

# 10 | 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 ?

Sylvain BOISSON, Julien COLLIGNON, Serge LANGUNU, Julie LEBRUN, Mylor Ngoy SHUTCHA, Grégory MAHY

En parallèle avec le développement économique, les villes tropicales s'étendent depuis la zone urbaine créant une partie distincte, la zone périurbaine. Au Katanga (République Démocratique du Congo), les activités minières ont des impacts non négligeables sur la santé des populations humaines et l'environnement dans ces zones. Cependant, les espèces végétales vivant naturellement sur les gisements cupro-cobaltifères présentent une haute valeur conservatoire et un intérêt potentiel en réhabilitation des sites pollués en éléments traces métalliques. Cette étude vise à évaluer la possibilité de concilier la conservation de deux espèces métallicoles (*Crotalaria cobalticola* et *Anisopappus davyi*) avec la phytostabilisation. L'établissement des deux espèces a donc été évalué de la graine à la plantule dans une zone périurbaine polluée et un site témoin phytostabilisé par la graminée *Microchloa altera*. Le taux de levée, la survie et la croissance ont été analysés en fonction de la présence du couvert végétal et du type d'amendement (calcium et matière organique). Les résultats soulignent l'importance et la nécessité de la couverture végétale dans le succès d'établissement des plantules des deux espèces.

## **Combining the phytostabilisation of the polluted soils with the conservation of the copper-cobalt flora in Lubumbashi: a new strategy to valorise extreme ecosystems?**

Tropical cities extend from the urban area in parallel with their economic growth, delimiting a distinct section, the periurban area. In Katanga (Democratic Republic of the Congo), the human health of populations and the environment are threatened by mining activities in these specific areas. Species occurring naturally on copper-cobalt outcrops have a high conservation value and a potential interest in the rehabilitation of sites polluted with trace metals. This study aims to evaluate the success of the combination of the conservation of two copper-cobalt tolerant species (*Crotalaria cobalticola* and *Anisopappus davyi*) with phytostabilisation strategies. The establishment of two species from seed to seedling was analyzed in one site in a polluted periurban area and one control site; both were phytostabilized with the grass *Microchloa altera*. The rate of emergence, the survival and the growth of plants were compared according to the presence of *M. altera* and amendments (calcium and organic matter). The results highlighted the importance and necessity of the grass cover to the success of seedling establishment of the two studied species.

### **10.1. INTRODUCTION**

L'Homme et ses activités industrielles transforment drastiquement le paysage et les écosystèmes de la Terre (Vitousek, 1997; Comín, 2010; Bogaert et al., 2014). Tandis que l'urbanisation, l'intensification de l'agriculture et l'industrialisation ont profondément marqué le paysage de l'hémisphère nord au 20<sup>e</sup> siècle, ces changements se produisent maintenant avec le développement de la plupart des pays du Sud. La croissance démographique et économique

Bogaert J. & Halleux J.M., 2015. *Territoires périurbains. Développement, enjeux et perspectives dans les pays du Sud*. Gembloux, Belgique : Presses agronomiques de Gembloux.

d'une ville dépend de l'urbanisation et de l'industrialisation en perpétuelle interaction (Quigley, 2009). En s'étendant par la périphérie, une ville voit sa zone rurale colonisée par des éléments urbains formant une nouvelle zone aux caractéristiques propres appelée « périurbaine » (André et al., 2014). Cette zone, souvent moins organisée et moins densément peuplée que la zone urbaine, présente des surfaces agricoles et industrielles plus importantes (Ravetz et al., 2013).

En Afrique centrale, la ville de Lubumbashi est située au centre de l'Arc cuprifère dans la partie katangaise (République Démocratique du Congo). Cette région contient des gisements de cuivre (Cu) et de cobalt (Co) parmi les plus importants au monde associés avec d'autres minerais (Cailteux et al., 2005 ; Kampunzu et al., 2009). Ces ressources naturelles ont été exploitées de manière artisanale pendant plusieurs siècles mais la période coloniale a fortement bouleversé ces activités en industrialisant les processus de production (UMHK, 1956). Notamment, plusieurs sites d'exploitation et de transformation ont été créés dans la région au 20<sup>e</sup> siècle, dont l'usine de la GECAMINES qui a développé la ville de Lubumbashi (Prasad, 1989). Pendant plusieurs dizaines d'années, l'extraction chimique des métaux a conduit à la contamination des sols et des eaux environnants par la retombée de particules métallifères à l'ouest de la ville (cône de pollution) due aux vents dominants (UMHK, 1956 ; Shutcha et al., 2010). L'urbanisation a amené des habitants à s'installer dans ces zones polluées situées en périphérie de la zone urbaine où la végétation est fortement fragmentée à cause de la présence d'éléments traces métalliques dans l'air, l'eau et le sol (Manda et al., 2010 ; Shutcha et al., 2010 ; Vranken et al., 2013). Aujourd'hui, les habitants et les animaux de ces zones présentent dans leurs tissus des teneurs en cobalt et en cuivre anormalement élevées comparativement aux standards internationaux (Banza et al., 2009). Les voies d'expositions sont principalement l'eau, les particules dans le sol, et la consommation de fruits et de légumes contaminés (Shutcha et al., 2010 ; Mpundu Mubemba Mulambi et al., 2013 ; Cheyns et al., 2014).

