

Évaluation de la qualité des sols sur un site minier du Copperbelt Congolais: Mise en évidence de la pollution d'origine minière

[Assessment of soil quality on a mining site in the Congolese Copperbelt: Demonstration of pollution from mining]

Arthur Kaniki Tshamala¹, Jean-Noël Mputu Kanyinda^{2,3}, and Jean-Marie Kanda Ntumba¹

¹Département de Chimie Industrielle, Faculté Polytechnique, Université de Lubumbashi, RD Congo

²Département de Chimie et Industrie, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, RD Congo

³Département de Géologie Appliquée, Faculté Polytechnique, Université de Mons, Belgium

Copyright © 2021 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 concerns the assessment of the soil quality of a mining site in the Congolese Copperbelt (Democratic Republic of Congo) with the aim of identifying possible pollution from mining. The site concerned is in Kipushi in the southwest of the city of Lubumbashi and has been the subject of mining since 1924 before being shut down in 1993. The methodology adopted consisted of a sampling campaign and in-situ measurements followed by chemical analyzes in the laboratory. The samples were taken using hand augers to a depth between 0 and 30 cm, the permeability was determined by means of percolation test by the constant level method or the Porchet method and the analyzes Elemental chemicals were performed by atomic absorption spectrometry. Regarding the pH, the results obtained indicate that the soil is acidic in several places and therefore has a great capacity to mobilize ETM. From the point of view of agronomic value, the results show that on the whole site, the soil is poor in organic matter (OM); the average value is 1.64% which reflects an extremely low bacterial activity. As for the elemental chemical composition, the results obtained indicate significant concentrations of trace metal elements (TME) attributable to the mining activity developed on the site for nearly 70 years. These are: Fe (23,400 - 88,300 ppm), Cd (100 - 1,400 ppm), Co (100 - 6,600 ppm), Cu (9,700 - 60,800 ppm), Pb (100 - 19,400 ppm) and Zn (22,400 - 108,100 ppm).

KEYWORDS: assessment, quality, soils, mining site, Congolese Copperbelt, mining pollution.

RESUME: Cette étude porte sur l'évaluation de la qualité des sols d'un site minier du Copperbelt congolais (République Démocratique du Congo) dans le but d'identifier une éventuelle pollution d'origine minière. Le site concerné est situé à Kipushi au Sud-Ouest de la ville de Lubumbashi et a fait l'objet d'une exploitation minière depuis 1924 avant de connaître l'arrêt en 1993. La méthodologie adoptée a consisté en une campagne d'échantillonnage et des mesures in-situ suivies des analyses chimiques au laboratoire. Le prélèvement d'échantillons a été réalisé à l'aide des tarières à main sur une profondeur comprise entre 0 et 30 cm, la perméabilité a été déterminée au moyen de test de percolation par la méthode à niveau constant ou méthode de Porchet et les analyses chimiques élémentaires ont été réalisées par spectrométrie d'absorption atomique. En ce qui concerne le pH, les résultats obtenus indiquent que le sol est acide à plusieurs endroits et présente par conséquent une grande capacité de mobiliser les ETM. Du point de vue de la valeur agronomique, les résultats montrent que sur l'ensemble du site, le sol est pauvre en matière organique (MO); la valeur moyenne est de 1,64% ce qui traduit une très faible activité bactérienne. Quant à la composition chimique élémentaire, les résultats obtenus indiquent des concentrations importantes en éléments trace métallique (ETM) attribuables à l'activité minière développée sur le site depuis près de 70 ans. Il s'agit de: Fe (23.400 – 88.300 ppm), Cd (100 – 1.400 ppm), Co (100 – 6.600 ppm), Cu (9.700 – 60.800 ppm), Pb (100 – 19.400 ppm) et Zn (22.400 – 108.100 ppm).

MOTS-CLEFS: évaluation, qualité, sols, site minier, Copperbelt Congolais, pollution minière.

1 INTRODUCTION

Le sol est formé de constituants solides (minéraux et organiques) et de pores renfermant des constituants liquides et gazeux. Les constituants minéraux proviennent majoritairement de la désagrégation de la roche mère, des végétaux et d'apports par l'homme. Parmi ces composés minéraux des sols on trouve avant tout les silicates, mais aussi des substances nutritives inorganiques; les cations Ca^{+2} , Mg^{+2} , et K^{+} ainsi que les nitrates et les phosphates qui sont d'une grande importance pour les plantes. Quant aux constituants organiques, en proportion très faible (environ 5%), ils proviennent des organismes présents dans le sol ou apportés au sol par les végétaux et les animaux, alors que les constituants gazeux contenus dans les cavités du sol peuvent provenir de l'air extérieur, de la vie des organismes et de la décomposition des matières organiques (Joseph KOUAKOU KOUASSI and TAHRI. 2012; Adriano 1986).

