



## **Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation**

Février 2006

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'ADIT - Société Nationale d'Intelligence  
Stratégique

Coordination technique : Frédérique CADIÈRE - Département Sites et Sols Pollués - Direction  
Déchets et Sols - ADEME (Angers)

**Remerciements :**

Françoise STRASSER - Société Nationale d'Intelligence Stratégique - 2 rue Brûlée - 67000 Strasbourg.

Nadine DUESO – Département Sites et Sols Pollués – Direction Déchets et Sols – ADEME (Angers).

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

**L'ADEME en bref :**

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie est un établissement public sous la tutelle conjointe des ministères de l'Ecologie et du Développement Durable, de l'Industrie et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

<http://www.ademe.fr>

## Sommaire

<b>Contexte et objectifs de l'étude .....</b>	<b>1</b>
<b>Contexte.....</b>	<b>1</b>
<b>Objectifs de l'étude.....</b>	<b>2</b>
<b>Périmètre de l'étude .....</b>	<b>5</b>
<b>Méthodologie .....</b>	<b>7</b>
<b>Chap. 1 : Les techniques biologiques de dépollution des sols .....</b>	<b>9</b>
<b>1. Les techniques biologiques innovantes .....</b>	<b>9</b>
<b>Tableau : Techniques biologiques retenues par l'ADEME .....</b>	<b>12</b>
<b>Fiches techniques : les techniques biologiques retenues.....</b>	<b>14</b>
Bioremédiation .....	14
Phytoremédiaion .....	15
Bioslurry .....	16
Atténuation naturelle .....	17
<b>2. Les fiches « innovations » .....</b>	<b>18</b>
<b>Fiches « innovation » : les techniques innovantes .....</b>	<b>19</b>
<b>3. D'autres techniques déjà anciennes, évoluent peu .....</b>	<b>23</b>
<b>Chap. 2 : Sélection de 5 pays d'intérêt prioritaire .....</b>	<b>25</b>
<b>1. Les pays pressentis .....</b>	<b>25</b>
<b>2. Interrogation des bases de données d'articles scientifiques .....</b>	<b>28</b>
<b>3. Interrogation des bases de données de brevets .....</b>	<b>31</b>
<b>4. Bilan de la sélection des pays .....</b>	<b>37</b>
<b>Chap. 3 : L'état de la recherche à l'international .....</b>	<b>38</b>
<b>1. Situation de la recherche en Europe .....</b>	<b>38</b>
<b>11. L'Allemagne .....</b>	<b>38</b>
Le soutien du ministère de la recherche (BMBF).....	38
La stratégie du ministère de la recherche .....	39
Les projets locaux et européens .....	41

La société Bioplanta GmbH de phytoremédiation .....	42
<b>12. La Belgique .....</b>	<b>44</b>
Une législation spécifique toute récente .....	44
Le soutien à la recherche en Wallonie .....	45
L'industrie belge de la dépollution .....	47
Législation et sites pollués en Flandre .....	48
<b>13. Le Royaume-Uni .....</b>	<b>51</b>
Le BBRSC : recherche sur les microorganismes et les végétaux .....	52
Le soutien du DTI aux biotechnologies et aux entreprises .....	54
Un marché en pleine expansion .....	55
<b>2. Situation de la recherche en Amérique du Nord .....</b>	<b>59</b>
<b>21. Le Canada : le transfert technologique privilégié.....</b>	<b>59</b>
Les travaux de recherche sur le bioremédiation et l'innovation ...	59
Le transfert technologique et démonstration .....	60
Phytoremédiation : le soutien du ministère de l'environnement...	62
<b>22. Les Etats-Unis : le marché de la dépollution comme moteur...</b>	<b>65</b>
La bioremédiation appliquée aux hydrocarbures .....	65
La bioremédiation appliquée aux métaux .....	65
La phytoremédiation .....	66
<b>Chap. 4 : La recherche française dans le contexte international .....</b>	<b>74</b>
<b>1. La situation en France .....</b>	<b>74</b>
<b>2. Les points à améliorer .....</b>	<b>84</b>
<b>Conclusions et recommandations .....</b>	<b>86</b>

## Résumé

Cette étude vise à dresser un état de la recherche et de l'innovation française dans le domaine des techniques biologiques de traitement des sols pollués.

Comparée à la situation internationale, la recherche française peut être qualifiée en huit constats :

- une recherche de qualité ;
- des techniques combinées pour innover ;
- un réseau d'acteurs informel ;
- le transfert technologique en panne ;
- une politique de recherche encore timide ;
- des financements assez faibles ;
- des sites pilotes peu nombreux ;
- la communication et les sites de démonstration à développer.

Certains aspects de la recherche gagneraient à être améliorés, comme le fonctionnement en réseau des acteurs, les expérimentations de terrain pour valider les résultats de laboratoire, l'accès à des sites pollués pour la recherche, les projets pluridisciplinaires...

L'ADEME a donc élaboré un plan d'action visant quatre actions prioritaires pour soutenir l'optimisation et le développement de techniques de traitement innovantes.

## **Contexte et objectifs de l'étude**

### **Méthodologie**

**Chap. 1 : Les techniques biologiques de dépollution des sols**

**Chap. 2 : Sélection de cinq pays prioritaires**

**Chap. 3 : L'état de la recherche à l'international**

**Chap. 4 : La situation de la France à l'international**

**Conclusions et recommandations**

## **Contexte et objectifs de l'étude**

### ***Contexte***

Les pays industrialisés comptent de grandes surfaces de terrains contaminés et dans l'Union européenne des Quinze, le nombre de sites pollués était estimé à 1 400 000 environ. Cette pollution des sols est généralement le fait de l'activité minière, pétrolière ou d'autres activités industrielles encore, comme la sidérurgie, la cokerie, la chimie ou la fabrication de peinture par exemple. Le recensement des sites et sols pollués et la caractérisation des polluants met en évidence la contamination par les métaux (cuivre, zinc, plomb, cobalt, nickel, arsenic, cadmium), les hydrocarbures légers (fuel, essence, gazole) et lourds (lubrifiants, huiles lourdes, pétrole brut), les solvants halogénés, et d'autres molécules complexes encore (hydrocarbures aromatiques polycycliques, HAP, etc.). Les composés organiques seraient impliqués dans près de 75 % des sites pollués.

La dépollution des sites contaminés est une préoccupation majeure, en raison d'une part, de l'impact de cette pollution sur l'environnement et la santé, liée notamment à la propagation des molécules dangereuses dans le milieu et leur transfert dans les nappes phréatiques et dans la chaîne alimentaire, et d'autre part des coûts exorbitants engendrés par les projets de réhabilitation qui exigent souvent l'excavation des sols et le transport onéreux des terres vers les installations de dépollution.

Par ailleurs, la législation tend à se renforcer, attribuant les responsabilités et obligations pour la prise en charge de la réhabilitation des sites et prévoyant des mesures pour les sites abandonnés. En France, dans la législation actuelle, c'est l'exploitant de l'installation polluante ou le propriétaire du terrain contaminé qui est rendu responsable de la gestion de la pollution.

Les traitements mis en œuvre pour dépolluer les sols sont nombreux et depuis des années déjà, de nouvelles technologies sont en développement. Sur le terrain, les techniques de traitement thermiques et physico-chimiques sont les plus répandues, tandis que les procédés de traitement biologiques sont souvent considérés comme réservés à une catégorie restreinte de composés comme les hydrocarbures pétroliers légers ou adaptés à des conditions particulières.

Les techniques biologiques qui utilisent le pouvoir dépolluant de microorganismes ou de plantes que l'on fait pousser sur le sol contaminé sont connues et utilisées depuis longtemps. Certaines sont mises en œuvre depuis les années 80 et 90 et sont arrivées à maturité, d'autres font l'objet de travaux de recherche et développement, en France et à l'étranger. L'intérêt de ces techniques réside essentiellement dans le fait qu'elles ne nécessitent ni excavation, ni transport, ce qui rend leur mise en œuvre bien moins coûteuse.

### **Objectifs de l'étude**

Le Département sites et sols pollués de l'ADEME intervient dans l'élaboration de la politique nationale de gestion des sites et sols pollués et dans la réalisation des opérations de dépollution. A ce titre, l'ADEME mène une série d'actions qui s'articulent autour de quatre axes :

- L'animation et le soutien financier aux travaux d'études et de recherche qui portent sur les enjeux environnementaux et sanitaires, l'optimisation des techniques de dépollution et le développement de procédés de traitement innovants
- La participation aux échanges nationaux, européens, internationaux destinés à coordonner les programmes de recherche, à diffuser les résultats des politiques de gestion des sols, à promouvoir des connaissances et compétences acquises dans le domaine de la dépollution
- Le conseil et le soutien aux acteurs et responsables de sites pollués, c'est-à-dire les industriels et les collectivités locales
- La mise en sécurité des sites pollués à responsable défaillant à la demande de l'Etat.

Dans le cadre du soutien aux programmes de recherche et développement sur la dépollution des sols, l'ADEME lance chaque année un appel à candidature à l'attention des laboratoires désireux d'obtenir le financement d'un projet ou d'une bourse de thèse. Il s'avère que les candidatures des laboratoires intéressés par l'obtention d'une aide concernent de plus en plus les techniques biologiques.

Afin de sélectionner les techniques biologiques à promouvoir en priorité, l'ADEME souhaite identifier les projets de recherche à la fois les plus innovants, les plus prometteurs et les plus réalistes en terme de transfert technologique et d'application sur le terrain à court et moyen terme.

Pour cela, l'ADEME a confié à l'ADIT la réalisation d'un état des lieux de la recherche et de l'innovation dans le domaine des techniques biologiques de dépollution des sols. Il s'agit d'une part de positionner la recherche française dans le contexte international, et d'autre part de proposer un plan d'actions à mener pour accélérer l'application sur le terrain des techniques biologiques à fort potentiel.

A cet effet, la mission de l'ADIT consiste à réaliser une étude en deux phases :

- l'une est destinée à évaluer la situation de la recherche française par rapport à celle mise en œuvre dans cinq autres pays actifs dans ce domaine, et à identifier les techniques innovantes et prometteuses du point de vue de leur mise en œuvre en situation réelle pour une commercialisation future ;
- l'autre vise à formuler des recommandations afin de promouvoir la recherche française, de favoriser l'innovation et d'accélérer le développement de procédés plus efficaces, plus rapides, mieux adaptés.

Il s'agit notamment d'identifier les techniques biologiques les plus avancées du point de vue des résultats obtenus en conditions réelles et de l'application sur le terrain, de connaître leur niveau de développement actuel et les conditions nécessaires pour passer au stade industriel et à la commercialisation.

Ensuite, la réunion d'un panel d'experts français du domaine (chercheurs, industriels, consultants) doit permettre notamment de mener les actions suivantes :

- affiner le bilan de la recherche française établi en phase 1
- définir des axes de recherche prioritaires pour la France
- identifier les partenariats potentiels, les coopérations synergiques, les collaborations internationales présentant un intérêt pour accélérer le développement des techniques biologiques
- proposer des mesures à prendre pour accélérer la recherche appliquée, le transfert technologique et le passage des études en serre aux essais pilotes, puis à l'échelle d'un site
- réfléchir sur les modalités françaises de mise à disposition de sites pollués pour les travaux des chercheurs

Les résultats présentés dans ce document concernent la phase 1 de l'étude.



## Périmètre de l'étude

Cette étude est consacrée aux techniques biologiques de traitement des sols pollués. La nature de la pollution et la fonction des sites contaminés pris en compte dans ce travail reflètent les grandes préoccupations de la gestion des sols contaminés en France. Ainsi, les informations exploitées dans le cadre de ce travail concerneront les situations suivantes :

- **Les sols : sites d'industrie lourde**

Les sols pollués à prendre en compte dans cette étude sont des lieux où s'est établie une activité industrielle et notamment :

- des activités minières : charbon, fer, potasse, bauxite, minerai, etc.
- des activités pétrolières : sites d'exploitation pétrolière, raffineries, stations-service, déversement accidentel d'hydrocarbures
- l'industrie chimique : sites des centres de production et de stockage (tels les sites de la chimie bâloise, à la frontière suisse)
- des friches industrielles : sites d'anciennes usines comme par exemple :
  - Metaleurop (Nord-Pas-de-Calais) : divers métaux lourds (zinc, plomb, arsenic, métaux spéciaux)
  - Renault à Boulogne Billancourt (Hauts-de-Seine) : hydrocarbures lourds (huile d'usinage, gazole), chrome VI <sup>1</sup>
- d'autres activités industrielles : cokerie, sidérurgie, fabrication de peinture, traitement de surface, automobile, etc.
- d'anciens sites de décharges (déchets industriels dangereux)

Il peut s'agir de sites actifs ou de sites au repos qui ont accueilli une activité industrielle génératrice de pollution pour les sols.

- **Les polluants : organiques et minéraux**

Les polluants concernés par cette étude sont les substances organiques, les éléments minéraux, ou leur mélange :

- **les composés organiques :**
  - - les produits pétroliers : hydrocarbures aliphatiques légers et lourds
    - linéaires (hexane, octane, etc.)
    - cycliques (BTEX : benzène, toluène, xylène, ...)
    - polycycliques : HAP<sup>2</sup>, PCB<sup>3</sup>, pyrène, etc.
  - - les solvants et solvants halogénés
    - phénolés (toluène)
    - chlorés (TCE<sup>4</sup>, PCE<sup>5</sup>, etc.)
- **les métaux :** cuivre, zinc, plomb, cobalt, nickel, mercure, cadmium, etc.
- **les pollutions mixtes :** composés organiques et métaux

Sont exclus du champ de l'étude les pollutions issues de l'utilisation de produits de l'agrochimie et de l'agriculture (engrais, pesticides, herbicides, fongicides), de matières explosives (TNT<sup>6</sup>, nitroglycérine, etc.), d'éléments radioactifs.

---

<sup>1</sup> traitement des pare-chocs

<sup>2</sup> Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, HAP, PAH

<sup>3</sup> Biphenyl Polychlorés, BPC, PCB

<sup>4</sup> trichloréthylène, TCE

<sup>5</sup> perchloréthylène, PCE

<sup>6</sup> trinitrotoluène, TNT

- **Les techniques biologiques**

Les techniques de traitement à identifier et à caractériser dans le cadre de cette étude sont les techniques biologiques, c'est-à-dire les techniques qui exploitent les propriétés d'un organisme vivant pour réaliser l'opération de dépollution. Ce sont des techniques de décontamination (extraction ou dégradation du contaminant) ou d'assainissement (réduction des risques, c'est-à-dire des impacts sur les récepteurs *via* un abattement des sources d'exposition, des doses reçues par les récepteurs ou des organismes présents).

L'organisme vivant utilisé peut être un microorganisme (bactérie, champignon), un végétal (algue, plante, arbuste, arbre), un végétal complexe formé de l'association symbiotique d'un champignon et d'une algue, voire un animal (lombric, vers de terre). Cet organisme vivant agit sur le composé polluant par absorption, accumulation, digestion, transformation, dégradation, évapotranspiration, etc., pour le rendre moins toxique, l'extraire, l'immobiliser ou le diluer considérablement.

On considèrera aussi bien les techniques utilisées individuellement, que celles combinées à un autre procédé qu'il soit physico-chimique, thermique ou biologique. Ainsi, on s'intéressera aux techniques mise en oeuvre de la manière suivante :

- *in situ* : traitement du sol sur le site même, sans excavation
  - ex : phytoremédiation
- *sur site* : traitement du sol excavé sur le site même, avant d'être remis en place
  - ex : bioréacteur
- *hors site* : traitement du sol qui a été excavé et transporté vers un centre de dépollution
  - ex : biocentre

Dans le cadre de cette étude, l'intérêt a été porté sur les techniques biologiques innovantes et dont le stade de développement se rapproche de l'application sur le terrain et de la commercialisation. Les techniques déjà anciennes et dont la mise en oeuvre évolue peu n'ont pas été prises en compte.

## Contexte et objectifs de l'étude

### Méthodologie

Chap. 1 : Les techniques biologiques de dépollution des sols

Chap. 2 : Sélection de cinq pays prioritaires

Chap. 3 : L'état de la recherche à l'international

Chap. 4 : La situation de la France à l'international

Conclusions et recommandations

## Méthodologie : Recherche et traitement de l'information

### *Recherche, analyse et synthèse de l'information*

Pour réaliser cette étude, l'ADIT a mis en œuvre ses outils et savoir-faire pour l'identification et l'analyse de l'information internationale concernant l'état d'avancement de la recherche dédiée aux techniques biologiques de dépollution des sols et des projets d'application sur le terrain. Un dispositif performant d'accès à l'information qui s'appuie sur les moyens suivants :

- conduite d'entretiens directs et par téléphone auprès des experts identifiés dans les pays concernés
- sollicitation du réseau propre de relais CAST (Conseillers et Attachés Scientifiques) au sein des Ambassades de France permettant un accès direct et une approche opérationnelle des sources d'information
- animation du réseau de correspondants dans les zones d'intérêt prioritaires (Europe, Etats-Unis, Canada, Japon ...) chargés de collecter localement les informations sur des thèmes spécifiques dans des centres identifiés au préalable (ministères de l'Environnement, Agences pour l'Environnement, centres de recherche, fédérations professionnelles ...)
- interrogation de bases de données internationales spécialisées (brevets, publications scientifiques, études de marchés, appels d'offres, etc.)
- validation des résultats par des experts des pays étudiés
- identification et exploitation de sources nationales d'informations spécialisées (magazine, bulletins de veille, sites Internet, forums ...)
- veille permanente sur les déchets et les sols, réalisée en interne
- exploitation intensive du réseau Internet et utilisation d'outils performants (veille automatisée, alerte, recherches avancées, cartographies sémantiques, etc.)
- accès à des sources de littérature grise (relevés de décisions, documents préparatoires, etc.)

Les résultats obtenus après recherche, analyse et synthèse de l'information sont soumis aux experts des pays concernés pour commentaires et validation des documents préparés.

### **Atelier de travail et consultation d'experts**

D'autre part, un atelier de travail d'une journée réunissant une vingtaine d'experts de la recherche, de l'industrie et des services a été organisé à l'ADEME, à Paris, afin de recueillir leur avis.

Cet atelier était destiné à identifier les besoins actuels de la recherche française avec la contribution des chercheurs, des utilisateurs de techniques de dépollution et les détenteurs de sols à traiter. Il a permis d'échanger sur les mesures à prendre et les actions à mener afin de promouvoir l'utilisation des techniques biologiques pour le traitement des sols pollués en France.

En un premier temps, la présentation des principaux résultats de l'étude a été suivie d'une discussion qui a permis de confirmer les points à améliorer.

Ensuite, les aspects suivants ont été abordés :

1. Les techniques biologiques à privilégier et les étapes de R&D à soutenir en priorité
2. Les collaborations et partenariats à développer, en France, en Europe, à l'international
3. Les moyens à mettre en œuvre :
  - mise à disposition de sites pollués pour les essais en conditions réelles
  - modes de financement envisageables

Les diverses propositions formulées ont été évaluées en terme de faisabilité, de délais et de coûts. Elles ont servi à élaborer avec l'ADEME une série de recommandations à suivre à court et moyen termes pour dynamiser les travaux de recherche et accélérer l'application des techniques biologiques sur le terrain. Ces recommandations sont détaillées dans un plan d'actions.

## Contexte et objectifs de l'étude

### Méthodologie

#### Chap. 1 : Les techniques biologiques de dépollution des sols

#### Chap. 2 : Sélection de cinq pays prioritaires

#### Chap. 3 : L'état de la recherche à l'international

#### Chap. 4 : La situation de la France à l'international

#### Conclusions et recommandations

## Chap. 1 : Les techniques biologiques de dépollution des sols

Les techniques biologiques de dépollution des sols sont nombreuses. Selon la nature de la pollution à traiter, elles sont mises en œuvre seules ou combinées à d'autres procédés, physiques, chimiques, thermiques ou biologiques.

Bien que l'avantage principal des techniques biologiques réside dans leur mise en œuvre sur le site même (*in situ*), certaines nécessitent l'excavation des terres et sont réalisés *sur site* (excavation des terres qui sont traitées sur le site même) ou *hors site* (excavation et transport des terres vers un centre de dépollution).

L'identification des techniques biologiques existantes ou émergentes et l'analyse des procédés impliqués met en évidence l'existence de deux catégories principales : les techniques de **bioremédiation** qui utilisent essentiellement des bactéries et les techniques de **phytoREMÉDIATION** qui exploitent les propriétés des végétaux (plantes, arbustes, arbres). Elles peuvent être classées en fonction de leur degré d'innovation :

- les techniques innovantes qui font l'objet de travaux de recherche et développement poussés et d'essais pilotes sur site
- les techniques plus anciennes, qui n'évoluent plus vraiment, à l'exception d'ajustements mineurs pour optimiser leur rendement et gagner en efficacité.

### 1. Les techniques biologiques innovantes

Parmi les techniques biologiques innovantes, certaines sont commercialisées tout en faisant l'objet de travaux de recherche et développement en vue d'améliorer les conditions d'utilisation et d'optimiser les performances, d'autres n'ont pas dépassé le stade expérimental et sont étudiées soit en laboratoire, soit dans des serres, ou font l'objet d'essais sur le terrain (chantiers expérimentaux, sites pilotes). Figurent parmi ces technologies innovantes à la fois des techniques de bioremédiation et de phytoREMÉDIATION.

**Les techniques de bioremédiation** utilisent les propriétés dépolluantes de microorganismes (des bactéries essentiellement, mais également des champignons) endogènes ou exogènes au terrain contaminé et peuvent être subdivisées en huit catégories selon le principe biologique ou mode de dépollution mis en œuvre. Ces catégories répertoriées ci-après sont présentées plus en détail dans le **tableau A** :

- biodégradation
- bioimmobilisation
- biolixiviation
- bioslurry (traitement en bioréacteur)
- biorestauration
- bioaugmentation
- biostimulation

**Les techniques de phytoremédiation** exploitent les propriétés de certaines espèces végétales (strates herbacées, plantes, arbustes, arbres, algues) à interagir avec des composés chimiques organiques ou minéraux pour dépolluer un terrain contaminé *in situ*. Le plus souvent, ce sont les microorganismes de la rhizosphère<sup>7</sup> qui dégradent les composés organiques. Il arrive que les produits issus de la dégradation, qui peuvent ou non être accumulés par le végétal, soient plus dangereux que le polluant d'origine. La biomasse produite peut contenir le polluant (tiges, feuilles) et doit être traitée d'une façon adéquate, qui revient souvent à récolter les végétaux pour les incinérer. La phytoremédiation peut utiliser cinq catégories de procédés pour dépolluer un sol contaminé, listées ci-après et détaillées dans le **tableau A** :

- phytoextraction
- phytostabilisation
- phytodégradation / phytotransformation
- phytovolatilisation / phytostimulation
- rhizodégradation

La phytoextraction des métaux est le procédé le plus connu.

**Les diverses techniques de bioremédiation et de phytoremédiation**, les principes qu'elles mettent en œuvre, les pollutions auxquelles elles s'appliquent, ainsi que quelques exemples concrets **sont présentés dans les tableaux A**, ci-après.

De plus, les principales techniques biologiques développées actuellement, c'est-à-dire la **bioremédiation** et ses deux formes les plus extrêmes, l'**atténuation naturelle** (ou bioremédiation naturelle) et le **bioslurry** (effectué en bioréacteur et nécessitant un équipement particulier) ainsi que la **phytoremédiation** sont exposées en détail dans quatre **Fiches Techniques** correspondantes, présentées ci-après.

Les techniques qui supposent d'injecter des microorganismes dans les sols, *in situ*, nécessitent de contrôler de nombreux paramètres et de prendre d'importantes précautions pour éviter la diffusion des microbes dans l'environnement proche. Ces techniques sont généralement moins bien acceptées du fait des risques de transfert des bactéries et des pollutions dans les sols environnants et les nappes phréatiques.

En ce qui concerne la phytoremédiation, l'éventualité que les polluants soient libérés par la plante par évapotranspiration, ou que des organismes OGM soient utilisés pour optimiser les propriétés dépolluantes du végétal sont autant d'obstacles à l'acceptation de cette technique par le public.

Du point de vue scientifique, les limites de la phytoremédiation varient selon les techniques mises en œuvre ; on citera toutefois les plus courantes :

- fuite de gènes, possibilité d'invasion,
- consommation faune sauvage/habitat faune sauvage
- remobilisation
- présence temporaire ou persistante de produits dérivés
- limite de la zone prospectée par les racines
- temps long et aléas climatiques, etc.

En revanche, les avantages de la phytoremédiation sont multiples : utilisation de procédés biologiques et d'organismes végétaux, coûts de mise en œuvre considérablement réduits par

---

<sup>7</sup> Sol entourant les racines des plantes et qui en est directement influencé.

rapport aux techniques classiques, procédés agréables du point de vue visuel ou sonore, et donc d'autant mieux acceptés que leur mise en oeuvre est longue et peut durer quelques années.

**Tableau A : Techniques biologiques de dépollution des sols retenues par l'ADEME dans le cadre de cette étude (1/2)**

		Technique	Principe	Polluant	Niveau de développement	Exemple
<i>in situ</i>	Bioremediation (microorganisme)	<b>Biodégradation</b>	<b>Utilisation de la capacité de certains microorganismes à transformer le polluant</b> en substrat (source de carbone, d'énergie)	Hydrocarbures pétroliers, (HAP, BTEX, solvants industriels (TCE, PCE, PCB, métaux lourds		Procédé INIPOL par TOTAL : accélérateur de biodégradation des hydrocarbures. Site expérimental en Russie
		<b>Bio-immobilisation</b>	<b>Utilisation de la capacité de certains microorganismes à immobiliser</b> un ou plusieurs composants présents à l'état soluble (bactéries)	Métaux et produits pétroliers	BRGM : R&D et essai pilote sur site	Tests sur le site d'Hispano-Suiza (Cr))
		<b>Biolixiviation</b>	<b>Solubilisation et entraînement dans la phase aqueuse</b> par les microorganismes de <b>polluants</b> fixés ou piégés dans le sol	Minerais, métaux lourds (Cu, Cr, Fe, Pb, Zn, Co), phosphore	BRGM et INSA Lyon : R&D dans le cadre de la traitabilité des sols pollués	
<i>hors site</i>	Bioremediation	<b>Traitement en bioréacteur (bioslurry)</b>	<b>Création d'une boue épaisse</b> en mettant la partie fine du sol dans l'eau et ajout de nutriments pour stimuler la croissance de la population microbienne. Un système d'aération est employé pour les procédés aérobies. En fin de traitement, les phases solides et liquides sont séparées et le sol est remis en place.	Hydrocarbures, phénols, HAP, pétrole, PCB, pentachlorophénol, composés organiques halogénés volatils ou semi volatils	Commercialisé	HP Biotechnologie a dépollué un site allemand avec le réacteur horizontal du procédé HBBM (hydrocarbures, phénols, HAP).



