

VARHYPEX - Création et production de variétés hyperaccumulatrices de métaux lourds pour la dépollution des sols (phytoextraction)

Sterckeman T.¹, Gossiaux L.², Guimont S.², Jaubertie J.-P.³, Sirguez C.¹

¹ Université de Lorraine – INRAE, Laboratoire Sols et Environnement, F-54505 Vandœuvre-lès-Nancy cedex

² VALTERRA Dépollution & Réhabilitation - 3 allée de Chantilly, F-54500 Vandœuvre-lès-Nancy

³ Agri Obtentions, Chemin de la Petite Minière, F-78280 Guyancourt

Correspondance : thibault.sterckeman@univ-lorraine.fr

Résumé

La surexposition chronique des populations au Cd par les denrées agricoles doit être réduite. La phytoextraction apparaît actuellement comme la seule solution pour décontaminer d'énormes superficies de terres agricoles contaminées par ce métal. Pour la mettre en œuvre, on dispose d'une plante avec une capacité de bioconcentration exceptionnelle, l'hyperaccumulateur *Noccaea caerulescens*, dont on a démontré le potentiel d'amélioration des traits d'intérêt, notamment de sa production de biomasse. Des simulations raisonnables ont indiqué l'efficacité de la phytoextraction en grande culture, comme culture intermédiaire d'automne. L'étude a permis une première définition des idéotypes nécessaires. Les procédés existants ou à l'étude suggèrent que moyennant des adaptations, la biomasse de l'hyperaccumulateur pourrait être valorisée pour produire de l'énergie ou des matériaux, ce qui réduirait le coût de la dépollution des sols. Cependant, il reste de nombreux verrous scientifiques et technologiques à lever pour arriver à cette solution : création de cultivars à forte production de biomasse, dont les semences puissent être multipliées à un coût acceptable ; développement d'une filière de traitement valorisant la biomasse issue des cultures de phytoextraction ; établissement d'itinéraires techniques permettant d'insérer la phytoextraction en grande culture.

Abstract: Creation and production of hyper-accumulative varieties of heavy metals for soil decontamination (phytoextraction)

Chronic overexposure of populations to Cd in vegetal foods must be reduced. Phytoextraction is currently the only solution to decontaminate huge areas of farmland that are contaminated by this metal. To implement it, we have a plant with an exceptional bioconcentration capacity, the hyperaccumulator *Noccaea caerulescens*, for which the improvement of useful traits, particularly its biomass production, has been shown. Reasonable simulations indicated the efficiency of phytoextraction as an intermediate fall crop. The study allowed a first definition of the necessary ideotypes. Existing or proposed processes suggest that with adaptations, the biomass of the hyperaccumulator could be used to produce energy or materials, which would reduce the cost of soil remediation. However, there are still many scientific and technological obstacles to overcome to reach this solution: Creation of cultivars with high biomass production, the seeds of which could be produced at an acceptable cost; Development of a treatment sector that would use the biomass from phytoextraction cultures; Designing of agricultural practices allowing the insertion of phytoextraction in field cropping.

Introduction

Le cadmium (Cd) est un métal présent à l'état de traces dans la croûte continentale supérieure et dans les sols. C'est un élément très toxique, pouvant être fortement retenu dans le corps humain, notamment au niveau des reins. Cette rétention fait de l'exposition chronique même faible une menace sérieuse pour la santé humaine, du fait de risques accrus de dysfonctionnements rénaux et de cancers. Si l'on s'en réfère au seuil d'exposition chronique proposé aux USA, la plupart des populations du monde sont nettement surexposées Cd par leur alimentation. D'après le seuil proposé par l'Autorité Européenne de Sécurité Alimentaire (EFSA), les populations européennes sont juste sous la limite de la surexposition (Clemens *et al.*, 2013). Ce cadmium vient principalement des sols, où il est absorbé par les racines et partiellement stocké dans les parties consommables des plantes cultivées. Les céréales, les légumes et les tubercules sont la principale source de cette surexposition (EFSA, 2012), à tel point que l'Union Européenne a récemment recommandé aux États de prendre des mesures pour la réduire (Borg, 2014).

L'excès de Cd dans les sols provient des activités humaines, principalement de la fertilisation phosphatée (Six et Smolders, 2014). En effet, le Cd est naturellement concentré dans la plupart des minerais de phosphates et on le retrouve dans les engrais apportant du P aux cultures. En France et en Europe, cette pollution touche des surfaces très importantes, dont on ne sait comment les décontaminer, puisqu'il n'existe actuellement aucune technique pour cela. La teneur moyenne des sols agricoles français est de 0,3 mg Cd kg⁻¹, soit environ trois fois le fond géochimique. La phytoextraction du Cd, c'est-à-dire son enlèvement par une culture spécifique qui l'accumulerait dans ses parties récoltables, est la voie la plus vraisemblable pour dépolluer d'aussi vastes étendues touchées par une contamination relativement faible. Depuis plusieurs décennies, la phytoextraction des métaux toxiques a été envisagée à l'aide de plantes hyperaccumulatrices (Chaney, 1983), espèces non domestiquées ayant la capacité de fortement tolérer et accumuler dans leurs parties aériennes des éléments tels que le nickel (Ni), le zinc (Zn) ou le Cd. Pour la pollution cadmiée, la principale espèce hyperaccumulatrice étudiée est *Noccaea caerulescens* (le tabouret bleuâtre), Brassicaceae par ailleurs très étudiée pour comprendre l'homéostasie de l'hypertolérance et de l'hyperaccumulation des métaux. Mais la phytoextraction a le plus souvent été envisagée pour traiter des sols assez fortement contaminés, de superficies modérées, par exemple en milieu industriel ou péri-industriel. Elle n'a pas atteint de résultats opérationnels ni un développement commercial, du fait des durées trop longues de dépollution, en partie dues à l'absence de cultivars performants. La phytoextraction par l'hyperaccumulateur pour des pollutions faibles comme celle dues au Cd en agriculture ou en maraîchage n'a en outre pas été envisagée jusqu'à présent.

L'objectif de notre étude était d'évaluer la faisabilité de la phytoextraction du Cd avec l'hyperaccumulateur *N. caerulescens* et de définir les conditions de son développement, notamment en termes de création et de production de cultivars. Les principales actions que nous avons menées lors de cette étude ont été :

- Une synthèse des travaux de phytoextraction du Cd en plein champ, visant à évaluer le potentiel de l'espèce et à dégager des itinéraires techniques pour leur culture,
- Un bilan des premiers travaux d'amélioration de l'hyperaccumulateur menés récemment dans notre laboratoire,
- Une prise en main de la culture de l'hyperaccumulateur par le partenaire semencier de ce projet, visant notamment à évaluer la faisabilité de la production de semences et de plants en mini-mottes,
- Des simulations du bilan de cadmium à l'échelle du siècle dans les sols agricoles en France, en incluant ou pas la culture de phytoextraction selon différentes modalités,
- Un recensement des techniques permettant de traiter et valoriser la matière végétale produite par les cultures de phytoextraction,
- Une réflexion sur les recherches à mener pour arriver à une phytoextraction opérationnelle du Cd.

Nous en présentons ici les principaux résultats.

