

Phytoremédiation



Exemple de phytoremédiation, ici sur une ancienne plate-forme gazière de Rønnede (Danemark) via plusieurs espèces de saules (Salix).

La **phytoremédiation** est la dépollution des sols, l'épuration des eaux usées ou l'assainissement de l'air intérieur, utilisant des plantes vasculaires, des algues (phycoremédiation) ou des champignons (mycoremédiation), et par extension des écosystèmes qui supportent ces végétaux. Ainsi on élimine ou contrôle des contaminations. La dégradation de composés nocifs est accélérée par l'activité microbienne^[1].

1 Qu'est-ce que la phytoremédiation ?

L'étymologie provient du grec « phyton » = plante, et du latin « remedium » = rétablissement de l'équilibre, remédiation. La phytoremédiation n'est pas un concept nouveau puisqu'il y a 3 000 ans les hommes utilisaient déjà les capacités épuratoires des plantes pour le traitement de l'eau. Depuis les années 1970 cette pratique a trouvé un regain d'intérêt notamment pour le traitement des pesticides et des métaux.

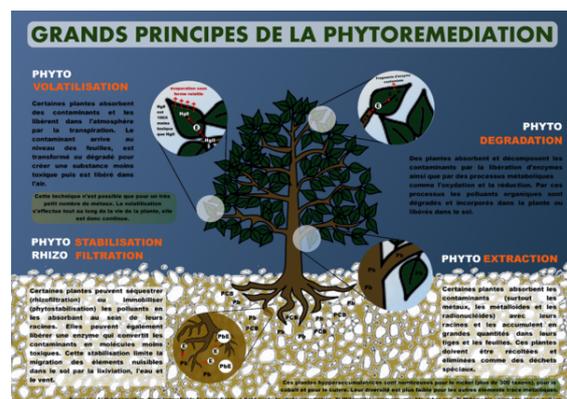
La phytoremédiation est un ensemble de technologies utilisant les plantes pour réduire, dégrader ou immobiliser des composés organiques polluants (naturels ou de synthèse) du sol, de l'eau ou de l'air provenant d'activités humaines. Cette technique permet également de traiter des pollutions inorganiques (éléments traces métalliques (ETM), radionucléides).

- **Sol** : Cette technique est utilisée pour décontaminer biologiquement les sols pollués par des métaux

et métalloïdes, pesticides, solvants, explosifs, pétrole brut et ses dérivés, radionucléides et contaminants divers.

- **Eaux usées et effluents liquides** : La phytoremédiation sert également à la décontamination d'eaux chargées en matière organique ou en contaminants divers (métaux, hydrocarbures, organochlorés, pesticides). On considère alors les traitements sur sol en place (l'effluent est épandu) ou directement en milieu humide.
- **Air** : Il peut s'agir aussi de dépolluer l'air intérieur ou de recycler l'eau grâce aux plantes dépolluantes (d'après les recherches de Bill Wolverton pour la NASA dans les années 1980-90). Cet axe de recherche se développe de manière importante depuis quelques années. Le programme Phyt'air est un projet français qui réalise une étude de faisabilité pour la constitution d'un système simple de bioépuration de l'air intérieur.

2 Principe de phytoremédiation



Grands principes de la phytoremédiation.

La phytoremédiation repose essentiellement sur les interactions entre les plantes, le sol et les micro-organismes. Le sol est une matrice complexe servant de support au développement des plantes et des micro-organismes qui se nourrissent des composés organiques ou inorganiques le composant. Lorsque certains de ces composés sont en excès par rapport à l'état initial du sol, ce dernier est qualifié de contaminé (cela s'applique aussi à l'eau et à l'air qui à la différence sont des fluides). Les composés en excès

peuvent alors être utilisés comme source d'énergie par les plantes et les micro-organismes. Dans le système plante - sol - micro-organismes, la **biodégradation bactérienne** est souvent en amont de l'**absorption racinaire**. Plantes et micro-organismes ont **coévolué** pour disposer d'une stratégie à bénéfices mutuels pour gérer la **phytotoxicité** où les micro-organismes profitent des **exsudats racinaires**, lors même que la plante bénéficie des capacités de dégradation des micro-organismes **rhizosphériques** pour réduire le stress dû à la phytotoxicité. Finalement, la plante est l'agent essentiel de l'exportation d'un **contaminant** hors du milieu environnant.

2.1 Effet rhizosphérique

La rhizosphère désigne le volume de sol soumis à l'influence de l'activité racinaire. Ce volume de sol est plus ou moins important et varie selon les plantes et le sol. Les processus qui se déroulent dans la rhizosphère sont essentiels pour la phytoremédiation. L'activité et la biomasse microbienne y sont beaucoup plus importantes que dans un sol sans racines. Les racines libèrent naturellement des substances dans le sol où elles se développent, par les **exsudats racinaires**. Ceux-ci favorisent et entretiennent le développement des colonies microbiennes en fournissant de 10 à 20 % des sucres produits par l'activité photosynthétique de la plante (**photosynthétats**). De nombreux composés peuvent ainsi être libérés, par exemple, des **hormones**, des **enzymes** ainsi que de l'**oxygène** et de l'eau. Les micro-organismes rhizosphériques en retour favorisent la croissance de la plante (réduction des **pathogènes**, mise à disposition de nutriments...). En théorie, plus les racines sont abondantes plus elles fournissent une surface de développement importante pour la microfaune et microflore rhizosphériques. De fait, les exsudats racinaires favorisent la **biodégradation des polluants organiques** en stimulant l'activité microbienne.

