

Journal of **Environment** (JE)

Remédiation de Sols Miniers Contaminés en Éléments-Traces Métalliques par un Biochar Issu de la Pyrolyse de Déchets Organiques : Cas de Trois Sites du Haut-Katanga et du Lualaba (République Démocratique du Congo)



CARJ
Journals

Remédiation de Sols Miniers Contaminés en Éléments-Traces Métalliques par un Biochar Issu de la Pyrolyse de Déchets Organiques : Cas de Trois Sites du Haut-Katanga et du Lualaba (République Démocratique du Congo)



Clarice Kunyonga Zoza^{1,2*}, Nestor Nzinga wa Bwanga², Clovis Kalaka Mayur³, Jean Luhembwe Baruani¹, Gloire Yav Irung¹, Tatiana Kyeusi Muninga², Delphin Mukalay Umba², Jean-batiste Lumbu Simbi¹

¹Faculté des Sciences et Technologique, Département Chimie et Industrie, Université de Lubumbashi, Lubumbashi/ République Démocratique du Congo

²Ecole Supérieure des Ingénieurs Industriels, Département Génie des procédés chimiques, Université de Lubumbashi, Lubumbashi /République Démocratique du Congo

³Centre de Recherche Agroalimentaire (CRAA), Département Contrôle de qualité, Lubumbashi /République Démocratique du Congo

<https://orcid.org/0009-0007-3229-9456>

Accepted: 12th Sep, 2026, Received in Revised Form: 29th Sep, 2026, Published: 12th Oct, 2026

Résumé

Objectif : Évaluer l'efficacité d'un biochar produit à partir d'épluchures de pomme de terre comme amendement pour la remédiation de sols miniers contaminés par les éléments-traces métalliques (ETM) dans le Haut-Katanga et le Lualaba, en République démocratique du Congo.

Méthodologie : Trois sols miniers provenant de SODIMICO (Musoshi), de Ruashi Mining et d'un site minier du Lualaba, ainsi qu'un sol témoin non minier, ont été étudiés. Les épluchures de pomme de terre ont été pyrolysées pendant trois heures pour produire le biochar. Les propriétés physico-chimiques du biochar et des sols ont été évaluées avant et après amendement.

Résultats : Le biochar obtenu présentait un pH alcalin (10,21), une teneur élevée en cendres (59,1 %) et en carbone organique (26,4 %). Son incorporation a augmenté significativement le pH des sols, de 5,94–6,36 à 7,06–8,98, et réduit les teneurs en Cu, Pb, Co et Fe jusqu'à 93 %, 97 %, 73 % et 60 %, respectivement. Une amélioration de l'azote total, du carbone organique, de la matière organique, de la rétention en eau et de la capacité d'échange cationique a également été observée.

Contribution originale à la théorie, à la pratique et aux politiques : Cette étude apporte des données nouvelles sur la valorisation d'un déchet organique local pour immobiliser les éléments traces métalliques et améliorer la qualité des sols miniers. Elle soutient le développement de solutions locales, accessibles et durables de réhabilitation des sols dégradés en RDC.

Mots-clés : Biochar ; Éléments-traces métalliques ; Sols miniers ; Immobilisation ; Remédiation.

I. Introduction

L'exploitation des gisements cuprocobaltifères du Copperbelt katangais façonne depuis plus d'un siècle l'économie de la République démocratique du Congo (RDC), mais elle a également entraîné une dégradation durable des sols sous l'effet des rejets miniers, des émissions des fonderies et des différents déchets issus du traitement des minerais (Balasha and Peša, 2023). Ces activités, qu'elles soient industrielles ou artisanales, libèrent dans le milieu terrestre des éléments traces métalliques (ETM), notamment le cuivre (Cu), le cobalt (Co), le plomb (Pb) et le fer (Fe), dont l'accumulation dans les sols agricoles environnants peut compromettre la sécurité alimentaire et la santé publique lorsque des cultures vivrières y sont installées (Sikuzani et al., 2019; Katebe et al., 2024). À Lubumbashi, des concentrations élevées de Cu et d'autres ETM ont notamment été rapportées dans les sols maraîchers, avec des teneurs totales en Cu variant de 204 à 1355 mg/kg selon les sites étudiés (Katebe et al., 2024).

Face à cet héritage, la remédiation des sols contaminés constitue un enjeu prioritaire pour restaurer les terres cultivables autour des sites miniers du Haut-Katanga et du Lualaba. Parmi les approches disponibles, les amendements organiques et inorganiques occupent une place importante. Ils peuvent modifier les propriétés physico-chimiques des sols, notamment le pH, la capacité d'échange cationique et la teneur en matière organique, et ainsi accroître la rétention des éléments traces métalliques, réduisant leur mobilité et leur biodisponibilité pour les plantes (Naidu et al., 1994; Katebe et al., 2024). Dans les sols contaminés de Lubumbashi, l'application combinée de matières organiques et de chaux agricole a notamment permis d'améliorer certaines propriétés du sol et de réduire le transfert de plusieurs ETM du sol vers les cultures (Katebe et al., 2024).

