

La phytoremédiation comme alliée de la dépollution



Idris Bensari
Étudiant en biologie végétale



Le coquelicot en phytoremédiation : une espèce bio-indicatrice par excellence du pH d'un sol

© Krzysztof Ziarnek, Kenzaiz

Plantations
15/10/2021

15 minutes



Souvent passé sous silence, le sol est la base de toute vie sur la terre ferme. Son importance est indéniable et sa bonne santé est essentielle pour le maintien d'une agriculture viable.

Pourtant, comme la plupart des écosystèmes, le sol est victime des activités humaines et de leurs rejets. Les sources de pollution sont nombreuses et le sol, pourvoyeur de nourriture, devient inutilisable, voire dangereux.

En effet, une terre pleine de polluants est un problème sanitaire, d'une part, par la possible ingestion par ceux qui la manipule comme les enfants et, d'autre part, par la qualité médiocre des fruits et légumes y poussant.

Ce que vous allez apprendre

- Comment les activités humaines impactent les sols
- En quoi les plantes et la phytoremédiation sont une solution à la pollution édaphique
- Comment les plantes peuvent extraire des métaux lourds du sol
- Les réussites, les limites et les problèmes de cette phytotechnologie



Idris Bensari

La phytoremédiation est la dépollution des sols, des eaux ou de l'air en utilisant des plantes.

La phytoremédiation, c'est quoi ?

Les plantes, grâce à leur physiologie, ont la capacité de croître sur des sols pollués voire parfois d'absorber ces polluants ! En effet, certaines plantes ont évolué sur des terres riches en métaux lourds et développeront la capacité d'accumuler ces polluants dans leurs tissus.

De nos jours, de plus en plus de sols sont pollués par les activités humaines. Depuis une trentaine d'années, les chercheurs tentent d'exploiter les étonnantes facultés du règne végétal pour dépolluer les sols. Certains projets portent déjà leurs fruits et cette phytotechnologie sera cruciale dans les décennies à venir.

La phytoremédiation est la dépollution des sols, des eaux ou de l'air en utilisant des plantes. L'étymologie provient du grec *phyto* qui signifie plante et du latin *remedium* signifiant le rétablissement de l'équilibre.

Sources de pollution

Il existe une multitude de sources de pollutions, lesquelles se déversent quotidiennement dans le sol : pots d'échappements, huile de voiture, lisier, déversements d'hydrocarbures, utilisation excessive de produits agrochimiques, etc. Elles sont le plus souvent liées aux activités humaines.

Par exemple les pollutions peuvent provenir de produits issus des pratiques agricoles : engrais, effluents d'élevage ; des produits résiduels de l'activité humaine : boues de stations d'épurations, sources de métaux lourds et autres ETM (éléments traces métalliques) ; mais aussi d'hormones, de médicaments, de pesticides, de déchets industriels ou d'usages communs. Dans les sols, les polluants les plus préoccupants sont les polluants inorganiques, les ETM appelés couramment « métaux lourds » ou les polluants organiques tels que les pesticides et les hydrocarbures.

Notez que les ETM peuvent être naturellement présents à des niveaux toxiques dans le sol. Les zones urbaines sont particulièrement contaminées à cause de la grande proximité des industries et des trafics routiers. La pollution des sols est donc une menace pour la sécurité alimentaire et sanitaire de la société.

Les lieux pollués en zones urbaines peuvent être assainis au moyen de technologies lourdes, basées sur l'excavation, le traitement *ex situ* et la réutilisation ultérieure des matériaux traités pour l'aménagement paysager. Ces méthodes à forte intensité de ressources ne sont généralement ni économiquement ni écologiquement viables pour les sols pollués.

Pour espérer le maintien d'une activité économique soutenable, il est nécessaire de changer de paradigme. Pour cela, le développement de technologies résilientes et efficaces respectant l'environnement sont fondamentales.



Pot d'échappement d'un bus

© Chigdk1

La présence des métaux lourds dans le sol

Les polluants métalliques induisent des modifications importantes des propriétés du sol (pH, potentiel ionique, etc.) et de sa morphologie. Ces derniers altèrent la nutrition des végétaux et se retrouvent dans les tissus des plantes poussant sur ce type de sol. Contrairement à une idée reçue, le sol se comporte rarement comme un filtre. En effet, le sol possède trois phases (mobile, liquide et gazeux) participant chacun à la redistribution des polluants.