2.2 Principe de décontamination

Brièvement, les plantes vont soit absorber le contaminant pour le **métaboliser** ou le stocker, soit réduire voire empêcher la libération du contaminant dans d'autres compartiments de l'environnement (**phytostabilisation**). Le plus souvent, les composés **organiques** (**xénobiotiques** ou non) peuvent être dégradés et métabolisés pour la croissance de la plante. Le **polluant** est alors éliminé. Lorsqu'il s'agit de composés **inorganiques** polluants (métaux, métalloïdes ou radionucléides), il ne peut y avoir que **phytostabilisation** ou **phytoextraction** car ces types de polluants ne sont pas biodégradables.

3 Les différentes formes de phytoremédiation

1. **Phytoextraction** : utilisation de plantes qui absorbent et concentrent dans leurs parties récoltables (feuilles, tiges) les polluants contenus dans le sol (souvent des **Éléments-trace métallique** : ETM). On utilise souvent des plantes **accumulatrices** et/ou **hyperaccumulatrices** qui sont capables de tolérer et d'accumuler les ETM. Il est possible d'améliorer cette extraction par l'ajout de **chélateurs** au sol. Le plus souvent les plantes sont récoltées et incinérées ; les cendres sont stockées (en CET) ou valorisées pour récupérer les métaux accumulés (on parle alors de *phytomining*).
2. **Phytotransformation**, ou **phytodégradation** : certaines plantes produisent des **enzymes** (déhalogénase, oxygénase...) qui catalysent la dégradation des substances absorbées ou adsorbées ; celles-ci sont transformées en substances moins toxiques ou non-toxiques par la **métabolisation** des contaminants dans les tissus des plantes ou par les organismes de la **rhizosphère** maintenue par la plante (on parle alors de **rhizodégradation** : dégradation par la rhizosphère). Selon les premiers résultats du programme Phytorestore / Phycos^[2] annoncés fin 2010, un pilote industriel ayant fonctionné deux ans a montré l'efficacité du traitement par filtres plantés d'une eau de nappe polluée par des organochlorés (di-, tri-, tétra-, penta-, hexa-chlorobenzènes et hexachlorocyclohexanes dont le lindane (insecticide réputé peut **biodégradable**)). 99 % de ces organochlorés auraient été détruits ou absorbés lors de leur passage sur le filtre planté et le bilan chimique fait sur les compartiments liquides, solides (supports, plantes) et gazeux prouve que la dégradation a primé (Selon les acteurs du projet, moins de 2 % des polluants se sont volatilisés dans l'air ou ont été adsorbés par le substrat, après deux ans d'essai, et la bioaccumulation dans les plantes serait négligeable). Ce procédé (breveté), diminue fortement l'écotoxicité de l'effluent d'après les tests de toxicité effectués avec la daphnie *Daphnia magna* et la bactérie *Aliivibrio fischeri*.
3. **Phytofiltration** ou **rhizofiltration** : utilisée pour la dépollution et la restauration des eaux de surface et souterraines. Les contaminants sont absorbés ou adsorbés par les racines des plantes en milieu humide.
4. **Phytovolatilisation** : les plantes absorbent l'eau de la lithosphère contenant des contaminants organiques et autres produits toxiques, transforment ceux-ci en éléments volatils, et les relâchent dans l'atmosphère via leurs feuilles. Elles peuvent aussi dans certains cas transformer des contaminants organiques en éléments volatils avant de les transférer

dans l'atmosphère - toujours via les feuilles. La phytovolatilisation n'est pas toujours satisfaisante, car si elle décontamine les sols elle libère parfois des substances toxiques dans l'atmosphère. Dans d'autres cas plus satisfaisants, les polluants sont dégradés en composants moins - ou non-toxiques avant d'être libérés.

5. **Phytostabilisation** : réduit simplement la mobilité des contaminants. La technique la plus utilisée est de se servir des plantes en réduisant les écoulements de surface et de sub-surface, en limitant l'érosion et en réduisant les écoulements souterrains vers la nappe. Cette pratique intègre ce que l'on appelle communément le **Contrôle hydraulique**, ou phytohydorégulation^[3]. Le *pompage hydraulique* (traduit littéralement de l'anglais) peut se faire quand les racines atteignent les eaux souterraines tout en prélevant de larges volumes d'eau et en contrôlant le gradient hydraulique et les migrations latérales de contaminants au sein de l'aquifère. En deux mots, il s'agit d'utiliser des plantes à forte évapotranspiration pour réduire le mouvement des polluants par les écoulements (latéraux ou en profondeur). Une autre pratique consiste à immobiliser les composés polluants en les liant chimiquement. Les plantes adsorbent les polluants du sol, de l'eau ou de l'air, les retenant localement (d'où l'utilisation du terme *adsorption* au lieu d'absorption) et réduisant leur biodisponibilité. Le processus est parfois rendu possible, ou amplifié et accéléré, par l'ajout de composés organiques ou minéraux, naturels ou artificiels. C'est une méthode efficace pour empêcher la dispersion des polluants dans les eaux de surface ou souterraines.
6. **Phytorestauration** : cette technique implique la restauration complète de sols pollués vers un état proche du fonctionnement d'un sol naturel (Bradshaw 1997). Cette subdivision de la phytoremédiation utilise des plantes indigènes de la région où sont effectués les travaux de phytorestauration. Ceci dans le but d'atteindre la réhabilitation entière de l'écosystème naturel originel, du sol aux communautés végétales. Comme le souligne Peer *et al.* (2005), en comparaison des autres techniques de phytoremédiation, la phytorestauration met en lumière la question du niveau de décontamination nécessaire et suffisant. Il existe une grande différence entre décontaminer un sol pour atteindre un niveau légalement satisfaisant pour qu'il soit à nouveau exploitable et restaurer totalement un espace pour qu'il revienne à des conditions pré-contamination. Lorsque l'on fait référence à la phytorestauration des eaux usées, on parle d'un procédé récent ayant trait à l'utilisation des propriétés naturelles d'autoépuration des végétaux (Dabouineau *et al.*, 2005). Utilisé dans ce sens, la phytorestauration devient synonyme du terme **phytoépuration**. Ce type de pro-

