

Apport des éléments traces métalliques des eaux de la mine souterraine de Kipushi à la rivière Kafubu (RD Congo)

[Contribution of trace metals in water from the underground mining of Kipushi in Kafubu river (DR Congo)]

Muyumba Nonga Welcome¹, Kapasi Kambuyi Victor¹, Kalonda Mutombo Emery², Mbayo Kitambala Marsi², Tshisand Tshibwid Patrick², Chipeng Kayemb François³, Ngoy Kihuya Edward¹, and Lumbu Simbi Jean Baptiste²

¹Laboratoire de chimie, Département de Chimie-physique, Section sciences Exactes, Institut Supérieur Pédagogie de Lubumbashi, Lubumbashi, RD Congo

²Laboratoire des substances naturelles, Département de Chimie, Faculté des Sciences, Université de Lubumbashi, Lubumbashi, RD Congo

³Laboratoire de Biologie, Département de Biologie-Chimie, Section sciences Exactes, Institut Supérieur Pédagogique de Lubumbashi, Lubumbashi, RD Congo

Copyright © 2016 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: This study aims to evaluate the metal pollution levels after water from the underground mine Kipushi located south of the Democratic Republic of Congo in the Kafubu River. To achieve this, the waters were sampled at three sampling campaigns (February, March and April of 2012) from the drain into the Katapula Kafubu River downstream of the confluence with the river Kipushi. It has been shown that cadmium and zinc values at 83.3% and 66.7% respectively were higher than those of the standard set by the European Union and 16.7%, 66.7% are higher as the Mining Regulations of the Democratic Republic of Congo for liquid effluents. Moreover, these high levels could pose health risks to the local population of Kafubu River. Our results serve as a warning bell to national environmental policies to protect the people living in a mining environment.

KEYWORDS: Effluent, pollution, environment, runoff and population.

RESUME: Cette étude a pour objet l'évaluation du taux de pollution métallique issue des eaux de la mine souterraine de Kipushi située au Sud de la République Démocratique du Congo dans la rivière Kafubu. Pour y parvenir, des prélèvements d'eaux ont été effectués au cours de trois campagnes d'échantillonnage (février, mars et avril de l'année 2012) à partir du drain Katapula jusque dans la rivière Kafubu en aval de la confluence avec la rivière Kipushi. Il a été démontré que les valeurs de cadmium et de zinc respectivement à 83,3 % et 66,7 % sont plus élevées que celles de la norme fixée par l'Union Européenne et 16,7 %, 66,7 % de ces mêmes métaux sont plus élevées que celles du Règlement Minier de la République Démocratique du Congo pour les effluents liquides. Par ailleurs, ces teneurs élevées pourraient constituer des risques sanitaires pour la population riveraine de la rivière Kafubu. Nos résultats serviront de sonnette d'alerte aux politiques environnementales nationales visant à protéger les populations riveraines dans un environnement minier.

MOTS-CLEFS: Effluent, pollution, environnement, ruissellement et population.

1 INTRODUCTION

La pollution de l'environnement, plus particulièrement du sol et des eaux de surface des villes minières du Katanga par les effluents industriels ne date pas d'aujourd'hui [1,2]. Ces dernières années, le spectre de la pollution de la Kafubu, continue à accroître suite aux activités des industries minières très florissantes et de l'exploitation artisanale des substances minérales étendue sur toute sa longueur. En effet, la rivière Kafubu sert de déversoir pour les eaux d'exhaure de la mine souterraine de Kipushi et celles usées de certaines usines métallurgiques de ladite cité minière [3]. En République Démocratique du Congo (RDC), la contamination métallique des écosystèmes a attiré l'attention de nombreux chercheurs [3,4,5,6,7,8,9].

Muteba et ses collaborateurs (2011) ont effectué ses études pendant que les eaux résiduelles d'une entreprise minière à Kipushi, en même temps que celles d'exhaure de la mine se déversaient dans la Kafubu. Ils ont démontré que l'arsenic et les cyanures, polluants toxiques, ont tué les poissons massivement pour la situation du 25 avril 2011. Par ailleurs, nous avons évalué la qualité chimique de l'eau de cette rivière à l'arrêt du fonctionnement de cette entreprise. Cette eau constitue en effet, l'un des aspects de la pollution le plus menaçant pour ces milieux. Par ses effets néfastes, elle pourrait engendrer des situations dangereuses et critiques notamment la perte de toute vie aquatique, l'intoxication métallique de la population riveraine affectant parfois l'équilibre écologique de ces écosystèmes [10]. La pollution due aux rejets des usines hydrométallurgiques constitue un problème d'actualité qui préoccupe toutes les régions soucieuses de maintenir leur patrimoine hydrique à un haut degré de qualité. Cette préoccupation touche la province du Katanga, située au Sud de la RDC où une importante activité minière est menée depuis des années [3]. L'accumulation des contaminants métalliques dans les organismes aquatiques présente des effets toxicologiques sur les espèces, les écosystèmes et les risques sanitaires par l'ingestion d'espèces comestibles [11,12].