La présence des ETM dans les sols est un problème majeur notamment à cause de leur mobilité. Leur mobilité est définie comme étant l'aptitude à se déplacer d'un compartiment à l'autre du sol. Une partie de ces éléments possèdent une action toxique sur les êtres vivants. Certains d'entre eux sont indispensables à faible dose pour le développement de la vie comme les oligo-éléments essentiels tel que le cuivre ou le zinc. Pour ces éléments, les seuils de carence et de toxicité sont souvent assez proches. Par ailleurs, certains ETM n'ont qu'une action toxique comme le cadmium, le nickel, le plomb, l'arsenic ou le titane.



Idris Bensari

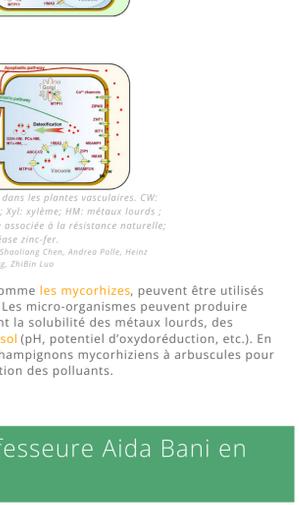
Pour espérer le maintien d'une activité économique soutenable, il est nécessaire de changer de paradigme. Pour cela, le développement de technologies résilientes et efficaces respectant l'environnement sont fondamentales.

La phytoremédiation comme technique de la phytogestion

La phytogestion (ou *phytomanagement* en anglais) est une technique jouant sur les systèmes sol-plante pour orienter les flux d'oligo-éléments dans l'environnement dans le but d'assainir les sols contaminés. L'avantage de cette technique est d'être moins chère et plus respectueuse de l'environnement que les autres techniques d'assainissement.

La phytogestion décrit un ensemble de techniques qui incluent le phytomining, la biofortification et la phytoremédiation. Le phytomining et la biofortification sont les applications de la phytoremédiation. La première consiste à exploiter des métaux au moyen de plantes tandis que la seconde vise à enrichir des plantes maraichères en oligo-éléments nécessaires au bon fonctionnement de notre organisme.

Le rôle de la végétation dans le phytomanagement des sites contaminés est d'ajouter de la valeur au terrain et d'atténuer les effets négatifs associés à la contamination des sols. Une distinction importante dans la distribution des oligo-éléments dans le sol est de savoir s'ils sont inertes ou biodisponibles. Par définition, un élément est dit biodisponible lorsqu'il peut être utilisé par les organismes vivants.



Planter, semer, cultiver... Pour la phytoremédiation, une filière à inventer !



Les grands principes de la phytoremédiation

© UPVD-BioEco-STEL3-2011

Les différentes approches de la phytoremédiation

La phytoremédiation est un ensemble de techniques adaptées à des situations spécifiques. Elle est limitée aux 30 à 90 premiers centimètres du sol à partir de la surface où les racines et le microbiome de la rhizosphère peuvent pénétrer.

Phytostabilisation

La première technique dans la phytoremédiation est la phytostabilisation qui vise à réduire la mobilité et la biodisponibilité des polluants dans les sols empêchant la contamination du réseau trophique et des nappes phréatiques. Elle peut être considérée comme une solution transitoire car la présence de substances toxiques dans le sol continuera de présenter une menace pour la santé humaine.

Les espèces utilisées pour la phytostabilisation doivent être tolérantes à plusieurs stress : les polluants organiques et inorganiques, la sécheresse et la salinité. Les racines ajoutent de la matière organique au sol qui lie les oligo-éléments. La phytostabilisation exploite la transpiration des plantes et l'ancrage des racines dans le sol pour réduire le lessivage et contrôler l'érosion.

Une faible absorption des oligo-éléments par les plantes est essentielle car des concentrations élevées dans les tissus aériens augmentent la probabilité de leur entrée dans la chaîne alimentaire et entraîne une accumulation des polluants à la surface du sol, car une litière de feuilles contaminées s'y dépose.

Phytovolatilisation

La phytoremédiation adopte aussi d'autres stratégies comme la phytovolatilisation ; les plantes absorbent les polluants présents dans le sol et les transforment en éléments volatils non toxiques avant de les libérer.

Un domaine important est la biotransformation car les plantes produisent des enzymes qui catalysent la dégradation des polluants absorbés.

Une approche très utile pour le phytomining est la phytoextraction utilisant des plantes qui absorbent et concentrent les polluants contenus dans le sol directement dans leurs tissus. Ces plantes sont dites hyperaccumulatrices. Le plus souvent, les plantes sont récoltées, incinérées et valorisées pour récupérer les métaux accumulés.

Physiologie végétale de la phytoremédiation

L'absorption, la translocation, la désintoxication et la séquestration des ETM sont des processus clés pour faire face à des quantités excessives de polluants métalliques. Généralement, ils sont présents sous forme ionique dans la solution du sol et sont ainsi facilement accessibles par les systèmes racinaires. Les métaux lourds peuvent être séquestrés dans les parois cellulaires, les vacuoles, et l'appareil de Golgi des plantes. Pour rappel voici un schéma d'une cellule végétale.