**Tableau A : Techniques biologiques de dépollution des sols retenues par l'ADEME dans le cadre de cette étude (2/2)**

		Technique	Principe	Polluant	Niveau de développement	Exemple
in situ et hors site	Bioremédiation	Biorestauration	<b>Ajout de nutriments</b> (azote/phosphore) pour stimuler la croissance des microorganismes indigènes et favoriser la dégradation des polluants	pollution organique (hydrocarbures pétroliers, HAP), métaux lourds	Commercialisé en <i>ex-situ</i> pour les traitements en biotertre et bioslurry	
		Bioaugmentation	<b>Introduction dans le sol de microorganismes exogènes adaptés aux polluants à traiter</b>	hydrocarbures lourds, HAP, PCB		
		Biostimulation	<b>Réensemencement de populations prélevées sur le site</b> , dont la croissance a été stimulée en laboratoire ou en bioréacteurs installés sur site	hydrocarbures pétroliers, HAP		
	Phytoremédiation	Phytoextraction	<b>Utilisation de plantes capables d'extraire, de transporter et de concentrer les polluants</b> du sol dans les parties récoltables (feuilles, tiges, racines).	métaux (Pb, Cd, Zn, Cu), nitrate	Stade expérimental avancé (sites pilotes, serres, etc.), commercialisation possible, SITA Remediation	Plantes hyper-accumulatrices : <i>Thalaspia</i> , <i>Alyssum</i> , <i>Brassica</i> ( <i>moutarde</i> )
		Phytostabilisation	<b>Séquestration des métaux par des plantes</b> pour limiter le risque de lessivage des polluants et de contamination des nappes phréatiques	métaux (Pb, Cd, Zn, Cu, As, Cr, Se),	Stade expérimental avancé (sites pilotes, serres, etc.),	Plantes à racines fibreuses et profondes
		Phytodégradation / Phytotransformation	<b>Transformation par la plante</b> de molécules organiques complexes en composés plus simples, qui seront intégrés dans les tissus de la plante.	composés organiques, nitrate, phosphate	Stade expérimental avancé (sites pilotes, serres, etc.),	Arbres (famille du saule, peuplier), herbes, légumes
		Phytovolatilisation / Phytostimulation	<b>Stimulation de la volatilisation du polluant</b> absorbé par la plante et éliminé par évapo-transpiration.	métaux (As, Hg, Se), composés organiques volatils (COV)	Stade expérimental avancé (sites pilotes, serres, etc.),	<i>Brassica Juncea</i> (moutarde), plantes marécageuses
		Rhizodégradation	<b>Dégradation des polluants par les racines</b> (processus interne) et l'activité microbienne associée (externe). Traitement plus profond, complémentaire aux traitements biologiques (phytostimulation)	composés organiques (HAP, PCB, PCP, BTEX), solvants, produits phytosanitaires	Stade expérimental avancé (sites pilotes, serres, etc.),	Herbes à racines fibreuses : Bermuda, blé, seigle, fétuque

<b>BIOREMEDIATION</b>		
<b>Principe</b>	utilisation de microorganismes, généralement des bactéries, pour réduire la pollution d'un site : identification et caractérisation biochimique des microorganismes susceptibles de réaliser la transformation des polluants présents sur le site	
<b>Application</b>	traitement <i>in situ</i> ou <i>hors site</i> des sols, boues, sédiments, effluents liquides	
<b>Polluant</b>	métaux, solvants, hydrocarbures (HAP), explosifs, produits phytosanitaires, etc.	
<b>Techniques</b>	<b>bio-dégradation</b>	utilisation de la capacité de certains microorganismes à transformer le polluant en substrat (source de carbone, d'énergie) ; la biodégradation totale d'un composé organique s'appelle la minéralisation
	<b>bio-immobilisation</b>	utilisation de la capacité de certains microorganismes (essentiellement des bactéries) à immobiliser un / plusieurs composants présents à l'état soluble
	<b>bio-lixiviation</b>	solubilisation par les microorganismes et entraînement dans la phase aqueuse de polluants fixés ou piégés dans le sol
	<b>injection d'eau oxygénée</b>	injection d'eau oxygénée (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) et éventuellement de nutriments dans la zone insaturée via des galeries construites, puis récupération de l'eau dans des puits de pompage
	<b>bio-restauration</b>	ajout de nutriments (azote/phosphore) pour stimuler la croissance des microorganismes indigènes et favoriser la dégradation des polluants
	<b>bio-augmentation</b>	introduction dans le sol contaminé de microorganismes allochtones <sup>8</sup> capables de traiter les polluants présents
	<b>bio-stimulation</b>	ré-ensemencement de populations prélevées sur le site, dont la croissance a été stimulée en laboratoire ou dans des bioréacteurs installés sur site
<b>Points forts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- intérêt économique : coûts de traitement réduits</li> <li>- intérêts techniques :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ traitement d'une gamme diversifiée de polluants (organiques, minéraux)</li> <li>▪ possibilité de préparer des microorganismes spécialisés</li> <li>▪ capacité des microorganismes à vivre dans des conditions extrêmes (pH, oxygénation, concentrations élevées de polluant, etc.)</li> <li>▪ nombreux microorganismes identifiés et caractérisés</li> </ul> </li> <li>- tests en laboratoire concluants</li> </ul>	
<b>Points faibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- application sur le terrain plus complexe :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ concentrations élevées de polluant peuvent ralentir le processus</li> <li>▪ aléas du terrain : composition et propriétés du terrain</li> <li>▪ conditions climatiques (les fluctuations saisonnières affectent le métabolisme des microorganismes)</li> <li>▪ difficulté à trouver des sites pilotes pour valider les travaux de laboratoire</li> </ul> </li> </ul>	
<b>Niveau de développement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- stade expérimental avancé (sites pilotes, serres, etc.)</li> <li>- caractérisation des bactéries existantes (propriétés, conditions optimales, etc.)</li> <li>- identification de nouvelles souches bactériennes</li> <li>- peu d'applications à grande échelle</li> </ul>	
<b>Contacts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dominique Darmendrail, BRGM, Orléans, <a href="mailto:d.darmendrail@brgm.fr">d.darmendrail@brgm.fr</a></li> <li>- Corinne Leyval, LIMOS, Nancy, <a href="mailto:corinnr.leyval@limos.uhp-nancy.fr">corinnr.leyval@limos.uhp-nancy.fr</a></li> <li>- Roger Durand, ULCO, Calais, <a href="mailto:r.durand@univ-littoral.fr">r.durand@univ-littoral.fr</a></li> <li>- Alain Schouff, ARTEB, Lyon, <a href="http://www.arteb.com">www.arteb.com</a></li> </ul>	

Fiche technique

<sup>8</sup> provenant d'un endroit différent (contr. autochtone, indigène)

<b>PHYTOREMEDIATION</b>		
<b>Principe</b>	utilisation de la capacité de certains végétaux à se développer en milieu contaminé (herbacées, plantes, arbustes, arbres) : ils peuvent bloquer, extraire, accumuler, transformer ou détruire un polluant	
<b>Application</b>	traitement des sols, boues, sédiments, effluents liquides voire gazeux	
<b>Pollution</b>	métaux, solvants, hydrocarbures (HAP), explosifs, produits phytosanitaires, etc.	
<b>Techniques</b>	<b>phyto-extraction</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- extraction par la plante (rhizosphère) des polluants du sol</li> <li>- translocation dans la plante (racines, tiges, feuilles, fruits)</li> <li>- récolte des plantes et incinération / co-incinération</li> <li>- récupération partielle de métaux lourds (traitement mâchefers/REFIDIS<sup>9</sup>)</li> </ul>
	<b>phyto-stabilisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- stabilisation par réduction de la mobilité et biodisponibilité des polluants</li> <li>- limitation du transfert vers d'autres compartiments (nappe, atmosphère)</li> <li>- réduction du potentiel de dispersion des polluants</li> <li>- aide à la restauration d'une couverture végétale</li> </ul>
	<b>phyto-dégradation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dégradation de polluants par voie métabolique en molécules moins toxiques</li> <li>- intégration dans les tissus de la plante</li> <li>- réduction ou élimination de résidus toxiques</li> </ul>
	<b>phyto-volatilisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- extraction du polluant du sol par le végétal</li> <li>- relargage atmosphérique par évapotranspiration du polluant initial ou transformé</li> <li>- meilleurs résultats avec des espèces à forte évapotranspiration</li> </ul>
	<b>rhizo-dégradation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dégradation du polluant par les racines (processus interne) et l'activité microbienne associée (processus externe), <i>i.e.</i> par la rhizosphère<sup>10</sup></li> <li>- possibilité de traitements plus profonds</li> <li>- complémentaire aux traitements biologiques (phytostimulation)</li> </ul>
<b>Points forts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- intérêt économique : 10 à 100 fois moins coûteux que les techniques classiques</li> <li>- intérêt technique : - extraction d'une gamme variée de polluants                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- plus de 800 espèces végétales concernées</li> </ul> </li> <li>- intérêt environnemental : technique « passive », le soleil est le seul apport énergétique</li> <li>- intérêt paysager : réduction de la pollution visuelle</li> </ul>	
<b>Points faibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- durée du traitement : plusieurs années</li> <li>- faible profondeur d'intervention (enracinement des végétaux) : 0,5 à 1 m pour les herbacées, 2 à 4 m pour les arbres et arbustes</li> <li>- tributaire des conditions climatiques qui affectent la vie de la plante</li> <li>- technologie encore jeune aux applications industrielles peu nombreuses</li> </ul>	
<b>Niveau de développement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- stade expérimental avancé (sites pilotes, serres, etc.)</li> <li>- travaux de recherche sur les capacités des végétaux à éliminer/neutraliser des composés divers et sur les moyens de rendre le polluant plus disponible à la plante (biodisponibilité)</li> <li>- peu d'applications à grande échelle, sur le long terme</li> <li>- absence de filière globale (incluant le traitement des plantes jusqu'au déchet ultime)</li> <li>- forte implication en région Nord-Pas-de-Calais</li> <li>- amorce d'application en Rhône-Alpes (phase de recherche)</li> <li>- nombreux sites contaminés sans objectifs de décontamination en Rhône-Alpes :</li> <li>- des brevets déposés par les sociétés nord-américaines</li> <li>- intérêt économique naissant</li> </ul>	
<b>Contacts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Olivier Faure, Université de S<sup>t</sup>-Étienne, Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale LEV<sup>11</sup> <a href="mailto:faure@univ-st-etienne.fr">faure@univ-st-etienne.fr</a></li> <li>- Franck Pressiat, Compagnie Nationale du Rhône, CNR Projets, Cellule hydrobiologie et génie écologique <a href="mailto:f.pressiat@cnr.tm.fr">f.pressiat@cnr.tm.fr</a> <a href="mailto:pressiat@cnr.tm.fr">pressiat@cnr.tm.fr</a></li> <li>- Thierry Jacquet, Société Phytorestore, <a href="http://www.phytorestore.com/">http://www.phytorestore.com/</a></li> </ul>	

Fiche technique

<b>BIOSLURRY</b>	
<b>Principe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- création d'une boue épaisse en mettant la partie fine du sol en suspension dans l'eau (concentration de solide entre 10 et 50 % en poids) ; l'eau utilisée étant de l'eau de rivière ou de l'eau souterraine, contaminée ou non.</li> <li>- ajout de nutriments pour stimuler la croissance de la population microbienne.</li> <li>- système d'aération employé pour les procédés aérobies.</li> </ul>
<b>Application</b>	traitement <i>ex situ</i> des sols, boues
<b>Polluant</b>	carburants et huiles, pentachlorophénol, PCB, HAP, composés organiques halogénés volatils ou semi volatils, etc. métaux lourds, chlorures (pré-traitement nécessaire car ces polluants peuvent inhiber le métabolisme bactérien)
<b>Techniques</b>	<b>Para-mètres à définir</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- caractéristiques physiques du mélange liquide/solide, régies par la distribution des composés organiques dans le mélange, la viscosité et la tension superficielle des contaminants</li> <li>- énergie nécessaire à apporter au système pour homogénéiser la suspension</li> <li>- temps de séjour des solides et liquides pour obtenir le résultat souhaité</li> <li>- apport minéral (N, P,...), température et quantité d'oxygène pour parvenir à la biodégradation maximale</li> <li>- caractéristiques des émissions gazeuses (CO<sub>2</sub> et produits volatils)</li> </ul>
	<b>micro-organismes utilisés</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- microorganismes indigènes</li> <li>- microorganismes naturels pré-adaptés</li> <li>- mélanges de souches</li> </ul>
	<b>facteurs d'efficacité</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- résultat étroitement lié à l'accessibilité du polluant et à sa sensibilité à la dégradation biologique (transfert des composés organiques de la phase solide vers la phase aqueuse)</li> <li>- taux de dégradation variable selon le type de sol et la nature du polluant : exemple : dans un sol constitué de 5 % de gravier, 40 % de sable et 55 % de limon et d'argile, l'élimination d'hydrocarbures lourds peut atteindre 95 %, si le traitement en bioslurry est précédé d'un pré-lavage des sols</li> </ul>
<b>Points forts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- structure du sol peu altérée par le traitement, réutilisable pour la reconstitution paysagère</li> <li>- dégradation de concentrations élevées de polluants solubles (jusqu'à 250 g / kg d'hydrocarbure dans le sol)</li> <li>- possibilité d'apporter des souches spécialisées</li> <li>- réduction des problèmes associés à l'hétérogénéité du sol</li> <li>- facilité du contrôle et du maintien de conditions favorables aux organismes épurateurs</li> <li>- durée de mise en œuvre plus courte que d'autres traitements</li> </ul>
<b>Points faibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- coût élevé par rapport à d'autres techniques (excavation des terres)</li> <li>- degré de solubilisation du composé organique comme facteur limitant</li> <li>- difficulté de maintenance de l'activité de population microbienne durant le traitement</li> <li>- teneur résiduelle plus ou moins élevée en polluant</li> </ul>
<b>Niveau de développement</b>	Technique commercialisée : <ul style="list-style-type: none"> <li>- la société HP Biotechnologie a dépollué un site en Allemagne</li> <li>- la société OHM utilise des bactéries adaptées aux PCB et aux hydrocarbures pétroliers</li> <li>- la société ECOVA inocule les espèces <i>Alcaligènes</i> et <i>Pseudomonas</i> pour traiter des HAP</li> </ul>
<b>Contacts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Xavier Marly, ENSG, Vandoeuvre-les-Nancy, <a href="mailto:xavier.marly@ensg.inpl-nancy.fr">xavier.marly@ensg.inpl-nancy.fr</a></li> <li>- O. Lorain, POLYMEM, Toulouse, <a href="mailto:o.lorain@polymem.fr">o.lorain@polymem.fr</a></li> </ul>

Fiche technique

<b>ATTENUATION NATURELLE</b>		
<b>Principe</b>	<p><b>Processus se produisant naturellement dans les sols</b> et les eaux souterraines, sans intervention humaine, visant à réduire la masse, la toxicité, la mobilité, le volume ou la concentration de polluants dans ces milieux.</p> <p>Les processus impliqués sont la <b>dispersion</b>, la <b>dilution</b>, la <b>volatilisation</b>, l'<b>adsorption</b>, les mécanismes de <b>stabilisation</b> ou de <b>destruction des polluants</b> (dégradation biotique<sup>12</sup> par des bactéries autochtones ou abiotique<sup>13</sup>), qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques<sup>14</sup></p>	
<b>Application</b>	traitement <i>in situ</i> des sols et des eaux	
<b>Polluant</b>	hydrocarbures aliphatiques, aromatiques, HAP, phénols, solvants chlorés, PCB, amines métaux, métalloïdes, chlorures, nitrates, cyanures	
<b>Techniques</b>	<b>Utilisation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>atténuation naturelle (AN)</b> : ensemble des processus naturels</li> <li>- <b>atténuation naturelle contrôlée (ANC)</b> : processus naturel utilisé comme technique de dépollution et pour laquelle les conditions sont contrôlées et l'évolution du processus naturel dans le temps et l'espace est suivie de près</li> <li>- <b>atténuation naturelle dynamisée (AND)</b> : stimulation de la biodégradation du polluant par l'approvisionnement du sol en nutriments ou en bactéries (peut utiliser les biotechnologies (PCR) pour quantifier le patrimoine génétique des populations microbiologiques du sol pollué)</li> </ul>
	<b>Protocole</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>France</b> : le « Biorestauration protocol », procédure de traitement microbiologique <i>in situ</i> élaborée<sup>15</sup> en 2002 (solvants chlorés, HAP, métaux, métalloïdes)</li> <li>- <b>Grande Bretagne</b> : un guide sur l'évaluation et la surveillance de l'atténuation naturelle de contaminants dans les eaux souterraines publié en juin 2000 par l'<i>English and Welsh Environment Agency</i> (une distinction importante entre les termes « atténuation naturelle » et « atténuation naturelle contrôlée »).</li> <li>- <b>Etats-Unis</b> : de nombreux guides d'évaluation du potentiel d'atténuation naturelle (émanant d'organismes fédéraux, nationaux, entreprises privées, associations professionnelles) ; seuls ceux réalisés par l'EPA (1999, 1998, 1997) sont officiellement reconnus</li> </ul>
<b>Points forts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- économique : bien moins coûteux que des traitements actifs</li> <li>- technique : évite l'excavation et le transport des terres</li> <li>- sanitaire : limite le contact des opérateurs avec les polluants</li> <li>- environnemental : ne génère aucun déchet</li> </ul>	
<b>Points faibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- peu efficace pour des concentrations élevées de polluant</li> <li>- exige une surveillance à long terme (mesures, contrôles)</li> <li>- activité microbienne susceptible d'être inhibée par des composés toxiques</li> <li>- migration de polluants possible en cas de processus très lent</li> </ul>	
<b>Niveau de développement</b>	<p>Selon une étude de 2003<sup>16</sup> du BRGM, l'atténuation naturelle n'est pas encore considérée comme une technique de dépollution à part entière en France.</p> <p>Aux Etats-Unis, c'est un outil de gestion et de dépollution des sites pollués</p>	
<b>Contacts</b>	<p>APESA, Association Pour l'Environnement et la Sécurité en Aquitaine, France</p> <p>HPC Envirotec, France</p> <p>Planreal, Suisse</p> <p>ICI Paints (Imperial Chemical Industries, Kings College Université de Londres , Royaume-Uni</p> <p>RMIT-University (Australie)</p>	

Fiche technique

## 2. Les fiches « innovation »

Les techniques biologiques les plus innovantes, développées en laboratoire et prometteuses du point de vue de leur application sur le terrain ont été identifiées. Elles concernent principalement la combinaison de procédés existants et bien connus. Elles sont au nombre de quatre et sont présentées sous la forme de **Fiches Innovation** :

- couplage bioaugmentation / phytoremédiation
- couplage bioremédiation (champignon) / phytoremédiation
- couplage phytoextraction / valorisation énergétique de la biomasse
- système de phytoremédiation multiprocess

<b>Fiche innovation</b>	
<b>COUPLAGE BIOAUGMENTATION / PHYTOREMEDIATION</b>	
<b>Principe</b>	<p>Inoculation de microorganismes spécifiques (bio-augmentation) dans des matrices poreuses (sols, sédiments), capables :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- de dégrader des molécules organiques (des pesticides notamment) ou</li> <li>- d'augmenter le stock de métaux disponibles pour les plantes utilisées pour la phyto-extraction (avec des microorganismes producteurs de sidérophores<sup>17</sup> par exemple)</li> </ul> <p>En conséquence, la croissance des microorganismes inoculés est améliorée par l'approvisionnement de nutriments exsudés par les racines des plantes utilisées pour la phyto-extraction.</p>
<b>Application</b>	<p>Expérimenté pour le traitement de sédiments viticoles contaminés par des pesticides organiques et minéraux, accumulés dans des bassins d'orage (projet de la Plate-forme technologique « Agrosystèmes »)</p> <p>Transposable à d'autres catégories de sols et à d'autres types de pollution</p>
<b>Pollution</b>	Pesticides organiques et métaux (cuivre)
<b>Techniques</b>	<p><b>travaux en laboratoire</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sélection de couples microorganisme / végétal pour optimiser à la fois la dégradation de polluants organiques et l'extraction de métaux</li> <li>- travaux sur la survie microbienne des microorganismes inoculés (bio-augmentation) par la technique d'immobilisation</li> </ul>
	<p><b>Réalisations sur site pilote</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 9 casiers de 13 m<sup>2</sup> avec maîtrise des flux hydrauliques (verticaux/horizontaux) et récupération individuelle des percolats</li> <li>- analyse physico-chimique et écotoxicologique des sédiments et percolats au cours du procédé de dépollution</li> <li>- modélisation du procédé de dépollution biologique</li> </ul>
	<p><b>évolution du projet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- évaluation du procédé de traitement : possibilité de réemploi des sédiments traités, fiabilité du traitement, coût du traitement par comparaison à d'autres</li> <li>-évaluation de la pertinence des méthodes mises en œuvre : tests écotoxicologiques innovants, analyse de biodiversité, tests de détection des gènes impliqués dans la dégradation de polluants (enzymes)</li> <li>- possibilité de transposition des résultats à d'autres matrices</li> <li>- possibilité de transfert de technologie à l'entreprise partenaire</li> </ul>
<b>Points forts</b>	caractère innovant du procédé : couplage bioremédiation / phytoremédiation essai pilote reproduisant le fonctionnement d'un bassin d'orage viticole
<b>Points faibles</b>	En cours d'identification
<b>Niveau de développement</b>	<p>Projet sur 3 ans, démarré en janvier 2006 pour s'achever en décembre 2008 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- janvier 2006 - décembre 2007 : travaux en laboratoire</li> <li>- janvier 2007 - décembre 2008 : essais dans les cases lysimétriques</li> </ul>
<b>Contacts</b>	<p>Thierry Lebeau, Professeur à l'Université de Haute-Alsace, Responsable du projet et animateur de la Plate-forme Technologique « Agrosystèmes » (tél : 03.89.20.31.35, <a href="mailto:thierry.lebeau@uha.fr">thierry.lebeau@uha.fr</a>)</p>

<b>Fiche innovation</b>	
<b>COUPLAGE PHYTOEXTRACTION / PRODUCTION DE BIOMASSE</b>	
<p>En 2003, le ministère fédéral de la Recherche (BMBF) a lancé un programme visant à mettre en place un réseau interdisciplinaire sur la thématique "Energies renouvelables à partir de biomasse issue de la phyto-extraction des sols contaminés". Ce programme est piloté par l'Institut CUTEC (Clausthaler Umwelttechnik-Institut, Allemagne), pour une durée de deux ans.</p> <p>Dans le cadre de ce programme, neuf projets ont été menés qui visent à réaliser les objectifs suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ la mise en place d'un réseau d'experts permettant de faire l'état des lieux de la science et de la technique dans le domaine de l'utilisation de biomasse provenant de sols décontaminés par phytoextraction</li> <li>▪ l'évaluation des possibilités et des limites de ce procédé</li> <li>▪ la conception de projets prioritaires</li> </ul> <p>Actuellement, ce réseau se compose de 35 experts issus de divers secteurs scientifiques et industriels. Tous travaillent sur des thématiques telles que :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ la récupération des métaux lourds dans les plantes</li> <li>▪ les différentes techniques disponibles actuellement</li> <li>▪ les meilleures méthodes pour l'utilisation énergétique des plantes (Ex : la combustion)</li> <li>▪ les limites des procédés actuels et les nouvelles solutions envisageables</li> </ul>	
<b>Principe</b>	Les membres du réseau testent différentes plantes
<b>Application</b>	sols
<b>Pollution</b>	Hydrocarbures
<b>Techniques</b>	
<b>Points forts</b>	Technique à double objectif : dépollution des sols et production d'énergie à partir de la biomasse Concept innovant Interdisciplinarité : agriculture, génétique, botanique, sciences du sol, ingénierie Traitement de tous les aspects : techniques, sociaux, écologiques, économiques
<b>Points faibles</b>	
<b>Degré de développement</b>	Le projet démarré en octobre 2003 devait s'achever fin 2005 Il doit fixer les objectifs prioritaires pour un mise en œuvre efficace de cette technique combinée Budget : 200 000 €
<b>Contacts</b>	- Dr. - Ing Britta Kragert, CUTEC Institut (Clausthaler Umwelttechnik-Institut, Allemagne) tél : 00 49 53 23 93 32 08, e-mail : <a href="mailto:britta.kragert@cutec.de">britta.kragert@cutec.de</a> - Dipl. - Ing Daniela Perbandt, Responsable de projet, CUTEC Institut tél : 00 49 53 23 93 32 70, e-mail : <a href="mailto:daniela.perbandt@cutec.de">daniela.perbandt@cutec.de</a>



<b>Fiche innovation</b>							
<b>COUPLAGE BIOREMEDIATION (champignon) / PHYTOREMEDIATION</b>							
<b>Principe</b>	utilisation des champignons endomycorhiziens à arbuscules (EA) pour renforcer les plantes et accroître leur capacité à diminuer les stocks de HAP dans les sols projet de recherche fondamentale du Laboratoire Mycologie, Phytopathologie, Environnement, Université du Littoral et Côte d'Opale, ULCO, Nord-Pas-de-Calais						
<b>Application</b>	Sols						
<b>Pollution</b>	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)						
<b>Techniques</b>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%; vertical-align: top;"><b>Travaux de laboratoire</b></td> <td>                     Etude et caractérisation du potentiel des plantes mycorhizées à dégrader les polluants de façon plus rapide et plus efficace                      - Evaluation de l'impact de différentes concentrations de HAP sur la colonisation racinaire par les champignons EA                      - Etude de leur rôle dans la survie et la croissance des racines se développant dans les milieux contaminés par des HAP                      - Examen de l'effet des mycorhizes sur le devenir des HAP présents dans le milieu en déterminant la part des mécanismes de dégradation et de bioaccumulation                      - Suivi d'activités enzymatiques impliquées dans la dégradation des HAP, sur racines mycorhizées ou non, en présence et en absence de polluants                 </td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;"><b>Réalisation sur site pilote</b></td> <td>Aucune : le laboratoire ne dispose pas de site pilote</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;"><b>Evaluation du projet</b></td> <td></td> </tr> </table>	<b>Travaux de laboratoire</b>	Etude et caractérisation du potentiel des plantes mycorhizées à dégrader les polluants de façon plus rapide et plus efficace - Evaluation de l'impact de différentes concentrations de HAP sur la colonisation racinaire par les champignons EA - Etude de leur rôle dans la survie et la croissance des racines se développant dans les milieux contaminés par des HAP - Examen de l'effet des mycorhizes sur le devenir des HAP présents dans le milieu en déterminant la part des mécanismes de dégradation et de bioaccumulation - Suivi d'activités enzymatiques impliquées dans la dégradation des HAP, sur racines mycorhizées ou non, en présence et en absence de polluants	<b>Réalisation sur site pilote</b>	Aucune : le laboratoire ne dispose pas de site pilote	<b>Evaluation du projet</b>	
<b>Travaux de laboratoire</b>	Etude et caractérisation du potentiel des plantes mycorhizées à dégrader les polluants de façon plus rapide et plus efficace - Evaluation de l'impact de différentes concentrations de HAP sur la colonisation racinaire par les champignons EA - Etude de leur rôle dans la survie et la croissance des racines se développant dans les milieux contaminés par des HAP - Examen de l'effet des mycorhizes sur le devenir des HAP présents dans le milieu en déterminant la part des mécanismes de dégradation et de bioaccumulation - Suivi d'activités enzymatiques impliquées dans la dégradation des HAP, sur racines mycorhizées ou non, en présence et en absence de polluants						
<b>Réalisation sur site pilote</b>	Aucune : le laboratoire ne dispose pas de site pilote						
<b>Evaluation du projet</b>							
<b>Points forts</b>							
<b>Points faibles</b>							
<b>Degré de développement</b>	Recherche fondamentale Le passage à un système appliqué est envisagé						
<b>Contacts</b>	- Anne Grandmougin-Ferjani, Université du Littoral et Côte d'Opale (ULCO), Nord-Pas de Calais ( <a href="mailto:grand@univ-littoral.fr">grand@univ-littoral.fr</a> ; 03 21 34 81 95) - Pirouz Shirali, ULCO, Nord-Pas de Calais ( <a href="mailto:Pirouz.Shirali@univ-littoral.fr">Pirouz.Shirali@univ-littoral.fr</a> ; 03 28 23 76 10)						

<b>Fiche innovation</b>	
<b>SYSTEME DE PHYTOREMEDIATION MULTI PROCESS (MPPS)</b>	
<b>Principe</b>	<p>Combinaison de diverses techniques de bioremédiation autour d'un système de phytoremédiation pour décontaminer les sols pollués par des hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) persistants. Les techniques impliquées dans le système sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ le landfarming (aération)</li> <li>▪ la bioremédiation (bactéries)</li> <li>▪ la phytoremédiation (accroissement de la taille de la plante par les bactéries de la rhizosphère (PGPR<sup>18</sup>) et accroissement de la tolérance de la plante aux</li> </ul>
<b>Application</b>	Traitement des sols contaminés
<b>Pollution</b>	Hydrocarbures pétroliers totaux persistants (HPT)
<b>Techniques</b>	<p><b>Réalisation en laboratoire</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sélection d'espèces végétales capables de proliférer en présence de concentrations élevées de polluants</li> <li>- Sélection de souches de PGPR permettant d'accroître la tolérance de la plante et d'accélérer la croissance de la plante sur un sol fortement contaminé</li> </ul>
	<p><b>Réalisation sur site pilote</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- fractionnement du sol contaminé par des HPT persistants en 12 parcelles (délimitées selon le degré de contamination du sol, soit 3 degrés)</li> <li>- application de la technique du MPPS à 3 parcelles</li> <li>- application de la technique du landfarming à 3 parcelles</li> <li>- application de la technique de phytoremédiation à 3 parcelles</li> </ul>
	<p><b>Evolution et résultats</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Après une période de 4 mois, le taux moyen de dégradation des HPT persistants avec le MPPS était 2 fois celui du landfarming seul, 50% supérieur à celui de la bioremédiation seule et 45% supérieur à celui de la phytoremédiation seule ; quel que soit le degré de persistance du polluant</li> <li>- Après une seconde période de 4 mois, la technique du MPPS a dégradé à 90% les HPT persistants contenus dans toutes les parcelles, tandis que sur la même période, la phytoremédiation seule a dégradé 50 % des HPT persistants seulement</li> </ul>
<b>Points forts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- caractère innovant du procédé qui combine plusieurs techniques biologiques</li> <li>- technique plus efficace et plus rapide qu'une technique appliquée individuellement</li> <li>- l'utilisation de plusieurs techniques biologiques permet de traiter différents aspects du polluant</li> </ul>
<b>Points faibles</b>	
<b>Degré de développement</b>	Application sur le site de Sarnia (Ontario, Canada)
<b>Contacts</b>	<p>Pr. Bruce Greenberg, Département de biologie, Université de Waterloo, Ontario, Canada            tél : 00 1 (519) 888 4567 ext. 3209, e-mail : <a href="mailto:greenber@sciborg.uwaterloo.ca">greenber@sciborg.uwaterloo.ca</a>            Dr. Xiao-Dong Huang PhD, Département de biologie, Université de Waterloo, Ontario, Canada            tél : 00 1 (519) 888 4567 ext. 5085, e-mail : <a href="mailto:xdhuang@sciborg.uwaterloo.ca">xdhuang@sciborg.uwaterloo.ca</a></p>

### 3. D'autres techniques, déjà anciennes, évoluent peu

Les techniques biologiques de dépollution des sols commercialisées par les entreprises sont déjà anciennes et ne font plus l'objet de travaux majeurs de recherche et développement. Il s'agit de techniques de bioremédiation qui consistent soit à stimuler la population bactérienne endogène, soit à opérer dans un espace contrôlé. Elles emploient les six procédés suivants :

- bioventing (ventilation, injection d'air et de nutriments dans le sol)
- biosparging (lavage)
- combinaison bioventing / biosparging (ventilation / lavage)
- pump and treat (traitement du sol associé au traitement de la nappe)
- biotertre (biopile : excavation des terres avant ajout de microorganismes adaptés au polluant, correspondant à de la bioaugmentation)
- compostage

Ces techniques biologiques sont désormais classiques et ne sont donc pas retenues dans le cadre de cette étude. Les principes mis en œuvre, les polluants concernés, les entreprises qui les commercialisent et quelques exemples des opérations de dépollution réalisées sont exposés dans le **tableau B** ci-après.