L'objectif de cette étude est de déterminer l'impact des eaux de la mine souterraine de Kipushi déversées dans la rivière Kafubu sur la qualité chimique de ses eaux. Pour y parvenir, quelques échantillons d'eau susceptibles de contenir des éléments traces métalliques entraînés par les eaux de la mine souterraine de Kipushi à partir du drain Katapula jusque dans la rivière Kafubu ont été récoltés et analysés.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 ECHANTILLONNAGE

La cité minière de Kipushi se situe au Sud de la République Démocratique du Congo, à 600 mètres de la frontière zambienne et à 30 kilomètres au Sud-Ouest de la ville de Lubumbashi. Le climat de Kipushi, comme celui du parcours du Katanga méridional est du type tropical. Il est caractérisé par deux saisons, à savoir : une saison de pluie et une saison sèche. La cité minière de Kipushi appartient au bassin de la Kafubu. Plusieurs ruisseaux prennent leur source à moins d'un kilomètre de la mine souterraine découlant vers le Sud-Ouest et se déversent dans la rivière Kafubu [3].

2.2 ECHANTILLONNAGE

Dans cette étude, les sites de prélèvement sont situés principalement dans la vallée de la rivière Kipushi. Ces sites ont été fixés par rapport aux sources probables de modification de concentrations en éléments traces métalliques des eaux de la mine souterraine de Kipushi. L'échantillonnage des eaux à analyser a été réalisé en six points choisis de manière à mettre en évidence le potentiel polluant de l'effluent liquide et son impact dans la rivière Kafubu. Les prélèvements des échantillons ont été effectués au cours de trois campagnes aux mois de février, mars et avril 2012. Ainsi nous avons les points de prélèvements (figure 1) :

- E1, situé à environ 2 km de Kipushi en amont de la deuxième digue et est constitué des eaux de la mine souterraine ;
- E2 est également situé à plus ou moins 2 km de Kipushi en amont de la deuxième digue dans la rivière Kipushi et est constitué d'un mélange des eaux de ruissellement domestique et celle de la rivière Kipushi ;
- E3, situé à environ 3 km de Kipushi en aval de la troisième digue et est constitué du mélange de E1 et E2 ;
- E4, situé à environ 3,5 km de Kipushi dans la rivière Kipushi au niveau du pont Kipushi dans la chefferie Kaponda. A ce niveau, les eaux de la rivière Kipushi s'ajoutent à celles du ruisseau Kaniamesha ;
- E5, situé à environ 4 km de Kipushi dans la rivière Kafubu en amont de la confluence de la rivière Kipushi et Kafubu au niveau du pont Kafubu ;
- E6, situé à environ 4 km de Kipushi dans la rivière Kafubu en aval de la confluence de la rivière Kipushi.