Le sol, en général, constitue l'espace de vie pour les hommes, les animaux, les plantes et les microorganismes. Il accumule et met à leur disposition la plupart des éléments indispensables à la vie (air, eau, éléments nutritifs...). A côté de sa fonction alimentaire, le sol peut également constituer un filtre environnemental efficace en épurant l'eau qui le traverse de divers polluants pouvant contaminer la chaîne alimentaire et les nappes souterraines (Lemière B. 2008; Gbago Onivogui 2013; Abou Traore 2014; Bouafia 2016). Le sol agricole, quant à lui, remplit trois rôles: un rôle physique (support des racines des plantes), un rôle chimique (nutrition minérale des végétaux) et un rôle biologique (maintenance des activités bactériennes) (Jean-Michel Gobat 2017; Andrés Rodríguez-Seijo 2017). Cependant les activités humaines et industrielles peuvent modifier considérablement la qualité du sol et constituer par conséquent des effets néfastes pour les hommes, les animaux, les plantes et les microorganismes. Selon Lee et al. (Churl Gyu Lee 2001), l'exploitation minière est l'une des plus importantes sources de métaux lourds dans l'environnement. Les opérations minières d'extraction et de broyage, la concentration de minerais et l'évacuation de résidus, constituent des sources majeures de contamination de l'environnement (Adriano 1986). Par conséquent, des niveaux élevés de concentrations en métaux lourds peuvent être trouvés aux alentours des mines métallifères en raison de la décharge et la dispersion des déchets miniers dans les sols environnants, dans les cultures et les cours d'eau. Ils peuvent éventuellement présenter un risque potentiel pour la santé des résidents au voisinage de zones minières (Churl Gyu Lee 2001; Dinesh Kumar 2019; Fabio Fuentes-Gandara 2018).

Le degré de contamination est souvent évalué à partir des teneurs totales en éléments trace métallique (ETM) dans les couches du sol et dans cette approche de nombreuses études ont été entreprises dans divers pays, dont la République Démocratique du Congo, sur la contamination par les ETM des sols, des plantes, des eaux et des sédiments résultant de l'activité minière (Bamba Bukengu Muhaya 2016; Bamba Bukengu Muhaya 2017a; Bamba Bukengu Muhaya 2017b; Bamba Ousmane 2013). En ce qui concerne les ETM, suivant leur spéciation et en fonction des conditions locales, une fois dans le sol, ils peuvent « migrer » pour contaminer les aquifères, d'autres sols et/ou les eaux de surface, ou tout simplement se concentrer dans un ou plusieurs des milieux cités. Les modes de transports étant multiples, mais les plus importants sont: l'infiltration, le ruissellement et l'écoulement souterrain.

La figure 1.1 montre les différents scénarios possibles pouvant conduire à l'accumulation ou à la contamination des ressources par les ETM. On voit entre autres que le ruissellement des eaux de pluie à la surface d'une zone polluée (appelée source) peut convoyer les polluants dans l'infiltration souterraine, d'abord dans la zone non saturée sous-jacente, et ensuite percoler vers les nappes souterraines (Li Guo 2017; Lijun Wang 2017).

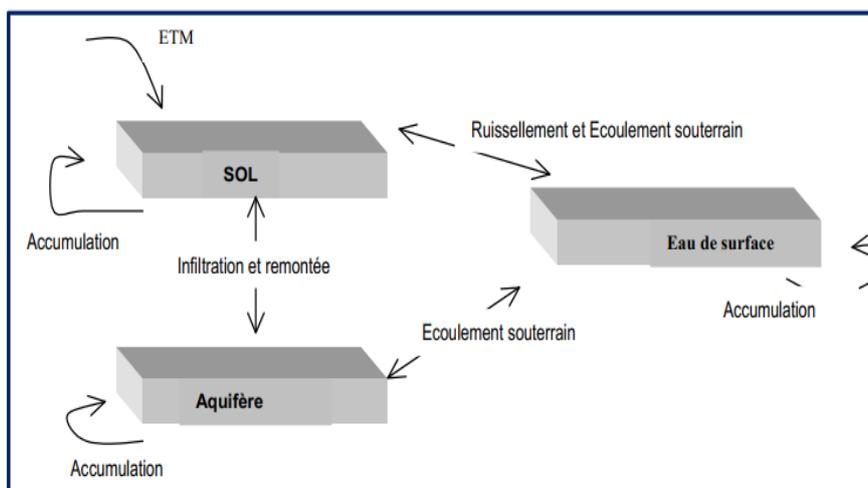


Fig. 1. Mécanismes de transport possibles conduisant à la contamination et/ou accumulation des ressources par les ETM

La dispersion aérienne, non mise en évidence sur la figure 1, suivie des retombées atmosphériques, est aussi l'un de scénarios possibles susceptibles de provoquer la contamination ou l'accumulation des polluants dans un milieu donné. La caractérisation du sol peut être faite afin de déterminer sa qualité à partir de son pH, sa porosité, sa masse volumique, son humidité, sa composition chimique, etc. (Bouafia 2016). En pédologie, le sol est caractérisé aussi par une structure en horizon. En plus de la caractérisation au laboratoire, la qualité du sol est connue par des levés et observations faits sur le terrain. A cet effet, on effectue des sondages (profondeur maximum 1,2 m) qui font l'objet d'une description selon certains critères (Jean-Michel Gobat 2017). La synthèse des observations permet de connaître la distribution spatiale des sols. L'appréciation des caractéristiques physiques et chimiques de chaque unité de sol permet ensuite de réaliser des cartes thématiques: carte de décapage du sol (projet d'exécution seulement), carte de classification de la valeur agronomique ou carte de sensibilité aux polluants (Matei Gheorghe 2019).