Par ailleurs, la phytostabilisation aidée, qui combine l'inactivation *in situ* et l'implantation de plantes tolérantes, a été appliquée avec succès dans divers pays (notamment en Europe, aux Etats-Unis, au Canada, en Chine).

**Tableau B : Techniques biologiques de dépollution des sols non retenues par l'ADEME dans le cadre de cette étude**

	Technique	Principe	Polluant	Exemple	
<i>in situ</i>	<b>Bioremediation (microorganismes)</b>	<b>Bioventing</b> (ventilation, tirage d'air)	<b>Injection d'O<sub>2</sub></b> dans la zone non saturée pour stimuler la microflore et la biodégradation des polluants	Hydrocarbures totaux (essence, gazole), BTEX, polluants biodégradables	Biogenie : unité de fabrication de peinture par bioventing sur 1000 m <sup>2</sup> à 3,5 m de profondeur, (hydrocarbures, BTEX, solvants chlorés, phénolés)
		<b>Biosparging</b> (lavage)	<b>Injection d'air, d'O<sub>2</sub> ou de nutriments</b> (N, P, K) dans la zone saturée <sup>19</sup> <b>pour entretenir l'activité des micro-organismes indigènes</b>	Hydrocarbures semi-volatils et volatils, HAP, BTEX, phénols	
		Combinaison <b>bioventing / biosparging</b>	<b>Injection d'air dans la zone saturée</b> (sparging) <b>pour vaporiser les polluants</b> (dissous ou adsorbés dans la frange capillaire <sup>20</sup> et l'aquifère <sup>21</sup> ) et les transporter dans la zone insaturée <sup>22</sup> où ils sont biodégradables	Hydrocarbures peu volatiles	
		<b>Pump and Treat</b> (traitement du sol associé au traitement de la nappe)	<b>L'eau polluée de la nappe est pompée</b> , traitée en surface, aérée, additivée d'eau oxygénée, de nutriments ou microorganismes, <b>puis réinjectée</b> dans le sol	Hydrocarbures totaux (essence, fuel), BTEX	OHM Remediation Services a dépollué un site (OH) en 2 ans. (essence et fuel sur sols sablonneux, argileux, limoneux)
<i>hors site</i>	<b>Bioremediation</b>	<b>Biopile</b> (Biotertre)	<b>Regroupement des sols excavés en tas de terres</b> qui sont traités sur site ou hors site par diverses voies : compostage, biocentre, landfarming (technique agricole)	Polluants organiques (hydrocarbures, HAP, PCP, phénols), métaux lourds	- Renault Boulogne Billancourt : biocentre (50 000 tonnes, t) et biotertre (10 000 t) sur site - Procédé ROTAMIX (Canada)
		<b>Compostage</b>	<b>Procédé d'aération</b> stimulant la flore aérobie, optimisé par l'apport d'agents structurants (copeaux de bois, paille, fumier) et de populations fongiques dégradant les xénobiotiques. Peut faire partie du biotertre	Polluants organiques (HAP, BTEX, phénols)	

## Contexte et objectifs de l'étude

### Méthodologie

Chap. 1 : Les techniques biologiques de dépollution des sols

**Chap. 2 : Sélection de cinq pays prioritaires**

Chap. 3 : L'état de la recherche à l'international

Chap. 4 : La situation de la France à l'international

Conclusions et recommandations

## Chap. 2: Sélection de cinq pays prioritaires

Les pays étrangers pressentis pour l'analyse comparative sont ceux qui ont développé un secteur industriel fort, particulièrement axé sur les exploitations minières et pétrolières et les activités traditionnelles de l'industrie lourde. De plus, ils doivent être actifs dans les domaines de la protection de l'environnement, disposer de laboratoires de recherche environnementale performants et mener des travaux scientifiques de bon niveau.

La sélection des pays a tenu compte d'une part des caractéristiques de l'activité industrielle passée et présente et d'autre part de l'importance et la qualité des activités de la recherche scientifique dans le domaine des techniques environnementales.

### 1. Les pays pressentis en Europe et dans le monde

- **En Europe**

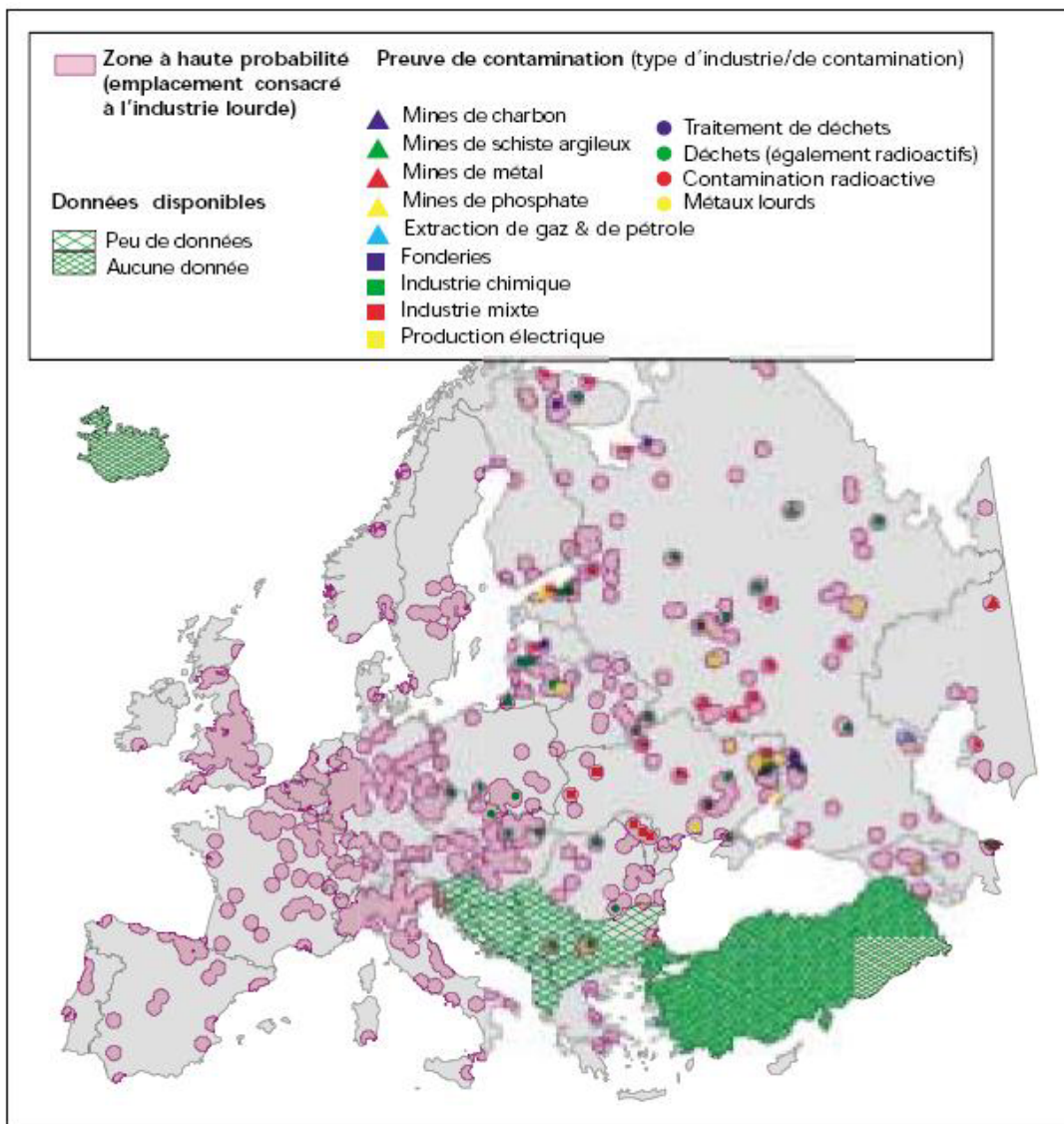
En Europe, une étude de l'Agence européenne de l'environnement (AEE, Danemark, UNEP) intitulée « *Dégradation du sol et développement durable en Europe : ayons les pieds sur terre - Un défi pour le XXI<sup>e</sup> siècle* »<sup>23</sup> analyse les principales causes de la contamination dans plusieurs pays européens.

Cette étude suggère que les zones d'implantation de l'industrie lourde qui présentent ou sont susceptibles de présenter des problèmes de contamination des sols sont concentrées dans le Nord-Est de la France, en **Belgique, aux Pays-Bas, en Allemagne**, ainsi qu'au **Royaume Uni** ; le Nord de **l'Italie** est concerné également. A l'Est, des zones sensibles sont identifiées en particulier en **Autriche**, en **Hongrie**, en **Slovaquie**, dans le Sud de la **Pologne**, en **République Tchèque** (cf. cartographie ci-après).

Toutefois, certains pays présentent un intérêt particulier pour la réalisation de l'analyse comparative dans le cadre de cette étude :

- Les voisins du Nord de la France, la **Belgique** et **l'Allemagne** se distinguent par une problématique des sols comparable à celle que connaît cette région de l'hexagone. En Allemagne, les bassins charbonniers et de l'acier de la Ruhr sont en reconversion. La Belgique a fermé ses mines de charbon en deux étapes, les mines wallonnes dans les années 60, puis les 5 derniers charbonnages du Limbourg en 1986.
- Les **Pays-Bas** ont conquis des terres sur la mer et sont très sensibles aux questions environnementales ; la protection de l'environnement, des sols et de l'eau constituent des préoccupations majeures et les travaux de recherche sont à la pointe.
- Le **Royaume-Uni** a développé d'intenses activités pétrolières et minières (charbon, potasse, étain, plomb) qui le placent au 10<sup>e</sup> rang pour la production de charbon et de pétrole en 2002. Il est directement concerné par la directive européenne sur les déchets miniers de 2004. La réhabilitation des sols y est une question d'actualité.

### Zones probables de problèmes de contamination localisée en Europe



Source : EAA

Outre les activités dans les secteurs de l'énergie et de l'industrie lourde des pays européens, des informations relatives aux travaux de recherche et aux mesures gouvernementales sont à considérer, et notamment :

- En **Allemagne**, la recherche dans le domaine de l'environnement en général est très active et structurée en réseau ; de plus le ministère de la Recherche a lancé récemment un important programme de recherche sur les méthodes de mesures de la pollution des sols.
- En **Belgique**, de nouvelles dispositions ont été proposées par le ministère de l'Environnement pour la prise en charge des pollutions orphelines.
- Le **Royaume-Uni** est reconnu pour la qualité de ses travaux de recherche et le nombre élevé de ses publications scientifiques, notamment dans les sciences de la vie. Le soutien financier à la recherche et notamment à la recherche appliquée est de taille.

Ainsi, en Europe, l'Allemagne, la Belgique, les Pays-Bas et le Royaume-Uni apparaissent comme des pays à privilégier *a priori* pour l'analyse comparée.

- **Outre-Atlantique**

Hors d'Europe, certains pays tels les **Etats-Unis** et le **Canada** s'imposent naturellement :

- d'une part en raison du dynamisme de leurs industries pétrolières et minières lié à l'abondance des matières premières du sous-sol,
- d'autre part du fait de la qualité de leurs travaux scientifiques et du niveau élevé des fonds alloués à la recherche d'une façon générale.

La présence d'organismes gouvernementaux puissants dédiés à la protection de l'environnement en général et des sols en particulier, comme l'USEPA (Environment Protection Agency) et Environnement Canada laisse présager d'une politique de dépollution des sols active.

Aux Etats-Unis, l'EPA a lancé dès 1980 un important programme de recensement des sites pollués par des déchets industriels dangereux (Superfund) en vue de leur réhabilitation. Au Québec, la nouvelle loi sur les terrains contaminés (Loi 72, 2003) stimule les mesures de protection et de traitement des sites pollués au Québec et dans les autres provinces du Canada<sup>24</sup>.

**Ces pays industrialisés préalablement retenus (*Belgique, Allemagne, Pays-Bas, Royaume-Uni, Canada, Etats-Unis*) ont été ensuite positionnés par rapport à leurs activités de recherche dans le domaine des techniques biologiques de dépollution des sols. L'interrogation de bases d'articles scientifiques et de bases de brevets doit identifier les pays « meneurs »<sup>25</sup>.**

## 2. Interrogation des bases de données d'articles scientifiques

La quantité de publications scientifiques dans des journaux reconnus à l'international (géologie, technologies environnementales, biotechnologies, ingénierie, etc.) et le nombre de brevets déposés sont des indicateurs fiables de l'avancée des travaux scientifiques et du dynamisme de la recherche dans une discipline donnée. D'une façon générale la publication de travaux scientifiques est plutôt le fait des laboratoires de recherche publique ; les entreprises publient peu par souci de garder confidentielles les thématiques de recherche qu'ils explorent et de se protéger de leurs concurrents.

Afin d'identifier les pays dans lesquels la production scientifique relative aux techniques biologiques de dépollution des sols est la plus prolifique, nous avons interrogé des bases de données scientifiques référençant la littérature scientifique et assurant une couverture mondiale.

Le moteur de recherche *Scirus* interroge les bases de données des journaux scientifiques et techniques nationaux et internationaux, comme par exemple :

- Science direct, la base de données de littérature scientifique au format électronique la plus importante au monde ; elle référence des millions d'articles scientifiques, techniques et du domaine biomédical en texte intégral qui sont publiés par plus de 1 800 journaux spécialisés.
- Scitation, le service de l'Institut Américain de Physique (AIP) qui référence les articles des éditions en sciences et technologies, de nombreuses éditions en ingénierie et sciences physiques, les actes des conférences, etc.
- Les publications de la NASA (National Aeronautics & Space Administration)
- Les publications en langue anglaise de l'Académie des Sciences de Russie
- Les sites officiels des gouvernements, agences gouvernementales, universités et académies et organisations diverses publiques ou privées (Instituts de recherche, centres de transfert technologique, etc.)
- La base américaine de brevets USPTO (United States Patent and Trademark Office)
- PubMed et BioMed Central qui couvrent tous les champs de la médecine et de la recherche médicale au niveau mondial
- et d'autres encore.



- **Requête à l'échelle mondiale**

- Le moteur de recherche *scirus* a été paramétré de façon à retenir les articles publiés entre janvier 2000 et janvier 2005.
- L'équation de recherche a été construite de la façon suivante :

[ ***contaminated soils*** AND ***bioremediation*** ANDNOT ***explosives*** ]

Le terme « *explosives* » s'est avéré discriminant et son exclusion a permis d'écartier un grand nombre d'articles consacrés aux techniques biologiques de dépollution des sols publiés par des laboratoires des Etats-Unis. La dépollution des sols contaminés au TNT fait l'objet d'un important volume de travaux.

► Résultats : **453 articles publiés** entre janvier 2000 et janvier 2005

- **Requête par pays : conditions identiques (équation et période)**

La requête a porté sur vingt pays industrialisés.

Certains ont été retenus selon divers critères détaillés dans le paragraphe précédent (Allemagne, Belgique, Royaume-Uni, Canada, Etats-Unis).

D'autres sont des pays à forte activité minière ou pétrolière actuelle ou ancienne (pays d'Europe de l'Est, pays d'Amérique du Sud) ou étant apparus dans les travaux de collaboration avec des laboratoires français (Italie, Espagne, Autriche, Suède, Inde)

► Résultats : Nombre de publications par pays (*cf. histogramme*)

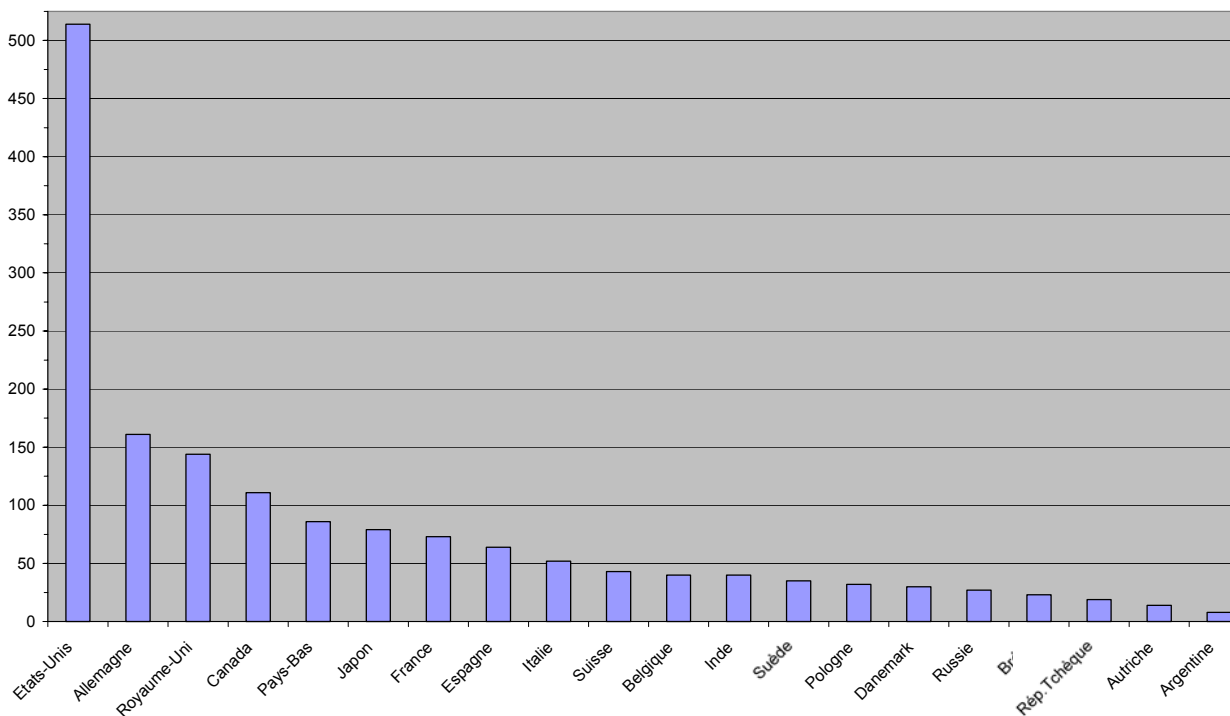
Les **Etats-Unis** arrivent largement en tête et apparaissent dans 514 articles publiés. Ce chiffre est supérieur au nombre total de publications étant donné que plusieurs laboratoires peuvent être à l'origine d'un même article (co-auteurs).

Les **Etats-Unis** sont suivis dans l'ordre de l'**Allemagne** (161 articles), du **Royaume-Uni** (144 articles), du **Canada** (111 articles). Ces quatre pays figurent parmi les pays retenus *a priori*.

La France arrive au 7<sup>e</sup> rang (73 articles) précédée des Pays-Bas (86) et du Japon (79). Dans les travaux publiés par ces deux pays, la pollution des sols et des eaux sont étroitement liées. Une analyse approfondie des articles a montré que la recherche aux Pays-Bas est plus spécifique aux techniques de dépollution des eaux.

Les pays suivants et ayant publié au moins 40 articles sont l'Espagne et l'Italie, la Suisse, la Belgique et l'Inde. La Belgique est le pays dans lequel la problématique des sols pollués et de leur assainissement est la plus proche de celle de la France, avec une tradition d'industrie lourde (métallurgie, sidérurgie) et d'exploitation minière (charbonnages), ainsi que des activités importantes dans les secteurs de l'automobile, de la chimie (raffinerie, pétrochimie, pharmacie), etc.

**Techniques biologiques de traitement des sols pollués :  
nombre de publications par pays**  
janv. 2000 à janv. 2005



De plus, dans un article de Dr. J.P. Schwitzguébel<sup>26</sup>, publié en 2002<sup>27</sup>, une liste présentant les projets de terrain européens utilisant la phytoremédiation montre que 4 des 16 sites répertoriés en Europe sont localisés en Belgique (travaux suivis par l’université de Limbourg). Le choix du 5<sup>ème</sup> pays retenu dans le cadre de l’étude a donc porté sur la Belgique.

Ainsi, les pays proposés **sur la base du nombre de travaux scientifiques publiés** sont les suivants : l’Allemagne, le Royaume-Uni, la Belgique, le Canada et les Etats-Unis.

### 3. Interrogation des bases de données de brevets

L'interrogation des bases de brevets rend compte de l'innovation dans un domaine particulier. Les bases de données suivantes ont été interrogées :

- France : Institut National de la Propriété Industrielle, INPI
- Europe : Office européen des brevets, OEB
- Canada : Office de la Propriété Intellectuelle du Canada, OPIC
- Etats-Unis : US Patent & Trademark Office, USPTO

#### 31. La base de données de brevets nationaux de l'INPI

L'interrogation de la base de brevets de l'INPI a produit 12 brevets concernant les techniques biologiques de traitement des sols, déposés par des acteurs français :

- 11 sur la bioremédiation des sols contaminés par l'industrie
- 1 sur la phytoremédiation.

**Parmi les 11 brevets sur la bioremédiation :**

**-7 sont enregistrés par l'industrie chimique (6) et pétrolière (1) et appliqués aux hydrocarbures :**

- 5 brevets déposés par **Rhône Poulenc Chimie** concernent les HAP et organo-halogénés (4 souches bactériennes, 1 champignon) :
  - 2 brevets en 2002 : 1 sur *Fusarium oxysporum* CNCM I-2256 et 1 sur *Fusarium solani* CNCM I-2257
  - 1 brevet en 2001 : *Cladiosporum sphaerospermum* CNCM I-2255
  - 2 brevets en 1997 : 1 sur *Corolius versicolor* CNCM I-1657 et 1 sur un champignon de la famille *Polyporales*
- 1 brevet déposé par **CECA** (chimie) en 1995 sur la bioremédiation des sols pollués aux hydrocarbures et autres composés biodégradables
- 1 brevet d'**Elf Aquitaine**, 1996, sur le traitement des HAP (excavation, ajout d'agent oxygénant couplé à un microorganisme et de nutriments).

**- 3 brevets sont enregistrés par 3 grands centres de recherche :**

- **1 par l'Institut Français du Pétrole (IFP)**, 2000 : isolation de *Corynebacterium urealyticum* qui dégrade hydrocarbures et éthers de gasoil et kérosène
- **2 par le Commissariat de l'Energie Atomique (CEA)**
  - en 1999, avec le CNRS : isolation de *Penicillium* qui élimine les composés nitroaromatiques par minéralisation
  - en 1996 : décontamination des sols et déchets avec des microorganismes qui réduisent le fer et solubilisent les métaux lourds

**-1 brevet par la société GRS Valtech (1998) :** utilisation de microorganismes en conditions aérobie et anaérobie pour dégrader des composés toxiques.

**L'unique brevet sur la phytoremédiation a été déposé par l'Université de Rennes, en 2004 :** il concerne l'injection d'hydrates de carbone dans la plante pour améliorer l'efficacité de la phytoremédiation.

### 32. La base de données de l'Office Européen des Brevets

L'Office Européen des Brevets propose un service de recherche de brevets sur sa base de données, accessible sur l'internet. Pour notre requête et les activités qui nous intéressent, le code identifié dans la Classification Internationale des Brevets (CIB) est BO9C1 pour « régénération des sols pollués par des procédés microbiologiques ou utilisant des enzymes ». Ce code a été validé par notre interlocuteur à l'INPI.

L'interrogation de la base des brevets déposés en Europe a livré un total de 155 brevets concernant les techniques biologiques de traitement des sols, parmi lesquels l'analyse sémantique a identifié **69 brevets d'intérêt majeur**, dont 90 % concernent la bioremédiation :

- 62 brevets sur la bioremédiation des sols contaminés par l'activité industrielle
- 7 brevets concernant la phytoremédiation

**Parmi les 69 brevets retenus, 43 sont déposés par les Etats-Unis, soit 62 %.**

**Parmi les 62 brevets sur la bioremédiation enregistrés en Europe, 80 % sont déposés par 2 pays seulement, les Etats-Unis et le Japon :**

- 38 brevets déposés par les **Etats-Unis** (61 %)
- 12 brevets déposés par le **Japon** (19 %)
- 2 brevets par la Russie (hydrocarbures lourds<sup>28</sup>, 2001 et 2002)
- 2 brevets par l'Australie (1991, 1998)
- les 8 autres ont été déposés chacun par un pays différent :
  - 5 en Europe : Allemagne (Chimie Henkel, 1993), Royaume-Uni (privé, 1996), Italie (Tirsi SRL<sup>29</sup>, 2003), Suisse (privé, 1999), Bulgarie (Elektra 2000 EOOD<sup>30</sup>, 2004)
  - 1 par Taïwan : National Central University, 2004
  - 1 par la Nouvelle Zélande : Université Waikato, 2004, sur les champignons
  - 1 par le Canada : Université McMill et Centre National de Recherche du Canada, CNRC, 2000

Les **38 brevets américains sur la bioremédiation** sont déposés par les acteurs suivants, sachant que la moitié au moins s'appliquent à la pollution par les hydrocarbures et que 28 proviennent de grands groupes (74 %) :

- 12 sont déposés par la pétrochimie : 11 par Exxon et 1 par FMC Corp.
- 11 par des sociétés de biotechnologie et d'innovation technologique : Geobiotic Inc, Geovation Technologies Inc, Keraplast Technology Ltd
- 5 par de grandes sociétés de dépollution : Lockheed Idaho Technologies Company, Inland Consultants, Advanced Environmental Technology...
- 8 sont déposés par des personnes privées (hydrocarbures, solvants)
- 1 brevet est déposé par l'Armée américaine
- 1 par l'Université Rutgers (Newark, New Jersey)

**Les 12 brevets nippons concernent la bioremédiation** et sont déposés par des entreprises privées, entre 2000 et 2004, sauf 2 qui datent de 1996 et 1998 :

- 5 proviennent du génie civil (2000 à 2003)
- 4 proviennent de 4 entreprises aux activités polluantes (énergie, automobile, métallurgie, 1998, 2000, 2001)
- 2 sont issus de sociétés de biotechnologies (1996, 2001)
- 1 est déposé par une société de dépollution (2004, arsenic)

**Concernant la phytoremédiation, 5 des 7 brevets enregistrés sont américains, l'un est russe, l'autre est français.**

Parmi les 5 brevets américains, 3 sont déposés par des sociétés de dépollution et s'appliquent aux métaux lourds (Edenspace, 1998, Phytotech Inc., 1993 et 1994). Le plus récent est déposé par l'Université de Géorgie en 2004 et concerne des plantes transgéniques, le plus ancien a été déposé par une société de biotechnologie en 1998 et utilise de l'électrocinétique.

Le brevet russe date de 2001 et concerne la rhizodégradation des sols pollués par des hydrocarbures pétroliers.

Le brevet français de l'Université de Rennes en 2004 concerne l'injection dans la plante d'hydrates de carbone pour améliorer la phytoremédiation.

Ainsi, en Europe, la plupart des brevets ont été déposés entre 1994 et 2004, et 6 ont été déposés entre 1989 et 1993 : 4 américains, 1 australien, 1 allemand.

Près de 90 % des brevets portent sur la bioremédiation, 10 % seulement concernent la phytoremédiation.

Les Etats-Unis et le Japon ont déposé 80 % des brevets en Europe. Les Etats-Unis ont déposé 61 % des brevets sur la bioremédiation et 71 % des brevets sur la phytoremédiation. Les brevets nippons concernent exclusivement la bioremédiation.

Seuls deux autres pays apparaissent plus d'une fois : la Russie (2 brevets sur la bioremédiation, 1 sur la phytoremédiation) et l'Australie (2 brevets sur la bioremédiation).

L'Allemagne (bioremédiation, 1993), le Royaume-Uni (bioremédiation, 1996), la France (phytoremédiation, 2004) et le Canada (bioremédiation, 2000) apparaissent une seule fois. La Belgique et les Pays-Bas sont absents.

L'analyse des brevets enregistrés auprès de l'OEB met en évidence l'activité intense des Etats-Unis et du Japon. Parmi les pays européens, on retrouve les pays déjà remarquables pour le nombre de travaux publiés : Allemagne, Royaume-Uni, France.

### **33. La base de données de l'Office de la Propriété Intellectuelle du Canada, OPIC**

L'interrogation de la base de brevets du Canada a fourni 13 brevets au total :

- 12 brevets sur la bioremédiation des sols
- 1 sur la phytoremédiation des sols

Sur ces 13 brevets, 9 proviennent des Etats-Unis (69 %), 2 du Canada (15 %), soit 85 % issus d'Amérique du Nord.

#### **Sur les 12 brevets portant sur la bioremédiation des sols :**

- 8 sont déposés par les Etats-Unis (67 %), dont 7 sur les hydrocarbures
- 2 sont déposés par le Canada ;
  - par l'université McGill, 2000, sur les HAP
  - par un privé sur des souches bactériennes, 1996
- 1 brevet est déposé par l'Australie (souches bactériennes, 1998)
- 1 brevet est déposé par un groupe allemand de la chimie (Henkel, 1993)

Sur les 12 brevets concernant la bioremédiation, 8 sont déposés par des entreprises : 4 par le pétrolier Exxon, 1 par le chimiste allemand et 3 par des sociétés de dépollution. Trois proviennent d'instituts de recherche, 1 d'un individu.

Parmi les 8 brevets américains sur la biorémediation, un seul s'applique aux métaux lourds (Université de Géorgie<sup>31</sup>, 1997), les autres portent sur les hydrocarbures et autres composés organiques.

**L'unique brevet sur la phytoremédiation** a été déposé par la société américaine de dépollution Edenspace Systems Corporation en 1994 (*Brassica*, métaux).

Le Canada possède 2 brevets, l'Australie et l'Allemagne un chacun.

Les brevets ont été déposés entre 1992 et 1996 pour la plupart (11 sur 13). Les 2 plus récents, de 1998 (Australie) et 2000 (Canada), concernent la bioremédiation.

Sur la base de brevets du Canada, les Etats-Unis ont déposé le plus grand nombre de brevets, suivis du Canada ; on retrouve le brevet allemand.

### **34. La base de données de l'US Patent & Trademark Office, USPTO**

L'interrogation de la base de brevets de l'USPTO aux Etats-Unis a conduit à l'identification de 422 brevets sur la période 1976-2005.

La requête prenant en compte des pays en particulier, les Etats-Unis, le Canada, le Japon et en Europe, la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Belgique a identifié 202 brevets sur la bioremédiation<sup>32</sup> des sols dont :

- 196 brevets sur la dépollution des sols par des microorganismes
- 6 brevets sur la phytoremédiation des sols

**Parmi les 196 brevets sur la dépollution des sols par les microorganismes, 90 % sont issus d'Amérique du Nord et 7 % du Japon :**

- 164 ont été déposés par les Etats-Unis (84 %)
- 13 ont été déposés par le Canada (7 %)
- 13 déposés par le Japon, dont 7 par Canon KK<sup>33</sup> (1994-1998)
- 3 déposés par la France : CEA/CNRS 1999, CNRS 1998, INRA 1996
- 2 déposés par l'Allemagne : Henkel 1994 (chimie), Solvay 2001 (métaux)
- 1 déposé par le Royaume-Uni : Envirotreat Ltd (société de dépollution) en 1996 (PCB, HAP)

**Parmi les 164 brevets américains, 38 % portent sur les hydrocarbures pétroliers, 27 % sur les métaux lourds et 13 % sur les solvants :**

- 63 brevets s'appliquent aux hydrocarbures pétroliers (soit 38 %) et sont déposés par des compagnies pétrolières (à 75 %) : au Texas (33), en Californie (10), en Ohio (10), en Floride (9), en Alaska (1)
- 45 brevets concernent les métaux lourds (soit 27 %) : 25 en Californie, 7 en Arizona et 13 sur le chrome hexavalent (11 du Maryland, 2 d'Idaho)
- 9 portent sur les HAP (5 %) et sont déposés par les industries pétrolières et chimiques : 7 de l'Ohio et 2 de Californie
- 10 portent sur les PCB (6 %) et sont déposés par l'industrie chimique et des universités : 4 de l'Indiana, 4 de l'Ohio, 2 de Californie
- 8 brevets du Tennessee concernent le TCE (4) et les COV (4) et sont déposés par les secteurs de l'énergie, de la dépollution et l'université
- 7 brevets d'Arizona concernent le MTBE (groupes pétroliers)
- 3 brevets sur le toluène proviennent de l'Ohio (industrie chimique)
- les autres portent sur des bioréacteurs et sont déposés par des sociétés de dépollution (12 en Californie, 6 en Idaho).

**Parmi les 13 brevets canadiens, 6 concernent les hydrocarbures (46 %) :**

- 8 sont déposés par des sociétés de dépollution : 4 concernent les hydrocarbures et composés organiques (Biogénie, 1993, 1994), Petrozyme Technologies, 1999 et Unotec Services, 1999), les autres concernent les PCB, le bioventing, le couplage bio/phytoremédiation
- 2 par le ministère de l'Environnement en 1995 (toxicité des sols)
- 1 par l'université McGill
- 1 par le Conseil National de la Recherche au Canada (CNRC, 1993, hydrocarbures)
- 1 par 2 individus de Waterloo en 2003 : bioréacteur pour hydrocarbures

**Les 13 brevets nippons sont déposés par de grands groupes industriels et concernent les solvants :**

- 7 sont déposés par Canon KK<sup>34</sup>, dont 2 sur le TCE et les organochlorés
- 2 par l'équipementier industriel Sumitomo, 1999, 2000 (organochlorés)
- 2 par des sociétés fabricant des composants électroniques : Matsushita en 2002 (COV) et NEC en 1997 (tetrachloroéthane et nitrate)
- 1 par la société Toyota en 2000
- 1 par la société d'ingénierie environnementale Ebara en 2001 (composés organiques halogénés)

**Les 3 brevets français concernent la bioremédiation, dont 2 sur le traitement des métaux :** celui de l'INRA (1996) et celui du CNRS (1998) qui protège un gène (CYP76B1) impliqué dans le traitement des métaux et des composés organiques. En revanche, le brevet du CEA/CNRS (1999) concerne une souche de *Penicillium* éliminant les composés nitroaromatiques.

**La Belgique n'a déposé aucun brevet à l'USPTO.**

**Parmi les 6 brevets sur la phytoremédiation, 4 proviennent d'Amérique du Nord, les 2 autres sont britanniques :**

- 3 sont déposés par les Etats-Unis dont 2 sur l'extraction de métaux lourds (Université du Maryland, 1998, Cognis, 1994), l'autre sur des méthodes électrocinétiques (Lynntech, 1998).
- 1 par le Canada : l'université de Guelph sur une plante hyper-accumulatrice d'ions métalliques (1998)
- 2 par le Royaume-Uni : l'université de Lancaster sur les polluants organiques (2000), Isis Innovation Ltd sur les métaux (1998)

Ainsi, parmi les 202 brevets identifiés sur la base de brevets de l'USPTO, 83 % sont déposés par les Etats-Unis, principalement des compagnies pétrolières et l'industrie chimique ainsi que des sociétés de technologies environnementales ; une dizaine d'universités seulement sont enregistrées.

Environ 7 % des brevets sont canadiens, enregistrés par des sociétés de dépollution et relatifs aux hydrocarbures.

Près de 6 % des brevets sont japonais, enregistrés par des géants industriels et appliqués au traitement des solvants.



Environ 4 % des brevets sont européens (sur 8 au total) : 3 sont français, 3 sont britanniques, 2 sont allemands. Quatre s'appliquent aux métaux, les autres concernent divers composés organiques (PCB, HAP, nitroaromatiques).

#### **4. Bilan de la sélection des pays**

Le croisement des résultats de l'analyse du nombre de publications scientifiques par pays avec les résultats obtenus via l'interrogation de bases de données de brevets met en évidence l'importante production des Etats-Unis. Le Canada est bien positionné également et en Europe, il s'avère que les pays pressentis, notamment l'Allemagne et le Royaume-Uni, sont à retenir en priorité pour la comparaison internationale.

Le Japon est bien placé, tant en nombre de publications que de brevets déposés, mais ne sera pas retenu dans le cadre de cette étude. De fait, l'archipel étant confronté à des problèmes d'espace, il est peu probable que les techniques biologiques, longues à mettre en œuvre, soient utilisées de façon significative pour la dépollution des sols contaminés.

La Belgique est retenue en raison d'une part de problématiques communes avec la France dans le domaine des sols pollués, comme cela a été évoqué plus haut, et d'autre part pour sa production scientifique conséquente.

Finalement, l'interrogation des bases de données de brevets conforte le premier choix proposé à l'issue de la comparaison du nombre de publications scientifiques. Parmi les pays les plus actifs dans la recherche sur les techniques biologiques de traitement des sols, les cinq pays retenus dans le cadre de cette étude sont les suivants :

- **l'Allemagne**
- **la Belgique**
- **le Royaume-Uni**
- **le Canada**
- **les Etats-Unis**

*Note : Ce choix résulte de l'identification, parmi les pays confrontés à des problématiques de sols pollués comparables à celle de la France, des pays dans lesquels la recherche sur les techniques biologiques de dépollution des sols apparaît la plus active, en termes de publications et brevets déposés. Il ne s'agit pas d'une identification des pays en fonction des techniques appliquées.*

**Contexte et objectifs de l'étude****Méthodologie****Chap. 1 : Les techniques biologiques de dépollution des sols****Chap. 2 : Sélection de cinq pays prioritaires****Chap. 3 : L'état de la recherche à l'international****Chap. 4 : La situation de la France à l'international****Conclusions et recommandations****Chap. 3 :****L'état de la recherche à l'international****1. La situation de la recherche en Europe**

L'analyse de l'état de la recherche consacrée aux techniques biologiques de dépollution des sols dans ces cinq pays est destinée à apprécier la situation de la France dans le contexte international. La caractérisation des stratégies développées et l'identification de leurs forces et faiblesses permettent de positionner la recherche française. Cette comparaison doit mettre en évidence les stratégies à succès dont pourra s'inspirer le système français et les projets de coopération opportuns. La situation de la Recherche en Europe est évaluée en analysant l'état de la recherche dans trois pays : l'Allemagne, la Belgique et le Royaume-Uni.

**11. L'Allemagne : le soutien du ministère de la Recherche**

L'Allemagne traite chaque année environ 5 millions de tonnes de terres contaminées<sup>35</sup>. Actuellement, la recherche sur les techniques biologiques de dépollution des sols porte essentiellement sur deux techniques : l'atténuation naturelle (notamment à l'UFZ, Centre de recherche sur l'environnement de Leipzig) et la phytoremédiation, appliquée essentiellement aux zones humides (wetlands) et aux eaux de surface (considérée peu adaptée au traitement des sols où la contamination est située en profondeur). D'une façon générale les travaux menés dans les laboratoires universitaires relèvent plutôt de la recherche fondamentale (Université de Aachen, de Bonn, de Munich).

Dans le domaine de la phytoremédiation, la société Bioplanta, créée en 1991 et basée à Leipzig est l'entreprise de référence Outre-Rhin. Elle emploie 6 personnes dans son laboratoire de recherche.

Pour les autres techniques biologiques, plus anciennes, la recherche réalisée en laboratoire est achevée, le développement est réalisé sur site au cours de la mise en œuvre du procédé de dépollution par les Länder (Etats fédéraux, responsables de la dépollution de leurs sites).

De grands programmes stratégiques ou initiatives thématiques portant sur le traitement des sites contaminés ont été initiés et subventionnés par le ministère de la Recherche et de l'Education, le BMBF.

- **La stratégie du ministère de la recherche (BMBF)**
  - **Le projet de recherche appliqué KORA sur le potentiel et les risques de l'atténuation naturelle (2002-2007)**

Dans le cadre du programme fédéral « Recherche pour l'environnement (« *Forshung für die Umwelt* ») et de la réhabilitation des sites pollués, le ministère de la Recherche a lancé en février 2000 un important projet de subventions à la R&D consacré à l'atténuation naturelle des sols et des eaux contaminés. Ce projet désigné KORA (*Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Böden und Grundwässer*) est dédié à l'étude des processus de rétention et de dégradation qui réduisent les polluants dans les sols et eaux souterraines.

Ce projet a pour objectif la mise au point d'un traitement adapté et efficace à long terme pour les sols et les eaux contaminés ainsi que la préparation d'un cadre réglementaire approprié. Il se focalise d'une part sur l'étude des processus de rétention et de dégradation des polluants et des conditions de réalisation de ces processus, et d'autre part sur le développement de moyens de mesure, d'évaluation et de suivi de l'évolution de ces processus et la conception d'une méthode d'évaluation des risques.

Le projet KORA doit aboutir au développement de méthodes standard pour la mise en œuvre de procédés de remédiation, pour l'évaluation des dangers liés à la diffusion des polluants, et pour l'analyse et la mise en œuvre des mesures qu'il convient d'appliquer après l'étape de nettoyage (post-remédiation).

Il s'agit en outre de faire le point sur l'état des connaissances et des expériences nationales et internationales en vue de mettre en œuvre l'atténuation naturelle et augmentée.

Le projet KORA est coordonné par le Dr. Jochen Michels de l'organisation DECHEMA e.V. (Association pour l'ingénierie chimique et les biotechnologies, établie à Frankfort) et suivi par deux porteurs de projets du ministère de la Recherche et de l'Education (BMBF) et du ministère de l'Economie et du Travail (BMWA) : l'agence de projets pour les technologies de l'eau et la gestion des déchets et l'agence de projets dédiés à l'environnement (Projekträger Jülich). Le projet a démarré en été 2002 et finance des projets de recherche sur 3 ans (5 ans maximum).

Ce programme de subvention finance 60 projets qui ont été sélectionnés parmi près de 200 propositions. Les projets élus sont menés sur le terrain, sur 23 sites pollués identifiés sur le territoire allemand ; ils mettent en œuvre des méthodes différentes et sont organisés autour de 8 réseaux thématiques. Les 6 premiers réseaux concernent des polluants industriels classiques, présents sur les sites retenus, les 2 autres traitent d'aspects plus larges.

Les résultats des travaux des réseaux 1 à 6 doivent déboucher sur des lignes directrices permettant d'évaluer le potentiel de dégradation de groupes de polluants (et de combinaisons de polluants) qui sont étudiés dans les différents sites. Les réseaux 7 et 8 doivent produire les chapitres d'un manuel de recommandation qui sera rédigé d'un point de vue interdisciplinaire. Les 8 réseaux thématiques sont gérés chacun par un coordinateur unique et présentés ci-après :

- 1 raffineries, citernes, fuel, huiles minérales (MTBE, TPH, BTEX)
- 2 usines à gaz, cokerie, fabrication de goudron bitume (HAP, BTEX, composés hétérocycliques)
- 3 industrie chimique et de transformation de métal
- 4 centres de stockage et décharges abandonnées (déchets ménagers, déchets chimiques)

- 5 anciennes usines de munitions (aromatiques nitrés)
- 6 mines et sédiments
- 7 prédictions et modélisation
- 8 évaluation, questions légales, acceptation par les officiels et le public

Les 8 réseaux thématiques ont été définis d'abord, et le choix des 23 sites a été réalisé ensuite, à partir de 200 propositions obtenues au total. Les 23 sites retenus pour les expérimentations relatives à l'atténuation naturelle appartiennent majoritairement au Gouvernement (anciennes décharges, stations services, sites de fabrication d'explosifs, usines à gaz notamment), certains sont des propriétés mixtes public/privé (sites miniers, sédiments), d'autres sites appartiennent à des entreprises privées (friches industrielles). La mise à disposition de sites pollués par des industriels est motivée essentiellement par l'argument commercial et la promotion d'une image plus 'verte'.

Les participants sont invités à travailler en collaboration au sein des réseaux thématiques qui doivent eux-même coopérer entre eux de façon à consolider les connaissances et expériences acquises au cours de ce projet de R&D et présenter un manuel commun de recommandations.

Le public est tenu informé des résultats obtenus par des moyens de communication appropriés. Ce projet KORA fait l'objet d'un site internet dédié ([www.natural-attenuation.de/](http://www.natural-attenuation.de/)), d'ateliers de travail locaux, de séminaires, de réunions d'information et de manifestations diverses (présentations visant les professionnels et le grand public), de publications diverses (brochures) et d'une lettre d'information présentant l'état d'avancement des travaux et les résultats obtenus.

Le budget alloué par le ministère de la recherche pour la période 2002-2007 s'élève à 15 M€.

- ***Le projet sur l'exploitation énergétique des végétaux utilisés pour la phytoremédiation (2005-2007)***

Le ministère de la Recherche a commissionné l'Institut de recherche CUTEC (Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH) pour réaliser un état des lieux des connaissances, expériences et publications sur le thème de l'exploitation énergétique de la biomasse générée par des opérations de phytoremédiation. Un document faisant le point sur l'état de l'art et les perspectives des techniques étudiées doit paraître à la fin de l'année 2005. Il est en charge également de développer un réseau interdisciplinaire autour du thème « Energies renouvelables à partir de biomasse issue de la phytoextraction des sols contaminés ».

Ce réseau d'experts doit contribuer à la réalisation de l'état des lieux de la science et de la technique dans le domaine de l'utilisation de biomasse provenant de sols décontaminés par phytoextraction, à l'évaluation du potentiel et des limites de ce procédé et à la conception de projets de R&D prioritaires.

Le projet est prévu sur une durée de deux ans.

- **Le projet sur les techniques biologiques : Guide des procédures biologiques d'assainissement des sols (1996-2001)**

Il y a une dizaine d'années un important programme de recherche sur l'utilisation des techniques biologiques pour la dépollution des sols a été initié par le ministère de la Recherche, et financé à hauteur de 10 M€ (1996-2001). Il a donné lieu à la publication d'un guide des procédures biologiques de dépollution des sols, traitant à la fois des aspects technologiques, législatifs et économiques (intitulé *Leitfaden biologische Verfahren zur Bodensanierung*).

D'une façon générale, la recherche sur les techniques biologiques de remédiation a été freinée par la législation sur les déchets et les sites contaminés (TASi, Technische Anleitung Siedlungsabfall, Guide technique sur les déchets municipaux, de 1993) qui fixe des règles telles que la mise en décharge des sols pollués est bien moins coûteuse que tout autre mode de gestion des terres polluées. De plus, le dumping lancé par les exploitants de décharges afin de remplir leurs installations avant l'entrée en vigueur de la réglementation transposant la directive sur les décharges a fortement encouragé le stockage en décharge des sols pollués.

La recherche allemande mise sur l'atténuation naturelle et la phytoremédiation. Une vingtaine de laboratoires publics et privés menant des travaux de recherche sur les techniques biologiques de traitement des sols ont été recensés. Parmi les plus réputés figurent par exemple :

UFT, Zentrum für Umweltforschung & Umwelttechnologie, Bremen  
Centre de recherche et de technologies pour l'environnement, Brême  
Traitement biologique des sols pollués, phytoremédiation, bioremédiation

RWTH Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen,  
Ecole technique supérieure de Rhénanie Westphalie, Aix la Chapelle  
Chaire d'Ecologie, d'écotoxicologie, d'écochimie : phytoremédiation (détoxification de xenobiotics par les plantes)

Université de Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, ZAG  
Centre des sciences biologiques appliquées : atténuation naturelle

Les laboratoires de recherche bénéficient du soutien du ministère de la Recherche, des ministères et agences de l'environnement des Länder, etc.

- **Les projets locaux et européens**

- **Application de l'atténuation naturelle pour la gestion des sols contaminés dans le Land de Bade Wurtemberg (1998-2004)**

Dans le Land de Bade-Wurtemberg, l'Agence de protection de l'Environnement (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, LfU) a financé divers projet d'études menés par le centre des sciences biologiques appliquées (ZAG) de Tübingen. Ces travaux portaient sur l'évaluation des processus de l'atténuation naturelle des sites contaminés et ont donné lieu à la préparation des lignes directrices préliminaires (Teutsch et al., 2001; Rügner & Teutsch 2002) inspirées de lignes directrices existantes pour la gestion des sols contaminés (LFU, 2002) et du règlement de 1999 sur la conservation des sols (**Bundes-Bodenschutzgesetz**, BBodSchV). Les processus ont été expérimentés sur trois sites de références (Rügner et al., 2004a,b) et les résultats des investigations ont servi de base de décision aux autorités réglementaires, celles-ci se sont prononcées en faveur de l'atténuation naturelle comme mode de gestion de ces sites.

Ce centre des sciences biologiques appliquées (ZAG) de Tübingen mène et a mené d'autres projets d'investigation sur l'utilisation de l'atténuation naturelle : sur le site d'une ancienne usine à gaz de la ville de Kehl<sup>36</sup> (2000-2002), sur une ancienne décharge municipale de Osterhofen

contaminée à l'ammonium (2000-2004), sur un ancien site de stockage de déchets industriels de la ville de Wernau, contaminé par une pollution mixte, HAP, ammonium, phénols, hydrocarbures chlorés (2000-2002).

- **Les projets du 6<sup>e</sup> PCRD**

Le centre des sciences biologiques appliquées (ZAG) de Tübingen est également impliqué dans de nombreux travaux de recherche menés dans le cadre du Projet KORA décrit plus haut, ainsi que dans des programmes de recherche financés par l'Union européenne dans le cadre du 6<sup>e</sup> PCRD (1999-2005) et qui concernent la gestion et la dépollution des sols et des eaux (ex : WELCOME, CORONA, etc.)

- **La société de phytoremédiation Bioplanta GmbH, à Leipzig**

Créée en 1992, cette société d'ingénierie environnementale et de phytochimie travaille en collaboration étroite avec l'UFZ, Centre de recherche sur l'environnement de Leipzig et son laboratoire de R&D compte 5 à 10 chercheurs. BioPlanta conçoit des végétaux pour le traitement des eaux contaminées d'origines diverses et utilise des systèmes biologiques passifs, des zones humides construites (constructed wetlands) et des lagons. Les travaux de remédiation concernent les eaux d'épuration, les sites de décharge (lixiviats), les boues d'épuration (compostage).

Pour le traitement des sols, elle a mené des opérations de prévention de la diffusion des polluants (sécurisation) et de réduction/élimination des polluants sur des sites industriels (métaux lourds) et militaires (explosifs).

Dans la région de Leipzig, Bioplanta est impliquée dans des expérimentations de grande taille, menées avec des communautés de communes. A l'international elle a mené des projets de traitement des eaux (eaux d'épuration au Pérou et effluents de tanneries au Mexique).

## Principaux experts contactés en Allemagne

Dr. Jens Deutscher  
 Traitement de sites contaminés à la Faculté des Forêts, Géosciences et  
 Hydrosociences  
 Université de technologie de Dresde  
 tél : 00 49 35 01 53 00 25, e-mail : [jens.deutscher@mailbox.tu-dresden.de](mailto:jens.deutscher@mailbox.tu-dresden.de)

Pr. Dr. Heinz Rennenberg  
 Responsable de la Chaire de physiologie des arbres  
 Université de Fribourg en Brisgau  
 tél : 00 49 76 12 03 83 01, e-mail : [Heinz.Rennenberg@ctp.uni-freiburg.de](mailto:Heinz.Rennenberg@ctp.uni-freiburg.de)

Dr. Christoph Henkler  
 Senior Manager, Planreal AG, Dusseldorf  
 tél : 00 49 21 03 77 518, e-mail : [chenkler@planreal.com](mailto:chenkler@planreal.com)

Dr. Kerstin Hund-Rinke  
 Responsable de l'équipe de recherche " métabolisme et biodisponibilité "  
 Institut Fraunhofer de Microbiologie Moléculaire et d'Ecologie Appliquée  
 tél : 00 49 29 72 30 22 66, e-mail : [kerstin.hund-rinke@ime.fraunhofer.de](mailto:kerstin.hund-rinke@ime.fraunhofer.de)

Andrea Kuhne  
 BioPlanta GmbH, Leipzig  
 tél : 00 49 34 12 24 58 34

Britta Kragert  
 Responsable management et marketing, Institut CUTEC, Clausthaler  
 Umwelttechnik GmbH  
 tél : 00 49 53 23 93 32 08, e-mail : [britta.kragert@cutec.de](mailto:britta.kragert@cutec.de)

Daniela Perbandt  
 Département de Gestion du Développement Durable, Institut CUTEC  
 tél : 00 49 53 23 93 32 70, e-mail : [daniela.perbandt@cutec.de](mailto:daniela.perbandt@cutec.de)

M Hildebrandt (pour Mr. Wilhelm Schönfelder)  
 Représentant permanent des actions COST pour l'Allemagne à Bruxelles  
 tél : +32 2 238 1940

Prof. Dr. Hans Harms  
 Participant du COST 837 pour l'Allemagne, Relai phytoremédiation,  
 Braunschweig  
 tél : +49-531 50 93 63, [H.HarmsBS@t-online.de](mailto:H.HarmsBS@t-online.de)

Dr. Joachim Woiwode  
 Expert en gestion des sols  
 Ministère de l'environnement, BMU, Berlin  
 tél : 00 49 1 888 305 2681, [joachim.woiwode@bmu.bun.de](mailto:joachim.woiwode@bmu.bun.de)

Dr. Andreas Bieber  
 Expert en bioremédiation  
 Ministère de l'environnement, BMU, Berlin  
 tél : 00 49 1 888 305 26 81, [andreas.bieber@bmu.bund.de](mailto:andreas.bieber@bmu.bund.de)

Dr. Jochen Michels  
 Coordinateur du projet KORA sur l'atténuation naturelle, DECHEMA eV<sup>37</sup>,  
 Francfort  
 tél : 00 49 69 7564 157, e-mail: [michels@dechema.de](mailto:michels@dechema.de), [www.natural-attenuation.de](http://www.natural-attenuation.de)

Mme KABARDIN  
 ICCS, International Centre for Soil & Contaminated Sites

Agence de l'environnement, UBA, Dessau  
tél : +49 340 2103 3152

Sabine Rücker, tél.: +49 340 2103 3008, e-mail:  
<mailto:Sabine.Ruecker@UBA.de>

Dipl.-Geogr. Sabine Gier  
ITVA, Association ingénieurs sites contaminés<sup>38</sup>, Berlin  
tél.: + 49 30 48 63 82 80, e-mail : [info@itv-altlasten.de](mailto:info@itv-altlasten.de), <http://www.itv-altlasten.de>



## 12. La Belgique : la recherche stimulée par la législation

Pays à forte activité minière et industrielle, la Belgique est très concernée par la gestion des sols pollués. Dans la Région de Bruxelles-Capitale, près de 7 000 sites pollués ont été recensés, en 2004, par l'Institut Bruxellois de Gestion de l'Environnement (IBGE), représentant environ 8 % du territoire régional. En Région Wallonie, près de 6 000 sites ont été répertoriés la même année par la Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGRNE) ; entre 2000 et 2003, la superficie ayant subi une décontamination a quasiment quadruplé, grâce aux importants moyens financiers déployés.

Quelques structures publiques sont impliquées dans le financement des activités de dépollution des sols. Pour la Région Bruxelles-Capitale, il s'agit par exemple de l'Institut Bruxellois de Gestion de l'Environnement et pour la Région Wallonie, de la Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGRNE) et de la Société Publique d'Aide à l'Environnement (SPAQUE, membre actif de la Région en matière de dépollution des sols, créée par le Gouvernement wallon en 1991). La ministre belge de l'environnement envisage la création d'un fond destiné à financer le traitement des pollutions orphelines de sols, nombreuses en Belgique.

- **Une législation spécifique toute récente**

Actuellement, l'administration wallonne assimile les sols contaminés à des déchets, que la pollution résulte ou non d'un acte volontaire : par exemple, un sol pollué par l'épanchement accidentel d'hydrocarbures (fuite accidentelle d'une citerne à mazout) acquiert le statut de déchet, que le sol soit excavé ou non. Les stations-services font l'objet d'une réglementation particulière : l'arrêté du Gouvernement wallon (AGW) du 4 mars 1999 fixe un cadre spécifique pour l'assainissement des sols pollués de ces stations (il en existe plus de 2 000 en Région wallonne).

Le décret relatif à l'assainissement des sols pollués et aux sites d'activités économiques à réhabiliter, a été adopté le 1<sup>er</sup> avril 2004 (« décret sols », Moniteur belge, 7 juin) et entrera en vigueur à une date qui sera fixée par le Gouvernement. Ce décret comporte trois volets : le 1<sup>er</sup> réforme le régime des sites d'activités économiques désaffectés, le 2<sup>e</sup> intègre la problématique de la pollution des sols à la législation sur le permis d'environnement, le 3<sup>e</sup> vise à « doter la Région wallonne d'un instrument juridique spécifique indispensable à la conduite d'une politique de gestion et d'assainissement des sites pollués ».

En Wallonie, la gestion des sols pollués fait l'objet de travaux de réflexion et de clarification. Ainsi, le ministère de la Région wallonne a publié, en août 2005, un document intitulé « *Réhabilitation des dépotoirs et assainissement des sols : le point sur la situation en Région wallonne et ses perspectives d'évolution* », préparé par la Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, l'Office Wallon des Déchets et la Direction des Infrastructures de Gestion des Déchets<sup>39</sup>. Ce document pédagogique reprend le contenu de la législation, ses implications et ses évolutions récentes.

- **Le soutien à la recherche en Wallonie**

En Wallonie, la recherche universitaire dépend administrativement de la Division Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Énergie (DGTRE) et notamment de deux sous-directions : d'une part la Division de la Recherche et de la Coopération scientifique qui gère les programmes de recherche dans les universités, centres de recherche et instituts universitaires (Hautes Ecoles) et promeut les travaux de coopération (participation des acteurs belges aux programmes de l'Union européenne, tels EUREKA<sup>40</sup> et COST 837, 859), et d'autre part la Division des Aides aux Entreprises.

La DGTRE encourage à la valorisation des résultats de la recherche en facilitant la création de spin off<sup>41</sup> à partir des innovations des laboratoires universitaires, notamment dans le domaine des biotechnologies environnementales. Elle soutient le transfert technologique des résultats de la recherche universitaire vers les entreprises qui permet de moderniser les outils de production et de concevoir de nouveaux produits. Enfin, elle mise sur le renforcement de l'expertise scientifique et le développement de l'attractivité du territoire wallon pour attirer l'implantation d'entreprises et de laboratoires internationaux, l'objectif étant la création d'emplois qualifiés durables. La propriété intellectuelle est une autre préoccupation de la DGTRE, qui aide financièrement les laboratoires à protéger leurs résultats.

Afin de promouvoir une recherche scientifique d'envergure internationale, située à l'interface des disciplines et pour favoriser la collaboration entre laboratoires et les partenariats avec l'industrie, la DGTRE a créé des programmes qui subventionnent exclusivement des projets remplissant des critères spécifiques, liés au potentiel de coopération et d'application commerciale.

- **Succès des programmes FIRST pour les sciences et techniques**

En 1989, la DGTRE a lancé le programme de Formation et d'Impulsion à la Recherche Scientifique et Technologique, désigné « FIRST Université » et couronné d'un succès tel que l'action s'est étendue aux Hautes Ecoles (1991) et aux entreprises (1993). Le programme FIRST poursuit trois objectifs : l'accroissement du potentiel scientifique et technologique des universités, la valorisation des résultats de la recherche au sein des entreprises, et la formation de futurs cadres en vue de la diffusion de technologies émergentes dans les entreprises. Il permet aux chercheurs de se familiariser avec le milieu de l'entreprise tout en gardant leur statut universitaire, créant ainsi des passerelles entre la recherche et l'industrie. La Région prend en charge, pendant deux ans au moins, la rémunération d'un jeune chercheur universitaire menant un projet susceptible de contribuer au développement économique wallon.

Trois projets de dépollution de sols ont été retenus par le **programme FIRST**.

- Le Centre Wallon de Biologie Industrielle (CWBI), qui réunit la Faculté des Sciences de l'Université de Liège et la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, a lancé **REMEDPCB**, un projet de bioremédiation des sols contaminés aux PCB. Il consiste à développer une formulation microbiologique applicable *in situ* pour éliminer les polluants par bioaugmentation. Il associe trois types d'acteurs : un centre de recherche belge, un partenaire scientifique européen et un industriel, c'est-à-dire le CWBI, l'Institut de l'Eau et de Gestion des Déchets de l'Université de Aachen (Allemagne) et BioRem SA, société belge de biotechnologie et environnement. La Wallonie contribue à hauteur de 50 % (budget total : 0,11 M€).

L'une des activités du CWBI consiste à sélectionner des microorganismes pour le traitement des sols pollués et utilise les biotechnologies pour optimiser l'efficacité de dégradation des polluants (PCB, HAP).

- Un projet de phytoremédiation initié par l'Unité de Biologie Végétale de l'Université Catholique de Louvain, s'intitule **PRISE** : la mise au point d'une technique de prétraitement de graines (« priming ») doit augmenter l'efficacité et la rentabilité des dispositifs de revégétalisation de sites difficiles d'accès et optimiser leur réhabilitation par phytoremédiation. Ce projet doit contribuer à la réhabilitation de sites industriels désaffectés, nombreux en Wallonie (terrils miniers, carrières, talus routiers et ferroviaires). L'Université Catholique de Louvain s'est ainsi associée à deux laboratoires espagnols (le Département de Ressources Naturelles de l'Institut murcien de Recherche et Développement en Agriculture et Agroalimentaire, IMIDA et le Département de Conservation du sol et de l'eau et de Gestion des déchets organiques du Centre d'Ecologie et de Biologie Appliquée de Segura, CEBAS) et à un industriel, Redebel SA. Cette société de conseil et de services pour l'aménagement d'espaces verts propose un procédé d'ensemencement par hydrosemis, adapté aux surfaces inaccessibles. PRISE est subventionné pour moitié par la Wallonie (budget total de 0,11 M€).
- Dans le cadre du programme FIRST 2002, le laboratoire de Biochimie de l'Université de Liège<sup>42</sup> avait lancé **BIOREM**, projet de mise au point de souches bactériennes psychrophiles<sup>43</sup> pour la bioremédiation des sites pollués par des composés organiques. Ce projet de collaboration entre un laboratoire belge, un partenaire européen et un industriel associe le Laboratoire de Biochimie de l'Université de Liège, l'Institut de Microbiologie de l'Université d'Innsbruck (Autriche) et Artechno SA, spin-off du CWBI, spécialisée en biotechnologie et microbiologie. Ce projet était entièrement financé par la Wallonie (0,12 M€).

Artechno SA utilise des techniques de bioremédiation des sols pollués par des produits pétroliers, la biostimulation et la bioaugmentation. Sa collection de 3 000 souches bactériennes est consacrée au développement d'applications environnementales. Le CWBI est également à l'origine de la spin-off Biotreatment SA, spécialiste de la conception et réalisation de projets de traitement biologique des sols et déchets.

#### ○ *Le programme BIOVAL pour les biotechnologies appliquées*

Plus récemment, en 1999, la DG TRE a lancé le programme BIOVAL, qui s'adresse aux universités et entreprises concevant des projets basés sur des techniques biologiques (microbiologie, culture cellulaire) et répondant à des critères de sélection spécifiques. Les aides sont allouées sur trois ans.

Pour les universités, le projet doit d'une part être mené par un chercheur expert dans une discipline indispensable au développement du projet, et en coopération avec un laboratoire universitaire maîtrisant une expertise complémentaire, et, d'autre part, présenter un potentiel de valorisation industrielle (santé, environnement, agroalimentaire), détaillé dans un schéma de valorisation. Pour les entreprises, il s'agit en priorité de disposer des compétences nécessaires à la conduite du projet, de présenter une étude de marché pour les produits nouveaux issus du projet et, le cas échéant, de prévoir l'intervention de sous-traitants industriels ou universitaires.

- **L'industrie de la dépollution : un nombre d'acteurs à la mesure des besoins**

En Belgique une cinquantaine d'entreprises sont actives dans le domaine du traitement des sols, beaucoup d'entre-elles mettent en œuvre des techniques biologiques (Eco System Engineering E.S.E, Ecoterres, Envisan, Sita, Tauw, etc.). Une vingtaine de bureaux d'études sont spécialisés dans l'assainissement des sols ; l'expertise des bureaux belges dans les techniques biologiques de dépollution est reconnue en France. Seize centres appartenant à des entreprises de dépollution disposent d'une autorisation gouvernementale pour procéder au traitement des terres polluées. Cette autorisation est octroyée pour un site spécifique et une durée de dix ans en général.

Une douzaine de laboratoires privés et publics sont actifs dans le domaine des techniques biologiques de dépollution des sols,.

Ce nombre élevé d'acteurs est lié à l'évolution récente de la législation et les renforcements à venir. La dépollution des sols est un secteur d'activité jeune en Belgique où les entreprises et laboratoires se lancent sur un marché émergent.

---

### **Le cas de la société ENVISAN**

Envisan est une société belge spécialisée dans les domaines de la dépollution de sols, de la construction de centres techniques d'enfouissement (CET), de l'assainissement et du traitement de l'aquifère, des boues organiques et des sédiments de dragage.

Pour la dépollution des sols, Envisan possède plusieurs centres de recyclage et de stockage temporaire des terres. Ces centres sont équipés, notamment, pour le traitement biologique des sols. Les polluants les plus fréquemment traités sont les hydrocarbures pétroliers (essence, diesel, mazout ...), les métaux lourds, les HAP, PCB.

Les centres Envisan sont des centres agréés en assainissement biologique des sols : le centre Envisan Noordok (Gand, Flandre), créé en 1998 sur une superficie de 2 ha, a traité 335 000 tonnes de terre entre 1998 et 2003, tandis que le centre Hulsdonk (Gand), créé en 2002 sur 5 ha, a traité 50 000 tonnes entre 2002 et 2003. Les principaux clients sont des stations-services, les chemins de fer, des collecteurs de déchets, l'industrie pétrochimique, des entrepreneurs, les pouvoirs publics, le secteur privé.

---

Malgré une prise de conscience tardive, la Belgique affiche une réelle volonté de figurer parmi les pays de référence dans le domaine des techniques biologiques de dépollution des sols, grâce à une politique dynamique de recherche et développement et au renforcement de la législation pour la gestion des sols pollués.

Par ailleurs, dans une étude de marché réalisée aux Etats-Unis, la Belgique figure parmi les marchés européens les plus intéressants pour les entreprises de dépollution des sols, un marché qui croît sous l'effet du renforcement de la législation. Le fait que les sociétés de dépollution locales doivent être certifiées par les autorités publiques régionales restreint toutefois l'accès au marché belge des entreprises étrangères.

- **Législation et gestion des sites pollués en Flandre**

La Flandre a été confrontée à beaucoup de problèmes avec les sols pollués, étant donné que la notification du propriétaire engendrait des procédures juridiques longues et coûteuses pour déterminer les responsabilités concernant la création de la pollution et l'obligation de dépolluer.

### ***Depuis 1995 : 10 ans de recul et d'expérience***

En 1995, la loi a dissocié la responsabilité de la pollution et l'obligation de dépolluer, contrairement à ce qui se passe dans d'autres pays d'Europe et aux Etats-Unis, où ces deux aspects sont connectés. Le point fondamental est l'obligation de dépolluer, qui est traitée indépendamment de la question de la responsabilité ; le propriétaire du site peut difficilement échapper à cette obligation.

Le législateur a décidé qu'il importait de protéger un nouveau propriétaire d'un site nouvellement acquis et potentiellement pollué, en cas d'achat d'un terrain dont la pollution est invisible. Des procès entre des voisins et le nouveau propriétaire ont conduit à la condamnation du gérant alors qu'il n'était pas jugé responsable de cette pollution (citerne à fuites, gaz de benzène, maladies du voisinage) .

Ainsi donc, un terrain potentiellement pollué qui est mis en vente doit faire l'objet d'une investigation, préalable à la vente. S'il s'avère qu'il est le siège d'une contamination grave, le sol doit être dépollué. La vente est bloquée jusqu'à ce qu'une partie ait déposé un document stipulant que le sol va être dépolluer en précisant les délais et en présentant une garantie financière. Autrement dit, pour pouvoir réaliser la transaction immobilière, la dépollution doit être prévue, échelonnée dans le temps et financée, sur le papier.

Du fait de ce système, le Gouvernement doit effectuer ou ordonner très peu d'investigations de terrain lui-même ; c'est le propriétaire qui la fait réaliser afin de pouvoir conclure la vente. Le nombre de terrains ayant bénéficié d'une opération de dépollution a ainsi fortement augmenté. Pour le Gouvernement, ce système est donc peu coûteux tant en investigations qu'en opérations de dépollution, et favorable au Budget. Toute la problématique de gestion de sols pollués ou potentiellement pollués est ainsi régulée par la loi du marché.

Il existe toutefois des sites pour lesquels la situation est bloquée, car l'existence d'une pollution grave a été révélée après le démarrage des travaux, et le constructeur immobilier a abandonné le projet.

Le Gouvernement flamand peut s'intéresser à certains sites orphelins pour des raisons d'ordre économique ou politique. Il s'agit par exemple de sites situés à proximité des zones portuaires (Anvers, Gand, Bruges) ou dans des zones suburbaines (concernés par des projets d'extension, de construction de bâtiments d'habitation ou de services). Lorsque ces sites sont importants en taille, la dépollution est très coûteuse et ne peut être prise en charge par le seul Gouvernement. Dans ce cas, le Gouvernement cherche des partenaires désireux d'acquérir le site (pour une installation industrielle par exemple) ou de participer à un projet de re-développement du site (urbanisation par exemple). Le Gouvernement privilégie les partenaires publics tels que les collectivités territoriales (communes, Provinces, Régions). En l'absence de succès auprès des décideurs du secteur public, il se tourne vers les acteurs privés (entreprise industrielle ou du secteur tertiaire). Ainsi, les parties intéressées participent financièrement aux travaux de réhabilitation du site, aux côtés du Gouvernement. En combinant la dépollution à une opération d'acquisition ou de développement, les coûts de réhabilitation du site sont réduits de façon significative.

Il arrive également qu'un agrément sur la remédiation soit obtenu par le Gouvernement. Ainsi, un site industriel pollué peut être cédé au Gouvernement en même temps qu'une certaine somme destinée à couvrir partiellement le coût de la dépollution. Le Gouvernement peut ensuite proposer ce site à un acheteur potentiel qui pourra faire l'acquisition du site ou participer à son re-

développement s'il apporte la somme complémentaire nécessaire au financement de la dépollution du site. La transaction réalisée par le Gouvernement lui permet ainsi de faire réaliser des opérations de réhabilitation à peu de frais.

En effet, le budget alloué aux projets de dépollution des sols est limité et provient exclusivement de la taxe sur les déchets en vigueur en Flandre.

**Principaux experts contactés en Belgique**

Dr. Ludo Diels  
Responsable du Groupe de décontamination des sols  
Institut Flamand pour la Recherche Technologique (VITO), Flandre  
tél : 00 32 14 33 69 24, e-mail : [ludo.diels@vito.be](mailto:ludo.diels@vito.be)

Prof. Dr. Ir. Willy Verstraete  
Responsable du Laboratoire d'écologie et de technologie microbienne  
Université de Ghent, Flandre  
tél : 00 32 92 64 59 76, e-mail : [Willy.Verstraete@UGent.be](mailto:Willy.Verstraete@UGent.be)

Dr. Jaco Vangronsveld  
Responsable du Groupe de biologie environnementale  
Université de Limbourg, Flandre  
tél : 00 32 11 26 83 31, e-mail : [jaco.vangronsveld@luc.ac.be](mailto:jaco.vangronsveld@luc.ac.be)

Pr. Anne-Marie Corbisier  
Responsable de l'Unité de microbiologie (MBLA)  
Université Catholique de Louvain, Wallonie  
tél : 00 32 10 47 37 42, e-mail : [corbisier@mbla.ucl.ac.be](mailto:corbisier@mbla.ucl.ac.be)

Pr. Philippe Sonnet  
Responsable de l'unité des sciences du sol (SOL)  
Université Catholique de Louvain, Wallonie  
tél : 00 32 10 47 36 42, e-mail : [sonnet@sols.ucl.ac.be](mailto:sonnet@sols.ucl.ac.be)

Dr. Spyros Agathos  
Responsable de l'Unité de génie biologique (GEBI)  
Université Catholique de Louvain, Wallonie  
tél : 00 32 10 47 36 55, e-mail : [agathos@gebi.ucl.ac.be](mailto:agathos@gebi.ucl.ac.be)

Jean-Marc Aldric  
Assistant de recherche en Bio Industrie  
Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Wallonie  
tél : 00 32 81 62 23 11, e-mail : [aldric.jm@fsagx.ac.be](mailto:aldric.jm@fsagx.ac.be)

Bruno Campanelle  
Chargé de recherche en Biologie Végétale  
Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Wallonie  
tél : 00 32 81 62 24 68, e-mail : [campanella.b@fsagx.ac.be](mailto:campanella.b@fsagx.ac.be)

Dr. Christian Deley  
Co responsable du Centre pour la Recherche Environnementale (ERC),  
Flandre  
tél : 00 32 53 76 97 69, e-mail : [christian.deley@erc.be](mailto:christian.deley@erc.be)

Dr. Charles Gerday  
Responsable du Laboratoire de biochimie  
Université de Liège, Wallonie  
tél : 00 32 43 66 33 40, e-mail : [ch.gerday@ulq.ca.be](mailto:ch.gerday@ulq.ca.be)

Frédéric Zoller  
Directeur du Développement  
Deep Green SA, Bruxelles  
tél : 00 32 23 40 87 90

M .Victor Dries  
OVAM, (Openbare Afvalstoffenmaatschappij voor het Vlaams gewest)  
Société publique des Déchets pour la Région flamande  
Mechelen, Flandre  
mail : [victor.dries@ovam.be](mailto:victor.dries@ovam.be)  
tél: 00 32 15 284 490

### **13. Le Royaume-Uni : la recherche très dynamique**

Selon les estimations 2002 de l'Agence de l'Environnement, le Royaume-Uni compte plus de 300 000 hectares de terres potentiellement polluées et réparties sur 50 000 à 100 000 sites ; de plus, 5 000 à 20 000 de ces sites seraient des zones à haut risque. Il s'agit de sites contaminés par l'activité minière et industrielle. Ils nécessitent d'être nettoyés ou partiellement dépollués avant de pouvoir être réutilisés ou simplement pour réduire les risques.

Le coût de la réhabilitation des terres contaminées, évalué entre 10 et 20 milliards de livres, soit 15 à 30 milliards d'euros, est extrêmement élevé. C'est pourquoi l'Etat s'intéresse aux techniques biologiques moins onéreuses que sont la bioremédiation dans la rhizosphère et la phytoremédiation.

Selon un grand groupe suédois du secteur de la dépollution, le marché britannique de la décontamination des sols est particulièrement juteux et doit croître de façon à atteindre 34 milliards de dollars en 2010. Les mesures législatives transposant les directives européennes (directive sur les décharges), les taxes incitatives (taxe sur les décharges) et l'objectif du Gouvernement de construire 60 % de l'habitat neuf sur d'anciens sites pollués dans cadre d'une stratégie de long terme de réduction de la pollution expliquent cet engouement.

Par ailleurs, la recherche sur les techniques biologiques de dépollution des sols contaminés, bioremédiation et phytoremédiation est fortement stimulée par les questions de protection de l'agriculture, de qualité des produits agricoles et de sécurité de la chaîne alimentaire. Les structures gouvernementales impliquées dans le financement de la recherche sur les techniques de dépollution de sols sont nombreuses : il s'agit notamment du Département de l'Agriculture, du Département du Commerce et de l'Industrie, du Ministère de l'Environnement, de l'Agence de l'Environnement et de plusieurs Conseils de recherche, structurés par discipline.

Les programmes thématiques de soutien à l'innovation et les projets de recherche et développement stratégiques sont axés sur l'application industrielle des techniques biologiques et leur exploitation commerciale ; ils privilégient systématiquement les travaux pluridisciplinaires menés en collaboration par les laboratoires universitaires et les entreprises. Les financements alloués par le Gouvernement sont conséquents et témoignent de la volonté d'évaluer le potentiel d'utilisation des techniques biologiques pour une exploitation généralisée, à grande échelle.

- **Le BBSRC : recherche sur les microorganismes et les végétaux**

Le BBSRC (Biotechnology and Biological Sciences Research Council, BBSRC<sup>44</sup>), Conseil de recherche en biotechnologies et sciences biologiques, est la principale agence de financement de la recherche et de la formation académique dans le domaine des sciences biologiques à visée non médicale. Il soutient la recherche fondamentale sur les végétaux et les microorganismes.

Le BBSRC alloue 8 M£ par an (~ 12 M€) aux chercheurs des universités et de 8 instituts de recherche, dont il est le principal financeur. Parmi ces instituts, l'IGER (Institute of Grassland and Environmental Research) est dédié à la recherche en agriculture et environnement, le Rothamsted Research étudie l'agriculture végétale durable et l'environnement et le Silsoe Research Institute (SRI), est spécialisé dans l'ingénierie des biosystèmes appliqués à l'environnement, l'agriculture et l'agroalimentaire.



---

### **Le cas de l'Institut IGER au Pays de Galles**

En 1990, le BBSRC a fondé l'**IGER** (Institute of Grassland and Environmental Research) dédié à la recherche en agriculture et environnement. L'IGER a développé une expertise dans les technologies de transformation génétique des plantes et mis en place trois plate-formes : l'une consacrée aux biotechnologies, l'autre à l'environnement et la 3<sup>e</sup> à l'agriculture. Son Département des sciences du sol, de l'environnement et de l'écologie (SEES) étudie la gestion de l'environnement et des terres : les thématiques de recherche portent sur les interactions plante/microbe, les cycles de la nutrition, l'agroécologie, la qualité environnementale, etc. Les programmes de recherche de l'IGER sont soutenus par le Gouvernement à hauteur de 12 M£ par an.

En 2003, l'IGER a lancé un projet de bioremédiation, intitulé « Identification, contrôle génétique et évaluation des caractéristiques améliorant la qualité environnementale et la bioremédiation des prairies ». Financé par le DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) sur 4 ans (2003-2007), il vise à améliorer l'efficacité de la bioremédiation des sols contaminés aux métaux lourds. Dans le domaine de la phytoremédiation, l'IGER identifie des espèces végétales pour la détoxification de polluants spécifiques, compare l'effet de l'injection de polluants dans différentes espèces végétales, met au point des méthodes pour optimiser l'extraction des polluants, développe des génotypes originaux pour améliorer la phytoremédiation.

L'IGER est membre fondateur du Consortium sur la bioremédiation « BioPoll Cymru », qui associe l'Université Aberystwyth et le jardin botanique national du Pays de Galles. Le Consortium met en commun les diverses expertises pour traiter la pollution par bioremédiation et propose divers services : évaluation de l'impact des polluants, gestion de la végétation pour traiter les problèmes de pollution, identification de nouveaux microorganismes pour la bioremédiation, sélection et gestion de plantes,...

Ce Consortium a créé l'AberBioCentre (ABC), le biocentre d'Aberystwyth qui associe trois instituts de références en sciences biologiques et agricoles : l'IGER, l'Institut des sciences biologiques (IBS) et l'Institut des sciences rurales de l'Université du Pays de Galles. Employant 500 scientifiques et financé à hauteur de 20 M£ par an, ce biocentre est dédié à la recherche en physiologie végétale, phytoremédiation, microbiologie, biotechnologies.

---

Par ailleurs, le BBSRC finance des bourses universitaires, des bourses de thèse, des allocations de recherche ainsi que des initiatives thématiques et projets stratégiques.

- **BBSRC : LINK Bioremediation pour l'industrie de la dépollution**

Parmi les initiatives thématiques du BBSRC, le Programme LINK Collaborative Research promeut les projets de R&D menés en partenariat avec l'industrie : il prend en charge 50 % des fonds nécessaires à la réalisation de travaux collaboratifs dans des secteurs scientifiques clés.

Dans ce cadre, le Programme **LINK Bioremediation** a été lancé en 2001 afin de faciliter l'accès des entreprises de la dépollution aux approches pluridisciplinaires, indispensables au développement industriel et à l'application commerciale des sciences et techniques biologiques pour le traitement des sols, de l'eau et de l'air. Une sélection de 12 projets courant jusqu'à l'automne 2008 et d'un coût total de 10 M€€ (près de 15 M€) sont soutenus à hauteur de 5 M£ (7,5 M€).

Le Programme **LINK Bioremediation** est coordonné par deux membres du CLARRC (Contaminated Land Assessment & Remediation Research Centre, Centre de recherche pour

l'évaluation et la réhabilitation des terres contaminées), un centre écossais de recherche pluridisciplinaire sur les technologies durables de réhabilitation de l'environnement pollué et de promotion du transfert technologique vers l'industrie.

Les 8 projets concernant la décontamination des sols sont détaillés dans le tableau ci-après. Les principales thématiques retenues sont l'exploitation de l'atténuation naturelle, le développement des techniques de bioremédiation *in situ*, la bioremédiation en conditions réelles et l'évaluation des risques (impact sanitaire et socio-économique), les techniques combinées (association de la bioremédiation à d'autres technologies). Tous ces projets sont réalisés en laboratoire et en site pilote ; parmi les partenaires industriels figurent entre autres Shell Global Solutions, BP International, Dew Remediation Ltd, Pera Innovation Ltd (innovation technologique), Geosyntec Consultants Ltd (Géologie et gestion de l'environnement, Etats-Unis), etc.

Le Programme LINK Bioremediation est soutenu financièrement par l'Agence de l'Environnement ainsi que le Conseil de recherche en ingénierie et sciences physiques (EPSRC, Engineering and Physical Sciences Research Council). D'autres structures apportent leur soutien à un stade plus avancé, pour une approche par projet : le SEERAD (Département écossais pour l'Environnement et les Affaires rurales), les Conseils de recherche en médecine (MRC, Medical Research Council), en environnement (NERC, Natural Environment Research Council) et en économie (ESRC, Economic and Social Research Council). Le Gouvernement tient à disposition 7,5 M£ (11,25 M€) tout au long du programme (2001-2008) ; le ministère de l'Environnement (DEFRA) et ministère du Commerce et de l'Industrie (DTI) sont impliqués également.

---

### **Conditions générales de participation au Programme LINK**

Un projet de recherche doit remplir des critères spécifiques pour être sélectionné par le Programme LINK : il doit associer un partenaire industriel et un partenaire académique (les PME sont encouragées), être considéré comme pré-compétitif, conduire à des applications exploitables commercialement, faire l'objet d'un accord entre partenaires sur la propriété intellectuelle, proposer une stratégie détaillée définissant le rôle de chacun, etc. Les entreprises participant au Programme LINK bénéficient d'un soutien financier à l'innovation, de relations suivies avec les experts universitaires et de rencontres avec de jeunes diplômés, éventuels candidats au recrutement.

Le programme LINK a depuis été remplacé par d'autres formes de soutien aux projets menés en collaboration, comme par exemple le DTI Technology Programme, le Grant for Research & Development ou le Knowledge Transfer Partnerships.

---

**Programme LINK Bioremediation du BBSRC : huit projets spécifiques au traitement des sols**

Intitulé du projet	Période	Sujet	Structure(s)	Budget
SEREBAR	2002-2006	Bioremediation <i>in situ</i> des sols contaminés par du cyanure, des HAP et composés hétérocycliques en utilisant la technique des barrières perméables réactives	Université Queen's de Belfast	1,5 M£ (2,3 M€)
PASS	2002-2005	Phytoextraction des métaux lourds présents dans le sol sur une superficie de 700 ha.	Université de Nottingham	0,19 M£ (0,28 M€)
BIOPHYTO	2003-2005	Evaluation à grande échelle d'un procédé combiné de bioremediation / phytoremediation pour le traitement des sols contaminés aux hydrocarbures	Université de Greenwich	0,41 M£ (0,6 M€)
ISMOnACH	2003-2006	Mise au point d'une stratégie d'atténuation naturelle contrôlée en utilisant les empreintes digitales des éléments chimiques et en effectuant des analyses moléculaires	Université d'Essex	0 21 M£ (0,3 M€)
PROMISE	2004-2007	Optimisation d'un procédé de biopile pour traiter les sols contaminés par des hydrocarbures en y incluant un schéma de gestion des risques	Univ. de Cranfield, Centre de gestion intégrée des déchets	0,9 M£ (1,3 M€)
SABRE	2004-2008	Développement d'un procédé de bioremediation <i>in situ</i> des sols contaminés par des solvants chlorés en combinant aération des sols et bioaugmentation	implique le RU, les États-Unis, le Canada, dirigé par l'Université de Sheffield	2,9 M£ (4,3 M€)
BIOREM 45	2004-2005	Mise au point de tests permettant de prévoir la biodisponibilité du polluant selon la nature du sol, pour l'application à une technique de bioremediation contrôlée	Université de l'Anglia de l'Est	0,211 M£ (0,31 M€)
BIOREM 47	2005-2007	Développement de nouvelles techniques pour améliorer la phytoremediation du TCE	Université de Glasgow	0,4 M£ (0,59 M€)

○ **BBSRC : le Programme BIRE dédié à l'étude de la rhizosphère**

La bioremediation a été retenue également dans le cadre du **Programme BIRE** (Biological Interactions in the Root Environment), initié en 2001 par le BBSRC et son Comité des sciences végétales et microbiennes, et co-financé par le Département écossais des Affaires rurales (SERAD, Scottish Executive Rural Affairs Department). Ce Programme BIRE encourage lui aussi les approches pluridisciplinaires pour l'étude des interactions biologiques dans l'environnement racinaire, c'est-à-dire la rhizosphère. Cinq axes thématiques ont été retenus : la caractérisation des interactions biologiques, l'ingénierie de la rhizosphère, la transmission de signal, la dynamique des nutriments et la modélisation des populations de la rhizosphère, sachant que les résultats des travaux auront des applications en agriculture (amélioration des cultures, suppression des agents pathogènes, optimisation des rendements, ...) et dans la gestion des sols (protection, dépollution, stabilisation).