Afin de remédier aux problèmes d'exposition aux métaux à Lubumbashi, une étude récente a proposé d'utiliser des végétaux locaux afin de diminuer la dispersion des éléments traces métalliques dans le sol, l'eau et l'air (Shutcha et al., 2010). Cette technique, la phytostabilisation, présente l'avantage d'être peu coûteuse, facile d'entretien et favorable pour le paysage, contrairement aux méthodes chimiques et physiques (Berti et al., 2000). Elle demande cependant l'utilisation d'espèces tolérantes aux métaux présents dans le sol et ayant, entre autres, une bonne couverture du sol.

Sur les affleurements métallifères du Katanga, une flore de plus de 550 espèces végétales, appelées métalphytes, est adaptée à des conditions environnementales extrêmes (Duvigneaud et al., 1963 ; Leteinturier, 2002). Dans cet écosystème, les teneurs disponibles en cuivre et en cobalt du sol dépassent respectivement les 10 000 mg/kg et 1 000 mg/kg, soit environ 100 fois plus élevées que les sols de la région (Leteinturier, 2002). Parmi ces espèces, une cinquantaine est présente dans plus de 75 % des cas sur des sites naturellement contaminés en métaux, qualifiés d'endémiques (Faucon et al., 2010) et certaines présentent un intérêt scientifique (Chipeng et al., 2009 ; Faucon et al., 2012), par exemple les (hyper)accumulatrices de métaux (<http://copperflora.org/a-unique-flora.php>) (Leteinturier, 2002 ; Faucon et al., 2009 ; Lange et al., 2014).

Néanmoins, l'intensification des activités minières d'extraction aura, jusqu'à la fin de l'exploitation, des impacts irrémédiables sur cette végétation unique au monde. Aujourd'hui, plus de 65 % des espèces endémiques sont en danger critique d'extinction selon les critères de l'UICN et 9 % se sont déjà éteintes (Faucon et al., 2010). Dans un effort de conservation de ces

espèces, plusieurs études ont mis en évidence les relations entre les communautés végétales, les espèces et les éléments du sol (Saad et al., 2012; Ilunga wa Ilunga et al., 2013; Séleck et al., 2013). Cependant, aucun test n'a été effectué sur l'usage des espèces endémiques d'intérêt scientifique en stabilisation et en réhabilitation de sols pollués dans un contexte urbanisé. Ce type d'approche permettrait d'établir une dynamique de développement durable dans les zones périurbaines et polluées d'une ville tropicale issue d'un contexte minier.

Dans ce cadre, la présente étude vise à tester une nouvelle approche qui consiste à combiner la phytostabilisation des sols pollués et la conservation d'espèces cupro-cobalticoles endémiques et d'intérêt scientifique dans une zone périurbaine et polluée de la ville de Lubumbashi (Katanga). Deux espèces d'intérêt ont été semées en 2013 dans des parcelles mises en place en 2009, présentant deux types de traitements (couverture végétale; amendement), et situées dans deux sites de la ville de Lubumbashi : un site contrôle et un site localisé dans le cône de pollution. Leur germination et leur développement ont été suivis jusqu'au stade plante afin d'évaluer leur installation dans les sites.

## 10.2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 10.2.1. Espèces étudiées

Deux espèces métallophiles d'intérêt conservatoire des sites cuprifères du Katanga ont été sélectionnées. *Crotalaria cobalticola* P.A. Duvign. & Plancke est une Fabaceae annuelle endémique stricte des sites cuprifères du Katanga dont le statut UICN est « en danger » (EN). Elle est identifiée comme une hyperaccumulatrice de cobalt avec un maximum d'accumulation d'environ 3000 mg/kg MS dans les tissus (Duvigneaud et al., 1959; Brooks et al., 1987) (Copperflora : [http://copperflora.org/eflora/species.php?id\\_e=76](http://copperflora.org/eflora/species.php?id_e=76)). *Anisopappus davyi* S.Moore est une Asteraceae vivace identifiée comme une hyperaccumulatrice de cuivre et de cobalt (Brooks et al., 1987) (Copperflora : [http://copperflora.org/eflora/species.php?id\\_e=13](http://copperflora.org/eflora/species.php?id_e=13)). Pour chacune des espèces, trois populations de graines ont été collectées entre 2010 et 2011 dans l'Arc cuprifère katangais entre Tenke et Fungurume puis stockées à la banque de graines de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Lubumbashi (Tableau 10.1). Les populations de graines ont été conservées à une humidité relative de 2-5 % et à température ambiante.