1. Synthèse des essais de phytoextraction du Cd en plein champ

Le tabouret bleuâtre (Figure 1), *N. caerulescens*, est l'espèce qui a le plus été utilisée pour tenter de dépolluer les sols contaminés par le Cd. Autrefois rattachée au genre *Thlaspi*, elle est originaire d'Europe occidentale et centrale et particulièrement présente en France, à moyenne altitude. On la trouve sur les sols non métallifères de prairies et lisières forestières des Ardennes, des Vosges, du Massif Central, du Jura ou des Pyrénées. Elle est constitutivement hyperaccumulatrice de Zn et certains génotypes sont adaptés aux sols nickelifères (sols sur serpentinite). D'autres génotypes, dits calaminaires, sont adaptés aux sols lourdement enrichis en Zn, Pb et Cd (sols de sites miniers ou métallurgiques). C'est l'espèce qui accumule le plus de Cd, du fait de l'existence, dans le sud du Massif Central, de génotypes accumulant particulièrement ce métal (Sterckeman *et al.*, 2017). L'espèce présente un régime de reproduction de type mixte, avec un fort taux d'autofécondation.



Figure 1 : Plante de tabouret bleuâtre (*Noccaea caerulescens* (J.Presl & C.Presl) F.K.Mey.) à la floraison.

Son cycle végétatif naturel est celui d'une plante bisannuelle. La graine germe à la fin de l'été, forme une rosette à l'automne, qui passe l'hiver, subit une vernalisation, fleurit très tôt en sortie d'hiver. Sa floraison est étalée et étagée pendant tout le printemps, de même que la fructification, qui arrive à terme, à la maturité, entre la mi-juin et la mi-juillet. Les graines peuvent également germer au printemps suivant l'année de leur production, donnant des rosettes qui vont passer l'année sans fleurir, ce qui confère à l'espèce une forme pérennante.

De 1993 à 2017, près d'une douzaine de sites pollués dans le monde ont fait l'objet d'essais de plein champ de phytoextraction du Cd et du Zn avec *N. caerulescens*, ce qui représente un nombre de cultures plus important, du fait que plusieurs cultures ont été menées sur certains sites pendant plusieurs années selon des modalités différentes (Tableau 1). La teneur en Cd dans les sols était très variable, de 0,2 à 50 mg.kg⁻¹ environ. Des populations sauvages de diverses origines ont été utilisées, qui n'étaient pas toujours les plus accumulatrices de Cd. Les cultures ont le plus souvent été implantées par repiquage, rarement par semis direct, l'implantation ayant lieu au printemps ou au début de l'été, et la récolte en fin d'été ou à l'automne. Leurs durées étaient variables mais en général courtes, de l'ordre de 2 à 4 mois. Il n'y a pas eu à proprement parler de tests de réponse à la fertilisation ou aux traitements phytosanitaires. Les productions de matière sèche étaient de 0,3 à 7,8 t MS.ha⁻¹. Beaucoup de cultures ont produit moins de 1 t.ha⁻¹. Un rendement de 2 t.ha⁻¹ peut donc être considéré comme honorable et de 4 t.ha⁻¹ comme exceptionnellement élevé. Ceci explique la faible efficacité de la dépollution, dont les durées étaient estimées (elles ne l'étaient pas dans tous les essais) à plusieurs décennies.

Tableau 1 : Localisation et références des essais de phytoextraction du Cd menés avec *N. caerulea*.

Essai	Pays	Source
Beltsville	USA	Brown <i>et al.</i> (1995)
Bruxelles	Belgique	Jacobs <i>et al.</i> (2017)
Casiano	Suisse	Hammer et Keller (2003)
Dornach	Suisse	Kayser <i>et al.</i> (2000), Hammer et Keller (2003), Keller <i>et al.</i> (2003)
Homécourt	France	Rees (2014)
La Bouzule	France	Schwartz (1997)
Mae Sot	Thaïlande	Simmons <i>et al.</i> (2014)
Nottingham	Royaume Uni	Maxted <i>et al.</i> (2007)
Příbram	Tchéquie	Trustoš <i>et al.</i> (2016)
Vandoeuvre	France	Lovy (2012)
Woburn	Royaume Uni	McGrath <i>et al.</i> (1993), Baker <i>et al.</i> (1994), McGrath <i>et al.</i> (2000), McGrath <i>et al.</i> (2006)
Ziefen	Suisse	Felix (1997)

Les espoirs d'une réussite du traitement avec *N. caerulea* reposent sur quelques essais ayant montré un fort rendement d'extraction et surtout sur la présence dans les cultures de certains individus plus productifs en matière sèche et plus concentrés en métaux.

Pour le calendrier de culture, on peut envisager une culture d'hiver, proche du cycle naturel et ressemblant à celle du colza. La récolte serait réalisée en mai, au moment où les inflorescences sont encore vertes et constituent un maximum de biomasse. Des cultures que l'on peut qualifier de printemps peuvent également être envisagées, avec une implantation en mars-avril et une récolte au mois d'août voire plus tard. Dans ce cas, la rosette se développe avec peu de floraison du fait de l'absence de vernalisation, mais les essais menés montrent que l'on n'obtient pas pour autant une plus faible biomasse.

Nous avons également réalisé une synthèse bibliographique des essais de phytoextraction de plein champ menés avec d'autres espèces que le tabouret bleuâtre. Ce sont d'autres espèces hyperaccumulatrices de Cd, plus récemment découvertes, comme *Sedum alfredii*, *S. plumbizincicola* ou la morelle noire (*Solanum nigrum*), ou des espèces accumulatrices et à forte production de biomasse, comme des saules (*Salix* spp.), le riz (*Oryza sativa*), le maïs (*Zea mays*), le colza (*Brassica napus*), le tournesol (*Helianthus annuus*), la moutarde brune (*B. juncea*) et le tabac (*Nicotiana tabacum*). Quelques espèces présentent un potentiel pour la phytoextraction du Cd : l'hyperaccumulateur *S. plumbizincicola*, la morelle noire ainsi que certaines variétés de tabac et de riz. Leur utilisation serait adaptée aux sols peu contaminés, comme ceux des parcelles agricoles ou maraîchères. Cependant, outre que ces espèces sont adaptées à des climats ou des systèmes de culture particuliers (*S. plumbizincicola* et riz ont été testés avec un certain succès en Chine et au Japon), les résultats expérimentaux sont encore peu nombreux et demandent confirmation dans diverses situations. Dans les conditions françaises, il serait pertinent de tester les performances de la morelle noire et du tabac pour la réduction de la charge en Cd des sols peu contaminés.

2. Bilan des premiers travaux d'amélioration de l'hyperaccumulateur *N. caerulescens*

Lorsque que nous avons soumis le projet VARHYPEX à l'appel à projets CASDAR, nous terminions un programme de sélection généalogique de l'hyperaccumulateur mené grâce un financement de la région Lorraine, du FEDER et de l'Ademe (programmes LORVER et CAPHYTEX). VARHYPEX a été l'occasion de faire le point sur le potentiel d'amélioration génétique de l'espèce au regard des résultats de ce programme de création de lignées. Pour la phytoextraction, la sélection va chercher à maximiser la minéralomasse de métal, c'est-à-dire la quantité de métal dans les parties aériennes, qui se calcule en multipliant la biomasse aérienne de la plante par sa concentration en Cd. On va donc rechercher les plantes les plus grosses et les plus concentrées en métaux.

