

## **Application des phytotechnologies : état de l'art**

Valérie Bert, Michel Mench, Jaco Vangronsveld, Peter Kusch, Jean-Paul Schwitzguebel

► **To cite this version:**

Valérie Bert, Michel Mench, Jaco Vangronsveld, Peter Kusch, Jean-Paul Schwitzguebel. Application des phytotechnologies : état de l'art. 2. Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, Oct 2009, Paris, France. ADEME Editions. Angers, pp.NC, 2009. <ineris-00973357>

**HAL Id: ineris-00973357**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00973357>**

Submitted on 4 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Application des phytotechnologies : état de l'art

**Valérie Bert** <sup>(1)</sup>, **Michel Mench** <sup>(2)</sup>, **Jaco Vangronsveld** <sup>(3)</sup>,  
**Peter Kuschik** <sup>(4)</sup>, **Jean-Paul Schwitzguebel** <sup>(5)</sup>

<sup>1</sup> INERIS, Unité Technologies et Procédés Propres et Durables, Parc Technologique Alata, BP2, 60550 Verneuil en Halatte (F) - [valerie.bert@ineris.fr](mailto:valerie.bert@ineris.fr)

<sup>2</sup> UMR INRA BIOGECO 1202 « Biodiversité, GENes et Communautés », Equipe Ecologie des Communautés, Université Bordeaux 1, Talence (France)

<sup>3</sup> Université de Hasselt, Campus Diepenbeek, Environmental Biology, Diepenbeek (BE)

<sup>4</sup> Department of Bioremediation, Centre for Environmental Research Leipzig-Halle, Leipzig (GE)

<sup>5</sup> Laboratory for Environmental Biotechnology, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (CH)

## Résumé

Le réseau Européen COST 859 (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research) « Phytotechnologies to promote sustainable land use and improve food safety » (<http://w3.gre.ac.uk/cost859>) rassemble plus de 250 scientifiques.

Depuis octobre 2004, il œuvre à promouvoir et organiser en réseau la recherche dans le domaine des phytotechnologies. Structuré en quatre groupes de travail (WG) interconnectés, ses activités sont axées sur les plantes et microorganismes associés pour (i) comprendre, contrôler et utiliser des mécanismes impliqués dans l'absorption, la translocation, le métabolisme et le stockage des polluants (éléments traces non essentiels ou en excès, composés organiques) et des éléments nutritifs essentiels, (ii) réduire le transfert des polluants vers les plantes utilisées en alimentation et améliorer leurs qualités et valeur nutritive (WG3), en utilisant les connaissances et outils de la Physiologie et Biologie végétale (tous WG), Biochimie, Biogéochimie et Microbiologie (WG1) et Biologie moléculaire (WG2).

Enfin, le dernier groupe de travail « Application et Intégration des Phytotechnologies » (WG4) a pour mission de proposer des solutions appropriées pour assainir, réhabiliter et gérer durablement les sols et les ressources en eaux, avec une évaluation des conséquences écologiques, socio-économiques (dont la valorisation des milieux et de la biomasse récoltée) et réglementaires. Ces solutions doivent pouvoir prouver leur efficacité, présenter des avantages par rapport aux autres solutions disponibles, respecter l'environnement et être économiquement viables. Sur la base des travaux réalisés par les scientifiques du WG4 sur des sites pilotes où sont expérimentés la phytoextraction, la phytostabilisation, la rhizodégradation, la rhizofiltration et le lagunage artificiel et restitués lors des réunions du groupe de travail, l'état d'avancement de l'application des phytotechnologies au niveau mondial sera présenté ainsi que les besoins de recherche associés.

## **1. OBJECTIFS**

Le réseau Européen COST 859 (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research), « Phytotechnologies to promote sustainable land use and improve food safety » (<http://w3.gre.ac.uk/cost859>), rassemble plus de 250 scientifiques répartis dans les 29 pays participants. Depuis octobre 2004, il œuvre à promouvoir et organiser en réseau la recherche en Europe dans le domaine des phytotechnologies. Structuré en quatre groupes de travail (WG) interconnectés, ses activités sont axées sur les plantes et microorganismes associés pour (i) comprendre, contrôler et utiliser des mécanismes impliqués dans l'absorption, la translocation, le métabolisme et le stockage des polluants (éléments traces non essentiels ou en excès, composés organiques) et des éléments nutritifs essentiels, (ii) réduire le transfert des polluants vers les plantes utilisées en alimentation et améliorer leurs qualités et valeur nutritive (biofortification) (WG3), en utilisant les connaissances et outils de la Physiologie et Biologie végétale (tous WG), Biochimie, Biogéochimie et Microbiologie (WG1) et Biologie moléculaire (WG2). Enfin, le dernier groupe de travail « Application et Intégration des Phytotechnologies » (WG4) a pour mission de proposer des solutions appropriées pour assainir, réhabiliter et gérer durablement les sols et les ressources en eaux, avec une évaluation des conséquences écologiques, socio-économiques (dont la valorisation des milieux et de la biomasse récoltée) et réglementaires. Ces solutions doivent pouvoir prouver leur efficacité, présenter des avantages par rapport aux autres solutions disponibles, respecter l'environnement et être économiquement viables.

