Implications des relations sol-plante en ingénierie écologique des habitats et sols métallifères dégradés: le cas des habitats riches en cuivre du Katanga (République Démocratique du Congo)

Michel-Pierre Faucon, E Ilunga, Bastien Lange, S Boisson, M Seleck, S Le Stradic, M Shutcha, C Grison, Olivier Pourret, P Meerts, et al.

▶ **To cite this version:**

Michel-Pierre Faucon, E Ilunga, Bastien Lange, S Boisson, M Seleck, et al.. Implications des relations sol-plante en ingénierie écologique des habitats et sols métallifères dégradés: le cas des habitats riches en cuivre du Katanga (République Démocratique du Congo). Bulletin des Séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer, 2015, 61 (2-3), pp.391-401. hal-02265959

HAL Id: hal-02265959
https://hal.science/hal-02265959

Submitted on 13 Aug 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Implications des relations sol-plante en ingénierie écologique des habitats et sols métallifères dégradés, le cas des habitats riches en cuivre du Katanga (République Démocratique du Congo)

Implications of soil-plant relationships in ecological engineering of degraded metalliferous habitats and soils, the case of copper rich habitats in Katanga (Democratic Republic of Congo)

M-P. Faucon[1], E Ilunga[2,3], B Lange[1,4], S. Boisson[2,3], M Seleck[2], S Le Stradic[2], M. Shutcha[3], C. Grison[5], O. Pourret[1], P. Meerts[4], G. Mahy[2]

[1]Hydrogéochimie Interactions Sol-Environnement (HydrISE) Unité, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais (ISAB-IGAL), 15 rue Pierre Waguet, Beauvais 60026, FR
[2]Biodiversity and Landscape Unit, Department of Forest, Nature and Landscape, University de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, 2 Passage des Déportés, Gembloux 5030, BE
[3]Ecology, Restoration Ecology and Landscape research Unit, Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi, Lubumbashi, DRCongo
[4]Laboratory of Plant Ecology and Biogeochemistry, Université Libre de Bruxelles, 50 Avenue F. Roosevelt, BE-1050 Brussels, BE
[5]Bio-inspired Chemistry and Ecological Innovations (ChimEco), FRE CNRS-University of Montpellier-Stratoz 3673, Cap Alpha, Avenue de l'Europe, 34830 Clapiers, France

Résumé

La restauration écologique des habitats dégradés et des sols nus riches en métaux lourds créés par l'activité minière est devenue aujourd'hui un enjeu environnemental majeur pour réduire l'érosion de la biodiversité et la dégradation des paysages, des sols et de l'eau. Les études de restauration écologique basées sur l'identification des espèces sans faire référence aux traits fonctionnels des plantes sont limitées au réservoir régional des espèces et rendent difficile les interprétations et les applications dans des contextes écologiques variés. En comparant les traits fonctionnels des plantes entre l'habitat métallifère non dégradé et un gradient de succession d'habitats secondaires, il est possible de définir des traits liés à la capacité de colonisation des sols nus riches en métaux lourds. Cette première tentative d'analyse des traits sur les habitats riches en métaux lourds permet ainsi d'identifier les traits candidats pour la phytoremediation. Un des futurs challenges est de créer de nouveaux écosystèmes fonctionnels sur les sols nus contaminés par les métaux lourds en

favorisant la conservation de la biodiversité et les services écosystémiques associés à la protection des sols et de l'eau. Cette approche nécessitera d'associer des espèces sélectionnées pour la phytoremediation provenant des habitats secondaires métallifères et des habitats métallifères primaires.

Mots clés : cuivre, ingénierie écologique, interactions sols-plantes, métaux lourds, traits fonctionnels

Samenvatting. - *Implicaties van bodem-plant relaties en ecologische engineering van metaalrijke en gedegradeerde habitats en bodems, case studie, koper rijke habitats in Katanga (Democratische Republiek Congo)*

