

AMBASSADE DE FRANCE AUX ETATS-UNIS

MISSION POUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE

CONSULAT GENERAL DE SAN-FRANCISCO

LA PHYTOREMEDIATION

Jean Louis MOREL

René MOLETTA

Stéphane ROY

RAPPORT DE

Jean Louis MOREL

Directeur du Laboratoire associé Sols et Environnement

ENSAIA-INRA, Nancy¹

René MOLETTA

Directeur de Recherche

Directeur du Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement

INRA, Narbonne²

Stéphane ROY

Attaché pour la Science et la Technologie

San Francisco³

¹ 2, avenue de la Forêt de Haye. 54505 Vandoeuvre les Nancy Cedex. Tél: 03.83.59.58.47. Fax: 03.83.59.57.91.
email: Jean-louis.morel@ensaia.inpl-nancy.fr

² Avenue des Etangs, 11100 Narbonne. Tél: 04.68.42.51.52, fax: 04.68.42.51.60. email: moletta@ensam.inra.fr

³ Consulat Général de France. 530 Bush Street. San Francisco, CA, 94108. Tél: 415.397.4440. Fax: 415.397.9947.
email: stephane.roy@diplomatie.fr. Site web: <http://www.france-science.org>

RESUME

Ce rapport présente les résultats d'une mission d'étude organisée par la Mission pour la Science et la Technologie pour évaluer l'importance de la phytoremédiation dans la stratégie de la réhabilitation environnementale aux Etats-Unis. La phytoremédiation est une technologie qui utilise les propriétés des plantes pour nettoyer et réhabiliter des sites contaminés. Elle est utilisée pour différents polluants et dans différentes conditions. Basée sur des entretiens avec des professeurs d'Universités, des présidents de sociétés de biotechnologie et des directeurs scientifiques de l'industrie pétrochimique, cette mission s'est intéressée aux aspects technologiques (efficacité et coût du traitement, comparaison avec d'autres méthodes biologiques et physiques, recherches conduites pour améliorer l'efficacité de la phytoremédiation) et économiques (marché offert à la phytoremédiation dans le gigantesque projet de réhabilitation des sols contaminés aux Etats-Unis).

Il ressort de cette étude que

- *la phytoremédiation est une technologie émergente qui devrait s'imposer comme une méthode efficace de réhabilitation des sols contaminés.*
- *D'ores et déjà, la phytoremédiation est envisagée sur au moins 300 sites contaminés*
- *l'impact économique et le potentiel récréatif de la technologie de la phytoremédiation représentent de sérieux atouts pour son développement rapide.*

ABSTRACT

This report sets forth the results of a study mission organized by the Mission for Science and Technology to evaluate the importance of phytoremediation in the US rehabilitation strategy. Phytoremediation is a technology which uses the properties of plants to clean and rehabilitate contaminated sites. It is used against various pollutants and in varying conditions. This mission was based upon interviews with university professors, presidents of biotech companies, and scientific directors of the petrochemical industry, and focused upon aspects which were not only technological (cost and effectiveness of treatment, comparison with other biological and physical methods, research carried out to improve the effectiveness of phytoremediation) but also economic (the market for phytoremediation within the enormous task of rehabilitating contaminated soil in the United States).

This study has reached the following conclusions:

- *Phytoremediation is an emerging technology and should be guaranteed a place as an effective means of rehabilitating contaminated soils.*
- *Phytoremediation has already been envisaged for at least 300 contaminated sites.*
- *The economic impact and restorative potential of phytoremediation present considerable advantages for its rapid development.*

INTRODUCTION.....

I - LA RECHERCHE EN MILIEU ACADEMIQUE.....

 1 - University of Massachusetts

 2 - University of Iowa

 3 - Northern Arizona University

 4 - University of California à Berkeley.....

II - LES ENTREPRISES SPECIALISEES EN PHYTOREMEDIATION.....

 1 - Ecolotree.

 2 - PhytoBioSystems

 3 - Chevron Research and Technology Compagny.....

