

La phytoremédiation : un véritable bioréacteur naturel

La phytoremédiation consiste à utiliser des plantes pour dépolluer l'environnement, y compris des sols contaminés. À l'instar de l'usine de traitement la plus sophistiquée, les plantes, en combinaison avec le sol et les microorganismes, forment un « bioréacteur » alimenté à l'énergie solaire, capable de traiter une variété impressionnante de contaminants.

Dans l'industrie de la décontamination, les bioréacteurs sont utilisés pour profiter de l'activité biologique des microorganismes. Il s'agit généralement de grandes cuves ou de réservoirs remplis d'eau contaminée et dans lesquels est « cultivée » une concentration élevée de microorganismes par le contrôle des conditions (température, pH, agitation/aération, etc.). Tout comme la technologie, la phytoremédiation est basée sur l'utilisation de processus biologiques.

Dans le cas des sols contaminés, les caractéristiques du sol et la présence de végétaux sont les principaux agents influençant l'activité des microorganismes, et l'énergie solaire suffit à alimenter le système. Le rôle des plantes, qui se situe entre autres dans l'utilisation en eau et l'exsudation racinaire qui régulent l'hydrologie du sol et en modifient les propriétés physico-chimiques, influence directement la disponibilité des contaminants, leur dégradation et leur assimilation et crée un environnement favorable à une grande activité microbiologique, laquelle est également utile à la dégradation de certains contaminants. D'une certaine façon, la combinaison des plantes, des microorganismes et du sol forme un véritable bioréacteur naturel!

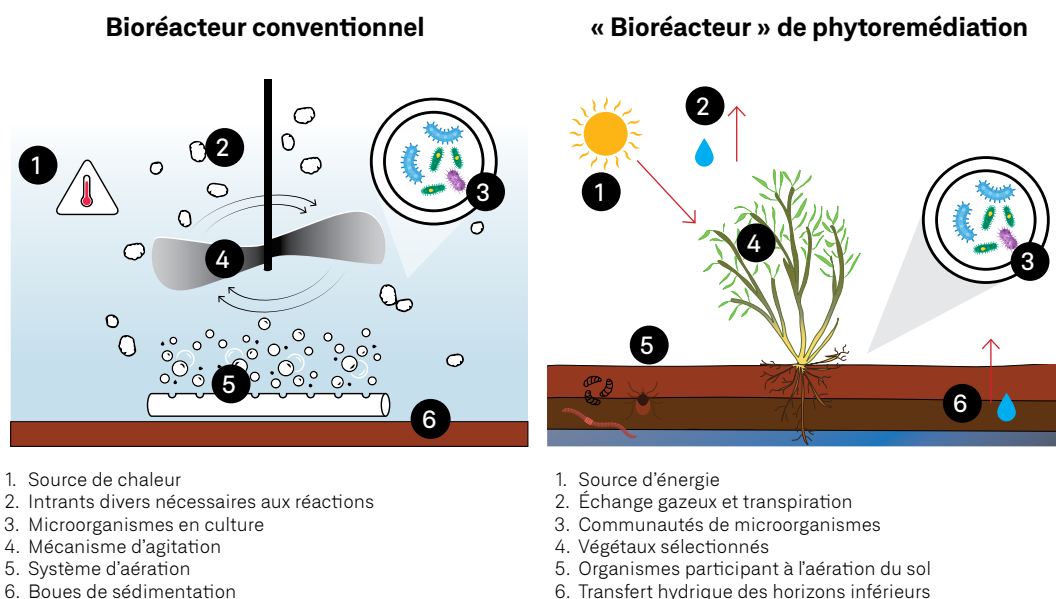


Figure 1. Tout comme un bioréacteur conventionnel, un système de phytoremédiation mise sur des processus biologiques pour le traitement de la contamination.

Les différents mécanismes de phytoremédiation

Phytoextraction

Internalisation et accumulation des contaminants dans les parties aériennes de la plante, suivies de la récolte de la biomasse afin de définitivement retirer les contaminants du site.