Le biochar, matériau carboné obtenu par pyrolyse de biomasse dans des conditions limitées en oxygène, est devenu au cours des dernières décennies un amendement largement étudié pour la restauration et la remédiation des sols contaminés en raison de sa capacité à modifier les propriétés physico-chimiques du sol et à immobiliser certains éléments traces métalliques (Ahmad et al., 2014; Lehmann and Joseph, 2015). Sa structure poreuse, sa surface spécifique élevée, sa richesse en groupes fonctionnels de surface et son caractère généralement alcalin lui confèrent une capacité importante de sorption des contaminants métalliques. Par ailleurs, son incorporation dans les sols peut améliorer la capacité d'échange cationique, la rétention en eau et la teneur en carbone organique du sol (Sohi et al., 2010 ; Beesley et al., 2011).

Toutefois, l'efficacité du biochar dans la remédiation des sols contaminés n'est pas constante et dépend fortement de la nature de la biomasse utilisée, des conditions de pyrolyse, des propriétés du biochar obtenu ainsi que des caractéristiques physico-chimiques du sol et des contaminants présents. Les différents biochars peuvent notamment présenter des différences importantes de pH, de surface spécifique, de teneur en cendres, de capacité d'échange cationique et de groupes fonctionnels de surface, ce qui peut entraîner des performances différentes dans l'immobilisation des éléments traces métalliques (Ahmad et al., 2014; Li et al., 2022). Ainsi, la comparaison de plusieurs biochars produits à partir de biomasses différentes constitue une approche pertinente pour identifier les matériaux les mieux adaptés à la remédiation d'un sol minier donné.

Les mécanismes d'immobilisation des éléments traces métalliques par le biochar sont multiples et peuvent intervenir simultanément. L'augmentation du pH du sol induite par certains biochars peut réduire la solubilité des métaux et favoriser leur précipitation ou leur association avec des phases minérales. L'adsorption à la surface du biochar, la complexation avec les groupes fonctionnels oxygénés, l'échange ionique ainsi que la formation d'associations avec les oxydes de fer et de manganèse peuvent également contribuer à réduire la mobilité et la biodisponibilité des éléments traces métalliques (Beesley et al., 2011; Ahmad et al., 2014). Pour le cobalt, une étude expérimentale a montré qu'un biochar de paille de blé appliqué à 5 % pouvait réduire sa mobilité et sa biodisponibilité dans un sol contaminé. Les analyses spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) ont notamment mis en évidence le rôle des groupes hydroxyles et carboxyles présents à la surface du biochar dans la complexation du Co(II), tandis que l'effet du pH et les interactions avec les oxydes de Fe et de Mn contribuaient également à l'immobilisation du cobalt dans le sol (Medyńska-Juraszek et al., 2020).

Ces mécanismes sont particulièrement importants dans les sols tropicaux des régions minières du Copperbelt, où les propriétés pédologiques, le degré d'altération des matériaux parentaux, le pH et la présence d'oxydes de fer et de manganèse peuvent fortement influencer la mobilité des éléments traces métalliques. Par conséquent, les résultats obtenus dans d'autres régions du monde ne peuvent pas être directement extrapolés aux sols du Haut-Katanga et du Lualaba sans validation expérimentale dans les conditions locales.

Dans le contexte africain, plusieurs travaux ont montré le potentiel des amendements organiques et du biochar pour contribuer à la réduction de la mobilité et du transfert des éléments traces métalliques dans les sols affectés par les activités minières, bien que leur efficacité varie selon les propriétés du sol, le type d'amendement et les conditions d'application (Yoshii et al., 2020; Matungu et al., 2026). Dans la région minière de Kabwe, en Zambie, Yoshii et al. (2020) ont évalué l'utilisation de fumier de poulet, de biochar dérivé de fumier de poulet et d'urée, en association avec la citronnelle (*Cymbopogon citratus*), pour la réhabilitation d'un sol contaminé par le plomb. Les auteurs ont montré que la combinaison de la citronnelle et du fumier de poulet permettait de réduire de 70 % le plomb (Pb) échangeable du sol et de diminuer de 19 % la concentration de plomb (Pb) dans le maïs cultivé après le traitement (Yoshii et al., 2020). Plus récemment, Tembo et al. (2025) ont évalué, sur des sols fortement contaminés de Kabwe, l'efficacité du biochar, du triple superphosphate, de l'acide phosphorique et de la dolomie calcinée. Le biochar a augmenté le pH et la capacité d'échange cationique du sol et a réduit les concentrations extractibles de Pb, Cd, Cu et Zn, suggérant un rôle important de l'adsorption, de la complexation et de la modification des propriétés physico-chimiques du sol dans l'immobilisation des métaux (Tembo et al., 2025).

Une synthèse récente consacrée aux paysages miniers africains confirme cependant que les performances du biochar restent variables selon la matière première, les propriétés du biochar, la dose appliquée et les caractéristiques pédologiques locales, et souligne la nécessité d'adapter les stratégies de remédiation aux conditions environnementales propres à chaque site minier (Matungu et al., 2026). Ainsi, les résultats disponibles à Kabwe confirment l'intérêt du biochar et des amendements organiques comme stratégies de remédiation, tout en mettant en évidence

la nécessité de comparer différents biochars et leurs doses d'application dans des contextes pédologiques spécifiques (Yoshii et al., 2020).