L'ingénierie de la rhizosphère doit permettre d'élucider les interactions plante/sol/microbe. Du point de vue de l'exploitation des résultats, il s'agit d'une part, de comprendre les mécanismes de

décomposition des polluants (composés organiques PCB, HAP, métaux lourds) afin d'élargir l'utilisation de la bioremédiation et de la phytoremédiation, et d'autre part, d'obtenir la suppression des agents pathogènes en développant des stratégies biologiques de protection des cultures.

Une vingtaine d'allocations de recherche ont été allouées pour une période de 3 ans environ dans le cadre du Programme BIRE. Plusieurs projets concernent la dépollution biologique des sols contaminés :

- 2001-2004 : Etude des interactions entre les organismes de la rhizosphère, Institut Ecosais de Recherche (£ 257 380, soit 378 800 €)

- 2001-2004 : Mise au point d'un bioréacteur utilisant les organismes de la mycorrhizosphère (champignons et bactéries) pour dépolluer des sols contaminés par des polluants organiques persistants (POP), Université d'Aberdeen (£ 220 252, soit 324 000 €)

- 2001-2004 : Développement d'une technique de rhizoremédiation des sols contaminés par des POP et modélisation des processus impliqués, Rothamsted Research (£ 187 392, soit 275 700 €)

- 2001-2003 : Etude de la transformation des métaux lourds dans la mycorrhizosphère et développement de technologies de rhizoremédiation des sols contaminés, Université de Dundee (£ 117 800, soit 176 300 €).

- **Le soutien du DTI aux biotechnologies et aux entreprises**

- *DTI : Le Programme BioWise pour les biotechnologies environnementales (1999-2004)*

En janvier 1999, le Département de l'Industrie et du Commerce (DTI) a lancé l'important Programme **BIO-WISE** (« Biotechnology at Work »), consacré aux biotechnologies industrielles et à leurs applications environnementales (protection de l'eau, de l'air, des sols, réduction des émissions et prévention des déchets). Il visait d'une part à soutenir le développement des sociétés de biotechnologies en stimulant l'innovation, et d'autre part à faciliter l'intégration des biotechnologies dans l'industrie britannique pour accroître sa compétitivité. Le DTI a investi M£ 14,5 (soit 21 M€) dans ce programme sur 4 ans, dont plus de 3 M£ (4,5 M€) alloués à des projets de démonstration.

Dans ce cadre, le projet de démonstration des **Techniques Biologiques de décontamination des terres** a été mené par l'Association pour l'information et la recherche de l'industrie de la construction (CIRIA). Ce projet sur 18 mois a bénéficié d'un budget de £140 000 (210 000 €) dont £35 000 alloués par BIO-WISE (52 000 €). Des exemples d'utilisation efficace, rentable et durable de procédés biologiques pour l'évaluation des risques et la réhabilitation des sols contaminés ont été présentés. Les techniques biologiques existantes et celles émergentes ont été décrites ainsi que les avantages liés à leur utilisation (coûts, efficacité, facilité de mise en œuvre). Les entreprises membres de l'Association ont co-financé le projet : AEA Technology, BP Amoco, Shell Global Solutions, la Fondation du Groupe BOC, Shanks Waste Services, Astra Zeneca. Cette démonstration a été l'occasion de publier une brochure sur les techniques de bioremédiation, d'y consacrer un numéro de la lettre d'information « BIOUS, Biotechnology at Work », et de mettre en place une foire aux questions sur la bioremédiation sur l'internet destinée à informer, sensibiliser et familiariser le public et les professionnels avec cette approche.

- **DTI : Le réseau FIRSTFARADAY (Oxford) pour une stratégie de recherche sur la dépollution des sols**

Le DTI finance également l'initiative FIRSTFARADAY<sup>45</sup> qui a pour mission d'une part de développer des méthodes et technologies de pointe pour la réhabilitation des sols contaminés, et d'autre part de créer un réseau de chercheurs universitaires, d'industriels et d'acteurs du transfert technologique et de la formation afin de positionner favorablement l'industrie britannique du traitement des sols et de l'eau sur le marché international. Depuis 2004, le réseau FIRSTFARADAY travaille à l'élaboration d'une stratégie de recherche sur dix ans pour concevoir et développer les outils et solutions du futur pour la gestion des sols contaminés. Il a l'intention de structurer le développement technologique et de répartir les projets de R&D de façon à privilégier les travaux de la recherche appliquée par rapport à la recherche fondamentale et à atteindre un ratio de l'ordre 80/20.

Les participants universitaires sont l'université d'Oxford, le Centre pour l'écologie et l'hydrologie d'Oxford (Centre for Ecology and Hydrology, CEH Oxford), l'une des 5 composantes du Conseil de recherche sur l'environnement (Natural Environment Research Council, NERC), l'université Queen's de Belfast, l'université Cranfield et les universités de Sheffield, de Aberdeen, de Nottingham. Les domaines d'expertise incluent l'atténuation naturelle, la biodisponibilité des polluants, la physiologie microbienne, l'écologie moléculaire, etc.

Ces laboratoires universitaires conduisent des travaux de R&D pluridisciplinaires et en partenariat avec l'industrie, privilégiant les projets à fort potentiel d'industrialisation et de commercialisation. Parmi les cinq projets phares, deux concernent la bioremédiation :

- IMPART : réponse microbienne indigène aux technologies de remédiation *in situ* (Indigenous Microbial Response to *In Situ* Remedial Technologies)
- IN-STEP : traitement *in situ* pour procédés de bioremédiation avancés (In Situ Source Treatment for Enhanced Bioremediation Processes)

### • **Un marché en pleine expansion**

Le marché britannique des technologies environnementales est constitué de plus de 7 000 entreprises évoluant sur un marché estimé à près de 19 milliards d'euros en 2000. En 2003, le secteur de la réhabilitation des sols était à lui seul évalué à plus d'un milliard d'euros.

Plus d'une quarantaine d'entreprises de dépollution ou de biotechnologies environnementales mettent en oeuvre principalement des techniques biologiques de dépollution des sols et de l'eau, dont par exemple :

- *AEA Technology Environnement* : traitement biologique des déchets organiques solides, des sols et eaux souterraines contaminées et des COV.
- *Arcadis Geraghty & Miller International Incorporated* : prestataire de services en phytoremédiation principalement.
- *Bio-Systems Corporation Ltd* : production de bactéries pour le traitement des sites industriels, municipaux, commerciaux.
- *Commercial Microbiology Ltd* : recherche microbiologique, optimisation de la croissance de souches bactériennes pour la bioremédiation *in situ*
- *Crow Bio Systems* : analyse des sites et bioremédiation des sites contaminés (métaux lourds, HAP, PCB, etc.)

- *Environmental Minerals Ltd* : phytoremédiation *in situ* des terres contaminées et utilisation des propriétés des systèmes microbiens
- *Oil Cleaning Bio-Products Ltd* : amélioration de la capacité des microorganismes à absorber les huiles
- *Response Bioremediation Ltd* : prestataire de services en technologies de bioremédiation des sites contaminés
- *Remedios Ltd* : utilisation de biocapteurs pour le diagnostic et la dépollution des sites, a mis au point plusieurs technologies brevetées (ex : le procédé Restore permet d'évaluer le potentiel de bioremédiation du site, d'identifier les contraintes du site à traiter et de définir une stratégie de bioremédiation).

En mai 2005, la société Market & Business Development a publié une importante étude de marché intitulée « UK Contaminated Land Treatment Market Development » qui estime le niveau de contamination des terres et le coût de la réhabilitation, toutes techniques confondues ; elle identifie les entreprises présentes sur le marché, détaille l'évolution du marché pour la période 1996-2005 (taille, segments, tendances) et évalue son potentiel de développement à l'horizon 2009.

### **Principaux experts contactés au Royaume-Uni**

Pr. David Lerner  
Responsable du Groupe "Protection et Restauration des eaux  
souterraines"  
Université de Sheffield  
tél : 00 44 11 42 22 57 25  
e-mail : [d.n.lerner@shef.ac.uk](mailto:d.n.lerner@shef.ac.uk)

Pr. David Werner  
Chercheur en chimie environnementale  
Université de Newcastle upon Tyne  
e-mail : [david.werner@newcastle.ac.uk](mailto:david.werner@newcastle.ac.uk)

Pr. Andy Meharg  
Professeur en Biogéochimie  
Université d'Aberdeen  
tél : 00 44 12 24 27 22 64  
e-mail : [a.meharg@abdn.ac.uk](mailto:a.meharg@abdn.ac.uk)

Dr. Fangjie Zhao  
Chercheur en phytoremédiation  
Centre Rothamsted Research  
e-mail : [fajjie.zhao@bbsrc.ac.uk](mailto:fajjie.zhao@bbsrc.ac.uk)

Peter Hurrell  
BBSRC  
tél : 00 44 17 93 41 46 80  
e-mail : [peter.hurrell@bbsrc.ac.uk](mailto:peter.hurrell@bbsrc.ac.uk)

## 2. La situation de la recherche en Amérique du Nord

L'évaluation de la situation internationale de la recherche menée sur les techniques biologiques de dépollution des sols passe par l'analyse de l'état de la recherche en Amérique du Nord. Le Canada et les Etats-Unis, fortement industrialisés, comptent de grandes étendues de sols pollués et les investigations menées sur l'exploitation de techniques biologiques, moins coûteuses, pour la réhabilitation des sites ont démarré bien plus tôt qu'en Europe.

### 21. Canada : le transfert technologique privilégié

Dans ce pays à forte activité industrielle, la pollution des sols concerne principalement les hydrocarbures issus de l'industrie pétrolière et les métaux lourds de l'exploitation minière. En 2003, plus de 30 000 terrains urbains contaminés par des hydrocarbures pétroliers ont été recensés (cf. Table Ronde Nationale sur l'Environnement et l'Economie, TRNEE).

Les structures gouvernementales s'impliquent financièrement : Environnement Canada, la Commission à l'environnement et au développement durable, le Conseil National de Recherche Canada (CNRC), la Table Ronde Nationale sur l'Environnement et l'Economie (TRNEE), le ministère de l'Environnement du Québec, etc.

Un Groupe de travail sur la gestion des lieux contaminés créé en 1995 et co-présidé par Environnement Canada et le ministère de la Défense Nationale réunit 15 ministères et agences fédéraux pour élaborer une approche fédérale de gestion des lieux contaminés et déterminer les coûts, responsabilités et risques.

Au Canada, les techniques biologiques commercialisées concernent essentiellement la bioremédiation bactérienne appliquée aux sols pollués par les hydrocarbures. Les laboratoires de recherche se focalisent sur les biotechnologies environnementales. Outre les importants travaux de recherche menés dans ce domaine, c'est le dynamisme des centres de transfert technologique qui retient l'attention.

- **Les travaux de recherche sur la bioremédiation et l'innovation**

Les travaux de R&D sur les techniques biologiques de réhabilitation des sols sont menés dans des laboratoires universitaires de renom, mais également dans les centres de recherche des grandes entreprises de dépollution.

Qu'il s'agisse de la recherche universitaire ou industrielle, les travaux misent sur l'innovation technologique et les projets de collaboration public-privé sont fréquents. L'accent est mis sur la pluridisciplinarité et certains projets de réhabilitation associent biologistes, chimistes, géologues, architectes, etc.

Les laboratoires des universités et grandes écoles allient les travaux de recherche fondamentale et de recherche appliquée et sont engagés dans des partenariats avec l'industrie. Si les thématiques de recherche concernent la bioremédiation et la bactériologie, la phytoremédiation et l'atténuation naturelle, les **biotechnologies environnementales** mobilisent les plus gros efforts.

Parmi les innovations récentes figurent par exemple les travaux suivants :

- L'Institut de recherche en biotechnologie met au point une biobarrière perméable semi-passive pour traiter les hydrocarbures pétroliers et conçoit des outils moléculaires de caractérisation et surveillance des sites contaminés
- L'Université McGill a conçu une méthode qui accélère le biotraitement de sols souillés par des polluants organiques



- L'Université de Waterloo parvient à stimuler la biodégradation des HAP par des cultures bactériennes (huile d'arachide)
- A l'INRS, l'Institut Armand-Frappier transforme les enzymes qui dégradent des polluants récalcitrants comme les PCB

Par ailleurs, l'université McGill a déposé 2 brevets sur la bioremédiation des sols contaminés en 2000 : l'un concerne le traitement des HAP et l'autre, déposé avec le Conseil National de Recherche du Canada (CNRC), porte sur l'utilisation d'enzymes microbiennes sur une pollution industrielle.

Une centaine d'entreprises canadiennes sont spécialisées dans l'assainissement des sols, parmi lesquelles une vingtaine de grands groupes mettent en œuvre des techniques biologiques, comme par exemple Biogénie Environnement, Dessau-Soprin, GAIA<sup>46</sup>, Jacques Whitfoord, Sodexen, SAIC Canada, etc. Il s'agit de techniques déjà anciennes telles le biosparging, le bioventing, les biopiles, le compostage.

Dans la recherche industrielle, les innovations concernent des procédés améliorant l'efficacité de la bioremédiation des sols pollués aux hydrocarbures essentiellement, dont voici des exemples :

- Biogénie a créé une plateforme technique de traitement en biopile *ex situ* pour traiter les hydrocarbures et des produits récalcitrants<sup>47</sup>
- Dessau-Soprin a élaboré un procédé de bioventilation *in situ*, ainsi qu'une technique de bioaspiration (« bioslurp »)
- Sodexen a conçu les procédés BIOTERRE *in situ* (hydrocarbures difficiles d'accès) et HAPPS de microorganismes dans un réacteur modulaire transportable pour un traitement rapide de HAP (3 semaines)
- TechnoRem Inc. : utilise diverses techniques de biostimulation et de bioaugmentation et développe des regroupements bactériens mieux adaptés aux milieux et polluants à traiter
- Bionetix Canada fabrique des produits à base de suppléments enzymatiques et bactériens pour la bioremédiation et la bioaugmentation
- Biorem Inc a mis au point des réacteurs à combustible en suspension pour les traitements *in situ*, des biopiles et du landfarming, pour traiter *ex situ* des HAP, huiles, essences, composés organiques volatils
- SiREM (jeune société) a développé le KB-1, une culture de plusieurs espèces de *Dehalococcoides sp.* pour stimuler la déchloration réductive.

Certaines entreprises réalisent d'importants investissements dans la R&D. GSI Environnement y investit annuellement 10 % de son chiffre d'affaires, et a ainsi développé des techniques de dépollution des sols. SAIC Canada possède un laboratoire de R&D et d'essais spécialisé dans le traitement de polluants organiques et inorganiques du sol et de l'eau. Sodexen dédie l'intégralité de son département de R&D au développement de technologies de dépollution des sols.

La plupart des entreprises (comme par exemple Hydro-Terra Inc., Biogénie Inc., TechnoRem Inc.) entretiennent des relations suivies avec le milieu académique pour encourager les initiatives novatrices et se tenir informées des développements scientifiques et technologiques récents.

**Le Canada se distingue par le fait que les technologies environnementales sont fortement promues par des structures dynamiques vouées au transfert technologique.**

- **Transfert technologique et démonstration**

Trois centres canadiens sont entièrement dédiés à l'avancement des technologies environnementales (CECATE) :

- Enviro-Accès : réseau d'experts pour l'innovation environnementale (Québec)
- OCETA : Centre d'Ontario pour l'avancement des Technologies Environnementales
- CETAC-West : Corporation Canadienne pour l'Avancement des Technologies Environnementales

Enviro-Accès soutien les entreprises et projets novateurs dans le domaine de l'environnement et du développement durable, en proposant quatre types de services :

- soutien stratégique : gestion, recherche de financement, commercialisation, veille technologique
- mise en réseau : organisation de rencontres d'affaires ciblées entre entreprises canadiennes et partenaires étrangers ou clients potentiels (Europe, Amérique du Sud)
- intervention et conseil : réalisation de plan d'affaires, de plan de communication, d'études de marché, support à la démonstration d'un procédé technologique, appui à la commercialisation internationale...
- promotion et information : répertoire d'entreprises, fiches techniques, programme de vérification des technologies environnementales VTE<sup>48</sup>

Les partenaires d'Enviro-Accès sont le Centre québécois de valorisation des biotechnologies (CQVB), des entreprises de dépollution des sols (Dessau-Soprin, GSI Environnement, J. Whitford Environment, etc.) et d'ingénierie environnementale (Groupe S.M. International, Tecslut Environnement) et des universités (Laval, Moncton, Sherbrooke, École polytechnique de Montréal)

L'OCETA et le CETAC-West sont les équivalents Enviro-Accès pour l'Ontario et l'Alberta.

- **Le Centre québécois de valorisation des biotechnologies, CQVB**

Le CQVB est un centre de liaison et de transfert (CLT) soutenu par le ministère du Développement économique et régional et le ministère de la Recherche du Québec. Il doit promouvoir l'innovation au sein des PME québécoises des bioindustries et accompagner le transfert des technologies issues de la recherche (universitaire, gouvernementale, privée), afin de concevoir de nouveaux produits ou procédés et générer de la richesse.

Le CQVB mène des activités de mise en relation et concertation stratégique des acteurs scientifiques, industriels et économiques, afin de créer un climat de confiance, propice à l'innovation. Des activités de veille et la diffusion de publications sur les biotechnologies présentent les résultats de la recherche et les équipes scientifiques au public et acteurs intéressés. Ainsi, le numéro de mars 2005 de sa revue *BioVeille* est consacré à la bioremédiation des sites contaminés (présentation des techniques, équipes et activités de recherche à l'international).

Le CQVB a également créé le Réseau Bio-Innovation réunissant chercheurs, industriels et acteurs économiques afin de créer des alliances, structurer des réseaux et mutualiser des ressources humaines et financières. Le gouvernement du Québec incite les entreprises à devenir membre d'un centre de liaison et de transfert (CLT) tel le CQVB, en leur accordant un crédit d'impôt de 50 % pour les services d'adaptation technologique (remboursable et non imposable).

Enfin, le CQVB organise des missions ciblées à l'étranger : avec le Ministère du Développement Économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE) il préparait une mission technologique au Japon, en septembre 2005, avec la visite de centres de recherche japonais et la participation au Global Venture Forum 2005, rencontres d'affaires programmées par la chambre de commerce d'Osaka.

- **Le Centre d'Excellence de Montréal en Réhabilitation de Sites, CEMRS**

Le CEMRS est une corporation à but non lucratif, fondée par la Ville de Montréal, le Gouvernement du Québec et le Gouvernement du Canada pour remplir deux missions : soutenir l'innovation technologique dans le domaine de la dépollution et réhabilitation de sites et promouvoir l'expertise industrielle dans ces domaines. C'est le lieu de rencontre privilégié des grands propriétaires fonciers, consultants, développeurs de technologies et centres de recherche.

**- Les sites de démonstration : promotion de la bioremédiation**

Des sites de démonstration sont mis en place par les centres Enviro-Accès et le CEMRS. Le réseau Bio-Innovation du CQVB (membre de Enviro-Access) mène des projets de démonstration sur des terrains pollués qui font intervenir diverses structures (privées ou publiques) partenaires du réseau.

En 2002, le CEMRS a achevé la construction d'une station expérimentale qui abrite une salle expérimentale comprenant trois espaces de démonstration (175 m<sup>2</sup> chacun), une vitrine technologique présentant les réalisations du Centre, des laboratoires (chimie, microbiologie, géotechnique), des équipements spécifiques de démonstration de projets pilotes, un laboratoire mobile pour la collecte d'échantillons et les travaux de terrain, des aires extérieures protégées et aménagées pour recevoir des sols contaminés ou pour des expérimentations. L'Institut Armand Frappier possède des bioréacteurs, des enceintes anaérobies, des équipements de PCR (Polymerase Chain Reaction).

- **Phytoremédiation : le soutien du ministère de l'environnement**

- *Une base de données consacrée aux métaux*

La Direction générale pour l'avancement des technologies environnementales d'Environnement Canada, a créé en 1999, PHYTOREM, une base de données électronique et interactive répertoriant 700 plantes, lichens, algues, champignons montrant un potentiel élevé d'accumulation de 19 métaux.

- *Les sites de démonstration*

A la fin des années 90, Environnement Canada a participé à plusieurs projets de démonstration de la viabilité de la phytorestoration sur des parcelles de terrain expérimentales et contrôlées. Ainsi, des chercheurs de l'Université de Colombie Britannique ont créé des jardins hydroponiques<sup>49</sup> servant à déterminer l'efficacité de diverses plantes pour l'élimination de métaux (Zn, Cd, As) à la mine Cominco à Trail (Colombie Britannique).

Certains laboratoires disposent d'équipements permettant de mener des travaux de recherche appliquée. L'IRB (cf. fiche Canada 1) possède une "usine pilote environnementale" dédiée aux études sur le terrain ainsi qu'une serre pour la recherche sur la phytoremédiation et l'écotoxicologie des plantes.

- **Diffusion des résultats et communication**

Au Canada, les thématiques de recherche et les résultats des travaux sont largement diffusés dans des publications spécialisées et des supports grand public. De plus les laboratoires de recherche comme les entreprises animent des sites internet très complets et actualisés régulièrement, qui présentent les activités, les actions menées, les projets de collaboration, et les succès obtenus comme par exemple les essais pilotes qui ont fait leur preuve, les sites dépollués dans le passé, etc.

Les acteurs canadiens de la dépollution, chercheurs et industriels se côtoient dans de nombreux ateliers de travail et colloques et interviennent dans les conférences internationales dédiées à la remédiation des sols et sédiments, comme par exemple :

- Consoil 2005 (France, octobre 2005)
- International Conference on Industrial Crops and Rural Development (Espagne, septembre 2005)
- BioJapan (Japon, septembre 2005)
- 3<sup>rd</sup> European Bioremediation Conference (Crète, juillet 2005)
- 15<sup>th</sup> Annual West Coast Conference on Soils, Sediments and Water (Etats-Unis, mars 2005)

## Principaux experts contactés au Canada

Charles Greer  
 Responsable du Groupe de Microbiologie Environnementale  
 Institut de Recherche en Biotechnologie (IRB), Montréal  
 tél : 00 1 (514) 496 6182, e-mail : [Charles.Greer@cnrc-nrc.gc.ca](mailto:Charles.Greer@cnrc-nrc.gc.ca)

Roland Brousseau  
 Responsable du Groupe de Génétique Environnementale  
 Institut de Recherche en Biotechnologie (IRB), Montréal  
 tél. : 00 1 (514) 496 6152, e-mail : [roland.brousseau@cnrc-nrc.gc.ca](mailto:roland.brousseau@cnrc-nrc.gc.ca)

James F. Barker  
 Responsable du Laboratoire de Chimie Organique et de Microbiologie  
 Environnementale  
 Université de Waterloo, Waterloo  
 tél : 00 1 (519) 888 4567 poste 2103, e-mail : [jfbarker@sciborg.uwaterloo.ca](mailto:jfbarker@sciborg.uwaterloo.ca)

Ken Reimer  
 Responsable du Groupe des Sciences Environnementales  
 Collège Militaire Royal du Canada, Kingston  
 tél : 00 1 (613) 541 6000 poste 6161, e-mail : [reimer-k@rmc.ca](mailto:reimer-k@rmc.ca)

Réjean Samson  
 Directeur Général du CIRAIG (Centre Interuniversitaire de Recherche sur l'Analyse  
 et la Gestion du Cycle de vie)  
 Ecole Polytechnique de Montréal, Québec  
 tél : 00 1 (514) 340 4898, e-mail : [rejean.samson@polymtl.ca](mailto:rejean.samson@polymtl.ca)

William W. Mohn  
 Responsable du Groupe Adaptation Bactérienne et Réponse à l'Environnement  
 Université de British Columbia, Vancouver  
 tél : 00 1 (604) 822 4285 (office) ou 5646 (labo), e-mail :  
[wmohn@interchange.ubc.ca](mailto:wmohn@interchange.ubc.ca)

Richard Villemur  
 Responsable du Groupe de Recherche en Microbiologie Environnementale  
 Institut National de Recherche Scientifique (INRS), Institut Armand Frappier (IFA),  
 Laval  
 tél : 00 1 (450) 687 5010, e-mail : [richard.villemur@inrs-iaf.quebec.ca](mailto:richard.villemur@inrs-iaf.quebec.ca)

Michel Lachance  
 Directeur Liaison Veille  
 Centre Québécois de Valorisation des Biotechnologies, Sherbrooke  
 tél : 00 1 (819) 823 2230 poste 21, e-mail : [michel.lachance@cqvb.qc.ca](mailto:michel.lachance@cqvb.qc.ca)

Gérald Zagury  
 Professeur au Département des Génies Civil, Géologique et des Mines  
 Ecole Polytechnique de Montréal, Québec  
 tél : 00 1 (514) 340-4711 poste 4980, e-mail : [gerald.zagury@polymtl.ca](mailto:gerald.zagury@polymtl.ca)

Nathalie Oulianova  
 Marketing et transfert de technologie  
 Institut de Recherche en Biotechnologie - Conseil National de Recherches Canada  
 IRB-CNRC, [www.irb-bri.cnrc-nrc.gc.ca](http://www.irb-bri.cnrc-nrc.gc.ca)  
 tél : 00 1 (514) 496-2732, e-mail: [Nathalie.Oulianova@cnrc-nrc.gc.ca](mailto:Nathalie.Oulianova@cnrc-nrc.gc.ca)

## 22. Etats-Unis : le marché de la dépollution comme moteur

Aux Etats-Unis, les techniques biologiques de traitement des sols pollués sont mises en oeuvre depuis plus de 20 ans et utilisées majoritairement pour dépolluer des terrains contaminés aux hydrocarbures pétroliers (déversements accidentels, sites d'exploitation, raffineries de pétrole, stations-service, etc.). Elles sont appliquées à des pollutions existantes, sur des terrains exploités par l'industrie pétrolière le plus souvent.

La bioremédiation des sols contaminés aux métaux a démarré plus tard, après l'application des techniques biologiques à un nombre croissant de types de polluants, tels les solvants, HAP, PCB et autres composés organiques. La recherche appliquée au traitement biologique des pollutions aux métaux lourds a mobilisé moins d'efforts.

- **Bioremédiation : priorité aux hydrocarbures**

- **La position de l'EPA**

Selon M. Steve Rock de l'EPA, la recherche aux Etats-Unis ne porte pas ou peu sur la découverte ou la mise au point de nouveaux microorganismes « super-efficaces », dotés de propriétés de dégradation exceptionnelles (« *super degrador* »). Cette approche n'est pas considérée comme porteuse au vu des problématiques des sols pollués spécifiques à l'Amérique du Nord. En revanche, elle est connue comme caractéristique des travaux de recherche menés au Brésil et en France notamment.

Dans le cadre du Réseau dédié au développement des technologies de remediation (*Remediation Technologies Development Forum, RTDF, lancé par l'EPA en 1992*) un Consortium sur la bioremédiation des solvants chlorés a été créé en 1993, constituant l'un des 8 groupes d'actions du RTDF. Il réunit des représentants de l'industrie, de l'université et d'agences gouvernementales (EPA, Department of Defense, DoD, Department of Energy, DoE) qui s'intéressent au développement de techniques de bioremédiation *in situ* pour les sols et nappes pollués par ces composés chimiques.

- **La recherche : focalisée sur la biostimulation**

Aux Etats-Unis, la recherche sur les techniques de bioremédiation appliquées aux hydrocarbures se focalise sur la détermination des conditions optimales de dégradation des hydrocarbures par les bactéries présentes dans le sol contaminé. L'efficacité et la rapidité de dégradation dépendant à la fois des caractéristiques du terrain concerné et des propriétés spécifiques des hydrocarbures impliqués, les travaux consistent à définir et à reproduire les conditions physico-chimiques de dépollution les plus appropriées à chaque cas particulier de pollution.

Considérant que les bactéries endogènes sont les meilleurs agents de dégradation existants, il s'agit de stimuler leur croissance en leur apportant les nutriments de base (oxygène, azote, phosphate), dans des concentrations et proportions idéales, leur permettant de produire de la biomasse et la meilleure activité possible.

En effet, les hydrocarbures sont ubiquitaires et les bactéries capables de les dégrader sont présentes partout également. De plus, l'ajout de nutriments à un terrain pollué est une pratique bien mieux acceptée par le public que l'apport de populations bactériennes exogènes.

Les travaux de recherche portent donc sur la création des conditions optimales et sur la mise en contact des bactéries dépolluantes avec des hydrocarbures, en facilitant le transfert des bactéries vers la nappe d'hydrocarbures ou, inversement, en facilitant l'accès des hydrocarbures vers la zone riche en bactéries endogènes.

Ainsi, par exemple, l'un des défis pour les chercheurs de l'EPA consiste à faciliter la rencontre entre les hydrocarbures et les bactéries dépolluantes dans des zones telles les mangroves ou les

terres marécageuses, saturées et pauvres en oxygène (excepté en surface) sans les détruire, sachant que la bioremédiation est une réaction aérobie. Il pose donc la question de la stimulation de la biodégradation en conditions anaérobies : faut-il acheminer l'O<sub>2</sub> vers les hydrocarbures ou faire remonter les hydrocarbures vers l'O<sub>2</sub> présent en surface ?