Sur la base des travaux réalisés par les chercheurs du WG4, sur des sites pilotes de démonstration où sont expérimentés la phytoextraction, la phytostabilisation, la rhizodégradation, la rhizofiltration et le lagunage artificiel, et restitués lors des réunions du groupe de travail, cette présentation propose de développer le retour d'expérience acquis en application réelle et de taille significative. Les besoins de recherche associés sont présentés en conclusion. La majeure partie des résultats développés dans la présentation est compilée dans les publications [1], [2], [3] et [4].

## **2. RESULTATS DES APPLICATIONS DE PHYTOREMEDIATION (PILOTES, PLEIN CHAMPS)**

### **2.1. – Phytostabilisation**

Il existe dans le monde une trentaine de sites phytostabilisés connus. La surface de ses sites varie de quelques mètres carrés à quelques dizaines d'hectares. La phytostabilisation à grande échelle est cependant rare. Idéalement, les plantes candidates ne doivent pas transférer et accumuler des éléments traces dans leurs parties aériennes au-delà des valeurs fréquentes propres à leur métabolisme et usage. Elles doivent être tolérantes à divers stress (éléments traces, contaminant organiques, interactions biotiques avec des animaux et microorganismes pathogènes, sécheresse, déficience en nutriments, érosion, etc.) et être valorisables. Elles doivent développer un système racinaire si possible dense et profond, avoir un recouvrement important et être pérennes. Elles doivent être de préférence natives pour éviter les invasions et adaptées aux conditions climatiques.

La plante universelle utilisable en phytostabilisation n'existe pas car chaque site a des propriétés et une contamination spécifiques. La sélection d'herbacées pérennes (*e.g. Agrostis* sp., *Festuca* sp., *Miscanthus*, etc.), d'arbustes et d'arbres dépend principalement des contaminants, des objectifs et des moyens de remédiation, de l'usage futur du site, de la législation et des possibilités de valorisation de la biomasse. Peu d'essais pilotes et sur sites contaminés utilisent la végétation native locale ce qui résulte souvent en un faible taux de survie de la végétation, en un faible recouvrement et par conséquent en une absence d'efficacité de la phytostabilisation. L'absence de maintenance les premières années (*e.g. irrigation, lutte contre les ravageurs et l'herbivorie, etc.*) peut être une cause d'échec.

L'assemblage de groupes fonctionnels de végétaux différents dans une communauté peut augmenter la productivité et le rendement. De même, une communauté végétale diversifiée est plus adaptée pour couvrir un sol ayant une forte variabilité spatiale des contaminants (degré et nature) et des conditions pédologiques

En phytostabilisation, il est d'usage courant d'utiliser conjointement des amendements du sol et des plantes tolérantes dont le trait phénotypique est de peu accumuler les éléments traces dans leurs parties aériennes malgré une exposition forte. Des plantes tolérantes issues de populations métallophiles ou non sont capables de couvrir des sols pollués par les éléments traces en absence d'amendements. Cependant, lorsque le pool labile d'éléments traces est important et que la disponibilité en éléments nutritifs est faible, la végétation peut avoir du mal à s'implanter, laissant à nue certaines parties du sol. Les amendements peuvent favoriser la survie et la croissance des plantes, l'installation et le développement de nouvelles plantes, pas forcément connues pour leur tolérance aux éléments traces (biodiversité).

L'utilisation d'amendement en combinaison avec des plantes natives (phytostabilisation aidée) diminue le pool labile d'éléments traces susceptible soit d'actions néfastes pour la biologie et la santé, soit de migrer en profondeur ou en surface et d'atteindre les nappes ou les cours d'eau. La diminution des concentrations en éléments traces dans les lixiviats est visible dès les premiers temps après l'ajout de l'amendement. Cependant, les amendements sont sélectifs et n'ont pas la même action sur tous les éléments traces. Un mélange d'amendement peut être préférable à un amendement seul sur un site présentant une pollution multiple (différents métaux et métalloïdes avec ou sans xénobiotiques organiques).