En République démocratique du Congo, les travaux réalisés dans la région de Lubumbashi ont principalement porté sur la caractérisation de la contamination des sols et des cultures ainsi que sur l'utilisation d'amendements organiques et calcaires pour réduire le transfert des éléments traces métalliques (ETM) vers les plantes. Katebe et al. (2024) ont notamment étudié des sols maraîchers présentant différents niveaux de contamination par le Cu et ont évalué l'effet de fumier de poulet, de sciure et de chaux agricole. Les auteurs ont montré que les amendements organocalcaires pouvaient améliorer les propriétés physico-chimiques du sol et réduire le transfert des métaux vers les légumes. Toutefois, les sols fortement contaminés demeuraient problématiques pour la production de légumes destinés à la consommation humaine (Katebe et al., 2024).

Malgré ces avancées, une lacune importante subsiste dans les connaissances concernant l'utilisation du biochar pour la remédiation des sols cupro-cobaltifères du Copperbelt katangais. Les études réalisées en RDC ont surtout porté sur la caractérisation de la contamination, la mobilité des éléments traces métalliques, leur transfert vers les cultures et l'utilisation d'amendements organiques ou calcaires, tandis que les données expérimentales portant spécifiquement sur la comparaison de différents biochars dans les sols miniers du Haut-Katanga et du Lualaba restent limitées. En particulier, il existe encore peu de données permettant de déterminer, dans les conditions pédoclimatiques locales, quels types de biochars présentent les meilleures performances pour immobiliser simultanément le Cu, le Co, le Pb et le Fe.

De plus, les relations entre les caractéristiques des biochars, les modifications du pH et de la capacité d'échange cationique du sol, les mécanismes de fixation des éléments traces métalliques et leur biodisponibilité pour les plantes restent insuffisamment documentées dans le contexte du Copperbelt katangais. Cette lacune est importante puisque l'efficacité d'un biochar observée dans un sol ou une région donnée ne peut pas nécessairement être transposée à un autre contexte pédologique et climatique. L'étude de ces interactions dans les conditions locales est donc nécessaire pour identifier des matériaux de remédiation adaptés, accessibles et potentiellement valorisables à partir de biomasses disponibles localement.

Ainsi, la présente étude vise à évaluer l'efficacité d'un biochar produit à partir d'épluchures de pomme de terre, un déchet organique abondant et disponible localement que nous avons utilisé comme amendement pour la remédiation de trois sols miniers contaminés en éléments traces métalliques (ETM) dans le Haut-Katanga et le Lualaba.

II. Matériel et méthodes

2.1 Zone et sites d'étude

L'étude a porté sur trois sites miniers du Katanga (RDC) et un sol témoin non minier :

- le site de l'ancien concentrateur de SODIMICO, à Musoshi, localité minière historique du cuivre située à environ 60 km au sud-est de Lubumbashi, alimentée depuis 1972 par l'exploitation d'un gisement de minerais sulfurés de cuivre ;

- l'usine de RUASHI Mining, implantée dans la commune de la Ruashi (Haut-Katanga), à quelques kilomètres du centre-ville de Lubumbashi, qui produit du cuivre cathodique et des concentrés de cobalt à partir de l'ancienne carrière à ciel ouvert de l'Étoile ;
- un sol prélevé dans une entreprise minière de la province du Lualaba ;
- un sol témoin non contaminé, prélevé au champ expérimental de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Lubumbashi (Unilu-FSA), utilisé comme base de comparaison agropédologique.

Ces sites ont été retenus en raison de l'activité minière qui s'y est déroulée (cas de SODIMICO, dont le concentrateur est aujourd'hui à l'arrêt) ou qui s'y déroule encore (RUASHI Mining et le site du Lualaba).

2.2 Production et caractérisation du biochar

Le biochar a été produit à partir d'épluchures de pomme de terre collectées comme déchets ménagers auprès d'un débit de restauration situé sur le campus de l'Université de Lubumbashi. Trois lots de 126,23 g ont été pyrolysés séparément pendant des durées croissantes (1 h, 2 h et 3 h), puis le biochar obtenu a été broyé et conditionné. L'échantillon pyrolysé pendant trois heures a été retenu pour la suite de l'étude, car il présentait une carbonisation complète de la biomasse, contrairement aux lots pyrolysés plus brièvement.

La caractérisation physico-chimique du biochar a porté sur l'humidité, le taux de cendres (perte au feu à 600 °C), le pH et la conductivité électrique (mesurés sur suspension aqueuse après chauffage à reflux), la porosité (indices d'iode et de bleu de méthylène), la capacité d'échange cationique, la teneur en matière organique (perte au feu à 450 °C) et le carbone organique (Walkley & Black, 1934), selon des protocoles standards de caractérisation des biochars (Sohi et al., 2010)

2.3 Échantillonnage des sols et amendement

Les sols des trois sites miniers et du site témoin ont été échantillonnés, séchés à l'air libre, tamisés puis caractérisés avant amendement. Pour chaque sol minier, un mélange sol-biochar a ensuite été constitué et incubé, avant d'être soumis au même protocole analytique que les échantillons non amendés, permettant une comparaison directe des paramètres avant et après traitement.

2.4 Analyses physico-chimiques des sols

Les paramètres suivants ont été déterminés sur chaque échantillon de sol, avant et après amendement, selon des méthodes de référence en analyse des sols : le pH et la conductivité électrique (CE), mesurés respectivement par potentiométrie et conductimétrie sur une suspension aqueuse (Smith and Doran, 1997); l'azote total, déterminé par la méthode de Kjeldahl (Bremner, 1960) ; et le phosphore disponible, déterminé par la méthode de (Bray et Kurtz, 1945).