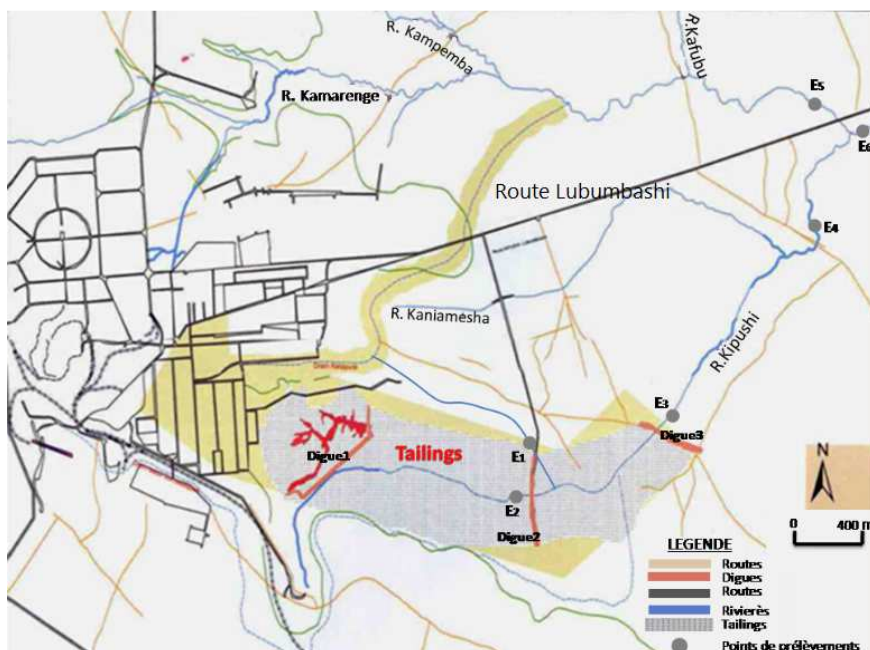


Figure 1. Localisation des points de prélèvement du sol sur notre site

2.3 MODE DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS

Le rythme des prélèvements des échantillons est d'une fois par mois c'est-à-dire le 29/02/2012, le 29/03/2012 et le 28/04/2012. Les prélèvements s'effectuaient assez loin des rives dans le sens contraire du courant d'eau en nous servant d'un bidon stérilisé en plastique. Ils se réalisaient dans le courant principal du canal principal. Les échantillons prélevés étaient conservés dans des flacons stérilisés en polyéthylène de 500 ml. Le prélèvement et la conservation des échantillons sont délicats compte tenu des teneurs faibles en éléments. Les échantillons prélevés sont alors déposés au laboratoire pour analyse dans les 24 heures qui suivent le prélèvement.

2.4 MESURE DES PARAMÈTRES CHIMIQUES

L'acidité a été mesurée à l'aide d'un pH-mètre de marque Mettler Doledo. Les éléments minéraux ont été dosés par spectrométrie d'émission à l'aide d'un spectromètre ICP couplé à un spectromètre de masse de marque Perkin Elmer Sciex au laboratoire du Centre de Recherche Agro-Alimentaire de Lubumbashi.

3 RESULTATS

3.1 ACIDITÉ DES EAUX

Les valeurs de pH des échantillons d'eau pour tous les six points de prélèvement sont légèrement basiques et comprises entre 7,01-7,82 (tableau 1).

Tableau 1. Résultats des mesures de pH des eaux

Mois	pH						N.U.E.	R.M.
	E1	E2	E3	E4	E5	E6		
Février	7,05	7,21	7,30	7,39	7,24	7,27	6,5-9	6-9
Mars	7,10	7,01	7,39	7,51	7,40	7,01		
Avril	7,12	7,21	7,82	7,72	7,78	7,01		
\bar{X}	7,09	7,27	7,47	7,54	7,47	7,10		

N.U.E. : Norme Union Européenne ; R.M. : Règlement Minier

3.2 ÉVALUATION DES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES

Les analyses chimiques ont été faites dans le but de déterminer leurs teneurs en polluants métalliques notamment le plomb, le cadmium, le zinc, le cuivre, le cobalt et l'arsenic. Les résultats des analyses (tableau 2 ; tableau 3 et tableau 4) sont présentés en raison d'un prélèvement par mois et par site prévu dans notre plan d'échantillonnage. Les résultats ont permis de mettre en évidence les paramètres métalliques pour les trois mois d'étude.

Tableau 2. Teneurs en ETM (mg/L) des eaux pour le mois de février

ETM	N.U.E.	R.M.	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Plomb	< 0,050	0,600	0,034	< 0,001	0,018	0,044	0,014	0,027
Cadmium	< 0,005	0,100	0,167	0,009	0,105	0,061	0,004	0,040
Zinc	< 5,000	1,000	237,9	7,514	76,12	43,38	5,211	32,62
Cuivre	< 1,000	0,300	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Cobalt	< 1,000	-	0,264	0,126	1,321	0,985	0,132	0,618
Arsenic	< 0,050	1,000	0,004	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,001	< 0,001

Pour le mois de février (tableau 2), il a été constaté que les teneurs en zinc, cobalt et cadmium dépassent celles de la norme pour certains échantillons avec comme valeurs très élevées successivement 237,9 mg/L, 1,321 mg/L et 0,167 mg/L.

