



**HAL**  
open science

## Le traitement biologique des sols pollués par des composés organiques. L'intérêt des champignons filamenteux

Christian Mougin, Véronique Chaplain, P. Gaillardon, L. Sohier, Raphaël Mercier, J.C. Sigoillot, C. Laugero, M. Asther

### ► To cite this version:

Christian Mougin, Véronique Chaplain, P. Gaillardon, L. Sohier, Raphaël Mercier, et al.. Le traitement biologique des sols pollués par des composés organiques. L'intérêt des champignons filamenteux. Le Courrier de l'environnement de l'INRA, 1996, 28, pp.49-56. hal-02689893

**HAL Id: hal-02689893**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02689893v1>**

Submitted on 1 Jun 2020

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

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

# le traitement biologique des sols pollués par des composés organiques l'intérêt des champignons filamenteux

par **Christian Mougin, Véronique Chaplain et Paul Gaillardon,**

INRA, unité de Phytopharmacie et Médiateurs chimiques, route de Saint-Cyr, 78026 Versailles cedex

**Laurent Sohier et Rachel Mercier,**

KREBS Réseau Eurisys, division Réhabilitation de sites, 8, rue Jean-Pierre-Timbaud, BP 67, 78184 Saint-Quentin-en-Yvelines cedex.

**Jean-Claude Sigoillot, Chantal Laugero et Marcel Asther**

INRA, laboratoire de Biotechnologie des champignons filamenteux, centre d'enseignement supérieur en Biotechnologie/ESIL, Parc scientifique et technologique, CP 925, 163, av. de Luminy, 13288 Marseille cedex 09

Un recensement national des sites pollués réalisé en 1994 par le ministère de l'Environnement a répertorié 669 sites contaminés, qui se répartissent en trois grands types : *les anciennes décharges*, qui ont été utilisées sans respecter les règles techniques actuelles et dont le sous-sol inadapté a conduit à une pollution des eaux, *les dépôts de déchets*, occasionnés par des faillites d'entreprises ou des pratiques frauduleuses d'importation ou d'élimination de déchets et, enfin, *les sols pollués* par des retombées, des infiltrations ou des déversements de substances polluantes, liés à l'exploitation d'une installation industrielle ou à un accident de transport.

Cet inventaire sera réactualisé fin 1996. Cependant, on se heurte toujours à l'absence de normes françaises aussi bien sur les teneurs maximales admises pour les composés organiques dans les sols que sur les techniques d'analyse permettant d'évaluer ces teneurs. Les sites pollués constituent pourtant un risque à moyen terme pour les eaux de surface et souterraines et pour l'usage même des sols (habitat, cultures, implantation d'activités).

La diversité chimique apparente de la pollution d'un site est généralement faible et se limite, pour les polluants organiques, à quelques molécules (appartenant à une ou plusieurs familles chimiques) produites par l'activité industrielle exercée sur le site. En France, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les polychlorobiphényles (PCB) sont les plus fréquemment rencontrés. Pour les HAP, plus de 400 sites sont recensés. Sur un même site, les teneurs en ces molécules sont très hétérogènes et elles peuvent atteindre localement 1 000 à 10 000 ppm (mg/kg). Certains sites accueillant des transformateurs électriques contiennent des matériaux ou des sols pollués par les PCB à des teneurs de quelques centaines de ppm. On trouve également parmi les polluants organiques des produits pétroliers, des munitions, des explosifs, des produits à usage agro-pharmaceutique. Les contaminations peuvent survenir sur les lieux de production ou sur ceux de stockage.

## Quand doit-on dépolluer et qui doit payer?

La France ne dispose pas actuellement de cadre légal spécifique aux sites et aux sols pollués. L'action administrative s'exerce alors au travers de deux lois : n°76-663 (19 juillet 1976) relative aux installations classées pour la protection de l'environnement et n°75-633 (15 juillet 1975) relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux.

Quatre principes et dispositions de base en découlent :

- l'obligation de dépollution préalable à la vente d'un terrain sur lequel a fonctionné une installation classée. C'est la seule circonstance qui permet d'imposer la réhabilitation d'un site indépendamment des risques réels de contamination ;
- en cas de cessation d'activité d'une installation classée soumise à autorisation, l'obligation pour l'exploitant d'informer le préfet et de produire un mémoire sur l'état du site et les travaux d'évacuation, de dépollution ou de surveillance nécessaires. La réhabilitation effective du site ne peut être imposée en cas de cessation d'activité ;
- en application du principe pollueur-payeur (confirmé par la loi n° 95-101 du 2 février 1995), les travaux de traitement et de réhabilitation des sites, ainsi que toutes les études préalables, doivent être effectués par le responsable du site (exploitant ou détenteur) et sont financièrement à sa charge ;
- pour certaines catégories d'installations classées, l'obligation d'apporter des garanties financières ayant notamment pour objet de couvrir les accidents, les pollutions et la remise en état du site après cessation d'activité.

Lorsqu'aucun responsable solvable n'est identifié, le site est déclaré « orphelin » par le ministère de l'Environnement et les études et travaux de dépollution sont à la charge de la collectivité. Les travaux correspondants sont effectués par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) qui assure la maîtrise d'ouvrage. En France, de 1987 à 1994, 40 sites ont été déclarés orphelins. Le financement est assuré pour les nuisances d'origine industrielle par la taxe sur l'élimination des déchets industriels spéciaux, et pour les nuisances causées par des déchets ménagers par le fonds de modernisation et de gestion des déchets.

## La démarche d'une action de dépollution

Lorsqu'un arrêté préfectoral a stipulé la réhabilitation d'un site, les directions régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) coordonnent et encadrent administrativement et techniquement les activités liées au traitement du site.

L'intervention de dépollution s'effectue en quatre étapes :

- *diagnostic, bilan de l'exploitation antérieure* : une étude historique et documentaire sur l'activité passée du site et des investigations sur le terrain (visite des dépôts, ateliers, puits, etc.) conduisent à une première identification des déchets présents sur le site et à leur localisation prévisible (séparation des terrains sains des terrains contaminés) ;
- *exécution d'un programme d'études techniques* : des prélèvements effectués sur le terrain et des analyses chimiques déterminent la nature des polluants effectivement présents, les teneurs et leur localisation. Différentes zones à traiter sont alors définies en fonction du degré de pollution du sol. Des études hydrogéologiques (analyses des eaux de surface et souterraine) et des études de stabilité (dépôts et crassiers) conduisent à l'évaluation des risques de dispersion des contaminants dans l'environnement ;
- *choix du procédé de traitement* : les DRIRE fixent le seuil à atteindre pour la réhabilitation du site en partenariat avec le propriétaire du site et l'industriel chargé de la dépollution. L'industriel propose des solutions de traitement en précisant les seuils qui seront atteints dans un délai donné et les coûts. A chaque technique de traitement correspond un seuil susceptible d'être atteint. Les traitements biologiques nécessitent souvent des essais préliminaires de laboratoire pour évaluer ce seuil. Ils sont à la charge du propriétaire. Ce dernier choisit le ou les procédés de traitement qui répondent à la fois aux exigences administratives et à ses contraintes financières propres ;



- *travaux de réhabilitation* : l'exécution des travaux de dépollution selon les délais et objectifs fixés est contrôlée par un dispositif de surveillance piloté par les DRIRE. Tout dépassement de durée du traitement sera à la charge de l'industriel.

Pour fixer le seuil de dépollution à atteindre, les DRIRE s'appuient en général soit sur des normes d'analyse et de seuil étrangères, soit sur une analyse des risques permettant de quantifier le seuil en dessous duquel le polluant ne représente plus de danger pour l'environnement. Ce seuil varie pour les HAP entre 100 et 500 ppm - teneur totale en 16 HAP mesurée selon la norme américaine de l'EPA (Agence pour la protection de l'environnement américaine). Pour les PCB, tout matériau en contenant plus de 50 ppm est considéré comme pollué et susceptible d'être traité comme déchet industriel. Les normes américaines de l'EPA servent là aussi de référence, en l'absence de normes françaises.

## Les traitements actuels

Les techniques de traitement des sols pollués se développent rapidement. Elles sont souvent complexes et représentent un coût non productif pour l'entreprise propriétaire du site. Le traitement d'un site implique presque toujours la mise en oeuvre de plusieurs techniques et procédés, simultanément ou successivement.