Le potassium échangeable a été extrait à l'acétate d'ammonium (NH_4OAc) et dosé par photométrie de flamme (Thomas, 1982). Le carbone organique a été déterminé selon la méthode de (Walkley et Black, 1934), tandis que la matière organique a été estimée par perte au feu;

Capacité d'échange cationique (CEC) et capacité maximale de rétention en eau (WHC_{max}) ;

Eléments-traces métalliques (Cu, Pb, Co, Fe, Ca, Mg, Na, Al, Zn), dosés et comparés à la norme française NF U44-041 relative aux amendements organiques, utilisée ici comme référentiel indicatif de comparaison en l'absence de norme congolaise spécifique.

2.5 Analyse des données

Les valeurs obtenues avant et après amendement ont été comparées pour chaque site et chaque paramètre. Les variations relatives des teneurs en éléments traces métalliques (ETM) ont été calculées en pourcentage de la valeur initiale. Une analyse statistique comparative a été conduite pour évaluer la significativité des baisses observées pour le cuivre, le cobalt et le fer, ainsi que de la hausse du pH associée.

III. Résultats

3.1 Caractéristiques physico-chimiques du biochar

Le biochar obtenu après deux heures de pyrolyse présente un pH fortement alcalin (10,21) et une conductivité électrique élevée (7,56 mS/cm), supérieure aux valeurs de référence IBI/EBC (< 4 mS/cm) (Tableau 1). Sa teneur en cendres (59,1 %) dépasse largement les seuils usuels (< 20 %), tandis que sa capacité d'échange cationique reste faible (0,40 cmol/kg). Le rapport C/N (23,6) et la teneur en carbone organique (26,4 %) traduisent un matériau riche en carbone mais relativement pauvre en azote au regard des standards internationaux.

Tableau I. Caractéristiques physico-chimiques du biochar (pyrolyse de 2 h).

Paramètre	Unité	Valeur	Norme IBI/EBC (2012)
pH	—	10,21	—
Conductivité électrique	mS/cm	7,56	< 4
Capacité d'échange cationique	cmol/kg	0,40	10 – 30
Carbone organique	%	26,4	≈ 50
Rapport C/N	—	23,6	10 – 30
Matière organique	%	45,5	—
Cendres	%	59,1	< 20
Azote total	%	1,12	0,5 – 3
Microporosité (indice d'iode)	nm	1358,9	< 2
Macroporosité (bleu de méthylène)	nm	129,1	> 50

3.2 Caractéristiques du sol témoin

Le sol témoin, non exposé à l'activité minière, présente un pH légèrement acide (6,63), une conductivité électrique modérée (699 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et une capacité d'échange cationique relativement élevée (21,6 meq/100 g), favorable à la rétention des nutriments (Tableau 2). Les teneurs en ETM y demeurent faibles et généralement inférieures aux normes de référence, à l'exception du sodium (Tableau 3).

Tableau II. Paramètres agronomiques du sol témoin (Unilu-FSA).

Paramètre	Unité	Valeur
pH	—	6,63
Conductivité électrique (EC)	$\mu\text{S}/\text{cm}$	699
Azote total (N)	%	0,23
Phosphore disponible (P)	mg/kg	4,21
Potassium total (K)	mg/kg	68,2
Carbone organique (CO)	%	1,57
Matière organique (MO)	%	2,70
Rapport C/N	—	6,81
Capacité de rétention en eau (WHC _{max})	%	12
Capacité d'échange cationique (CEC)	meq/100g	21,6

Tableau III. Teneurs en éléments-traces métalliques du sol témoin.

ETM	mg/kg	Sol témoin	Norme NF U44-041
Cu		50,7	50 – 150
Pb		3,93	50 – 100
Co		9,36	5 – 50
Fe		368,9	10 000 – 50 000
Zn		12,9	100 – 300
Al		95,3	10 000 – 50 000

3.3 État des sols miniers avant amendement

Avant amendement, les trois sols miniers présentent des profils contrastés. Le pH varie de 5,94 (RUASHI Mining) à 6,36 (SODIMICO), qualifiant ces sols d'acides à légèrement acides, à l'exception du sol du Lualaba dont le pH (6,14) reste proche de la neutralité. Les teneurs en azote total et en phosphore disponible sont faibles sur les trois sites, tandis que la capacité d'échange cationique est nettement inférieure à celle du sol témoin, notamment pour le site du Lualaba (6,5 meq/100 g).

Les teneurs en ETM révèlent une contamination marquée sur les trois sites (Tableau 5, colonnes « avant »). Le cuivre atteint 7136 mg/kg dans le sol du Lualaba, soit environ 47 fois la borne supérieure de la norme NF U44-041 (50–150 mg/kg). Le plomb dépasse également très largement la norme sur les trois sites (327,9 à 937,9 mg/kg, contre 50–100 mg/kg de référence), de même que le cobalt (62,5 à 93,0 mg/kg, contre 5–50 mg/kg).

3.4 Effet du biochar sur les paramètres agronomiques des sols

L'incorporation du biochar a modifié sensiblement les propriétés physico-chimiques des trois sols (Tableau 4). Le pH a augmenté sur l'ensemble des sites, passant de 5,94 à 7,06 pour RUASHI Mining, de 6,36 à 8,98 pour SODIMICO. La hausse la plus marquée est de 2,6 unités et de 6,14 à 7,89 pour le Lualaba. Cette évolution rapproche les trois sols de la neutralité, condition généralement favorable à la disponibilité des nutriments et à la croissance des cultures.

