

Stratégies de conservation de la diversité végétale des sites métallifères : les enseignements de l'écologie des populations de *Viola calaminaria*.

Grégory MAHY¹ / g.mahy@ulg.ac.be, Michel Pierre FAUCON² / michel-pierre.faucon@lasalle-beauvais.fr, Jean - Philippe BIZOUX¹ / jean-philippe.bizoux@ulg.ac.be

De tout temps, les botanistes ont été attirés par les environnements extrêmes de par l'originalité des communautés végétales qui s'y développe. Ces environnements peuvent poser des problèmes spécifiques de conservation de leur biodiversité qui demandent de développer des stratégies originales parfois en dehors des sentiers battus. Dans cette synthèse, nous explorons les défis qui se posent pour la conservation de la flore des sites métallifères (voir définition ci-dessous), les stratégies qui peuvent être mises en œuvre et la façon dont la recherche scientifique peut soutenir la mise en place de ces stratégies. Nous développons également l'idée que l'approche traditionnelle de protection de sites remarquables peut être complétée par l'intérêt à porter à des sites anthropiques et à leur contribution à la biodiversité en nous basant sur le cas de *Viola calaminaria*.

Qu'est ce qu'un site métallifère ?

Les sols métallifères présentent des teneurs en métaux lourds extrêmement élevées qui peuvent atteindre des milliers de mg/kg (Ernst 1990). On appelle métaux lourds les éléments métalliques naturels caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 g/cm³ ou parfois 4 g/cm³. Ils sont aussi parfois désignés par l'appellation « éléments traces métalliques ». A des concentrations normales certains sont utiles voire indispensables aux végétaux mais ils deviennent tous toxiques à partir d'un certain seuil de concentrations, le plus souvent relativement faible. Les sols métallifères sont de deux types. Les sols métallifères naturels se développent sur des affleurements de roches métallifères. Les plus répandus à la surface de la terre sont les affleurements serpentiniques riches en nickel, en fer et en magnésium, présents sur tous les continents. Les affleurements de roches ferrifères sont aussi très répandus. On trouve également des



Viola calaminaria

affleurements de manganèse, de cuivre, de cobalt, d'or, de zinc, (Faucon 2009). Au cours du temps, le développement des activités minières et la transformation de minerais a dispersé des métaux lourds toxiques et contaminé des surfaces bien plus vastes que celles occupées par les affleurements naturels. De nouveaux types d'habitats métallifères sont ainsi apparus (Bizoux et al. 2004 ; Faucon et al. 2009). Ces sites métallifères d'origine anthropique varient selon la nature du sol existant avant la pollution, la nature du ou des minerais exploités, des procédés industriels. Ils constituent un ensemble très hétérogène.

Métaux lourds et biodiversité.

Les sites métallifères présentent des conditions de stress élevé pour les espèces végétales. Ces conditions de stress recouvrent les teneurs élevées en métaux lourds et d'autres contraintes environnementales telles que la xéricité (sécheresse du sol) ou dans beaucoup de cas un statut nutritif déficient. De plus les sites métallifères sont en général de taille réduite et isolés les uns des autres dans des paysages présentant des concentrations en métaux normales. Les végétaux qui colonisent les affleurements métallifères sont donc soumis à la fois aux effets de la dérive génétique (différenciation génétique par hasard) due à l'isolement géographique des populations et à des pressions de sélection importantes dues à la toxicité des métaux lourds. Ces végétaux peuvent donc subir des processus

de microévolution et éventuellement de spéciation qui sont à l'origine de l'existence de taxons (espèces, sous-espèces, variétés) spécialisés adaptés aux concentrations élevées en métaux lourds et endémiques de ces sites. Les végétaux capables de coloniser les sites métallifères sont appelés métallobytophytes. On distingue en général les métallobytophytes absolus, pour les taxons strictement limités (endémiques) aux sites métallifères, des pseudométallobytophytes qui sont présents sur sols métallifères et non métallifères. A l'échelle des écosystèmes, les sites métallifères hébergent des communautés végétales hautement originales liées à la sélection d'espèces spécialisées et à la limite à la dispersion dans les milieux isolés.

