

Implications des relations sol-plantes pour la conservation de la biodiversité végétale des sites cuprifères du Katanga face à l'anthropisation

Michel-Pierre Faucon, Soizig Le Stradic, Sylvain Boisson, Edouard Ilunga Wa Ilunga, Bastien Lange, Wilfried Masengo, Mylor Shutcha, Olivier Pourret, Gregory Mahy

► **To cite this version:**

Michel-Pierre Faucon, Soizig Le Stradic, Sylvain Boisson, Edouard Ilunga Wa Ilunga, Bastien Lange, et al.. Implications des relations sol-plantes pour la conservation de la biodiversité végétale des sites cuprifères du Katanga face à l'anthropisation. Bogaert J., Colinet G.

Mahy G. Anthropisation des paysages katangais. Belgique, Presses Universitaires de Liège, 2018. hal-02265970

HAL Id: hal-02265970

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02265970>

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.

3

Implications des relations sol-plantes pour la conservation de la biodiversité végétale des sites cuprifères du Katanga face à l'anthropisation

Michel-Pierre FAUCON, Soizig LE STRADIC, Sylvain BOISSON, Edouard ILUNGA WA ILUNGA, Bastien LANGE, Wilfried MASENGO KALENGA, Mylor NGOY SHUTCHA, Olivier POURRET, Grégory MAHY*

Au Katanga, République Démocratique du Congo, les affleurements métallifères naturels supportent une végétation et une flore (flore du cuivre) uniques recelant des espèces endémiques métalphytes. L'industrie minière endommage sévèrement les écosystèmes et, au-delà de la perte en biodiversité qu'une telle activité entraîne, présente un risque pour la santé publique. De ce fait, la majorité des endémiques métalphytes de la flore du cuivre sont désormais considérées comme des taxa en danger critique d'extinction. Cependant, ces métalphytes 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. La conservation de la diversité végétale des sols riches en métaux nécessite une compréhension fine des relations sol-plantes à différentes échelles (écosystèmes, communautés et populations) afin de définir des stratégies de conservation *in situ* et *ex situ*, et mettre en place le cas échéant des projets de restauration et de réhabilitation de la végétation impactée. Le présent chapitre propose une synthèse des avancées scientifiques concernant la compréhension des relations sol-plantes opérant au niveau des affleurements de roches de Cu et Co, et impliquées dans la conservation de la diversité des communautés, la diversité spécifique et la diversité génétique. Les facteurs chimiques du sol (c'est-à-dire Cu, Co, pH, C, N, Ca, Mn et Fe), et les conditions écologiques qu'ils génèrent, sont essentiels à la structuration des communautés végétales, et leur variation est en partie responsable de l'hétérogénéité de communautés observées à l'échelle d'un affleurement de Cu et Co. Le maintien ou la restauration de ces facteurs du sol est, de ce fait, nécessaire et représente un point crucial pour la reconstruction ou la restauration des communautés végétales des affleurements de cuivre après exploitation. Chaque affleurement doit faire l'objet d'un plan d'action qui lui est propre de par la spécificité des communautés végétales à l'échelle des affleurements individuels. La conservation *ex situ* des espèces individuelles est également un défi du fait de la variation interspécifique des niches édaphiques des endémiques en lien au Cu et Co, mais également

Bogaert J., Colinet G. & Mahy G., 2018. *Anthropisation des paysages katangais*. Gembloux, Belgique : Presses Universitaires de Liège – Agronomie-Gembloux.

aux autres conditions édaphiques. Les résultats présentés dans ce chapitre suggèrent que les stratégies à développer sont spécifiques pour chaque taxon à conserver, en particulier pour rétablir des populations viables dans des habitats restaurés.

The consequences of plant-soil relationships for the conservation of plant biodiversity in copper outcrops in Katanga in a context of anthropization

In the Katanga Province (Democratic Republic of the Congo), natural metalliferous habitats support highly distinctive plant communities and flora (the so-called ‘copper flora’) including a number of endemic metallophyte taxa. These metallophytes are considered key resources for the implementation of green technologies useful for the remediation of soils polluted by metals. The revival of the mineral extraction industry in Katanga threatens these metallophytes, which are now present on the list of most critically endangered plants. It also leads to serious threats to human health. The conservation of plant diversity on metal-rich soils requires an understanding of the soil-plant relationships at different scales (ecosystem, community and population) in order to define *in situ* and *ex situ* conservation strategies. The present chapter proposes a review of advances and perspectives on soil-plant relationships in Cu and Co habitats, and their implications for the conservation of plant communities, species and genetic diversities. Soil chemical factors (i.e. Cu, Co, pH, C, N, Ca, Mn and Fe), and the ecological conditions they generate, are essential to the structure and heterogeneity of plant communities at the scale of an outcrop of Cu and Co. The maintenance or restoration of these soil factors is therefore necessary and represents a crucial point for the reconstruction or restoration of plant communities of copper outcrops after exploitation. Each outcrop must be the subject of an action plan of its own, due to the specificity of the plant communities on the scale of each outcrop. The *ex situ* conservation of individual species remains a challenge because of the interspecific variation of their edaphic niches linked to Cu and Co, but also to other edaphic conditions. The results presented in this chapter suggest that conservation strategies should be developed for each taxon, in particular to restore viable populations in restored habitats.