céde intègre notamment l'épuration des eaux par les **macrophytes**. Dans ce cas, ce sont les bactéries vivant dans la zone racinaire des macrophytes qui sont garantes de la dépollution, les plantes servent là simplement de substrat de croissance pour les microorganismes (voir station de Honfleur).

7. **Phytostimulation** : localisée essentiellement dans la rhizosphère, c'est la stimulation par les plantes des activités microbiennes favorables à la dégradation des polluants. Cet aspect, quand il a été étudié, a été constaté chez tous les hyperaccumulateurs.
8. **Rhizofiltration** ou rhizoépuration (pour épuration de l'eau ; elle peut se faire en système hydroponique ou in situ sur des îles flottantes) Construites avec des coussins flottants de matière synthétique pouvant être traversé par des racines^[4] ;

4 Avantages et limites

Les avantages :

- Le coût de la phytoremédiation est bien moindre que celui de procédés traditionnels *in situ* et *ex situ* ;
- Les plantes peuvent être facilement surveillées ;
- Récupération et réutilisation de métaux de valeur (des entreprises se spécialisent dans le « phytominage ») ;
- C'est la méthode la moins destructrice car elle utilise des organismes naturels et préserve l'état naturel de l'environnement (micro-organismes, animaux et structure du sol) (contrairement à l'emploi de procédés chimiques, il n'y a pas d'impacts négatifs sur la fertilité des sols) ;
- Exploitation des végétaux produits.

Les limites :

- La phytoremédiation est limitée à la surface et la profondeur occupées par les racines (noter que de nombreux polluants à base de métaux restent aussi dans la couche de sol supérieure) ;
- Croissance lente et biomasse faible demandent un investissement en temps assez important, ou/et parfois l'adjonction de chélateurs ou autres substances (pour les pollutions inorganiques comme les ETM). On peut cependant utiliser des plantes à croissance rapide - voir les tables d'hyperaccumulateurs, qui démontrent un éventail de choix très large pour la plupart des polluants de toutes sortes ;

- On ne peut pas, avec des systèmes de remédiation à base de plantes, totalement empêcher l'écoulement des contaminants dans la nappe phréatique (ceci n'est possible qu'au prix de l'enlèvement complet du sol, ce qui ne résout pas le problème de contamination dudit sol ni les problèmes afférents). Une expérience en Iowa (États-Unis) démontre cependant que des peupliers plantés entre un champ de maïs et un ruisseau ont considérablement réduit la concentration de nitrates dans l'eau de surface : en bord de champ celle-ci contenait 150 mg/l de nitrates, tandis que parmi les peupliers la teneur en nitrates n'était que de 3 mg/l ^[3] ;
- Le niveau et le type de contamination influence la phytotoxicité des polluants. Dans certains cas, la croissance ou la survie des plantes peut être réduite ;
- Bioaccumulation possible de contaminants passant dans la chaîne alimentaire, du niveau des consommateurs primaires à ceux du niveau secondaire. Il est essentiel de disposer des plantes de façon responsable, et de ne pas consommer des plantes utilisées pour nettoyer un terrain.
- Pour que la technique se perfectionne, une sélection végétale est indispensable. Mais cela prend du temps pour sélectionner, hybrider, reproduire, etc. Des dizaines d'années peuvent être nécessaires. De plus, les propriétés de certaines plantes ne se retrouvent pas systématiquement chez tous les individus de l'espèce ;
- L'utilisation d'OGM pour accroître des capacités végétales est controversée, surtout en Europe ;
- Le problème du futur des végétaux ne contenant pas de minerais commercialisables, mais des polluants devant être stockés dans un endroit où cela ne gênera personne.

Amélioration des rendements :

- La phytoaccumulation est liée à la phytotolérance de la plante vis-à-vis des polluants, notamment expliquée par les phytochélatines ;
- La toxicité de certains polluants peut être diminuée par la réduction chimique des éléments concernés, qui se trouvent ainsi transformés en substances moins polluantes, et/ou en les incorporant à des composants organiques (une autre forme de biotransformation) ;
- Dans ce but on peut chélater les polluants avec des ligands spécifiques qui diminuent la quantité d'ions libres ;
- Des expérimentations sont menées en électrocinétique : le sol est soumis à un courant direct pour promouvoir le mouvement des ions dans le sol ;
- L'interaction entre phytoremédiation et la bioremédiation *in situ* de microorganismes ou de leurs enzymes) est également étudiée ;
- Le domaine des manipulations génétiques orientées vers la phytoremédiation est aussi en fort développement.

