



## **SUMATECS : Gestion durable des sols contaminés par les éléments traces : état de l'art et besoins de recherche**

Valérie Bert, Michel Mench, Ann. Ruttens, Jurate Kumpiene, Ingo Muller, Andy Cundy, Wolfgang Friesl-Hanl, Pavel Tlustos, Giancarlo Renella, Karine Tack, et al.

### **► To cite this version:**

Valérie Bert, Michel Mench, Ann. Ruttens, Jurate Kumpiene, Ingo Muller, et al.. SUMATECS : Gestion durable des sols contaminés par les éléments traces : état de l'art et besoins de recherche. 2. Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, Oct 2009, Paris, France. ADEME Editions. Angers, pp.NC, 2009. <ineris-00973368>

**HAL Id: ineris-00973368**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00973368>**

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.

# SUMATECS

## Gestion durable des sols contaminés par les éléments traces : état de l'art et besoins de recherche

**Valérie Bert** <sup>(1)</sup>, **Michel Mench** <sup>(2)</sup>, **Ann Ruttens** <sup>(3)</sup>, **Jurate Kumpiene** <sup>(4)</sup>, **Ingo Müller** <sup>(5)</sup>,  
**Andrew Cundy** <sup>(6)</sup>, **Wolfgang Friesl-Hanl** <sup>(7)</sup>, **Pavel Tlustos** <sup>(8)</sup>, **Giancarlo Renella** <sup>(9)</sup>, **Karine  
Tack** <sup>(1)</sup>, **Sébastien Denys** <sup>(1)</sup>, **Nelly Cochet** <sup>(10)</sup>, **Frédérique Vialletelle** <sup>(11)</sup>,  
**Marie-Claire Magnié** <sup>(11)</sup>, **Jean Marc Brignon** <sup>(1)</sup>, **Pascal Jollivet** <sup>(10)</sup>, **Bernd Marschner** <sup>(12)</sup>,  
**Jean Paul Soularue** <sup>(2)</sup>, **Frédéric Raspail** <sup>(2)</sup>, **Markus Puschenreiter** <sup>(13)</sup>

<sup>(1)</sup> INERIS, Direction des Risques Chroniques, Unité Technologie et Procédés Propres et Durables,  
Parc Technologique Alata, BP2, - F60 Verneuil en Halatte - [valerie.bert@ineris.fr](mailto:valerie.bert@ineris.fr)

<sup>(2)</sup> UMR BIOGECO INRA 1202, Université de Bordeaux 1, Bât B8, avenue des Facultés, F-33405 Talence

<sup>(3)</sup> Hasselt Universiteit, Centre for Environmental Sciences, Environmental Biology, B-3590 Diepenbeek

<sup>(4)</sup> Division of Waste Science & Technology, Luleå University of Technology, 971 87 Luleå, Sweden

<sup>(5)</sup> Saxon State Agency for Environment & Geology, Soil Protection Unit, Zur Wetterwarte 11, D-01109 Dresden, <sup>(6)</sup>  
School of the Environment, University of Brighton, Lewes Road, Brighton BN2 4GJ, United Kingdom

<sup>(7)</sup> Austrian Research Centers GmbH – ARC, Environmental Research, A-2444 Seibersdorf

<sup>(8)</sup> Department of Agrochemistry and Plant Nutrition, Faculty of Agrobiolgy, Food and Natural Resources,  
Kamýcká 957, 165 21 Prague 6 – Suchbát, Czech Republic

<sup>(9)</sup> Department of Soil Science and Plant Nutrition, University of Florence, P.le delle Cascine 28, I-50144, Florence <sup>(10)</sup>  
UMR 6067 Laboratoire Génie des Procédés Industriels, Centre de Recherches, BP 20529, F-60205 Compiègne Cedex

<sup>(11)</sup> INERTEC, 6 rue de Watford, F-92000 Nanterre, France

<sup>(12)</sup> Dept. Soil Science/Soil Ecology, Geographical Institute, Ruhr-University Bochum, Universitätsstr 150, D-44780 Bochum,

<sup>(13)</sup> BOKU - University of Natural Resources & Applied Life Sciences, A-1190 Vienna