Les végétaux ont la capacité biologique d'assimiler certains éléments pour leur nutrition, incluant des métaux et de petites molécules inorganiques comme des nitrates ou des phosphates. Les mécanismes de transfert de ces éléments du sol vers l'intérieur des cellules de la plante sont souvent peu spécifiques : ils laissent passer toutes molécules chimiquement similaires à celles pour lesquelles ils sont développés. Par exemple, le cadmium (Cd^{2+}) est très similaire au calcium (Ca^{2+}) et pourra donc pénétrer dans la plante. C'est la même chose pour certaines formes d'arsenic qui sont très proches des molécules de phosphates. Par ailleurs, certains métaux comme le cuivre, le zinc et le fer sont à la fois des éléments nutritifs pour les plantes et des contaminants lorsque leur concentration est élevée. Toutefois pour être assimilés, les contaminants doivent être disponibles pour la plante, c'est-à-dire solubles dans l'eau. Dans certains cas, la présence des plantes peut augmenter cette disponibilité en modifiant les conditions physico-chimiques du sol, notamment via l'exsudation racinaire (sécrétion d'un cocktail de molécules diverses, notamment des enzymes, des sucres et des acides). Ainsi, toutes les plantes ont, théoriquement, la capacité biologique d'effectuer de la phytoextraction. Toutefois, la tolérance aux contaminants et l'efficacité d'accumulation varient beaucoup selon les espèces. Certaines d'entre elles, particulièrement dans les familles des Brassicacées, Euphorbiacées, Asteracées, Lamiacées et Scrophulariacées, ont démontré un potentiel particulièrement élevé d'accumulation de contaminants; on les appelle des hyperaccumulateurs. D'autres espèces ont plutôt un taux d'accumulation faible à moyen, mais possèdent une grande tolérance et une très

forte croissance. Le système racinaire de ce type de plante permet souvent d'aller chercher la contamination plus profondément dans le sol et malgré un taux d'accumulation plus faible que les hyperaccumulateurs, la plus grande quantité de biomasse produite résulte en une capacité d'extraction similaire, voire supérieure.

Phytodégradation

Dégradation des contaminants en formes secondaires inoffensives à l'intérieur même des tissus des végétaux, ou dans la rhizosphère via des composés sécrétés par les végétaux.

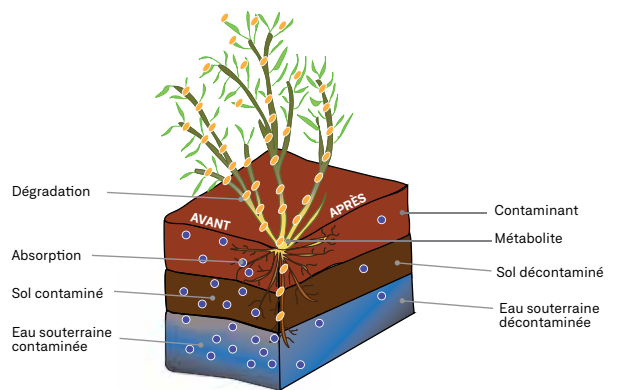


Figure 3. L'objectif de la phytodégradation est de transformer les contaminants en métabolites secondaires stables et inoffensifs, notamment grâce à des enzymes végétales.

Contrairement à la phytoextraction qui est particulièrement utile pour les métaux, la phytodégradation s'attaque aux contaminants organiques, c'est-à-dire qui sont essentiellement composés de carbone et qui peuvent être dégradés en formes secondaires (métabolites) inoffensives. Les plantes ne possèdent toutefois aucun mécanisme pour assimiler ce type de molécules; seuls les contaminants ayant une solubilité à la fois dans l'eau et dans les lipides (coefficient d'hydrophobicité de 0,5 à 3) peuvent pénétrer la membrane cellulaire des racines par simple diffusion, en passant de la région la plus concentrée (le sol contaminé) vers la région la moins concentrée (l'intérieur de la racine). Par ailleurs, la phytodégradation peut également s'effectuer dans le sol tout près des racines (rhizosphère) via des enzymes sécrétés par les végétaux. Certains composés phénoliques et organochlorés ainsi que pesticides font partie des contaminants pouvant potentiellement être phytodégradés. La dégradation s'opère principalement par des enzymes produits par la plante, soit naturellement, soit en réponse à la présence de contaminant (mécanisme de détoxication).

ILLUSTRATIONS : SOCIÉTÉ QUÉBÉCOISE DE PHYTOTÉCHNOLOGIE

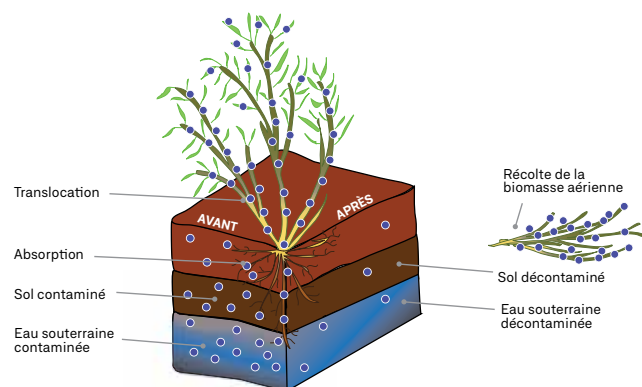


Figure 2. La phytoextraction consiste au transport des contaminants du sol ou de l'eau vers les parties aériennes des plantes, suivi de la récolte de la biomasse.