Het ecologisch herstel van aangetaste habitats en kale bodems door mijning verrijkt aan zware metalen is nu een belangrijke milieu-uitdaging geworden om de biodiversiteit erosie tegen tegaan alsmede het landschap, de bodem en de water degradatie te remmen. Studies omtrent het ecologisch herstel, gebaseerd op de identificatie van soorten zonder verwijzing naar de functionele eigenschappen van planten zijn beperkt tot de regionale pool van species en vermoeilijken de interpretaties en toepassingen in diverse ecologische contexten. Vergelijkingen van de functionele eigenschappen van planten tussen niet-metaalhoudende aangetaste habitats en een opeenvolging gradiënt van secundaire habitats, maken het mogelijk om kenmerken te definieren met betrekking tot de kolonisatie capaciteit van kale grond verrijkt aan zware metalen. Deze eerste poging om de eigenschappen van habitats verrijkt aan zware metalen te analyseren en helpt bij het identificeren voor fytoremediatie trekken. Een van de uitdagingen voor de toekomst is om nieuwe functionele ecosystemen te identificeren voor deze kale gronden verontreinigd met zware metalen en dit door het bevorderen van het behoud van de biodiversiteit en ecosysteemdiensten in verband met de bescherming van bodem en water. Deze aanpak vergt associëren van geselecteerde soorten voor fytoremediatie komende van secundaire en primaire zware metaal rijke habitats.

Trefwoorden. – Metaalrijke rots-aardlaag; Behoud van biodiversiteit; Koper; Functionele plantenecologie; Ecologische engineering; Bodem-plantinteracties; Zware metalen; Fytorehabilitatie; Verontreinigde bodems; Functionele kernmerken

Abstract

Ecological restoration of degraded metalliferous habitats and bare soils created by mining activity have now become a major environmental concern to reduce erosion of biodiversity and degradation of landscape, soil and water. Studies based on species identification for restoration purposes without reference to plant trait are limited only to local pools of species which makes the interpretation and applications in various ecological contexts rather difficult. Analysis of functional plant traits in degraded primary habitats and along a successional gradient in secondary habitats enable the definition of traits associated to colonization of secondary habitats and the identification of potential traits for appropriate species selection for phytoremediation of metal-rich bare soils. One of the future challenges is to create new functional ecosystems on bare soils contaminated by heavy metals by promoting ecosystem services such as biodiversity conservation and soil and water protection.

Key words: copper, ecological engineering, soil-plant interactions, heavy metals, functional plant traits

Quelles solutions pour faire face à l'érosion de la biodiversité des affleurements de roche de cuivre et à la dégradation des paysages, des sols et de l'eau par les activités minières ?

Les sols enrichis naturellement en métaux lourds représentent des habitats très contraignants pour la végétation. Des affleurements naturels de roches très riches en cuivre et cobalt sont exceptionnels à la surface de la Terre et constituent des anomalies géochimiques (Pourret et al., in press). La colonisation de tels affleurements par des communautés végétales adaptées, diversifiées et riches en espèces, est une singularité biogéographique et écologique du Katanga (Duvigneaud & Denaeyer-De Smet 1963 ; Brooks & Malaisse, 1985). Ces affleurements se présentent sous forme de collines portant une végétation herbacée dispersée dans la forêt claire. La flore de ces habitats primaires naturellement riches en Cu est composée d'environ 600 espèces dont 32 espèces endémiques strictes (Faucon et al., 2010).

Figure 1 Vue générale d'un affleurement de roches de Cu et Co (à gauche) et savane steppique de pente (à droite) (http://www.copperflora.org/).

La physionomie générale de la végétation des affleurements de cuivre est une succession de communautés du haut vers le bas de l'affleurement métallifère. Au sommet, une communauté d'espèces chasmophytiques sur des blocs de roche siliceuse cellulaire peu minéralisés (concentration en cuivre entre 250 et 900 mg/kg), suivie d'une steppe sur la partie supérieure des affleurements où les concentrations en Cu sont les plus fortes (entre 3500-100 000 mg/kg) et une savane steppique au pied de la colline avec des concentrations

en cuivre moindre (entre 1000-3500 mg/kg) (appelée aussi dembo d'empoisonnement, Figure 1) (Duvigneaud & Denayer-De Smet, 1963 ; Seleck et al., 2013). Les espèces de la flore du cuivre présentent des adaptations physiologiques remarquables pour tolérer et parfois accumuler les métaux contenus dans le sol (Chipeng et al., 2009 ; Faucon et al., 2012). Cependant, l'industrie minière endommage sévèrement les écosystèmes et, au-delà de la perte en biodiversité qu'une telle activité entraine, elle constitue un véritable risque pour la santé publique (Banza et al., 2009 ; Cheyns et al., 2014). Ces risques environnementaux sont davantage accentués dans les climats tropicaux étant donné que le transfert des métaux lourds est accéléré par l'intense ruissellement et l'érosion hydrique influencée par les précipitations abondantes (au Katanga, 1 300 mm de précipitation par an principalement concentrés pendant les 5 mois de la saison des pluies, Malaisse, 1974) et par l'érosion éolienne pendant la saison sèche. Le Katanga, en raison de son sous-sol exceptionnellement riche en minerais de Cu, Co, U, est l'une des régions du monde impactée par l'exploitation minière, ce qui engendre l'augmentation importante des surfaces de sols contaminés (Vranken et al., 2013 ; Mees et al., 2013).