5 Hyperaccumulateurs et interactions biotiques

Article détaillé : Hyperaccumulateurs.

Les plantes sélectionnées en phytoextraction sont choisies pour leur capacité à extraire des volumes importants de polluants. Elles sont appelées **plantes hyperaccumulatrices**, ou **hyperaccumulateurs**. Les caractéristiques communes aux hyperaccumulateurs sont souvent : une pousse rapide ; des végétaux résistants, faciles à planter et maintenir ; une grande capacité pour l'évapotranspiration (évaporation de l'eau par les feuilles) ; et la capacité de transformer les contaminants concernés en des produits non-toxiques ou moins toxiques. Parmi les plantes les plus utilisées, on trouve les peupliers, qui réunissent rapidité de croissance, grande adaptation climatique, et capacité à absorber de grandes quantités d'eau (relativement à d'autres espèces). Cette dernière qualité leur permet de traiter de plus grandes quantités de polluants dissous, ainsi que de limiter la quantité d'eau passant au-delà de la zone contaminée - limitant donc aussi la propagation de la contamination.

En 1999 Reeves et al^[5] listent 320 espèces accumulatrices provenant de 43 familles. Leur nombre est beaucoup plus élevé : par exemple, à ce jour (2006) on connaît environ 300 hyperaccumulateurs de nickel. Des centres de diversité se présentent à Cuba (climat subtropical) et Nouvelle-Calédonie (climat tropical). De nombreuses espèces étudiées pour leur accumulation de métaux sont des Brassicaceae (climat tempéré et froid, hémisphère nord).

L'équipe de recherche d'Abdelhak El Amrani sur le mécanisme à l'origine de la biodiversité, de l'université de Rennes, a travaillé sur plusieurs polluants, en particulier sur l'herbicide atrazine. Ces chercheurs ont découvert un mécanisme dans les plantes qui permet à celles-ci de se développer même quand la concentration de pollution de leur sol est normalement létale pour une plante non traitée. C'est la présence de certains composés naturels biodégradables simples comme des polyamines exogènes, qui permet aux plantes de tolérer des concentrations de polluants 500 fois supérieures par rapport aux plantes témoins, mais aussi d'absorber davantage de polluants. Ce traitement amène des changements dans l'expression génétique des plantes, impliquant des gènes connus dans le processus de résistance au stress environnemental. La

technique génétique a été brevetée par l'université de Rennes^[6].

(La section qui suit est principalement un résumé de l'article "*The significance of metal hyperaccumulation for biotic interactions*" par Robert Boyd et Scott Martens^[7].

Une plante est dite **hyperaccumulatrice** si elle peut concentrer le ou les polluants selon un pourcentage minimum variant selon le polluant concerné (exemple : plus de 1 mg/g de matière sèche pour le nickel, cuivre, cobalt, chrome ou plomb ; ou plus de 10 mg/g pour le zinc ou le manganèse^[8]). La plupart des 215 hyperaccumulateurs cités par Baker et Brooks concernent le nickel. Ils ont listé 145 hyperaccumulateurs de nickel, 26 de cobalt, 24 de cuivre, 14 de zinc, quatre de plomb, et deux de chrome. Cette capacité d'accumulation est due à l'**hypertolérance**, ou **phytotolérance** : résultat de l'**évolution adaptative** des plantes à des environnements hostiles au cours de multiple générations. Boyd et Martens listent 4 interactions biotiques pouvant être affectées par l'hyperaccumulation de métal :

1. Protection
2. Interférences avec les plantes voisines d'espèces différentes.
3. Mutualisme
4. Commensalisme
5. Le biofilm

5.1 Protection

Des résultats d'expériences nombre en croissant indiquent que les métaux dans les hyperaccumulateurs ont un *rôle de protection* au moins partiel pour les plantes envers un certain nombre d'organismes (bactéries, fungi, insectes).

La défense contre les virus n'est pas toujours améliorée par la présence de métaux. Davis *et al.* ont comparé deux espèces voisines *S. polygaloides* Gray (hyperaccumulateur de nickel) et *S. insignis* Jepson (non-accumulateur), les inoculant avec le virus Turnip mosaic. Ils ont ainsi démontré que la présence de nickel affaiblit la réponse des plantes au virus^[9].

Les défenses élémentales des plantes sont circonvenues par leurs prédateurs de trois façons^[7] : (a) nourrissent sélectif sur des tissus à concentration en métaux peu élevée, (b) régime varié pour diluer le métal (vraisemblable pour les herbivores de grande taille relativement aux plantes), et (c) tolérance de hautes concentrations de métal.

5.1.1 Régime alimentaire sélectif

Les aphides du pois (*Acyrtosiphon pisum* (Harris); *Homoptera* : *Aphididae*) se nourrissant du **phloème** de

Streptanthus polygaloides Gray (*Brassicaceae*) ont des taux de survie et de reproduction égaux sur des plantes contenant environ 5 000 mg/kg de nickel amendé avec NiCl₂ (Chlorure de nickel), et sur celles contenant environ 40 mg/kg de nickel. Ainsi, soit le phloème est pauvre en nickel même chez les hyperaccumulateurs de nickel, ou bien les aphides tolèrent de hautes doses de nickel.

Celles nourries sur des plantes à concentration élevée de nickel ne montrent qu'une très légère augmentation du taux de nickel dans leurs corps, comparé aux aphides nourries sur des plantes pauvres en nickel^[7].