A ce titre, la flore et la végétation des sites métallifères présentent un intérêt particulier pour la biodiversité (Whiting et al. 2004) en présentant à la fois des particularités génétiques, spécifiques et écosystémiques. De plus, de par son aptitude à tolérer et accumuler les métaux lourds, la flore métallifère renferme des ressources phytogénétiques utiles pour le développement de technologies de mitigation des pollutions telles que la phytostabilisation, la restauration écologique, voire la décontamination des sites pollués par les métaux lourds (Whiting et al. 2004). La flore métallifère présente aussi un intérêt scientifique particulier. En effet, les problèmes posés par une telle flore sont multiples. Ils se placent à la fois sur les plans taxonomique (aspects

Photo © J. Piquera

¹ Unité Biodiversité Paysage, Gembloux Agro-Biotech, ULg, Passage des Déportés 2, 5030 Gembloux
² HydrISE, LaSalle Beauvais, 60026 Beauvais cedex, France

morphologiques, génétiques,), écologique (biodiversité, écotoxicologique), physiologique

Une biodiversité hautement menacée et une stratégie de conservation complexe

L'habitat des métallobytophytes a été altéré historiquement et est actuellement directement menacé particulièrement par l'extraction minière de surface. Les espèces végétales des affleurements métallifères associées en communautés primaires sont détruites par le remaniement du substrat lors de l'extraction du minerai en surface (Faucon 2009). Hormis les pays industrialisés, peu de pays possèdent une réglementation pour la protection et la conservation de la biodiversité des habitats métallifères primaires (Faucon 2009). D'un point de vue de la conservation de la biodiversité, il serait nécessaire de protéger une proportion significative des gisements métallifères naturels des divers types afin de pouvoir recouvrir la diversité des communautés et des espèces endémique de ces sites. Dans la réalité, cette stratégie est le plus souvent inapplicable soit que la plupart des sites primaires aient été détruits par l'activité minière historique, soit que ces habitats soient sous une pression importante d'exploitation du fait de la demande croissante en ressources minérales des économies émergentes. La conservation de la biodiversité végétale des sites métallifères demande donc de développer des approches originales.

Au delà de la conservation dans des sites protégés, la communauté scientifique s'accorde sur le fait que le moyen le plus efficace d'assurer la survie des métallobytophytes au sein des concessions minières existantes est de promouvoir leur utilisation dans des techniques de restauration écologique et de réhabilitation de site à la fin de l'exploitation minière (Whiting et al. 2002). De plus, les activités minières peuvent créer de nouveaux habitats métallifères par le stockage des résidus d'exploitation plus ou moins minéralisés aussi bien que par les pollutions aériennes résultant des retombées des usines de traitements (Faucon 2009). Ces habitats présentent une gamme étendue de conditions édaphiques et peuvent être recolonisés par des espèces

des habitats ouverts adaptées à la toxicité des métaux lourds (Bizoux et al. 2004 ; 2008 ; Faucon et al. 2009). Plusieurs études récentes ont démontré l'intérêt de tels habitats anthropiques pour la conservation de la flore métallifères ou au moins d'une partie des espèces métallobytophytes (Faucon et al. 2009). Toutefois, ces habitats sont eux-mêmes souvent menacés du fait de leur réhabilitation pour des raisons de santé humaine ou de reconversion de sites. Dans ces situations, des actions de restauration directe d'habitats

métallifères peuvent être nécessaires pour assurer la viabilité des espèces et des communautés végétales typiques de ces milieux. Les sites d'origine anthropique fournissent une situation unique pour évaluer comment les espèces métallocoles peuvent profiter de nouveaux habitats. Ces études apportent de nombreux éléments de compréhension de l'écologie de ces espèces qui aideront les gestionnaires dans les actions de restauration.

Dans une perspective de conservation, il est également impératif de tenir compte de l'histoire évolutive des taxons. De plus en plus, les scientifiques préconisent, pour des groupes taxonomiques complexes, la conservation des processus évolutifs qui génèrent la biodiversité plutôt que la préservation d'un nombre limité de taxons, souvent mal définis (Ennos et al. 2005). Ce principe s'applique très bien au cas des métallobytophytes qui présentent souvent des adaptations étonnantes résultant de processus évolutifs particuliers. Les plans de gestion de ces espèces devraient donc intégrer les processus évolutifs et écologiques qui sont la base des réponses adaptatives aux changements environnementaux. A cette fin des études portant sur la diversité génétique et la réaction des espèces aux conditions



Végétation calaminaire sur site primaire, Kelmis

Photo © F. Brevers

des milieux s'imposent pour appuyer les gestionnaires dans leurs actions.