1. Enjeux de la diversité végétale des sites cuprifères du Katanga

Depuis plusieurs siècles, les botanistes sont fascinés par la diversité végétale associée aux sols métallifères (c’est-à-dire riches en métaux lourds). Les sols métallifères peuvent être d’origine naturelle ou anthropique, c’est-à-dire que leur formation résulte d’activités humaines. Les affleurements métallifères naturels les plus répandus à la surface de la terre sont les affleurements serpentiniques riches en nickel, en fer et en magnésium (Brady et al., 2005), mais il existe aussi des affleurements de fer, de manganèse, de cuivre, de cobalt, d’or et d’autres minerais rares. Ces anomalies géochimiques sont exceptionnelles à la surface de la planète et peuvent atteindre plusieurs grammes de métaux par kilogramme de sol. La toxicité des éléments traces métalliques opère un filtre très sévère sur les espèces, ce qui a pour effet l’élimination de nombreuses espèces intolérantes aux métaux, mais qui, toutes autres conditions étant égales, pourraient croître en ces milieux.

Au Katanga, une province située au sud-est de la République Démocratique du Congo, les affleurements riches en cuivre (Cu) et en cobalt (Co), appelés sites cuprifères, présentent des formations végétales distinctes au sein du paysage (Duvigneaud & Denayer-De Smet, 1963) (Figure 1). Les communautés végétales de ces sites cuprifères

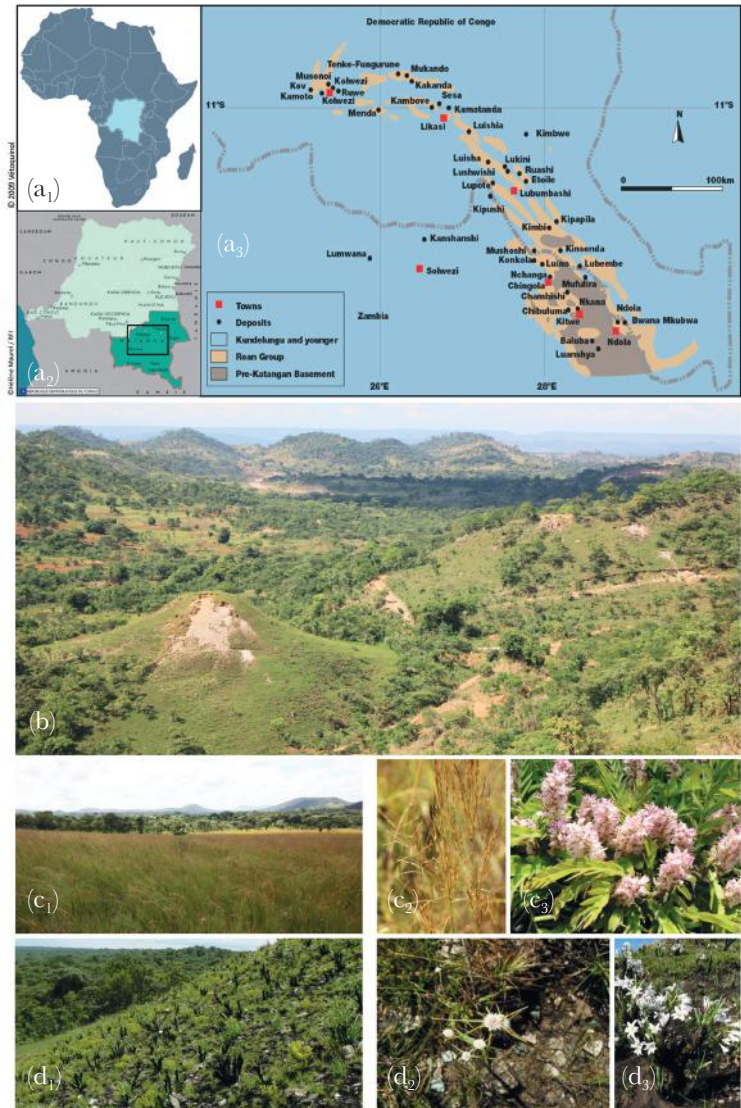


Figure 1. Localisation et paysage des sites cuprifères de l'Arc cuprifère katangais, des communautés végétales principales et de deux de leurs espèces indicatrices. (a) Localisation de la République Démocratique du Congo, du Katanga et de l'Arc cuprifère katangais. (b) Paysage de l'Arc cuprifère katangais avec site cuprifère en avant plan entouré de *Uapaca robynii*. (c₁) Savane steppique. (c₂) *Loudetia simplex*. (c₃) *Cryptosepalum maraviense*. (d₁) Steppe. (d₂) *Asclepis metallorum*. (d₃) *Xerophyta equisetoides*.