La fertilité globale des sols s'est également améliorée : la matière organique a progressé de 22 à 127 % selon le site, l'azote total a été multiplié par 3,6 à 5,6, et la capacité d'échange cationique a augmenté de 68 à 128 %. Le rapport C/N, en revanche, évolue de façon contrastée : il augmente pour RUASHI Mining (de 6,5 à 10,7, traduisant une décomposition plus lente de la matière organique amendée) mais diminue fortement pour SODIMICO et le Lualaba (respectivement de 22,5 à 8,3 et de 21,3 à 8,2), signe d'une minéralisation plus rapide de la matière organique dans ces deux sols. Le potassium total diminue notablement à SODIMICO (de 185,6 à 82,6 mg/kg), alors qu'il augmente aux deux autres sites.

Tableau IV. Effet de l'amendement biochar sur les paramètres agronomiques des trois sols miniers (valeurs avant → après amendement).

Paramètre	Unité	RUASHI Mining (avant → après)	SODIMICO (avant → après)	LUALABA (avant → après)
pH	—	5,94 → 7,06	6,36 → 8,98	6,14 → 7,89
Conductivité électrique	μS/cm	970 → 836	22 → 48	333 → 201
Azote total (N)	%	0,07 → 0,32	0,08 → 0,39	0,09 → 0,43
Phosphore disponible (P)	mg/kg	4,85 → 5,67	6,51 → 6,98	2,23 → 3,43
Potassium total (K)	mg/kg	108,2 → 270,2	185,6 → 82,6	98,3 → 121,5
Carbone organique (CO)	%	1,50 → 3,42	1,80 → 3,25	1,90 → 3,54
Matière organique (MO)	%	2,60 → 5,90	3,10 → 5,60	3,30 → 6,10
Rapport C/N	—	6,54 → 10,69	22,48 → 8,33	21,27 → 8,23
Rétention en eau (WHCmax)	%	17 → 23	13 → 16	7 → 13
CEC	meq/100g	10,3 → 23,5	12,0 → 22,1	6,5 → 10,9

3.5 Effet du biochar sur les teneurs en éléments-traces métalliques

L'amendement biochar s'accompagne d'une diminution généralisée des teneurs en ETM sur les trois sites (Tableau 5). La baisse la plus spectaculaire concerne le plomb, avec des réductions de 91 à 97 % selon le site, ramenant les concentrations proches, voire en deçà, de la norme de référence. Le cuivre diminue également fortement, en particulier dans le sol du Lualaba où il passe de 7136 à 529,4 mg/kg (93 %), une valeur qui reste toutefois encore supérieure à la norme NF U44-041. Le cobalt affiche des réductions de 46 à 73 %, et le fer de 32 à 60 %. Le zinc et l'aluminium, moins fortement contaminés à l'origine, connaissent également des baisses de 23 à 51 %.

Tableau V. Teneurs en éléments-traces métalliques des trois sols avant et après amendement biochar, et variation relative associée.

ETM (mg/kg)	Norme U44-041	NF	RUASHI Mining	SODIMICO	LUALABA
Cu	50 – 150		635,7 → 385,7 (–39 %)	696,5 → 365,8 (–48 %)	7136 → 529,4 (–93 %)
Pb	50 – 100		937,9 → 82,3 (–91 %)	327,9 → 11,3 (–97 %)	496,9 → 15,0 (–97 %)
Co	5 – 50		88,9 → 32,6 (–63 %)	62,5 → 34,0 (–46 %)	93,0 → 25,0 (–73 %)
Fe	10 000 – 50 000		948,7 → 564 (–41 %)	3332,8 → 2251 (–32 %)	2700 → 1087 (–60 %)
Zn	100 – 300		20,2 → 14,8 (–27 %)	132,8 → 65,0 (–51 %)	858,3 → 557,5 (–35 %)
Al	10 000 – 50 000		195,2 → 149,7 (–23 %)	236,3 → 132,3 (–44 %)	245,5 → 132,0 (–46 %)

Il convient de noter que, malgré ces réductions substantielles, les teneurs résiduelles en cuivre et en plomb demeurent, pour certains sites, supérieures aux bornes supérieures de la norme de référence, ce qui souligne les limites d'un traitement unique sur des sols très fortement contaminés à l'origine, en particulier celui du Lualaba.

IV. Discussion

Les résultats obtenus montrent que le biochar produit à partir d'épluchures de pomme de terre présente un potentiel intéressant pour réduire la biodisponibilité des ETM dans les sols miniers contaminés du Katanga. La baisse conjointe et cohérente des teneurs en cuivre, plomb, cobalt et fer observée sur les trois sites, associée à une hausse systématique du pH, est cohérente avec les mécanismes d'immobilisation des éléments traces métalliques décrits dans la littérature. En effet, l'augmentation du pH peut réduire la solubilité et la mobilité de certains cations métalliques en favorisant leur précipitation sous forme d'hydroxydes, de carbonates ou d'autres phases moins solubles, tout en renforçant leur adsorption sur les surfaces réactives du biochar et sur les colloïdes du sol (Ahmad et al., 2014; Beesley et al., 2011; Naidu et al., 1994; Palansooriya et al., 2020). Les mécanismes impliqués comprennent notamment l'adsorption, l'échange ionique, la complexation de surface et la précipitation, dont l'importance dépend des propriétés du biochar, du métal considéré et des caractéristiques physico-chimiques du sol (Guo

et al., 2020; He et al., 2019; Thomas et al., 2020). La forte alcalinité du biochar produit (pH = 10,21) pourrait ainsi expliquer son effet amendement sur l'acidité du sol, particulièrement marqué dans le sol de SODIMICO, où une augmentation de 2,6 unités de pH a été observée.