D'un autre côté, des aphides (*Brachycaudus lychnidis* L.) nourries sur l'accumulateur de zinc *Silene vulgaris* (Moench) Garcke (*Caryophyllaceae*) – qui peut contenir jusqu'à 1 400 mg/kg de zinc dans ses feuilles – montraient des niveaux élevés d'accumulation de zinc (9 000 mg/kg) dans leurs corps.

5.1.2 Tolérance pour le métal

Hopkin (1989)^[10] et Klerks (1990)^[11] l'ont démontrée pour les espèces animales ; Brown & Hall^[12] pour les espèces fongales ; et Schlegel & al. (1992) et Stoppel & Schlegel (1995) pour les espèces bactériales.

Streptanthus polygaloides (*Brassicaceae*) peut être parasité par *Cuscuta californica* var. *breviflora* Engelm. (*Cuscutaceae*). Les plants de *Cuscuta* ainsi découverts^[7] contenaient entre 540 et 1 220 mg de Ni/kg de poids sec, soit (un maximum de) 73 fois le contenu en nickel de plants de *Cuscuta* parasitant des plantes d'une autre espèce locale non-accumulatrice. Boyd & Martens (subm.) estiment ceci la première instance documentée de **transfert des défenses élémentales d'un hôte hyperaccumulateur à une plante parasitante**.

5.2 Interférences avec des plantes voisines d'espèces différentes

Baker & Brooks (1989)^[8] en ont mentionné la possibilité mais n'ont pas offert de mécanisme explicatif. Gabrielli *et al.* (1991), et Wilson & Agnew (1992), ont suggéré une baisse de compétition expérimentée par les hyperaccumulateurs de par la litière de leurs feuilles.

Ce mécanisme mimique l'allélopathie, bien que l'effet soit dû ici à une redistribution d'un élément dans le sol plutôt qu'à la plante manufacturant un composé organique. Boyd et Martens appellent ceci **allélopathie élémentale** - sans le problème d'autotoxicité démontré dans d'autres cas d'allélopathie (Newman 1978).

Le taux de métal dans les sols est clairement plus élevé aux alentours des hyperaccumulateurs. L'hypothèse d'allélopathie élémentale nécessite de démontrer que ces taux élevés inhibent les autres espèces serpentine.

5.3 Mutualisme

Deux types de mutualisme sont considérés ici :

- associations mycorhizales ou *mycorrhizae*, et
- dispersion du pollen et des graines.

5.3.1 Associations mycorhizales ou *mycorrhizae*

Il y a deux types de champignons mycorhizaux : les ectomycorhizaux et les endomycorhizaux. Les champignons ectomycorhizaux forment des fourreaux autour des racines ; les champignons endomycorhizaux pénètrent les cellules du cortex dans les racines^[13].

Les associations mycorhizales sont les relations symbiotiques entre les fungi et les racines des plantes. Certains hyperaccumulateurs peuvent former des associations mycorhizales, et dans certains cas le champignon mycorrhizal peut jouer un rôle dans le traitement du métal^[7]. Dans les sols à taux en métaux bas, les mycorrhizae vésiculaires et arbusculaires augmentent l'absorption de métal des espèces non accumulatrices^[12]. D'un autre côté certaines mycorrhizae augmentent la tolérance aux métaux en diminuant l'absorption du métal chez certaines espèces non-accumulatrices. Ainsi l'association mycorrhizale aide *Calluna* à éviter la toxicité du cuivre et du zinc^[14]. La plupart des racines nécessitent environ 100 fois plus de carbone que l'hyphae des fungi associés pour couvrir le même volume de sol^[15]. C'est pourquoi il est plus facile pour l'hyphae que pour les plantes d'acquérir des éléments à mobilité réduite, comme le césium-137 and strontium-90^[16].

Les champignons mycorhizaux dépendent des plantes hôtes pour leur carbone, tout en permettant aux plantes d'absorber les nutriments et l'eau plus efficacement^[17]. Le fungus facilite la prise de nutriments pour les plantes, tandis que celles-ci leur fournissent des composés organiques riches en énergie^[18]. Certaines espèces de plantes normalement symbiotiques avec des champignons micorhizaux peuvent exister sans l'association ; mais le champignon améliore grandement la croissance de la plante. Du point de vue de l'énergie dépensée, héberger des champignons est beaucoup plus effectif pour la plante que de produire des racines^[19].

La famille des *Brassicaceae* formerait peu d'associations micorhizales^[18]. Cependant, Hopkins (1987) note du mycorrhizae associé à *Streptanthus glandulosus* Hook. (*Brassicaceae*), un non-accumulateur^[20]. Les terres serpentes sont peuplées de champignons tolérant le taux de métal généralement élevé dans ces sols. Certains de ces fungi sont micorhizaux^[21].

L'absorption de radionuclides par les fungi dépend de leur mécanisme nutritionnel (mycorrhizal ou saprophyte)^[22]. *Pleurotus eryngii* absorbe mieux le Cs que le Sr et le Co, tandis que *Hebeloma cylindrosporum* favorise Co. Mais

augmenter la quantité de K augmente l'absorption de Sr (chemical analogue au Ca) mais non celle de Cs (chemical analogue à K). De plus, la teneur en Cs décroît avec *Pleurotus eryngii* (mycorrhizal) et *Hebeloma cylindrosporum* (saprophyte) si la dose de Cs est augmentée, mais la teneur en Sr augmente si la dose de Cs est augmentée – ceci indiquerait que l'absorption est indépendante du mécanisme nutritionnel.