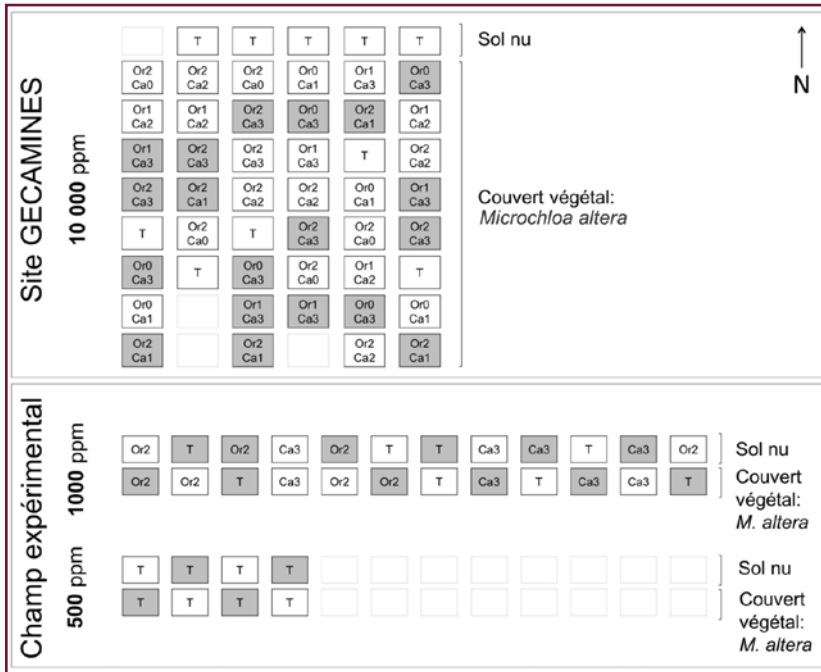
**Tableau 10.1.** Caractéristiques des accessions utilisées dans les mélanges de graines des deux espèces. R = Réfrigération (T°C = 5°C, H.R. ambiante); U = Ultraséchage (T°C = 25°C, H.R. < 5 %). Les dates sont exprimées en jj/mm/aaaa.

Espèce	Accession	Site de récolte	Date de récolte	Date de mise en conservation	Mode de conservation
<i>Anisopappus davyi</i>	HI 100 bis	Kabwelunono	15/05/2010	09/06/2010	R
	HI 166 bis	Fungurume IV	11/10/2010	25/10/2010	U
	HI 298 bis	Kakalalwe	01/07/2011	10/08/2011	U
<i>Crotalaria cobalticola</i>	HI 105 bis	Kavifwafwaulu	19/05/2010	07/06/2010	U
	HI 107 bis	Goma 3	20/05/2010	08/06/2010	U
	HI 237 bis	Kakalalwe	12/05/2011	12/07/2011	U

## 10.2.2. Sites d'étude

L'étude a été effectuée à Lubumbashi (altitude 1500 m; température : 16-33°C; précipitations annuelles : 1300 mm, saison des pluies de novembre à avril). L'expérimentation a été mise en place dans des zones expérimentales de deux sites aménagés entre 2006 et 2009 (Shutchka et al., 2010; Shutchka et al., 2013). Le dispositif expérimental au sein des deux sites est complètement aléatoire.

Le premier site est une zone habitée située à 2 km à l'ouest de l'usine d'extraction de la Général Carrière des Mines – GECAMINES (11°40'S, 27°27' E). La zone a été caractérisée comme périurbaine selon la clé élaborée par André et al. (2014). Les teneurs en cuivre dans le sol dépassent 10000 mg Cu/kg sol par endroit dues aux retombées atmosphériques métalliques pendant plusieurs dizaines d'années (Shutchka et al., 2010; Narendrula et al., 2012). En 2009, 50 parcelles de 1 m<sup>2</sup> ont reçu trois modalités d'amendements calcaires et organiques croisées (Or0 : pas d'amendement organique, Or1 : 4,5 kg compost/m<sup>2</sup>, Or2 : 22,5 kg compost/m<sup>2</sup>, Ca0 : pas d'amendement calcaire, Ca1 : 0,25 kg calcaire/m<sup>2</sup>, Ca2 : 0,5 kg calcaire/m<sup>2</sup>, Ca3 : 1 kg calcaire/m<sup>2</sup>, T : sans amendement) (Figure 10.1). Cinq nouvelles parcelles non couvertes et sans amendement (T) ont été délimitées dans la continuité des anciennes parcelles.



**Figure 10.1.** Dispositif expérimental au site GECAMINES (haut) et au champ expérimental de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Lubumbashi (bas). Légende : Or0 : pas d'amendement organique, Or1 : 4,5 kg compost/m<sup>2</sup>, Or2 : 22,5 kg compost/m<sup>2</sup>, Ca0 : pas d'amendement calcaire, Ca1 : 0,25 kg calcaire/m<sup>2</sup>, Ca2 : 0,5 kg calcaire/m<sup>2</sup>, Ca3 : 1 kg calcaire/m<sup>2</sup>, T : sans amendement. Les cases grises correspondent aux parcelles (1 m<sup>2</sup>) où *Crotalaria cobalticola* a été semée et les cases blanches correspondent aux parcelles (1 m<sup>2</sup>) ayant reçu l'espèce *Anisopappus davyi*.