Tableau 3. Teneurs en ETM (mg/L) pour le mois de mars

ETM	N.U.E.	R.M.	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Plomb	< 0,050	0,600	0,011	< 0,001	0,013	0,017	0,003	0,006
Cadmium	< 0,005	0,100	0,113	0,004	0,077	0,049	0,003	0,037
Zinc	< 5,000	1,000	1322	30,50	547,5	352,9	26,06	315,0
Cuivre	< 1,000	0,300	< 0,001	0,055	< 0,001	< 0,001	0,018	< 0,001
Cobalt	< 1,000	-	0,118	0,053	0,542	0,432	0,093	0,269
Arsenic	< 0,050	1,000	0,017	< 0,001	0,019	0,023	< 0,001	0,010

N.U.E. : Norme Union Européenne ; R.M. : Règlement Minier
Les valeurs en caractère gras sont au-dessus des normes.

Les résultats du mois de mars (tableau 3) montrent que seuls le cadmium et le zinc ont des teneurs supérieures à celles de la norme de l'Union Européenne et à celles du Règlement Minier congolais avec des valeurs les plus élevées respectivement : 0,113 mg/L et 1,322 mg/L.

Tableau 4. Teneurs en ETM (mg/L) pour le mois d'avril

ETM	N.U.E.	R.M.	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Plomb	< 0,050	0,600	0,003	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,001
Cadmium	< 0,005	0,100	0,047	0,007	0,030	0,025	0,006	0,019
Zinc	< 5,000	1,000	0,055	0,166	0,015	0,069	0,049	0,052
Cuivre	< 1,000	0,300	0,007	0,023	0,012	< 0,001	0,005	0,004
Cobalt	< 1,000	-	0,239	0,08	0,349	0,278	0,072	0,193
Arsenic	< 0,050	1,000	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

N.U.E. : Norme Union Européenne ; R.M. : Règlement Minier
Les valeurs en caractère gras sont au-dessus des normes.

Au mois avril (tableau 4), les teneurs du zinc dans tous les échantillons dépassent celle de la norme de l'Union Européenne et celles du Règlement Minier congolais avec la valeur la plus élevée : 1322 mg/L rapport. Il apparaît clairement que le cadmium est le seul métal qui a des valeurs qui excèdent celles des normes l'Union Européenne et celles du Règlement Minier congolais pour le mois d'avril. Il est le seul métal qui a des valeurs au-dessus des normes de l'Union Européenne et celles du Règlement Minier congolais pour tous les trois mois d'étude.

En général pour les trois mois d'étude, les teneurs des ETM pour E3 sont moyennes, car résultent du mélange de E1 et E2. Nous avons constaté que la teneur en cobalt (1,321 mg/L) (tableau II), n'exprime pas la moyenne de E1 (0,264 mg/L) et E2 (0,126 mg/L) qui sont le rapport de 2/1 presque. Les teneurs dans la rivière Kafubu (E6) augmentent, par ajout de certaines ETM de la rivière Kipushi (E4) par rapport aux teneurs en amont (E5). La rivière Kipushi draine les eaux de la mine souterraine de Kipushi. De tous les points de prélèvement, c'est E1 en général qui a à chaque fois la teneur la plus élevée.

4 DISCUSSION

Pour les échantillons du site étudié, les valeurs du pH des eaux, comprises entre 7,01-7,82, sont conformes à la norme de l'Union Européenne et du Règlement Minier. La faible basicité des eaux pourrait être due au fait de la présence de certains minéraux dans la roche permettant une neutralisation naturelle in situ de l'activité de l'eau. Par ailleurs, le pH joue un rôle important dans l'adsorption des métaux. En effet, un pH alcalin limite le passage des métaux de la phase solide à la phase aqueuse [13].