Schéma d'une cellule végétale

© domomegg

Toutes ces manipulations essentielles à l'absorption et à la désintoxication des polluants par les plantes sont médiées par des protéines comme celles de la résistance naturelle (ZIP (Zinc-iron permease), HMA (heavy metal ATPase) ou MTP (metal tolerance protein)).

Les ETM en solution dans le sol sont absorbés par les racines. Dans les racines, ils sont détoxifiés, séquestrés ou transportés le long des voies symplasmiques ou apoplasmiques du xylème vers les parties aériennes. Après la translocation vers les feuilles, les ETM entrent dans les cellules foliaires où a lieu la désintoxication et le stockage. Les ETM accèdent aux cellules radiculaires via des transporteurs ou des canaux présents dans la membrane plasmique. Les ETM sont détoxifiés par des chélateurs tels que les métallothionéines (MT) ou l'histidine (His).

Schéma des dynamiques d'ETM dans les plantes vasculaires. CW: paroi cellulaire; CS: Endoderme; Xyl: xylème; HM: métaux lourds; NRAMP: protéine de macrophage associée à la résistance naturelle; ZIP: perméase zinc-fer.

© Wenguang Shi, Yuhong Zhang, Shaojing Chen, Andrea Polla, Heinz Rennenberg, Zhibin Luo

Les micro-organismes associés aux plantes, comme les *mycorhizes*, peuvent être utilisés pour améliorer l'extraction des contaminants. Les micro-organismes peuvent produire différents types d'acides organiques améliorant la solubilité des métaux lourds, des sidérophores ou modifier l'environnement du sol (pH, potentiel d'oxydo-réduction, etc.). En pratique, il est aussi possible d'inoculer des champignons mycorhiziens à arbuscules pour améliorer la croissance des plantes et l'extraction des polluants.

L'agromining par la Professeure Aida Bani en Albanie

La dépollution par les plantes est encore au stade de prototype mais des projets apportent des résultats encourageants.

Aujourd'hui, il est possible de citer le projet de recherche de la professeure Aida Bani en Albanie au sein du laboratoire Sols et Environnement de l'INRAE et de l'université de Nancy de 2005 à 2009. Cette dernière utilise une plante endémique perçue comme une adventice : *Alyssum murale*. De la famille des *Brassicaceae*, elle est une cousine du chou. L'*Alyssum* des murs possède l'incroyable faculté de pousser sur les sols pollués mais, surtout d'accumuler dans ses tissus des ETM. En effet, autour du lac d'Ohrid, le sol est dit « ultramafiques » car riche en métaux lourds, en particulier en nickel.

Alyssum murale

© Krzysztof Ziarnek, Kenzaiz

La phytoextraction en utilisant *Alyssum murale* a permis aux chercheurs d'extraire 100 kilogrammes de nickel par hectare. Grâce à des agencements comme la distance entre les plants, leur densité, l'ajout d'engrais, le temps et la manière de récolter ou l'association avec d'autres plantes comme les *Fabaceae* (possédant la capacité de fixer l'azote atmosphérique) les rendements ont pu être doublés.

Pourtour du lac Ohrid, riche en métaux lourds, qui rend l'étude de sa flore intéressante d'un point de vue de la phytoremédiation

© FIF

Aida Bani

Les opportunités qu'offre la phytoextraction intéressent beaucoup des paysans du coin. En cultivant ces plantes hyperaccumulatrices, ils peuvent gagner bien plus d'argent qu'avec les plantes fourragères : deux, trois, voire quatre fois plus.

La vente de ces plantes à la société de biotechnologies végétales Econick permet déjà d'améliorer le quotidien des paysans riverains ayant participé aux expérimentations.

Problèmes de la phytoremédiation

L'un des problèmes majeurs de cette technique est que nous ne savons pas encore bien ce qu'il est possible de faire de la biomasse végétale polluée.

Une fois accumulée dans les parties aériennes, les polluants piégés peuvent être utilisés en chimie (production industrielle ou recherche et développement) mais les prix de fabrication d'agents chimiques à partir de biomasse végétale polluée ne sont pas rentables, comparés aux productions conventionnelles. La recherche doit continuer à développer des moyens de production plus rentables afin que la technique soit plus largement diffusée.

L'autre souci est le peu d'espèces connues efficaces dans les techniques de phytoremédiation actuelles. En effet, dans les espèces répertoriées comme hyperaccumulatrices, la majorité sont de petites plantes (du genre *Poa* ou *Brassicaceae* par exemple).