Actuellement, la majorité des endémiques métallophytes sont désormais considérées comme des espèces en danger critique d'extinction (Faucon et al., 2010). Cependant, ces espèces représentent un patrimoine biologique remarquable, d'autant plus qu'elles sont maintenant considérées comme des éléments clés pour le développement de technologies vertes visant à fixer ou dépolluer des sols contaminés en métaux. Un des principaux défis actuellement est de conserver ces métallophytes et de les utiliser afin de développer des techniques de phytoremédiation performantes comprenant deux principaux procédés : la phytostabilisation et la phytoextraction. La phytostabilisation consiste à réduire la mobilité des métaux dans le sol contaminé et leur transfert par l'installation d'un couvert végétal permanent et par des amendements organiques et minéraux au sol (Shutcha et al., 2010 ; Asensio et al., 2014). La phytoextraction consiste à extraire les métaux du sol via leur accumulation dans la partie aérienne des plantes qui est ensuite récoltée et minéralisée (McGrath et al., 2002). Ce procédé suscite un regain d'intérêt grâce aux innovations

récentes en chimie verte qui cherche à valoriser les métaux issus de la biomasse des végétaux cultivés sur sols contaminés en tant que catalyseur des réactions de synthèse organique de molécules d'intérêt (Escande et al., 2014 ; Grison et al., 2015). Le développement et l'amélioration des procédés de phytoremédiation des sols contaminés par les métaux lourds du sud-est de l'Afrique centrale passent par la mise en évidence des traits des végétaux parmi les 600 espèces présentes sur les habitats métallifères du Katanga, primaires (les affleurements de roche de Cu) et secondaires (i.e. créés par l'activité minière) (Leteinturier et al., 1999). Ceci en examinant leur intérêt pour la phytoremediation, i.e. les traits liés à la colonisation des habitats secondaires, au maintien de la végétation pendant la saison sèche (i.e. pérenne), au développement de la végétation pendant la saison sèche, au mode de reproduction (multiplication latérale par reproduction végétative ou non), au degré de tolérance au cuivre et au cobalt et à la capacité ou non à accumuler du Cu et Co dans la partie aérienne de la plante. Cette approche en écologie fonctionnelle appliquée permet de fournir une liste de traits candidats pour la phytostabilisation et la phytoextraction sans avoir nécessairement besoin de toutes les connaissances taxonomiques et floristiques et transposables dans les différents contextes pédoclimatiques de la région du sud-est de l'Afrique Centrale.

L'analyse des traits fonctionnels, adaptatifs et chimiques des végétaux des sols métallifères du Katanga, une approche innovante pour définir les procédés de phytostabilisation et de phytoremédiation

L'étude de comparaison des traits des végétaux entre les habitats primaires et secondaires d'âges différents (> 5 ans et > 30 ans) a permis de mettre en évidence les traits spécifiques aux végétations des habitats primaires associés aux espèces pérennes présentant (Ilunga et al., 2015) une capacité élevée de propagation latérale (par reproduction végétative), des xylopodes (plantes à tronc ligneux souterrain, renouvelant toutes les tiges chaque année), un système souterrain profond > 30 cm et chez certaines espèces une phénologie de

