



HAL
open science

Plantes hyperaccumulatrices et biovalorisation des métaux

Valérie Burtet-Sarramegna, Bruno Fogliani, Claude Grison, Sandrine Isnard,
Tanguy Jaffré, Laurent L'Huillier, Yohan Pillon, Cyril Poullain

► **To cite this version:**

Valérie Burtet-Sarramegna, Bruno Fogliani, Claude Grison, Sandrine Isnard, Tanguy Jaffré, et al..
Plantes hyperaccumulatrices et biovalorisation des métaux. Géologues, 2021. hal-03480909

HAL Id: hal-03480909

<https://hal.science/hal-03480909>

Submitted on 19 Jul 2024

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.

Plantes hyperaccumulatrices et biovalorisation des métaux

Valérie Burtet-Sarramegna¹, Bruno Fogliani², Claude Grison³, Sandrine Isnard⁴, Tanguy Jaffré⁵, Laurent L'Huillier⁶, Yohan Pillon⁷ et Cyril Poullain⁸.

Historique et connaissances acquises sur les plantes hyperaccumulatrices

Certains éléments traces métalliques (ETM) sont physiologiquement essentiels aux plantes, généralement en quantités très faibles. À titre illustratif, le nickel est indispensable pour le bon fonctionnement d'une enzyme : l'uréase. Cependant, en présence de concentrations élevées d'ETM, à l'instar de celles rencontrées dans les sols riches en métaux biodisponibles (qu'ils soient naturellement riches ou contaminés), les organismes font face à des contraintes édaphiques fortes, auxquelles ils doivent s'adapter pour survivre. Ces organismes sont caractérisés par une tolérance qui résulte de l'acquisition de mécanismes adaptatifs diversifiés en fonction des contraintes du milieu. Ainsi, certaines plantes (dites « excluders ») vont limiter l'entrée des ETM au niveau des racines, ainsi que leur transport vers les tiges et les feuilles, limitant les concentrations des métaux dans leurs cellules. Cependant, d'autres espèces ont développé la capacité d'accumuler des concentrations très élevées d'ETM dans leurs parties aériennes, et plus particulière-

ment les feuilles, et sont, en raison de ce comportement, dénommées hyperaccumulatrices de métaux.

La première plante hyperaccumulatrice de nickel : *Alyssum bertolonii*, a été décrite en Italie en 1948 (Minuzzi et Vergnano, 1948). C'est seulement au cours des années 1970-1980 que l'hyperaccumulation du nickel et celle du manganèse ont été largement décrites en Nouvelle-Calédonie chez plusieurs espèces de différents groupes botaniques (Jaffré *et al.*, 2013). Le phénomène d'accumulation le plus spectaculaire a été signalé chez *Pycnanandra* (ex *Sebertia*) *acuminata*, un arbre endémique dont le latex contient jusqu'à 25% de nickel (Jaffré *et al.*, 1976). Cet arbre est d'ailleurs nommé « le Sève Bleue » en raison de la coloration de son latex par les sels de nickel.

Aujourd'hui, on trouve à travers le monde environ 760 espèces hyperaccumulatrices (en particulier du nickel) (Manara *et al.*, 2020). Par ailleurs, l'exploration systématique des herbiers du monde entier par des techniques non invasives devrait permettre d'en découvrir encore davantage (van der Ent *et al.*, 2019 ; Gei *et al.*, 2020). Selon l'élément considéré, le seuil au-delà duquel une plante est considérée comme hyper-accumulatrice est différent (Tableau 1).