5.3.2 Dispersion du pollen et des graines

Certains animaux obtiennent de la nourriture des plantes (nectar, pollen, ou pulpe de fruit - Howe & Westley 1988). Les animaux se nourrissant d'hyperaccumulateurs à concentration en métal élevée, doivent soit être tolérants soit diluer la concentration de métal en mélangeant la nourriture avec d'autres sources à teneur en métal moindre. Alternativement, les hyperaccumulateurs peuvent dépendre pour la dispersion de leurs graines, de vecteurs abiotiques ou de vecteurs animaux non-mutualistes, mais nous manquons d'informations sur ces mécanismes de dispersion en ce qui concerne les hyperaccumulateurs.

Jaffré & Schmid 1974 ; Jaffré *et al.* 1976 ; Reeves *et al.* 1981 ; ont étudié le taux de métal dans les fruits et les fleurs entiers. Ils ont généralement trouvé des taux importants de métaux dans ceux-ci. Baker *et al.* (1992) a trouvé une exception avec *Walsura monophylla* Elm. (*Meliaceae*), originaire des Philippines et montrant 7000 mg/kg Ni dans les feuilles mais seulement 54 mg/kg dans les fruits. Certaines plantes possèdent donc un mécanisme qui exclut les métaux ou autres contaminants de leurs structures reproductrices.

5.4 Commensalisme

Article détaillé : Commensalisme.

Le commensalisme est une **interaction bénéfique à un organisme tout en ayant une valeur neutre pour un autre**. La plus vraisemblable pour les hyperaccumulateurs est l'épiphytisme. Mais on trouve ce phénomène le plus couramment dans les forêts tropicales, et les études conduites dans de tels habitats n'ont porté que peu ou prou d'attention sur ce point. (e.g., Proctor *et al.* 1989 ; Baker *et al.* 1992). Proctor *et al.* (1988) ont étudié l'arbre *Shorea tenuiramulosa*, qui peut accumuler jusqu'à 1000 mg Ni /kg de poids sec dans ses feuilles. Ils ont estimé la couverture d'épiphytes en Malaisie, mais n'ont pas rapporté les valeurs pour les espèces individuelles. Boyd *et al.* (1999) ont étudié l'occurrence d'épiphytes sur les feuilles du buisson tropical hyperaccumulateur en Ni *Psychotria douarrei* (Beauvis.). La quantité d'épiphytes augmente considérablement avec l'âge de la feuille, jusqu'à 62 % pour les plus vieilles feuilles. Un exemplaire épiphytique de [leafy liverworts] venant d'une feuille de *P. douarrei*, contenait

400 mg Ni /kg poids sec (bien moins que la plante hôte, dont les plus vieilles feuilles - celles les plus épiphitisées - contenaient une valeur moyenne de 32,000 mg Ni /kg poids sec). Des doses élevées de Ni n'empêchent donc pas la colonisation de *Psychotria douarrei* par les épiphytes.

Les composés chimiques qui interviennent dans les interactions hôte-épiphyte sont plus susceptibles d'être localisés dans les tissus les plus externes de l'hôte (Gustafsson & Eriksson 1995). De plus, la plupart du métal s'accumule dans les parois des cellules ou vacuoles épidermales ou subépidermales (Ernst & Weinert 1972 ; Vazquez *et al.* 1994 ; Mesjasz- Rzybylowicz *et al.* 1996 ; Gabrielli *et al.* 1997). Ceci suggère que les épiphytes subiraient des taux de concentration de métaux plus élevés lorsqu'ils poussent sur des feuilles d'hyperaccumulateurs. Mais Severne (1974) a mesuré l'évacuation de métal par les feuilles pour l'hyperaccumulateur de nickel *Hybanthus floribundus* (Lindl.) F. Muell. (*Violaceae*), originaire d'Australie occidentale ; il conclut que les feuilles ne relâchent pas facilement le nickel.

En principe une autre interaction commensale pourrait exister si le taux élevé de métal dans le sol était nécessaire pour qu'une autre espèce de plantes puisse s'installer. Aucune évidence n'est jusqu'à présent allée dans ce sens.

5.5 Le biofilm

Voir les articles correspondants sur le biofilm et *Pseudomonas aeruginosa*.

5.6 Les feuilles des arbres

Un article de Science concluait en novembre 2010 que les écosystèmes boisés feuillus seraient capables de mieux dépolluer l'air que ce qu'on pensait initialement, pour les composés organiques volatils (COV) testés. Les expériences faites en laboratoire laissent penser que les feuilles absorbent même encore plus efficacement les COV et les détruisent par conversion enzymatique) quand elles sont stressées par des blessures ou par certains polluants (ozone et du méthyl vinyl cétone lors des expériences). Le cycle des COV oxygénés dans l'air devrait donc être revu et mieux incorporé dans les modèles globaux de chimie de l'atmosphère et de transport des polluants^[23].

6 Villes ou régions pratiquant partiellement ou totalement la phytoremédiation

6.1 En France

- Honfleur (France, Normandie) : technique des jardins filtrants dépolluant par phytolixiviation des métaux lourds dissous accumulés par phytofixation dans des casiers filtrants successifs^[24].
- Bègles (France, Gironde)
- au parc du Chemin de l'île, à Nanterre (Hauts-de-Seine)^[25].