croissance à la fin de la saison sèche. Les différences importantes de traits fonctionnels entre les habitats primaires et secondaires montrent que les habitats secondaires récents peuvent offrir des conditions favorables pour la colonisation des plantes et permettre d'identifier les traits les plus appropriés pour initier la revégétalisation des sols nus contaminés par les métaux lourds (Ilunga et al., 2015). Les principaux traits impliqués dans la recolonisation d'habitats métallifères secondaires sont les suivants : cycle de vie annuel, phénologie de croissance durant la saison des pluies, système souterrain de 0-10 cm, banque de bourgeon par graines, taille des dispersules < 2 mm x 2 mm et mode de dispersion par adhésion. Ces traits doivent donc être considérés comme les principaux candidats pour la revégétalisation des sols nus créés par l'activité minière afin de restaurer les paysages dégradés des zones minières du sud-est de l'Afrique central et notamment du Haut Katanga. Cependant, les espèces sélectionnées présentant cet ensemble de traits pour réaliser la revégétalisation post-mining (e.g. *Bulbostylis pseudoperennis* Goetgh., *Haumaniastrum katangense* (S.Moore) P.A.Duvign. & Plancke, *Crepidorhopalon tenuis* (S. Moore) Eb. Fisch.) ne permettent pas de restaurer un écosystème composé d'une diversité fonctionnelle élevée, ni d'assurer le rôle à part entière de la phytostabilisation qui est de réduire la mobilité et le transfert des métaux lourds pendant les deux saisons de l'année. En effet, le transfert des métaux lourds par érosion éolienne n'est pas réduit par ce type de végétation puisqu'elle est composée essentiellement d'espèces annuelles qui ne survivent pas pendant la saison sèche (durée de 5 mois). Un système souterrain et aérien non permanent durant les deux saisons n'est pas favorable à la réduction du ruissellement et de l'érosion hydrique et éolienne et ainsi du transfert des métaux lourds vers d'autres milieux. Une des priorités pour la restauration des habitats et sols métallifères dégradés serait d'intégrer à ces végétations secondaires certaines fonctions et traits mis en évidence dans les habitats primaires tels que les graminées cespiteuses à propagation latérale favorisant un couvert dense et permanent (e.g. *Loudetia simplex (*Nees) C.E. Hubb., *Tristachya bequaertii* De Wild., *Andropogon schirensis* Hochst. ex A.Rich.). Cette approche permettrait

de créer un nouvel écosystème fonctionnel présentant des services écosystémiques pour la conservation de la biodiversité et la protection des sols.

Cependant, les espèces sélectionnées présentant cet ensemble de traits associés à la colonisation des habitats secondaires ainsi que les espèces pérennes présentées précédemment pour améliorer la performance des procédés de phytoremediation doivent être hautement tolérantes au Cu et au Co étant donné que les sols nus métallifères peuvent présenter des conditions plus extrêmes que les habitats primaires (sécheresse et concentrations en Cu disponibles plus élevées). Une tolérance au Cu élevée a été montrée chez *Crepidorhopalon tenuis* (Faucon et al., 2012a), *Haumaniastrum katangense* (Chipeng et al., 2009), *Microchoa altera* (Rendle) Stapf. (Shutcha et al., 2010) et *Anisopapus chinensis* (L.) Hook. (Lange et al. in press) qui présentent toutes un potentiel élevé pour la phytostabilisation. Néanmoins, la phytostabilisation des sols hautement contaminés par les poussières atmosphériques des fonderies pouvant atteindre 10 % de Cu total dans le sol nécessite des amendements organiques et chaulant afin de réduire la mobilité et la disponibilité du Cu en augmentant le pH du sol et en apportant de la matière organique qui adsorbe le Cu (Shutcha et al. 2015). Cette diminution de la disponibilité du Cu dans le sol a permis de diminuer la toxicité du milieu de manière suffisante pour favoriser le développement de *Microchloa altera* plantée dans la cadre du premier essais de phytostabilisation *in situ* en Afrique tropicale (Shutcha et al. 2015 ; Figure 2).

Parmi les espèces candidates pour la révégétalisation et la phytostabilisation, certaines présenteraient des traits chimiques de leur partie aérienne particuliers. En effet, environ trente espèces sont considérées comme hyperaccumulatrices de Cu et de Co (Baker et al., c'est-à-dire qu'elles présentent des concentrations élevées en Cu et en Co dans leur partie aérienne nettement supérieures aux plantes normales, > 300 mg/kg et sans présenter de symptômes de chlorose et de ralentissement de la croissance (Faucon et al., 2007 ; Van der Ent et al., 2013). Cette hyperaccumulation du Cu et du Co confère un intérêt pour la phytoextraction. Cependant, il existe des variations élevées des teneurs accumulées en Cu/Co chez les cuprophytes du Katanga (Lange et al. 2014). Celles-ci s'expriment à