### Résumé

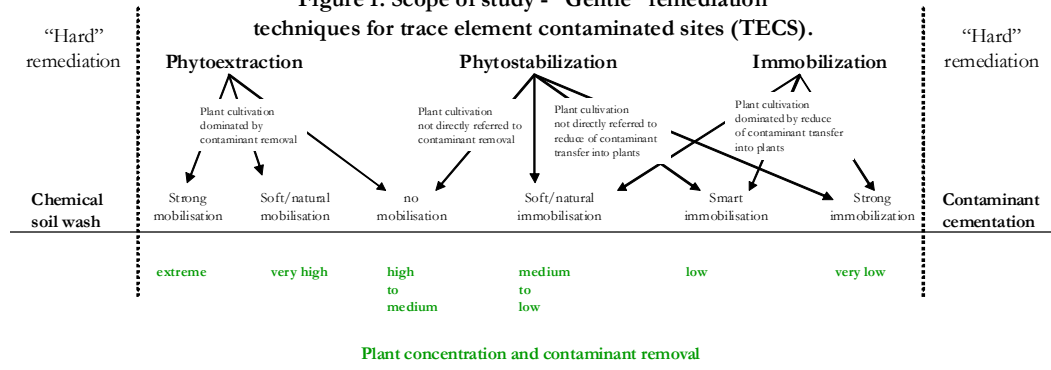
Le développement des technologies de remédiation *in situ* dites “douces” comme la phytoremédiation ou la stabilisation *in situ*, fait l'objet de recherches intenses depuis plusieurs dizaines d'années (Fig 1). D'importants progrès ont été réalisés au niveau expérimental mais l'application de ces technologies en pratique n'en est qu'à ses débuts.

Le projet européen SUMATECS a pour objectif de faire un état de l'art à partir de la littérature et des projets disponibles, y compris les projets nationaux et les procédures locales, pour identifier le statut actuel de la recherche et des applications en Europe. Ce projet a également pour objectif de proposer des scénarios de remédiation incluant les impacts potentiels sur l'environnement local et de définir les futurs besoins de recherche.

Plus particulièrement, le projet s'est attaché à (a) réaliser un état de l'art de la recherche et de la mise en pratique des technologies douces de remédiation, (b) réaliser un état de l'art des aspects environnementaux et socio-économiques associées à ces technologies, (c) de rassembler et d'évaluer les méthodes existantes pour déterminer les fractions d'éléments traces (métaux et non-métaux) pertinentes pour leur écotoxicologie (c'est à dire la fraction biodisponible), et (d) de réaliser un état de l'art des outils d'aide à la décision existants. En plus de l'approche bibliographique, des essais en laboratoire ayant pour objectif la valorisation de la biomasse contaminée ont été conduits.

Une synthèse des résultats obtenus ainsi que les besoins de recherche identifiés seront présentés lors du colloque.

Figure 1: Scope of study - "Gentle" remediation techniques for trace element contaminated sites (TECS).



## **1. OBJECTIFS DU PROJET**

Les technologies “douces” de remédiation *in situ* (c'est-à-dire la phytoremédiation, l'immobilisation *in situ*, etc.) font l'objet d'intenses recherches depuis les années 1990. Des progrès significatifs au niveau expérimental ont été réalisés mais l'application de ces solutions de remédiation *in situ* dans des cas réels, comme Difpolmine à la Combe du Sault, reste encore marginale. Les méthodes de détermination de l'exposition aux éléments traces (métaux et métalloïdes) pertinentes pour l'écotoxicologie (comme la fraction biodisponible) ne prédisent pas suffisamment les risques potentiels. Des solutions douces de remédiation *in situ* existent et devraient être intégrées dans un outil d'aide à la décision. L'application des options douces de remédiation *in situ* devrait avoir des implications environnementales et socio-économiques pour les populations locales. La gestion des sols contaminés par les éléments traces (TECS) entre dans une nouvelle ère où les décisions environnementales doivent être prises dans un contexte de développement durable, être socialement bien acceptées et intégrer la notion de risque. Ainsi la gestion des sols contaminés par les éléments traces doit être économiquement viable, faisable, efficace et pérenne.

Certains aspects étroitement liés à la remédiation n'ont été que peu étudiés lors de précédents projets de recherche. Il s'agit des impacts potentiels sur l'environnement local (ex : fonctionnement du sol, impacts socio-économiques sur la population locale, etc.). Ces aspects sont des points clés pour répondre à la pérennité de la remédiation.

L'objectif de ce projet était de réaliser l'état de l'art en utilisant les données de la littérature (journaux scientifiques, rapports) et celles issues d'un questionnaire envoyé aux experts impliqués dans la remédiation des TECS (scientifiques, décideurs, gestionnaires, industriels, etc.). L'information collectée a été utilisée pour identifier l'état actuel de la recherche, les applications en Europe, proposer un système d'aide à la décision, des solutions et stratégies de remédiation incluant les impacts potentiels sur l'environnement local, et définir les futurs besoins de recherche [1].