○ *L'application sur le terrain : une technologie d'appoint*

La bioremédiation qui utilise des microorganismes est mise en oeuvre par les compagnies pétrolières par la technologie de landfarming, pour dépolluer des sols contaminés aux hydrocarbures. Elle est appliquée le plus souvent en tant que technologie secondaire, c'est-à-dire pour affiner la dépollution réalisée au préalable par des techniques mécaniques ou physico-chimiques. Cette option est sélectionnée également en cas de pollution légère ou superficielle. Elle est plus longue à mettre en oeuvre que les techniques non biologiques mais bien moins coûteuse. La première utilisation de la bioremédiation date de 1989, pour le traitement des sols pollués lors de la catastrophe de l'Exxon Valdez qui a déversé du pétrole brut sur les côtes de l'Alaska.

● **Bioremédiation : l'application aux métaux**

○ *Les travaux de recherche : biodisponibilité des métaux*

Les travaux de recherche sur la bioremédiation des métaux *in situ* ont mobilisé moins d'efforts que ceux appliqués aux composés organiques, solvants, hydrocarbures. Ils concernent essentiellement deux thématiques :

- d'une part les interactions microorganisme-métal, c'est-à-dire les processus mis en oeuvre dans le processus de bioremédiation, les facteurs influençant la toxicité et le transport du métal (biotransformation, biosorption, bioaccumulation, biominéralisation),
- d'autre part les mécanismes mis en oeuvre par les microorganismes : oxydo-réduction, métabolisme du fer, volatilisation, etc.

D'une façon générale, il apparaît que ces dernières années, les travaux et la réflexion portent de plus en plus sur la question de la biodisponibilité des composés chimiques piégés dans le sol, l'interaction des composés polluants avec les éléments constitutifs du sol, le comportement des agents polluants résiduels, c'est-à-dire qui subsistent dans la matrice du sol après un traitement dépolluant du terrain et restent piégés dans le « réservoir » que constitue la structure du sol.

Ainsi, une importante revue bibliographique publiée par l'EPA en octobre 2003 et impliquant les grands experts du pays est intitulée « *Report on bioavailability of chemical wastes with respect to the potential for soil bioremediation* ». Elle fait le point sur les résultats obtenus par les travaux de bioremédiation et de phytoremédiation et analyse l'impact de ces traitements biologiques sur la réduction de la biodisponibilité des composés chimiques résiduels piégés dans le sol. Elle souligne l'importance de la prise en compte du **phénomène de biodisponibilité des polluants** résiduels et de la compréhension des mécanismes mis en jeu. La théorie développée est la suivante : sachant que la bioremédiation et la phytoremédiation ne permettent pas d'éliminer l'intégralité des polluants, il convient de prendre en compte la notion de biodisponibilité réduite des polluants dans la politique de gestion des sols pollués et la définition des objectifs de dépollution à atteindre ; ceci implique de développer des méthodes de mesure et de suivi de la biodisponibilité des polluants et de procéder à l'évaluation des risques pour la santé et l'environnement de la pollution résiduelle.

- **L'application sur le terrain : plus récente, moins fréquente**

Depuis les 15 dernières années, la bioremédiation est appliquée à un nombre croissant de catégories de polluants organiques, hydrocarbures, solvants, HAP, PCB, etc. Actuellement, les processus biologiques sont utilisés également pour traiter des sols pollués aux métaux lourds et contaminants radioactifs.

Les stratégies de bioremédiation déployées pour la pollution par les métaux consistent soit à faire agir des microorganismes pour solubiliser les métaux qui sont ensuite absorbés par des plantes (phytoremédiation), soit à faciliter l'immobilisation des métaux par des agents inoffensifs (biopolymères), ou encore à exploiter l'activité enzymatique des microorganismes pour transformer des métaux en substances moins toxiques, insolubles ou volatiles.

- **La phytoremédiation, technologie émergente**

Aux Etats-Unis, la phytoremédiation est considérée comme une technique de dépollution émergente qui fut proposée la première fois en 1980 et testée activement sur des sites de décharges de déchets au début des années 90. Les brevets relatifs aux techniques de phytoremédiation ont été déposés au milieu des années 90 (entre 1994 et 1998 sur la base de données de brevets de l'USPTO), à l'exception du plus récent qui a été enregistré en 2000.

La phytoremédiation est toujours en train de gagner l'acceptation du public. Rappelons que le potentiel de libération des polluants par les plantes par évapotranspiration et l'utilisation d'organismes génétiquement modifiés (OGM) dans les techniques environnementales constituent des limites de l'intérêt de cette technique et peuvent susciter la résistance du public.

- **La position de l'EPA**

En 1996, l'EPA a publié un premier guide sur la phytoremédiation destiné au grand public et visant à sensibiliser les citoyens avec cette technique innovante<sup>50</sup>. Un guide méthodologique élaboré par l'EPA est disponible également, qui décrit les conditions et modes de mise en œuvre de la phytoremédiation (Steve Rock, 1997).

A l'EPA, l'équipe dédiée à la phytoremédiation des composés organiques (*Phytoremediation of Organics Action Team*) a été créée en 1997, comme l'une des 6 équipes du Forum pour le Développement des Technologies de Remédiation (*Remediation Technologies Development Forum, RTDF*). Ce Forum avait été instauré dès 1992 pour stimuler la collaboration entre les secteurs publics et privés et promouvoir des solutions innovantes en réponse aux problèmes de pollution liés aux déchets dangereux. L'équipe dédiée à la phytoremédiation des composés organiques se compose de représentants de l'industrie, du gouvernement, de l'université qui soutiennent l'utilisation des végétaux pour la réhabilitation des sols et de l'eau.

Par ailleurs, l'Association for Environmental Health and Sciences (AEHS) a été créée en 1985 pour mettre en réseau les professionnels de la réhabilitation des sols, faciliter la communication et la coopération entre experts de la protection et de la dépollution des sols et supprimer les barrières pouvant cloisonner les disciplines. Elle compte actuellement 400 membres de la profession, représentant une grande variété de disciplines (biologie, géologie, chimie, hydrogéologie, ingénierie, etc.), issus des Etats-Unis et d'ailleurs.



○ **Les travaux de recherche : focalisés sur les végétaux...**

Aux Etats-Unis, les travaux de recherche sur la phytoremédiation portent essentiellement sur la caractérisation des espèces végétales (il existe plus de 200 000 espèces) et de leurs propriétés dépolluantes (accumulation, dégradation) ainsi que de la mise au point et l'optimisation des conditions de croissance et de décontamination (adjuvants, nutriments, fertilisation, agents chélateurs (EDTA), etc.), c'est-à-dire les conditions de biostimulation.

Ainsi par exemple, les travaux les plus récents publiés dans les derniers numéros de *International Journal of Phytoremediation* (2002-2004) décrivent majoritairement l'identification et les propriétés de végétaux présentant un intérêt : caractérisation des plantes hyper-accumulatrices (métaux), physiologie de plantes aux propriétés dépolluantes, criblage d'espèces végétales pour leur capacité d'absorption ou tolérance aux métaux, effet de divers paramètres sur l'efficacité de la phytoremédiation ou la tolérance du végétal au polluant (température, pH, oxygène, nutriments, agents chélateurs, etc.), efficacité de plantes transgéniques (plant de moutarde et selenium).

D'autres travaux, moins nombreux, portent sur les propriétés de la rhizosphère (sol associé aux racines et riche en microorganismes), l'effet d'un mycorhize (association symbiotique champignon/racines de végétal) sur la phytoextraction, la caractérisation d'un couple plante/microorganisme. Enfin, un article décrit la surexpression d'une enzyme (ATP sulfurylase, impliqué dans la synthèse de glutathione) et un autre concerne la bioingénierie des plantes.

○ **... ils pourraient être restructurés**

Mitch M. Lasat, de l'EPA, a publié en 2002, une évaluation de la recherche menée dans le domaine de la phytoextraction des métaux<sup>51</sup>. Partant du constat que le succès de la dépollution par phytoextraction dépend d'une part des divers facteurs caractérisant les trois des éléments impliqués, le métal, le sol et la plante (sévérité de la contamination, biodisponibilité du métal pour être assimilé par les racines, disponibilité de la plante à intercepter, absorber, accumuler le métal) et d'autre part des interactions complexes entre ces trois éléments métal/sol/plante, il préconise de considérer chaque cas de pollution comme une situation particulière, et d'adopter systématiquement une approche au cas par cas. Afin de dynamiser les travaux de recherche qui tardent à déboucher sur des technologies de phytoremédiation commercialisables, il suggère quatre axes de recherche à développer en priorité, pour élucider les mécanismes mis en jeu :

- les propriétés des microorganismes du sol et leur action sur le métal pour le rendre accessible au végétal : la catalyse de réactions d'oxydo-réduction modifiant la mobilité du métal dans le sol et sa biodisponibilité pour les racines des plantes, l'effet du mycorhize (association champignon/plante),
- la biodisponibilité du métal pour son assimilation par les racines : solubilisation du métal (exemple du plomb) dans le sol, facteurs limitants (insolubilité, fixation, précipitation dans le sol),
- les mécanismes physiologique et biochimique de remédiation au sein de la plante : leur compréhension permettant d'optimiser la dépollution par des pratiques agronomiques par exemple, d'identifier les gènes impliqués et d'améliorer les propriétés dépolluantes des plantes par les biotechnologies,
- l'amélioration des végétaux pour la dépollution de l'environnement, en utilisant les croisements et les biotechnologies : par exemple, les plantes hyper-accumulatrices étant généralement petites, elles sont croisées avec des plantes non accumulatrices de croissance rapide, productrices de biomasse.

De plus, cette analyse critique souligne que le succès des travaux de recherche et de la mise en œuvre de la phytoremédiation comme technologie de dépollution fiable et commercialisable dépendra de la capacité à développer une approche globale et une collaboration interdisciplinaire réunissant biologistes, chimistes, agronomes, microbiologistes, etc.

### ○ **Le financement de la recherche**

Les projets de recherche sont financés en grande partie par les agences gouvernementales. L'EPA, le Département de l'Agriculture (USDA), le Département de l'Energie (DoE), le Département de la Défense (DoD) et ses services financent des travaux de recherche sur la phytoremédiation dans le cadre de programmes plus généraux portant sur la réhabilitation des sols, le traitement des eaux ou la dépollution de l'air (comme par exemple, le programme *Natural and Accelerated Bioremediation Research Program*, NABIR lancé par l'Office of Biological and Environment Research (BER) de l'Office of Science du Department of Energy, DoE). Le fait que certaines agences (DoD) cherchent des solutions en réponse à des problèmes de pollution existants et qui nécessitent d'être traités, implique que le financement porte souvent sur des travaux de recherche appliquée et des situations de contamination concrètes. D'où la mise à disposition de terrains pollués pour la réalisation d'essais en conditions réelles et la vérification à grande échelle des résultats obtenus en laboratoire ou en serre.

C'est en Amérique du Nord que le nombre d'applications sur le terrain des techniques biologiques est le plus important et de loin : au total, le nombre de chantiers anciens et actuels serait compris entre 400 à 500 aux USA et au Canada, toutes activités confondues : dépollution de sites, expérimentations sur sites pilotes, démonstrations à échelle réelle, nettoyage volontaire (pétroliers et chimistes notamment), etc.

### ○ **L'application sur le terrain : les hydrocarbures privilégiés**

Comme pour la bioremédiation par les microorganismes, les travaux d'application sur le terrain de la phytoremédiation concernent essentiellement la décontamination de sols pollués par des composés organiques et des hydrocarbures. Ces chantiers d'application sont notamment le fait des grands groupes pétroliers British Petroleum (BP) et Chevron qui se sont lancés dans des programmes de réhabilitation de sites pollués basés sur l'utilisation de végétaux et la plantation d'arbres. Il s'agit le plus souvent de sites pollués par des déversements de pétrole ou des stations services. Les opérations consistent généralement à excaver les zones de terrain les plus polluées et à réaliser des plantations sur les zones avoisinantes, moins polluées.

Le nombre de chantiers ou sites d'application serait compris entre 100 et 150 sites, localisés aux USA essentiellement (quelques-uns au Canada, en Algérie).

Globalement, l'utilisation de la phytoremédiation se focalise sur trois applications majeures : le nettoyage de sols souillés par des composés organiques, la couverture de décharges ainsi que la décontamination des eaux souterraines (nappe phréatique).

### ○ **La phytoextraction<sup>52</sup> des métaux : une approche au cas par cas**

L'utilisation d'espèces végétales pour l'extraction des métaux des sols contaminés a connu quelques beaux succès aux Etats-Unis, qui sont toutefois relativement peu nombreux ; les plus célèbres concernent la phytoextraction de l'arsenic par les plants de moutarde (*Brassica*), la phytoextraction du plomb d'un ancien site industriel (Magic Marker Site, Trenton, NJ) et d'un quartier résidentiel (MA).

Selon Steve Rock, notre expert de l'EPA, les européens souhaiteraient voir davantage d'expériences réussies de l'application de la phytoextraction, la recherche financée par l'Union européenne misant particulièrement sur cette utilisation de la phytoremédiation (cf. COST 859, réunion en Italie, juin 2005).

Des progrès restent à réaliser afin de développer cette technologie alternative et de parvenir à un stade d'exploitation permettant sa mise sur le marché.

### o *L'industrie de la phytoremédiation*

Les entreprises spécialisées dans la phytoremédiation des sols ont vu le jour il y a une quinzaine d'années déjà, autour de 1990, et il en existe une vingtaine actuellement. Il s'agit souvent de petites entreprises créées par des chercheurs de l'université qui réalisent ainsi le transfert technologique des résultats de leurs travaux de laboratoire, et poursuivent quelques fois des projets de collaboration avec l'université. En voici quelques exemples :

- Thomas Consultants (Cincinnati, Ohio) depuis 1989 : phytoremédiation de composés organiques, atténuation naturelle, couverture de décharges, a intégré le groupe Civil & Environmental Consultants, Inc. (CEC, janv.2005).
- EcoloTree (North Liberty, Iowa) depuis 1990 : utilise des peupliers et des herbes, activités de couverture de décharges, de filtration de lixiviats, etc.
- Phytokinetics (North Logan, Utah), depuis 1994 : commercialise des peupliers et graminées, traite les hydrocarbures pétroliers (Total Petroleum Hydrocarbon, TPH), le crésote, TCE, BTEX...
- Edenspace (Dulles, Virginie), depuis 1998 : détenteur de plusieurs brevets, utilise notamment des fougères et traite les pollutions métalliques (As, Pb, Cr, U), a acquis en 1999 Phytotech Inc., pionner de la phytoextraction ; sa clientèle se compose à plus de 50 % d'agences fédérales.
- Applied Phytogenetics Inc. APGEN (Georgie, Massachusetts, David J. Glass, PhD.) : phytoremédiation, polluants chimiques et métaux lourds.

Outre les prestations de phytoremédiation, ces entreprises commercialisent des systèmes d'échantillonnage, des dispositifs de surveillance, de mesure, d'analyse de la pollution et d'évaluation des risques.

Par ailleurs, de grands groupes d'ingénierie proposent également des prestations et produits de phytoremédiation, parmi lesquels :

- ENSR International : Environmental & Energy Development Consulting Services (Westford, Massachusetts, un bureau en France)
- SAIC : Science Applied International Corporation
- CH2M Hill (Colorado, Canada, etc.) : phytoremédiation (sols, nappes)

Ces grands groupes sont présents dans les domaines de l'eau, de l'énergie, des déchets, des transports, etc., et leurs prestations consacrées à la phytoremédiation sont incluses dans les services environnementaux.

Les plus grands clients de ces entreprises de dépollution sont généralement les agences fédérales, c'est-à-dire l'EPA, le Department of Agriculture (USDA), le Department of Energy (DoE),

les services du Department of Defense (DoD), l'US Army Corps of Engineers, la NASA, etc., soit une quinzaine de structures au total.

La phytoremédiation est fréquemment utilisée pour la dépollution de sites dans le cadre du grand programme fédéral Superfund de l'EPA, dédié à la réhabilitation des sites pollués par les déchets industriels dangereux et lancé en 1980. Elle est également fréquemment mise en œuvre pour la dépollution des eaux souterraines, des terrains marécageux, des boues et eaux usées, des lixiviats de décharges, etc.

Le coût de la mise en œuvre de la phytoremédiation est bien moins élevé que celui des autres techniques disponibles, qu'elles soient physiques, chimiques, ou thermiques. Suivant les cas, ce coût ne représenterait que 20 à 50 % du coût des techniques classiques. Au vu du nombre et de l'étendue des sites pollués nécessitant d'être réhabilités, la taille du marché est considérable.

## Principaux experts contactés aux Etats-Unis

Steven A. Rock  
 Environmental Engineer, U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio 45268  
 tél : 001 (513) 569 7149, e-mail : [rock.steven@epa.gov](mailto:rock.steven@epa.gov), [Regional Workbench Consortium](#)

*The Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal, 2<sup>nd</sup> Edition, Harry Freeman ed., McGraw Hill, 1997*

Albert D. Venosa, Ph.D.  
 U.S. Environmental Protection Agency  
 National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH  
 tél : 001 (513) 569 7668, e-mail: [venosa.albert@epa.gov](mailto:venosa.albert@epa.gov)

Richard Schaffner, Jr.,  
 Senior Technical Specialist, GZA GeoEnvironmental, Inc., <http://www.gza.net>  
 Moderator, Bioremediation Discussion Group, <http://bioremediationgroup.org>  
 tél : 001 (603)623-3600, e-mail: [rschaffner@gza.com](mailto:rschaffner@gza.com)

Richard Schaffner, Jr., P.G., C.G.W.P  
 Senior Technical Specialist, GZA GeoEnvironmental, Inc., <http://www.gza.net>  
 Moderator, Bioremediation Discussion Group, <http://bioremediationgroup.org>  
 tél : 001 (603) 623 3600, e-mail: [rschaffner@gza.com](mailto:rschaffner@gza.com)

Mrs. Jean  
 Phytokinetics, Inc  
 North Logan, UT  
 tél : 001 (435) 750 6296

## Contexte et objectifs de l'étude

### Méthodologie

Chap. 1 : Les techniques biologiques de dépollution des sols

Chap. 2 : Sélection de cinq pays prioritaires

Chap. 3 : L'état de la recherche à l'international

**Chap. 4 : La situation de la recherche française à l'international**

Conclusions et recommandations

## Chap. 4 : La recherche française dans le contexte international

### 1. La situation en France

La France dispose de **deux bases de données** référençant les sites et sols pollués et mises à jour régulièrement :

- la base BASOL<sup>53</sup> sur les sites pollués par les activités industrielles a été établie en 1994 et doit être la « mémoire » des sites et sols pollués en France : elle prend en compte les accidents administratifs avérés et répertorie plus de 3 700 sites pollués en France (Carte des sites inventoriés par région mise à jour en février 2004).
- la base BASIAS, sur les sites anciens, mise en place en 1998<sup>54</sup> référence plus de 300 000 sites de pollution potentielle.

La pollution des sols est le fait d'une activité industrielle et agricole intensive. La France est notamment confrontée aux questions de la gestion de l'« après-mine » dans les anciens bassins miniers houillers du Nord-Pas-de-Calais, de Lorraine et du Centre-Midi, dans celui de potasse en Alsace ou dans les anciennes mines de fer de Lorraine. Les polluants majeurs sont les métaux lourds, hydrocarbures, solvants, pesticides.

Actuellement, **une vingtaine d'entreprises de dépollution ont été identifiées**, qui utilisent des techniques biologiques pour traiter des sols contaminés, parmi lesquelles Biogénie Europe, GRS Valtech, Apinor par exemple. Une dizaine de bureaux d'études spécialisés et cabinets de conseil ont été recensés également.

#### **• Une recherche française de qualité, basée sur la connaissance**

En France, une vingtaine de laboratoires consacrent leurs activités de recherche aux techniques biologiques de traitement des sols pollués.

Le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), l'INERIS (Institut National de l'environnement industriel et des risques) et le CNRSSP (Centre National de Recherche sur les Sites et Sols Pollués) sont les structures nationales qui viennent en appui à la politique publique de gestion des sols et orientent la recherche nationale dédiée à la caractérisation des pollutions et à la réhabilitation des sites pollués. Ils se consacrent plus particulièrement au développement de méthodes, d'outils et de connaissances utiles à la prise de décision.

Les travaux des laboratoires relèvent surtout de la recherche fondamentale. La recherche française est une recherche basée sur la connaissance et le savoir. La recherche appliquée est assez peu présente dans les laboratoires publics. La recherche menée par les entreprises de dépollution reste marginale, d'autant plus qu'il s'agit souvent de PME qui ne disposent pas de laboratoire de recherche.

Les thèmes de recherche sont très diversifiés et concernent tous les aspects de la dépollution biologique des sols, qu'il s'agisse de l'étude approfondie des microorganismes et plantes présentant des propriétés fixatrices et dépolluantes, de l'analyse géologique des sols et sous-sols ou de la caractérisation de la pollution et de son évolution dans le temps et l'espace.

Les techniques biologiques étudiées sont les suivantes :

- bioremédiation :
  - biodégradation
  - bio immobilisation
  - biolixiviation
  - bioslurry (traitement en bioréacteur)
  - biorestauration
  - bioaugmentation
  - biostimulation
- phytoremédiation :
  - phytoextraction
  - phytostabilisation
  - phytodégradation, phytostimulation
  - rhizodégradation
- combinaison d'organismes :
  - couplage bioremédiation / phytoremédiation

Parmi les pays étudiés, les Etats-Unis, le Canada et le Royaume-Uni se distinguent par le fait que les laboratoires se consacrent essentiellement à des travaux de recherche appliquée, menés généralement en partenariat avec l'industrie. Les laboratoires publics sont naturellement engagés dans de nombreuses collaborations avec les industries et les institutions gouvernementales. La valorisation industrielle et l'exploitation commerciale des résultats des travaux de recherche est l'objectif de nombreux projets de recherche et programmes thématiques.

#### • **Les techniques biologiques combinées pour innover**

En France, une douzaine de laboratoires mènent des travaux de recherche portant sur la bioremédiation des sols contaminés par une pollution organique ou métallique. Les pollutions mixtes sont assez peu étudiées. Comme dans les autres pays étudiés, la bioremédiation, la phytoremédiation et l'atténuation naturelle sont des techniques qui mobilisent les efforts de recherche. La France se distingue notamment par la conception de techniques biologiques combinées (telles que le couplage bioremédiation (bactérie ou champignon) / phytoremédiation).

La Belgique (Wallonie) et le Canada (Québec) misent plus particulièrement sur les biotechnologies environnementales. L'Allemagne et le Royaume-Uni semblent privilégier la phytoremédiation et l'atténuation naturelle. L'Allemagne a opté en particulier pour une approche concernant la valorisation énergétique de la biomasse générée par phytoremédiation, qui s'inscrit dans une politique de soutien au développement des énergies renouvelables. Le Royaume-Uni se penche notamment sur la compréhension des mécanismes complexes de la rhizosphère pour améliorer le potentiel et l'efficacité des végétaux comme agents de dépollution.

Aux Etats-Unis, les travaux de bioremédiation se concentrent davantage sur l'étude de la biostimulation (hydrocarbures pétroliers) et la biodisponibilité (métaux lourds) ; dans le domaine de la phytoremédiation, c'est la phytoextraction des métaux qui semble prévaloir et une approche multidisciplinaire du sol pollué, procédant au cas par cas a été préconisée.

- **Un réseau d'acteurs informel, à valoriser**

Il existe peu de grands projets de recherche menés en coopération entre les laboratoires identifiés. De la même façon, les laboratoires sont faiblement engagés dans des partenariats de recherche avec les industriels de la dépollution.

Néanmoins, le réseau des acteurs est bien existant : les laboratoires oeuvrant dans le domaine de la dépollution des sols se connaissent bien et les chercheurs ont de nombreuses occasions de rencontrer les industriels de la réhabilitation de sites contaminés, lors des nombreuses manifestations consacrées aux sols pollués, qu'ils s'agissent de colloques (Adebiotech, actions COST, ADEME en décembre 2002), de congrès (Consoil, Congrès de la Société Française du Génie des Procédés), de séminaires (ADEME, Intersol, Polytech'Orléans), de salons (Pollutec), d'ateliers divers (thématiques ou interrégionaux, comme par exemple les ateliers ADEME concernant la pollution à l'arsenic (avec le BRGM) et les HAP (avec le CNRSSP) ou encore le groupe thématique « Traitement des déchets et Sites Pollués » de la Société Française de Génie des Procédés<sup>55</sup>, etc.

Les principaux réseaux d'acteurs dédiés sont présentés ci-dessous :

- Le **GISFI**, Groupement d'Intérêt Scientifique pour les Friches Industrielles, est un consortium interdisciplinaire de 13 laboratoires de recherche publique de Lorraine (INPL, UHP, Universités de Nancy et de Metz, INRA, CNRS, INERIS, BRGM) spécialistes notamment en sciences de sol, en génie des procédés, en éco-toxicologie, en microbiologie, chimie, etc. Le propriétaire du site est Bail-Industrie (du Groupe Arcelor). Le GISFI a été retenu dans le cadre du Contrat de Plan État-Région au titre du volet "après mines".
- Le **PCSSP**, Pôle de Compétence Sites et Sédiments Pollués, a été créé en 1995 par l'Etat et le Conseil Régional du Nord Pas-de-Calais : il mène des projets de recherche et développe des outils d'aide à la décision pour gérer les sols pollués et accélérer la réhabilitation des friches industrielles.
- L'**UPDS**, Union Professionnelle des entreprises de Dépollution de Sites est un syndicat professionnel qui regroupe la plupart des entreprises spécialisées dans la réalisation d'études et de travaux relatifs aux sites pollués, soit une trentaine d'entreprises.
- L'**EEDEMS**, Evaluation Environnementale, Déchets, Matériaux, Sols pollués, est un GIS (Groupement d'intérêt scientifique) créé à l'initiative de 4 établissements publics de recherche : l'INSA de Lyon, l'ENTPE (Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat), le BRGM et le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). Il met en réseau les compétences, coordonne les programmes de recherche et dispose d'une plate-forme technologique pour l'expérimentation à l'échelle pilote. Les actions menées concernent des études de transfert des polluants, de modélisation des émissions de polluants, d'expertise et diagnostic de sites, etc.
- Le comité **Adebiotech** issu de la fusion d'Adebio et du Comité Biotech regroupe leurs expertises et réseaux pour créer des synergies publiques et privées et promouvoir les biotechnologies en France et à l'international. Le secrétariat et la logistique sont assurés par la Société de Chimie Industrielle (SCI), l'un des membres fondateurs.
- L'**AFES**, Association Française pour l'Étude des Sols, est une société savante qui œuvre pour le développement des connaissances du sol et de leurs applications. Elle réunit les personnes impliquées dans la protection des sols et traitant de questions environnementales, agronomiques, réglementaires, etc.



- La **SFGP**, Société Française de Génie des Procédés, est une association qui regroupe les acteurs professionnels du domaine du Génie des Procédés. Il s'agit de chercheurs, enseignants, industriels et équipementiers venant des divers secteurs d'activité (chimie, pétrole, pharmacie, agroalimentaire, papeterie, métallurgie, traitement des eaux et sols). Elle compte environ 500 membres.
- L'**UCIE**, Union des Consultants et Ingénieurs en Environnement, représente les intérêts des ingénieurs, experts, formateurs et consultants agissant dans les domaines d'activités professionnelles liés à l'environnement, depuis l'ingénierie spécialisée au conseil spécifique.

Par ailleurs, le ministère de l'Ecologie et du Développement durable (MEDD) propose un portail sur les sites et sols pollués ou radio-contaminés, à l'adresse [www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr](http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr) (anciennement <http://www.fasp.info/>) conçu en partenariat avec l'ADEME, le BRGM, l'INERIS et l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire). Il propose notamment de l'information sur la politique nationale, la réglementation, les programmes de recherche, un service de réponse aux questions fréquentes.

#### • **Les sites pilotes dans l'hexagone**

Qu'ils s'agisse de sites ateliers ou de sites de démonstration, les sites pilotes sont assez peu nombreux en France.

Pour les sites ateliers, le GIFSI (Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles, en Lorraine) est la principale référence en France. Le **GISFI** dispose d'infrastructures dédiées à la valorisation des travaux de laboratoires avec le site de la cokerie d'Homécourt et la station expérimentale. Il concentre ses activités autour des HAP et se distingue par son organisation multidisciplinaire, impliquant des laboratoires experts dans de nombreuses disciplines, pour une analyse intégrée des sols et des polluants.

Du point de vue de l'innovation dans le domaine des techniques de dépollution, le GISFI privilégie les techniques à faible impact sur le milieu et en particulier la phytoremédiation et l'atténuation naturelle. Les travaux expérimentaux sont menés en conditions réelles sur des parcelles équipées et les travaux d'application doivent se poursuivre en collaboration avec des industriels de la dépollution ; ils peuvent conduire à la mise en place de lieux de démonstration.

On notera également l'existence d'un site atelier en Gironde (12 hectares).

Par ailleurs, quatre autres sites pilotes ont été recensés en France, certains sont finalisés, d'autres en cours ou dans leur phase de démarrage.