Ce résultat est cohérent avec les observations de Lele Nyami réalisées sur un sol ferrallitique de Kinshasa, où l'application de biochar a permis de réduire l'acidité et la saturation en aluminium tout en améliorant la disponibilité du phosphore. (Nyami et al., 2016) L'augmentation du pH consécutive à l'apport de biochar peut en effet contribuer à réduire la toxicité et la disponibilité de l'aluminium et à modifier les processus de fixation et de désorption du phosphore dans les sols tropicaux acides (Nyami et al., 2016; Shetty et al., 2021). Plusieurs synthèses récentes confirment que le biochar peut améliorer la disponibilité du phosphore dans les sols, notamment les sols acides, par l'intermédiaire de modifications du pH, de la sorption-désorption du phosphore et des interactions avec les oxydes de fer et d'aluminium (Glaser and Lehr, 2019; Tesfaye et al., 2021; Yang et al., 2021; Zhang et al., 2025) . La légère augmentation du phosphore disponible observée sur les trois sites de la présente étude, bien que modeste, pourrait ainsi être associée à l'augmentation du pH induite par le biochar et à une diminution de la fixation du phosphore par les phases minérales du sol.

La comparaison avec l'étude de Nyami et al., (2022) fait toutefois apparaître des différences de composition entre les biochars : le pH du biochar produit dans la présente étude (10,21) est supérieur à celui rapporté par ces auteurs (7,8), tandis que sa teneur en carbone organique (26,4 %) est inférieure à celle rapportée dans leur étude (49 %). Ces différences peuvent s'expliquer, entre autres, par la nature de la biomasse utilisée comme matière première, ainsi que par les conditions de pyrolyse, notamment la température, la durée et le type de pyrolyse. En effet, la nature du substrat et les conditions de production influencent fortement les propriétés physico-chimiques finales du biochar, notamment son pH, sa teneur en cendres, sa teneur en carbone, sa surface spécifique et sa porosité (Joseph et al., 2010; Enders et al., 2012; Ippolito et al., 2020; Tomczyk et al., 2020). Le caractère généralement plus alcalin des biochars produits à des températures élevées est notamment associé à la concentration des cations basiques et des carbonates dans la fraction minérale du biochar. Ainsi, les différences observées entre les deux biochars pourraient contribuer à expliquer leurs effets différents sur les propriétés des sols et sur l'immobilisation des éléments traces métalliques.

Contrairement à l'étude de Lele Nyami dans laquelle le biochar était associé à une fertilisation minérale, aucun apport d'engrais minéral n'a été réalisé dans le présent travail (Nyami et al., 2016). Cette différence expérimentale permet d'apprécier plus directement l'effet propre du biochar sur les propriétés du sol, mais peut également expliquer certaines différences dans l'évolution des paramètres de fertilité, notamment du potassium à SODIMICO, par rapport aux systèmes associant biochar et engrais minéral. En effet, l'étude de Lele Nyami a montré que l'association du biochar à la fertilisation minérale pouvait améliorer la teneur en carbone, en potassium et la capacité d'échange cationique du sol, ainsi que la disponibilité du phosphore (Nyami et al., 2016).

Par ailleurs, à la différence de l'étude d'Ilunga Tabu consacrée à l'influence du moment d'application du NPK sur la croissance et le rendement du maïs installé sur un ferralsol du Haut-

Katanga, la présente étude n'a pas intégré un suivi temporel détaillé des conditions hydriques et climatiques (Ilunga et al., 2019). Or, les variations de l'humidité du sol et des précipitations peuvent influencer la dissolution, la mobilité et le prélèvement des éléments nutritifs par les plantes. Cette absence de suivi constitue donc une limite de la présente étude et doit être prise en compte dans l'interprétation des variations observées des paramètres de fertilité.

Il convient également de relever une incohérence dans la mesure de la surface spécifique du biochar, dont la valeur obtenue (de l'ordre de $3,1 \times 10^{45} \text{ m}^2/\text{g}$) est physiquement irréaliste et doit être considérée comme un artefact de mesure ou de calcul plutôt que comme une valeur exploitable ; elle n'a donc pas été retenue dans l'interprétation des mécanismes de sorption, qui reposent davantage ici sur les indices de porosité (bleu de méthylène, indice d'iode) et sur l'effet pH. Une détermination par la méthode BET (adsorption d'azote), correctement calibrée, serait nécessaire pour caractériser rigoureusement la texture poreuse de ce biochar dans de futurs travaux.