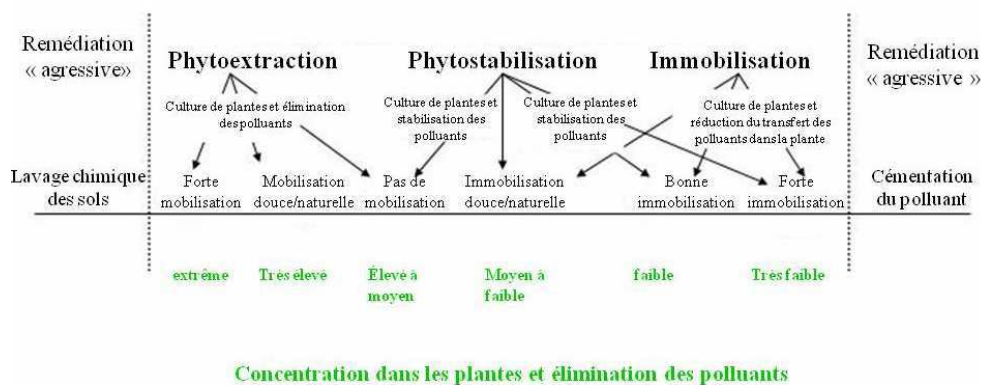
L'étude se focalise sur les TECS, les sites (pollution historique ou récente) et les environnements agricoles ou urbains. Tous les partenaires impliqués dans le projet ont une grande expérience de recherche dans le domaine des techniques douces de remédiation, des stratégies de mise en oeuvre et des aspects associés tels que le fonctionnement des sols, l'impact environnemental, l'utilisation de la biomasse, etc. La plupart des partenaires du projet sont impliqués dans des projets et des réseaux européens, tels que les COST Actions 859 et 837 centrés sur les phytotechnologies.

## **2. LES SOLUTIONS DOUCES DE REMEDIATION**

### **2.1. - État de l'art de la recherche sur les solutions douces de remédiation**

Les techniques douces de remédiation sont des techniques *in situ* qui n'impactent pas les fonctions ou la structure du sol, mais au contraire les préservent ou les améliorent. Ce sont les techniques de phytoremédiation, d'immobilisation *in situ*, etc. (Fig. 1).

Ces techniques utilisent des plantes pour extraire, dégrader ou confiner les contaminants potentiellement toxiques, dangereux dans l'eau et/ou des sols et sédiments. Dans de nombreuses solutions de phytoremédiation, les plantes sont aidées par des microorganismes associés dans la rhizosphère ou symbiotiques. Ces bactéries, actinomycètes et champignons mycorrhiziens ont souvent un rôle important dans le devenir et/ou la dégradation des contaminants.



**Figure 1 - Techniques douces de remédiation pour les sites contaminés par les éléments traces**

## **2.2. – Essais sur site conduits en Europe**

Vingt cinq essais de phytoextraction, cinq essais de phytostabilisation, dix-huit essais de phytostabilisation aidée et trois essais d'immobilisation conduits *in situ* (parcelles de taille diverse) ont été répertoriés en Europe.

## **2.3 - Stabilisation in situ (immobilisation) et phytostabilisation aidée**

Les amendements du sol sont utilisés seuls (stabilisation) ou bien avec des plantes tolérantes aux éléments traces qui les confinent dans les racines et/ou la rhizosphère (phytostabilisation aidée). L'efficacité des amendements du sol sur le pool labile d'éléments traces a été évaluée par des méthodes chimiques (ex : extractions séquentielles ou sélectives, dilution isotopique, isothermes d'adsorption-désorption, diffusion en gel fin, lessivage sur le long terme, simulation d'arrosage) et des méthodes biologiques (ex : croissance des végétaux, rendement en matière sèche, fonctions métaboliques dans les tissus végétaux, micro-noyaux, traits phénotypiques, essais écotoxicologiques sur les invertébrés du sol, les populations bactériennes et microbiennes, réponses bioluminescentes de souches bactériennes). Comparer l'efficacité des amendements d'après la littérature pour sélectionner les meilleurs d'entre eux selon les contaminants et les objectifs de remédiation n'est pas chose aisée. Les laboratoires utilisent des méthodes d'évaluation différentes et l'action d'un amendement est fréquemment dépendante du type de sol, du profil de contamination, de sa localisation et variation spatiale, du contexte écologique, etc. La dépendance au type de sol pour l'immobilisation doit être prise en compte pour développer une option de remédiation sur un site spécifique. Comparer à des modèles ou des expériences en pots, les retours d'expérience les plus robustes concernant l'immobilisation proviennent de parcelles d'expérimentation sur site conduites sur le long terme ou de mésocosmes placés en extérieur.

## **2.4 – Phytoextraction**

Malgré un effort de recherche intensif en phytoextraction sur la dernière décade, peu d'essais sur site ou de réalisations à caractère commercial qui démontrent le succès de la phytoextraction ont été réalisés. Le potentiel de phytoextraction dépend de la biomasse des plantes, du facteur de bioconcentration (BCF), du volume de sol qui doit être dépolluée, du type et de l'intensité de la contamination. Malgré sa faible production de biomasse, au champ, *Thlaspi caerulescens* est une des plantes phytoextractrices les plus efficaces pour le Cd, à l'exception d'essais où le saule donne de meilleurs résultats, suivi par le colza dans les conditions du Nord de l'Europe.