Le second site est le champ expérimental (CE) de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Lubumbashi (11°27'S, 27°28'E). Au total, 32 parcelles de 1 m<sup>2</sup> y ont été délimitées et présentent des modalités d'amendement similaires à GECAMINES (Or2 : 22,5 kg compost/m<sup>2</sup>, Ca3 : 1 kg calcaire/m<sup>2</sup>, T : sans amendement). Les sols ont été artificiellement contaminés en 2006 à l'aide de sulfate de cuivre hydraté (CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O) afin d'obtenir 24 parcelles avec des teneurs en cuivre du sol d'environ 1 000 mg Cu/kg et 8 parcelles avec des teneurs d'environ 500 mg Cu/kg sol (Figure 10.1).

Au sein des deux sites, 16 éclats de souches/m<sup>2</sup> de l'espèce végétale *Microchloa altera* (Rendle) Stapf (Copperflora : [http://copperflora.org/eflora/species.php?id\\_e=185](http://copperflora.org/eflora/species.php?id_e=185)) ont été installés en 2008 avec succès dans chaque parcelle (Figure 10.1) (Shutchka et al., 2010). *M. altera* est une Poaceae pérenne cespiteuse formant des touffes denses d'environ 50 cm de hauteur. En février 2013, chaque parcelle était couverte à plus de 90 % par *M. altera*.

### 10.2.3. Mise en place et suivi

Pour chaque espèce, les trois accessions ont été mélangées de manière égale avant d'être semées. Les espèces ont été semées à raison de 30 graines par parcelle le 26/02/2013 suivant une grille de 6 lignes et 5 colonnes. Dans toutes les parcelles sans amendement (T) du site GECAMINES, 15 graines de chaque espèce ont été semées afin de conserver une densité constante dans toutes les parcelles ainsi que le même nombre de répétitions (GECAMINES : n=5 ; CE : n=2). À partir du mois d'avril, les parcelles ont été arrosées tous les deux jours avec 75 cl d'eau. Les températures et les précipitations journalières ont été mesurées au niveau de l'aéroport international de Luano à Lubumbashi (11°35'S 27°31'E).

### 10.2.4. Mesures et suivi

La levée (*i.e.* apparition des cotylédons) et la survie (*i.e.* plantule morte) ont été observées tous les 4 jours pendant 5 semaines puis tous les 7 jours. La hauteur (*i.e.* distance entre le collet et l'apex) et le nombre de feuilles de chaque plantule ont été mesurés une fois par semaine à partir du 01/04/2013 jusqu'au 08/05/2013 (fin d'expérimentation). Les taux de germination (*i.e.* apparition de la radicule 2 mm) des mélanges de populations utilisées ont été vérifiés en conditions contrôlées à l'Unité Biodiversité et Paysage de Gembloux Agro-Bio Tech en mai 2013 (boîtes de Petri, 25°C, 12 h).

### 10.2.5. Traitement des données

Les proportions ont été transformées afin de respecter l'homoscédasticité, le cas échéant. La quantité de données était insuffisante pour tester la normalité. Les variables de levée et de survie des espèces ont été calculées à l'échelle de la parcelle avant les comparaisons. Ces variables ont été comparées via une analyse de la variance à deux critères de classification selon la couverture et l'amendement de sol (ANOVA 2). Étant donné le nombre hétérogène de plantules par parcelle, les hauteurs ont été modélisées avec un modèle linéaire mixte avec comme facteurs fixes la couverture et l'amendement de sol et, comme facteurs aléatoires de groupement, la parcelle.

Les moyennes ont été structurées via le test de Tukey ou de la différence franchement significative (HSD) avec un taux d'erreur de 5 %. Toutes les analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel R (<http://cran.r-project.org/>).

## 10.3. RÉSULTATS

### 10.3.1. Levée

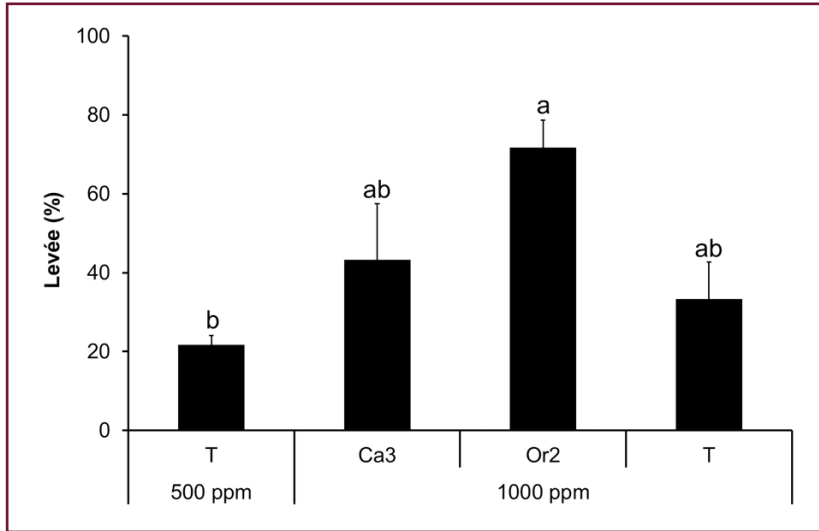
En conditions contrôlées, les taux de germinations des mélanges utilisés étaient de  $40,0 \pm 17,6\%$  pour *C. cobalticola* et de  $54,4 \pm 6,9\%$  pour *A. davyi*.

