

# La phytoremédiation des sols contaminés

Jean-Louis Morel

## Summary

### Phytoremediation of contaminated soils

Plants provide new ways for soil remediation. The activity of living roots (absorption, exudation of organic compounds, action on physical soil properties) contribute to decrease the negative effects of pollutants, as they are stabilised or eliminated (extraction or degradation). In the presence of plants, hydrocarbons, a rather ubiquitous group of soil pollutants, are degraded faster than in bare soil. Hydrocarbon degrading bacteria are stimulated by root exudates, which also create favourable conditions for co-metabolism. Also, the fragmentation of aggregates as well as the release of surfactants increase the exposure of organic pollutants to microorganism degradation. The phytoremediation technology is efficient to reduce the dissemination of pollutants. On historically contaminated soils, effects are generally discrete within a short period of time and may be more effective in the long run.

## Mots-clés

**Plantes, racines, exsudats, hydrocarbures, dégradation, rhizosphère.**

## Key-words

**Plant, root, exudate, hydrocarbon, degradation, rhizosphere.**

Nouvelle voie de traitement des sols pollués, la phytoremédiation suscite depuis une dizaine d'années un intérêt grandissant. Si l'on dispose actuellement de technologies valables pour le traitement des eaux et des sols, en revanche, les fortes interactions avec la matrice organo-minérale rendent difficile l'extraction ou l'inactivation des polluants des sols à partir des technologies disponibles, sans altérer les propriétés du milieu. Ainsi, en raison de leur potentiel à intervenir sur les polluants des sols, les plantes sont considérées avec un regard nouveau. Avec le Soleil comme source d'énergie, un système racinaire « prospecteur » et un impact modéré sur les propriétés intrinsèques du sol, ce type d'approche apparaît économiquement et écologiquement très attractif pour gérer les sites contaminés. Mais quelles actions peut-on attendre des végétaux vis-à-vis des polluants des sols ? Les effets observés en conditions contrôlées peuvent-ils se traduire en technologies de traitement des sols pollués par les activités agricoles, urbaines et industrielles ?

## Les différentes facettes de la phytoremédiation

Les plantes vivantes exercent diverses actions sur leur milieu, se comportant tantôt en puits par le prélèvement d'eau, d'oxygène et d'éléments minéraux, tantôt en source par l'introduction dans le sol de composés organiques (débris végétaux, exsudats racinaires) ou inorganiques ( $\text{CO}_2$ , protons), qui contribuent à modifier les propriétés physiques et chimiques et l'activité microbienne du sol environnant (figure 1). A cette diversité d'action, correspondent plusieurs orientations de la phytoremédiation selon les polluants considérés.

- **La phytostabilisation** ou implantation d'un couvert végétal sur une surface contaminée protégeant le sol contre l'érosion éolienne et hydrique ; les polluants sont ainsi immobilisés [1]. Les espèces végétales sont choisies, d'une

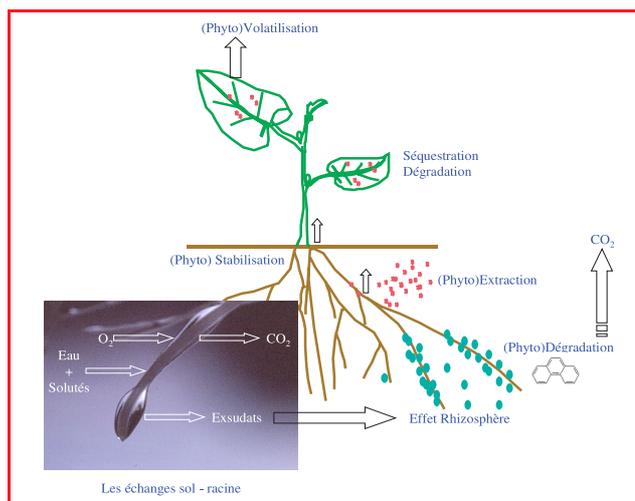


Figure 1 - Actions des plantes sur les polluants et applications pour le traitement des sols pollués.

part, pour leur tolérance aux composés toxiques présents dans le sol et, d'autre part, pour leur capacité à exclure ces composés du prélèvement racinaire. Les racines peuvent aussi modifier l'état chimique des polluants, par changement du pH rhizosphérique, réduction ou encore séquestration des polluants sur et dans les racines. Les polluants prennent alors des formes moins assimilables par les plantes ou moins susceptibles d'être transportées par les eaux. La phytostabilisation est applicable à tout type de pollution pour autant que des plantes tolérantes soient disponibles.