60 populations de *N. caerulescens*, dont 38 originaires de France, ont été phénotypées, à raison de 15 individus par population en première année. Ces populations appartenaient aux types édaphiques non métallifère (NM), calaminaire (C) et de serpentinite (S). Durant trois générations successives, nous avons sélectionné la descendance et fixé ses caractères d'intérêt par autofécondation (Figure 2). Ceci a été réalisé en serre hors gel, en grands bacs de culture, sur sol artificiellement contaminé.

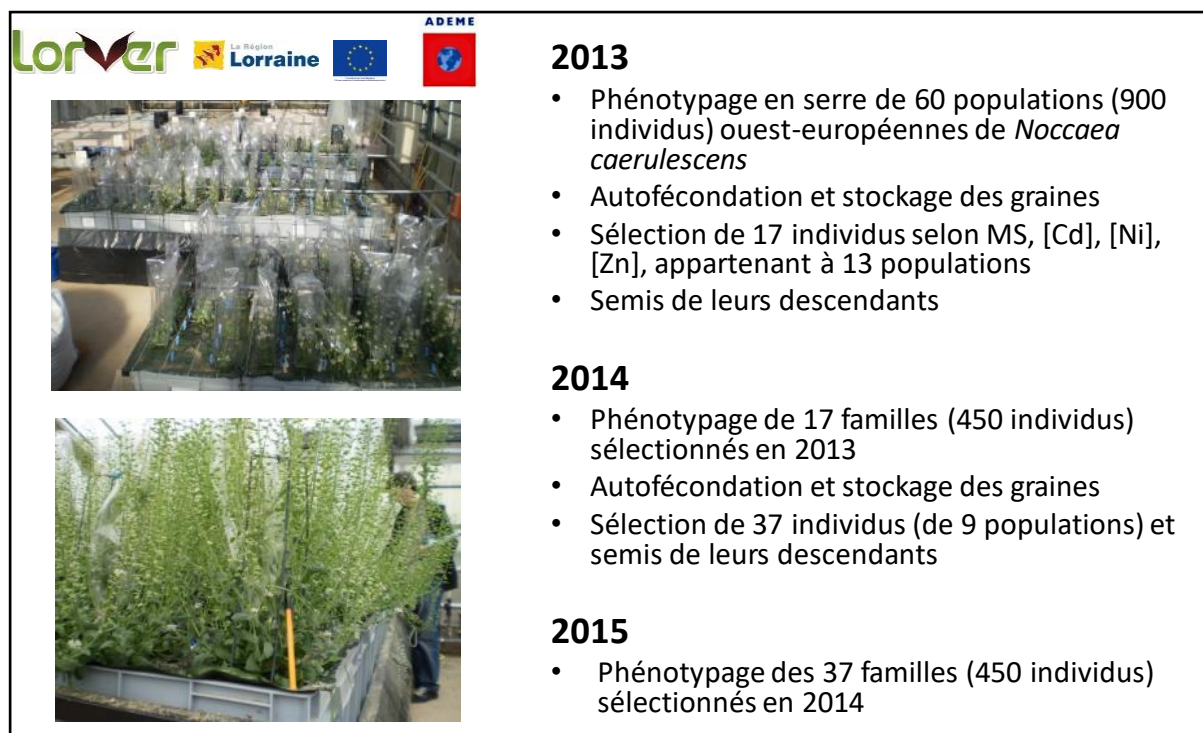


Figure 2 : Programme de la sélection de l'hyperaccumulateur *N. caerulescens* mené dans le cadre du programme LORVER.

Dans les populations sauvages d'origine, on observe une grande variabilité de biomasse des parties aériennes (MS). La moyenne se situe aux environs de 5 g de MS par plante, ce qui correspondrait à environ 3,6 t MS ha⁻¹, en restant très prudent sur cette conversion depuis quelques plantes à un comportement en peuplement. Mais il existe de très gros individus dans toutes les populations, avec des masses allant jusqu'à 25 g environ, soit à la densité de semis de 72 plantes m⁻², plus de 14 t MS ha⁻¹.

La Figure 3 présente l'évolution de la biomasse aérienne au cours de la sélection. La génération G0 est celle des individus sélectionnés après le premier phénotypage des populations sauvages. Les plus gros font près de 20 g, ce qui correspond à 7,3 t MS ha⁻¹, pour une densité de semis de 43 plantes m⁻². Dans la génération suivante, les individus sélectionnés (G1) pèsent de 15 à 70 g, permettant d'envisager des rendements de l'ordre de 10 t MS par ha⁻¹.

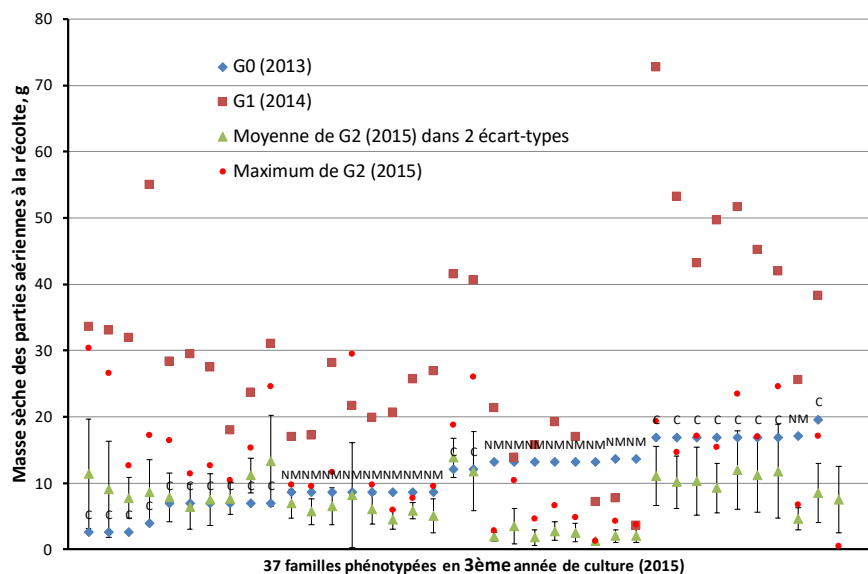


Figure 3 : Evolution de la masse sèche des parties aériennes de *N. caerulea* au cours de la sélection généalogique. C : calaminaire ; NM : non métallifère.

En troisième génération (G2), on a cependant constaté une chute très forte de la biomasse. Les moyennes des descendance étaient souvent sous la masse de l'individu G0 à l'origine de la lignée. Un essai complémentaire de culture de trois générations cultivées simultanément sur le même sol a montré que cette baisse en troisième génération ne résultait pas d'une dépression de consanguinité, mais probablement d'une baisse de la fertilité du substrat, due à des cryptogames et à une dégradation des propriétés physiques du sol.

Dès la génération G0, la concentration en Cd dans les parties aériennes (Figure 4) était plus élevée dans les populations calaminaires que dans les populations non métallifères. Nous avons constaté une augmentation de la concentration dans les plantes de la génération G1 par rapport à celles de la G0, mais il n'y a pas eu d'amélioration notable dans la génération G2. On note cependant dans celle-ci des individus aux concentrations exceptionnellement élevées.