hébergent environ 600 espèces constituant la «flore du cuivre» (Malaisse, 1983; <http://copperflora.org/eflora/>). Parmi les gisements de cuivre mondiaux, les sites cuprifères du Katanga sont les seuls connus pour héberger des taxons endémiques stricts (Faucon et al., 2010). On recense 32 taxons endémiques stricts (uniquement sur sols métallifères) et 23 endémiques larges (c'est-à-dire présentant plus de 75 %

des occurrences sur les sols riches en Cu) (Faucon et al., 2010). La proportion d'endémique stricte parmi la flore du cuivre, estimée à 5 %, est considérée comme faible en comparaison des autres flores métallicoles, telle que la flore des sols des serpentines de Californie et d'Italie, qui présentent un taux d'endémisme quatre à cinq fois élevé.

L'exploitation minière altère directement la biodiversité de ces sites cuprifères par l'extraction de minerais (Faucon, 2008; Faucon et al., 2011; Le Stradic et al., 2016). Le Katanga, en raison de son sous-sol riche en métaux et minerais, est en première ligne en ce qui concerne l'exploitation minière. Ainsi, en République Démocratique du Congo, 70 % des taxons endémiques métallifères sont désormais considérés en « danger critique d'extinction » et environ 10 % seraient déjà éteints (Faucon et al., 2010; Faucon et al., 2012a). En outre, le Katanga correspond à l'une des principales régions du monde présentant des problèmes environnementaux et de santé public associés à la contamination par le Cu, le Co et l'U des sols, de l'air et de l'eau, en raison de la forte activité d'extraction opérant dans la région (Banza et al., 2009; Manda et al., 2010; Cheyns et al., 2014). Les surfaces de sols contaminés par les métaux ne cessent d'augmenter en raison de l'activité minière qui a débuté industriellement dans la région au début du xx^e siècle et qui connaît, depuis le début du xxi^e siècle, une forte intensification. Ainsi, un des principaux enjeux est, et sera, de remédier à cette contamination notamment par le développement de procédés de phytoremédiation innovants à partir de la diversité végétale des affleurements cuprifères (Boisson et al., 2015). De par son aptitude à tolérer et accumuler les métaux, la flore métallicole représente une ressource biologique remarquable, à la fois scientifiquement intéressante et précieuse pour de nombreuses applications écotechnologiques dans la phytoremédiation des sols contaminés : il est donc essentiel de conserver ce patrimoine biologique (Whiting et al., 2004). Leur implication en écotechnologie est accentuée par la valorisation en chimie verte des métaux (Zn, Ni, Pt, Cu, Co et Mn) issus de la biomasse des métallophytes hyperaccumulatrices comme catalyseurs des réactions de synthèse organique de molécules d'intérêt (Losfeld et al., 2012; Grison, 2014).

Les communautés végétales des sites cuprifères sont peu, voire pas, résilientes aux perturbations anthropiques fortes, telles que l'extraction de minerais, qu'elle soit faite de façon artisanale ou industrielle. En comparant, en termes de composition d'espèces et/ou d'abondance de traits fonctionnels, les communautés végétales primaires des affleurements de cuivre et les communautés végétales secondaires issues de la recolonisation de zones perturbées (c'est-à-dire de zones de remaniement des substrats miniers et des dépôts de déchets miniers) ou les communautés issues de translocations de sols et de carpettes de végétation, aucun signe de résilience des communautés primaires n'a été mis en évidence même après 30 ans (Faucon et al., 2011; Ilunga Wa Ilunga et al., 2015; Le Stradic et al., 2016).

Il est donc urgent de développer des mesures de conservation et des projets de restauration de la biodiversité des affleurements de cuivre et de cobalt au Katanga. Les connaissances des processus écologiques et biogéochimiques qui régissent les écosystèmes, les communautés et les populations sont fondamentales pour définir et appliquer la restauration écologique à des habitats dégradés (Palmer et al., 1997). Dans le cas des écosystèmes métallifères, on s'attend à ce que la variation des condi-

tions chimiques du sol soit le principal facteur de structuration de la diversité végétale, et cette variation devrait être prise en compte pour recréer les conditions adéquates de croissance des espèces et des assemblages d'espèces dans les programmes de conservation, de restauration et de phytostabilisation.

Le présent chapitre propose une synthèse des avancées et perspectives des études récentes ayant examiné les relations sol-plantes au sein des habitats des sites cuprifères du Katanga, aux différents niveaux de la biodiversité : diversité des communautés végétales, diversité spécifique, variation des niches écologiques des espèces et variabilité intraspécifique des traits adaptatifs. Les implications pour la conservation de cette flore exceptionnelle sont mises en avant.