6.2 Dans le monde

- Rønnede (Danemark)
- Suzhou (Chine, Jiangsu)
- Fuyang (Chine, Zhejiang)^[26]
- Wuhan (Chine, Hubei) : écoquartier « zéro rejet » dont les eaux usées sont réutilisées pour la consommation non-humaine (lavage des voitures, arrosage des jardins, etc.)^[27]
- et de nombreuses autres localités.

7 À l'échelle individuelle

Il est également possible d'utiliser ces techniques dans un jardin à l'échelle individuelle pour les eaux usées, à condition d'avoir un comportement responsable en triant ses déchets, et de manger plutôt bio. Cette pratique est utilisée individuellement dans de nombreux pays dans des maisons autonomes. En France on peut citer la maison de démonstration dite *Earthship*^[28] (« vaisseau terrestre ») nouvellement construite en Normandie.

8 Sources et références

- [1] *Phytoremediation - Transformation and control of contaminants*. Par S.C. McCutcheon et J.L. Schnoor (2003). Dans Wiley-interscience, Inc., NJ, USA, 987 pages.
- [2] Projet de recherche partenariale Phyco, mené en collaboration avec le Leca, le CNRS et l'Université de Savoie ; Source : Lettre : Le quotidien pollutec, 30 nov 2010
- [3] *Federal Remediation Technologies Roundtable, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide*, 4-31 - In-situ biological treatment/Phytoremediation.
- [4] T.R. Headley & C.C. Tanner pour le Conseil régional d'Auckland, *Application of Floating Wetlands for Enhanced Stormwater Treatment : A Review ; Independent study undertaken by NIWA (National Institute of Water and Atmospheric research of New Zealand), Auckland Regional Council ; Technical Publication No. November 2006 ; PDF, 100 pages*

- [5] *Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba*. Par R.D. Reeves, A.J.M. Baker, A. Borhidi et R. Beraza'n. Dans *Ann. Bot.* 1999, 83 :29–38.
- [6] La phytoremédiation s'attaque aux sols gorgés de polluants. Article par Chantal Houzelle dans le journal "Les Echos", section "Environnement". 4 avril 2008.
- [7] "*The significance of metal hyperaccumulation for biotic interactions*". Par R.S. Boyd et S.N. Martens. Dans *Chemoecology* 8 (1998) pp.1–7.
- [8] *Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – A review of their distribution, ecology and phytochemistry*. Par A.J.M. Baker et R.R. Brooks. Dans *Bio-recovery* (1989), 1 :81–126.
- [9] *Nickel Increases Susceptibility of a Nickel Hyperaccumulator to Turnip mosaic virus*. Par M.A. Davis, J.F. Murphy et R.S. Boyd. *J. Environ. Qual.*, Vol. 30, January–February 2001.
- [10] *Ecophysiology of Metals in Terrestrial Invertebrates*. Par S.P. Hopkin. GB-London : Elsevier Applied Science (1989)
- [11] *Adaptation to metals in animals*. Par P.L. Klerks. Dans Shaw AJ (ed.) *Heavy Metal Tolerance in Plants : Evolutionary Aspects*. Boca Raton :FL : CRC Press (1990), pp 313–321.
- [12] *Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants*. Par M.T. Brown et I.R. Hall. Dans Shaw AJ (ed.) *Heavy Metal Tolerance in Plants : Evolutionary Aspects*. Boca Raton : FL : CRC Press (1990), pp. 95–104.
- [13] *The root system*. Par T.L. Rost, M.G. Barbour, C. R. Stocking et T.M. Murphy. Dans *Plant Biology*, 1998 (pp. 68-84). California : Wadsworth Publishing Company. Cité dans Westhoff99.
- [14] *The biology of mycorrhizal infection in the Ericaceae. VIII. The role of mycorrhizal infection in heavy metal tolerance*. Par R. Bradley, A.J. Burt et D.J. Read. Dans *New Phytol* 1982, 91 :197–209.
- [15] *The significance of mycorrhizae*. Par J.L. Harley. Dans *Mycological Research* 1989, 92 : 129-134.
- [16] *On predicting the fate of radioactive caesium in soil beneath grassland*. Par G.J.D. Kirk et S. Staunton. *Journal of Soil Science*, 1989, 40 : 71-84.
- [17] *Accumulation of cesium-137 and strontium-90 from contaminated soil by three grass species inoculated with mycorrhizal fungi*. Par J.A. Entry, L.S. Watrud et M. Reeves. Dans *Environmental Pollution*, 1999, 104 : 449-457. Cité dans Westhoff99.
- [18] *The Ecology of Mycorrhizae*. Par M.F. Allen. New York : Cambridge University Press (1991). Cité dans Boyd 1998.
- [19] Marshall and Perry 1987.
- [20] *Mycorrhizae in a Californian serpentine grassland community*. Par N.A. Hopkins. *Can Bot* 1987, 65 :484–487.
- [21] *Mycoecology on serpentine soil*. Par J.L. Maas et D.E. Stuntz. *Mycologia* 61 :1106–1116 (1969). Cité dans Boyd 98.
- [22] *Influence of the nutritional mechanism of fungi (mycorrhize/saprophyte) on the uptake of radionuclides by mycelium*. Par A. Baeza, J. Guillen, S. Hernandez, A. Salas, M. Bernedo, J.L. Manjon, G. Moreno. Dans *Radiochimica acta*, 2005. vol. 93, no 4, pp. 233-238.
- [23] T. Karl1, P. Harley, L. Emmons, B. Thornton, A. Guenther, C. Basu, A. Turnipseed et K. Jardine ; *Report Efficient Atmospheric Cleansing of Oxidized Organic Trace Gases by Vegetation* ; Online 21 October 2010 Science 5 November 2010 : Vol. 330 no. 6005 pp. 816-819 DOI : 10.1126/science.1192534 ; Résumé en anglais
- [24] Alissar Cheaïb, *La dépollution par les plantes*, journal CNRS
- [25] « Dépolluer avec des plantes, une manière intelligente de nettoyer la planète. », sur *Le Blog de Charles Magnier*, 17 juin 2014 (consulté le 18 juin 2014).
- [26] (en)(zh) visite d'une station de phytoremédiation à Fuyang par le centre de recherche en bioremédiation du sol et de l'environnement de Chine
- [27] Yinan Qian, « Et si on pouvait épurer l'eau grâce à des plantes ? », sur *Rue 89*, 25 décembre 2007
- [28] Earthship