Au champ expérimental, aucun effet de l'interaction entre la couverture et les amendements n'a été mis en évidence sur le taux de levée de *C. cobalticola* et de *A. davyi*. Dans les parcelles avec une couverture végétale, les taux de levée de *A. davyi* et de *C. cobalticola* valaient respectivement  $14,2 \pm 5,6\%$  et  $42,5 \pm 23,0\%$ . Les taux de levée dans les parcelles sans couverture végétale étaient significativement inférieurs aux teneurs dans les parcelles avec couverture et valent  $6,2 \pm 4,9\%$  ( $F = 9,75$ ;  $P < 0,05$ ) pour *A. davyi* et  $25,8 \pm 11,6\%$  ( $F = 8,23$ ;  $P < 0,05$ ) pour *C. cobalticola* (Tableau 10.2). Les modalités d'amendement seules n'ont pas influencé significativement la levée de *A. davyi* contrairement à *C. cobalticola* qui présentait des taux de levée supérieurs dans les parcelles contaminées à 1000 mg/kg et amendées au compost ( $50,0 \pm 4,7\%$ ), à la chaux ( $37,5 \pm 20,0\%$ ) et non amendées ( $30,0 \pm 4,7\%$ ) par rapport aux parcelles avec 500 mg/kg de cuivre et non amendées ( $19,2 \pm 3,5\%$ ) ( $F = 4,91$ ;  $P < 0,05$ ) (Figure 10.2).

Au site GECAMINES, les taux de levée dans les parcelles non amendées (T) sans couverture végétale étaient nuls pour les deux espèces. Dans les parcelles non amendées (T) couvertes, les taux de levée étaient de  $41,3 \pm 22,8\%$  pour *A. davyi* et  $45,3 \pm 22,3\%$  pour *C. cobalticola*. Entre les amendements, les taux de levée des deux espèces n'étaient pas significativement différents et valent en moyenne  $50,5 \pm 24,4\%$  pour *A. davyi* et  $38,0 \pm 13,2\%$  pour *C. cobalticola*.

**Tableau 10.2.** Taux de levée (%) par parcelle (30 graines) et hauteur après deux mois (mm) au champ expérimental de la Faculté des Sciences Agronomiques (Université de Lubumbashi – République Démocratique du Congo), et dans les sols sans amendement (T) au site GECAMINES. Les taux de germination ont été également mesurés en boîte de Pétri. Les valeurs P indiquent si les deux valeurs précédentes sont significativement différentes ( $P < 0,05$ ). Légende : ND = pas de données. - = non analysé.

		Champ expérimental			GECAMINES (T)			Boîte de Petri
		Couvert	Sol nu	P	Couvert	Sol nu	P	
Levée (%)	<i>C. cobalticola</i>	$42,5 \pm 23,0$	$25,8 \pm 11,6$	0,021	$45,3 \pm 22,3$	$0,0 \pm 0,0$	-	$40,0 \pm 17,6$
	<i>A. davyi</i>	$14,2 \pm 5,6$	$6,2 \pm 4,9$	0,014	$41,3 \pm 22,8$	$0,0 \pm 0,0$	-	$54,4 \pm 6,9$
Hauteur (mm)	<i>C. cobalticola</i>	$29,14 \pm 4,5$	$37,0 \pm 14,0$	0,001	$31,7 \pm 9,3$	ND	-	-
	<i>A. davyi</i>	ND	ND	-	ND	ND	-	-



**Figure 10.2.** Effet des amendements sur la levée (moyenne  $\pm$  écart type, %) de *Crotalaria cobalticola* ( $F= 4,91$  ;  $P$ -value  $< 0,05$ ) au champ expérimental (CE). 500 et 1000 ppm sont respectivement les parcelles avec 500 et 1000 mg Cu/kg. Les moyennes ne partageant pas les mêmes lettres sont significativement différentes ( $P < 0,05$ ). Légende : T : sans amendement, Ca3 : 1 kg calcaire/m<sup>2</sup>, Or2 : 22,5 kg compost/m<sup>2</sup>.

### 10.3.2. Croissance et survie

Au champ expérimental, aucune interaction entre les deux types de traitement (couverture végétale  $\times$  amendement) n'a été mise en évidence. Les hauteurs des plantules de *C. cobalticola* mesurées après 2 mois étaient significativement supérieures ( $41,7 \pm 17,6$  mm) dans les sols contenant 1000 mg Cu/kg non amendé (T) par rapport aux sols contenant 500 mg Cu/kg non amendés (T) ( $27,0 \pm 11,3$  mm). Le taux de survie des plantules de *A. davyi* était nul un mois après le semis même si sous couverture végétale il est resté supérieur plus longtemps. Pour *C. cobalticola*, les taux de survie dans toutes les parcelles sont restés supérieurs à 50 % jusqu'au 21/03/2013. En fin d'expérimentation, on constate un taux de survie plus élevé dans les parcelles couvertes sans être différentes significativement.