Les retours d'expériences conduites en solution hydroponique indiquent le potentiel génétique des plantes pour l'absorption des éléments traces et leur transfert des racines vers les parties aériennes ; mais ces résultats ne peuvent pas être directement extrapolés pour déduire les

performances phytoextractrices des plantes en champ. Les causes principales sont des différences dans la structure et la localisation des racines, les interactions rhizosphériques, les interactions biotiques avec la flore et la faune, les conditions limitantes pour les nutriments, l'eau, etc. La phytoextraction aidée correspond à la mise en œuvre soit d'agents minéraux (ex : S, sulfate d'ammonium) ou organiques (ex : acides chélatants) ou de microorganismes (bioaugmentation) dans le sol pour augmenter l'exposition des racines des végétaux aux éléments traces et leur accumulation dans les parties aériennes, soit de surfactants pour augmenter la tolérance des végétaux et leur accumulation de contaminants. La phytoextraction aidée avec des agents minéraux ou des chélatants peut entraîner des effets non intentionnels comme la migration en profondeur de métaux ou des impacts sur la flore et faune. La bioaugmentation, avec un accroissement plus raisonnable de l'exposition mais sur un temps plus long correspondant à celui de l'absorption par les racines est une solution plus prometteuse.

Sur site, les fortes concentrations de métaux ou métalloïdes biodisponibles ou la diversité des contaminants du sol peuvent limiter l'utilisation de certains cultivars qui ne sont pas suffisamment tolérants aux métaux/métalloïdes ou aux contaminations multiples. L'utilisation potentielle de plantes tolérantes accumulatrices, notamment de leurs cultivars à forte biomasse, en phytoextraction de sols contaminés ne dépend pas seulement de leur capacité à accumuler certains éléments traces (ex : Cd, Zn, Ni, Se, et As) dans leurs parties aériennes mais aussi, et c'est peut-être le facteur le plus important, de leur capacité à tolérer des concentrations de métaux/métalloïdes dans le sol relativement importantes tout en maintenant une vitesse de croissance rapide et le prélèvement des contaminants.

## **2.5 - Phytoextraction versus stabilisation in situ**

Lorsqu'on tient compte de la masse de métal/métalloïde qui peut être extraite par hectare et par an, et s'il existe une forte contrainte de temps dans le cahier des charges pour une utilisation future, il est évident que la phytoextraction est pour l'instant une solution surtout applicable à des sols modérément pollués et ne constitue pas encore une alternative à part entière aux techniques de remédiation conventionnelle sur des sols plus fortement pollués, sauf si la contrainte de temps est moins prégnante ou bien si le pool labile est faible par rapport au contenu total (objectif(s) de remédiation basé(s) sur les expositions et risques et non sur le contenu total en contaminants). Toutefois, il existe des retours d'expérience positifs notamment avec la phytoextraction du Se et l'utilisation de lignée mutante de tournesol et de tabac pour le Cd, Zn et Pb. Au contraire, la phytostabilisation est moins limitée par le degré de contamination en éléments traces et des pollutions mixtes peuvent être traitées en même temps en utilisant un mélange approprié d'amendements du sol ou bien des microorganismes (phytoextraction couplée à la rhizodégradation des xénobiotiques).

## **3. EVALUATION DES METHODES EXISTANTES POUR DETERMINER LA FRACTION BIODISPONIBLE D'ELEMENTS TRACES DANS LES SOLS**

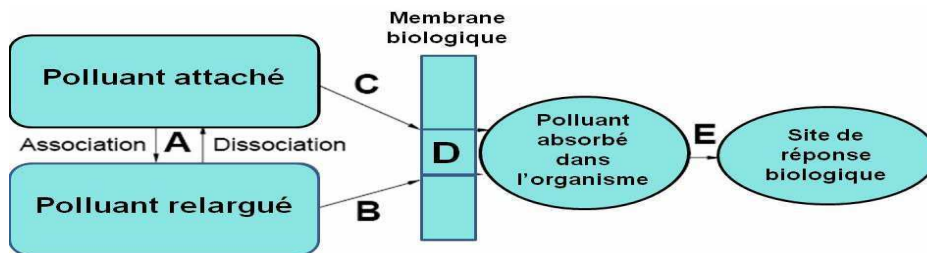
### **3.1. - Utilisation de la biodisponibilité dans la gestion des sols contaminés en éléments traces en Europe**