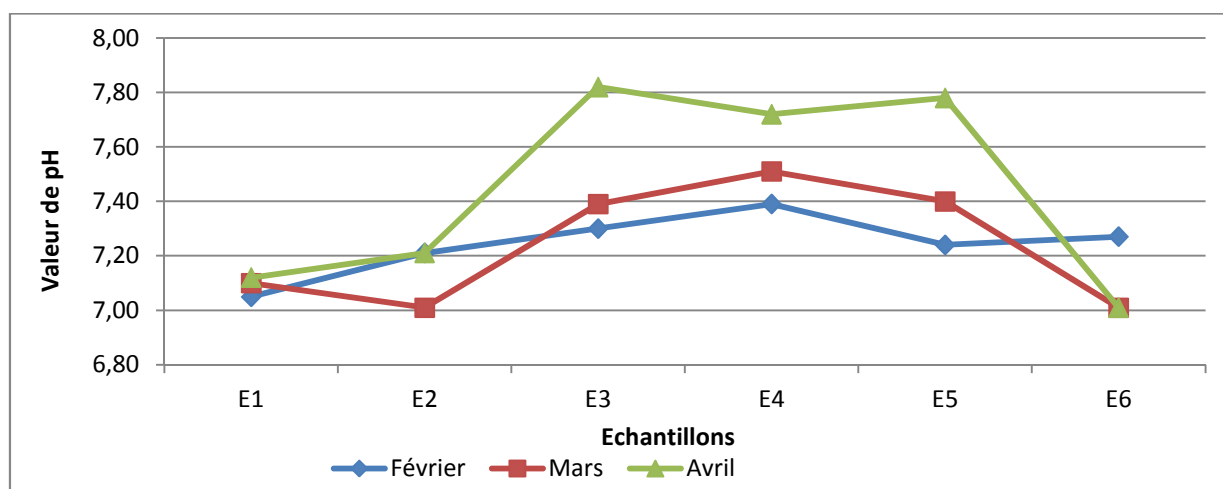


Figure 2. Evolution des pH dans les échantillons durant la période de prélèvement

Les valeurs du pH trouvées induisent une augmentation du taux d'adsorption des éléments traces dans les sédiments superficiels. Le piégeage des éléments traces n'est pas forcément définitif. Les risques de remobilisation, de biodisponibilité et donc de toxicité sont à craindre. Ils constituent en effet un danger permanent pour l'écosystème aquatique lorsque les conditions physico-chimiques le permettent [14], notamment dans la chaîne trophique [15].

En outre, nos résultats ont montré que sur l'ensemble des six échantillons prélevés au mois de février, les teneurs en zinc, cadmium et cobalt sont respectivement 100 %, 83,3 %, et 16,7 % supérieures à celles des normes de l'Union Européenne alors que pour le Règlement Minier les teneurs en cadmium et zinc sont respectivement 33,3 % et 100 % supérieures à celles du Règlement Minier.

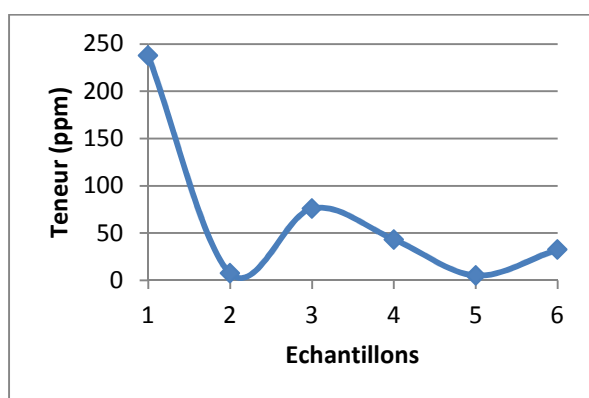


Figure 3. Evolution de la teneur de zinc dans les échantillons au mois de février

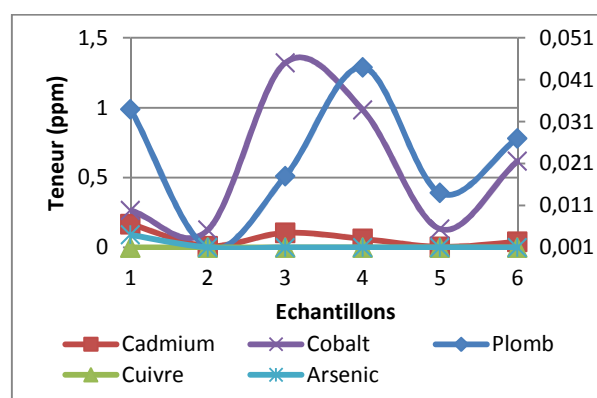


Figure 4. Evolution de la teneur des autres métaux dans les échantillons au mois de février

A la sortie de la digue 3 (E3) du mois de février, la teneur du cobalt (1,321 mg/L) à la sortie du bassin a augmentée d'une façon anormale comparativement aux deux teneurs qui entrent dans ce même bassin (E1 0,264 mg/L et E2 0,126 mg/L) et ces résultats corroborent ceux de [3] et ses collaborateurs qui, en 2011, ont informé qu'il y avait soit une augmentation, soit une diminution des teneurs à la sortie de la digue 3 comparativement aux teneurs à l'entrée. Les fluctuations des teneurs à la sortie de la digue 3 résultent du fait que le déversement irrégulier des effluents industriels dans le bassin de décantation, comme cela se présente dans la pratique, a un effet perturbateur de teneur en ETM [16]. En principe, le mélange de deux solutions de concentrations différentes produit une nouvelle solution de concentration intermédiaire. Les surcharges brutales dues à la précipitation qui en résultent inhibent très souvent et complètement le rôle des bassins de décantation ou le compromettent fortement [16].