Elément	Seuil d'hyperaccumulation (mg / kg poids sec)	Nombre de familles	Nombre de Genres	Nombre d'espèces
Arsenic (As)	➤ 1000	1	2	5
Cadmium (Cd)	➤ 100	7	9	43
Cobalt (Co)	➤ 300	18	33	43
Cuivre (Cu)	➤ 300	20	44	53
Chrome (Cr)	➤ 1000	1	1	1
Plomb (Pb)	➤ 1000	7	9	9
Manganèse (Mn)	➤ 10 000	16	24	42
Nickel (Ni)	➤ 1000	54	131	532
Sélénium (Se)	➤ 100	7	15	41
Thallium (Tl)	➤ 100	1	2	2
Zinc (Zn)	➤ 3000	9	12	21

Tableau 1. Seuils de concentration des métaux dans les feuilles, définissant l'hyperaccumulation par les plantes pour la plupart des métaux. Nombre de familles, genres et espèces de plantes hyperaccumulatrices découvertes à ce jour, d'après la base de données « Global Hyperaccumulator Database (Mars 2020 ; <http://hyperaccumulators.smi.uq.edu.au/collecton/>) (d'après Manara *et al.*, 2020).

1. ISEA (Institut des Sciences Exactes et Appliquées, Université de la Nouvelle-Calédonie, BP R4, 98851 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie).

2. bruno.fogliani@unc.nc ; ISEA - IAC (Institut Agronomique néo-Calédonien, BP 73, 98890 Païta, Nouvelle-Calédonie).

3. claude.grison@cncs.fr ; Laboratoire de Chimie Bio-inspirée et Innovations écologiques, UMR 5021, Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Montpellier, 34790 Grabels, France.

4. AMAP, Université Montpellier, IRD, CIRAD, CNRS, INRAE, Montpellier, France ; AMAP, IRD, Herbier de Nouvelle-Calédonie, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.

5. AMAP, Université Montpellier, IRD, CIRAD, CNRS, INRAE, Montpellier, France ; AMAP, IRD, Herbier de Nouvelle-Calédonie, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.

6. IAC.

7. yohan.pillon@ird.fr ; LSTM, IRD, INRAE, CIRAD, Institut Agro, Univ. Montpellier, Montpellier.

8. cyril.poullain@cncs.fr ; Laboratoire de Chimie Bio-inspirée et Innovations écologiques, UMR 5021, Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Montpellier, 34790 Grabels, France.

L'existence de cette faculté d'hyperaccumulation est présente chez de nombreuses familles végétales, réparties dans différentes régions (Fig. 1), ce qui suggère des origines multiples de ce caractère (Verbruggen *et al.*, 2009).

Signification biologique de l'hyperaccumulation

Quels sont les bénéfices de l'hyperaccumulation pour les plantes ? Cette question reste largement débattue en raison de la diversité des mécanismes et des conditions écologiques de l'hyperaccumulation, qui répondent à des contraintes variées. Plusieurs hypothèses sont donc avancées, parmi lesquelles la protection de la plante vis-à-vis des herbivores et des attaques fongiques (Boyd, 2004), bien que certains insectes semblent avoir développé des stratégies de tolérance au nickel (Boyd *et al.*, 2006). L'hyperaccumulation dans les feuilles pourrait également conduire à l'enrichissement de la litière à proximité de la plante, limitant ainsi la germination et le développement d'autres espèces moins adaptées à des teneurs métalliques élevées.

De l'intérêt d'utiliser les plantes hyperaccumulatrices

Les caractéristiques adaptatives développées par les espèces hyperaccumulatrices de métaux ouvrent de nombreuses perspectives quant à leur utilisation dans divers domaines. Ainsi, outre leur utilisation pour la restauration écologique des terrains miniers dégradés par l'ex-

ploitation minière (Losfeld *et al.*, 2015a), certaines espèces peuvent également être employées in situ pour la décontamination des sols (phytoremédiation) (Losfeld *et al.*, 2015b). Ceci peut notamment se faire en fixant les métaux polluants, tout en évitant leur transfert vers la nappe phréatique, un processus nommé phytostabilisation.

L'usage des plantes hyperaccumulatrices est également de plus en plus envisagé dans des perspectives de valorisation économique via la phytomine ou l'agromine (Van der Ent *et al.*, 2021). Ces deux dernières techniques consistent à cultiver des plantes hyperaccumulatrices sur des milieux riches en métaux afin d'exploiter le métal ou les dérivés métalliques qu'elles sont en mesure de stocker. Le terme de phytomine est plus employé lorsque l'on s'attache à étudier le potentiel d'extraction des plantes, là où l'agromine s'intéresse aux procédés technologiques, agronomiques ou métallurgiques permettant de produire des composés commercialisables. Par exemple, les complexes métalliques stockés dans ces plantes sont parfois pourvus de propriétés intéressantes, notamment catalytiques (voir encadré).