Sur le plan méthodologique, plusieurs limites doivent être soulignées. Premièrement, l'étude repose sur une incubation de courte durée, qui ne permet pas d'évaluer la stabilité de l'immobilisation des éléments traces métalliques dans le temps, ni le comportement du sol après un arrêt de l'apport de biochar. Deuxièmement, aucun essai en conditions réelles de culture (test agronomique avec le maïs, culture régionale probable) n'a été mené pour vérifier que la baisse des teneurs totales en élément traces métalliques se traduit effectivement par une réduction du transfert vers les parties comestibles des plantes. Un point essentiel pour statuer sur la sécurité sanitaire d'une éventuelle remise en culture. Troisièmement, les teneurs résiduelles en cuivre et en plomb restant, pour certains sites, supérieures aux normes de référence, une seule application de biochar ne suffit probablement pas à ramener ces sols à des niveaux compatibles avec toutes les normes agricoles, et des stratégies combinées (doses plus élevées, associations avec d'autres amendements, phytoremédiation complémentaire) mériteraient d'être testées.

Ces réserves ne remettent pas en cause la tendance générale observée : sur les trois sites indépendamment de leur niveau initial de contamination, le biochar a simultanément réduit la biodisponibilité des principaux éléments traces métalliques préoccupants et amélioré les indicateurs de fertilité du sol, ce qui en fait un candidat sérieux pour des stratégies de réhabilitation à faible coût dans le contexte minier katangais.

Conclusion et perspectives

Cette étude démontre qu'un biochar produit localement à partir d'épluchures de pomme de terre, un déchet organique disponible en abondance, constitue un amendement efficace pour la remédiation de sols miniers contaminés en éléments-traces métalliques dans le Haut-Katanga et le Lualaba. Sur les trois sites étudiés, l'amendement a induit une hausse significative du pH du sol, principal facteur associé à la diminution des teneurs en cuivre, plomb, cobalt et fer, avec des réductions atteignant respectivement 93 %, 97 %, 73 % et 60 % selon le site. Cet effet s'est accompagné d'une amélioration parallèle de la fertilité des sols (azote, carbone organique, matière organique, capacité d'échange cationique), renforçant l'intérêt agronomique de cette pratique au-delà de sa seule fonction de dépollution.

Les propriétés du biochar dépendant fortement des conditions de pyrolyse, un temps de traitement de trois heures s'est révélé nécessaire pour obtenir une carbonisation complète du substrat et les propriétés adsorbantes recherchées. Ces résultats confortent l'intérêt de valoriser les déchets organiques agro-alimentaires locaux comme ressource pour la production de biochar, dans une logique d'économie circulaire appliquée à la réhabilitation des sols miniers.

Des recherches complémentaires sont toutefois nécessaires pour consolider ces conclusions : un suivi de plus longue durée permettrait d'évaluer la stabilité de l'immobilisation des ETM et la réversibilité éventuelle de l'effet après arrêt de l'amendement ; des essais en conditions réelles de culture, notamment avec le maïs, sont requis pour quantifier le transfert résiduel des métaux vers les parties comestibles des plantes et statuer sur l'innocuité sanitaire d'une remise en culture ; enfin, une caractérisation plus poussée de la texture poreuse du biochar (méthode BET) et l'évaluation de doses d'application variables permettraient d'optimiser le protocole en vue d'une application à plus grande échelle sur les sols dégradés du Copperbelt katangais.

Références bibliographiques

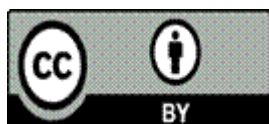
- Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S.S., Ok, Y.S., 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere* 99, 19–33.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Balasha, A.M., Peša, I., 2023. “They polluted our cropfields and our rivers, they killed us”: Farmers’ complaints about mining pollution in the Katangese Copperbelt. *Heliyon* 9, e14995. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14995>
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J.L., Harris, E., Robinson, B., Sizmur, T., 2011. A review of biochars’ potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environ. Pollut.* 159, 3269–3282.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.07.023>
- Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59(1), 39–46. <https://doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>
- Bremner, J.M., 1960. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *J. Agric. Sci.* 55, 11–33. <https://doi.org/10.1017/S0021859600021572>
- Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., Lehmann, J., 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresour. Technol.* 114, 644–653. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022>
- Glaser, B., Lehr, V.-I., 2019. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Sci. Rep.* 9, 9338. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z>
- Guo, M., Song, W., Tian, J., 2020. Biochar-Facilitated Soil Remediation: Mechanisms and Efficacy Variations. *Front. Environ. Sci.* 8, 521512.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.521512>