- **La phytoextraction** se veut une véritable extraction sélective des polluants minéraux des sols. Elle est relativement inopérante pour les polluants organiques comme les hydrocarbures car les plantes prélèvent ces composés en trop faible concentration [2], mais elle peut être notable

pour des composés halogénés [3]. Pour les polluants inorganiques, elle utilise des plantes hyperaccumulatrices qui ont acquis au cours de l'évolution la capacité d'accumuler dans leurs parties aériennes des quantités considérables d'éléments minéraux. Des métaux, comme le Cd, le Ni ou le Zn, normalement présents à l'état de traces, atteignent des concentrations de même niveau que les éléments majeurs comme l'azote. Plus de 400 espèces hyperaccumulatrices ont été identifiées de par le monde, la plupart sont des hyperaccumulatrices de nickel (e.g. *Alyssum murale*, espèce très répandue, qui contient plus de 1 % de Ni dans les feuilles), mais d'autres éléments sont également accumulés (As, Co, Cu, Mn, Pb, Se). Les hyperaccumulateurs offrent des applications multiples, incluant la phytoextraction de métaux des sols pollués et le « phytomining », c'est-à-dire l'utilisation des plantes pour exploiter des gisements métallifères pauvres (Ni). La phytoextraction est une voie prometteuse pour extraire sélectivement certains polluants métalliques particulièrement toxiques, comme le cadmium [4]. Son intérêt, qui repose sur l'existence de plantes sauvages constituant un patrimoine exceptionnel à sauvegarder, montrent une grande efficacité à réduire la disponibilité des polluants métalliques dans les sols.

- **La phytovolatilisation** est la transformation d'éléments comme le sélénium, le mercure ou l'arsenic par les micro-organismes et les plantes ; la méthylation microbienne du sélénium, par exemple, s'avère très efficace dans la rhizosphère. Certaines plantes hyperaccumulant le sélénium ont aussi la capacité de volatiliser l'élément absorbé à partir d'une chaîne de réactions qui conduisent à la formation de diméthylsélénure [5] (figure 2). Cette réaction, spontanée dans les sols, pourrait être amplifiée en stimulant l'activité des micro-organismes par l'implantation d'un couvert végétal approprié, conduisant à l'élimination du polluant du sol. Toutefois, son déplacement vers l'atmosphère peut entraîner de nouveaux problèmes. De même, il a été démontré qu'une part significative des composés organiques halogénés, comme le PCE ou le TCE, prélevés par des espèces ligneuses comme le saule, peuvent être « volatilisés » sous l'action de la transpiration [3].

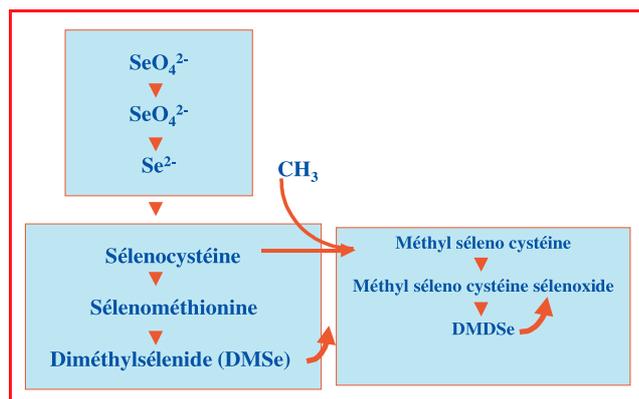


Figure 2 - Métabolisme du sélénium dans la plante [5].

- Enfin, **la phytodégradation** est l'amplification de la dissipation des polluants organiques récalcitrants, induite par la présence de plantes. Étant donné la fréquence des composés organiques dans les sols pollués, notamment les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), une telle voie mérite toute l'attention. Nous consacrerons donc ce qui suit à cette approche du traitement des sols

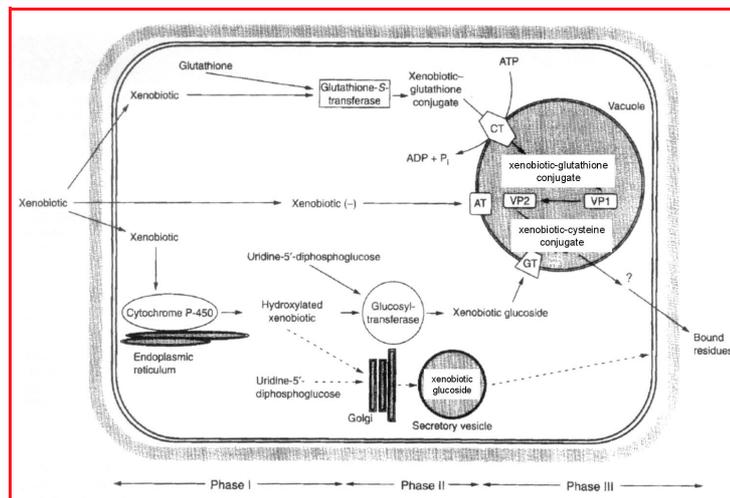


Figure 3 - Processus de détoxification des xénobiotiques dans les cellules végétales [6].

contaminés en insistant d'abord sur les caractéristiques du système sol/micro-organismes/plante, puis sur le devenir de composés organiques comme les hydrocarbures (notamment les HAP) et enfin sur les perspectives d'applications pratiques.

### La phytodégradation des polluants organiques

Les plantes peuvent métaboliser de nombreuses molécules xénobiotiques toxiques dans leurs tissus : pesticides, hydrocarbures, composés halogénés [6] (figure 3). Mais elles peuvent aussi contribuer à la dégradation de ces composés organiques récalcitrants dans leur rhizosphère [7]. Les composés halogénés qui ont la capacité à pénétrer dans la plante sont dégradés à la fois dans les tissus (phytoréduction, phytoxydation et assimilation) et dans la rhizosphère (phytoréduction) (figure 4) [3].

### La rhizosphère : un bioréacteur efficace

La rhizosphère est l'environnement immédiat des racines, et bénéficie d'apports réguliers de composés organiques issus de celles-ci, appelés exsudats, représentant une très large gamme de molécules, du glucose aux polysaccharides. Utilisés par la microflore du sol comme source de carbone et d'énergie, ces exsudats induisent une augmentation importante du nombre de micro-organismes au voisinage de la racine. L'exsudation est concomitante de la croissance de la plante et représente une dérivation vers le sol de 5 à 20 % du carbone fixé par la photosynthèse, dépendant des facteurs environnementaux (température, lumière, humidité, contraintes physiques, statut nutritionnel, présence de micro-organismes). Des travaux déjà anciens montrent que l'introduction de composés facilement métabolisables dans le sol s'accompagne souvent d'une dégradation accrue de l'humus, amenant à la diminution du stock de matière organique stable du sol. Ce phénomène, appelé « priming effect », affecte-t-il aussi des molécules organiques xénobiotiques comme les hydrocarbures ? Enfin, des symbioses s'établissent entre les racines des plantes et les micro-organismes. Les mycorhizes par exemple, associations entre les champignons et les racines des

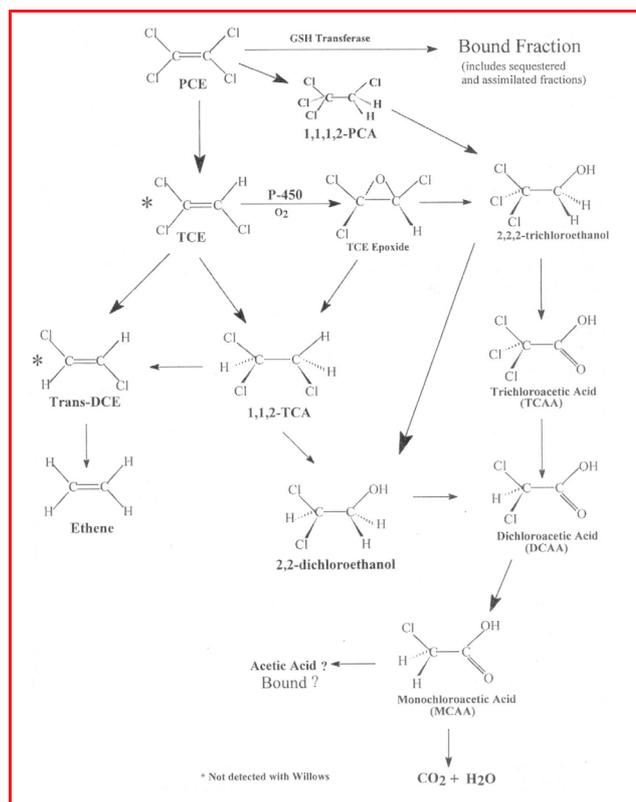


Figure 4 - Phytodégradation du pentachloroéthylène (PCE) (dégradation dans la plante et la rhizosphère) [3].