En raison de leur potentiel et des nombreuses applications associées, de plus en plus de pays s'attachent à valoriser les plantes hyperaccumulatrices à travers le monde. La Nouvelle-Calédonie, reconnue comme hotspot mondial de biodiversité, et renommée pour sa flore très diversifiée et originale, compte de nombreuses espèces hyperaccumulatrices de métaux (dans des groupes botaniques variés), dont une centaine pour le nickel, ce qui la classe au second rang derrière Cuba, mais loin devant tous les autres territoires.

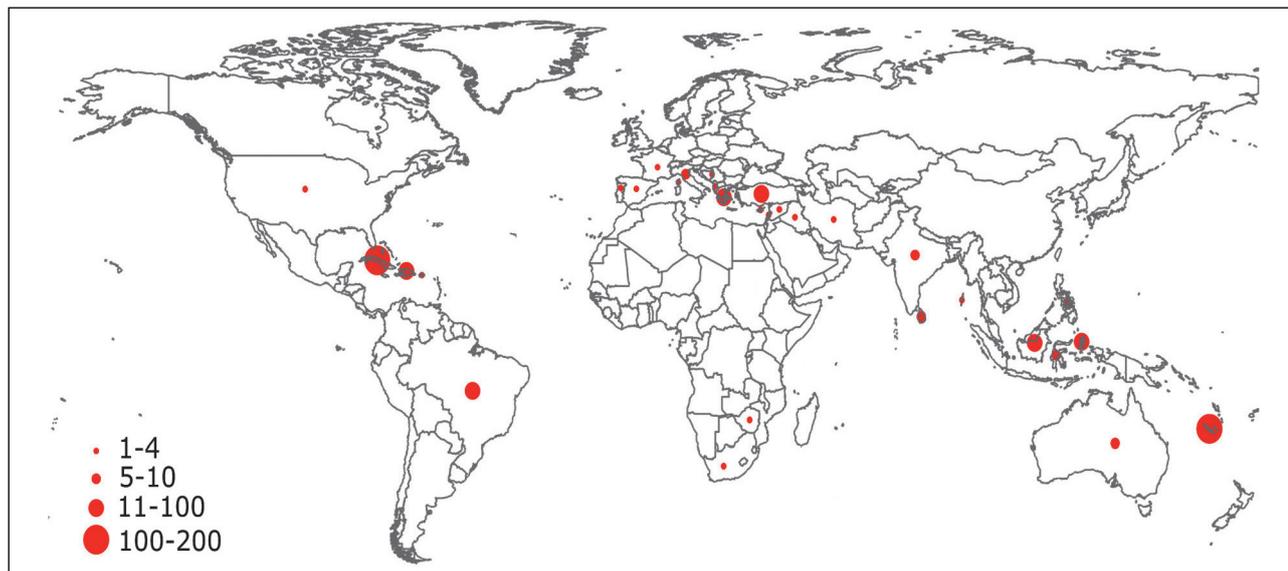


Figure 1. Carte de répartition mondiale des espèces hyperaccumulatrices (d'après Invernon *et al.*, 2021).

L'écocatalyse : une valorisation durable et écologique des plantes hyperaccumulatrices d'éléments métalliques