Au site GECAMINES, la hauteur des plantules de *A. davyi* est en moyenne de  $3,8 \pm 2,1$  mm. L'hétérogénéité dans les résultats n'a pas permis de faire des tests statistiques. Pour *C. cobalticola*, aucune différence significative des hauteurs moyennes entre les différents amendements n'a été constatée. Les plantules mesuraient en moyenne  $27,9 \pm 6,4$  mm. La hauteur de *C. cobalticola* est significativement corrélée avec le nombre de feuilles ( $R = 0,88$  ;  $P < 0,001$ ). En fin d'expérience, les taux moyens de survie de *A. davyi* et de *C. cobalticola* étaient respectivement de  $3,6 \pm 4,4\%$  et  $7,5 \pm 8,4\%$ .

## 10.4. DISCUSSION

Cette étude a démontré la nécessité d'un couvert végétal dans l'installation des deux espèces métallicoles d'intérêt dans la région de Lubumbashi. La zone périurbaine polluée (GECAMINES) a été un site propice à la mise en place de nouvelles zones couvertes afin de permettre à la population d'être moins exposée aux éléments traces métalliques et de conserver une partie de la biodiversité végétale de la région. Même si cette expérimentation a concerné la partie écologique du problème, cette démarche nécessite également de tenir compte des acteurs socio-politiques des villes concernées. Leur implication dans ces méthodes peu coûteuses permettrait d'établir un plan d'aménagement pour cette zone périurbaine, identifiée de prime abord comme non constructible (Bruneau et al., 1990).

La levée était supérieure sous un couvert, sans être unanimement influencée par le type d'amendement. En effet, il est difficile de distinguer l'effet de la concentration en cuivre et l'effet de l'amendement au champ expérimental. La couverture végétale de l'espèce *M. altera* a probablement permis d'améliorer les propriétés physico-chimiques du sol et de sa surface, cette interaction favorable est définie comme la facilitation (Callaway, 2007; Bonanomi et al., 2011). Les touffes de graminées créent et alimentent la litière qui favorise la porosité du sol, l'infiltration de l'eau et la quantité de nutriments disponibles (Janeau et al., 1999; Parraga-Aguado et al., 2013). Le couvert végétal réduit également la température au niveau du sol et l'évaporation de l'eau offrant des conditions microclimatiques différentes d'un sol nu (Maestre et al., 2001). Cet effet a été particulièrement marqué au site GECAMINES qui présentait de vastes zones de sols dénudés extrêmement sensibles à l'érosion éolienne et exposées à la chaleur. On constate néanmoins qu'en conditions contrôlées, les taux de germination des deux espèces sont faibles comparativement à une étude précédente (Godefroid et al., 2013). La techniques de conservation des espèces utilisées dans cette étude est l'ultraséchage (T°C ambiante, H.R. < 5%), ce qui expliquerait les différences avec l'étude menée par Godefroid et al. (2013) sur ces graines conservées à 5°C et une H.R. < 5%. Aussi, les milieux métallifères sont des environnements propices aux processus de spéciation intense qui peuvent conduire à la formation de plusieurs populations soumises à une adaptation locale (Leimu et al., 2008; Fones et al., 2010; Faucon et al., 2012). Malgré la toxicité de cuivre, la germination de certaines espèces cuprophytes semble également être favorisée par la présence de cuivre dans le substrat (Chipeng et al., 2009). Dans les parcelles, la levée de *C. cobalticola* au champ expérimental est proche du taux de germination en boîtes de Pétri contrairement à l'espèce *A. davyi*. Cette différence n'ayant pas été observée entre le site GECAMINES et les boîtes de Pétri, le mélange des trois populations de *A. davyi* a probablement été moins homogène au champ expérimental.

Au contraire, la présence d'un couvert végétal a contraint la croissance des espèces d'intérêt dans leurs premiers stades même si elle est restée généralement faible pendant la période du test. Cette interaction a pu être la conséquence d'une entrée en compétition pour la lumière, l'eau et les nutriments des espèces testées avec *M. altera*. Cette tendance de facilitation de l'émergence et de la survie opposée à un ralentissement de la croissance sous un couvert végétal a déjà été citée dans plusieurs études (Callaway et al., 1996; Suding et al., 1999; Walker et al., 1999; Foster, 2002). Les amendements ont significativement influencé la hauteur au champ expérimental avec des individus plus développés dans les parcelles les plus contaminées en cuivre et non amendées pour *C. cobalticola*. Des études antérieures ont effectivement mis en évidence l'action favorable des métaux à des concentrations précises sur la croissance

chez certains métalphytes (Keller et al., 2004; Street et al., 2007). Au site GECAMINES, aucun effet des amendements sur la croissance des deux espèces n'a été observé. Córdova et al. (2011) ont également démontré une productivité identique des plantes entre des sols normaux, contaminés à la chaux ou au compost. À Lubumbashi, Shutcha et al. (2010) avaient également observé l'absence de l'influence de la chaux et du compost sur les performances de *M. altera*.