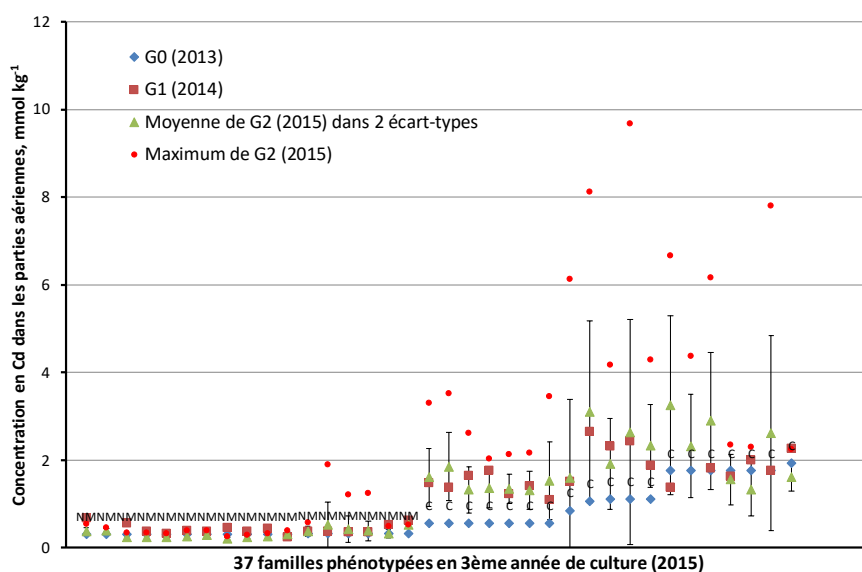


Figure 4 : Evolution de la teneur en Cd des parties aériennes de *N. caerulea* au cours de la sélection généalogique. C : calaminaire ; NM : non métallifère.

La minéralomasse a essentiellement suivi l'évolution de la biomasse (Figure 5). Les descendants de la génération G2 sont retombés quasiment au niveau de leur grands-parents G0. Par contre, en G1, les meilleurs individus extraient beaucoup plus de Cd que les individus d'origine. En effet, les meilleurs individus calaminaires de la génération G0 ont extrait de l'ordre de 8,4 % du Cd du sol alors qu'avec les meilleurs de la G1, on peut estimer enlever de l'ordre de 35 % du Cd du sol en une culture.

Les traits sélectionnés des meilleurs individus sont encourageants, en termes de biomasse, de concentration et de minéralomasse de Cd. Un potentiel de production de l'ordre de 8 à 10 t MS ha⁻¹ a été mis en évidence par la culture en serre, de même qu'une extraction allant jusqu'à 45 % du Cd présent dans le sol en une seule culture. Cependant, ces performances n'ont pas été retrouvées en conditions de plein champ. Nous avons en effet cultivé six lignées ou populations dans un dispositif identique en conditions extérieures, de septembre à juillet, faisant hiverner les plantes. Leur biomasse à la récolte était en moyenne 16 fois inférieure à celles des mêmes accessions cultivées en serre. Cet énorme écart semble dû au froid, mais également aux propriétés du sol utilisé, qui se sont révélées ici encore dégradées par plusieurs cultures successives de l'hyperaccumulateur. Cette partie de l'étude montre donc un potentiel d'amélioration génétique de la plante qui reste à être exprimé dans les conditions de plein champ. Elle suggère également une inadaptation de la plante à la monoculture.

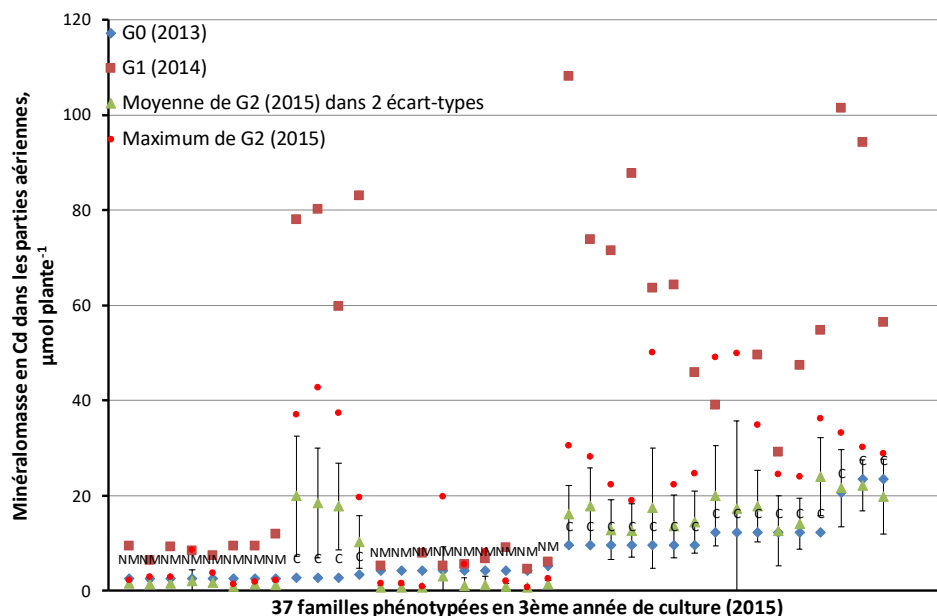


Figure 5 : Evolution de la minéralomasse de Cd extraite par *N. caerulea* au cours de la sélection généalogique. C : calaminaire ; NM : non métallifère.

3. Production de semences et de mini-mottes

Les génotypes les plus intéressants pour la phytoextraction du Cd proviennent de populations calaminaires, c'est-à-dire adaptées à des sols lourdement contaminés en Pb, Zn et Cd. Cependant, pour des raisons de disponibilité et d'aptitude à la culture des sites pollués, mais aussi de protection de la santé des travailleurs, il ne semble pas possible d'envisager que la multiplication des semences de *N. caerulea* se fasse sur des sites contaminés par les métaux. La question se pose alors de la faisabilité de la production des semences sur des sols non contaminés, comme ceux des stations semencières classiques. On peut notamment se demander si la quantité et la qualité des semences d'une plante calaminaire sont les mêmes si on la cultive sur un sol qui contient très peu de métaux. Pour répondre à cette question, au moins sur le court terme, nous avons mené des cultures de *N. caerulea* d'une population calaminaire à la station d'Agri Obtentions à Lusignan.

En première année, des plantations ont été réalisées en mars par repiquage, en châssis ouvert sur sol non contaminé. Du sulfate de zinc a été apporté au substrat. Les plantes sont restées très petites et ont fleuri très rapidement, ce qui suggère une date de plantation non adaptée. La récolte a été réalisée début juillet. L'égrenage était important. En seconde année, le repiquage a eu lieu en novembre, dans les mêmes conditions que l'année précédente. La floraison a débuté dès la mi-mars et la récolte s'est faite fin juin. Les hampes florales avaient une hauteur de 20 à 25 cm et l'égrenage était encore abondant (Figure 6). L'égrenage dû à la déhiscence étalée dans le temps des silicules conduit à une perte importante de semences et oblige à une récolte manuelle en plusieurs passages. Cela augmente fortement le coût de la production des semences. Il est donc nécessaire, pour arriver à une mécanisation de la production, d'obtenir non seulement des plantes au port plus élevé, mais également dont la déhiscence des silicules soit simultanée. Ce problème existait sur le colza et a été résolu par les améliorateurs ; il pourrait donc l'être aussi pour *N. caeruleus*.