Le site minier concerné par cette étude est situé sur le copperbelt congolais à Kipushi, cité minière localisée à environ 30 km au Sud-Ouest de la ville de Lubumbashi en République Démocratique du Congo (RDC). Ce site a fait l'objet d'une exploitation minière depuis 1924 avant de connaître l'arrêt en 1993. La mine de Kipushi a été construite par l'Union Minière du Haut-Katanga qui l'a exploitée durant 42 ans avant que la Générale des Carrières et des Mines (Gécamines) n'en prenne le contrôle en 1967. De 1924 à 1993, la mine a produit un total de 6,6 millions de tonnes de zinc, 4 millions de tonnes de cuivre, 278 tonnes de germanium et 12.673 tonnes de plomb. En raison de facteurs économique et politiques, la Gécamines a dû, en 1993, la placer en régime de maintenance et entretien. Actuellement, la reprise des activités sur le site de Kipushi est assurée dans le cadre du projet Kipushi Corporation (KICO) résultant du partenariat entre le groupe Ivanhoe Mines et la Gécamines en vue d'exploiter en souterrain le gisement cupro-zincifère (Schneider 2007; Mpundu Mubemba Mulambi Michel 2013).

Il faut noter que pendant plus d'un siècle, l'exploitation minière en RDC s'est effectuée dans un contexte ne prenant pas en compte la protection de l'environnement. C'est seulement en juillet 2002 qu'une nouvelle loi minière a intégré des dispositions relatives à la protection de l'environnement avec l'obligation faite à l'exploitation de faire le suivi, entre autres, de la qualité des sols sur son site. D'où la nécessité de caractériser les anciens sites miniers afin d'évaluer leur impact sur l'environnement et les personnes vivant à proximité. Tel est l'intérêt de cette étude.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 ECHANTILLONNAGE ET CODAGE

Le prélèvement d'échantillons a été réalisé à l'aide des tarières à main de marque Eijkelkamp. A chaque point de prélèvement, plusieurs échantillons ont été prélevés, mélangés et homogénéisés de manière à constituer un seul échantillon composite représentatif du point considéré. Au total 24 échantillons ont été prélevés à une profondeur comprise entre 0 et 30 cm. Les échantillons de sols prélevés ont été séchés à l'air libre, broyés et tamisés à 2 mm. Une partie de la fraction supérieure à 2 mm a été ensuite broyée manuellement dans un mortier d'agate afin de la réduire en poudre (dizaine de micromètres) et d'homogénéiser la répartition des particules (Mpundu Mubemba Mulambi Michel 2013). En vue de donner la position géographique de différents points d'échantillonnage, la géolocalisation a été effectuée à l'aide du GPS Etrex Vista C Garmin. Ce GPS est constitué d'un boîtier Robuste, totalement étanche, muni d'un écran 256 couleurs, TFT haute résolution rétroéclairé. La localisation des points d'échantillonnage est présentée sur l'image aérienne de la figure 2.



Fig. 2. Localisation des points d'échantillonnage

2.2 PH, HUMIDITÉ ET MATIÈRE ORGANIQUE (M.O)

Le pH a été déterminé sur site et au laboratoire. Sur site, le pH a été déterminé à l'aide d'une trousse d'analyse du pH du sol de type Hanna Instruments, marque HI 99121. Et au laboratoire, le pH a été déterminé suivant la norme ISO 10390 (10390 2005). Deux suspensions 1/5 volumique ont été préparées; une à l'aide de l'eau (pH H₂O) et l'autre à l'aide du chlorure de potassium 1 M (pH KCl). Le pH H₂O est appelé acidité actuelle, active ou réelle. Dans ce cas, l'électrode ne mesure que les protons de la solution du sol, puisque aucun échange n'est effectué. L'acidité d'échange est évaluée par la mesure du pH KCl (Jean-Michel Gobat 2017). Dans ce cas, la solution de KCl est destinée à provoquer la délocalisation des H⁺ fixés, par échange avec le K⁺ en excès. En théorie, le pH H₂O est ainsi toujours un peu plus élevé que le pH KCl. L'humidité a été déterminée suivant la norme ISO 11465 (11464 1994) basée sur la perte de masse à 105°C. La teneur en matière organique a été déterminée aussi par perte de masse, mais à 450°C au bout de 24 heures.

2.3 DÉTERMINATION DE LA PERMÉABILITÉ

La perméabilité a été déterminée au moyen des tests de percolation par la méthode à niveau constant ou méthode de Porchet. Des trous cylindriques de 10 cm de profondeur ont été réalisés dans le sol et remplis d'eau claire afin de mesurer la vitesse à laquelle l'eau s'infiltré. La cellule de mesure qui permet de suivre l'évolution du niveau d'eau dans le temps est constituée d'un cylindre en PVC de 4,6 cm de diamètre. Plusieurs mesures sont faites et la moyenne calculée (Bouafia 2016).