- He, L., Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P.C., Xu, J., 2019. Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. *Environ. Pollut.* 252, 846–855. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.151>
- Ilunga, T.H., Banza, M.J., Lukusa, M.L., Mukunto, K.I., Malonga, H.L., Kanyenga, L.A., Nyembo, K.L., 2019. Influence du moment d’application du NPK sur la croissance et le rendement du maïs (*Zea mays* L.) installé sur un ferralsol. *J. Appl. Biosci.* 127, 12794. <https://doi.org/10.4314/jab.v127i1.4>
- Ippolito, J.A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J.M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M.L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K., Borchard, N., 2020. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar* 2, 421–438. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>
- Joseph, S.D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C.H., Hook, J., Van Zwieten, L., Kimber, S., Cowie, A., Singh, B.P., Lehmann, J., Foidl, N., Smernik, R.J., Amonette, J.E., 2010. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Soil Res.* 48, 501–515. <https://doi.org/10.1071/SR10009>
- Katebe, F.M., Colinet, G., Kyalamakasa, J.-M.K., Mubemba, M.M., Jijakli, M.H., 2024. Application of soil amendments to reduce the transfer of trace metal elements from contaminated soils of Lubumbashi (Democratic Republic of the Congo) to vegetables. *Environ. Monit. Assess.* 196, 902. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13029-8>
- Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), 2015. *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*, Second edition. ed. Routledge, Taylor & Francis Group, London ; New York.
- Li, X., Braakhuis, A., Li, Z., Roy, R., 2022. How Does the University Food Environment Impact Student Dietary Behaviors? A Systematic Review. *Front. Nutr.* 9, 840818. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.840818>
- Matungu, M.M., Mwaanga, P., Mwamba, T.M., Mudenda, L., Syampungani, S., 2026. Lead pollution in soils within the African mining landscapes: current status, impacts, and nature-based interventions. *Environ. Monit. Assess.* 198, 663. <https://doi.org/10.1007/s10661-026-15492-x>
- Medyńska-Juraszek, A., Ćwieląg-Piasecka, I., Jerzykiewicz, M., Trynda, J., 2020. Wheat Straw Biochar as a Specific Sorbent of Cobalt in Soil. *Materials* 13, 2462. <https://doi.org/10.3390/ma13112462>
- Naidu, R., Bolan, N.S., Kookana, R.S., Tiller, K.G., 1994. Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils. *Eur. J. Soil Sci.* 45, 419–429. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1994.tb00527.x>

- Nyami, B.L., Sudi, C.K., Lejoly, J., 2016. Effet du biochar et des feuilles de *Tithonia diversifolia* combiné à l'engrais minéral sur la culture du maïs (*Zea mays* L.) et les propriétés d'un sol ferralitique à Kinshasa (RDC). BASE 57–67. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.12592>
- Nyami, B.L., Sudi, C.K., Lejoly, J., Kalala, P.M., 2022. Effet du biochar sur la rétention et la disponibilité en eau et éléments minéraux pour les plantes dans un sol sableux de Kinshasa.
- Palansooriya, K.N., Shaheen, S.M., Chen, S.S., Tsang, D.C.W., Hashimoto, Y., Hou, D., Bolan, N.S., Rinklebe, J., Ok, Y.S., 2020. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review. Environ. Int. 134, 105046. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105046>
- Shetty, R., Vidya, C.S.-N., Prakash, N.B., Lux, A., Vaculík, M., 2021. Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. Sci. Total Environ. 765, 142744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142744>
- Sikuzani, Y.U., Boisson, S., Kaleba, S.C., Khonde, C.N., Malaisse, F., Halleux, J.-M., Bogaert, J., Kankumbi, F.M., n.d. Dynamique de l'occupation du sol autour des sites miniers le long du gradient urbain-rural de la ville de Lubumbashi, RD Congo.
- Smith, J.L., Doran, J.W., 1997. Measurement and Use of pH and Electrical Conductivity for Soil Quality Analysis, in: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), SSSA Special Publications. Wiley, pp. 169–185. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c10>
- Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., Bol, R., 2010. A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil, in: Advances in Agronomy. Elsevier, pp. 47–82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Tembo, M., Kataba, A., Soe, N.C., Doya, R., Musonda, R., Zyambo, G., Ikenaka, Y., Yabe, J., Muzandu, K., Ishizuka, M., Nakayama, S.M., 2025. Significant reduction of blood and tissue lead and cadmium concentrations in free-range and broiler chickens through soil remediation with biochar, phosphates, and calcined dolomite: Implications for public health and food safety. J. Hazard. Mater. Adv. 20, 100907. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100907>
- Tesfaye, F., Liu, X., Zheng, J., Cheng, K., Bian, R., Zhang, X., Li, L., Drosos, M., Joseph, S., Pan, G., 2021. Could biochar amendment be a tool to improve soil availability and plant uptake of phosphorus? A meta-analysis of published experiments. Environ. Sci. Pollut. Res. 28, 34108–34120. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14119-7>
- Thomas, G. W. (1982). Exchangeable cations. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties* (2nd ed., pp. 159–165). American Society of Agronomy & Soil Science Society of America

- Thomas, E., Borchard, N., Sarmiento, C., Atkinson, R., Ladd, B., 2020. Key factors determining biochar sorption capacity for metal contaminants: a literature synthesis. *Biochar* 2, 151–163. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00053-3>
- Tomeczyk, A., Sokołowska, Z., Boguta, P., 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 19, 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Yang, L., Wu, Y., Wang, Y., An, W., Jin, J., Sun, K., Wang, X., 2021. Effects of biochar addition on the abundance, speciation, availability, and leaching loss of soil phosphorus. *Sci. Total Environ.* 758, 143657. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143657>
- Yoshii, Y., Von Rein, I., Munthali, K., Mwansa, M., Nakata, H., Nakayama, S., Ishizuka, M., Uchida, Y., 2020. Evaluation of phytoremediation effects of chicken manure, urea and lemongrass on remediating a lead contaminated soil in Kabwe, Zambia. *South Afr. J. Plant Soil* 37, 351–360. <https://doi.org/10.1080/02571862.2020.1772386>
- Zhang, L., Chang, L., Liu, H., De Jesús Puy Alquiza, M., Li, Y., 2025. Biochar application to soils can regulate soil phosphorus availability: a review. *Biochar* 7, 13. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00415-1>



2026 by the Authors. This Article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)