2. Structuration de la diversité végétale des gisements de cuivre en lien avec les conditions édaphiques

2.1. Variation des assemblages d'espèces des sites cuprifères

La physionomie générale de la végétation des affleurements de cuivre se présente sous forme d'une succession de formations végétales du haut vers le bas de l'affleurement métallifère (Figure 2) : au sommet, une communauté d'espèces chasmophytiques sur des blocs de roche siliceuse cellulaire peu minéralisés (concentration en Cu extrait à l'EDTA entre 250 et 900 mg.kg⁻¹), suivie d'une steppe sur la partie supérieure des affleurements où les concentrations en Cu sont les plus fortes (3 500-10 000 mg.kg⁻¹) et une savane steppique au pied de la colline avec des concentrations en Cu moindres (100-3 500 mg.kg⁻¹) (appelée aussi *dembo* d'empoisonnement) (Duvigneaud & Denayer-De Smet, 1963; Brooks et al., 1985). La végétation du cuivre s'est, en fait, révélée être plus complexe qu'une simple succession de formations végétales le long d'un gradient de contamination. En effet, trois études plus fines ont mis en évidence une mosaïque de communautés à la fois au sein de et entre les sites (Saad et al., 2012; Ilunga Wa Ilunga et al., 2013; Séleck et al., 2013). Sur trois sites, Séleck et al. (2013) ont identifié sept communautés végétales différentes (Figure 3) dont six sont quasi uniques à un seul site. La spécificité floristique des sites peut être due à leur isolement géographique, entraînant une colonisation aléatoire à partir d'un pool régional d'espèces. Une diversité bêta (entre sites) élevée a aussi été observée à l'échelle régionale entre taches d'habitats serpentines (Harrison et al., 2004).

Les gradients marqués en Cu et Co extractibles du sol sont les principales variables chimiques du sol qui sont corrélées à la variation floristique des communautés végétales au sein des sites. D'autres facteurs chimiques du sol, tels que le pH, C, Ca et Mn, contribuent également à la variation floristique et à l'hétérogénéité des communautés végétales au sein et entre affleurements de cuivre (Saad et al., 2012; Ilunga Wa Ilunga et al., 2013; Séleck et al., 2013). Ces facteurs du sol influencent la disponibilité et donc la toxicité du Cu et du Co (Lange et al., 2014; Pourret et al., 2015). Le Co, par exemple, présente une affinité élevée pour les oxydes de Mn qui pourraient diminuer sa disponibilité et sa toxicité (Collins & Kinsela, 2011). De la même manière, de fortes concentrations d'oxydes de Fe et de matière organique dans le sol peuvent réduire la disponibilité du Cu et donc sa toxicité (Kabala & Singh, 2001). Les steppes, situées sur la partie supérieure des affleurements

(c'est-à-dire, où les concentrations en Cu sont les plus élevées), présentent des valeurs plus élevées de pH, des concentrations en C, N, Zn, Ca, P plus fortes, des valeurs C:N moindres et des concentrations en Fe et K plus faibles que pour les savanes steppiques situées en bas de versant où les concentrations en Cu sont moins élevées.



Figure 2. (a) (b) et (c) Vue générale de trois affleurements de Cu et Co au Katanga (République Démocratique du Congo) isolés géographiquement dans le paysage katangais dominé par la forêt claire du *miombo* sur les sols non métallifères; (d) Végétation chasmophytique de sommet d’affleurement; (e) et (f) Steppes sur sols avec de fortes teneurs en Cu; (g) Savane steppique de pente et (h) Savane steppique de bas de pente, ou *dembo* d’empoisonnement, où les teneurs en Cu sont moindres.

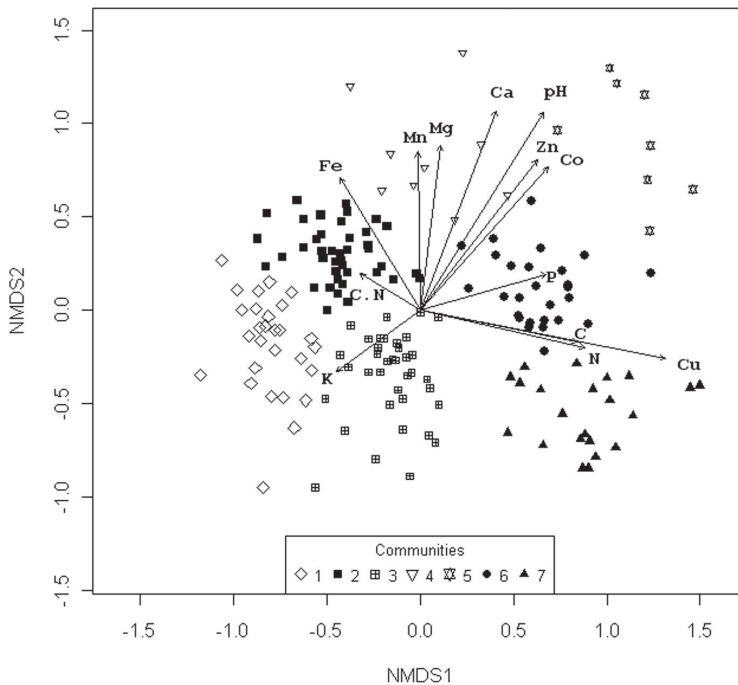


Figure 3. Diagramme d'ordination des relevés de végétation ($n=172$) distribués dans sept communautés végétales et associés aux facteurs du sol (Séleck et al., 2013). Savanes steppiques : 1 : sur Kavifwafwaulu ; 2 : sur Fungurume V nord ; 3 : sur Kazinyanga. Steppes : 4 : transition sur Fungurume V nord ; 5, 6 : steppe sur Fungurume V nord ; 7 : steppe sur Kavifwafwaulu et Kazinyanga.