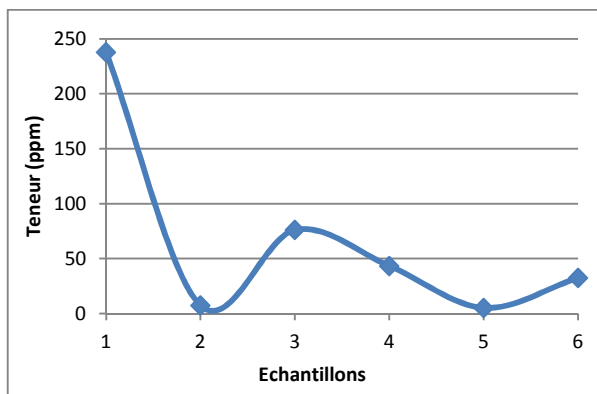


Figure 5. Evolution de la teneur de zinc dans les échantillons au mois de Mars

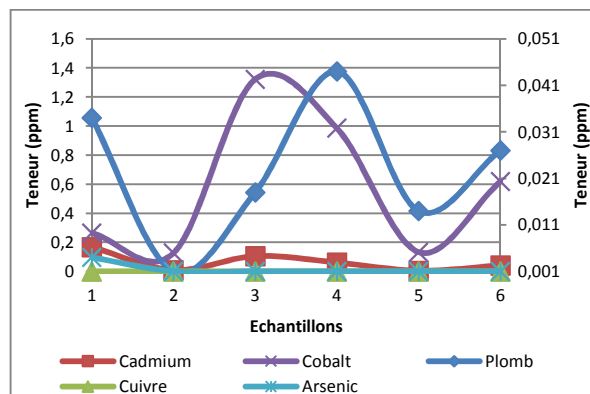


Figure 6. Evolution de la teneur des autres métaux dans les échantillons au mois de Mars

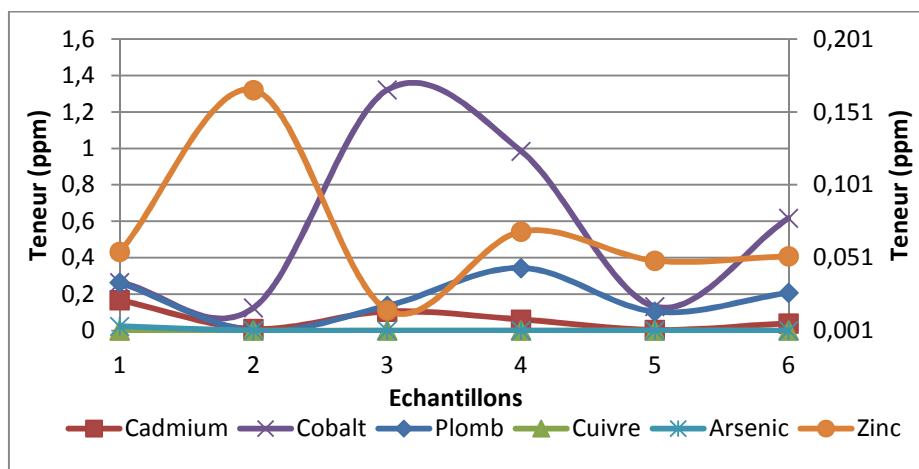
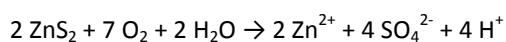


Figure 7. Evolution de la teneur de zinc dans les échantillons au mois d'Avril

Les eaux d'infiltration du bassin de décantation pourraient être aussi la cause de fortes teneurs en ETM des eaux souterraines proches de la mine de Kipushi (moins de 3 km). C'est ainsi que, dans le cas de nos résultats nous ajoutons l'effet du déversement des eaux de pluie qui entraînent les particules solides des bassins de décantation de rejets (Tailings). Cela s'explique par le fait que le mois d'avril marque la fin de la saison de pluie à Kipushi, les teneurs en zinc sont sensiblement diminuées E1 (0,055 mg/L). Ces eaux provoquant un lessivage puis chargées des ETM débordant les deux premières digues jusqu'à atteindre le drain Katapula évacuant les eaux de la mine souterraine de Kipushi [3],[7].