L'intégration du concept de biodisponibilité dans la gestion des sites contaminés en éléments traces varie dans les différents pays européens. En France et en Italie, la biodisponibilité n'est pas considérée dans les évaluations quantitatives du risque sanitaire contrairement à d'autres pays comme l'Angleterre, les Pays Bas ou la Suisse. En Angleterre, la notion de biodisponibilité n'est cependant pas reconnue par l'Agence de Protection de l'Environnement ; son utilisation est admise dans un contexte local bien que le protocole de mesure de la biodisponibilité varie d'un laboratoire à l'autre. Aux Pays Bas, l'utilisation de la biodisponibilité est recommandée par le RIVM (Institut National des Pays Bas pour la santé Publique et l'Environnement). La biodisponibilité est estimée expérimentalement à partir de la bioaccessibilité (c'est-à-dire la biodisponibilité potentielle pour l'homme et l'animal) déterminée selon la norme DIN 19738. Il n'existe pas de guide pour évaluer les résultats.

### 3.2 - Biodisponibilité/bioaccessibilité

La question principale qui se pose est la suivante : qu'est-ce que la biodisponibilité et comment la mesurer ? Dans la littérature, une vingtaine de définitions sont répertoriées. La biodisponibilité fait l'objet de nombreuses discussions entre professionnels de disciplines variées. La biodisponibilité peut être définie comme un processus : « interactions physiques, chimiques et biologiques qui déterminent l'exposition des plantes et des animaux aux polluants chimiques associés aux sols et aux sédiments » (US NRC, 2002) (Fig. 2).

La figure 2 décrit l'interaction dynamique des éléments traces avec le monde biologique via un certain nombre d'étapes. La biodisponibilité utilisée en évaluation du risque devrait être quantifiable. Deux options sont utilisées aujourd'hui pour déterminer la biodisponibilité des éléments traces : les méthodes chimiques qui quantifient une biodisponibilité potentielle à l'extérieur d'une cellule et les bioessais qui déterminent la biodisponibilité à l'intérieur d'une cellule.



**Figure 2 - Biodisponibilité dans le sol incluant A – libération d'un polluant attaché à un solide et B – transport ; C- transport des polluants attachés à un solide ; D – absorption à travers une membrane physiologique ; E – incorporation dans un organisme vivant. A, B et C peuvent avoir lieu par exemple dans le lumen de l'intestin (US NRC, 2002).**

Les méthodes chimiques font l'hypothèse que la biodisponibilité d'un élément est corrélée à sa solubilité, sa mobilité et sa forme chimique. Parmi ces méthodes, on peut citer : extraction de l'eau poreuse ou solution du sol (mini-tensiomètre de type Rhizon®, DGT), tests de lixiviation à l'eau (EN 12457/1-4), extraction sélective ou séquentielle avec des extractants de force variée (ex : eau, EDTA, acides organiques). La bioaccessibilité pour l'Homme, définie comme la fraction de polluant extraite par les fluides digestifs, est estimée par des tests de simulation de la digestion dans des compartiments tels que la bouche, le petit intestin ou l'estomac.

Les bioessais sont utilisés comme mesure directe de la toxicité du sol. Parmi les bioessais, on peut citer les tests microbiologiques (ex : biosenseurs tels que MicroTox® or BioTox®), les tests sur les plantes et les invertébrés, et les tests *in vivo* sur mammifères.

## 4. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIO-ECONOMIQUES DE LA REMEDIATION ET DES TECHNIQUES ASSOCIEES

### 4.1. - Effets des technologies douces de remédiation sur la biologie du sol et les activités biochimiques

La restauration de la fonctionnalité du sol en site pollué par les éléments traces dépend fortement de l'établissement et du développement d'une communauté active et bien structurée d'organismes du sol. Les données d'études à long terme de déchets de mines végétalisées montrent que l'activité biologique et biochimique est augmentée en présence de plantes (densité et diversité). Parmi les amendements du sol, ceux qui contiennent de la matière organique ou qui alcalinisent le sol contaminé améliorent les paramètres liés aux microbes et à la faune. Seuls quelques amendements, tels que les phosphates sans agent alcalinisant, ont des effets délétères sur les organismes vivants du sol. La biomasse microbienne du sol et l'activité des enzymes phosphatase et arylsulphatase ont été identifiées comme étant des indicateurs sensibles et appropriés pour la qualité biologique du sol.