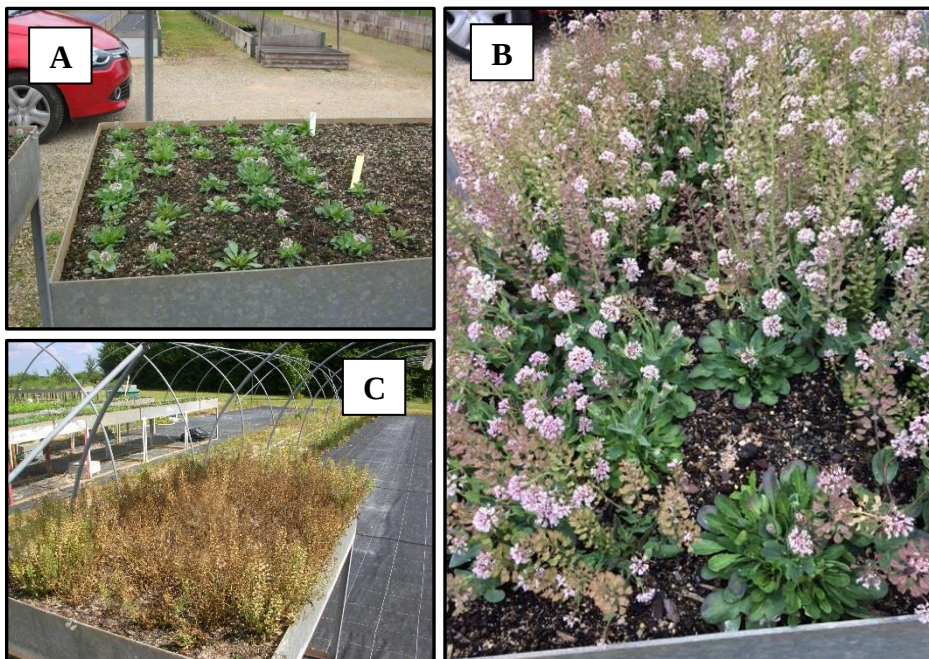


Figure 6 : Images de la production de semences de *N. caeruleus* sur sol non contaminé à la station de Lusignan. **A** : début de floraison des plantes repiquées en châssis ; **B** : fructification ; **C** : maturation des silicules.

Le poids de 1000 grains de la population étudiée était de 0,4 g, ce qui témoigne de la très petite taille des graines de *N. caeruleus*. Des tests de germination ont montré l'intérêt d'un passage au froid (-18 °C pendant un mois) pour lever la dormance, de même qu'un prétraitement par l'acide gibbérellique.

Le repiquage pouvant faciliter le travail au champ dans certaines situations, des mini-mottes ont été réalisées par la société Saulais à Saint-Barthélemy-d'Anjou, selon une méthode habituellement utilisée pour d'autres espèces florales ou légumières. Aucune difficulté technique n'a été rencontrée et des plaques de bonne qualité ont pu être produites, comme celles de 250 plants qui semblent bien adaptées à l'espèce (Figure 7).

Des essais de plein champ ont été réalisés par Agri Obtentions, dans le but d'une prise en main de la plante. Ils ont été conduits à Carrière-sous-Poissy sur un sol contaminé en divers métaux lourds, par un siècle d'épandage des eaux usées de la ville de Paris sur une ancienne zone de cultures maraîchères. Cinq cultures ont été lancées sur deux années, avec différentes dates et modes d'implantation (semis, repiquage). Dans l'ensemble, les plantes ont montré un très faible développement, en même temps qu'un épaississement de leurs racines. Ces symptômes semblaient résulter d'une intoxication par le cuivre,

ainsi que l'ont indiqué les analyses et des travaux montrant la très forte sensibilité de l'espèce à la toxicité au cuivre (Mijovilovich *et al.*, 2009). Le lieu apparemment fertile et pertinent pour la mise en place d'une phytoextraction (car modérément contaminé par le Cd) s'est révélé inadapté du fait de la contamination des sols par le cuivre. Ce résultat indique que la phytoextraction serait plus adaptée en milieu agricole, avec « mono-pollution » par le Cd qu'en milieu multicontaminé, risquant de provoquer une toxicité par le cuivre.



Figure 7 : Plants de *N. caerulescens* en mini-mottes.

4. Simulation de la phytoextraction

Pour évaluer la faisabilité de la phytoextraction dans différents contextes, nous avons développé un modèle de la phytoextraction par l'hyperaccumulateur. Le modèle repose sur le calcul de la minéralomasse extraite (Q_{phy}), qui est le produit de la biomasse récoltée (MS_{PA}) par la concentration en Cd dans celle-ci ($[Cd]_{PA}$).

$$Q_{phy} = [Cd]_{PA} MS_{PA}$$

La concentration en Cd dans les parties aériennes est proportionnelle à la concentration en ion Cd^{2+} libre dans la solution du sol dans laquelle les racines puisent, absorbent cet ion.

$$[Cd]_{PA} = BCF_{Cd} [Cd^{2+}]$$

Le facteur de proportionnalité est désigné par facteur de bioconcentration (BCF_{Cd}). Il a été déterminé empiriquement par Maxted *et al.* (2007) pour *N. caerulescens*. Le facteur de bioconcentration est donné pour la population Ganges, une des plus accumulatrices de Cd, par une fonction du pH du sol (pH_{sol}).

$$\log_{10}(BCF_{Cd}) = -0,281 pH_{sol}^2 + 4,21 pH_{sol} - 10,39, r^2 = 0,80$$

La concentration en ion Cd^{2+} hydraté est une fraction (f) de la concentration totale de Cd dans cette solution ($[Cd]_{sol}$) où le Cd existe également sous forme complexée, notamment par des molécules organiques et donc non absorbable par les racines.

$$[Cd^{2+}] = f [Cd]_{sol}$$

La concentration totale en Cd dans la solution du sol est à son tour déterminée grâce à un coefficient de partage (K_D) entre le Cd en solution et celui sorbé sur la phase solide du sol ($[Cd]_{sor}$).

$$[Cd]_{sol} = \frac{[Cd]_{sor}}{K_D}$$

Ce coefficient de partage est une fonction du pH du sol et de sa teneur en carbone organique (C_{org}). Nous avons utilisé la fonction donnée récemment par Six et Smolders (2014).

$$\log(K_D) = -0,94 + 0,51pH_{sol\ CaCl_2} + 0,79\log(C_{org}), (n = 151, r^2 = 0,71)$$

$$pH_{sol\ CaCl_2} = pH_{sol} - 0,54, (r^2 = 0,88, n = 86) \text{ (Smolders, 2017, communication personnelle)}$$

Sur la base de données expérimentales, nous avons calibré le modèle en fixant $f = 0,15$. Nous avons obtenu une corrélation linéaire entre les observations et les simulations, avec un coefficient de détermination de 0,52.

Nous avons ensuite simulé l'évolution des teneurs en Cd dans les sols sous culture annuelle (grande culture) sur un siècle. Nous avons ainsi simulé un bilan de Cd dans le sol pour chacune des cultures d'une succession de 100 ans, pour un sol moyen français et celui des 22 anciennes régions françaises. Nous avons simulé également l'introduction de la phytoextraction en culture annuelle ou en culture intermédiaire pour évaluer son impact sur le bilan de Cd.