Les sites Calaminaires en Région Wallonne et le cas de *Viola Calaminaria*

LES SITES CALAMINAIRES

En Région Wallonne, les sites métallifères naturels sont essentiellement constitués de sites calaminaires. Les sites calaminaires sont des sites à haute teneur en métaux lourds (Zinc et Plomb essentiellement) dans le sol (Duvigneaud et Saintenoy-Simon 1998). Cette désignation vient de Calamine, nom donné à un minerai de Zinc souvent composé de deux minéraux : un carbonate de zinc ($ZnCO_3$) et un silicate hydraté de zinc ($Zn_4(OH)_2Si_2O_7$) résultant principalement de l'altération de la Blende (Pahaut 1988). Cette désignation s'applique par extension à tous les milieux renfermant des teneurs élevées en Zinc et en autres métaux lourds (Pb, Cd, Cu) que l'on peut trouver dans le monde. D'après Duvigneaud et Saintenoy-Simon (1996) et Duvigneaud *et al.* (1993), les sites calaminaires peuvent être classés en quatre grands types selon leur origine : 1) Les sites calaminaires primaires constitués des affleurements en place, des



Photo © F. Brevers

Végétation calaminaire sur site secondaire récent formé par des remblais d'exploitation, Angleur

filons ou amas de minerais indépendants des activités humaines ; 2) Les sites calaminaires secondaires constitués des déblais résultant de l'exploitation plus ou moins ancienne, sur place, des mines et des excavations de surface ; 3) Un autre type de sites calaminaires secondaires formé de cendrées et scories résultant de l'activité des usines qui ont traité le minerai pour en extraire le métal ; 4) Les sites calaminaires tertiaires résultant de pollutions atmosphériques dues à l'exploitation industrielle des minerais ayant entraîné l'émission et la dispersion dans l'atmosphère de particules métalliques et de fumées riches en oxydes acides (SO_2 , SO_3 , NO_2 , ...) aux abords des usines. Les sites primaires et les sites secondaires anciens se situent tous dans l'est de la province de Liège (entre Liège et Aix-La-Chapelle). A partir de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, d'importantes industries du zinc se sont développées à l'écart des zones naturellement minéralisées notamment dans la vallée de la Meuse (entre Liège et Namur) et dans la vallée de la Vesdre (Liège, Prayon, Chaudfontaine). De vastes terils, remblais et zones polluées de manière atmosphérique en témoignent (Lambinon et Auquier 1964). La flore calaminaire est donc apparue sur un certain nombre d'autres sites, principalement à Liège et dans la vallée de la Vesdre. Les sites calaminaires ont été et sont encore menacés en Région Wallonne malgré le statut de protection NATURA 2000 des végétations calaminaires. Ils sont souvent considérés comme des terrains dangereux pour la santé humaine et les autorités publiques ont été enclines à promouvoir leur réhabilitation. Plusieurs sites ont disparus au cours des dernières décennies et d'autres ont

été partiellement altérés par l'extraction, le pâturage, l'amendement, ou la construction d'infrastructures privées ou publiques (Graitson 2006 ; Bizoux et al. 2004). Cette pression a pu amener à une diminution du nombre et de la taille des populations de métalophytes mettant potentiellement en danger leur survie sur le long terme. En 2004, Graitson recense 33 sites calaminaires en Belgique occupant 268 hectares. Les plus grandes superficies de ces sites sont des sites secondaires.