La mine souterraine de Kipushi étant cuprozincifère, l'oxydation des minéraux sulfureux [17] des sédiments par l'intrusion de l'oxygène dans ces nappes libère les métaux et pourrait contaminer les eaux souterraines selon le mécanisme de la réaction suivante :



Nos résultats montrent qu'en général l'apport minéral des eaux de la mine souterraine de Kipushi augmente les teneurs en ETM dans la rivière Kafubu pour les trois mois d'étude sauf au mois d'avril où le cuivre qui, à l'état de trace, diminue dans la rivière Kafubu (de E5 : 0,005 mg/L à E6 : 0,004 mg/L). Cela pourrait être dû au phénomène de la dilution.

Au mois de mars, les teneurs en cadmium et en zinc sont à 66,7 % et à 100 % respectivement supérieures à celles des normes de l'Union Européenne alors que 16,7 % et 100 % des teneurs respectivement en cadmium et en zinc sont supérieures à celles du Règlement Minier. Au mois d'avril il n'y a que les teneurs en cadmium qui dépassent à 100 % celles des normes de l'Union Européenne et aucune valeur en ETM ne dépassent celles du Règlement Minier.

Les teneurs très faibles du cuivre (0,055 mg/L ; 0,018 mg/L ;...) parfois inquantifiables même par l'appareil utilisé (< 0,001 mg/L) dans le ruissellement des eaux de la mine souterraine cupro-zincifère de Kipushi, seraient dues au fait que le cuivre est très peu soluble de tous les métaux de la quatrième période de la classification (cobalt, cuivre, zinc, nickel, titane, scandium, vanadium, chrome, manganèse et fer) [18]. Le cadmium contamine notre site d'étude pour les trois mois d'étude.

Les activités d'exploitations artisanales du cuivre et cobalt dans la vallée de la rivière Kipushi seraient aussi responsables de fortes concentrations en ETM dans les eaux de surfaces, puisque les effluents chargés de métaux et la lixiviation des résidus solides provenant des activités d'extraction minière déversent directement dans l'environnement et dans les rivières des ETM. L'aval de la confluence de la rivière Kafubu avec la rivière Kipushi (E6) met en évidence cet enjeu environnemental. Nous référant à la mort massive des poissons [3], nous pensons qu'il y a de réels risques de contamination métallique de la population riveraine de la rivière Kipushi ainsi que celle de la rivière Kafubu via la consommation d'eau.

5 CONCLUSION

La présente étude a permis de mettre en évidence quelques ETM apportés par le ruissellement des eaux de la mine souterraine de Kipushi dans la rivière Kafubu, susceptibles d'être responsable de la pollution de celle-ci.

Le site étudié a présenté les valeurs de pH légèrement basiques, il faudrait craindre une remobilisation des métaux lors des changements physico-chimiques.

Les résultats obtenus dans ce travail ont permis de procéder à une évaluation de la pollution métallique de l'eau de la rivière Kafubu dans sa partie environnante de la mine souterraine de Kipushi.

Ces résultats ont montré que les teneurs de cadmium sont relativement élevées dépassant la valeur de la norme fixée par l'Union Européenne dans le parcours de ces eaux jusque dans la rivière Kafubu durant les trois mois. Pour les deux premiers mois, les teneurs en zinc ont dépassé largement les normes de l'Union Européenne et du Règlement Minier. Par conséquent, l'utilisation de ces eaux pourrait avoir des effets négatifs sur la santé de la population. C'est ainsi que l'eau de la rivière Kafubu devrait être évitée pour l'irrigation agricole à cause de ses concentrations en ETM élevées. En général, les teneurs en ETM diminuent au fur et à mesure qu'il y a absence de la pluie à cause de l'instabilité tant chimique que physique des tailings qui, chargés des ETM sont entraînés dans le ruissellement des eaux de la mine souterraine de Kipushi via le drain Katapula.