Les postes du bilan sont, pour les entrées de Cd, les retombées atmosphériques, la fertilisation phosphatée et les divers amendement organiques, d'origine agricole, urbaine et industrielle. Parmi les sorties de Cd, on distingue la lixiviation, c'est-à-dire le Cd entraîné avec l'eau percolant, les récoltes des cultures annuelles et les éventuelles cultures de phytoextraction.

Si la fertilisation phosphatée se maintient telle qu'elle est actuellement, sachant que 74 % du Cd entrant provient des engrais phosphatés, la teneur en Cd dans les sols français va augmenter en moyenne d'environ 3 % après 100 ans. Les teneurs dans les cultures vont suivre la même tendance (Figure 8). On ne répondra pas au souhait des autorités sanitaires de faire baisser l'exposition chronique des populations au Cd par l'alimentation.

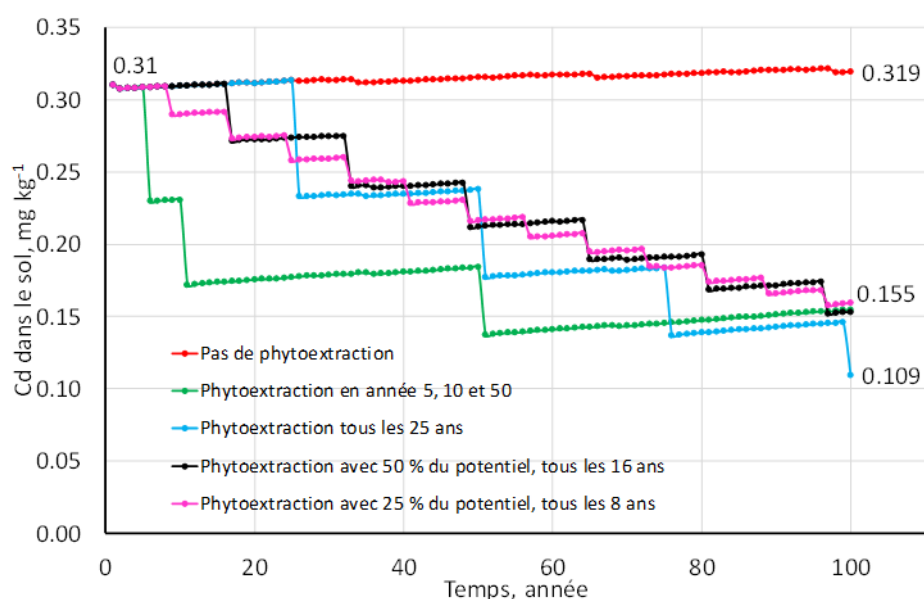


Figure 8 : Evolution moyenne de la teneur en Cd des sols français sous grande culture dans les 100 prochaines années. Courbe rouge croissante : sans phytoextraction ; courbes décroissantes : avec phytoextraction par *N. caerulea* en culture principale à différentes fréquences.

On peut imaginer que certaines années, la culture principale soit remplacée par celle de l'hyperaccumulateur *N. caerulea*. Trois cultures dans le siècle permettraient de ramener la teneur du sol entre 0,15 et 0,20 mg Cd kg⁻¹ (Figure 8). Mais cela suppose une plante produisant 10 t MS ha⁻¹, ce qui est beaucoup, et improbable à atteindre. Si on réduisait le potentiel de la culture de phytoextraction de 50 %, par exemple avec un rendement de 7 t MS ha⁻¹ et un facteur de bioconcentration de 70 % celui

de la population Ganges, il faudrait remplacer six cultures de rapport par celle de l'hyperaccumulateur. Envisagée en culture principale, la phytoextraction causerait donc une baisse de la production agricole, de 3 à 6 %. Une réduction de 3 % pourrait être acceptable, notamment si la phytoextraction venait à la place de la jachère. Une baisse de production de 6 % est une perspective moins envisageable et c'est pour cela que nous avons examiné l'alternative de placer la phytoextraction en culture intermédiaire d'automne, avant une culture de printemps (par exemple maïs, tournesol, pomme de terre, betterave sucrière), avec un potentiel d'accumulation qui serait celui de la population Ganges et une production de matière sèche faible, de 2,5 t MS.ha⁻¹.

Si la phytoextraction est placée devant chaque culture de printemps (32 % de la sole), on peut atteindre le fond pédo-géochimique (0,10 mg Cd.kg⁻¹) en environ 60 ans (Figure 9). Devant une culture de printemps sur deux, on diviserait la teneur du sol par 2,5 en 100 ans. La teneur de 0,15 mg Cd.kg⁻¹ serait atteinte en 50 ans environ si l'on faisait une culture piège à métaux devant 2 cultures de printemps sur 3. Une augmentation de la teneur en Cd des engrais phosphatés, due à l'exploitation de minerais chargés en ce métal, pourrait être contrecarrée par la phytoextraction.

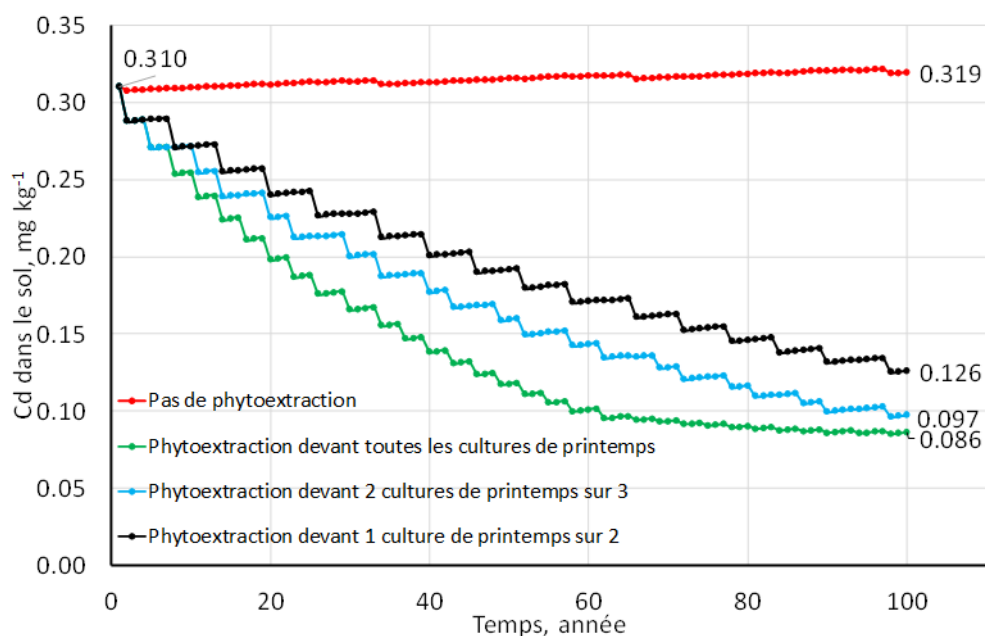


Figure 9 : Evolution moyenne de la teneur en Cd des sols français sous grande culture dans les 100 prochaines années. Courbe rouge croissante : sans phytoextraction ; courbes décroissantes : avec phytoextraction par *N. caerulescens* en culture intermédiaire à différentes fréquences.