Si les plantes hyperaccumulatrices ont montré tout leur intérêt en *restauration écologique*, elles constituent également un réservoir naturel de métaux de transition précieux en synthèse organique. Le laboratoire de Chimie Bio-inspirée et Innovations Ecologiques (<http://www.chimeco-lab.com>) a montré qu'elles pouvaient être valorisées d'une façon inédite et reconnue internationalement (Grison *et al.*, 2021), à travers une démarche qui répond aux objectifs du *développement durable*. Profitant de la capacité remarquable de ces plantes hyperaccumulatrices à bioconcentrer les métaux de transition dans leurs feuilles, il est possible de transformer les métaux dérivés de plantes en *catalyseurs métalliques biosourcés* pour la synthèse organique. Cette approche originale constitue le premier exemple de catalyseur chimique basé sur les phytotechnologies. Elle offre la première perspective de valorisation de cette biomasse unique et initie une *nouvelle* branche de la *chimie* verte : l'*écocatalyse*. Ce procédé a trouvé de nombreuses applications sociétales importantes (agents de biocontrôle, molécules antivirales, produits cosmétiques, ...). L'écocatalyse n'est pas un simple substitut aux catalyseurs issus de la métallurgie, mais conduit à de nouveaux outils qui intègrent *une triple vision : chimie, écologie, environnement*.

Applications en Nouvelle-Calédonie

Sur ce territoire, les sols issus des roches ultramafiques (certains riches en métaux biodisponibles) recouvrent un tiers de la surface de la Grande Terre. Un grand nombre d'espèces (~1200), endémiques à 96.6%, se trouvent uniquement sur ces sols (Isnard *et al.*, 2016). Ainsi, la Nouvelle-Calédonie n'échappe pas à l'engouement international pour les espèces hyperaccumulatrices, et présente des potentialités d'études et d'applications considérables (Löffel *et al.*, 2015b). Depuis plusieurs décennies, des travaux sont engagés pour, dans un premier temps, inventorier les espèces hyperaccumulatrices du pays, les caractériser et les intégrer dans les programmes de restauration des milieux dégradés par l'activité minière, et, dans un deuxième temps, évaluer leur valorisation économique potentielle. Dès les années 70, des espèces du genre *Grevillea*, *G. exul*, *G. rubiginosa*, *G. gillivrayi*, *G. meisneri* (*Proteaceae*) ou encore *Geissois pruinosa* (*Cunoniaceae*) et *Cloezia artensis* (*Myrtaceae*), ont fait l'objet de recherches pour leur capacité pionnière, associée à une bonne capacité d'implantation sur sites (limitant de fait l'érosion). À partir des années 90, la volonté d'accroître la diversité des espèces utilisées en réhabilitation a conduit à élargir la gamme d'espèces accumulant en particulier du manganèse ou du nickel (Fogliani *et al.*, 2004 ; L'Huillier *et al.*, 2010). Cette dernière est allée de pair avec la nécessité croissante de restaurer des zones dégradées par l'activité minière pour réduire l'érosion et les pollutions engendrées. De plus, dès 2010, avec la découverte de catalyseurs métalliques biosourcés extractibles (cf. encadré), l'opportunité de développer l'agromine en Nouvelle-Calédonie a été envisagée. Les premiers essais ont été menés en 2012 par l'IAC (Institut Agronomique néo-

Calédonien) et le CNRS en collaboration avec la SLN (Société Le Nickel) dans la zone de Thio (Fig. 2) et ont consisté à évaluer la réponse de plusieurs espèces : *Geissois* (*G. pruinosa*) et *Grevillea* (*G. exul*, *G. rubiginosa*) plantées sur déblais latéritiques (encore relativement riches en ETM), additionnés ou non d'engrais et/ou de topsoil. L'objectif était de mesurer, en fonction des traitements, tant l'accumulation des métaux que la croissance des plants dans un objectif d'exploitation économique. Dans un second temps, une association de ces mêmes espèces avec des espèces potentiellement fixatrices d'azote, comme *Gymnostoma deplancheanum* (*Casuarinaceae*), *Serianthes calycina* ou *Storckii-pancheri* (*Fabaceae*), a été testée. Puis des essais équivalents (mais menés sur d'autres espèces et sites miniers) ont été réalisés comme l'association de *Gymnostoma intermedium*, *S. calycina* et *S. pancheri* avec deux espèces de *Grevillea* (SLN-Kouaoua) ou encore *Grevillea meisneri* avec différents amendements de phosphore (SLN-Tiébaghi) et enfin l'association de *Grevillea exul* avec *Acacia spirobis* (KNS-Koniambo). Les résultats obtenus montrent des tendances plus ou moins favorables en fonction de l'espèce testée, des amendements apportés ou des associations réalisées ; tendances qui méritent d'être confirmées par un suivi à plus long terme au regard de la capacité de croissance des plantes sur sols ultramafiques.