différentes échelles révélant ainsi des variations entre les espèces, les populations, et également entre les individus (Lange et al. 2014 ; Faucon et al., 2009). Cette variation serait expliquée par la variabilité de mécanismes de tolérance au métaux lourds (exclueur, indicateur ou hyperaccumulateur), de la variabilité des propriétés du sol influençant la disponibilité du Cu et Co dans les sols (Lange et al. 2014 ; Pourret et al., 2015a) et de la variation génétique intra et interpopulationnelle de la capacité à accumuler le Cu et le Co (Faucon et al., 2012 ; Peng et al., 2012 ; Lange et al., résultats non publiés). Les études en conditions contrôlées ont permis de mettre en lumière les mécanismes de tolérance (exclueur, indicateur et hyperaccumuleur) des supposées hyperaccumulatrices de Cu et de Co. Il a été montré que *Crepidorhopalon tenuis* (C. t) (Faucon et al. 2012a) et *Haumaniastrum katangense* (H. k) (Chipeng et al., 2009) présenteraient un mécanisme d'exclueur, i.e. que le Cu reste en partie bloqué dans les racines. Ainsi, les concentrations en Cu dans les racines sont plus élevées que dans la partie aérienne. Les populations non tolérantes ou les moins tolérantes au Cu possèdent donc des concentrations plus élevées dans la partie aérienne que les populations tolérantes (Faucon et al. 2012b). Ces espèces considérées auparavant comme hyperaccumulatrices de Cu n'ont plus d'intérêt pour la phytoextraction malgré des concentrations en Cu > 300 mg/kg dans la partie aérienne de quelques individus *in natura*. Cependant, il a été montré chez *Anisopappus chinensis* (A. c), que l'accumulation du Cu dans la partie aérienne de la plante augmentait vis-à-vis des concentrations en Cu disponibles dans le sol (Figure 3 ; Lange et al. 2015). Comme cette espèce est pérenne et présente en moyenne une biomasse aérienne 40 fois plus élevée que la plupart des espèces pionnières des habitats secondaires (moyenne par individus A. c de 2 g de MS, moyenne espèces annuelles pionnières = 0.05 g), elle constitue une candidate idéale pour la phytoextraction des sols contaminés en Cu et pour la réduction du transfert des métaux lourds par érosion éolienne et hydrique puisqu'elle constitue un couvert permanent pendant les deux saisons et présente un système racinaire fasciculé qui peut atteindre 20 cm de profondeur.

Figure 2 Dispositif expérimental in situ de trois ans d'un essai de phytostabilisation de sols contaminés par les poussières d'une fonderie de cuivre (photo Shutcha, 2012). 16 pieds de *Microchloa altera* ont été plantés par m^2 en 2009 sur le site Penga-Penga contaminé en Cu situé à proximité de la cheminée de la fonderie de la Gécamine à Lubumbashi (Rép. Dém. Congo)

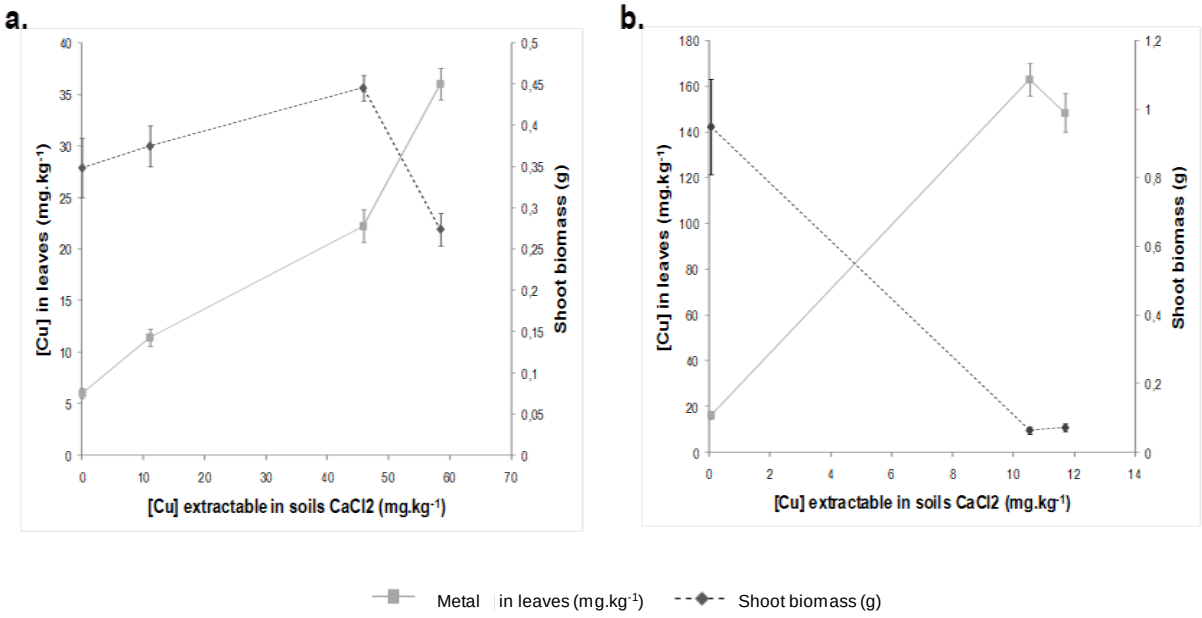

Figure 3 Tolérance et accumulation du cuivre (Lange et al. 2015) a. réponse chez *Anisopappus chinensis* b. réponse chez *Helianthus annuus* (espèce non tolérante au Cu).