Cette approche de modélisation nous a permis d'estimer les surfaces à ensemercer et la quantité de matière sèche produite, au niveau national comme à celui de chacune des 22 anciennes régions. Si on intercale une CIPAM devant deux cultures de printemps sur trois, on couvre chaque année près de 4 millions d'ha, soit 22 % de la SAU en grande culture annuelle. Cela produit près de 10 millions de tonnes de MS, dont l'énergie équivaut à environ 3 millions de tonnes équivalent pétrole (Figure 10).

5. Traitement de la biomasse produite par la phytoextraction

La combustion de la biomasse est un procédé de valorisation par voie sèche qui produit de la chaleur, du CO₂ et de l'eau par l'oxydation complète du combustible, en général en présence d'un excès d'air. L'eau chaude ou la vapeur ainsi obtenues sont utilisées dans les procédés industriels ou dans les réseaux de chauffage urbain. La vapeur peut également être envoyée dans une turbine ou un moteur à vapeur pour la production d'énergie mécanique ou d'électricité.

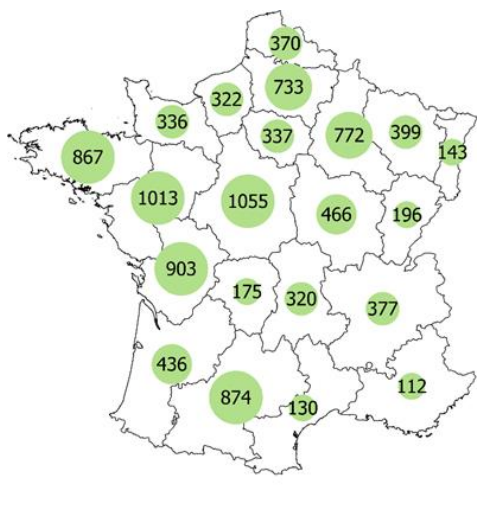


Figure 10 : Estimation de la production de matière sèche de *N. caerulescens* par région française (10^3 t MS an⁻¹) dans le cas d'une phytoextraction en culture intermédiaire

La combustion de la biomasse de tabouret bleuâtre soulève un certain nombre de questions quant à sa faisabilité technique et économique. Ainsi, on peut s'interroger sur le pouvoir calorifique de la MS qui va conditionner la pertinence économique de cette voie et sur le conditionnement de la biomasse en entrée (la biomasse doit-elle être préalablement déshydratée, formulée en granulés, peut-elle être brûlée brute ?). La teneur en cendres de la biomasse, responsable de la formation de mâchefers pouvant dégrader la qualité de la combustion devrait être évaluée. Il en est de même de sa teneur en chlore et en azote qui peuvent conduire à l'émission d'acides corrosifs pour la chaudière. En outre, la teneur en métaux toxiques des cendres est un facteur qui conditionne le traitement de ce reliquat de la combustion.

La méthanisation est un procédé de valorisation de la biomasse par voie humide, basé sur la dégradation de la matière organique par des micro-organismes, en milieu anaérobie. Complexe, elle s'opère dans un digesteur chauffé et sans oxygène. La méthanisation permet de générer d'une part du biogaz, qui se compose de méthane (dans des proportions de 50 à 70%) et de dioxyde de carbone et d'autre part, un digestat. Le biogaz peut être transformé en chaleur, en électricité ou en carburant pour véhicules. Le digestat est habituellement recyclé en agriculture du fait de ses propriétés fertilisantes.

Comme pour la combustion, la méthanisation de la biomasse de *N. caerulescens* pose des questions sur la faisabilité technique et économique. La question du conditionnement de la biomasse se pose : brute ou déshydratée ? Par ailleurs, la méthanisation représente un ensemble complexe de réactions réalisées par différents groupes de bactéries anaérobies. L'équilibre du milieu est primordial pour assurer à chaque groupe des conditions de vie satisfaisantes. Des paramètres tels que la proportion de lignines et de cellulose sont à connaître et à tester pour évaluer la fermentescibilité de la biomasse. La présence de métaux dans le mélange de fermentation pourrait également entraîner des dysfonctionnements du procédé. Enfin, le devenir des digestats devient problématique si ceux-ci contiennent trop de Cd.

Depuis février 2015, des travaux ont démarré à l'Université de Lorraine (Thèse de Z. Menana sous la direction de N. Brosse au Lermab) dans le cadre du programme LORVER, qui portent sur les possibilités de valorisation de la biomasse de *N. caerulescens* par bioraffinage. Leur objectif est la production de biocarburant de seconde génération, c'est-à-dire à partir de biomasse ligno-cellulosique. Cependant, la première étape du procédé conduit à l'extraction de pectines (qui représentent environ 20 % de la MS), qui pourraient trouver une valorisation dans l'industrie agro-alimentaire ou l'isolation thermique. La seconde étape vise à transformer les sucres extraits de la biomasse en éthanol. Une explosion à la vapeur permet en effet de séparer une phase liquide d'une phase solide. Les sucres de la phase solide sont réduits en sucres simples (glucose) par hydrolyse enzymatique, qui peuvent à leur tour être fermentés pour donner de l'éthanol. L'enjeu de recherche est de trouver la voie capable de fermenter également les sucres atypiques de la phase liquide. Les métaux se retrouveraient en majorité dans la fraction solide après explosion à la vapeur, et leur devenir au cours de la fermentation est actuellement à l'étude.

On peut enfin envisager de récupérer les métaux présents dans la biomasse de *N. caerulea*, ou encore dans les cendres de sa combustion ou les digestats de sa méthanisation. C'est ce que montrent les travaux de Hazotte *et al.* (2017), menés eux aussi à l'Université de Lorraine (LRGP) dans le cadre du programme LORVER. Ils ont conduit à mettre au point un procédé permettant d'extraire sélectivement, par cémentation, 96 % du Cd et 80 % du Zn de la biomasse. Les métaux produits sont d'une grande pureté et peuvent être valorisés dans l'industrie, voire en agriculture, comme oligo-élément dans le cas du Zn qui pourrait retourner au sol dont il a été extrait. On peut, de façon analogue, envisager de récupérer d'autres éléments issus de la biomasse, comme P et K.

L'avantage de la phytoextraction avec un hyperaccumulateur plutôt qu'un accumulateur (du type saule ou tabac) est de concentrer davantage le cadmium, et donc de nécessiter moins de biomasse. La contrainte induite est qu'il est probable que la biomasse doit être traitée dans des filières dédiées, qui auraient l'avantage de sortir le métal de la chaîne alimentaire. Au contraire, l'usage de filières de traitement classiques et déjà fonctionnelles, vu la difficulté à maîtriser le devenir de leurs déchets (cendres, digestats) pourrait conduire à un retour du Cd au champ.

Conclusions et perspectives

Cette étude nous a placés face à un enjeu important : la surexposition chronique des populations au Cd par les denrées agricoles, qui devrait augmenter dans les prochaines décennies si rien n'est fait pour réduire la contamination des sols et des récoltes par ce métal.