2.4 ANALYSES CHIMIQUES ÉLÉMENTAIRES

Au laboratoire, les analyses chimiques élémentaires ont été réalisées par absorption atomique après une mise en solution par voie humide. L'appareil utilisé est le PG Instrument de marque AA500. Cet appareil est piloté par le logiciel AAWin 3 et possède les caractéristiques suivantes:

- Combinaison de la technique de flamme et four à graphite entièrement automatisé, rapide avec multimode séquentiel et analyse par élément;
- Système avec tourelle motorisé permettant de positionner 8 lampes à cathode creuse;
- Tête de brûleur en alliage de titane;
- Possibilité d'utilisation de nombreuses matrices: aqueuse, organiques, acides et alcalines;
- Système manuel pour hydrure avec régulateur Argon.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 PERMÉABILITÉ

Le tableau 1 donne les résultats de la mesure de perméabilité (K). La perméabilité (ou conductivité hydraulique) est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par l'eau, sous l'action d'un gradient hydraulique. Elle correspond au coefficient de proportionnalité de la loi de Darcy. C'est une caractéristique du matériau. Cependant, ce n'est pas une propriété intrinsèque de celui-ci, puisqu'elle est aussi dépendante du fluide. Elle est en effet proportionnelle à la masse volumique de ce fluide et inversement proportionnelle à sa viscosité μ . La détermination de la perméabilité est indispensable non seulement pour le calcul des paramètres hydrodynamiques mais aussi pour la définition du caractère percolant du matériau. Un matériau percolant a un drainage aisé qui peut conduire à un taux d'infiltration élevé. Un matériau peu percolant a un drainage très difficile (à la limite impossible) et peut être considéré comme un monolithe.

Tableau 1. Résultats de la mesure de la perméabilité des sols

Code du point de mesure	Perméabilité (m/sec)	Code du point de mesure	Perméabilité (m/sec)
A	$3,33.10^{-4}$	F3	$3,5.10^{-4}$
B	$1,67.10^{-4}$	F4	$2,4.10^{-4}$
C	$1,58.10^{-4}$	F5	$2,36.10^{-4}$
D1	$2,08.10^{-4}$	F6	$2,73.10^{-4}$
D2	$2,5.10^{-4}$	G1	$2,22.10^{-4}$
E1	$2,06.10^{-4}$	G2	$3,5.10^{-4}$
E2	$8,33.10^{-4}$	G3	$2,32.10^{-4}$
E3	$1,33.10^{-4}$	G4	$3,04.10^{-4}$
E4	$1,67.10^{-4}$	G5	$1,42.10^{-4}$
E5	$1,28.10^{-4}$	G6	$2,5.10^{-4}$
F1	$1,25.10^{-4}$	H1	$2,12.10^{-4}$
F2	$2,5.10^{-4}$	H2	$1,73.10^{-4}$

Lorsque la perméabilité est inférieure à 10^{-10} m/s, le matériau est tout simplement considéré comme imperméable. C'est le cas des massifs rocheux à faible porosité et des argiles non fissurés. Les très faibles valeurs de K (10^{-9} à 10^{-7} m/s) indiquent que le matériau est très faiblement perméable et que par conséquent le drainage est difficile. Ceci est rencontré dans le matériau rocheux à faible porosité, dans les limons compacts ou dans les argiles faiblement fissurées. Les faibles valeurs (10^{-7} à 10^{-5}) montrent une faible perméabilité qui induit un drainage lent. Cette situation est rencontrée dans les sables très fins, les sables limoneux, les limons peu compacts, les argiles très fissurées, les granites altérés, les schistes, les grès, etc. Le drainage est aisé lorsque la perméabilité est supérieure à 10^{-4} m/s. Les résultats présentés au tableau 1 montrent que l'ensemble du site est caractérisé par une valeur de perméabilité relativement élevée (car de l'ordre de 10^{-4} m/sec) ce qui induit un drainage aisé. C'est donc un site qu'il faut absolument contrôler car une infiltration des polluants dans ces zones atteindrait rapidement les formations souterraines avec le risque de polluer la nappe phréatique ou l'aquifère.

3.2 PH, HUMIDITÉ ET TENEUR EN MATIÈRE ORGANIQUE (MO)

Le tableau 2 donne les résultats de la mesure du pH, de l'humidité et de la teneur en Matière Organique (MO). Le pH renseigne sur la mobilité des ETM étant donné son interaction avec les phénomènes d'adsorption. La teneur en MO ainsi que l'humidité déterminent la valeur agricole du sol. Pour interpréter les résultats de mesure du pH on se réfère à la classification des sols en fonction de pH présentée au tableau 3. D'après cette classification, les sols du terrain échantillonné ont des pH extrêmement acides à faiblement alcalins; c'est-à-dire pH-H₂O compris entre 2,66 et 7,36. D'après ces résultats on peut constater qu'à plusieurs endroits du site le sol est acide et présente par conséquent une grande capacité de mobiliser les ETM. La valeur moyenne de pH sur l'ensemble du site est 5,87. A certains endroits le pH est extrêmement acide (pH compris entre 2,66 et 5). Le pH est neutre seulement à trois endroits; et la valeur maximale de pH observée est de 7,36.

Tableau 2. Résultats de la mesure du pH, de l'humidité et de la matière organique

Code du point de mesure	pH in situ	H ₂ O (%)	MO (%)
A	5,35	11,37	1,9
B	2,66	9,5	1,11
C	6,99	11,35	1,57
D1	6,67	10,32	1,14
D2	4,97	13,25	1,76
E1	6,75	5,88	4,89
E2	6,35	10,43	0,64
E3	6,84	7,53	0,44
E4	6,29	6,39	0,22
E5	6,15	6,18	2,37
F1	3,55	10,09	1,38
F2	4,9	10,66	0,88
F3	5,97	14,47	0,09
F4	6,15	16,79	0,16
F5	6	15,4	0,48
F6	5,95	14,94	0,27
G1	7	8,33	3,91
G2	6,05	12,08	3,75
G3	6,3	14,32	0,96
G4	6,7	11,47	2,4
G5	6,92	11,91	2,92
G6	2,66	13,13	1,29
H1	7,35	18,21	2,65
H2	7,19	12,72	2,14
Moyenne	5,87	11,53	1,66
Maximum	7,36	18,21	4,89
Minimum	2,66	5,88	0,09

Il existe une valeur de pH pour laquelle la charge de surface de solide est nulle; c'est le point de charge nulle (PCN) ou zéro point charge (ZPC) en anglais. Pour un pH inférieur au pH de PCN, la charge de surface du solide sera positive et les espèces anioniques en solution pourront être sorbées; pour un pH supérieur au pH de PCN, la charge de surface du solide sera négative et les espèces cationiques pourront être sorbées à la surface. Dans les conditions normales de pH pour un sol en place c'est à dire non excavé (pH compris entre 6 et 8), les phases minérales et organiques les plus communes (quartz, feldspaths, argiles, oxydes de Mn et matières organiques) ont une charge négative.

Tableau 3. Classification des sols en fonction du pH

N°	Classe de réaction du sol	pH-H ₂ O
1	Extrêmement acide	< 4,5
2	Très fortement acide	4,5 – 5,0
3	Fortement acide	5,1 – 5,5
4	Moyennement acide	5,6 – 6,0
5	Faiblement acide	6,1 – 6,5
6	Neutre	6,6 – 7,3
7	Faiblement alcalin	7,4 – 7,8
8	Moyennement alcalin	7,9 – 8,4
9	Fortement alcalin	8,5 – 9,0
10	Très fortement alcalin	> 9,0

Pour interpréter les résultats de l'analyse de la teneur en MO on se réfère à la classification des sols en fonction de la teneur en MO présentée au tableau 4. Les résultats du tableau 2 montrent que sur l'ensemble du site, en moyenne, les sols sont très pauvres; la valeur moyenne est de 1,66%. En trois endroits seulement on observe des valeurs supérieures à 3,5%. Plus d'une dizaine de points ont une teneur en MO inférieure à 2%.

Tableau 4. Classification des sols en fonction de la teneur en MO pour deux textures

Niveau	Texture légère	Texture lourde
	Sable à loam	Loam argileux à argile lourde
Très pauvre	0,0 - 2,0 %	0,0 - 2,0 %
Pauvre	2,1 - 3,5 %	2,1 - 4,5 %
Moyen	3,6 - 6,5 %	4,6 - 10,0 %
Riche	6,6 - 8,0 %	10,1 - 13,0 %
Très riche	> 8,0 %	> 13,0 %

3.3 ANALYSES CHIMIQUES ÉLÉMENTAIRES

Le tableau 5 donne les résultats des analyses chimiques élémentaires. Ces analyses montrent une concentration très importante en ETM. Les teneurs en Cd (100 – 1400 ppm), en Co (100 – 6600 ppm), en Cu (9700 – 60800 ppm), en Pb (100 – 194000 ppm) et en Zn (22400 – 108100 ppm) dépassent largement les concentrations moyennes admises suivant les valeurs de référence présentées au tableau 6 (0,35 ppm pour le Cd, 8 ppm pour le Co, 30 ppm pour le Cu, 35 ppm pour le Pb et 90 ppm pour le Zn).

Les dépassements sont très importants surtout en ce qui concerne le Cu, le Pb et le Zn. Pour ces éléments, les valeurs rencontrées sont parfois 5000 fois supérieures aux valeurs de référence. Même comparées aux valeurs habituellement rencontrées dans les sols du copperbelt africain, ces concentrations sont très élevées. Du point de vue de la législation, la République Démocratique du Congo ne dispose pas des valeurs de référence propres aux sols.

Tableau 5. Résultats des analyses chimiques élémentaires

Code du point de mesure	Eléments analysés (%)								K (ppm)
	Zn	Cu	Co	Fe	Mn	S _{Tot}	Pb	Cd	
A	4,27	6,08	0,02	8,54	0,04	7,72	0,01	0,1	3,8
B	2,53	3,22	0,01	8,76	0,01	14,67	15,85	0,03	2,1
C	3,03	2,78	0,06	8,21	0,01	15,00	14,22	0,02	2,0
D1	2,24	3,11	0,05	4,02	0,12	7,92	10,12	0,01	4,4
D2	3,42	1,5	0,01	4,37	0,05	13,3	17,89	0,01	2,7
E1	5,72	1,16	0,6	6,97	0,01	6,8	0,77	0,01	1
E2	3,06	0,97	0,01	4,63	0,01	0,00	0,13	0,01	1,2
E3	5,18	1,09	0,02	4,13	0,01	0,00	19,4	0,01	1,4
E4	3,25	1,21	0,01	4,68	0,01	1,53	9,83	0,01	2,8
E5	6,08	2,85	0,01	7,69	0,01	7,69	0,7	0,01	2,2
F1	7,62	3,00	0,01	2,98	0,01	0,00	0,01	0,01	2,4
F2	9,05	1,81	0,02	4,05	0,01	6,54	0,46	0,14	1,3
F3	8,06	2,04	0,01	3,64	0,01	1,81	0,01	0,01	3,0
F4	10,81	2,46	0,01	5,00	0,01	5,39	0,51	0,14	3,9
F5	6,38	4,05	0,01	4,05	0,03	7,32	0,83	0,01	5,4
F6	5,37	1,22	0,01	4,18	0,01	0,00	0,46	0,01	3,4
G1	3,84	1,64	0,01	2,34	0,01	0,00	0,14	0,01	3,7
G2	7,71	2,8	0,01	2,74	0,04	3,62	0,16	0,03	5,9
G3	8,97	4,19	0,01	7,10	0,01	7,25	0,01	0,01	2,4
G4	3,38	1,44	0,03	3,53	0,01	0,00	0,48	0,02	2,2
G5	6,19	1,72	0,01	2,93	0,01	1,59	0,42	0,01	0,6
G6	5,49	3,3	0,03	8,83	0,01	0,00	0,43	0,04	1,5
H1	3,78	1,36	0,02	2,66	0,01	0,00	0,49	0,01	2,1
H2	2,88	1,07	0,66	3,19	0,01	0,00	0,01	0,01	2,7
Moyenne	5,35	2,34	0,09	5,01	0,02	4,51	3,89	0,03	2,67
Maximum	10,81	6,08	0,66	8,83	0,12	15,00	19,4	0,14	5,9
Minimum	2,24	0,97	0,01	2,34	0,01	0,00	0,01	0,01	0,6
Valeur de référence	0,0067	0,0014	-	-	-	0,0025	0,0035	0,000	-
Valeur seuil	0,023	0,011	-	-	-	0,0195	0,0195	0,0003	-
Valeur d'intervention	0,071	0,029	-	-	-	0,07	0,07	0,003	-

Tableau 6. Comparaison des résultats des ETM dans les sols du site étudié aux valeurs de référence (Baize. 2000)

Éléments	Valeur de référence ppm	Gamme fréquente ppm	Gamme de concentrations sur le site étudié ppm
As	6		
B	20	2 – 270	
Cd	0,35	0,01 – 2	100 – 1400
Co	8	0,05 – 65	100 – 6600
Cr	70	5 – 1 500	
Cu	30	2 – 250	9700 – 60800
I	5	0,1 – 25	
Mn	1000	20 – 10000	100 – 1200
Mo	1,2	0,1 – 40	
Ni	50	2 – 750	
Pb	35	2 – 300	100 – 194000
S	700	30 – 1600	
Zn	90	1 – 900	22400 – 108100

De manière générale, au niveau international, les valeurs de référence sont établies en fonction de l'usage du site (usage agricole, usage résidentiel, industriel ou récréatif). Dans le cas sous examen, le site peut être considéré comme un site mixte étant donné la présence des bâtiments industriels et la proximité des habitations. La législation européenne indique généralement trois valeurs:

La valeur de référence (VR): Elle correspond aux concentrations habituellement rencontrées; la valeur Seuil (VS): Elle correspond à la limite à ne pas dépasser, faute de quoi le site est considéré comme pollué. Lorsque cette valeur est atteinte, une étude de caractérisation approfondie doit être initiée afin d'évaluer le niveau de pollution et de déterminer éventuellement la méthode de dépollution qui convienne. Et la valeur d'Intervention (VI): Elle correspond au seuil nécessitant une remédiation sans aucune forme de procès. Les valeurs (VR, VS et VI) présentées sur les lignes inférieures dans le tableau 5 correspondent à la législation wallonne (Belgique). Si on se réfère à cette législation et on considère même les valeurs minimales pour chacun des ETM identifiés, on constate que le site étudié nécessite déjà une remédiation.

D'après les résultats présentés dans le même tableau (tableau 5), on peut également remarquer que la concentration en soufre total est très élevée. Sachant que le gisement cupro-zincifère exploité sur le site était sulfuré, cela peut s'expliquer notamment par une oxydation en surface des sulfures métalliques qui ont été extraits de la mine. D'autre part, le site étudié présente des trainées blanchâtres dont la connaissance de la nature nécessite des investigations appropriées. A ce sujet, une étude de la solution du sol à l'aide des lysimètres s'avère importante.