LA VIOLETTE CALAMINAIRE COMME MODÈLE D'ÉTUDE

Les sites calaminaires hébergent un certain nombre de taxons endémiques de rangs variés. Les principales métalophytes en Belgique sont *Viola calaminaria* (Gingins) Lej., *Thlaspi caerulescens* subsp. *calaminare* (Lej.) Dvorakova, *Armeria maritima* subsp. *halleri* (Wallr.) Rothm., *Silene vulgaris* subsp. *vulgaris* var. *humilis* R. Schubert, *Festuca ovina* subsp. *guestfalica* (Boenningh. ex Reichenb.) K. Richt., *Cochlearia pyrenaica* DC., *Minuartia verna* (L.) Hiern var. *hercynica* (Willk.) Friedrich, *Stereocaulon nanodes* Tuck. (lichen), *Scopelophila cataractae*

(Mitt.) Broth. (Bryophyte). Le nombre de pseudométagallophytes est plus étendu. Les principaux taxons répandus sur les terrains calaminaires en Région wallonne sont *Agrostis capillaris* L., *Festuca* div. sp., *Rumex acetosa* L., *Campanula rotundifolia* L., *Arrhenaterum elatius* (L.) Beauv. ex J. et C. Presl, *Molinia caerulea* (L.) Moench et *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth pour les plantes vasculaires. On note aussi plusieurs bryophytes et de nombreux lichens appartenant principalement aux genres *Cladonia* et *Stereocaulon*. Parmi tous ces taxa, ***Viola calaminaria*** est d'un intérêt particulier. La pensée calaminaire est considérée par les naturalistes belges comme une espèce endémique des sols contaminés en zinc de la région Stolberg-Aix-la-Chapelle-Liège où elle peut constituer des populations importantes. Le rang spécifique de *Viola calaminaria* a régulièrement été remis en questions mais quel que soit le niveau taxonomique, espèce, sous-espèce ou simple écotype, *V. calaminaria* représente une évolution particulière par son adaptation au site calaminaire et nécessite de mettre en place des études pour élaborer une stratégie de conservation. Beaucoup



Photo © F. Brevers

Végétation calaminaire sur site tertiaire récent résultant de pollution atmosphérique, Prayon

de stations de *Viola calaminaria* ne sont apparues que depuis les années 1970. Il semblerait qu'il y ait eu une expansion manifeste de la pensée calaminaire depuis cette époque sur une série de sites récents. Récemment, par contre une dizaine de sites ont été partiellement ou totalement détruits par réhabilitation (Bizoux et al. 2004).

La question de la viabilité des populations ayant colonisé des sites métallifères résultant de la pollution humaine récente est donc de première importance pour la conservation de la violette calaminaire. Depuis 2004, nous avons entrepris une étude approfondie du fonctionnement des populations de *Viola calaminaria*. Ces études comprennent des analyses de la démographie de ces populations, de leur mode et leur succès de reproduction et leur diversité génétique (Bizoux et al. 2004 ; Bizoux et al. 2007 ; Bizoux et al. 2008 ; Bizoux et al. 2011). Vingt-trois populations principales de violette calaminaire ont été recensées en 2003 ce qui représente une occupation de 55 % des sites calaminaires présents en Région Wallonne. Quelques petites populations supplémentaires sont présentes le long de la Vallée de la Geule. Seize de ces populations (70%) sont présentes sur des sites secondaires récents. La taille des populations est très variable allant de quelques mètres carrés à plus de trois hectares. Les populations récentes sont en moyenne quasi 10 fois plus grandes que les anciennes et elles représentent 89.5% de la superficie occupée par *V. calaminaria* en Région Wallonne. Ces sites apparaissent donc primordiaux en terme de surface. Mais qu'en est-il pour les autres facteurs importants pour la conservation ?

Dans un premier temps, nous avons étudié les paramètres de base de l'écologie des populations de *V. calaminaria*. Nos résultats montrent clairement que l'espèce est uniquement inféodée aux milieux enrichis en métaux lourds, même dans les sites récents. La gamme de concentrations en Zinc et Plomb dans les sols des sites où *V. calaminaria* est présente est très large mais toujours supérieure aux seuils de phytotoxicité. Il apparaît également que la présence de l'espèce ne semble pas limitée par



Population de *Viola calaminaria* et *Armeria maritima* subsp. *Hatterii*, Plombière – site secondaire

des teneurs très élevées en Zinc ou en Plomb. La raison pour laquelle l'espèce est uniquement présente dans de telles conditions édaphiques n'est pas évidente. Il est possible que l'espèce possède un « besoin » minimum en métaux pour se développer ou qu'elle soit simplement exclue des habitats moins marginaux lorsque la compétition avec les autres espèces devient trop importante. Un des éléments intéressants pour la restauration des populations de *V. calaminaria* est sa propension à développer une banque de graines assez importante dans le sol (environ 900 graines/m²) permettant après étrépage de relancer la dynamique des populations, voire de transférer du sol superficiel d'un site à l'autre pour favoriser la recolonisation de sites restaurés.