La phytoextraction apparaît actuellement comme la seule solution pour décontaminer d'énormes superficies de terres agricoles contaminées de manière diffuse par le Cd. Pour espérer la mettre en œuvre, on dispose d'une plante avec une capacité de bioconcentration exceptionnelle, l'hyperaccumulateur *N. caerulea*, qui présente un potentiel génétique d'amélioration de ses traits d'intérêt, notamment de sa production de biomasse. Des simulations raisonnables ont indiqué l'efficacité de la phytoextraction en grande culture, comme culture intermédiaire d'automne. L'étude a permis une première définition des idéotypes nécessaires. Les procédés existants ou à l'étude suggèrent que moyennant des adaptations, la biomasse de l'hyperaccumulateur pourrait être valorisée pour produire de l'énergie ou des matériaux, ce qui réduirait le coût de la dépollution des sols.

Cependant, il reste de nombreux verrous scientifiques et technologiques à lever pour arriver à cette solution. Les premiers portent sur la création d'un cultivar à forte production de biomasse, dont les semences puissent être multipliées à un coût acceptable. Les seconds sont relatifs au développement d'une filière de traitement valorisant la biomasse issue des cultures de phytoextraction. Les troisièmes bloquent toujours l'établissement d'itinéraires techniques permettant d'insérer la phytoextraction en grande culture.

Il semble à ce jour peu utile de mener des investigations sur l'agronomie de la phytoextraction et les procédés de traitement de la biomasse, si on n'a pas l'assurance du développement de la culture. Or celle-ci repose sur l'existence d'un cultivar performant. Autrement dit, la priorité en matière de recherche devrait aller aux investigations permettant la création variétale à partir de *N. caerulea*. Pour avancer, il nous semble important d'explorer les techniques de transformation du végétal, vers une augmentation notable de sa biomasse. Il est prioritaire de poursuivre la sélection généalogique, mais cette fois en conditions extérieures, afin d'intégrer les interactions du génome avec l'environnement. La polyploïdisation et l'hybridation interspécifique devraient être testées dans leur capacité à générer des plantes aux traits mieux adaptés. Il semble également nécessaire de mieux comprendre les déterminismes biomoléculaires de l'hypertolérance et de l'hyperaccumulation des métaux. La connaissance des gènes responsables de l'hyperaccumulation du Cd faciliterait la sélection généalogique et permettrait d'envisager la transgénèse comme voie de création variétale.

Remerciements

Ces travaux ont bénéficié du soutien financier du Ministère en charge de l'Agriculture, grâce au fond CASDAR semences 2015.

Références bibliographiques

- Baker A.J.M., McGrath S.P., Sidoli C.M.D., Reeves R.D., 1994. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resources, Conservation and Recycling* 11, 41-49.
- Borg T., 2014. Recommandation de la Commission du 4 avril 2014 sur la réduction de la présence de cadmium dans les denrées alimentaires. Commission Européenne, Bruxelles.
- Brown S.L., Chaney R.L., Angle J.S., Baker A.J.M., 1995. Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and metal tolerant *Silene vulgaris* grown on sludge-amended soils. *Environmental Science & Technology* 29: 1581-1585.
- Chaney R.L., 1983. Plant uptake of inorganic waste constituents. In: JF Parr, PB Marsh, JL Kla (eds) Land treatment of hazardous wastes. Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey.
- Clemens S., Aarts M.G.M., Thomine S., Verbruggen N., 2013. Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning. *Trends in Plant Science* 18, 92-99.
- EFSA, 2012. Cadmium dietary exposure in the European population. *EFSA Journal* 10: 2551.
- Felix H., 1997. Field trials for in situ decontamination of heavy metal polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160, 525-529.
- Hammer D, Keller C (2003) Phytoextraction of Cd and Zn with *Thlaspi caerulescens* in field trials. *Soil Use and Management* 19: 144-149.
- Hazotte C., Laubie B., Rees F., Morel J.L., Simonnot M.-O., 2017. A novel process to recover cadmium and zinc from the hyperaccumulator plant *Noccaea caerulescens*. *Hydrometallurgy* 174, 56-65.
- Jacobs A., Drouet T., Sterckeman T., Noret N., 2017. Phytoremediation of urban soils contaminated with trace metals using *Noccaea caerulescens*: comparing non-metallicolous populations to the metallicolous 'Ganges' in field trials. *Environmental Science and Pollution Research* 24, 8176-8188.
- Kayser A., Wenger K., Keller A., Attinger W., Felix H.R., Gupta S.K., Schulin R., 2000. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd, and Cu from calcareous soil: the use of NTA and sulfur amendments. *Environmental Science & Technology* 34, 1778-1783.
- Keller C., Hammer D., Kayser A., Richner W., Brodbeck M., Sennhauser M., 2003. Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field. *Plant and Soil* 249, 67-81.
- Lovy L., 2012. Hyperaccumulation du Cd par *Noccaea caerulescens* : cinétique, répartition et prédiction. Doctorat Ecole Doctorale Ressources, Procédés, Produits et Environnement. Université de Lorraine, pp. 133.
- Maxted A.P., Black C.R., West H.M., Crout N.M.J., McGrath S.P., Young S.D., 2007. Phytoextraction of cadmium and zinc from arable soils amended with sewage sludge using *Thlaspi caerulescens*: Development of a predictive model. *Environmental Pollution* 150, 363-372.
- McGrath S.P., Dunham S.J., Correll R.L., 2000. Potential for phytoextraction of zinc and cadmium from soils using hyperaccumulator plants. In: N. Terry, G. Banuelos (Eds) Phytoremediation of contaminated soil and water. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- McGrath S.P., Lombi E., Gray C.W., Caille N., Dunham S.J., Zhao F.J., 2006. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri*. *Environmental Pollution* 141, 115-125.
- McGrath S.P., Sidoli C.M.D., Baker A.J.M., Reeves R.D., 1993. The potential for the use of metal-accumulating plants for the in situ remediation of metal-polluted soils. In: HJP Eijackers, T Hamers (eds) Integrated Soil and Sediment Research : A Basis for Proper Protection. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Mijovilovich A., Leitenmaier B., Meyer-Klaucke W., Kroneck P.M.H., Gotz B., Kupper H., 2009. Complexation and toxicity of copper in higher plants. II. Different mechanisms for copper versus cadmium detoxification in the copper-sensitive cadmium/zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (ganges ecotype). *Plant Physiology* 151, 715-731.

Rees F., 2014. Mobilité des métaux dans les systèmes sol-plante-biochar. Université de Lorraine, pp. 316.

Schwartz C., 1997. Phytoextraction des métaux des sols pollués par la plante hyperaccumulatrice *Thlaspi caerulescens*. PhD Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires. Institut National Polytechnique de Lorraine, pp. 175.

Simmons R.W., Chaney R.L., Angle J.S., Kruatrachue M., Klinphoklap S., Reeves R.D., Bellamy P., 2014. Towards practical cadmium phytoextraction with *Noccaea caerulescens*. *International Journal of Phytoremediation* 17, 191-199.

Six L., Smolders E., 2014. Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium fluxes to European agricultural soils. *Science of The Total Environment* 485–486, 319-328.

Sterckeman T., Cazes Y., Gonneau C., Sirguey C., 2017. Phenotyping 60 populations of *Noccaea caerulescens* provides a broader knowledge of variation in traits of interest for phytoextraction. *Plant and Soil* 418, 523-540.

Tlustoš P., Břendová K., Száková J., Najmanová J., Koubová K., 2016. The long-term variation of Cd and Zn hyperaccumulation by *Noccaea* spp and *Arabidopsis halleri* plants in both pot and field conditions. *International Journal of Phytoremediation* 18, 110-115.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL).