

## Stratégies de remédiation *in situ* des sols pollués – la phytoremédiation

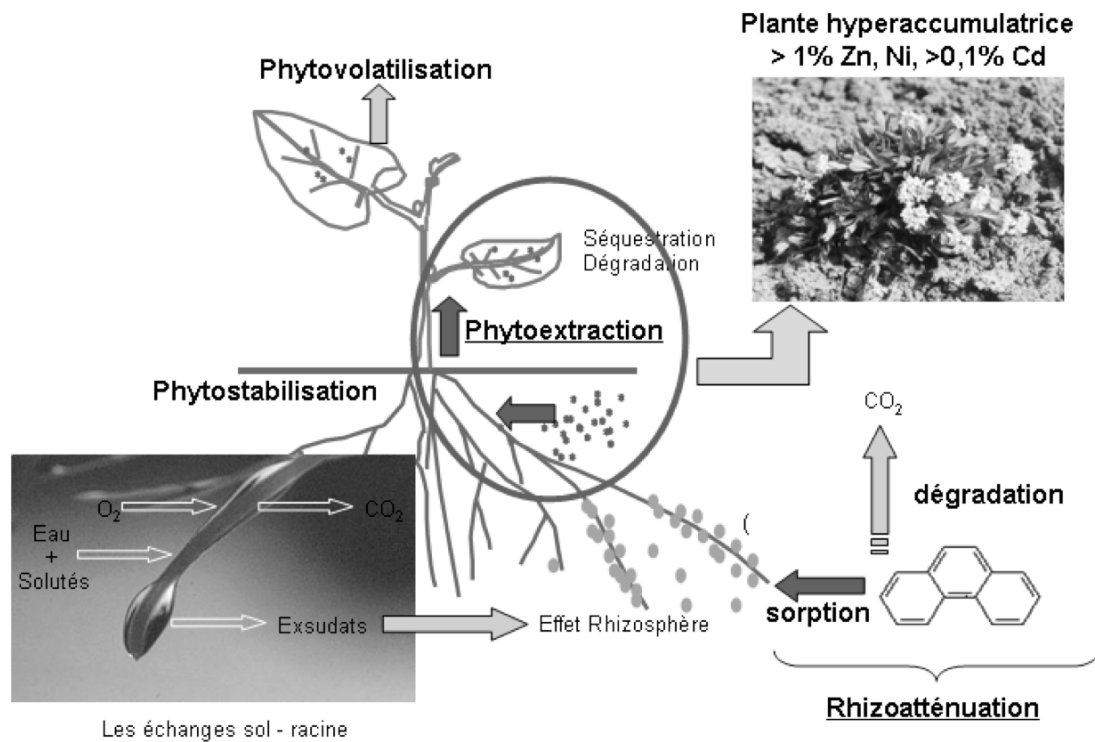
Jean Louis MOREL, Laboratoire Sols et Environnement UMR 1120 INPL-INRA

Support des activités agricoles, urbaines et industrielles, les sols sont le plus souvent considérés comme inépuisables et aptes à tolérer des quantités très élevées de déchets. Mais un inventaire sommaire à l'échelle européenne, réalisé dans le cadre de l'élaboration du projet de la Directive « Sols » (2006), a fait apparaître plus de 3,5 millions de sites et sols dégradés dont au moins 500 000 sont pollués. La pollution des sols est due à une très large gamme de substances inorganiques, comme les métaux lourds (*e.g.* Cd, Hg, Pb) et les métalloïdes (*e.g.* As), ou organiques, incluant les pesticides, les hydrocarbures, les PCB, les BTEX et l'ensemble de leurs produits de dégradation. Toutes ces substances ont en commun des propriétés toxiques à dose faible qui menacent la santé des organismes et des écosystèmes.

La gestion des sites contaminés, telle qu'elle est définie par la réglementation, impose de réduire les risques en dessous de seuils acceptables en fonction de l'usage des sites. Elle s'appuie sur la remédiation qui a fait l'objet de développements technologiques importants depuis les années 80. Mais, pendant une longue période les opérations de dépollution se limitaient à l'excavation des terres polluées, suivie de leur mise en décharge. A l'heure actuelle, les stratégies de traitement des sols pollués reposent sur des opérations *in situ*, *on site* ou *off site*, les deux dernières nécessitant l'excavation des terres préalablement à leur traitement (Simonnot et Croze, 2008). Les techniques de traitement sont alors destinées à extraire le polluant, à le dégrader ou à l'immobiliser. Elles utilisent des procédés physiques, chimiques ou biologiques. Par exemple, des polluants organiques peuvent être détruits par désorption thermique, par oxydation chimique ou par oxydation biologique. Les polluants métalliques peuvent être extraits par des solutions acides. Mais, dans tous ces cas, la terre traitée a perdu ses fonctions fondamentales et elle est considérée comme un déchet qu'il faut éliminer en site d'enfouissement technique.

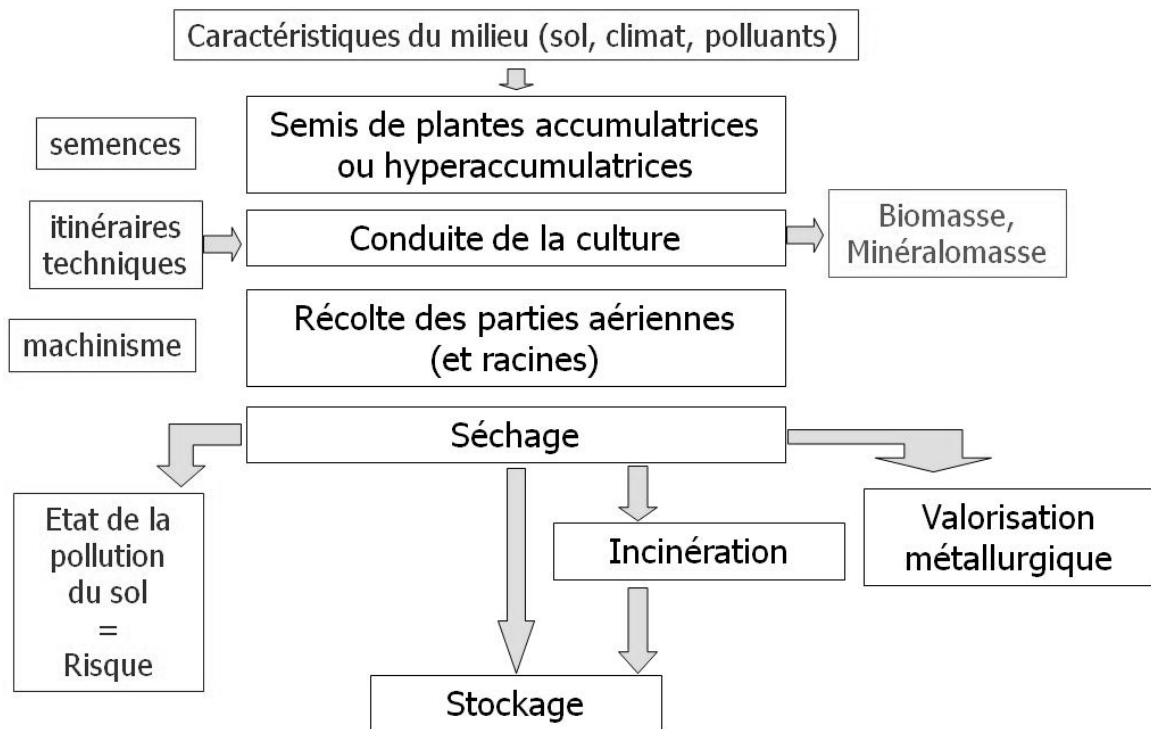
Si les procédés de traitement ont beaucoup progressé durant les deux dernières décennies permettant un abattement satisfaisant des pollutions et sont économiquement réalistes pour des petits volumes, tels que ceux rencontrés dans les zones urbaines à forte pression foncière, par contre, pour les surfaces très importantes, de plusieurs centaines d'hectares voire de plusieurs milliers ou dizaines de milliers d'hectares, les solutions économiquement et techniquement faisables sont rares. Or, ces espaces considérables représentent un enjeu très important dans un contexte de raréfaction des terres aptes à la production agricole. L'excavation des terres polluées n'est pas envisageable sur de telles surfaces et seul le traitement *in situ* est possible. Parmi les solutions potentielles, il existe trois voies conduisant à l'immobilisation des polluants, leur dégradation ou à leur extraction.

Ces voies peuvent reposer sur l'utilisation d'amendements (immobilisation), d'oxydants puissants tels que l'eau oxygénée (dégradation) ou des plantes (immobilisation, dégradation et extraction). Dans le dernier cas il s'agit d'une gestion des sols pollués par phytoremédiation, vocable générique qui sous-tend plusieurs actions des racines des plantes sur les polluants (Figure 1). La phytoremédiation peut être définie comme l'ensemble des procédés utilisant les plantes en vue de réduire les risques liés à la présence de substances toxiques dans les sols.



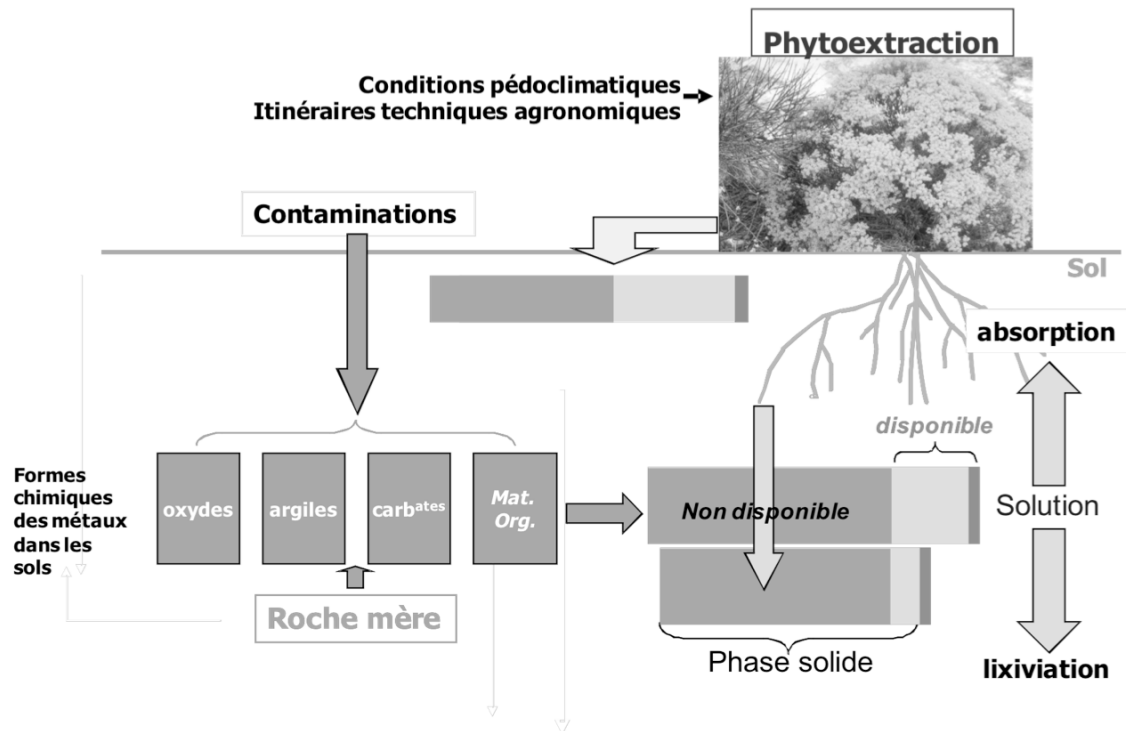
**Figure 1 : Rôles potentiels des plantes vis-à-vis des polluants des sols.**

La phytostabilisation est l'implantation d'un couvert végétal sur une surface contaminée qui protège le sol contre l'érosion éolienne et hydrique ; les polluants sont ainsi immobilisés. Si les polluants sont phytotoxiques, il est nécessaire de réduire d'abord leur disponibilité, par l'ajout d'amendements tels que le chaulage ou l'apport d'oxydes de fer. La phytodégradation repose sur l'effet rhizosphère qui stimule la dégradation des composés organiques des sols. Cette propriété peut être valorisée pour accélérer l'élimination des polluants organiques difficilement dégradables, comme certains produits phytosanitaires, des produits issus de l'industrie pétrolière, des composés de type HAP ou des solvants chlorés (Chaîneau *et al.*, 2000). En général sont privilégiées les Poacées et les Fabacées. Dans le procédé de phytoextraction, les racines des plantes se comportent comme des puits vis-à-vis des composés disponibles présents dans les sols. Certaines espèces, dites hyperaccumulatrices, ont la capacité de prélever des quantités considérables de métaux et de les transporter vers leurs parties aériennes, où ils sont généralement séquestrés sous la forme de complexes dans les vacuoles (Montarges-Pelletier *et al.*, 2009). Proposée dans les années 80 (Chaney, 1983), cette voie de décontamination des sols a été testée au laboratoire puis au terrain, avec la découverte d'espèces nouvelles pour l'extraction de métaux toxiques comme le cadmium (Baker *et al.*, 1994 ; Schwartz et Morel, 1998 ; Schwartz *et al.*, 2003)). Dans son principe, la phytoextraction consiste en la culture de plantes accumulatrices à forte production de biomasse ou de plantes hyperaccumulatrices afin d'abaisser la concentration en métaux assimilables dans le sol (Figure 2).



**Figure 2 : Etapes de la phytoextraction avec ou sans valorisation métallurgique**

Les plantes sont alors récoltées, séchées puis éliminées. Si les métaux qu'elles contiennent présentent un intérêt économique, elles sont alors traitées par les voies de la métallurgie ; on parle alors de phytomining comme dans le cas du nickel. Au plan pratique et à court terme, la phytoextraction réduit les risques de dissémination des polluants par une réduction du compartiment des métaux assimilables (Figure 3) et, à plus long terme, elle contribue à leur dissipation. L'optimisation des cultures de phytoextraction nécessite la définition d'itinéraires techniques appropriés afin d'augmenter le rendement d'extraction des métaux (préparation du sol, semis, fertilisation, protection, récolte).



**Figure 3 : Influence des plantes sur le cycle des métaux dans le système sol-plante hyperaccumulatrice**

Si la récupération de métaux d'intérêt économique et industriel tels que le nickel ou le cadmium est envisagée, deux procédés sont alors combinés, l'un agronomique, visant à extraire le métal à l'aide d'une plante et l'autre métallurgique, pour produire le métal sous une forme d'intérêt commercial. Les travaux menés en vraie grandeur pour le nickel avec des plantes hyperaccumulatrices comme *Alyssum murale* aboutissent à des rendements d'extraction élevés (plus de 70 kg ha<sup>-1</sup>) (Bani *et al.*, 2007) et un procédé métallurgique a été développé qui permet d'obtenir un composé du Ni à haute valeur ajoutée (Barbaroux *et al.*, 2009).

**En conclusion**, pour les sites de très grande taille, les solutions de gestion consistent essentiellement à contrôler les polluants des sols en s'attachant à réduire les risques à partir de la construction d'agrosystèmes adaptés. Il s'agit aussi de permettre sur ces surfaces une agriculture ou une foresterie qui apporte un revenu aux agriculteurs. Les stratégies actuelles pour valoriser les sites pollués et dégradés consistent alors à cultiver des plantes à usage non alimentaire, ayant un intérêt énergétique ou industriel (*e.g.* fibre). Pour cela, il doit être prévu une restauration des fonctions fondamentales du sol soit à la suite du traitement par voie chimique (*e.g.* oxydation chimique), soit directement pour permettre l'implantation d'un couvert végétal de phytoremédiation. La restauration des fonctions du sol repose sur des procédés respectueux des ressources naturelles, c'est-à-dire ne consommant pas de terres agricoles mais utilisant les sous produits des activités humaines (*e.g.* déchets organiques, terres traitées). Il s'agit de la construction de sols (Séré *et al.*, 2007).

## Références

- Baker, A.J.M.; Reeves, R.D. & Hajar, A.S.M. 1994. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae). *New Phytologist*, 127, 61-68.
- Bani A., Echevarria G., Sulçe S., J. L. Morel & Mullai A. 2007. In-situ phytoextraction of Ni by a native population of *Alyssum murale* on an ultramafic site (Albania), *Plant Soil* 293, 79-89.
- Barbaroux R., Meunier N., Mercier G., Taillard V., Morel J.L., Simonnot M.O., Blais J. F. 2009. Chemical leaching of nickel from the seeds of the metal hyperaccumulator plant *Alyssum murale*. *Hydrometallurgy*. 100 :10-14
- Chaîneau, C.H., Morel J.L., Oudot J. 2000. Biodegradation of fuel oil hydrocarbons in the rhizosphere of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Environmental Quality*, 29 :569-578.
- Chaney, R.L. 1983. Plant uptake of inorganic waste constituents. p. 50–76. In J.F. Parr, P.B. Marsh, and J.M. Kla (ed.) Land treatment of hazardous wastes. *Noyes Data Corp., Park Ridge, NJ*.
- Montarges-Pelletier, E., V. Chardot, G. Echevarria, L. J. Michot, A. Bauer, J.L. Morel 2008. Identification of nickel chelators in three hyperaccumulating plants: An X-ray spectroscopic study. *Phytochemistry* 69:1695-1709.
- Morel J.L., 2002, La phytoremediation des sols contaminés. *L'actualité Chimique*, 63-66.
- Séré G., Ouvrard S., Schwartz C., Renat J.C., Morel J.L., 2008, Ecological assessment of a constructed soil on degraded sites. *Journal of Soils & Sediments*, vol 8 (2), p 130-136
- Simonnot M.O, Croze V. 2008, Procédés de traitements physiques et chimiques des sols pollués. *Techniques de l'ingénieur*, vol. JB5, n°J3981, [Note(s): J3981.1-J3981.21]. Paris.
- Schwartz, C., Echevarria G., Morel J.L. 2003. Phytoextraction of cadmium with *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*, 249:27-35.