#### ▪ **Le programme MACAOH**

L'ADEME a engagé un programme d'étude et de recherche sur le devenir des composés organo-halogénés (COH<sup>56</sup>) dans les aquifères, intitulé MACAOH (Modélisation, Atténuation, Caractérisation dans les Aquifères des Organo-Halogénés). Mené par un groupe composé du bureau d'études Burgéap et de trois organismes de recherche (l'Institut Français du Pétrole (IFP), l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), et l'IMFS/IFARE réunissant l'Institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg et l'Institut franco-allemand de recherche pour l'environnement) sur 4 ans (10/2001-11/2005), il a porté sur quatre thèmes : l'état des connaissances sur le devenir et le comportement des COH dans les aquifères, la caractérisation des zones sources<sup>57</sup> dans un aquifère, l'atténuation naturelle et la mise en

évidence des divers mécanismes de zones sources et la modélisation du devenir des COH et l'analyse critique des divers outils de calcul proposés.

Les expérimentations ont été réalisées à la fois en colonne, sur le bassin expérimental de SCERES (site contrôle expérimental de recherche pour la réhabilitation des eaux et sols, situé à l'IFARE à Strasbourg, bassin enterré et instrumenté de 25 x 12 x 3 m et reconstituant un aquifère alluvial) et sur deux sites réels.

Co-financé par l'ADEME, ce programme a abouti à l'élaboration d'un état de l'art et de trois guides méthodologiques sur les thèmes de la localisation/caractérisation des zones sources, de l'atténuation naturelle et de la modélisation.

#### ▪ **Le projet PHYTOSTAB**

Le projet PHYTOSTAB (Phytostabilisation) fait suite au projet européen PhytoDec (Phytoremédiation de sols et de sédiments de curage pollués par les métaux<sup>58</sup>, 2000-2004, coordonné par les Pays-Bas) auquel ont contribué l'ADEME, le CEA (phytoextraction) et le CNRSP (phytostabilisation) pour développer un outil d'aide à la décision (Decision Support System, DSS) pour le choix de techniques de phytoremédiation appliquées au traitement des sols et sédiments pollués par les métaux.

Destiné à évaluer la durée de l'efficacité des couples espèce végétale / additif sélectionnés dans le cadre du projet européen PhytoDec, le projet PHYTOSTAB utilisera le dispositif expérimental mis en place en mai 2002, à Lallaing (59), et constitué de 9 parcelles instrumentées réalisées à partir de sédiments de curage du canal de la Scarpe contaminés en métaux (Cd, Pb, Zn, Cu). PHYTOSTAB utilisera également les critères d'efficacité retenus dans le cadre du projet PhytoDec : bonnes performances des plantes (couverture végétale, croissance, densité racinaire et autres caractéristiques liées à la protection et à l'érosion du sédiment), faibles concentrations de métaux dans les extraits au nitrate de calcium et dans les eaux interstitielles, faibles concentrations de métaux dans les parties aériennes des plantes.

Les résultats du projet PHYTOSTAB compléteront les résultats obtenus dans le cadre du projet européen PhytoDec.

#### ▪ **Le projet DifPolMine**

Le projet DifPolMine (Diffuse Pollution from Mine activity, pollution diffuse des zones minières<sup>59</sup> du Programme LIFE Environnement<sup>60</sup>) vise à démontrer qu'une approche adaptée de la gestion des eaux de ruissellement polluées par des métaux (ou des métalloïdes) et de phytostabilisation des sols, réduit le transfert de pollution vers les eaux de surface, et qu'une telle approche permet de retrouver une bonne qualité des eaux et évite l'accumulation de sédiments pollués dans les rivières. Le projet veut également prouver que les coûts de réhabilitation peuvent être maîtrisés en optimisant le choix des techniques et des conditions de réalisation et en minimisant les conditions d'exploitation et de suivis ultérieurs.

Le projet comporte des ouvrages d'assainissement et de traitement d'eau spécifiques et la phytostabilisation progressive des zones de pollution diffuse évitera l'érosion des sols. Un suivi approfondi du système permettra d'adapter au fur et à mesure les systèmes et de minimiser le transfert de pollution au cours des épisodes pluvieux.

Le site de démonstration de La Combe du Saut se trouve à proximité de la mine d'or de Salsigne (Aude). Ont été réalisés sur ce site, une

revégétalisation du terrain et des essais de végétaux pour développer un protocole de traitement de pollution à l'arsenic. Ce gisement situé près de Carcassonne, dans l'Aude a été exploité de manière intermittente depuis 2000 ans, d'abord pour le fer et l'arsenic (1873-1910), puis pour l'or, depuis 1892.

En France, il n'existe pas de sites ateliers (hors GIFSI) et il est difficile de trouver des sites de démonstration ; ceux-ci ne sont mis à disposition que pour des courtes durées et dans le cadre d'accords de confidentialité souvent très contraignants, gênant la diffusion des résultats et empêchant de poursuivre les programmes de recherche ou de permettre l'accès aux sites pour d'autres équipes.

Aux Etats-Unis, des structures de l'Etat (le Département de l'Energie ou le Ministère de la Défense, par exemple) mettent à la disposition des chercheurs des sites pollués pour la réalisation d'essais à grande échelle et en conditions réelles et la validation des résultats des travaux de recherche obtenus en laboratoire. Ainsi, l'EPA dispose de grandes étendues de sites pollués mis à disposition des laboratoires pour l'expérimentation sur le terrain et le suivi de l'évolution des polluants et des microorganismes.

De la même façon en Allemagne, les quelques 60 projets retenus dans le cadre du programme KORA de recherche sur l'atténuation naturelle, sont menés sur des sites contaminés sélectionnés en fonction de la nature de la pollution. Ce programme doit aboutir à l'élaboration de procédés standards de remédiation.

En Belgique, l'université de Limbourg a accès à divers sites pollués pour ses expérimentations sur le terrain (anciens sites industriels contaminés aux métaux lourds, aire de jeux contaminée, etc.).

- ***Le transfert technologique français en panne***

Globalement, malgré un maillage dynamique des acteurs de la recherche et de l'industrie, les travaux de recherche appliquée, donnant lieu à des expérimentations pilotes à grande échelle (grandes colonnes, dispositif lysimétrique, etc.) et d'essais en conditions réelles, sur le terrain sont peu fréquents. Selon les chercheurs, nombreux sont les résultats de laboratoire obtenus dans le domaine de la bioremédiation et de la phytoremédiation des sols qui sont en attente d'une expérimentation en conditions réelles, sur le terrain. Les compétences et l'expérience des industriels experts de la réhabilitation de sites seraient volontiers mises à contribution.

En France l'ex-programme RITEAU devenu PRECODD a pour objectifs le partenariat entre la recherche et l'industrie ainsi que la promotion et le développement des écotecnologies. On soulignera toutefois le faible taux de réponse et d'engagement financier des éco-industries françaises dans ce programme.

Ce constat justifie en partie le fait que, malgré une recherche performante et des projets de qualité, le transfert de technologies développées en laboratoire dans le secteur industriel pour leur application sur le terrain et leur exploitation commerciale est peu efficace et le relais laboratoire / entreprise fonctionne mal.

D'autres pays assurent la promotion du transfert technologique avec succès. Ainsi par exemple, en Belgique, la DG TRE (Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie) de la Région wallonne soutient financièrement des projets de recherche appliquée, à visée commerciale, et menés obligatoirement en partenariat avec un industriel.

Au Canada, le Québec soutient plus particulièrement les centres de liaison et de transfert technologique qui assurent notamment la mise en réseau des acteurs, la veille technologique, l'aide au montage de dossiers de demande de financement, etc. Plus généralement, ces centres de liaison concentrent leurs actions sur la promotion et la valorisation des techniques environnementales ainsi que l'information et la communication en réalisant des documents

techniques facilitant la rencontre entre le milieu de la recherche et de l'entreprise et permettant des échanges efficaces entre les chercheurs et les industriels.

- ***La politique de la recherche en environnement***

La comparaison de la recherche française avec celle menée dans les autres pays étudiés met en évidence l'absence de grands programmes nationaux comme ceux lancés en Allemagne et au Royaume-Uni par exemple. En Allemagne, le ministère de la Recherche et le ministère de l'Economie ont lancé en 2002, le programme KORA de recherche appliquée menée sur divers sites contaminés par la pollution industrielle et sélectionnés dans les Länder (doté d'un budget de 15 M€ sur 5 ans). Au Royaume-Uni, l'ambitieux projet LINK Bioremediation pour la promotion des partenariats entre les laboratoires de recherche publique et les entreprises de dépollution et le transfert de technologies de traitement des sols est financé à hauteur de 50 % par le Conseil de recherche BBSRC. En France, le budget de PRECODD est de 8,5 M€ mais dans tous les domaines de l'environnement

Cette politique de la recherche en environnement et plus particulièrement dans le domaine de la réhabilitation de sites pollués est liée à la réglementation sur les déchets, et notamment à la transposition des directives européennes en droit national. Ainsi par exemple, au Royaume-Uni, la taxe sur la mise en décharge a été revue à la hausse régulièrement afin de décourager le recours au stockage en décharge et de favoriser les autres filières (dépollution, recyclage, incinération).

En Allemagne, le dumping sur les prix de mise en décharge pratiqué par les opérateurs de centres d'enfouissement a découragé le développement des autres filières de traitement des terres polluées. En revanche, il a permis aux opérateurs de remplir leurs centres d'enfouissement avant l'entrée en vigueur de la directive européenne sur les décharges, en juillet 2005, qui réserve la mise en décharge aux seuls déchets ultimes<sup>61</sup>. La perspective de l'application de cette nouvelle mesure a relancé les programmes de recherche et développement sur les techniques de dépollution des sols ayant un faible impact sur l'environnement.

Si les activités de recherche peuvent être stimulées par les obligations réglementaires et mesure législatives, inversement, les résultats des travaux de la recherche et l'innovation technique peuvent justifier et entraîner une révision de la réglementation, qui peut devenir plus stricte (application de nouveaux procédés de dépollution ou de suivi qui deviennent réalisables, et représentent ainsi les meilleures technologies disponibles). Ainsi, au Canada, les experts considèrent que la législation est alimentée en continu par les résultats des travaux de la recherche appliquée aux sols pollués. En Allemagne également, les autorités des Länder se basent sur les résultats des travaux menés sur le terrain et les recommandations des chercheurs pour faire évoluer la politique de gestion des terrains contaminés.

- ***Le financement de la recherche sur la dépollution des sols***

En France, l'ADEME intervient dans le cadre d'appels à candidature annuels pour l'attribution de bourses de thèse ou d'appels d'offres thématiques. Un budget de 1,3 M€ par an est prévu pour la recherche sur les sites et sols pollués. Il n'y a pas de sources de financement, à part PRECODD (et RECORD<sup>62</sup> dans une moindre mesure).

Dans les autres pays étudiés, le financement de la recherche sur les sols fait souvent intervenir divers ministères ou agences gouvernementales. En Allemagne, le projet KORA de recherche appliquée est co-financé par le ministère de la Recherche et le ministère de l'Economie.

Au Royaume-Uni, les grands programmes thématiques de recherche font intervenir la contribution de divers ministères ou structures gouvernementales ou publiques, comme par exemple le BBSRC (Biotechnological & Biological Sciences Research Council), le DEFRA (Department for Environment Food and Rural Affairs), l'Environment Agency, le DTI (Department of Trade and Industry), le National Assembly of Wales, Home Grown Cereals Authority, etc.

Aux Etats-Unis également, les structures publiques impliquées dans le financement de la recherche sont nombreuses : Agence de l'Environnement (USEPA), Département de l'Energie (DoE), Département de la Défense (DoD), Département de l'Agriculture (USDA), Fondation Nationale des Sciences (NSF), etc.

- **La communication et les sites de démonstration**

En France, il existe peu d'espaces de démonstration pour des expérimentations pilotes, des installations servant de vitrines technologiques pour des réalisations réussies ou de centre de valorisation des technologies innovantes.

De même, il existe peu d'actions de communication destinées à familiariser le public avec les résultats des travaux de laboratoire et leur potentiel d'application sur le terrain. La diffusion de ces informations peut servir à sensibiliser les acteurs et décideurs ainsi que le grand public aux nouvelles pratiques disponibles. (Cf Guide grand public de l'EPA sur la phytoremédiation de 1996).

D'une façon générale, il manque un vrai recensement des projets de remédiation des sols, français et internationaux, c'est-à-dire un état des lieux de l'existant.

## **2. Les points à améliorer : une organisation en réseau**

L'analyse comparative de l'état de la recherche dans le domaine des techniques biologiques de dépollution des sols dans six pays met en évidence les forces et faiblesses de la recherche publique française.

Si, dans ce contexte international, la recherche française affiche un niveau scientifique comparable aux autres pays étudiés, certains maillons de la chaîne de l'innovation nécessitent toutefois d'être renforcés en vue de faciliter l'application sur le terrain des techniques développées en laboratoire.

Certains aspects de la recherche gagneraient à être améliorés, comme la collaboration entre les laboratoires, le fonctionnement en réseau des acteurs, les expérimentations sur le terrain pour valider les résultats obtenus en laboratoire, l'accès à des sites pollués pour réaliser ces expérimentations, les projets pluridisciplinaires, etc.

Pour répondre efficacement aux besoins exprimés et apporter des solutions rapides aux problèmes identifiés, un plan d'actions prioritaires a été élaboré avec l'ADEME. Il propose quatre actions à mettre en œuvre à court et moyen terme :

- **Créer un réseau d'acteurs** français à partir du groupe de participants à l'atelier du 4 novembre 2005 organisé par l'ADEME. Ce réseau pourra être sollicité pour réaliser un guide méthodologique et faire un point sur l'état des connaissances acquises au laboratoire et sur le terrain ainsi que pour produire une brochure à destination du grand public présentant les techniques biologiques et leurs atouts. Il pourra également prendre part à des rencontres avec des représentants étrangers (Belgique (Flandre), Pays-Bas) pour échanger ou engager des partenariats
- Identifier les laboratoires français et les chercheurs désireux de participer aux séances de travail des quatre groupes thématiques organisées par l'Union européenne dans le cadre des **actions COST** (COST 859) qui réunissent 220 participants de 28 pays et se tiennent dans divers pays d'Europe

- Repérer en France **les sites pollués, susceptibles de servir de sites ateliers** pour l'expérimentation des techniques biologiques et la validation des résultats des travaux de laboratoire. Il conviendra également de revoir les conditions d'utilisation des sites ateliers pour davantage de souplesse (responsabilité, sécurité, durée d'exploitation, interactions entre utilisateurs...)
- Effectuer un recensement des **opérations de démonstration** existantes en France, en Europe (notamment de l'Est) et à l'international et identifier les équipes scientifiques impliquées. Il conviendra de se pencher sur les modes de financement de ces opérations et de s'inspirer des formules réussies, transposables en France.

Certaines actions sont réalisables très rapidement en quelques mois, d'autres nécessiteront un délai d'un an et plus.

## Contexte et objectifs de l'étude

### Méthodologie

Chap. 1 : Les techniques biologiques de dépollution des sols

Chap. 2 : Sélection de cinq pays prioritaires

Chap. 3 : L'état de la recherche à l'international

Chap. 4 : La situation de la France à l'international

### Conclusions et recommandations

## Conclusions et recommandations

### *Un réseau - Des sites pilotes*

En France, les laboratoires qui travaillent sur les techniques biologiques de dépollution des sols sont reconnus pour leurs compétences et la qualité de leur recherche à l'international. En Europe, la France se place en 3<sup>e</sup> position derrière l'Allemagne et les Pays-Bas en nombre de travaux scientifiques publiés. Dans plusieurs pays, des responsables de laboratoires se montrent intéressés par des projets de collaboration avec les équipes françaises.

Les laboratoires français sont davantage impliqués dans des programmes de recherche fondamentale que de recherche appliquée (certains résultats de laboratoire attendent d'être validés sur le terrain). Les travaux menés en partenariat avec l'industrie sont plutôt nombreux, mais particulièrement discrets.

Dans une perspective de soutien et de promotion des travaux de recherche destinés à faire émerger de nouvelles techniques biologiques de traitement des sols pollués, plus performantes et plus rapides, il convient **d'encourager la recherche technologique et de faciliter le transfert des technologies** de la recherche vers l'industrie, des laboratoires vers les entreprises de dépollution.

A cet effet, il est indispensable de faciliter l'accès des chercheurs à des sites pollués afin qu'ils puissent tester sur le terrain et en conditions réelles les résultats obtenus à l'échelle du laboratoire et optimiser les protocoles pour l'utilisation efficace des techniques biologiques. Il convient de prévoir à la fois des sites ateliers pour les expérimentations de long terme et des sites pour les opérations de démonstration. La mise à disposition de sites pollués est une étape délicate qui soulève notamment des questions juridiques concernant les conditions de responsabilité et de sécurité du site et des personnes ou encore les modalités d'accès au site et fait intervenir de nombreux organismes, telles les autorités administratives (collectivités territoriales) et réglementaires (DRIRE<sup>63</sup>, DPPR<sup>64</sup>). Elle pose également la question du financement à court et long termes et celle de la coopération entre les divers utilisateurs du site, autant d'aspects qu'il faudra aborder pour convenir d'un mode de fonctionnement acceptable et faciliter les démarches pour les laboratoires et les chercheurs.

La **mise en réseau** des chercheurs français spécialistes de la bioremédiation et de la phytoremédiation s'avère nécessaire afin de décloisonner les deux disciplines, de créer des synergies, de faciliter la « fertilisation croisée » et de préparer un terrain favorable à l'innovation. Elle permettra également les rencontres entre les chercheurs de renom, experts du domaine depuis des décennies, et les jeunes chercheurs qui travaillent dans des laboratoires plus petits, plus récents, moins connus. Ce réseau devra également provoquer des rencontres avec des experts étrangers, afin d'échanger les connaissances et les savoir-faire et d'engager des collaborations et partenariats.

Par ailleurs, le maillage de réseaux d'acteurs et de compétences pourra stimuler le lancement de projets de coopération internationale dans des pays en développement où les sols pollués menacent la santé et l'environnement.

## Principaux experts contactés en France

Francis Douay  
 Responsable du Laboratoire Sol et Environnement  
 Institut Supérieur d'Agriculture (ISA), Lille  
 tél : 00 33 (0)3 28 38 46 08  
 e-mail : [f.douay@isa-lille.fr](mailto:f.douay@isa-lille.fr)

Thierry Lebeau  
 Responsable du Laboratoire Gestion des Risques et Environnement (antenne de Colmar)  
 Université de Haute Alsace (UHA), Colmar  
 tél : 00 33 (0)3 89 20 31 35  
 e-mail : [thierry.lebeau@uha.fr](mailto:thierry.lebeau@uha.fr)

Remy Gourdon  
 Responsable du Laboratoire d'Analyse Environnementale des Procédés et Systèmes Industriels (LAEPSI)  
 Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Lyon  
 tél : 00 33 (0)4 72 43 87 53  
 e-mail : [remy.gourdon@insa-lyon.fr](mailto:remy.gourdon@insa-lyon.fr)

Corinne Leyval  
 Responsable du Laboratoire des Interactions Microorganismes-minéraux-matières Organiques dans les Sols (LIMOS)  
 Université Henry Poincaré, Nancy  
 tél : 00 33 (0)3 83 68 42 82  
 e-mail : [Corinne.Leyval@limos.uhp-nancy.fr](mailto:Corinne.Leyval@limos.uhp-nancy.fr)

Anne Grandmougin-Ferjani  
 Co-Fondatrice du Laboratoire Mycologie, Phytopathologie, Environnement (LMPE)  
 Université du Littoral et Côte d'Opale (ULCO), Nord-Pas de Calais  
 tél : 00 33 (0)3 21 34 81 95  
 e-mail : [grand@univ-littoral.fr](mailto:grand@univ-littoral.fr)

Pirouz Shirali  
 Responsable du Laboratoire de Recherche en Toxicologie Industrielle et Environnementale (LRTIE)  
 Université du Littoral et Côte d'Opale (ULCO), Nord-Pas de Calais  
 tél : 00 33 (0)3 28 23 76 10  
 e-mail : [Pirouz.Shirali@univ-littoral.fr](mailto:Pirouz.Shirali@univ-littoral.fr)

Michel Mench  
 Directeur des recherches INRA, membre de l'équipe Ecologie des Communautés, UMR BIOGECO (Biodiversité Gènes et Ecosystèmes)  
 Université Bordeaux 1, Bordeaux  
 tél : 00 33 (0)5 40 00 31 14  
 e-mail : [mench@bordeaux.inra.fr](mailto:mench@bordeaux.inra.fr)

Patrick Billard  
 Chercheur en microbiologie au Laboratoire Ecotoxicité, Santé Environnementale (ESE)  
 Université Paul Verlaine, Metz  
 tél : 00 33 (0)3 87 37 85 13  
 e-mail : [billard@sciences.univ-metz.fr](mailto:billard@sciences.univ-metz.fr)



Thierry Blondel  
 Cabinet Conseil Blondel  
 Villeurbanne  
 tél : 00 33 (0)4 72 44 27 38  
 mobile : 06 61 10 96 75  
 e-mail : [tblondel@ccblondel.com](mailto:tblondel@ccblondel.com)

Alain Schouff  
 Chargé de mission  
 Agence Rhône Alpes pour le développement des technologies médicales et  
 biotechnologies (ARTEB), Lyon  
 tél : 00 33 (0)4 37 37 85 81  
 e-mail : [aschouff@arteb.com](mailto:aschouff@arteb.com)

Jean-Louis Morel  
 Responsable du Laboratoire Sol et Environnement  
 ENSAIA - INRA, Nancy  
 tél : 00 33 (0)3 83 59 58 47  
 e-mail : [jean-louis.morel@ensaia.inpl-nancy.fr](mailto:jean-louis.morel@ensaia.inpl-nancy.fr)

Jean-Marie Come  
 Service Recherche et Développement  
 Burgeap, Lyon  
 tél : 00 33 (0)4 37 91 20 50  
 e-mail : [jm.come@burgeap.fr](mailto:jm.come@burgeap.fr)

Ioannis Ignatiadis  
 Chercheur en biotechnologie  
 BRGM, Orléans  
 tél : 00 33 (0)2 38 64 35 59  
 e-mail : [i.ignatiadis@brgm.fr](mailto:i.ignatiadis@brgm.fr)

Bénédicte Couffignal  
 Association RECORD, Lyon  
 tél : 00 33 0(4) 72 43 81 88  
 e-mail : [benedicte.couffignal@record-net.org](mailto:benedicte.couffignal@record-net.org)

Frédéric Périé  
 Service Environnement au Pôle de Recherche et Développement Mont Lacq  
 Total Petrochemicals France  
 tél : 00 33 (0)5 59 92 68 36  
 e-mail : [frederic.perie@total.com](mailto:frederic.perie@total.com)

Frédéric Monot  
 Direction Chimie et Physico-chimie Appliquée, Département Biotechnologie et Chimie de  
 la Biomasse  
 Institut Français du Pétrole (IFP)  
 tél : 00 33 (0)1 47 52 73 53  
 e-mail : [frederic.monot@ifp.fr](mailto:frederic.monot@ifp.fr)

Frank Haeseler  
 Project leader "Management of Contaminated Sites"  
 Institut Français du Pétrole (IFP)  
 tél : 00 33 (0)1 47 52 64 04  
 e-mail : [frank.haeseler@ifp.fr](mailto:frank.haeseler@ifp.fr)

Michel Chalot  
 Responsable UMR1136 INRA Interaction Arbres Microorganismes, Faculté  
 Sciences et Techniques  
 Université Henry Poincaré, Nancy I  
 tél : 00 33 (0) 3 83 68 42 38  
 e-mail : [Michel.Chalot@scbiol.uhp-nancy.fr](mailto:Michel.Chalot@scbiol.uhp-nancy.fr)

Olivier Faure  
 Laboratoire d'Ecophysiologie Appliquée (LEPA)  
 Université Jean Monnet, Saint Etienne  
 tél : 00 33 (0)4 77 48 15 85  
 e-mail : [faure@univ-st-etienne.fr](mailto:faure@univ-st-etienne.fr)

Alexandra FRESNEAU  
 Site et Concept  
 Phytorestore, Paris  
 tél : 00 33 (0)1 43 72 99 89  
 e-mail : [a.fresneau@phytorestore.com](mailto:a.fresneau@phytorestore.com)

Thierry Jacquet  
 Directeur  
 Phytorestore, Paris  
 tél : 00 33 (0)1 43 72 38 00  
 e-mail : [t.jacquet@phytorestore.com](mailto:t.jacquet@phytorestore.com)

Valérie Bert  
 Chercheuse en Phytoremédiation  
 Centre National de Recherche sur les Sites et Sols Pollués (CNRSSP), Douai  
 tél : 00 33 (0)3 27 71 26 90  
 e-mail : [bert@cnrssp.org](mailto:bert@cnrssp.org)

Agnès Laboudigue  
 Directrice adjointe  
 Centre National de Recherche sur les Sites et Sols Pollués (CNRSSP), Douai  
 tél : 00 33 (0)3 27 71 26 82  
 e-mail : [laboudigue@cnrssp.org](mailto:laboudigue@cnrssp.org)

Stephane Vuilleumier  
 Equipe de microbiologie de l'environnement  
 Dynamique, évolution et expression de génomes de microorganismes, FRE2326  
 ULP - CNRS  
 Université Louis Pasteur (ULP) Strasbourg c  
 tél : +33-3-90-24-2022  
 e-mail : [vuilleumier@gem.u-strasbg.fr](mailto:vuilleumier@gem.u-strasbg.fr)

Annie Siboni  
 Attachée Commerciale  
 Germe SA, Marseille  
 tél : 00 33 (0)4 95 05 12 56  
 e-mail : [Germe@wanadoo.fr](mailto:Germe@wanadoo.fr)

Pr. Jean-Michel Ballester  
 Responsable scientifique  
 Germe SA, Marseille  
 tél : 00 33 (0)4 95 05 12 56  
 e-mail : [Germe@wanadoo.fr](mailto:Germe@wanadoo.fr)

Fabrice Poutier  
 Biobasic Environnement, Clermont Ferrand  
 tél : 00 33 (0)4 73 40 53 15  
 e-mail : [fpoutier@biobasicenvironnement.com](mailto:fpoutier@biobasicenvironnement.com)

Julien Troquet  
 Biobasic Environnement, Clermont Ferrand  
 tél : 00 33 (0)4 73 40 53 15  
 e-mail : [jtroquet@biobasicenvironnement.com](mailto:jtroquet@biobasicenvironnement.com)

Hervé Montclair  
 Biogenie Europe, Paris  
 tél : 00 33 (0)1 34 41 73 00

Jean-Michel Brun  
 Directeur Général Adjoint  
 GRS Valtech  
 tél : 00 33 (0)4 72 09 80 80  
 e-mail : [jmbrun@cgea.fr](mailto:jmbrun@cgea.fr)

Mathieu Calibre  
 Responsable marketing  
 Brezillon  
 tél : 00 33 (0)3 44 30 46 08  
 e-mail : [m.calibre@brezillon.fr](mailto:m.calibre@brezillon.fr)

Jean-Georges Heintz  
 Directeur Stratégique  
 SNCF  
 e-mail : [jean-georges.heintz@sncf.fr](mailto:jean-georges.heintz@sncf.fr)

Vincent Auriat  
 Direction de l'Ingénierie  
 SNCF  
 tél : 00 33 (0)1 41 62 01 99  
 e-mail : [Vincent.AURIAT@sncf.fr](mailto:Vincent.AURIAT@sncf.fr)

Bruno Paul-Dauphin  
 Remediation Management  
 BP France  
 tél : 00 33 (0)1 34 22 40 77  
 e-mail : [bruno.paul-dauphin@fr.bp.com](mailto:bruno.paul-dauphin@fr.bp.com)

Jean-Philippe HERMINE  
 Direction de la Politique Environnement  
 Renault  
 tél : 00 33 (0)1 76 85 80 91  
 e-mail : [jean-philippe.hermine@renault.com](mailto:jean-philippe.hermine@renault.com)

Roger Jacquet  
 Solvay France  
 e-mail : [Roger.Jacquet@solvay.com](mailto:Roger.Jacquet@solvay.com)

Pascale Bridou  
 Société de Chimie Industrielle (SCI)  
 e-mail : [pascale.bridou@wanadoo.fr](mailto:pascale.bridou@wanadoo.fr)

Danielle Lando  
Société de Chimie Industrielle (SCI) et vice-présidente du Comité Adebitech  
tél : 00 33 (0)6 03 98 05 45  
e-mail : [danielle.lando@free.fr](mailto:danielle.lando@free.fr)

### **Expert contacté en Suisse**

Dr. Jean-Paul Schwitzguébel  
Labo. Biotechnologie Environnementale, Ecole polytechnique fédérale Lausanne  
(EPFL)  
tél : +41 21 693 47 37, e-mail : [jean-paul.schwitzguebel@epfl.ch](mailto:jean-paul.schwitzguebel@epfl.ch)  
Président de l'action COST 837, membre de COST 859