4 CONCLUSION

La présente étude avait pour objet l'évaluation de la qualité des sols d'un site minier situé sur le Copperbelt congolais localisé à Kipushi au Sud-Ouest de la ville de Lubumbashi en République Démocratique du Congo. Cette évaluation avait pour but d'identifier une éventuelle pollution d'origine minière; car en fait, le site concerné a fait l'objet d'une exploitation minière depuis 1924 avant de connaître l'arrêt en 1993. La méthodologie adoptée a consisté en une campagne d'échantillonnage et des mesures in-situ suivies des analyses chimiques au laboratoire. Le prélèvement d'échantillons a été réalisé à l'aide des tarières à main sur une profondeur comprise entre 0 et 30 cm, la perméabilité a été déterminée au moyen de test de percolation par la méthode à niveau constant ou méthode de Porchet et les analyses chimiques élémentaires ont été réalisées par spectrométrie d'absorption atomique.

Du point de vue de la perméabilité, les résultats obtenus montrent que l'ensemble du site est caractérisé par une valeur de perméabilité relativement élevée (car de l'ordre de 10⁻⁴ m/sec) ce qui induit un drainage aisé avec le risque de pollution des eaux souterraines. En ce qui concerne le pH, les résultats obtenus indiquent que le sol est acide à plusieurs endroits et présente par conséquent une grande capacité de mobiliser les ETM. Du point de vue de la valeur agronomique, les résultats montrent que sur l'ensemble du site, le sol est pauvre en matière organique (MO); la valeur moyenne est de 1,64% ce qui traduit une très faible activité bactérienne. Quant à la composition chimique élémentaire, les résultats obtenus indiquent des concentrations importantes en ETM attribuables à l'activité minière développée sur le site depuis près de 70 ans. Il s'agit de: Fe (23.400 – 88.300 ppm), Cd (100 – 1.400 ppm), Co (100 – 6.600 ppm), Cu (9.700 – 60.800 ppm), Pb (100 – 19.400 ppm) et Zn (22.400 – 108.100 ppm). Ces teneurs dépassent largement les concentrations moyennes admissibles même pour un site à vocation industrielle. Il en découle que le site est pollué par des ETM et présente par conséquent un risque sanitaire pour les personnes vivant à proximité et pour l'environnement. Les

phénomènes à éviter sur ce site sont l'érosion éolienne et hydraulique car ce sont les phénomènes qui peuvent accentuer davantage ces risques en dispersant les polluants. Il convient de noter que le site présente aussi des trainées blanchâtres observables à sa surface. Ces trainées sont des signes de saturation en sels qui précipitent en surface. On recommande d'étudier ce phénomène et de voir comment l'arrêter avant que le pire ne survienne. L'extension de ce phénomène sur les constructions, les plantes et à la surface du sol est extrêmement dangereuse et devrait à tout prix être prévenue. Du point de vue de la remédiation, il y a plusieurs méthodes qu'on peut envisager, notamment la phytoremédiation et le *soil washing*. Mais ces méthodes sont conditionnées par une connaissance approfondie de l'ampleur de la pollution, notamment la profondeur.