Rhizodégradation

Dégradation des contaminants en formes secondaires inoffensives dans le sol, principalement dans la rhizosphère, via différents processus microbiologiques influencés indirectement par les végétaux.

La rhizodégradation implique également la dégradation des contaminants en métabolites inoffensifs, mais ici, ce sont les microorganismes tels que les bactéries et les champignons qui sont responsables de cette dégradation. Toutefois, la présence

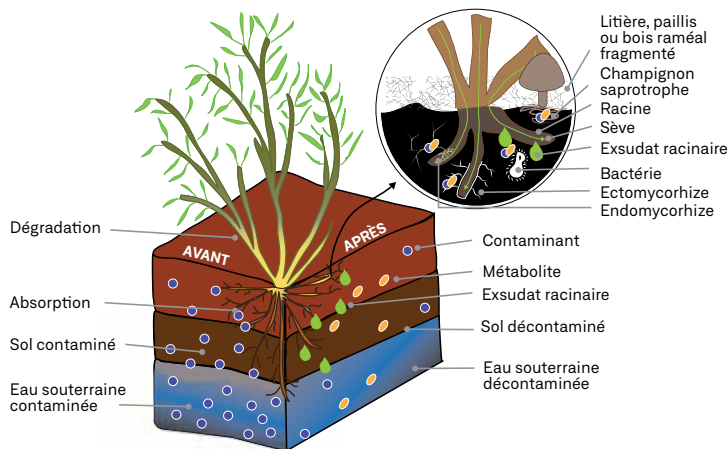


Figure 4. La rhizodégradation, soit la dégradation des contaminants dans la rhizosphère, s'opère via différents processus influencés indirectement par les plantes.

de végétaux augmente significativement l'efficacité de ces processus en fournissant des conditions favorables au développement d'une activité microbiologique intense (phytostimulation). Les racines des plantes émettent dans le sol de l'oxygène et diverses molécules carbonées pouvant servir de nourriture aux microorganismes. Les différents composés exsudés par les racines peuvent également influencer la disponibilité des contaminants et donc la facilité avec laquelle les microorganismes pourront les dégrader. En raison de la très grande diversité des microorganismes, une variété importante de contaminants peut être traitée par rhizodégradation. C'est notamment le cas des hydrocarbures de tous types, des pesticides, des composés organochlorés ou encore des surfactants.

Phytovolatilisation

Assimilation des contaminants ou d'une forme secondaire de ceux-ci et translocation dans les parties aériennes des végétaux, suivies du relargage dans l'atmosphère sous forme gazeuse via la transpiration.

Tout comme pour la phytoextraction et la phytodégradation intracellulaire, le point de départ de la phytovolatilisation est l'assimilation des contaminants par la plante. Dans ce cas, les molécules dont la volatilité (capacité d'une substance à

Inform

DÉVELOPPER
CONSEILLER
INNOVER
DOCUMENTER
DIFFUSER

Formation sur mesure en entreprise

Adaptée à vos besoins...

Dites-nous ce dont vous avez besoin et nous l'adapterons pour vous, chez vous!

Un des mandats de l'IQDHO est de perfectionner la pratique de l'horticulture ornementale en diffusant de l'information et en favorisant le développement de votre savoir-faire, de celui de vos gestionnaires et de votre personnel.

Besoins de formation en production :

- Gazonnière
- Jardinier
- Pépinière
- Serre

IQDHO

c'est 250 membres, près de 500 clients, 2 000 livres, 65 abonnements à des revues spécialisées, 40 000 références d'articles, des statistiques sur l'industrie, plus de 20 activités par année, près d'une centaine de projets de recherche et de développement, 20 experts, et plus encore!