Cependant, la phytoextraction de sols extrêmement contaminés comme les sols contaminés par les poussières atmosphériques des fonderies (dont les quantités totales en Cu peuvent atteindre 1 à 10 % de Cu dans le sol) est une utopie ; des milliers d'années seraient nécessaires pour phytoextraire ces sites à partir des hyperaccumulatrices de Cu présentant une productivité de biomasse au m^2 d'environ 20 à 50 g/m^2. La phytoextraction de ces sols contaminés aurait néanmoins un intérêt si elle est associée à une valorisation de la biomasse et des quantités de Cu accumulées dans de nouvelles technologies intégrant le recyclage des métaux à partir de déchets, de sédiments et de sols contaminés (Grison, 2014). La valorisation de certains métaux lourds accumulés dans la biomasse issue d'un procédé de phytoextraction est possible en chimie verte. Il a été démontré que le Zn, Ni, Mn et Cu phytoextraits pouvaient être substitués aux métaux issus de la métallurgie en tant que catalyseur de réactions de synthèse organique de molécules d'intérêt et augmentaient même le rendement de ces réactions (Grison, 2014 ; Grison et al. 2015) (Figure 4). Une des perspectives est de créer des systèmes de production de biomasse présentant des concentrations élevées en Cu qui seraient composés de plusieurs espèces et fonctions afin d'augmenter l'approvisionnement en Cu de cette potentielle nouvelle filière en chimie verte et l'efficacité de la phytoremédiation (i.e. diminuer le risque de transfert des métaux lourds vers d'autres milieux et vers les populations humaines).

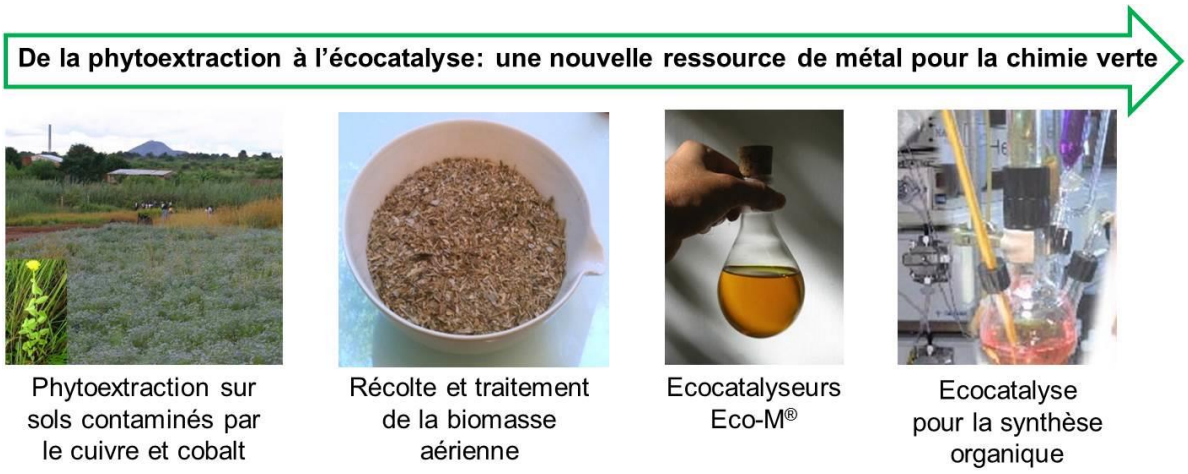

Figure 4 Concept général de la transformation des biomasses des hyperaccumulatrices de métaux en catalyseurs (d'après Grison et al. 2015).

Conclusion

La biodiversité végétale des sols naturellement riches en métaux lourds et de certains sols contaminés par les activités minières et sidérurgiques dans les contextes climatiques où le développement des végétaux est favorable, constitue un patrimoine biologique remarquable et s'assemble en offrant de nombreux services écosystémiques dans la conservation de la biodiversité et la protection des sols et de l'eau. Un des futurs challenges serait de conserver cette biodiversité végétale en créant de nouveaux écosystèmes fonctionnels diversifiés en espèces sur les sols nus contaminés par métaux lourds.