 4 - Autres sociétés

III - APPRECIATION DE LA SITUATION AUX ETATS-UNIS

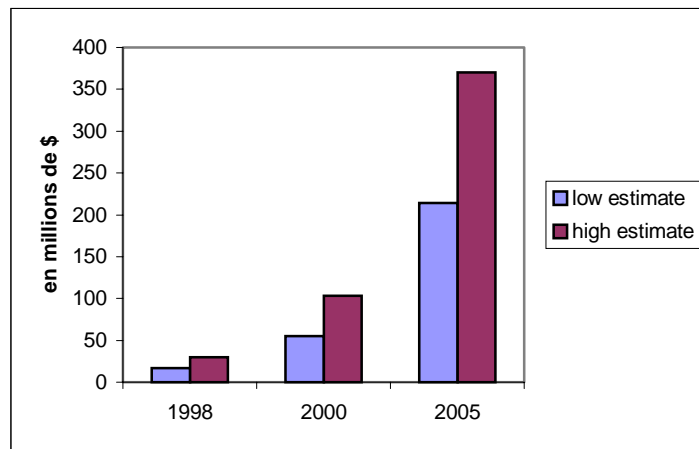
CONCLUSIONS

INTRODUCTION

La phytoremédiation utilise les propriétés des plantes pour réhabiliter des sites contaminés. Cette biotechnologie, dont l'émergence est récente (début des années 90), présente cinq volets :

- Phytostabilisation : les plantes sont utilisées pour leur aptitude à tolérer les polluants dans le sol et à s'installer sur les sols pollués de manière durable, limitant l'érosion et l'entraînement de polluants dans les sols.
- Phytoextraction: les plantes sont utilisées pour prélever et accumuler des métaux du sol dans les parties aériennes.
- Rhizofiltration: l'appareil racinaire croît dans des effluents pollués, insolubilise et concentre des métaux toxiques.
- Phytovolatilisation: les plantes extraient les éléments en traces du sol et favorisent leur volatilisation dans leur rhizosphère (environnement racinaire) ou à partir du feuillage.
- Phytodégradation : la présence de racines vivantes stimule la dégradation des composés organiques polluants dans la rhizosphère.

Le marché des sites contaminés comprend la remédiation des métaux lourds, des composés organiques et des radionucléides, une opportunité pour la phytoremédiation qui est évaluée à 8 milliards de dollars⁴ aux Etats-Unis. Plusieurs analystes américains confirment que le marché est appelé à se développer considérablement dans les années qui viennent.



Estimation du marché de la Phytoremédiation⁵

⁴ D. Glass Associates Inc. Needham, MA. DGlassAssc@aol.com

⁵ "The 1998 United States Market for Phytoremediation". D. Glass Associates Inc.

Secteur du marché	Montant
eaux usées municipales	12 à 14 milliards de \$
eaux usées industrielles (drainage des sites miniers)	500-700 millions de \$
décharges	600-1200 millions de \$

Estimation du marché de la Phytoremédiation⁶

Dans le cadre de son action de veille dans le domaine de l'environnement et de l'agrobiologie, la Mission pour la Science et la Technologie a choisi le thème de la phytoremédiation. Faisant appel à des experts français, cette étude avait pour objet de mieux faire connaître la situation américaine, de déterminer les tendances en recherche et développement et d'analyser la faisabilité de cette approche de réhabilitation des sols contaminés et des eaux usées. Nous souhaitons principalement:

- étudier les aspects technologiques d'efficacité et de coût du traitement,
- comparer avec d'autres méthodes biologiques et physiques,
- aborder les recherches conduites pour améliorer l'efficacité de la phytoremédiation, et
- analyser d'un point de vue économique le marché offert à la phytoremédiation dans le gigantesque projet de réhabilitation des sols contaminés aux Etats-Unis (évalué à 450 milliards de dollars).

Dans cette optique, cette mission d'étude a consisté à la visite de centres de recherche académiques et de sociétés privées. Ce rapport est le résultat d'entretiens avec des Présidents et *Chief Executive Officers*, des Directeurs de Recherche et des Professeurs d'Université. L'objectif principal est d'offrir en France un outil de réflexion pour des propositions d'action et de structuration.

Dans un premier temps, nous présentons la recherche dans certains centres du milieu académique, puis le développement et l'utilisation de la phytoremédiation par des sociétés privées avant d'entreprendre une analyse prospective de la situation aux Etats Unis.

I - LA RECHERCHE EN MILIEU ACADEMIQUE

1 - University of Massachusetts

Personne rencontrée.

Professeur Guy LANZA, Directeur de l'Environmental Science Program⁷.

L'expérience du Prof. G. LANZA dans le domaine de la phytoremédiation intéresse l'extraction de métaux lourds (Pb et Cr(VI)) par *Brassica juncea* et la dégradation de composés organiques récalcitrants (PCBs, phénols, TCE, TNT, BTEX). Il rapporte que pour certains sites pollués la phytoremédiation est la seule option valable retenue par l'EPA (Environmental Protection Agency). Guy LANZA est le rédacteur en chef de *International Journal of*

⁶ "The 1998 United States Market for Phytoremédiation". D. Glass Associates Inc.

⁷ Director of Environmental Science. 312 Stockbridge Hall. University of Massachusetts, Amherst (413) 545-3747. Fax: (413) 545-4860. Email: glanza@fnr.umass.edu

Phytoremediation, journal créé en 1997 et consacré exclusivement à cette nouvelle biotechnologie de traitement des environnements pollués (eaux, sols, déchets, air).

2 - University of Iowa

Personne rencontrée

Professeur Jerald SCHNOOR⁸

Prof. Jerry SCHNOOR est co-directeur du *Center for Global and Regional Environmental Research* de l'Université d'Iowa. Ses recherches concernent la modélisation mathématique de la qualité des eaux, la chimie aquatique, et l'impact des émissions de carbone sur les changements globaux. Il est aussi connu pour ses recherches sur la phytoremédiation avec des travaux dès le début des années 90, dans le cadre de la prévention des pollutions des eaux par les produits d'origine agricole qui ont consisté à étudier l'élimination des composés azotés (nitrate, ammonium) et des herbicides (ex : atrazine) par les peupliers. Les résultats obtenus sont particulièrement spectaculaires, les plantations en bandes le long des cours d'eau réduisant très fortement les flux de nitrate, par exemple, vers les eaux de surface. L'arbre joue à la fois un rôle d'extracteur dont le moteur est la transpiration (nitrate, herbicide) et de stimulateur de la dégradation des composés carbonés (herbicides) au niveau de ses racines (stimulation de l'activité microbienne). Outre le peuplier, d'autres plantes sont aussi testées notamment des espèces macrophytes utilisables dans des zones marécageuses (*wetlands*).

L'application de cette technologie s'est étendue aux sites pollués par des composés organiques non agricoles (ex : BTX, TCE, TNT). Elle a donné lieu à la création d'une compagnie privée, *Ecolotree* (voir plus loin). D'après ce chercheur le nombre de sites qui peuvent être traités par phytoremédiation, en faisant appel à la plantation d'arbres à croissance rapide, est considérable. Actuellement, la phytoremédiation est envisagée sur au moins 300 sites privés ou publics (sites Superfund de l'EPA). Dans certains cas la phytoremédiation est considérée comme un technique de finition après l'application de traitements plus drastiques dans le cas de pollutions massives (ex : sites contaminés par des explosifs)

3 - Northern Arizona University

Personne rencontrée

Professeur David E. SALT⁹

Ancien collaborateur de la Société Phytotech, Prof. David SALT est maintenant à l'Université de l'Arizona (Flagstaff) où il concentre ses recherches sur la compréhension des mécanismes d'hyperaccumulation des métaux. Ce processus qui conduit à l'accumulation de quantités considérables de métaux dans les parties aériennes de certaines espèces végétales constitue un atout pour le traitement des sols contaminés par les métaux par phytoextraction. La plante idéale pour la phytoextraction présenterait les caractéristiques suivantes : forte production de biomasse, croissance rapide, concentration élevée des métaux dans les parties aériennes. Le développement de la phytoextraction et son application en routine repose sur trois stratégies :

- augmenter la solubilité des métaux du sol : l'application de chélates est une voie envisagée et explorée notamment pour le plomb ou l'uranium dont la solubilité est très

⁸ University of Iowa. Dept. Civil and Environmental Engineering. 116 Engineering Research Facility. 330 South Madison St. Iowa City, IA 52242. Tél: (319) 335-5649. Fax (319) 335-5585.
jschnoor@cgrer.uiowa.edu

⁹ Chemistry Department. Northern Arizona University. Flagstaff, AZ 86011. Tel: (520) 523-6296. Fax: (520) 523-8111. Email: david.salt@nau.edu

faible dans les sols ; l'utilisation conjointe de plantes produisant de grandes quantités de biomasse (maïs, *B. juncea*) permet l'extraction des métaux du sol.

- Sélection végétale par fusion de protoplastes permettant le croisement d'espèces hyperaccumulatrices et d'espèces à forte production de biomasse.
- Sélection par le génie génétique avec identification des gènes responsables de l'hyperaccumulation.

L'application de chélates (EDTA, citrate) est déjà employée en routine pour traiter les sols contaminés par le plomb ou l'uranium. Une autre voie consiste à favoriser la production de chélates par les racines des plantes. Cela nécessite une meilleure connaissance de la rhizosphère des plantes hyperaccumulatrices.

La sélection de variétés pour augmenter l'hyperaccumulation repose soit sur la sensibilité à l'EDTA en vue de diminuer les doses d'EDTA soit sur la fusion de protoplastes (ex : *Thlaspi caerulescens* – *Brassica juncea*) permettant la production de plantes tolérantes et produisant de fortes quantités de biomasse.

Les mécanismes d'hyperaccumulation et les gènes responsables sont étudiés pour le nickel et l'espèce *T. goesingense* qui peut accumuler jusqu'à 1% de Ni dans ses parties aériennes. Si les différences entre une plante normale et une plante hyperaccumulatrice peuvent se situer à trois niveaux : augmentation de la biodisponibilité du métal, efficacité du prélèvement par les racines, et tolérance au métal, le dernier, la tolérance, semble expliquer le plus le phénomène d'hyperaccumulation. La complexation du métal (Ni) par l'histidine a été démontrée et les gènes responsables de la biosynthèse de cette molécule sont en cours d'identification.

Au plan pratique, les travaux menés par D. SALT conduiront probablement au développement d'espèces possédant une capacité d'extraction des métaux des sols particulièrement forte. Il y a là potentiellement la production de nouvelles espèces à usage environnemental.

4 - University of California à Berkeley

Personne rencontrée

Professeur Norman TERRY¹⁰

Prof. N. TERRY est spécialisé dans l'écophysiologie végétale. Dans le domaine de la phytoremédiation, il a développé une approche originale ciblée sur la volatilisation de certains éléments minéraux en présence de plantes (sélénium). Il s'agit de valoriser l'activité rhizosphérique (activité microbienne en présence des composés carbonés libérés par les racines des plantes) pour éliminer le sélénium par voie gazeuse. Le processus est la méthylation microbienne du sélénium mais aussi il a été démontré que le sélénium absorbé par les plantes pouvait subir la volatilisation (par des voies métaboliques qui ont été identifiées). Des applications en vraie grandeur de ce processus pour traiter les sites contaminés par le sélénium ont été réalisées en relation avec des compagnies privées (Chevron, voir plus loin). Les travaux consistent actuellement à accroître l'aptitude de certaines espèces à prélever le sélénium par le moyen du génie génétique et à élargir les connaissances à d'autres éléments (mercure par exemple).

¹⁰Department of Plant & Microbial Biology. University of California. 111 Koshland Hall. Berkeley, CA. 94720-3102. Phone: (510) 642-3510. Email: nterry@nature.berkeley.edu.
<http://plantbio.berkeley.edu/~terry>

D'après N. TERRY, la phytoremédiation représente une technologie émergente qui devrait dans le futur s'imposer comme une méthode efficace et d'un coût environnemental faible en comparaison des autres technologies. La recherche conduira là aussi à l'apparition de plantes efficaces pour le traitement des sites pollués et s'accompagnera probablement de prises de brevets et du développement du marché de la phytoremédiation.

II - LES ENTREPRISES SPECIALISEES EN PHYTOREMEDIATION

1 - Ecolotree¹¹.

Personne rencontrée:

Dr. Louis LICHT^{12,13}, Fondateur et Président

Créé en 1990, Ecolotree est la plus ancienne société qui propose la phytoremédiation comme solution de réhabilitation des sols contaminés aux USA. Environ 35 sites sont déjà implantés aux Etats-Unis et la société est basée sur l'utilisation du peuplier pour:

- jouer le rôle de tampon pour capter la pollution entre une rivière et un champ cultivé,
- recouvrir des décharges pour re-végétaliser le site,
- contribuer à dégrader des polluants, lixiviats, fuels, solvants présents dans le sol.

Cette société a planté 2 000 000 arbres en 1998 et a eu un chiffre d'affaires de 500.000 dollars. Les plants des peupliers ont été sélectionnés et produits en Oregon. Le peuplier est un végétal particulièrement intéressant car il peut survivre avec peu d'oxygène dans le sol, résiste à une salinité de 7 dS/m et produit un bois utilisable.

L'utilisation du peuplier comme tampon: visite du site d'AMANA (Iowa)

Les végétaux et notamment le peuplier peuvent servir de barrière aux herbicides, pesticides et engrais entre un champ cultivé et une rivière. Dans le site visité, il a été mis en place la protection d'un ruisseau qui traverse un champ de grande culture pour le protéger de la pollution azotée (engrais). Elle est réalisée par quatre rangées de peupliers de chaque côté du ruisseau. Dans le champ la teneur en nitrate dans l'eau est de 150 mg/l et de 8 mg/l au niveau des peupliers. Ces arbres ont été choisis car ils consomment beaucoup d'azote. Sur un hectare planté de 11 000 arbres, on peut accumuler 363kg de N dans ce végétal. Cette plantation peut servir aussi de coupe vent, de site de protection pour la vie sauvage... On peut produire aussi 70 t de bois à l'ha en 10 ans. Ceci représente 9,25 m³ de fuel par ha et par an. Le coût de la plantation est de 80 000 FF / ha sans irrigation et de 120 000 FF / ha avec. Le peuplier joue non seulement le rôle de stockage d'azote et sert à l'élimination de l'eau par évapotranspiration. Un ha de peuplier transpire 8000 m³ d'eau par an. Ce genre d'installation représente 20 % de l'activité d'Ecolotree.

Revégétalisation de décharge: visite de la décharge de Cedar Rapids (Iowa)

Le peuplier peut être utilisé pour recouvrir des décharges. Ces décharges n'ont pas de géotextiles en couverture mais reçoivent 1 à 1,5 m de terre. Les peupliers sont plantés (surtout des hybrides) et les racines peuvent descendre à plusieurs mètres à travers les couches de déchet, et parfois jusqu'au niveau de lixiviat de la cellule (ces cellules ont une double couche d'étanchéité). Le peuplier (qui nécessite une période d'adaptation) permet donc aussi une

¹¹ <http://www.ecolotree.com>

¹² 505 East Washinton Street, Suite 300. IOWA City IA 52240. Tel : (319) 358-9753. Fax : (319) 358-9773

¹³ ecolotree@aol.com

récupération des eaux de pluie, et donnent un aspect de forêt ce qui joue un rôle fondamental pour l'acceptabilité du site. Cette technique de recouvrement représente 60 % de l'activité d'Ecolotree. Elle a été appliquée dans d'autres sites et notamment testée dernièrement sur les décharges du Delaware.

Traitement des lixiviats: visite de la décharge de Madison (Iowa)

Le traitement des lixiviats peut être réalisé aussi par irrigation des peupliers qui couvrent la décharge. C'est le cas de la décharge de *Lee County Sanitary Landfill* à Madison (Iowa). Le lixiviat est récupéré dans des bassins et sert à irriguer 2,5 ha couvert de peupliers. C'est environ 3000 arbres qui sont plantés par ha. Pour cela il a été disposé de 70 cm de terre et les arbres sont plantés à 1 m de distance dans des rangées séparées à 4 mètres. Le temps de retour sur investissement a été évalué à 2,5 années. Les peupliers peuvent donner une récolte tous les 10 ans. Le traitement des lixiviats représente 20% de l'activité d'Ecolotree

2 - PhytoBioSystems

Personne rencontrée:

Associate Professor Kalidas SHETTY¹⁴, Président et CEO.

Department of Food Science ; University of Massachusetts, Amherst.

Responsable de la société émergente PhytoBioSystems, Dr. K. SHETTY est spécialisé dans l'étude de la régulation moléculaire et physiologique de la production de métabolites phénoliques chez les végétaux. Ses préoccupations relèvent 1) des biotechnologies alimentaires (régulation de la synthèse d'antioxydants, anti-inflammatoires, métabolites de prévention du cancer, phytoestrogènes, parfums...) et 2) des biotechnologies environnementales ; pour ces dernières deux volets principaux sont identifiés :

- Bioconversion des déchets de la pêche et de l'arboriculture en vue de la production de composés à valeur ajoutée : métabolites phénoliques, champignons, inoculants pour l'agriculture et l'environnement...
- Phytoremédiation des composés aromatiques utilisant des clones tolérant les composés phénoliques et produits à partir de cultures de tissus ; recherche d'inoculum bactériens en vue d'augmenter la tolérance et l'adaptation des plantes aux environnements pollués et accroître l'efficacité de la bioremédiation ; recherche de composés stimulant l'activité rhizosphérique pour augmenter la dégradation dans la rhizosphère ; recherche de lignées végétales pour le traitement de l'air (extérieur et intérieur) ; recherche de lignées pour la remédiation des métaux et des éléments en traces.

3 - Chevron Research and Technology Compagny

Personnes rencontrées:

Pete J. DUNDA, Project Manager¹⁵

Ross SMART, Environmental Biologist¹⁶

¹⁴ Umass. Dept of Food Science. Chenoweth Lab. University of Massachusetts. Amherst, MA 01003. Tél: (413) 545-1022. Fax (413) 545-1262. kalidas@foodsci.umass.edu

¹⁵ Chevron Corporation. Richmond, CA, 94802-0627. Tél: (510) 242-5217. Fax: (510) 242-1954. Email: pjdu@chevron.com

¹⁶ Chevron Corporation. Richmond, CA 94802-0627. Tél: (510) 242-5217. Fax: (510) 242-1954. Email: rsma@chevron.com

La société CHEVRON possède à Richmond en Californie une raffinerie équipée de plusieurs systèmes de traitement de leur pollution et notamment des *constructed wetland* (marais artificiels).

Ce site comporte plusieurs stations d'expérimentations qui utilisent les végétaux notamment pour améliorer les conditions environnementales sur le site.

- plantation de peupliers dans des sols gorgés d'hydrocarbures en surface (avec présence de HAP),
- mise en place de terre propre et d'une couverture végétale formée de peuplier, d'herbe et de légumineuses au-dessus de stockage de déchets
- mise en place de barrière de peuplier et de genévrier pour réduire la progression des contaminants pétroliers.
- mise en place d'un marais artificiel pour traiter les effluents de la raffinerie

C'est sur ce dernier point que nous avons focalisé notre analyse. La stratégie mise en place consiste en la séparation du système de traitement en plusieurs bassins afin de concevoir une première partie où se fait le traitement et une seconde où l'on a une finition avec accueil d'une vie animale, avicole principalement. Dans certains sites (au Dakota par exemple) sur 11 lagons, 6 sont structurés pour le traitement et 5 dédiés à l'habitat sauvage.

Dans la première partie, les principaux procédés de traitement dans ces marais sont d'origines physiques et microbiologiques. Ils sont plantés de végétaux, comme des joncs ou des typhas ce qui permet de maintenir une certaine concentration en oxygène dans l'eau.

Dans la seconde partie, ces marais sont aussi plantés de végétaux. La diversité végétale encourage le développement de la faune et ceci peut être obtenu en variant les profondeurs d'eau, en implantant des végétaux connus pour leur importance pour la vie sauvage. Celle-ci est favorisée aussi par la présence d'îles, de nourrisseurs.... Pour permettre une reproduction avicole, pour de nombreuses espèces une surface de 10 à 25 ha est nécessaire avec des zones profondes et à eau libre.

Sur le site visité à Richmond, le marais a une surface de 36 ha et est divisé en trois parties égales. La première étape est un marais de forme rectangulaire dont l'alimentation est répartie sur une longueur. Il est planté de joncs et de typhas. L'effluent traverse la largeur et est récupéré pour être envoyé dans un second bassin. Ce bassin est avant tout en eau libre dont 10 à 15 % sont couverts de végétaux (joncs, typhas et scirpes). L'effluent va ensuite dans un troisième bassin avec une végétation similaire à celle du premier, mais avec une couverture moins dense et des plantes plus petites.

Le débit d'effluent de raffinerie est de 4000 à 6000 m³ par jour ce qui fait un temps de séjours moyen de 7 à 10 jours. On rentre à 20-25 g/l de DBO et on en sort avec 5g/l. La seconde étape débute par un premier bassin rectangulaire dont l'effluent est réparti au centre du bassin et qui subit une légère aération (par jets d'eau en l'air). Enfin, un bassin de finition permet de rendre la DBO non détectable.

Ce marais a été particulièrement suivi au niveau du sélénium. Le sélénium qui est un élément indispensable en tant qu'élément trace, devient toxique à forte concentration. Dans le cas de cette raffinerie une concentration d'entrée en sélénium de 20-30 µg/l est réduite à moins de 5 µg/l par les marais. Le sélénium qui peut se présenter sous différentes formes chimiques est retenu dans le marais par différents phénomènes comme l'adsorption dans les sédiments, la volatilisation par les plantes et son accumulation dans la matière végétale. La plus grande partie

du sélénium est éliminée de l'eau par son immobilisation dans les sédiments et les tissus végétaux (avec des concentrations de 5 et 15 mg/kg respectivement) alors que la volatilisation représente 10 à 30 % du sélénium éliminée de l'eau.

4 - Autres sociétés

A titre d'exemple, nous citons les sociétés suivantes.

Société	Lieu	Activité
PhytoWorks, Inc. ¹⁷	Gladwyne, PA	<ul style="list-style-type: none"> commercialisation de deux plantes modifiées génétiquement (mercure) TNT, TCE, radionucléotides
Phytokinetics, Inc	North Logan, UT	<ul style="list-style-type: none"> PCP contamination
Phytotech	Princeton, NJ	<ul style="list-style-type: none"> rhizofiltration de métaux lourds (uranium; césium, strontium...)
Dupont Central Research Development	Newark, NJ	<ul style="list-style-type: none"> phytoextraction des métaux lourds
Verdant Technologies	Seattle, WA	<ul style="list-style-type: none"> TCE
Wolverton Environmental Services	Picayune, MS	
Energy Biosystems	The Woodlands, TX	<ul style="list-style-type: none"> purification de pétrole utilisant des plantes.

III - APPRECIATION DE LA SITUATION AUX ETATS-UNIS

Nos interlocuteurs se sont montrés optimistes sur la faisabilité de l'approche de la phytoremédiation dans le secteur de la bioréhabilitation aux Etats-Unis. Pas moins de 300 sites autorisés par l'EPA sont en cours d'expérimentation. De l'avis de nos interlocuteurs, la phytoremédiation offre d'ores et déjà des potentiels prometteurs avec une amélioration prévue grâce à l'utilisation des manipulations génétiques, rencontre l'engouement du public (restauration en sites paysagistes) et représente un coût inférieur à 20 pour cent de celui des méthodes physiques.

Agences	Sites
EPA	<ul style="list-style-type: none"> Wood Treatment Site (Portland, OR) Petroleum spill (Ogden, UT) TCE contaminated groundwater (Forth Worth, TX) metal contaminated soil (Findlay, OH)
DOD	<ul style="list-style-type: none"> nappe phréatique contaminées avec des explosifs (Milan, TN;

¹⁷ <http://www.phytoworks.com>

	Chattanooga, TN) • solvants chlorés (Aberdeen)
--	---

Quelques sites tests.

Les recherches sont financées en grande partie par la National Science Fondation, le Department of Energy et l'EPA, mais aussi par de grands groupes industriels (essentiellement pétroliers) pour des raisons de responsabilités légales (exemple des recherches du Professeur Shnoor). Par rapport au début des années 1990 où les promesses de la phytoremédiation avaient pour conséquence un financement de la recherche essentiellement appliquée, les agences se sont orientées vers le soutien à une recherche plus fondamentale. La recherche est toujours nécessaire pour:

- comprendre les aspects physiologiques, biochimiques et génétiques de la capture et l'accumulation des polluants,
- évaluer génétiquement les plantes qui sont considérées comme hyper-accumulatives,
- mieux saisir les interactions qui existent entre la plante et la rhizosphère et
- démontrer l'efficacité de la technologie.

Il y a peu de sociétés de biotechnologies (moins de 15) impliquées dans ce domaine innovateur. Nos interlocuteurs ont toutefois souligné que le marché est très prometteur et serait multiplié par 10 d'ici à l'an 2005. Deux raisons expliqueraient cette timidité:

- La technologie n'est pas encore acceptée par rapport à d'autres méthodes physiques: l'impact économique et le potentiel récréatif de la phytoremédiation représentent de sérieux atouts pour espérer un développement rapide.
- Les technologies développées par ces sociétés sont peu et difficilement protégées dans le domaine de la propriété industrielle. Ceci n'incite pas les investisseurs à participer. Le développement de nouvelles plantes transgéniques permettra d'offrir des technologies brevetées et contribuera au développement de ce secteur économique.

Les Etats-Unis sont organisés pour promouvoir cette approche innovante. Le *Phytoremediation of Organic Action Team (POAT)*¹⁸, sous comité du *Remediation Technologies Development Forum (RTDF)*¹⁹, a été créé en 1997. Composé de représentants de l'industrie, du gouvernement et du milieu académique, le POAT développe et évalue l'utilisation des plantes dans les processus de bioremédiation.

Si de manière générale cette technologie semble bien acceptée par le public, plusieurs points nécessitent une meilleure évaluation avant de pouvoir envisager une application à plus vaste échelle:

- effets des rejets dans l'atmosphère,
- recyclage des cendres de plantes,
- réponse des plantes aux différents facteurs environnementaux et
- entrée des contaminants dans les chaînes alimentaires

¹⁸ <http://www.rtdf.org/public/phyto/default.htm>

¹⁹ Créé en 1992 par l'EPA pour faciliter les collaborations entre la recherche académique et le public pour découvrir des solutions innovantes dans le domaine de la réhabilitation des sites pollués.

CONCLUSIONS

La nécessité de répondre à des enjeux forts en matière d'environnement a conduit les Etats-Unis à chercher des solutions innovantes pour nettoyer et réhabiliter les zones polluées. Cette question se positionne dans un contexte politique favorable où le Président CLINTON a imposé le nettoyage des sites fédéraux pollués avec un objectif de 2/3 des sites réhabilités pour la fin 2001. C'est dans cette optique que nous avons abordé cette mission de veille scientifique dans le domaine de la phytoremédiation. Tous les analystes s'accordent pour déclarer que:

- La phytoremédiation offre potentiellement de nombreux avantages.
- Les connaissances qui se limitent pour l'instant aux facteurs physiques contrôlant la dynamique des polluants devraient s'accroître pour mieux comprendre les processus de biologie chimique et enzymatique et déboucher sur l'application des outils de la biologie moléculaire pour modifier les plantes accumulatrices.
- Cette nouvelle génération de plantes transgéniques couplée à une acceptabilité du public contribuera au véritable essor de ce secteur. A ce titre, il est intéressant de noter que dans le cadre de l'accord Novartis-UC Berkeley qui permet à des projets de recherche d'être sélectionnés par un comité d'experts composé de 5 membres dont deux de Novartis, le laboratoire du Professeur Terry a été financé par Novartis bien que cette thématique ne soit pas représentée au sein du grand groupe des biotechnologies agricoles.

Enfin, il ressort de cette étude que:

- La phytoremédiation, concept très large recouvrant de nombreux aspects de l'utilisation des plantes pour traiter les environnements contaminés, a un avenir certain et connaîtra dans le futur des développements technologiques valables.
- La boîte à outils reste cependant à remplir; quelques technologies sont au point mais la recherche doit pouvoir progresser pour développer de nouvelles approches et de nouveaux organismes (sélection) permettant de traiter des situations complexes (sols pollués par les métaux).