Nous avons ensuite mis en relation la taille et l'isolement des populations avec des mesures du succès reproducteur de l'espèce (nombre de graines produites, pourcentage de germination) et avec la diversité génétique. La théorie prédit en effet que dans les petites populations, comptant donc moins d'individus, le succès reproducteur peut être diminué à cause d'une trop forte consanguinité au sein de la population (reproduction entre parents), d'une trop faible diversité des gènes, d'une rupture des interactions avec les pollinisateurs (pas assez de fleurs à offrir par exemple) ou encore parce que la probabilité que tous les individus de la population disparaissent en même temps est plus élevée.

Néanmoins, nous n'avons pas observé d'effet de la taille des populations sur la diversité génétique ou sur la production de graines. Le taux de germination est par contre positivement plus important dans les plus grandes populations. Un plus faible taux de germination dans les petites populations pourrait être dû aux effets de la consanguinité et pourrait handicaper l'établissement de populations lors de restauration si le nombre d'individus de départ est faible. L'isolement des populations influence beaucoup plus leur succès. Les populations les plus isolées produisent moins de graines et présentent des taux de germination plus bas. L'isolement semble donc avoir un impact important sur le succès reproducteur de l'espèce. Les populations les plus isolées présentent également les flux de gènes les moins importants avec les autres populations.

Enfin, nous avons comparé les populations se développant sur des sites secondaires ou tertiaires récents à des populations se développant sur des sites primaires ou des sites secondaires anciens. Au niveau génétique, nous avons montré que les sites récents présentaient une diversité génétique similaire aux sites anciens. Aucun effet de fondation n'a donc pu être détecté. Par contre, nous avons montré que les populations récentes présentaient une différenciation génétique inférieure aux populations anciennes. Ces deux constatations suggèrent que les populations récentes se sont formées par

plusieurs événements de colonisation à partir de plusieurs populations sources. Au niveau des deux paramètres du succès reproducteur, les populations récentes montrent des productions de graines et des taux de germinations supérieures aux anciennes populations indiquant la vitalité des populations installées sur les sites secondaires récents et les sites tertiaires et soulignant à nouveau leur intérêt pour la conservation de l'espèce.

En conclusion, les populations de *V. calaminaria* apparaissent viables et l'espèce ne semble pas directement menacée par des facteurs intrinsèques (diversité génétique, succès reproducteur,), tant que son habitat n'est pas détruit. On remarque nettement l'importance des populations récentes en terme de conservation et ce pour l'ensemble des points étudiés. Ces populations doivent donc être intégrées dans la conservation de l'espèce bien qu'elles posent plus de problèmes par rapport à la population humaine parce qu'elles se trouvent dans des zones plus densément peuplées. Les populations anciennes devraient toutes être protégées de façon intégrale, vu les faibles surfaces qu'elles représentent, afin d'éviter de nouvelles destructions car elles sont le patrimoine génétique originel de l'espèce. Des mesures locales devraient être prises pour favoriser le succès reproducteur (taux de germination) dans ces anciennes populations. Nos résultats soulignent également la vitalité de l'espèce dans les habitats les plus récents et sont donc encourageant pour le succès de restauration de nouveaux habitats propices à la violette calaminaire.

De façon générale, les études menées sur les espèces métallicoles incitent à développer des stratégies de conservation qui se basent sur une combinaison de mise sous cloche de quelques zones naturelles remarquables, de prise en compte du potentiel des habitats anthropiques et d'actions offensives de restauration de milieu.