Enfin, il est à souligner que quelles que soient les applications potentielles des espèces hyperaccumulatrices, la plante doit être considérée non pas seule mais comme un système complexe, ayant des interactions avec des microorganismes du sol, susceptibles de jouer un rôle essentiel sur la croissance de la plante et sur la stabilisation et l'extraction des métaux.



Figure 2. Illustration de la croissance après un an de suivi de plantes hyperaccumulatrices testées en agromine sur la zone de Thio, camps des sapins. A gauche : plant de *Geissois pruinosa* ; à droite : mesure d'un plant de *Grevillea exul*.

Le microbiome des hyperaccumulateurs - une autre source de perspectives ?

L'utilisation des espèces hyperaccumulatrices, pour la bioremédiation, la phytostabilisation, la phytomine ou encore l'agromine, peut être limitée par la productivité des plantes (faible biomasse et/ou croissance lente) et/ou la biodisponibilité restreinte des métaux dans le sol. Aussi, les programmes de recherche actuels visent à optimiser les conditions de croissance et de développement de ces espèces, voire leur capacité d'accumulation des métaux. C'est notamment dans cette perspective qu'ont été développés des travaux visant à mieux identifier les rôles clés des microorganismes naturellement associés à ces plantes et qui sont capables de favoriser leur croissance (par des effets dits PGP : Plant Growth Promoting), ou leur accumulation de métaux (Bourles *et al.*, 2020a ; 2020b). Ces microorganismes peuvent être des champignons (dont des champignons mycorhiziens) et/ou des bactéries (endophytes ou rhizosphériques). Qu'ils soient symbiotiques ou non, ces microorganismes (dont certains résistent aux métaux) jouent un rôle important dans la survie et la croissance de la plante, en atténuant la toxicité métallique et/ou en facilitant l'apport de nutriments essentiels, et/ou en facilitant l'installation d'autres microorganismes indispensables à la plante. Par ailleurs, certains de ces

microorganismes sont également capables d'accroître la biodisponibilité des métaux du sol, et par là-même de favoriser leur hyperaccumulation par la plante hôte. Il a également été établi que la présence de métaux dans les sols (sites pollués et/ou ultramafiques), semble sélectionner des cortèges microbiens spécifiques et/ou moduler l'activité microbienne de ces sols. Le concept d'assistance microbienne des plantes utilisées en phytomine (Benizri *et al.*, 2021) établit que des programmes de phytomine et/ou de restauration écologique efficaces doivent inclure des microorganismes naturellement associés aux plantes utilisées, et dont le rôle

bénéfique est désormais reconnu. Afin de mieux appréhender ces cortèges microbiens, leur sélection et leurs activités, différentes approches peuvent être mises en œuvre, qui sont soit culture-dépendantes (isolement de microorganismes cultivables), soit culture-indépendantes (en particulier techniques dites « omics » ; notamment la métagénomique ; voir infra). Il est à mentionner que ces deux types d'approches ne donnent pas accès au même type d'information et que, dans la perspective d'une utilisation ultérieure sur le terrain, seuls les microorganismes cultivables seront exploitables. Par ailleurs, leurs propriétés intrinsèques vis-à-vis des métaux pourront également être valorisées via le développement de biotechnologies innovantes. Ainsi, l'étude du microbiome des plantes hyperaccumulatrices de métaux est actuellement un domaine en plein essor.

Pour conclure, quelles que soient les applications envisagées, l'utilisation des espèces hyperaccumulatrices et/ou de leur microbiome pour de potentielles applications nécessite en amont une meilleure connaissance des mécanismes moléculaires et physiologiques de l'hyperaccumulation. Dans ce cadre, l'avènement des techniques moléculaires dites « omics » (génomique, transcriptomique, protéomique, ionomique), ouvre des perspectives tout à fait prometteuses.

Bibliographie

- Vous trouverez les références bibliographiques de cet article sur le site de la SGF : www.geosoc.fr