Sources

- S.L. Hutchinsona, A.P. Schwab et M. K. Banks. « *Phytoremediation of Aged Petroleum Sludge, Effect of Irrigation Techniques and Scheduling* ». *Journal of Environmental Quality* 2001, 30 :1516-1522
- M.P. de Souza, D. Chu, M. Zhao, A.M. Zayed, S.E. Ruzin, D. Schichnes, and N. Terry. "*Rhizosphere Bacteria Enhance Selenium Accumulation and Volatilization by Indian Mustard*" . *Plant Physiol.* (1999) 119 : 565-574.
- Information adaptée d'un rapport de la Northwestern University par J.L. Fiegl, B.P. McDonnell, J.A. Kostel, M.E. Finster, et Dr. K. Gray : *A Resource Guide : The Phytoremediation of Lead to Urban, Residential Soils*
- « Gouvernement du Canada – La science et les enjeux - Les biofondations – Environnement/Phytoremédiation »
- Amiot, J. *Utilisation des espaces dégradés en vue de production de biomasse. Etat des connaissances et perspectives*. Mémoire de Maîtrise UCO

9 Articles connexes

- Hyperaccumulateurs
- Plantes dépolluantes
- Phytostabilisation
- Bioremédiation
- Bioturbation
- Lagunage
- Marais filtrant
- Mycoremédiation
- Allélopathie
- phytochélatine

10 Liens externes

(fr) Le site du Laboratoire Sols et Environnement (Nancy)

(fr) Liste et culture de plantes dépolluantes

(fr) éléments de formation, de Laurence MARQUES (Université Montpellier, PowerPoint, 67 pages)

-  Portail de la botanique
-  Portail de l'environnement

11 Sources, contributeurs et licences du texte et de l'image

11.1 Texte

- **Phytoremédiation** *Source* : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Phytorem%C3%A9diation?oldid=109125300> *Contributeurs* : Anthere, Alno, Abrahami, Archeos, Yggdras, Zaharia, Phe, MedBot, Phe-bot, Efilguht, Ollamh, The RedBurn, Jef-Infojef, Flytox, Poulos, Sherbrooke, Mario~frwiki, Alpha.prim, Stéphane33, Zetud, Romanc19s, David Berardan, Gzen92, Vanina82, RobotQuistnix, Necrid Master, Cæruleum, Moez, TED, Le sotré, Julianedm, Grecha, Cehagenmerak, Pautard, Manu1400, Ji-Elle, Ejph, Lamiot, Tibauk, Asabengurtza, Basicdesign, Linan, Mnémosyne, Jarfe, Cwatier, Fm790, Manuguf, Chtfn, MirgolthBot, Nono64, Erabot, VonTasha, Rei-bot, Benoit Rochon, Drtissot, DodekBot~frwiki, Arduus Petus, Bertrand Cornu, VolkovBot, Franckiemaltese, Fluti, Phlo-M, Jymm, Chmlal, Louperibot, Dhatier, Jeje-cam, Devid~frwiki, Kolossus, Scaper, Colindla, WikiCleanerBot, Maurilbert, ZetudBot, Jaipasdepseudo, Luckas-bot, Gagea, GrouchoBot, Mélanie Huguet, Weazel, ArthurBot, Xqbot, Ortisa, Goudron92, JackBot, Dinamik-bot, Piwam, Ripchip Bot, Mrcx, Lio578, Salsero35, ChuispastonBot, Bertol, OrlodrimBot, Vagobot, Addbot, Do not follow et Anonyme : 21

11.2 Images

- **Fichier:Axelved.jpg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7e/Axelved.jpg> *Licence* : Public domain *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?
- **Fichier:Confusion_colour.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Confusion_colour.svg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Bub's
- **Fichier:Icône_botanique01.png** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8b/Icône_botanique01.png *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Transferred from fr.wikipedia ; transfer was stated to be made by User:Jacopo Werther. *Artiste d'origine* : Original uploader was Pixeltoo at fr.wikipedia
- **Fichier:Principes_phytoremediation.png** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/Principes_phytoremediation.png *Licence* : FAL *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : UPVD-BioEco-STEL3-2011
- **Fichier:View-refresh.svg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/View-refresh.svg> *Licence* : Public domain *Contributeurs* : The Tango ! Desktop Project *Artiste d'origine* : The people from the Tango ! project

11.3 Licence du contenu

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0