2.2. Variation de la richesse spécifique des sites cuprifères

Les steppes, où les concentrations en Cu et Co sont les plus élevées, accueillent la richesse en endémiques la plus élevée (Séleck et al., 2013). Ces endémiques tolèrent des conditions phytotoxiques extrêmes, et sont essentiellement associées aux sols les plus riches en Cu et en Co (Faucon et al., 2009; Faucon et al., 2012b). Cette particularité confère aux communautés végétales steppiques une valeur biologique élevée, et leur conservation est de ce fait prioritaire.

À l'échelle du paysage, d'autres facteurs, tels que des paramètres spatiaux (par exemple la surface du site ou la distance géographique entre les sites), influencent également les richesses en espèces et en endémiques sur sites cuprifères. Basée sur la théorie de la biogéographie insulaire, une étude récente de 34 sites cuprifères, de surface (0,2 ha à 27,3 ha) d'isolement géographique variable dans un paysage de 30×20 km, a démontré que la richesse en endémiques est positivement corrélée à la surface des sites, ce qui peut résulter d'une plus grande diversité d'habitats. L'utilisation de courbes d'accumulation a démontré que les trois plus grands affleurements (sur 34) hébergeaient l'ensemble des 25 espèces endémiques présentes dans le paysage, alors

que les 15 plus petits affleurements étaient nécessaires à atteindre la même richesse spécifique. Ces résultats démontrent l'importance des grands sites cuprifères dans la conservation de la richesse des endémiques des affleurements de cuivre.

2.3. Variation des niches édaphiques des taxons des affleurements riches en cuivre et cobalt

Les optima et amplitudes des niches écologiques des endémiques métallophytes du Katanga et des espèces structurantes des communautés végétales des sites cuprifères varient fortement, d'une espèce à l'autre, le long des gradients de Cu et de Co (Faucon et al., 2011 ; Faucon et al., 2012a ; Ilunga Wa Ilunga et al., 2013 ; Boisson et al., 2016a ; Boisson et al., 2016b). Pour le Cu, la tolérance s'étalonne de 50 à 11 000 mg.kg⁻¹ de sol et pour le Co de 4 à 1 500 mg.kg⁻¹ de sol. Dans une étude de modélisation des niches écologiques de 80 espèces de la flore du cuivre, Boisson (2016c) a montré que les amplitudes écologiques se répartissent régulièrement le long des gradients de contamination. Toutefois, les optimums écologiques montrent une ségrégation nette en trois groupes d'espèces : optimum aux plus hautes concentrations en Cu/Co, optimum aux plus basses concentrations en Cu/Co, optimum dans la gamme intermédiaire de concentrations en Cu/Co.

En comparant l'endémique stricte *Crepidiorhopalon perennis* (P.A.Duvign.) Eb.Fisch. (Linderniaceae) avec sa congénère pseudométallophyte *C. tenuis* (S.Moore) Eb.Fisch., Faucon et al. (2011) et Faucon et al. (2012a) ont montré que l'endémique occupait les sols les plus riches en Cu induisant un isolement écologique qui aurait participé au processus de spéciation écologique de cette espèce. Boisson et al. (2016a) ont montré que, parmi huit endémiques, six espèces ont des optima écologiques dans des concentrations de cobalt inférieures à 100 mg.kg⁻¹ et que seules deux espèces ont des optima écologiques supérieurs à 3 000 mg.kg⁻¹ de Cu dans le sol. L'amplitude écologique des endémiques *in situ* (en réponse aux concentrations en Cu ou Co) détermine leur besoin en cuivre pour la culture en conditions contrôlées (Boisson et al., 2016d). Par exemple, *Crotalaria cobalticola* P.A.Duvign. & Plancke, dont l'optimum écologique se situe dans les plus hautes concentrations sur le terrain (>10 000 mg.kg⁻¹ Cu de sol), présente une croissance supérieure dans des sols contaminés expérimentalement en Cu par rapport à des sols non contaminés alors que *Triumfetta welwitschii* var. *rogersii* (N.E.BR.) Brummitt & Seyani, qui présente un optimum *in situ* dans de plus basses concentrations (2 000 mg.kg⁻¹ Cu de sol), montre une meilleure croissance sur des sols de culture non contaminés (Figure 4). De plus, l'influence du cuivre dépend du stade de développement tel que démontré par des tests de germination chez quatre espèces des genres *Crotalaria* et *Diplolophium*, ces variations interstades étant propres à chaque espèce (Boisson et al., 2016e ; Boisson et al., 2017).