#### **4. 2. - Aspects socio-économiques des technologies douces de remédiation**

L'objectif principal de toute action de remédiation devrait être de stabiliser le site d'un point de vue écologique, économique et social. La stabilisation économique devrait avoir pour objectif la réutilisation du sol. Dans le cas de sites non urbains, le site pourrait avoir un usage forestier ou agricole et dans le cas de sites urbains, le site pourrait être utilisé pour construire des habitations, un parking, etc. La stabilisation sociale est étroitement connectée à la stabilisation écologique et économique. D'une part, les sites remédiés qui peuvent être économiquement réutilisés fournissent la possibilité aux propriétaires ou exploitants de gagner de l'argent grâce à l'usage qui est fait du site. D'autre part, les utilisateurs de sites publics remédiés tels que les parcs ou jardins d'enfants se sentent rassurés (succès de la remédiation et statut écologique restauré).

Réaliser une évaluation socio-économique des options éco-technologiques telles que les techniques douces de remédiation pose la question de la valeur des biens et des services environnementaux et sociétaux. Les études qui font le lien entre la phytoremédiation et les implications économiques sont peu nombreuses et ne considèrent que la valeur financière comme valeur socio-économique et représentative de la pérennité des projets. Les aspects sociaux et de bien-être (ex : santé humaine, dégâts causés à l'environnement près d'un site pollué) sont importants à quantifier en terme de coûts et de bénéfices mais difficiles à évaluer. La mise en cause de l'efficacité économique de la phytoremédiation par rapport aux techniques classiques de remédiation est souvent liée à la durée nécessaire pour atteindre les objectifs environnementaux. Une analyse coûts-bénéfices réalisée sur une période pertinente peut être considérée comme un outil d'aide à la décision et aider à comparer la phytoremédiation avec des techniques plus traditionnelles.

Le site de La Combe du Sault (Salsigne, Aude) a été pris comme exemple pour souligner les points clefs qui devraient apparaître dans une évaluation socio-économique pour tout projet de phytoremédiation qui se met en place.

#### **4. 3. - Valorisation de la biomasse contaminée**

La phytoextraction, comme la phytostabilisation, pourrait avoir une plus grande faisabilité si la biomasse produite était économiquement valorisée sous forme de bioénergie ou toute autre forme pouvant produire un bénéfice (e.g. huile essentielle, fibre, etc.). A la question « que faire de la biomasse contaminée après récolte ? », un retour d'expérience est disponible concernant le développement commercial de la phytoextraction du nickel avec une plante hyperaccumulatrice (*Alyssum* spp.) incluant la valorisation de la biomasse. Pour les autres éléments traces, en particulier pour le Zn et le Cd, la valorisation de la biomasse est en cours d'étude. Ces travaux de recherche devraient apporter dans un futur proche des réponses technologiques. Ces recherches doivent répondre à la question cruciale de la distribution et des concentrations des éléments traces dans les produits qui seront valorisés commercialement de façon à répondre aux obligations réglementaires. Concernant ce dernier point, le corpus réglementaire encadrant la valorisation de la biomasse nécessite d'être clairement identifié compte tenu des incertitudes existantes. Ce sont des facteurs clefs de la faisabilité et de l'applicabilité d'un procédé.

La biomasse contaminée n'est pas explicitement visée par la réglementation. Il est en particulier difficile de répondre à la question : doit-elle être considérée comme un déchet, voire un déchet dangereux ? Pour valoriser la biomasse contaminée, les industriels devraient discuter en amont avec les législateurs de façon à développer un procédé de valorisation rigoureux techniquement, approprié et acceptable économiquement.

#### **4.4 - Perception des techniques douces de remédiation**

Un questionnaire comportant 20 questions a été envoyé à des acteurs de la gestion des sites et sols pollués (décideurs, collectivités locales, industriels, citoyens, associations, scientifiques, etc.) pour connaître leur niveau de connaissance et leur opinion sur les techniques douces de



remédiation. Le questionnaire a été transmis, après traduction, dans tous les pays partenaires du consortium. Sur les 430 questionnaires envoyés, 130 (dont 15 pour la France) ont été retournés et analysés.

Les principaux résultats sont les suivants :

- les techniques douces de remédiation sont connues de la plupart des personnes interrogées mais rarement appliquées ;
- les décideurs sont plus sceptiques sur ces techniques (efficacité et réduction des risques sur le long terme) que les scientifiques et les consultants ;
- ces techniques présentent des désavantages liés à la durée pour atteindre les objectifs et à la réalisation du suivi et ont une application limitée en terme de pollution et d'usage du sol ;
- ces techniques sont perçues comme peu chères et causant peu d'impact négatif sur l'environnement ;
- le manque de connaissances, de retours d'expérience, de guide de décisions et de projets pilotes convaincants sont considérés comme des obstacles majeurs à l'application des techniques douces de remédiation.

## **5. STRATEGIES DE GESTION PERENNE DES SOLS CONTAMINES PAR LES ELEMENTS TRACES ET ENVIRONNEMENTS ADJACENTS : EVALUATION ET DEVELOPPEMENT**

Selon l'évaluation de danger et de risque, est-ce qu'un site contaminé par les éléments traces peut être géré dans un contexte de développement durable avec les options douces de remédiation qui doivent satisfaire des objectifs techniques et de gestion ? Quelle stratégie est acceptable ? Quand ce n'est pas possible, existe-t-il des alternatives ou des actions pour réduire ou contrôler le risque ?