## **2.2. – Phytoextraction**

Environ vingt cinq sites connus accueillent ou ont accueilli des essais de phytoextraction dans le monde. La surface de ces sites varie de quelques mètres carrés à quelques milliers d'hectares. Comme pour la phytostabilisation, la phytoextraction à grande échelle est rare et concerne soit des essais avec des arbres en taillis à courte rotation associé à une valorisation énergétique ou des cultures de colza et tournesol (cas du Cd et du Zn), soit des plantes hyperaccumulatrices (Cd, As, et Ni). Les stratégies les plus intégrées et diversifiées sont celles appliquées pour le Sélénium, suivi du Nickel. Les moins abouties concernent le Plomb et le Cuivre. Pour ce dernier, des travaux commencent à être prometteurs.

La plante idéale en phytoextraction doit être efficace pour l'accumulation dans les parties récoltables et fournir des bénéfices d'ordre financier ou écologique. La phytoextraction devrait être réalisée avec des espèces herbacées dicotylédones et des arbres, ayant un facteur de bioconcentration supérieur à 1. De nombreuses plantes ou arbres valorisables (production de fibres, d'énergie, d'huiles essentielles, biocarburants, etc.) ont un cycle de vie court et produisent une forte biomasse. Le revenu fourni par la valorisation de la biomasse pourrait être suffisant pour rendre la durée d'extraction, souvent limitante, envisageable. Lorsque la phytoextraction est combinée avec la valorisation de la biomasse, une attention particulière doit être portée au cycle des polluants dans le système sol-plante. Les conséquences écologiques d'une monoculture (e.g. sélection de populations de pathogènes et ravageurs) doivent aussi être évaluées.

Les concentrations en éléments traces dans les parties aériennes des plantes et les facteurs de bioconcentration varient en fonction des accessions et surtout des sites, c'est-à-dire de leur contamination et du type de sol. Avec des espèces végétales productives, le rendement de biomasse est estimé au maximum à environ 100 tonnes de masse fraîche/ha limitant l'extraction potentielle d'élément trace à 100 ou 2000 kg/ha/an en fonction de l'élément extrait. A partir d'une production plus réaliste, on peut estimer que la phytoextraction sur un sol moyennement pollué prendrait au moins 100 ans. Cependant, la plupart des études réalisées jusqu'à présent à une échelle significative utilisent des plantes ayant un facteur de bioconcentration inférieur à 0,5, ce qui augmente considérablement la durée de la phytoextraction.

Le rendement de phytoextraction peut être amélioré avec l'ajout d'agents fertilisants et/ou mobilisant les éléments traces, en maîtrisant les cycles de rotation, l'irrigation et de manière générale les pratiques culturales (phytoextraction aidée).

### **2.3. – Zones humides construites**

Les systèmes de zones humides construites sont bien développés partout dans le monde pour traiter les eaux usées domestiques, agricoles et industrielles. Les progrès enregistrés concernent les aspects techniques, liés à la nature du flux et au débit par exemple, et à la possibilité d'utiliser ces systèmes pour traiter les polluants émergents (résidus pharmaceutiques, pesticides).

Les zones humides construites sont des solutions alternatives fiables aux traitements conventionnels des eaux à partir du moment où elles ont été bien conçues et que les populations et les autorités locales ont été associées dès la conception. La biomasse produite peut être valorisée. Un autre avantage est qu'il n'y a pas de production de boues résiduelles. Dans les zones humides construites, le choix des plantes est un élément clef. Certaines plantes sont capables de phytoextraire des éléments traces (ex : Se) tandis que d'autres phytostabilisent (ex : Pb) ou phytodégradent avec l'aide des microorganismes associés à leurs racines les polluants organiques (ex : HAP non chlorés).

L'efficacité des zones humides construites dépend de nombreux facteurs comme le type de flux (horizontal, vertical), la circulation de l'eau, le débit, le temps de rétention, la composition de l'eau et les contaminants à traiter, la saisonnalité et les espèces plantées.

### **2.4. – Phyto/rhizodégradation des polluants organiques**

La dégradation des polluants organiques est généralement réalisée par les microorganismes. Les plantes aident les communautés microbiennes à dégrader les polluants organiques, un processus étant la rhizodéposition. Les plantes peuvent changer la structure de la communauté bactérienne, notamment leurs diversités métabolique et taxonomique.

La phyto/rhizodégradation peut être utilisée pour dégrader les hydrocarbures, les produits organiques persistants (PoPs), les explosifs et les produits pharmaceutiques dans les sols, les sédiments et les eaux. Deux expériences en champs montrent que les bactéries endophytes augmentent la dégradation des TCE et des BTEX.