2.4. Variation des traits fonctionnels en relation aux propriétés des sols

Parmi la flore du Katanga, seul un petit nombre d'espèces peuvent s'établir sur les affleurements de Cu et Co. Le filtre environnemental induit par les conditions édaphiques phytotoxiques de ces habitats sélectionne uniquement les espèces capables de s'établir sur ces milieux limitants, car présentant des traits particuliers telle que la

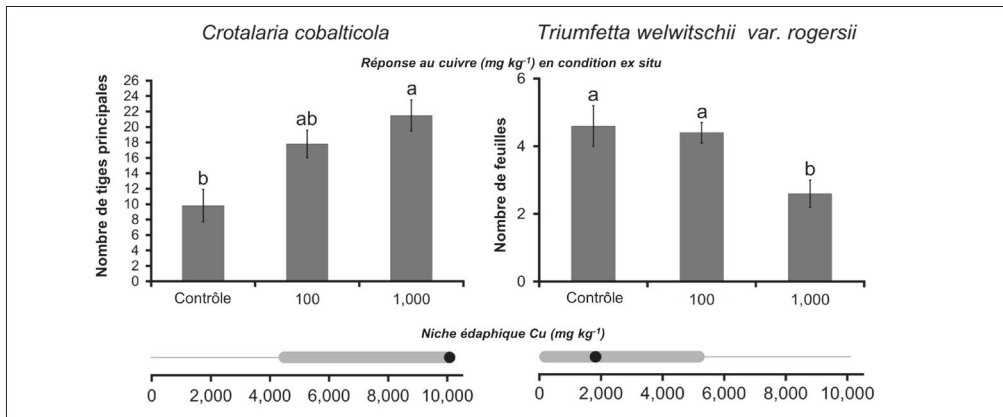


Figure 4. Réponse de *Crotalaria cobalticola* et *Triumfetta welwitschii* var. *rogersii* aux concentrations en Cu en culture (histogramme) et amplitude écologique en populations naturelles (graphe horizontal). Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes. L'amplitude écologique des espèces en réponse aux concentrations en Cu ont été modélisée par la méthode GAM. La ligne pleine représente l'amplitude écologique et le point l'optimum écologique.

tolérance au Cu et au Co, à la sécheresse et aux feux saisonniers, ainsi que pour certaines espèces un besoin nutritionnel en Cu élevé (Chipeng et al., 2009; Faucon et al., 2012a). Les concentrations en Cu et Co dans le sol impliquent des réponses variées sur différents traits selon l'espèce. Delhay et al. (2016) ont montré que les concentrations croissantes de métal privilégient le remplacement d'espèce par rapport à la variation intraspécifique, ce qui signifie que les espèces de ces habitats présentent une faible plasticité phénotypique. À l'échelle des communautés, la variation des traits se traduit par un changement dans les abondances des différentes formes de vie. Les espèces à xylopoies (organes de réserve souterrain) sont dominantes dans les communautés de bas de pente, sur des sols plus profonds et moins riches en métal, alors que les annuelles sont dominantes dans les communautés supérieures des affleurements sur des sols plus superficiels et très enrichis (Meerts, 2012; Delhay et al., 2016).

Même si les priorités de conservation sont définies en partie sur base de la rareté et la menace d'extinction des espèces, la stratégie de conservation de la flore du cuivre doit aussi intégrer la conservation de la diversité génétique au sein des espèces. En effet, il a été montré qu'une variation génétique de certains traits adaptatifs existe entre les populations d'une même espèce présentes sur les sols riches en Cu et en Co. Une variation génétique interpopulationnelle de la tolérance et de l'accumulation du Cu a été démontrée chez deux pseudométallophytes, *Crepidiorhopalon tenuis* et *Haumaniastrum katangense* (Faucon et al., 2012b; Peng et al., 2012). Cette variabilité génétique constitue une opportunité en ingénierie écologique pour définir et ajuster différents procédés de phytoremédiation (phytoextraction ou phytostabilisation) en regard de la variabilité des sites et sols tropicaux contaminés par les métaux lourds, des problèmes environnementaux et des possibilités de valorisation économique de la biomasse végétale produite.

3. Implications pour la conservation de la flore du cuivre

La première stratégie à développer pour conserver la flore du cuivre et son potentiel écotecnologique viserait à la mise en protection d'un ensemble d'affleurements représentatifs de la diversité végétale des sites de l'Arc cuprifère. Comme démontré à l'échelle du paysage, la protection d'un nombre limité de sites de surfaces importantes sélectionnés sur base de critères objectifs permettrait de recouvrir la diversité en espèces endémiques. Un réseau de zones protégées devrait aussi idéalement recouvrir la diversité écosystémique de l'habitat visé. La grande variation des communautés végétales observée entre sites demanderait dans ce cas la mise en protection d'un nombre important d'affleurements, ce qui est irréaliste au vu des enjeux socio-économiques liés à l'extraction des minerais au Katanga.