Pour répondre à ces questions, une revue des stratégies de gestion pour les sites contaminés par les éléments traces et leurs environnements adjacents en Europe et dans le monde a été réalisée. Les principales étapes de ces stratégies sont : établir un modèle conceptuel, évaluer initialement le risque en incluant l'incertitude et la communication, évaluer la faisabilité de l'option de remédiation, évaluer la stratégie de mise en œuvre de la remédiation et la réaliser. Pour évaluer l'option de remédiation, les facteurs spécifiques au site sont pris en compte, comme la nature du schéma conceptuel, la gestion du risque, les polluants et les matériaux qui peuvent être traités, les options de remédiation disponibles, la localisation des contaminants sur le site, les caractéristiques spécifiques des polluants et du site, etc. Les critères de gestion techniques, réglementaires, commerciaux et financiers qui peuvent affecter la prise de décision sont également pris en compte.

Le modèle conceptuel (diagramme ou écrit) représente les caractéristiques du site et montre la relation possible entre les polluants, les voies d'exposition et les récepteurs (environnementaux ou biologiques). La procédure offre un cadre technique pour appliquer la gestion du risque au site pollué. Elle s'accompagne de rapports et de guides techniques et peut comprendre des composantes telles que l'évaluation du risque (établir si des risques inacceptables existent et, s'ils existent, définir quelles actions doivent être entreprises sur le site), l'évaluation des options (évaluer les options de remédiation faisables et déterminer la stratégie de remédiation la plus appropriée pour le site) et la mise en œuvre de l'option (mise en œuvre et démonstration de l'efficacité à court et long terme de l'option choisie). La procédure peut être phasée ou non, extensive ou non, zonée ou non, et mettre en œuvre plusieurs techniques sur des zones identifiées avec des risques différents.

Une technologie appropriée est une technologie qui répond à des critères techniques et environnementaux pour un problème de remédiation donné. Une solution appropriée n'est pas forcément une solution faisable.

La remédiation de sols contaminés en éléments traces devrait avoir pour objectif le développement durable en aidant à la conservation de la ressource tout en évitant la dispersion de la pollution vers l'air, l'eau et le sol.

Après la mise en œuvre d'une ou plusieurs options de remédiation, le site remédié doit être surveillé (vandalisme), éventuellement maintenu selon les techniques mises en œuvre, et suivi sur le long terme (démontrer l'efficacité à court et à long terme de l'option mise en place). Une base de données dédiée aux techniques douces de remédiation, en cours de développement, est accessible à l'adresse <http://w3.pierroton.inra.fr:8000/users/welcome>. Cette base contient des données provenant des partenaires du consortium (avec des retours d'expériences en pot jusqu'aux parcelles en site). Cette base est appelée à s'enrichir de nouvelles données avec l'aide des partenaires du consortium mais aussi via l'aide d'autres partenaires.

## **6 SYSTEMES D'AIDE A LA DECISION POUR LA SELECTION DES TECHNIQUES DOUCES DE REMEDIATION**

Peu de pays ont une méthodologie ou un système bien développé pour prendre des décisions concernant la gestion des sols contaminés. Une amélioration considérable est nécessaire pour que dans les procédures de décision, le concept de développement durable soit pris en compte ; aujourd'hui, la majorité des projets pour la remédiation des sols contaminés favorisent les solutions techniques conventionnelles souvent non durables. Les implications financières de la technique sont très largement mises en avant (marges de profit, argent économisé) au détriment des impacts potentiels environnementaux, des implications socio-économiques et de l'implication des décideurs. Les facteurs clés de la remédiation en Europe sont : la gestion du risque, l'implication et le niveau de connaissance des gestionnaires du projet, la durée, la faisabilité et l'adéquation technique.

De manière générale, des outils d'aide à la décision « génériques » existent ; on peut citer l'analyse de cycle de vie, l'analyse multicritères, l'analyse de l'efficacité économique et l'analyse coût-bénéfice.

Le PhytoDSS est un outil d'aide à la décision développé dans le cadre d'un projet du 6<sup>ème</sup> PCRD (Phytodec). Il est probablement le seul outil disponible centré sur les techniques douces de remédiation. Cet outil se base sur l'approche REC (réduction du Risque, bénéfiques Environnementaux et Coûts). Il a été développé à partir d'un outil national dans le cadre d'un programme précédent sur la bioremédiation (Pays Bas). L'approche REC ne considère pas les facteurs règlementaires, politiques et sociaux qui pourraient impacter le choix de la remédiation.