REFERENCES

- [1] ISO (2005), "Qualité du sol: Détermination du pH," ISO, CH-1211: 1-7.
- [2] ISO (1994), "Qualité Du Sol: Prétraitement Des Échantillons Pour Analyses Physico-Chimiques," ISO, Ch-1211: 1-9.
- [3] ABOU TRAORE, GBOMBELE SORO, KOUASSI ERNEST AHOUSI, BARTHELEMEY SIAKA BAMBAMBA, NAGNIN SORO, JEAN BIEMI (2014), "Niveau de contamination en métaux lourds des sédiments d'une lagune tropicale: la lagune Aghien (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)," *Afrique Science.*, 10: 73-88.
- [4] ADRIANO, D.C. (1986), "Trace Elements in the Terrestrial Environment," *Environmental Conservation.*, 13: 379.
- [5] ANDRES RODRIGUEZ-SEIJO, MARIA LUISA ANDRADE (2017), "Characterization of soil physico-chemical parameters and limitations for revegetation in serpentine quarry soils (NW Spain)," *J Soils Sediments*, 17: 1321-30.
- [6] BAIZE, DENIS (2000), "Teneurs totales en « métaux lourds » dans les sols français. résultats généraux du programme ASPITET," *Courrier de l'environnement de l'INRA.*, 39-54.
- [7] BAMBAMBA BUKENGU MUHAYA, AMAKAY BUKAS, FRANÇOIS TOTO LUBALA, PIERRE KAMBULI KASETI, JOEL BACIRHEBA MUGISHO (2016), "Assessment of Trace Metals in Soils of North-Eastern Lubumbashi (Upper-Katanga Province, Democratic Republic of Congo)," *Journal of Environmental Science and Engineering.*, A5: 452-62.
- [8] BAMBAMBA BUKENGU MUHAYA, CLARISSE ZOZA KUNYONGA, SONIA CATHERINE MULONGO, FAUSTIN ZIGABE, MUSHOBOKWA, ARTHUR MUBWEBWE BISIMWA (2017a). Trace Metal Contamination of Sediments in Naviundu River Basin, Luano and Ruashi Rivers and Luwuwoshi Spring in Lubumbashi City, Democratic Republic of Congo. (David Publishing).
- [9] BAMBAMBA BUKENGU MUHAYA, MATTHIEU KAYEMBE WA KAYEMBE, CLARISSE ZOZA KUNYONGA, SONIA CATHERINE MULONGO, FIDEL MUSHAGALUSA CUMA (2017b), "Assessment of Trace Metal Contamination of Sediments in the Lubumbashi River Basin, Kafubu, Kimilolo and Kinkalabwamba Rivers in Lubumbashi City, Democratic Republic of Congo," *Journal of Environmental Science and Engineering.*, A6: 167-77.
- [10] BAMBAMBA OUSMANE, PELEDE SOULEYMANE, SAKO ABOUBAKAR, KAGAMBEGA NICOLAS, Y. W. MININGOU MARIETTE (2013), "Impact de l'artisanat minier sur les sols d'un environnement agricole aménagé au Burkina-Faso," *Journal des Sciences.*, 13: 1-11.
- [11] BOUAFIA, ALI (2016). Propriétés physiques du sol - Problèmes résolus. (éditions OPU (Office des Publications Universitaires d'Alger)).
- [12] CHURL GYU LEE, HYU-TAEK CHON, MYUNG CHAE JUNG (2001), "Heavy metal contamination in the vicinity of the Daduk Au-Ag-Pb-Zn mine in Korea," *Applied Geochemistry.*, 16: 1377-86.
- [13] DINESH KUMAR, D.S. MALIK, SIPAHEE LAL PATEL, VARSHA GUPTA (2019), "Human health risk assessment and mitigation of heavy metal pollution in agriculture and environment." in *Agriculture and Environmental Science Academy*. (ed.), *Health Risks and Remediation (Agro Environ Media.: India)*.
- [14] FABIO FUENTES-GANDARA, JOSE PINEDO-HERNANDEZ, JOSE MARRUGO-NEGRETE, SERGI DIEZ (2018), "Human health impacts of exposure to metals through extreme consumption of fish from the Colombian Caribbean Sea," *Environ Geochem Health.*, 40: 229-42.
- [15] GBAGO ONIVOGUI, SAIDOU BALDE, KANDE BANGOURA, MAMADOU KABIROU BARRY (2013), "Évaluation des risques de pollution en métaux lourds (Hg, Cd, Pb, Co, Ni, Zn) des eaux et des sédiments de l'estuaire du fleuve Konkouré (Rep. de Guinée)," *Afrique Science*, 09: 36-44.
- [16] JEAN-MICHEL GOBAT, MICHEL ARAGNO, WILLY MATTHEY (2017). *Le sol vivant* (France).
- [17] JOSEPH KOUAKOU KOUASSI, EDMOND SIKA AHOUA, ODETTE DOGBO DENEZON, YVES-ALAIN BEKRO, DENIS BAIZE, MOUSSA BOUNAKHLA, FATIHA ZAHRY, AND MOUNIA TAHRI. (2012), "Teneurs de métaux traces dans des sols à maraîchers dans la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire)," *International Journal of Biological and Chemical Sciences.*, 6: 2252-62.
- [18] LEMIERE B., SEGUIN J.J., LE GUERN C., GUYONNET D., BARANGER PH., SAADA A. (2008). *Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes*. (BRGM: Paris).
- [19] LI GUO, WEITUO ZHAO, XIAOWEN GU, XINYUN ZHAO, JUAN CHEN, SHENGGAO CHENG (2017), "Risk Assessment and Source Identification of 17 Metals and Metalloids on Soils from the Half-Century Old Tungsten Mining Areas in Lianhuashan, Southern China," *International Journal of Environmental Research and Public Health.*, 14: 1-18.

- [20] LIJUN WANG, WENDONG TAO, RICHARD C. SMARDON, XUE XU, XINWEI LU (2017), "Speciation, sources, and risk assessment of heavy metals in suburban vegetable garden soil in Xianyang City, Northwest China," *Front. Earth Sci.*, X: 1-12.
- [21] MATEI GHEORGHE, GEORGE LIVIU POPESCU, DOINA PRODAN, ILEANA COJOCARU, MONICA GROZA (2019), "Study of Some Soil Properties and Evaluation of the Level of Contamination with Lead in Baia Mare, Aghires and Copsa-Mica, Romania," *REV.CHIM.*, 7: 801-04.
- [22] MPUNDU MUBEMBA MULAMBI MICHEL, USENI SIKUZANI YANNICK, NTUMBA NDAYE FRANÇOIS, MUYAMBO MUSAYA EMMANUEL, KAPALANGA KAMINA PRISCA, MWANSA MUYEMBE, ILUNGA KAMPANYI, NYEMBO KIMUNI LUCIENS (2013), "Évaluation des teneurs en éléments traces métalliques dans les légumes feuilles vendus dans les différents marchés de la zone minière de Lubumbashi," *Journal of Applied Biosciences.*, 66: 5106–13.
- [23] SCHNEIDER, JENS, MELCHER, FRANK, BRAUNS, MICHAEL (2007), "Concordant ages for the giant Kipushi base metal deposit (DR Congo) from direct Rb–Sr and Re–Os dating of sulfides," *Mineralium Deposita.*, 42: 791-97.