### **2.5. – Phytoremédiation de l'air**

La phytoremédiation de l'air intérieur et de l'air ambiant sont peu étudiées contrairement aux autres techniques de phytoremédiation. Dans les lieux urbanisés, là où le trafic routier est dense, les poussières et les HAP constituent les polluants principaux de l'air. Les poussières contaminées en HAP et en éléments traces peuvent pénétrer dans les parties aériennes des plantes. Certaines plantes d'intérieur sont capables de dépolluer l'air contaminé en formaldéhyde. Plusieurs assemblages de végétaux permettent de capter les particules de l'air ambiant en ville. Des travaux sont menés sur les éléments traces issus des pots catalytiques.

## **3. PERSPECTIVES**

### **3.1 – pour la phytostabilisation**

Actuellement, l'efficacité de la phytostabilisation est démontrée sur la base des mesures du transfert solution du sol-racine-parties aériennes et d'indicateurs biologiques tels que l'activité et la biomasse microbienne. L'évaluation de l'efficacité sur le long terme de la phytostabilisation doit s'enrichir des connaissances sur les espèces de plantes adéquates, les variabilités intraspécifiques afin d'améliorer les cultivars disponibles, l'accumulation des éléments traces dans les parties aériennes des plantes, l'organisation et la dynamique des communautés végétale, la chimie et la multifonctionnalité des sols, l'utilisation des microorganismes, la valorisation de la biomasse, l'écotoxicologie, les pratiques de maintenance, les interactions biotiques et l'écologie des communautés animales.

### **3.2 – pour la phytoextraction**

Malgré les progrès évidents réalisés sur la phytoextraction des éléments traces ces dernières années, plusieurs problèmes restent à résoudre, comme la durée nécessaire pour atteindre des seuils de contamination résiduelle acceptable et la valorisation de la biomasse contaminée. La phytoextraction devrait devenir plus attractive et offrir un temps de décontamination plus rapide si les objectifs de remédiation étaient davantage basés sur l'exposition et les risques, et en particulier si la fraction « biodisponible » des sources (impact sur le vivant) et la fraction « mobile » (impact sur la migration) étaient diminuées plutôt que seulement la concentration « totale » en éléments traces. Ceci implique que les législateurs évoluent vers un concept « basé sur le risque » et que la diminution de la fraction « biodisponible » soit persistante sur le long terme.

## **4. CONCLUSION**

Plusieurs techniques de phytoremédiation sont au stade de la démonstration. C'est le cas, de la phytostabilisation aidée ou de la phytoextraction avec des arbres en taillis à courte rotation, du colza ou du tournesol. Cependant, il existe encore trop peu de démonstrations menées sur le long terme (au-delà de la décade).

L'optimisation des pratiques culturales et des végétaux, la conduite de consortium plante-microorganismes, l'identification des effets non intentionnels associés aux techniques de phytoremédiation, les temps de mise en opération et de gestion sont des besoins d'avancées mis en évidence. Pour la phytoextraction, la nécessité de réduire la durée du traitement et de valoriser la biomasse contaminée par des éléments traces de faible valeur ont été mises en évidence. De manière générale, les données socio-économiques liées aux techniques de phytoremédiation sont peu existantes et d'une faible accessibilité.

Les recommandations pratiques et les preuves de l'efficacité et de la pérennité des traitements pour les sites contaminés par les éléments traces et les xénobiotiques organiques ne pourront venir que des démonstrations sur site, qu'il est urgent d'encourager.

## **Références**

- [1] Mench M, Bert V, Schwitzguébel JP, Gawronski S, Schröder P, Vangronsveld P (2009) Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: II. Outcomes at field scale and outlook from COST Action 859. *Environ Sci Pollut Res* (In Press)
- [2] Bert V, Seuntjens P, Dejonghe W, Lacherez S, Thanh Thuy HT, Vandecasteele B (2009) COST 859 – Phytoremediation as a management option for contaminated sediments in tidal marshes, flood control areas and dredged sediment landfill sites. *Environ Sci Pollut Res* (In Press)
- [3] Mench M, Schwitzguébel JP, Schröder P, Bert V, Gawronski S, Gupta S (2009) Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: I. Outcomes from COST Action 859 on contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety. *Environ Sci Pollut Res* (In Press)
- [4] Vangronsveld J, Herzig R, Weyens N, Boulet J, Adriaensen K, Ruttens A, Thewys T, Vassilev A, Meers E, Nehnevajova E, van der Lelie D, Mench M (2009) COST 859 - Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environ Sci Pollut Res* (In Press).

## **Remerciements**

Les auteurs remercient l'Action COST 859 et tous les membres de ce réseau européen qui ont contribué aux différentes réunions de travail et colloques. Les actions du réseau COST 859 sont soutenues par la Commission Européenne, la Fondation Européenne pour la Science (ESF) et l'ADEME, Département Sites et Sols Pollués, Angers, France. Les auteurs remercient également les propriétaires pour l'accès aux sites et leur aide dans le soutien aux travaux.