Trois grands types de traitement sont disponibles :

- *les traitements physiques* : incinération, confinement (cas de fortes concentrations en polluant) ;
- *les traitements chimiques* : lavage à l'eau ou extraction par solvant (principalement sur les matériaux grossiers), oxydation chimique ;
- *les traitements biologiques* : utilisation de la microflore autochtone ou de micro-organismes allochtones.

Tous ces types de traitement peuvent être mis en oeuvre soit *in situ*, c'est-à-dire sans excavation des sols, soit *sur site* après excavation et préparation d'une aire étanche de traitement ou mise en route d'unité de traitement mobile, soit *hors site* dans des unités de traitement ou de stockage de grande capacité.

Mis à part le confinement, la plupart des traitements conduisent à une dégradation du polluant qui peut être obtenue soit par voie physico-chimique, soit par voie biologique. En France, la tendance est à l'incinération hors site pour les matériaux ou sols contenant plus de 10 000 ppm de HAP (le coût est de l'ordre de 10 KF par tonne), les sols étant stockés ensuite en centre d'enfouissement technique (CET). Pour les sols et matériaux moins concentrés, les techniques chimiques (environ 5 KF/t en moyenne) et biologiques sur site (coût inférieur à 1 KF/t) sont celles actuellement utilisées (car les plus compétitives). En ce qui concerne les PCB seuls deux centres de traitement thermique sont agréés pour le traitement des matériaux (température d'incinération et contrôle des rejets gazeux draconiens).

## Les traitements biologiques

Les traitements biologiques consistent à utiliser des organismes supérieurs (végétaux) ou des micro-organismes pour dégrader les polluants organiques. Les champignons, les bactéries, les actinomycètes et les algues sont les principaux micro-organismes des sols. En général, sous leur action, les polluants organiques sont transformés en molécules de moins en moins polluantes (en terme de persistance et de toxicité). Les procédés biologiques de dépollution visent donc à augmenter les capacités de dégradation des micro-organismes des sols pour accélérer les phénomènes naturels, afin de ramener les quantités de polluant extractibles en dessous des normes établies.

On dispose de deux types de procédés, qui tous deux mettent en oeuvre principalement des bactéries et des champignons : la *biostimulation* (stimulation de l'activité des microorganismes autochtones) et la *bio-augmentation* (introduction de micro-organismes allochtones sélectionnés). Ils font appel à trois types de technologies :

- *in situ*, seule la biostimulation est possible par aération et/ou par apport d'éléments nutritifs en milieu aqueux recirculé (les eaux de drainage sont récoltées puis redispersées à la surface des sols) ;
- *sur terres excavées*, on met en place des procédés de biostimulation et de bio-augmentation, les terres sont placées en andains (tertres) confinés dans des tranchées étanches et on apporte de l'eau, de l'oxygène (accepteur terminal d'électrons), des éléments nutritifs, des agents surfactants ou foisonnants pour améliorer les transferts de polluants et de nutriments et éventuellement des micro-organismes sélectionnés ;
- *dans des réacteurs en milieu liquide*, tous les paramètres sont contrôlés pour une dépollution d'effluents liquides (lixiviats, boues issues de concentration granulométrique < 50 µm). Cette technologie se prête particulièrement à la bio-augmentation.

Les traitements biologiques sont en plein développement car, d'une part, *tous les types de sols industriels sont traitables* par voie biologique ; un tel traitement ne nécessite pas de grosses infrastructures et il est toujours réalisé sur ou à proximité du site, ce qui évite le transport coûteux des sols. A l'issue du traitement, les sols traités sont remis en place. Le traitement biologique ne génère pas de déchets à

stocker. D'autre part, *tous les polluants organiques sont biotransformables* sous certaines conditions, mais à plus ou moins long terme.

