

Mycoremédiation

La **mycoremédiation** (parfois aussi appelée **fongoremédiation**) est l'ensemble des techniques utilisant une ou plusieurs espèces de champignon(s) pour épurer un milieu (eau, air, sol) ou un substrat de culture d'un ou plusieurs polluants ou éléments chimiques indésirables. C'est une technique initialement promue par Paul Stamets et d'autres mycologues qui préconisent de développer la culture de champignons, et qui considèrent la **fungiculture** comme une source importante de nourriture et de molécules utiles pour le futur, mais aussi comme un moyen d'améliorer les techniques de **bioremédiation**. Ils pensent que les champignons peuvent aussi jouer un rôle très important dans le domaine de la dépollution ; en accompagnement de la **phytoremédiation** ou de l'utilisation de divers microorganismes ; utilisés seuls ou en association épuratrice...

Cette **technologie environnementale** fait partie des techniques dites de **bioremédiation** et est parfois classée parmi les techniques de **phytoremédiation**, improprement car les champignons ne sont pas des plantes. Quand il s'agit de purifier de l'eau, de l'air ou un autre fluide, on parlera plus précisément de **mycofiltration**. Si l'opération se passe dans un **bioréacteur**, celui-ci peut être qualifié de **biofiltre**.

La mycoremédiation est nouvelle en tant que concept scientifique et technique, mais elle est en fait utilisée depuis des millénaires dans les processus de **compostage**.

La mycoremédiation est ainsi utilisée dans le domaine des biotechnologies dites "vertes", qui sont les biotechnologies liées à l'agriculture, l'environnement...

1 Étymologie

Le mot « *mycoremédiation* » est un **néologisme** créé par Paul Stamets à partir du grec « *mycos* » = champignon, et du latin « *remedium* » = rétablissement de l'équilibre, **remédiation**.

2 Principe

La technique utilise deux des capacités des mycéliums

- capacité à intimement coloniser le sol, des cadavres, des excréments contaminés (tant que le contaminant n'est pas **fongicide**)
- sécrétion extracellulaire d'**enzymes** et d'**acides** capables de décomposer des molécules très stables

telles que la **lignine** et la **cellulose**, les deux principales composantes de la **fibres végétale**. Certains champignons sécrètent des enzymes capables de dégrader d'autres composés organiques également composés de longues chaînes de **carbone** et d'**hydrogène**, structurellement proches de nombreux polluants organiques.

La mycoremédiation repose sur la connaissance de l'affinité marquée de certains champignons pour certains polluants.

3 Intérêt et avantages

L'intérêt de la mycoremédiation est technique mais aussi économique ; il s'agit d'épurer un milieu en y captant ou détruisant un produit toxique ou indésirable, comme on peut le faire avec d'autres solutions techniques physico-chimiques, mais souvent bien moins coûteusement qu'avec ces dernières. La mycoremédiation s'apparente pour sa méthode et ses moyens à la **phytoremédiation** ou à l'utilisation de bactéries.

Les champignons existant ne pouvant théoriquement être **brevetés**, ils peuvent être utilisés dans les pays pauvres à moindre coût que d'autres techniques demandant le versement de **royalties** à ses inventeurs ou ayants droit du brevet.

Certains champignons, dans certaines conditions qu'on peut chercher à reproduire dans des **bioréacteurs** semblent capables de dégrader ou d'accélérer la dégradation de composés organiques toxiques réputés très stables (dioxines ou PCB, ou certains pesticides par exemple) ou très toxiques (On a par exemple trouvé des souches capables de dégrader deux **gaz de combats** utilisés comme arme chimique : le **gaz neurotoxique VX** et le **sarin**).

Efficacité : pour certains polluants, la mycoremédiation pourrait agir plus efficacement et plus rapidement (à coûts égaux ou moindres) que via la **phytoremédiation** ou l'usage de bactéries. Ce semble être par exemple le cas des **hydrocarbures** et de nombre de leurs dérivés^[1].

Contrairement aux traitements chimiques ou électriques, les coûts de la mycoremédiation sont faibles et ne laissent *a priori* pas de séquelles négatives sur les sols (au contraire, ces derniers en sont fonctionnellement et structurellement améliorés)

4 Limites

La culture des mycéliums dans le sol ou dans un biofiltre demande, pour de nombreuses espèces de champignons, des conditions thermo-hygrométriques, certains apports en oligo-éléments, nutriments ou régulateurs de pH et d'autres conditions d'environnement encore mal comprises (ex : probables synergies entre plusieurs champignons, ou avec des bactéries accélérant la dégradation de composés nocifs ou nécessaires à celle-ci ..)^[2].

Certains toxiques, parce qu'ils ont une action fongicide sont inaccessibles à la mycoremédiation (hormis si l'on utilise des souches résistantes).

Dans le cas de fongocultures à vocation épuratoire pratiquées en plein air, il faut aussi prendre certaines précautions afin que les carpophores ou fructifications souterraines (dans le cas de champignons de type truffe, *elaphomyces*, etc) ne soient pas mangées par des humains ou des animaux, qui risqueraient alors de gravement s'intoxiquer.

5 Exemple d'utilisation et expérimentations



Le Pleurote en huître et un champignon dont le mycélium s'est montré capable de « casser » les chaînes de carbone des molécules de pétrole dans un substrat pollué

Un échantillon de sol contaminé par du fioul a étéensemencé avec un mycélium de Pleurote en huître (champignon dont la culture est aujourd'hui bien maîtrisée) alors qu'une bioremediation plus « traditionnelle » (c'est-à-dire par des bactéries ou des produits chimiques) était pratiquée sur des échantillons de contrôle identiquement pollués. Les tas ont été ensuite bâchés. Après seulement quatre semaines, le tas de terre polluée et ensemencé était couvert de Pleurotes dont certains mesuraient 12 pouces (30 cm) de diamètre. Et plus de 95 % du nombre des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) initia-



Les phorides font partie des invertébrés se nourrissant par milliers des carpophores en fin de vie, contribuent ainsi au cycle du carbone. Certains phorides sont particulièrement utiles aux équilibres écologiques (en parasitant par exemple les fourmis de feu, introduites aux USA et devenues très invasives

lement présents étaient détruits, et les champignons ne contenaient pas de HAP, ce qui signifie que dans ce cas les HAP avaient bien été dégradés (a priori en CO₂ et en vapeur d'eau) et non qu'ils ont simplement été déplacés et concentrés par les pleurotes. Les auteurs précisent qu'après 8 semaines, les carpophores des champignons ont produit leurs spores et ont commencé à pourrir ce qui a attiré un grand nombre de mouches (principalement de la famille des *Sciaridae* et *Phoridae*) et d'autres invertébrés mangeurs de champignons venant se gorger de spores, qu'ils contribuent à diffuser). Ces invertébrés ont à leur tour attiré des oiseaux, ce qui fait que le tas de terre traité par les champignons grouillait de vie et évoluait une oasis, alors que les autres semblaient morts.

Par hasard lors d'une autre expérience, impliquant un autre champignon trouvé dans une forêt ancienne, Paul Stamets et son équipe ont observé que ce champignon développait une colonie d'entités cristallines sur le front de croissance de son mycélium. cette structure se désintègre quand elle rencontre des bactéries *E. coli*, en envoyant un signal chimique au mycélium-père qui, en réponse, génère une structure macrocristalline qui attire les bactéries motiles par milliers. L'activité de ces bactéries est alors inhibée par le champignon et le mycélium mange ensuite les *E. coli* en les éliminant de son environnement, ce qui contribue aussi à l'épuration du sol.