Bibliographie

Asensio, V., Vega, F. A., & Covelo, E. F. 2014. Changes in the Phytoavailability of Nutrients in Mine Soils after Planting Trees and Amending with Wastes. Water, Air, & Soil Pollution, 225(6), 1-13.

Banza, C. L. N., Nawrot, T. S., Haufroid, V., Decrée, S., De Putter, T., Smolders, E., Kabyla, B.I., Luboya, O.S., Ilunga, A.N., Mutombo, A.M. & Nemery, B. 2009. High human exposure to cobalt and other metals in Katanga, a mining area of the Democratic Republic of Congo. Environmental Research, 109(6), 745-752.

Brooks, R.R., Reeves, R.D., Morrison, R.S., Malaisse, F. 1980. Hyperaccumulation of copper and cobalt – A review. Bull Soc Roy Bot Belg 113:166–172

Cheyns, K., Nkulu, C. B. L., Ngombe, L. K., Asosa, J. N., Haufroid, V., De Putter, T., Nawrot, T., Kimpanga, C.M., Numbi, O.L., Ilunga, B.K., Nemery, B. & Smolders, E. 2014. Pathways of human exposure to cobalt in Katanga, a mining area of the DR Congo. Science of The Total Environment, 490, 313-321.

Chipeng, F. K., Hermans, C., Colinet, G., Faucon, M. P., Ngongo, M., Meerts, P., & Verbruggen, N. 2010. Copper tolerance in the cuprophyte Haumaniastrum katangense (S. Moore) PA Duvign. & Plancke. Plant and soil, 328(1-2), 235-244.

Duvigneaud P, Denaeyer- De Smet S. 1963. Cuivre et végétation au Katanga. Bull Soc Roy Bot Belg, 96:92–231.

Escande, V., Olszewski, T. K., & Grison, C. 2014. From biodiversity to catalytic diversity: how to control the reaction mechanism by the nature of metallophytes. Environmental Science and Pollution Research, 1-14.

Faucon, M. P., Shutcha, M. N., & Meerts, P. 2007. Revisiting copper and cobalt concentrations in supposed hyperaccumulators from SC Africa: influence of washing and metal concentrations in soil. Plant and Soil, 301(1-2), 29-36.

Faucon, M. P., Colinet, G., Mahy, G., Luhembwe, M. N., Verbruggen, N., & Meerts, P. 2009. Soil influence on Cu and Co uptake and plant size in the cuprophytes Crepidorhopalon perennis and C. tenuis (Scrophulariaceae) in SC Africa. Plant and soil, 317(1-2), 201-212.

Faucon, M. P., Meersseman, A., Shutcha, M. N., Mahy, G., Luhembwe, M. N., Malaisse, F., & Meerts, P. 2010. Copper endemism in the Congolese flora: a database of copper affinity and conservational value of cuprophytes. Plant Ecology and Evolution, 143(1), 5-18.

Faucon, M. P., Chipeng, F., Verbruggen, N., Mahy, G., Colinet, G., Shutcha, M., Pourret, O., & Meerts, P. 2012a. Copper tolerance and accumulation in two cuprophytes of South Central Africa: Crepidorhopalon perennis and C. tenuis (Linderniaceae). Environmental and Experimental Botany, 84, 11-16.

Faucon, M. P., Tshilong, B. M., Rossum, F., Meerts, P., Decocq, G., & Mahy, G. 2012b. Ecology and hybridization potential of two sympatric metallophytes, the narrow endemic Crepidorhopalon perennis (Linderniaceae) and its more widespread congener C. tenuis. Biotropica, 44(4), 454-462.

Grison, C. 2014. Combining phytoextraction and ecocatalysis: a novel concept for greener chemistry, an opportunity for remediation. Environmental Science and Pollution Research, 1-3. DOI 10.1007/s11356-014-3169-0

Grison, C., Escande, V., Garel, C., Velati, A., Renard, B. L., & Eddy, P. 2015. Phytoextracted mining wastes for Ecocatalysis: Eco-Mn®, an efficient and eco-friendly plant-based catalyst for reductive amination of ketones. Green Chemistry. DOI: 10.1039/C4GC02193B

Ilunga wa Ilunga, E., Séleck, M., Colinet, G., Faucon, M. P., Meerts, P., & Mahy, G. 2013. Small-scale diversity of plant communities and distribution of species niches on a copper rock outcrop in Upper Katanga, DR Congo. Plant Ecology and Evolution, 146(2), 173-182.