D'autres approches de conservation ont donc été récemment testées pour préserver le patrimoine biologique des affleurements de cuivre, telle que la reconstruction des communautés végétales par transfert de top-sol ou de carpettes de végétation associée à la translocation d'individus (Le Stradic et al., 2016), et la conservation *ex situ* via des banques de graines des espèces les plus caractéristiques, la multiplication d'espèces en pépinière ou encore via la conservation de certaines espèces en jardin botanique (Boisson et al., 2016d; Copperflora.org).

Toutes ces approches demandent de prendre en compte la diversité des relations sol-plantes mises en avant dans les différentes études recensées dans ce chapitre. Les facteurs chimiques du sol (c'est-à-dire pH, C, N, Ca, Mn et Fe) et les conditions écologiques qu'ils génèrent sont essentiels à la structuration des communautés végétales, et leur variation est en partie responsable de l'hétérogénéité des communautés observées à l'échelle d'un affleurement de Cu et Co. Le maintien ou la restauration de ces facteurs du sol est, de ce fait, nécessaire et représente un point crucial pour la reconstruction ou la restauration des communautés végétales des affleurements de cuivre après exploitation. Chaque affleurement doit faire l'objet d'un plan d'action qui lui est propre du fait de la spécificité des communautés végétales à l'échelle des affleurements individuels. La conservation *ex situ* des espèces individuelles est également un défi du fait de la variation interspécifique des niches édaphiques des endémiques en lien au Cu et au Co, mais également aux autres conditions édaphiques. Les résultats présentés dans ce chapitre suggèrent que les stratégies à développer sont spécifiques pour chaque taxon à conserver, en particulier pour rétablir des populations viables dans des habitats restaurés.

Bibliographie

- Banza C.L.N. et al., 2009. High human exposure to cobalt and other metals in Katanga, a mining area of the Democratic Republic of Congo. *Environ. Res.*, **109**(6), 745-52.
- Boisson S. et al., 2015. Concilier la phytostabilisation des sols pollués avec la conservation de la flore cupro-cobalticole dans la région de Lubumbashi : une stratégie nouvelle pour valoriser les écosystèmes extrêmes ? In: Bogaert J. & Halleux J.M., 2015. *Territoires périurbains. Développement, enjeux et perspectives dans les pays du Sud*. Gembloux, Belgique : Les Presses agronomiques de Gembloux.

- Boisson S. et al., 2016a. Edaphic niches of metallophytes from southeastern Democratic Republic of Congo: Implications for post-mining restoration. *J. Nat. Conserv.*, **33** (2016), 18-24.
- Boisson S. et al., 2016b. Potential of copper-tolerant grasses to implement phytostabilisation strategies on polluted soils in South D.R. Congo. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **23**, 13 693-13 705.
- Boisson S., 2016c. Caractérisation de la niche édaphique des espèces cupro-cobalticoles du Katanga (R.D. Congo) en vue de leur conservation et de leur valorisation dans des stratégies de phytostabilisation. PhD Thesis. Université de Liège, Gembloux Agro-Bio tech.
- Boisson S. et al., 2016d. No copper required for germination of an endangered endemic species from the Katangan Copperbelt (Katanga, D.R. Congo): *Diplophium marthozianum*. *Trop. Ecol.*, **58**, 193-198.
- Boisson S. et al., 2016e. Copper tolerance of three *Crotalaria* species from southeastern D.R. Congo at the early development stage. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **20**(2), 151-160.
- Boisson S. et al., 2017. Specialized edaphic niches of threatened copper endemic plant species in the D.R. Congo: implications for *ex situ* conservation. *Plant Soil*, DOI 10.1007/s11104-016-3095-7
- Brady K.U., Kruckeberg A.R. & Bradshaw Jr. H.D., 2005. Evolutionary ecology of plant adaptation to serpentine soils. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **36**(1), 243-266.
- Brooks R.R. & Malaisse F., 1985. *The heavy metal tolerant flora of Southcentral Africa: a multidisciplinary approach*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Cheyns K. et al., 2014. Pathways of human exposure to cobalt in Katanga, a mining area of the D.R. Congo. *Sci. Total Environ.*, **490**, 313-321.
- Chipeng F.K. et al., 2009. Copper tolerance in the cuprophyte *Haumaniastrum katangense* (S. Moore) P.A. Duvign. & Plancke. *Plant Soil*, **328**(1-2), 235-244.
- Collins R.N. & Kinsela A.S., 2011. Pedogenic factors and measurements of the plant uptake of cobalt. *Plant Soil*, **339**(1), 499-512.
- Delhaye G. et al., 2016. Community variation in plant traits along copper and cobalt gradients. *J. Veg. Sci.*, **27**, 854-864.
- Duvigneaud P. & Denaeyer-De Smet S., 1963. Cuivre et végétation au Katanga [Copper and vegetation in Katanga]. *Bull. Soc. Roy. Bot. Belg.* Travaux du Centre scientifique et médical de l'Université libre de Bruxelles en Afrique centrale, **96**, 93-224.
- Faucon M.-P., 2008. Conservation du patrimoine biologique du Katanga : Initiation d'un programme de conservation de la biodiversité des affleurements naturels de cuivre. *EchoSud*, **18**, 6-7.
- Faucon M.-P. et al., 2009. Soil influence on Cu and Co uptake and plant size in the cuprophytes *Crepidiorhapon perennis* and *C. tenuis* (Scrophulariaceae) in SC Africa. *Plant Soil*, **317**(1-2), 201-212.
- Faucon M.-P. et al., 2010. Copper endemism in the Congolese flora: a database of copper affinity and conservational value of cuprophytes. *Plant Ecol. Evol.*, **143**(1), 5-18.
- Faucon M.-P. et al., 2011. May rare metallophytes benefit from disturbed soils following mining activity? The case of the *Crepidiorhapon tenuis* in Katanga (D.R. Congo). *Restor. Ecol.*, **19**(3), 333-343.
- Faucon M.-P. et al., 2012a. Copper tolerance and accumulation in two cuprophytes of South Central Africa: *Crepidiorhapon perennis* and *C. tenuis* (Linderniaceae). *Environ. Exp. Bot.*, **84**, 11-16.
- Faucon M.-P. et al., 2012b. Ecology and hybridization potential of two sympatric metallophytes, the narrow endemic *Crepidiorhapon perennis* (Linderniaceae) and its more widespread congener. *Biotropica*, **44**(4), 454-462.