Références

- Bizoux J.-P., Brevers F., Meerts P., Graitson E. & Mahy G. 2004. Ecology and conservation of Belgian populations of *Viola calaminaria*, a metallophyte with a restricted geographic distribution. *Belgian Journal of Botany*. **137** : 91-104. <http://hdl.handle.net/2268/22166>
- Bizoux, J.-P., & Mahy, (2007). Within-Population Genetic Structure And Clonal Diversity Of A Threatened Endemic Metallophyte, *Viola Calaminaria* (American Journal of Botany, (5), 887-895. <http://hdl.handle.net/2268/25071>
- Bizoux, J.-P., Dainou, K., Raspe, O., Lutts, S., & Mahy G. (2008). Fitness And Genetic Variation Of *Viola Calaminaria*, An Endemic Metallophyte : Implications Of Population Structure And History. *Plant Biology*, (6), 684-693. <http://hdl.handle.net/2268/27708>
- Bizoux, J.-P., cristofoli, S., Piqueray, J., & (2011). Conservation of an endemic metallophyte species : effect of population history and vegetative density on the reproductive success of *Viola calaminaria*. *Journal for Nature Conservation*, 72-78. <http://hdl.handle.net/2268/69258>
- Duvigneaud J., Saintenoy-Simon J. & Pauquet F. 1993. Une réserve naturelle d'Ardenne et Gaume : la pelouse calaminaire située au sud du parc communal de Kelmis-La Calamine. *Parcs Nationaux*. **48** : 66-76.
- Duvigneaud J. & Saintenoy-Simon J. 1996. Le site calaminaire de Plombières. *Ardenne et Gaume*. **51** : 5-9.
- Duvigneaud J. & Saintenoy-Simon J. 1998. Les haldes calaminaires de Plombières province de Liège, Belgique. *Les Naturalistes Belges*. **79** : 24-32.
- Ennos R.A., French G.C. & Hollingsworth P.M. 2005. Conserving taxonomic complexity. *Trends in Ecology & Evolution*. **20** : 164-168.
- Ernst W.H.O. 1990. Mine vegetation in Europe. pp. 285-300. In : Shaw A.J. ed. *Heavy metal tolerance in plants : evolutionary aspects*, CRC Press, Florida.
- Faucon, M.P. 2009. Ecologie et biologie de la conservation des metallophytes. Le cas de *Crepidorhopalon perenniss* et *C. tenuis* (Scrophulariaceae) des sols cupro-cobaltifères du Katanga. Thèse de doctorat, ULB.
- Faucon, MP ; Parmentier, I ; Colinet, G ; Mahy, G ; Luhembwe, MN ; Meerts, P. 2011. May Rare Metallophytes Benefit from Disturbed Soils Following Mining Activity? The Case of the *Crepidorhopalon tenuis* in Katanga (D. R. Congo), *Restoration ecology*, **19**, 333-343.
- Graitson E. 2006. Inventaire et caractérisation des sites calaminaires en région wallonne. *Natura mosana*. **58**, n°4, 83-124.
- Lambinon J. & Auquier P. 1964. La flore et la végétation des terrains calaminaires de la Wallonie septentrionale et de la Rhénanie aixoise. Types chorologiques et groupes écologiques. *Natura mosana*. **16** : 113-130.
- Pahaut P. 1988. Au sujet du Rocheux calaminaire. *Revue verviétoise d'histoire naturelle*. **Numéro spécial** : 11-14.
- Whiting S.N., Reeves R.D. & Baker A.J.M. 2002. Conserving biodiversity : mining, metallophytes and land reclamation. *Mining Environmental Management*. **10** : 11-16.
- Whiting S.N., Reeves R.D., Richards D., Johnson M.S., Cooke J.A., Malaisse F., Paton A., Smith J.A.C., Angle J.S., Chaney R.L., Ginocchio R., Jaffre T., Johns R., McIntyre T., Purvis O.W., Salt D., Schat H., Zhao F.J. & Baker A.J.M. 2004. Research priorities for conservation of metallophyte biodiversity and their potential for restoration and site remediation. *Restoration Ecology*. **12** : 106-116.

Les sites métallifères sont des îles écologiques. Illustration avec un gisement de cuivre portant une végétation de pelouse au sein d'une mer de forêt claire, Katanga / RDC