plantes terrestres, augmentent considérablement la zone d'influence de la plante sur son milieu.

### La dissipation des hydrocarbures en présence de plante

Dans les sols, les hydrocarbures subissent une élimination progressive sous l'influence de processus abiotiques (volatilisation, oxydation, photodégradation, lixiviation, formation de résidus liés) ou biotiques (dégradation et minéralisation microbiennes). En présence de plante, une stimulation de la dissipation des hydrocarbures peut être observée, résultant souvent d'une augmentation du nombre de bactéries dégradantes. Des cultures en conditions contrôlées sur une terre contaminée montrent ainsi qu'en présence de plante, la dégradation des hydrocarbures saturés et aromatiques d'un fioul est accélérée [7]. La stimulation, enregistrée durant les premiers stades de l'expérience, est masquée ultérieurement en raison de l'épuisement du milieu et de la présence d'hydrocarbures plus difficilement biodégradables. De même, lorsque les exsudats ou des composés modèles sont la seule source de carbone, la dégradation des hydrocarbures est plus rapide, démontrant ainsi le rôle majeur des composés exsudés.

La rhizosphère est un habitat favorable aux micro-organismes capables de dégrader les composés organiques récalcitrants. Par effet direct, les exsudats augmentent les populations microbiennes et leur activité dégradante et induisent des processus de dégradation par co-métabolisme des molécules récalcitrantes comme les HAP [8]. En contrôlant la nature des communautés microbiennes dans la rhizosphère, ils peuvent aussi favoriser indirectement certaines populations microbiennes : par exemple, les

monocotylédones créeraient les conditions pour une dégradation plus rapide de composés xénobiotiques récalcitrants comme le 2,4-D ou le 2,4,5-T. De même, les bactéries dégradant les PCB sont stimulées par les phénols exsudés par les racines de certaines espèces végétales. Enfin, les mycorhizes sont aussi un facteur important de dissipation des HAP dans un large volume de sol entourant les racines [9]. Les plantes pourraient également, comme certaines bactéries, libérer des émulsifiants qui aideraient à la mise en solution des hydrocarbures et leur dégradation ultérieure. Les racines exposent les composés organiques emprisonnés, provoquant la fragmentation de certains agrégats qui sont alors plus facilement dégradés par les micro-organismes. C'est probablement le même mécanisme qui explique la dégradation rapide des HAP à la suite d'opérations de remaniement de terres polluées (voir photographie en fin d'article). Enfin, la liaison aux cellules des racines et la formation de résidus liés avec la matière organique du sol constituent également une voie significative de dissipation des hydrocarbures.

### La phytodégradation : une technologie opérante ?

La phytoremédiation appliquée aux polluants organiques connaît maintenant un essor certain, en particulier aux États-Unis, avec la création d'entreprises spécialisées. Les peupliers, qui réduisent les flux de polluants vers la nappe, stabilisent le sol et favorisent probablement la dégradation des polluants organiques dans leur rhizosphère voire dans leurs tissus (pesticides), sont très largement utilisés pour traiter des sols contaminés par des polluants organiques. Des travaux tendent aussi à montrer que la culture d'espèces herbacées comme les graminées stimule la dégradation des HAP. Par exemple, des HAP de haute masse moléculaire (4-5 cycles), fraîchement introduits dans les sols cultivés avec différentes graminées, sont dégradés plus rapidement qu'en sol nu. Toutefois, dans le cas de sols contaminés par des activités industrielles passées où les composés ont subi différents processus conduisant à leur « vieillissement » ou incorporation dans la matrice solide du sol sous des formes peu disponibles, les informations sont quelquefois contradictoires. C'est le cas lorsque des essais sont conduits en vraie grandeur, c'est-à-dire dans des conditions qui reproduisent au mieux la réalité. Les effets sont alors plus discrets et souvent masqués par l'hétérogénéité du milieu, une propriété caractéristique des sols pollués. Par exemple, la dégradation des HAP présents dans des sols de cokerie ou d'anciennes usines à gaz n'apparaît stimulée que dans la profondeur du sol. Un autre indicateur de l'action de la plante est la réduction de la toxicité des terres contaminées, probablement liée à la réduction de la biodisponibilité des molécules toxiques dans la rhizosphère.