WWW.IQDHO.COM

**INFORMEZ-VOUS
DÈS AUJOURD'HUI!**

**450 778-6514
INFO@IQDHO.COM**

IQDHO
LE CENTRE D'EXPERTISE
EN HORTICULTURE
ORNEMENTALE DU QUÉBEC

passer à la phase gazeuse) est élevée sont évacuées en même temps que la vapeur d'eau par les stomates (transpiration). Cela peut être le cas pour certains solvants chlorés, herbicides, insecticides et hydrocarbures. Dans certains cas, notamment pour des éléments comme le mercure, l'arsenic et le sélénium, une première étape de transformation dans la plante peut résulter en une forme volatilisable. La phytovolatilisation n'est généralement pas le mécanisme principal de phytoremédiation recherché, mais doit être considérée pour évaluer les risques de transfert de contamination dans l'environnement dans le cas où la forme du contaminant volatilisé serait toxique.

Phytostabilisation

Immobilisation des contaminants et prévention de leur dispersion dans l'environnement via différents processus physico-chimiques.

La phytostabilisation permet de réduire les risques environnementaux associés à un sol contaminé, sans toutefois se débarrasser à proprement parler de la contamination en soi. Dans un premier temps, la couverture végétale du sol empêche le transport aérien des particules de sol contaminées en raison du vent. Ensuite, l'utilisation en eau des végétaux réduit les risques de lessivage des contaminants les plus solubles par percolation. Finalement, les racines des plantes offrent une surface spécifique importante pour la fixation de certains contaminants ou encore sécrètent des substances qui réagissent avec les contaminants et en réduisent la solubilité (et donc la capacité à se disperser) ou la réactivité. La phytostabilisation est particulièrement utile dans le cas des métaux ou des contaminants organiques récalcitrants qui résistent aux autres mécanismes de phytoremédiation. ●

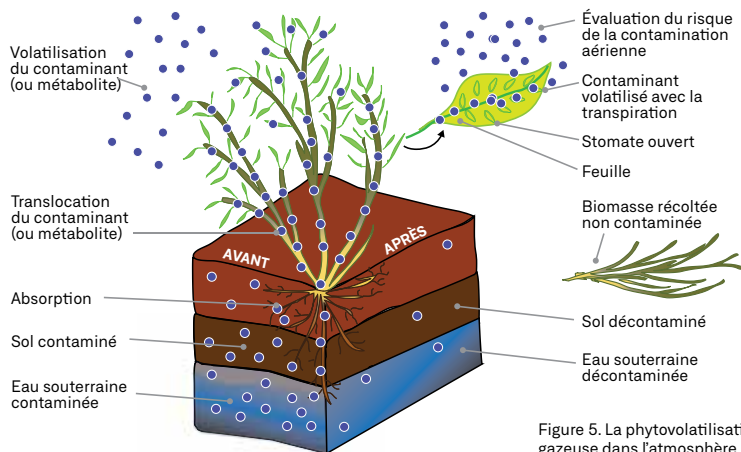


Figure 5. La phytovolatilisation consiste au relargage des contaminants sous forme gazeuse dans l'atmosphère par le biais de la transpiration des plantes.

Quelles plantes pour la phytoremédiation ?

La tolérance aux contaminants et les différents mécanismes de phytoremédiation sont basés sur des processus biologiques communs chez les végétaux. Ainsi, plusieurs espèces sont susceptibles d'être utilisées dans la phytoremédiation de sols contaminés. D'ailleurs, sur certains sites en friche, la colonisation naturelle du site par la végétation peut être utile à l'identification d'espèces potentielles pour le traitement du site, puisque l'on peut supposer que seules les espèces tolérantes aux contaminants présents arriveront à s'établir.

La tolérance aux contaminants doit toutefois s'accompagner de certaines capacités en terme de phytoremédiation. Plusieurs expérimentations ont été réalisées dans les dernières décennies afin d'identifier des espèces potentielles, mais de façon générale, certains critères sont à prioriser et dépendent du type de contamination et du mécanisme d'action envisagé. Quelques exemples de végétaux ayant des ensembles de caractéristiques intéressantes en phytoremédiation sont cités dans le tableau ci-bas.

Caractéristiques	Cultivars de saules ou de peupliers à croissance rapide (Salix sp., Populus sp.)	Moutarde (Brassica juncea)	Lupin blanc (Lupinus albus)	Moutarde sauvage (Thlaspi arvense)	Différentes espèces de fétuque (Festuca sp.)	Tournesol (Helianthus annuus)	Luzerne (Medicago sativa)	Pteris rubané (Pteris vittata)
Forte production de biomasse associée à une translocation des contaminants dans les parties aériennes	●					●		
Taux d'accumulation important de contaminants dans les parties aériennes (hyperaccumulation)		●		●		●		●
Réseau racinaire extensif favorisant une activité biologique importante dans le sol	●						●	
Exsudation de composés particulièrement utiles dans la décontamination	●		●					