Ilunga wa Ilunga, E., Mahy, G., Piqueray, J., Séleck, M., Shutcha, M., Meerts, P., & Faucon, M.P. 2015. Plant functional traits as a promising tool for the ecological restoration of degraded tropical metal-rich habitats and revegetation of metal-rich bare soils: a case study in copper vegetation of Katanga, DRC, accepted in Ecological Engineering.

Lange, B., Pourret, O., Jitaru, P., Meerts, P., Cancès, B., & Faucon, M.P., Copper and cobalt mobility and accumulation in a metallophyte as influenced by experimental manipulation of soil factors. Chemosphere, in press.

Lange, B., Faucon, M. P., Meerts, P., Shutcha, M., Mahy, G., & Pourret, O. 2014. Prediction of the edaphic factors influence upon the copper and cobalt accumulation in two metallophytes using copper and cobalt speciation in soils. Plant and Soil, 379(1-2), 275-287.

Leteinturier, B., Baker, A. J., & Malaisse, F. 1999. Early stages of natural revegetation of metalliferous mine workings in South Central Africa: a preliminary survey. Biotechnologie, agronomie, société et environnement, 3(1), 28-41.

Malaisse F. 1974. Phenology of the Zambezian woodland area with emphasis on the miombo ecosystem. In “Phenology and seasonality modeling”. Springer Berlin Heidelberg, 269-286.

Brooks, R. R., & Malaisse F. 1985. The heavy metal-tolerant flora of southcentral Africa—a multidisciplinary approach. Balkema, Rotterdam,The Netherlands.167p.

McGrath, S. P., Zhao, J., & Lombi, E. 2002. Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides. Advances in Agronomy, 75, 1-56.

Mees, F., Masalehdani, M. N. N., De Putter, T., D’Hollander, C., Van Biezen, E., Mujinya, B. B., Potdevin, J.L.., & Van Ranst, E. 2013. Concentrations and forms of heavy metals around two ore processing sites in Katanga, Democratic Republic of Congo. Journal of African Earth Sciences, 77, 22-30.

Peng, H., Wang-Müller, Q., Witt, T., Malaisse, F., & Küpper, H. 2012. Differences in copper accumulation and copper stress between eight populations of Haumaniastrum katangense. Environmental and Experimental Botany, 79, 58-65.

Pourret, O., Lange, B., Houben, D., Colinet, G., Shutcha, M., & Faucon, M. P. 2015a. Modeling of cobalt and copper speciation in metalliferous soils from Katanga (Democratic Republic of Congo). Journal of Geochemical Exploration, 149, 87-96.

Pourret, O., Lange, B., Bonhoure, J., Colinet, G., Decrée, S., Mahy, G., Séleck, M., Shutcha, M., & Faucon, M. P. 2015b. Assessment of soil metal distribution and environmental impact of mining in Katanga (Democratic Republic of Congo). Applied Geochemistry, in press.

Séleck, M., Bizoux, J. P., Colinet, G., Faucon, M. P., Guillaume, A., Meerts, P., Piqueray, J. & Mahy, G. 2013. Chemical soil factors influencing plant assemblages along copper-cobalt gradients: implications for conservation and restoration. Plant and soil, 373(1-2), 455-469.

Shutcha, M. N., Mubemba, M. M., Faucon, M. P., Luhembwe, M. N., Visser, M., Colinet, G., & Meerts, P. 2010. Phytostabilisation of copper-contaminated soil in Katanga: an experiment with three native grasses and two amendments. International journal of phytoremediation, 12(6), 616-632.

Shutcha, M., Faucon, M.P., Kamengwa Kissi, C., Colinet, G., Mahy, G., Ngongo Luhembwe, M., Visser, M., & Meerts, P. 2015. Three years of phytostabilisation experiment of bare acidic soil extremely contaminated by copper smelting using plant biodiversity of metal-rich soils in tropical Africa (Katanga, DR Congo). Accepted in Ecological Engineering,

van der Ent, A., Baker, A. J., Reeves, R. D., Pollard, A. J., & Schat, H. 2013. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction. Plant and Soil, 362(1-2), 319-334.

Vranken, I., Munyemba Kankumbi, F., Amisi Mwana, Y., Bamba, I., Veroustraete, F., Visser, M., & Bogaert, J. 2013. The spatial footprint of the non-ferrous metal industry in Lubumbashi. Tropicultura, 31(1), 20-27.