### Conclusion

Après une décennie de recherches intensives sur la capacité des plantes à traiter les pollutions les plus complexes associées à la matrice solide des sols, les résultats sont très prometteurs. La progression relativement rapide des travaux dans ce domaine est en partie la conséquence d'une relecture des données déjà anciennes, notamment sur le fonctionnement du système sol/plante/micro-organismes, avec de nouvelles perspectives et de nouvelles méthodes

d'investigation. C'est ainsi que les connaissances sur l'activité rhizosphérique et ses effets sur la matière organique des sols trouvent ici un écho particulier et soutiennent le concept de phytodégradation. Dix ans, c'est malgré tout trop peu pour bien comprendre les processus rhizosphériques impliquant les polluants. Les recherches doivent donc se poursuivre sur les mécanismes de dissipation des hydrocarbures dans la rhizosphère, notamment ceux qui impliquent les molécules les plus récalcitrantes à la dégradation; elles devraient permettre d'identifier des associations spécifiques plante/micro-organismes qui, par leur efficacité, pourraient être à la base de technologies de traitement en routine plus rapides que l'atténuation naturelle. Sous tous ses aspects, la phytoremédiation offre d'ores et déjà un fort potentiel. Cette biotechnologie représenterait un coût inférieur de 20 % à celui des méthodes physiques. Aux États-Unis, pas moins de 300 sites autorisés par l'Environmental Protection Agency sont en cours d'expérimentation et le marché est estimé à 300 millions de dollars d'ici 2005. Mais, en raison d'une efficacité à court terme pas toujours visible, la technologie n'est pas encore complètement acceptée par rapport à d'autres méthodes plus drastiques. A l'inverse, si elle reçoit un accueil favorable de la part du public, son application à grande échelle requiert encore des travaux sur son efficacité à long terme pour l'élimination des polluants et la protection de la ressource en eau.

## Références

- [1] Mench M., Vangronsveld J., Didier V., Clijsters H., *Environmental Pollution*, **1994**, 86, p. 279.
- [2] Chaîneau C.H., Morel J.-L., Oudot J., *J. Environ. Qual.*, **1997**, 26, p. 1478.
- [3] Nzengung V.A., Jeffers P., *International Journal of Phytoremediation*, **2001**, 3, p. 13.
- [4] Schwartz C., Morel J.-L., *6<sup>th</sup> International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, ConSoil'98*, Thomas Telford, Londres, **1998**.
- [5] Terry N., Zayed A.M., *Selenium in the Environment*, W.T. Frankenberger and S. Benson, Marcel Dekker, Inc, New York, **1993**, p. 343.
- [6] Coleman J.O.D., Blake-Kalff M.M.A., Davies T.G.E., *Trends in Plant Sci.*, **1997**, 2, p. 144.
- [7] Chaîneau C.H., Morel J.-L., Oudot J., *J. Environ. Qual.*, **2000**, 29, p. 569.
- [8] Bouchez M., Blanchet D., Vandecasteele J.-P., *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **1995**, 43, p. 156.
- [9] Joner E.J., Johansen A., Loibner A.P., de la Cruz M.A., Szolar O.H.J., Portal J.M., Leyval C., *Environ. Sci. Technol.*, **2001**, p. 2773.

### Jean-Louis Morel

est professeur au Laboratoire sols et environnement de l'ENSAIA\*.



\* Laboratoire sols et environnement, ENSAIA-INPL/INRA, 2 avenue de la Forêt de Haye, BP 172, 54505 Vandœuvre-les-Nancy Cedex.  
Tél. : 03 83 59 58 47. Fax : 03 83 59 57 91.  
E-mail : Jean-Louis.Morel@ensaia.inpl-nancy.fr



Étude de la phytodégradation des HAP dans des sols industriels (dispositifs lysimétriques).