- Grison C., 2014. Combining phytoextraction and ecocatalysis: a novel concept for greener chemistry, an opportunity for remediation. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 1-3.
- Harrison S., Safford H. & Wakabayashi J., 2004. Does the age of exposure of serpentine explain variation in endemic plant diversity in California? *Int. Geol. Rev.*, **46**(3), 235-242.
- Ilunga Wa Ilunga E. et al., 2013. Small-scale diversity of plant communities and distribution of species niches on a copper rock outcrop in Upper Katanga, D.R. Congo. *Plant Ecol. Evol.*, **146**(2), 173-182.
- Ilunga Wa Ilunga E. et al., 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. *Ecol. Eng.*, **82**, 214-221.
- Kabala C. & Singh B.R., 2001. Fractionation and mobility of copper, lead, and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter. *J. Environ. Qual.*, **30**(2), 485-492.
- Lange B. et al., 2014. Prediction of the edaphic factors influence upon the copper and cobalt accumulation in two metallophytes using copper and cobalt speciation in soils. *Plant Soil*, **379**(1-2), 275-287.
- Le Stradic S. et al., 2016. Comparison of translocation methods to conserve metallophyte communities in southeastern D.R. Congo. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **23**(14), 13 681-13 692.
- Losfeld G. et al., 2012. The chemical exploitation of nickel phytoextraction: an environmental, ecologic and economic opportunity for New Caledonia. *Chemosphere*, **89**(7), 907-910.
- Malaisse F., 1983. Phytogeography of the copper and cobalt flora of Upper Shaba (Zaire), with emphasis on its endemism, origin and evolution mechanisms. *Bothalia*, **14**, 497-504.
- Manda B., Colinet G. & André L., 2010. Évaluation de la contamination de la chaîne trophique par les éléments traces (Cu, Co, Zn, Pb, Cd, U, V et As) dans le bassin de la Lufira supérieure (Katanga). *Tropicultura*, **28**(4), 246-252.
- Meerts P., 2012. Écologie et biogéochimie des affleurements métallifères du Katanga. *Bull. Séances Acad. R. Sci. Outre-Mer*, **58**, 301-314.
- Palmer M.A., Ambrose R.F. & Poff N.L.R., 1997. Ecological theory and community restoration ecology. *Restor. Ecol.*, **5**(4), 291-300.
- Peng H. et al., 2012. Differences in copper accumulation and copper stress between eight populations of *Haumaniastrum katangense*. *Environ. Exp. Bot.*, **79**, 58-65.
- Pourret O. et al., 2015. Modeling of cobalt and copper speciation in metalliferous soils from Katanga (Democratic Republic of Congo). *J. Geochemical Explor.*, **149**, 87-96.
- Saad L. et al., 2012. Investigating the vegetation-soil relationships on the copper-cobalt rock outcrops of Katanga (D.R. Congo), an essential step in a biodiversity conservation plan. *Restor. Ecol.*, **20**(3), 405-415.
- Séleck M. et al., 2013. Chemical soil factors influencing plant assemblages along copper-cobalt gradients: implications for conservation and restoration. *Plant Soil*, **373**(1/2), 455-469.
- Whiting S.N. et al., 2004. Research priorities for conservation of metallophyte biodiversity and their potential for restoration and site remediation. *Restor. Ecol.*, **12**(1), 106-116.