Cependant, un certain nombre de contraintes sont à prendre en compte lors de l'utilisation de ces procédés. En premier lieu, il est difficile de garantir le délai d'obtention d'un seuil fixé. L'estimation de ce délai dépend alors de la nature du sol, du polluant et du rapport du niveau de pollution au seuil à atteindre. D'autre part, la biotransformation s'arrête à une concentration asymptotique seuil, limitée par la biodisponibilité du polluant dans le sol considéré. Seules des techniques physico-chimiques permettent d'atteindre les seuils les plus bas. En second lieu, une action de traitement biologique nécessite au préalable une optimisation technico-économique ; il s'agit en effet de déterminer les valeurs des paramètres de traitement qui permettront de mobiliser un minimum de moyens en un minimum de temps et de garantir le délai. Cette optimisation implique des essais de traitement sur des lots identiques aux sols à traiter.

## Principes généraux de la transformation des xénobiotiques par les micro-organismes

La transformation par les micro-organismes est considérée comme la composante majeure des réactions de transformation auxquelles sont soumis les polluants. En effet, les micro-organismes peuvent se développer dans des environnements très diversifiés et font appel à des mécanismes variés parfois uniques au sein du règne vivant.

Classiquement, les micro-organismes utilisent trois modes de transformation des molécules organiques directement liés au métabolisme cellulaire :

- le *cométabolisme* : un micro-organisme assure une ou plusieurs modifications structurales du polluant (dégradation) qui ne sert pas de source d'énergie. La présence d'un co-substrat permettant la croissance est alors nécessaire. Différents types de micro-organismes peuvent intervenir successivement (notion de communauté dégradante) et la dégradation du polluant peut être complète dans ces conditions ;
- la *biodégradation* : elle se distingue du cométabolisme par le fait que le micro-organisme trouve alors dans le polluant une source de carbone et d'énergie qui permet sa croissance. Le polluant est transformé en métabolites, biomasse et CO<sub>2</sub> (avec parfois d'autres composés inorganiques : NH<sub>3</sub>, etc.) ;
- la *synthèse* : les molécules de polluant, ou des produits de transformation, sont liées entre elles (polymérisation) ou à d'autres composés (conjugaison) grâce aux enzymes des microorganismes. La synthèse joue un rôle important dans l'immobilisation (stabilisation) des polluants dans les sols.

La transformation des xénobiotiques par les micro-organismes, qu'elle soit due à l'action d'un ou de plusieurs organismes, met en jeu simultanément plusieurs de ces mécanismes. Elle s'effectue au travers de réactions : oxydation, réduction, hydrolyse et synthèse.

Il faut également citer des effets indirects liés à la présence ou à l'activité des micro-organismes dans les sols : d'une part la *bio-accumulation* - le polluant pénètre et s'accumule le plus souvent de façon passive dans le micro-organisme -, conditionnée par les propriétés physico-chimiques du polluant et, d'autre part, les *effets secondaires de l'activité microbienne* : la transformation chimique du polluant est déclenchée par des changements de pH, de potentiel rédox ou autres liés à l'activité cellulaire.

## Caractéristiques d'un agent biologique de dépollution efficace

Les sols pollués sont souvent des écosystèmes dégradés carencés en nutriments et à faible peuplement microbien. Il apparaît alors plus intéressant d'y introduire un ou plusieurs micro-organismes en quantité importante et qui devront posséder les caractéristiques suivantes :

- *aptitude à transformer une large gamme de composés chimiques* : dans le sol les polluants sont sous forme de mélanges. L'agent biologique devra produire les systèmes enzymatiques capables de catalyser la transformation d'un grand nombre de substrats xénobiotiques de structures chimiques distinctes.

Ceci implique la multiplicité de systèmes enzymatiques, ou que ceux-ci montrent une faible spécificité de substrat et soient constitutifs (non induits par la présence du polluant) ;

- *forte accessibilité aux polluants* : dans les sols les polluants sont partiellement dissous dans la phase aqueuse ou éventuellement dans la phase gazeuse, mais aussi à l'état adsorbé sur le complexe organo-minéral du sol, ou encore à l'état natif. L'agent de dépollution devra être capable d'atteindre le polluant quelle que soit sa localisation, ce qui implique qu'il possède des systèmes enzymatiques exo- et intracellulaires ;

- *forte tolérance aux composés toxiques* : beaucoup de polluants présentent une toxicité intrinsèque élevée. Leurs pouvoirs biocides sont encore renforcés par les très fortes concentrations présentes sur les sites pollués, ainsi que par des synergies entre les composés. L'organisme aura pour première mission de détoxifier ces polluants pour permettre son action conjointe avec celle de la microflore autochtone résiduelle ;

- *possibilité d'hyperproduction d'un système enzymatique* particulièrement actif vis-à-vis d'une classe de polluants : le caractère généraliste d'un organisme sera alors complété par une action préférentielle sur une famille de molécules ;

- *inoculation et installation facilitées* dans les sols : le micro-organisme sera facilement manipulable, disponible en grande quantité pour la préparation d'inoculum concentrés. Les supports devront également permettre sélectivement sa croissance et son développement pour minimiser la compétition et les interactions inhibitrices avec la microflore autochtone ainsi que la prédation par la microfaune autochtone, au moins au début du processus de transformation.

Dans ce contexte, un groupe de champignons filamenteux paraît très intéressant, celui des basidiomycètes de la pourriture blanche.

## Les champignons de la pourriture blanche

Les champignons de la pourriture blanche forment un groupe particulier de basidiomycètes qui assure dans la nature la dépolymérisation et la minéralisation de la lignine (ligninolyse) et permet ainsi la destruction des fibres végétales.

Les champignons de la pourriture blanche sont actuellement très étudiés en raison de plusieurs applications, dont certaines sont utilisées par l'industrie :

- *mise en place de procédés propres et économiques dans l'industrie papetière* : le traitement des pâtes améliore la qualité du papier (résistance), diminue le coût énergétique de production et permet le blanchiment du papier en minimisant la consommation de chlore. Le système ligninolytique intervient également dans la décoloration des effluents de papeterie ;

- *bioconversion et production de molécules à haute valeur ajoutée d'intérêts agro-alimentaire et pharmaceutique* : les organismes vivants ou leurs enzymes purifiées sont utilisées pour la production de composés à valeur ajoutée importante comme la vanilline, le phénol, le méthanol. D'autre part, certains métabolites issus de la dégradation de la lignine ont des propriétés antibactériennes ;

### Le programme de recherches développé à l'INRA

Depuis quelques années, un programme de recherches est développé à l'INRA conjointement par l'unité de Phytopharmacie et Médiateurs chimiques (Versailles) et le laboratoire de Biotechnologie des champignons filamenteux (Marseille/Luminy). Il a pour objectif d'apporter des connaissances fondamentales sur la biochimie et la physiologie des champignons filamenteux, et de proposer des procédés de biodépollution des sols et effluents liquides contaminés par des polluants organiques. Ce programme a reçu les soutiens financiers de l'INRA (AIP Pesticides) et de l'ADEME (marché d'études).

Les axes de recherche développés sont :

- **Evaluation des potentialités de souches pures** cultivées en milieu liquide à transformer les polluants. Ces études permettent de suivre l'évolution de la molécule mère et des principaux produits issus de sa transformation au cours du temps, ainsi que l'établissement des schémas de dégradation. L'influence des conditions de culture sur la nature et l'intensité des réactions de transformation est aussi étudiée.

- **Recherche, identification et purification des systèmes enzymatiques** impliqués dans les principales réactions de transformation.

- **Hyperproduction de systèmes enzymatiques** d'intérêt.

- **Optimisation de l'inoculation** des champignons dans le sol, suivi de la **croissance fongique**, études de la **transformation** des polluants et évaluation de l'**efficacité du procédé** au niveau de la dégradation (minéralisation, formation de métabolites,...) ou de son immobilisation dans le sol.

- **Procédés de dépollution d'effluents liquides**.

Les études réalisées jusqu'à aujourd'hui ont porté sur des molécules à usage agro-pharmaceutique (triazines, lindane) ou générés par l'industrie papetière (pentachlorophénol, acides résiniques).

- *environnement* : les champignons sont étudiés pour la dépollution des effluents liquides et des sols renfermant des polluants organiques ;

- *biotraitement et valorisation des matériaux lignocellulosiques* : la biodégradation des résidus lignocellulosiques améliore la digestibilité et la valeur nutritive de substrats utilisés pour l'alimentation des ruminants. La cellulose libérée de la lignine permet aussi une production facilitée de biogaz.