Le second problème des plantes plus imposantes absorbant beaucoup de polluants est la dispersion via le réseau trophique. En effet, les plantes ayant une place primordiale dans le réseau alimentaire, un plant imposant sera une source de nourriture pour beaucoup d'animaux. Ces derniers entraîneront par leurs selles et leur décomposition après leur mort, des quantités significatives de polluants à des distances non négligeables.

Centres des plantes, désormais industrialisées et appelées « biochar »

© Oregon Department of Forestry

Les tests en cours sur la phytoremédiation

D'autres techniques sont en cours d'élaboration et sont prometteuses pour l'avenir. Tout d'abord, il y a la *combined phytoremediation and food production* (CPFP). C'est un mode de gestion où des plantes phytoremédiatrices poussent simultanément avec des plantes maraichères. Ce qui permet de continuer à utiliser un sol pollué pour faire de l'agriculture tout en le dépolluant. Mais cette solution reste théorique car il n'y a pas d'opération sur le terrain à grande échelle utilisant ce mode.

En mars 2021, parut une étude sur la renouée du Japon (*Reynoutria japonica*, espèce exotique envahissante ayant des impacts négatifs sur l'environnement et l'économie) et sa capacité à pousser en milieux pollués. L'étude a montré que lorsque la Renouée du Japon est cultivée sur des sols contaminés par différentes concentrations d'éléments traces métalliques (notamment en plomb et en cadmium), cela n'affecte pas la capacité des racines à se régénérer. Dans un sol contaminé par n'importe quelle concentration de plomb, les pousses de cette plante ont poussé à un rythme similaire à celui des plantes témoins (poussant dans un sol sain) et ont les mêmes caractéristiques morphologiques. L'analyse chimique de la teneur en métaux lourds a montré que cette espèce accumule de grandes quantités de métaux lourds dans les parties aériennes (feuilles, tiges, etc.) lorsqu'elle est cultivée dans un sol contaminé. La capacité de la renouée du Japon à se régénérer à partir de parties du rhizome, à croître et à se développer dans des conditions stressantes en présence de métaux lourds indique une tolérance élevée aux métaux lourds. Elle est une candidate potentielle pour la phytoremédiation.

Renouée du Japon, une plante considérée invasive candidate à la phytoremédiation

© Gyndi Holmstad

Pour le moment, toutes ces techniques sont perfectibles. Certains axes d'amélioration sont déjà étudiés par les laboratoires. En premier lieu, il est nécessaire de développer des protocoles de gestion efficaces pour la biomasse végétale obtenues après la phytoremédiation. Ensuite, il faudra évaluer les besoins de législation pour traiter le problème des déchets produits par le processus de phytoremédiation. D'autres protocoles doivent être développés comme des protocoles de suivi et d'évaluation des risques écotoxicologiques des différentes étapes des projets visant à combiner production alimentaire et phytoremédiation.

Le retard de la législation sur les sols, par rapport à la science, en termes d'absorption des polluants dans les cultures agricoles justifie des recherches supplémentaires qui soutiennent et éclairent les politiques et les lois qui traitent collectivement de la sécurité alimentaire et de la pollution des sols.

Pour conclure

Le règne végétal abrite une source inépuisable de solutions aux problèmes que les humains se sont créés.

Le potentiel de la méthode n'est plus à démontrer et plusieurs universités et laboratoires se penchent déjà sérieusement sur le sujet depuis les années 1950. Il s'agit cependant d'y investir bien plus d'efforts qu'actuellement si l'on souhaite réellement obtenir des résultats sur ce type de solutions fondées sur la Nature. Les défis à relever pour asseoir la méthode (de la biomasse à l'encadrement du potentiel impact de la méthode sur la Nature) mais les interrogations en la matière sont déjà bien identifiées.

C'est désormais à nous de faire les bons choix sur le sujet et de se donner des moyens ambitieux en la matière afin d'être à la hauteur des enjeux de dépollution.

Dorénavant, il s'agit d'orienter les recherches pour que la dépollution soit un sujet prioritaire et que ce soit fait de manière écologique afin de correspondre aux enjeux de notre siècle.

Les spécialistes du sujet sont sur vos réseaux sociaux préférés

Idris Bensari

Canop'Terre

INRAE

UICN

Idris Bensari
Étudiant en biologie végétale

Étudiant en biologie végétale à l'Université Grenoble-Alpes, il souhaite se spécialiser sur la dépollution des sols. À force de recherches et allant de stage en stage, il a finalement trouvé le domaine auquel il souhaite dédier sa vie : la phytoremédiation.

Si elle n'est que prototype pour le moment, il a le sentiment qu'elle sera bientôt une phytotechnologie à part entière, capable de répondre à l'un des plus grands défis de l'humanité, à savoir la pollution édaphique.