L'ABC (évaluation, bénéfiques et coûts) est un autre outil d'aide à la décision développé dans le cadre d'un projet européen. Il considère à la fois les techniques de remédiation douces et les techniques agressives. Cet outil ne considère pas les facteurs socio-économiques.

Les décideurs ont été interrogés via un questionnaire envoyé dans les différents pays dont sont issus les membres du consortium. Les réponses ont montré que plus de la moitié des interviewés ayant répondu n'avaient pas connaissance de l'existence d'outil d'aide à la décision utilisable pour sélectionner une remédiation appropriée ou des stratégies de gestion de sol contaminé. Ceux qui connaissent l'existence d'outils d'aide à la décision ont proposé des outils nationaux mais ne savaient pas si ces outils étaient appropriés pour les techniques douces de remédiation. Les décideurs aimeraient utiliser des outils d'aide à la décision via des guides nationaux mais n'ont pas conscience que ces guides sont des systèmes d'aide à la décision.

## **7. RESUME DES PRIORITES DE RECHERCHE**

Les sujets les plus urgents à résoudre sont les suivants : les projets de démonstration à l'échelle de la parcelle et du site sont nécessaires pour toutes les techniques douces de

remédiation (immobilisation, phytostabilisation, phytoextraction – incluant la valorisation de la biomasse). Ces applications pratiques doivent inclure les aspects suivants : évaluation initiale des risques, faisabilité et évaluation des options, remédiation, risque résiduel, maintenance et (bio)surveillance, et usage du site après remédiation. L'évaluation de la pérennité des options douces de remédiation doit aussi faire partie du projet de démonstration.

Ainsi, l'application pratique des techniques douces de remédiation se place dans une approche globale, intégrée sur l'ensemble de la filière, de la caractérisation du site jusqu'au suivi de la pérennité du traitement et la valorisation de la biomasse, avec des volets sur l'acceptabilité, l'incertitude, les coûts-bénéfices marchands ou non, etc..

Des améliorations concernant la quantification des risques sont nécessaires (ex : utilisation des biosenseurs microbiens ou cellulaires). La mise au point d'une boîte à outils (ex: batterie de tests) permettrait le suivi de l'efficacité des techniques de remédiation sur les sites, notamment en terme de risques et pas seulement de dangers.

Une évaluation économique, soit en valeur monétaire soit en valeur intangible, des fonctions du sol doit être mise en œuvre (de nouveaux systèmes devront être développés) de façon à comparer les différentes options de remédiation. Ceci devrait amener à une prise de conscience des fonctions positives et nécessaires du sol pour les organismes vivants.

Il est nécessaire de minimiser les impacts négatifs potentiels des techniques douces de remédiation (par ex : les effets négatifs sur les microbes du sol).

Enfin, la mise au point de listes simples ou de matrices de décision intégrant les techniques douces de remédiation dans des arbres de décision déjà existants devrait être encouragée.

## Références

[1] SUMATECS (Adriaensen K, Bert V, Böhm K, Brignon J-M, Cochet N, Cundy A, Denys S, Friesl-Hanl W, Gombert D, Haag R, Hurst S, Jaunatre R., Jollivet P, Kumpiene J, Magnie M-C, Marschner B, Mench M, Mikhalovsky S, Müller I, Onwubuya K, Puschenreiter M, Raspail F, Renella G, Rouil L, Ruttens A, Schoefs O, Soularue J.P, Stolz R, Tack K, Teasdale P, Tlustoš P, Vangronsveld J, Vialletelle F, Waite S) 2009 Sustainable management of trace element contaminated soils (SUMATECS) – Development of a decision tool system and its evaluation for practical application. Project No. SN-01/20. Final Research Report, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU). 314 p. ([http://www.snowman-era.net/downloads/SUMATECS\\_FINAL\\_REPORT.pdf](http://www.snowman-era.net/downloads/SUMATECS_FINAL_REPORT.pdf))

## Remerciements

SUMATECS est soutenu financièrement par l'ADEME (France), l'OVAM (Belgique, Communauté flamande), le Naturvardsverket (Suède), le UmweltBundesAmt für Mensch und Umwelt (Allemagne), the Environment Agency (Royaume Uni) le Stichting Kennisontwikkeling Kenniseverdracht Bodem (Pays-Bas) et Lebenministerium.at (Autriche).

Ce projet est réalisé grâce au soutien du programme SNOWMAN, qui regroupe des organisations et des administrations nationales. SNOWMAN est un des 70 ERA-Nets (European Research Area – réseaux) financé par le 6<sup>ème</sup> PCRD. D'autres informations sont disponibles aux adresses suivantes : <http://www.snowman-era.net> et <http://www.rhizo.at/Sumatecs>.