Les taux de survie en fin d'expérimentation sont très faibles (< 10 %) en raison du passage vers la saison sèche (mai). La période de transition (avril) a été caractérisée par une diminution de 23 % de l'humidité relative de l'air et par un arrêt progressif des précipitations. Ces conditions climatiques augmentent l'évapotranspiration des jeunes plantules qui sont incapables de résister à ce type de stress (Callaway, 2007). L'étude de Shutcha et al. (2010) avait démontré qu'un amendement était favorable à la survie de plants transplantés. Cet effet semble avoir été inexistant au site GECAMINES durant le stade d'installation des plantules. Une prochaine étude devrait débiter au début de la saison des pluies (novembre) et assurer un suivi continu durant toute la saison des pluies afin de reproduire la phénologie complète de ces espèces.

## 10.5. CONCLUSIONS

Les couverts phytostabilisants sont des environnements propices à l'établissement d'espèces à conserver, quelles que soient les conditions d'amendements. Ils présentent un réel intérêt dans les grandes villes des pays tropicaux où le développement est intense afin d'apporter des zones herbacées de haute biodiversité. L'association de la phytostabilisation et de la conservation peut être un succès, à condition de connaître toutes les variables influençant le développement des espèces utilisées. La conservation des espèces métalphytes d'intérêt doit passer par ce type de stratégie afin de valoriser les espèces conservées en banque de graines et de réhabiliter les sites fortement dégradés. Ces approches recréant de nouvelles communautés végétales demandent encore d'être étudiées afin de maximiser les chances d'établissement en conditions naturelles et d'élargir le nombre d'espèces utilisées. Les zones périurbaines polluées de Lubumbashi représenteront sans doute à elles seules les vestiges vivants des écosystèmes cupro-cobaltifères du Katanga.

## Remerciements

Les auteurs remercient les habitants du site GECAMINES de Lubumbashi qui ont veillé au maintien de la parcelle. Cette étude a été soutenue financièrement par les Fonds d'Aide à la Mobilité Étudiante (FAME) – Fédération Wallonie-Bruxelles qui a permis à Julien Collignon de voyager en République Démocratique du Congo et les Fonds pour la Formation à la Recherche dans l'Industrie et dans l'Agriculture (FRIA) – Fonds de la recherche scientifique (FRS-FNRS) qui financent la thèse de doctorat de Sylvain Boisson.

## BIBLIOGRAPHIE

- André M. et al., 2014. Vers une synthèse de la conception et une définition des zones dans le gradient urbain-rural. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **18**(1), 61-74.
- 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 the Congo. *Environ. Res.*, **109**(6), 745-752.

- Berti W.R. & Cunningham S.D., 2000. Phytostabilization of metals. In: Raskin I., Ensley B.D. (eds). *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean-up the Environment*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 71-88.
- Bogaert J., Vranken I. & Andre M., 2014. Biocultural Landscapes. In: Hong S.K., Bogaert J., Min Q. (eds). *Biocultural Landscapes: Diversity, Functions and Values*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 89-112.
- Bonanomi G., Incerti G. & Mazzoleni S., 2011. Assessing occurrence, specificity, and mechanisms of plant facilitation in terrestrial ecosystems. *Plant Ecol.*, **212**(11), 1777-1790.
- Brooks R.R., Naidu S.M., Malaisse F. & Lee J., 1987. The elemental content of metallophytes from the copper/cobalt deposits of Central Africa. *Bull. Soc. R. Bot. Belgique*, **119**(2), 179-191.
- Bruneau J.C. & Pain M., 1990. *Atlas de Lubumbashi*. Nanterre, France : Université Paris X, 133.
- Cailteux J.L.H., Kampunzu A.B., Lerouge C., Kaputo A.K. & Milesi J.P., 2005. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt deposits, central African Copperbelt. *J. Afr. Earth Sci.*, **42**(1-5), 134-158.
- Callaway R.M., 2007. *Positive interactions and interdependence in plant communities*, Dordrecht, The Netherlands: Springer, 415 p.
- Callaway R.M., DeLucia E., Moore D., Nowak R. & Schlesinger W., 1996. Competition and facilitation: contrasting effects of *Artemisia tridentata* on desert vs. montane pines. *Ecology* **77**(7), 2130-2141.
- 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.
- Comín F.A., 2010. *Ecological Restoration: A Global Challenge*. Cambridge University Press, 291 p.
- Córdova S., Neaman A., González I., Ginocchio R. & Fine P., 2011. The effect of lime and compost amendments on the potential for the revegetation of metal-polluted, acidic soils. *Geoderma*, **166**(1), 135-144.
- Duvigneaud P. & Denaeyer-De Smet S., 1963. Cuivre et végétation au Katanga [Copper and vegetation in Katanga]. *Bull. Soc. R. Bot. Belgique*, Travaux du Centre scientifique et médical de l'Université libre de Bruxelles en Afrique centrale, **96**, 93-224.
- Duvigneaud P. & Timperman J., 1959. Études sur le genre *Crotalaria*. *Bull. Soc. R. Bot. Belgique*, **91**(2), 135-176.
- Faucon M.P. et al., 2009. Soil influence on Cu and Co uptake and plant size in the cuprophytes *Crepidiorhodon 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., 2012. Copper tolerance and accumulation in two cuprophytes of South Central Africa: *Crepidiorhodon perennis* and *C. tenuis* (Linderniaceae). *Environ. Exp. Bot.*, **84**, 11-16.
- Fones H. et al., 2010. Metal hyperaccumulation armors plants against disease. *PLoS Pathog.*, **6**(9), e1001093.
- Foster B., 2002. Competition, facilitation, and the distribution of *Schizachyrium scoparium* along a topographic-productivity gradient. *Ecoscience*, **3**, 355-363.
- Godefroid S. et al., 2013. Germination capacity and seed storage behaviour of threatened metallophytes from the Katanga copper belt (D.R. Congo): implications for ex situ conservation. *Plant Ecol. Evol.*, **146**(2), 183-192.
- Ilunga wa Ilunga E., Séleck M., Colinet G., Meerts P. & Mahy G., 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.