REFERENCES

- [1] SNC-Lavalin International, "Etude sur la restauration des mines de cuivre et de cobalt en République Démocratique du Congo," Rapport préliminaire M-6708 (609082), Montréal, pp. 5-14, 2003.
- [2] W. Vande, J. Franssen, G. Kalambay, J.D. Kramkimel et D. Musibondo, "Profil environnemental de la République Démocratique du Congo," Rapport provisoire, contrat no. 2005/105393-Version 1, p. 42, 2005.
- [3] L.J.P. Muteba, F.K. Nyembo, T.B.M. Tambwe et S.M. Mwadiavinta, "La pollution de la rivière Kafubu : Mayi ni uzima," Rapport d'enquête, no. 1 ; Lubumbashi ; pp. 31-54, 2011.
- [4] M. Lootens and S. Lumbu, "Suspended sediment production in a suburban tropical basin (Lubumbashi, Zaïre)," *Journal des Sciences Hydrologiques*, 31(1), pp. 39-49, 1986.
- [5] M. Kisanguka, N. K. Kasongo, I. Lunda, M. Kyanda, L.N.K. Nyembo, S. Lumbu et M. Musoga, "Etude de la pollution industrielle des eaux de bassin Zaïrois du fleuve Zaïre dans le Cooperbelt Zaïrois," *Annales de la faculté des sciences*, vol. 5, pp. 127-134, 1989.
- [6] L.N. Banza, "Gestion des déchets plombifères et cadminifères dans la ville de Lubumbashi : Une menace à la survie de l'espèce humaine," Mémoire d'études supérieures, Ecole de santé publique, Faculté de médecine, Université de Lubumbashi, pp. 25-27, 2003.
- [7] S.W. Kitobo, "Dépollution et valorisation des rejets miniers sulfurés du Katanga : cas des tailings de l'Ancien Concentrateur de Kipushi," Thèse de doctorat, Faculté des sciences appliquées, Université de Liège, Belgique, pp. 7-42, 225, 2009.

- [8] K.F. Chipeng, "Etude d'une espèce tolérante au cuivre : *Haumaniastrum katangense*-Mise au point de sa culture et étude des mécanismes de tolérance," Thèse de doctorat, Département de Gestion des Ressources Naturelles, Faculté des Sciences Agronomiques ; Université de Lubumbashi, RD Congo, p. 7, 2010.
- [9] M. Kisanguka, "La perception de la pollution de l'eau par les riverains de la rivière Kafubu," Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA), Ecole de Sante Publique, Faculté de médecine, Université de Lubumbashi, RD Congo, pp. 35-44, 2010.
- [10] M. Makhoukh, M. Sbaa, A. Berrahou et M. Vanclooster, "Contribution à l'étude de l'impact d'un site minier abandonné dans la haute Moulouya sur la qualité de l'Oued Moulouya, Maroc," *Afrique Sciences*, 7(3), pp. 34-48, 2011.
- [11] M.A. Pétré, "Etude de la spéciation des métaux dissous en seine, relation avec le pH et la matière organique dissoute," Mémoire de master 2, Université Pierre et Marie Curie, Ecole des mines de Paris et Ecole National du Génie Rural et des Eaux et Forêts, France, p 46, 2008.
- [12] Y.H.A. Yapi, B.K. Dongui, A. Trokourey, Y.S.S. Barima, Y. Essis et P. Atheba, "Evaluation de la pollution métallique des eaux souterraines et de surface dans un environnement minier aurifère à Hiré (Côte d'Ivoire)," *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 8(3), pp. 1281-1289, 2014.
- [13] I. Thornton, "Risk assessment related to metals : the role of the geochemist," Report of the International Wordshop on Risk Assessment of Metals and their Inorganic Compound ; *International Council on Metals and the Environment*, Angers, France, 1996.
- [14] M. François, D. Li, H.C. Dubourguier et F. Douay, "Facteurs déterminants de la mobilité (Pb, Cu, Zn) dans les sols contaminés autour de deux usines métallurgiques du Nord de la France," Journées Nationales de l'étude des sols, du 22-24 octobre, Orléans, 2002.
- [15] F. Fadil, A. Maarouf et A. Zaid, "Utilisation de *Gammarus gauthieri* pour tester la toxicité des sédiments des eaux douces, *Limnol*, 32: pp. 73-78, 1997.
- [16] E. Koller, "Traitement des pollutions industrielles : eau, air, déchets, sols, boues," Dunod, Paris, pp. 1-11, 21, 34, 2004
- [17] N. Miramond, D. Miau et F. Brochard, "Diagnostic du phénomène Drainage Minier Acide sur des mines d'or primaire en Guyane françaises : Evaluation des risques associés," Rapport, GEM Impact DIREN, Guyane française, 2006.
- [18] S. Housecroft, "Chimie inorganique," 3^{ème} édition, Ed. De Boeck s.a., Bruxelles, pp. 686-688, 2010.