L'espèce la plus étudiée est *Phanerochaete chrysosporium* mais environ 40 espèces font actuellement l'objet de recherches actives.

## **Avantages liés à l'utilisation des champignons de la pourriture blanche**

### **Dégradation d'une large gamme de composés organiques**

Les champignons de la pourriture blanche sont d'une grande richesse enzymatique, produisant à la fois des systèmes exo-cellulaires peu spécifiques et à fort pouvoir oxydant (en particulier le système ligninolytique), et des systèmes intra-cellulaires impliqués dans la biotransformation des xénobiotiques. Cette richesse enzymatique permet à ces champignons d'assurer un grand nombre de réactions chimiques (oxydation, réduction, hydrolyse et synthèse) sur des xénobiotiques polluants de structures chimiques variées, et présentant des propriétés physico-chimiques (polarité, lipophilie, etc.) variées. De plus, ces systèmes enzymatiques ont pour certains une faible spécificité de substrat et un fort pouvoir oxydant (réactions radicalaires). Les enzymes agissent soit sur les polluants dissous dans l'eau du sol, soit sur les polluants adsorbés sur la fraction solide du sol. Le mycélium fongique constitue en outre un piège dans lequel les polluants s'accumulent, y compris les plus volatiles d'entre eux présents dans la phase gazeuse du sol. Ils deviennent alors des substrats potentiels pour les enzymes intracellulaires.

### **Mécanismes de régulation différents selon les activités enzymatiques**

Le système exocellulaire ligninolytique est placé sous le contrôle des nutriments et n'est pas régulé par la quantité de polluant présente au voisinage du champignon. Ainsi, la production des enzymes est stimulée lorsque le champignon se trouve en carence nutritionnelle vis-à-vis de la source de carbone ou de la source d'azote. En complément, un allongement de la phase de croissance des champignons obtenu en modulant par exemple la température de croissance conduit à une forte dégradation de polluant par les enzymes intracellulaires. Les situées intracellulaires sont, quant à eux, inductibles par certains xénobiotiques ou par des stress.

### **Forte tolérance aux composés toxiques**

Certains polluants sont toxiques pour les êtres vivants. Par exemple, les cyanures sont des inhibiteurs puissants de la respiration. Ils bloquent dans la mitochondrie la « chaîne respiratoire » qui permet le transfert des électrons jusqu'à l'oxygène. Le pentachlorophénol est un découplant des phosphorylations oxydatives. Il « perméabilise » les membranes aux protons, ce qui perturbe la synthèse de l'ATP et la régulation du pH cellulaire. De ce fait, ces polluants sont potentiellement inhibiteurs de la croissance de nombreux micro-organismes. Si ces composés sont toxiques pour les spores de champignon dont ils inhibent la germination, des cultures fongiques âgées de quelques jours tolèrent et dégradent des concentrations élevées de ces composés.

### **Possibilité d'utiliser des souches hyperproductrices d'un système enzymatique particulier**

De nombreuses recherches ont d'abord visé à améliorer l'activité des peroxidases. Par exemple, plusieurs souches mutantes hyperproductrices d'enzymes ont été obtenues par mutagenèse au moyen d'ultraviolets. Les gènes des peroxydases ligninolytiques sont actuellement clonés et séquencés. Une telle démarche s'applique à d'autres systèmes enzymatiques. On peut donc disposer de souches surexprimant un(des) système(s) enzymatique(s) plus spécifique(s) d'une famille de polluants.

### **Utilisation de substrats de croissance économiques**

Classiquement, les champignons nécessitent, avant leur inoculation dans le sol, une phase de production en masse par culture sur des substrats organiques (rafles de maïs, copeaux de bois) peu coûteux

car sous-produits de l'agriculture ou de l'industrie. On peut alors ensemercer les sols à traiter avec des quantités massives d'inoculum, ce qui permet au champignon d'être un compétiteur efficace de la microflore autochtone, du moins pendant le temps nécessaire à la mise en place du processus de biotransformation.