- Janeau J.L., Mauchamp A. & Tarin G., 1999. The soil surface characteristics of vegetation stripes in Northern Mexico and their influences on the system hydrodynamics: An experimental approach. *CATENA*, **37**(1-2), 165-173.
- Kampunzu A.B., Cailteux J.L.H., Kamona A.F., Intiomale M.M. & Melcher F., 2009. Sediment-hosted Zn–Pb–Cu deposits in the Central African Copperbelt. *Ore Geol. Rev.* **35**(3-4), 263-297.
- Keller C. & Hammer D., 2004. Metal availability and soil toxicity after repeated croppings of *Thlaspi caerulescens* in metal contaminated soils. *Environ. Pollut.*, **131**(2), 243-54.
- 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.
- Leimu R. & Fischer M., 2008. A meta-analysis of local adaptation in plants. *PLoS One*, **3**(12), e4010.
- Leteinturier B., 2002. *Évaluation du potentiel phytocénotique des gisements cuprifères d'Afrique centro-australe en vue de la phytoremédiation de sites pollués par l'activité.* Thèse de Doctorat : Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique).
- Maestre F., Bautista S., Cortina J. & Bellot J., 2001. Potential for using facilitation by grasses to establish shrubs on a semiarid degraded steppe. *Ecol. Appl.*, **11**(6), 1641-1655.
- 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.
- Mpundu Mubemba Mulambi M. et al., 2013. Évaluation des teneurs en éléments traces métalliques dans les légumes feuilles vendus dans les différents marchés de la zone minière de Lubumbashi. *J. Appl. Biosci.*, **66**, 5106-5113.
- Narendrula R., Nkongolo K. & Beckett P., 2012. Comparative Soil Metal Analyses in Sudbury (Ontario, Canada) and Lubumbashi (Katanga, D.R. Congo). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **88**(2), 187-192.
- Parraga-Aguado I. et al., 2013. The importance of edaphic niches and pioneer plant species succession for the phytomanagement of mine tailings. *Environ. Pollut.*, **176**, 134-143.
- Prasad M.S., 1989. Production of copper and cobalt at Gecamines, Zaire. *Miner. Eng.* **2**(4), 521-541.
- Quigley J.M., 2009. Urbanization Agglomeration and Economic Development. In: Spence M., Annez P.C., Buckley R.M. (eds). *Urbanization and Growth*, Washington, DC.: World Bank E-Library. Commission on Growth and Development, 115-132.
- Ravetz J., Fertner C. & Nielsen T.S., 2013. The dynamics of peri-urbanization. In: Nilsson K. et al. (eds). *Peri-Urban Futures: Scenarios and Models for Land Use Change in Europe*. Heidelberg, Germany: Springer, 13-44.
- 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.
- Shutcha M., Meerts P., Kazadi S., Faucon M.P. & Visser M., 2013. Low Caryopsis Production of the Toothbrush Grass (*Microchloa altera*) from Katanga (D.R. Congo) Could Limit the Revegetation of Trace Metal Contaminated Lands by Seeding. *Restor. Ecol.*, **31**(3), 240-244.
- Shutcha M.N. et al., 2010. Phytostabilisation of copper-contaminated soil in Katanga: an experiment with three native grasses and two amendments. *Int. J. Phytoremediation*, **12**(6), 616-632.
- Street R., Kulkarni M.G., Stirk W., Southway C. & Van Staden J., 2007. Toxicity of metal elements on germination and seedling growth of widely used medicinal plants belonging to Hyacinthaceae. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **79**(4), 371-376.

- Suding K.N. & Goldberg D.E., 1999. Variation in the effects of vegetation and litter on recruitment across productivity gradients. *J. Ecol.* **87**(3), 436-449.
- UMHK, 1956. *Union Minière du Haut Katanga 1906-1956*, Bruxelles : Ed. Cuypers L., 283 p.
- Vitousek P.M., 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science (80)*, **277**(5325), 494-499.
- Vranken I. et al., 2013. The spatial footprint of the non-ferrous mining industry in Lubumbashi. *Tropicultura*, **31**(1), 22-29.
- Walker L. & Powell E., 1999. Regeneration of the Mauna Kea silversword *Argyroxiphium sandwicense* (Asteraceae) in Hawaii. *Biol. Conserv.*, **89**(1), 61-70.