## En guise de conclusion

Economiques et écologiques sont deux adjectifs qui caractérisent les procédés biologiques de dépollution des sols. Cependant, ceux-ci restent à développer et de nombreuses données scientifiques restent encore à acquérir, compte tenu des nombreuses interactions entre le sol, les micro-organismes et les polluants. Dans ce contexte, les champignons filamenteux, dotés de potentialités intéressantes, doivent encore faire la preuve de leurs capacités réelles. Pour mener à bien une telle épreuve, en dépollution de sites industriels, une collaboration a été engagée entre l'INRA et la division Réhabilitation de sites de la société KREBS Réseau Eurisys. Cette société, spécialisée en ingénierie et services dans le secteur de la chimie, intervient également dans le domaine de l'environnement lié au traitement des déchets, pollutions et nuisances d'origine industrielle. Le programme de recherche financé par KREBS s'intéresse au traitement par les champignons de polluants persistants du type HAP, PCB et aromatiques nitrés dans les sols pollués.

D'un point de vue réglementaire, les critères utilisés pour évaluer un site ou un procédé de dépollution ne sont pas les mêmes dans les différents pays de l'Union européenne. En France, on se heurte toujours à l'absence de normes aussi bien sur les teneurs maximales admises pour les composés organiques dans les sols que sur les techniques d'analyse permettant d'évaluer ces teneurs. La future réglementation européenne imposera la validation d'un procédé de dépollution ■

## Eléments de bibliographie

- ALEXANDER M., 1994. *Biodegradation and bioremediation*. Academic Press, San Diego, 302 pp.
- BARR D.P., AUST S.D., 1994. Mechanisms white rot fungi use to degrade pollutants. *Environ. Sci. Technol.*, 28, 78A-86A.
- BOLLAG J.M., LIU S.Y., 1990. Biological transformation processes of pesticides. In H.H. CHENG : *Pesticides in the soil environment, processes, impacts, and modeling*. Soil Science Society of America Book Series 2, Madison, pp. 169-211.
- COOKSON J.T. Jr, 1995. *Bioremediation engineering : design and application*. McGraw-Hill, New York, 524 pp.
- HIGSON F.K., 1991. Degradation of xenobiotics by white rot fungi. *Rev. Environ. Contamin. Toxicol.*, 122, 111-152.
- HODGSON J., LAUGERO C., LEDUC R., ASTHER M., GUIOT S.R. Decrease of the methanogenic inhibition exerted by dehydroabietic acid after a fungal pretreatment by *Phanerochaete chrysosporium*. Article soumis à *Appl. Environ. Microbiol.*
- LAUGERO C., MOUGIN C., SIGOILLOT J.-C., MOUKHA S., ASTHER M. Influence of culture conditions on pentachlorophenol degradation by *Phanerochaete chrysosporium* in relation to pentachloroanisole formation. Article soumis à *J. Biotechnol.*
- LAUGERO C., SIGOILLOT J.-C., MOUKHA S., FRASSE P., BELLON-FONTAINE M.-N., BONNARME P., MOUGIN C., ASTHER M., 1996. Selective hyperproduction of manganese peroxidases by *Phanerochaete chrysosporium* I-1512 immobilized on nylon net in a bubble-column reactor. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 44,717-723.
- MOUGIN C., LAUGERO C., ASTHER M., CHAPLAIN V. Biotransformation of s-triazine herbicides and related degradation products in liquid cultures by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. Article soumis à *Pestic. Sci.*
- MOUGIN C., LAUGERO C., ASTHER M., DUBROCA J., FRASSE P., 1994. Biotransformation of the herbicide atrazine by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 60, 705-708.
- MOUGIN C., PERICAUD C., DUBROCA J., ASTHER M. Enhanced mineralization of lindane in soils supplemented with the white rot basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. Article soumis à *Soil Biol. Biochem.*
- MOUGIN C., PERICAUD C., MALOSSE M., LAUGERO C., ASTHER M., 1996. Biotransformation of the insecticide lindane by the white rot basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. *Pestic. Sci.*, 47, 51-59.
- SOHIER L., 1996. Traitement biologique de sols pollués par des composés organiques. *Environnement et Techniques*, 156, 46-52.
- VANDEGRIFT G.F., REED D.T., TASKER I.R. (ed.), 1992. *Environmental remediation, Removing organic and metal ion pollutants*, ACS Symposium Series 509, Washington, 275 pp.