Des zones-tampon (berges naturelles, bandes enherbées, ripisylves) sont recommandées le long des cours d'eau (en Amérique du Nord et dans différents pays. Elles sont même depuis les années 2000 maintenant localement obligatoires en France, à la demande de l'Europe, mais aussi en tant que zone-tampon ou substitut à un Corridor biologique dans la trame verte et bleue). Pour Paul Stamets et son équipe, ces zones n'auront un rôle efficace de filtration et d'épuration que si des mycéliums colonisent partout les premiers centimètres de leur sol. Les zones-tampons couvertes par une mosaïque de zones enherbées et de boisements multi-étagés et d'arbustes où de nom-

breux débris tombent sur le sol en nourrissant les champignons sont les plus épuratrices, car abritant et entretenant un tapis de mycéliums durablement apte à filtrer et décomposer de nombreux toxiques. Les zones rivulaires mycologiquement les plus riches sont plus fraîches, attirent plus d'insectes dont les larves ou descendants nourriront les poissons et amphibiens, en favorisant aussi la vie de nombreux oiseaux et chiroptères. Quand ces zones rivulaires ont atteint un « plateau de complexité écologique », elles deviennent autonomes (système autocatalytique). Paul Stamets s'étonne qu'on ne mentionne pas plus souvent l'importance vitale des champignons dans les zones tampons de corridors écologiques telles que les cours d'eau, sans parler de l'introduction ciblée de colonies mycéliales qui permettraient de mieux protéger ou restaurer des bassins hydrographiques entiers. L'usage croissant par l'agriculture intensive des pesticides (dont fongicides) depuis plusieurs décennies, associé à un déficit chronique en matière organique a hélas et justement contribué à fortement réduire la présence des mycéliums et champignons dans les parcelles agricoles cultivées.

Cette méthode, comme celle consistant à périodiquement enrichir le sol superficiel en mycélium *via* à l'apport de Bois raméal fragmenté est ingénieuse et simple dans sa conception, et idéale pour de nombreux polluants organiques. Les mycéliums et carpophores ou fructifications souterraines de champignons peuvent cependant fortement bioaccumuler des toxiques non biodégradables (métaux lourds ou métalloïdes provenant du ruissellement urbain ou routier) et contribuer à localement (re)contaminer le réseau trophique.

La mycofiltration est un complément naturel à la machine vivante épuratrice ("Living Machine ®") de John Todd qui reproduit un écosystème estuarien ou de lagune (lagunage naturel) pour décomposer des déchets organiques, éventuellement toxiques. Paul Stamets estime que le mariage de cette technique avec celle utilisant des mycéliums de champignon pourrait résoudre à court terme, certains des plus grands défis menaçant notre biosphère, voire contribuer à un « nouveau paradigme pour le 21^e siècle » donnant un sens au mot « soutenabilité^[3] ».

Le Traitement *ex situ* de sédiments contaminés, par des champignons vivant est expérimenté, et selon Thomas^[4], utilisable non seulement pour épurer une partie des centaines de millions de tonnes de sédiments pollués annuellement curés dans les canaux et eaux douces, mais aussi dans les ports, même pour des sédiments salés et contenant jusqu'à 70 % d'eau, et à la fois pollués par des métaux, des hydrocarbures et des PCB, comme le montrent les tests faits sur des sédiments curés dans le port de Norfolk (Connecticut). 20 % de ces sédiments avaient été enrichis de copeaux de boisensemencés avec une souche de champignon sélectionné pour son aptitude à la mycoremédiation de ce type de milieu. L'apport se faisait par simple dépôt en couche, ou par mixage, et le temps de « bio-réaction » était de 16 semaines^[5]. Cette technique pourrait être utile pour sécuriser les « sédimatériaux » que

les ports cherchent à valoriser économiquement. D'autres expériences sont en cours.

Le laboratoire des sciences de la mer, de la fondation Battelle^[6] (fondation nord-américaine à but non lucratif s'étant donné pour mission d'utiliser la science pour améliorer la santé environnementale et améliorer la santé des écosystèmes marins). Depuis les années 1990, il travaille notamment sur la bioremédiation et le traitement de certains déchets toxiques ou de la démilitarisation d'armes chimiques^[7]. Sous la direction du Dr Jack Word il a expérimenté différentes souches de champignons provenant de la banque de gènes de Paul Stamets, dont bon nombre ont été obtenus grâce des collectes de spécimens lors de randonnées dans les forêts anciennes des chaînes montagneuses Olympic Mountains et des Cascades. L'équipe a déposé une demande de brevet pour un tapis « mycélium » adapté à la biorestoration d'eaux polluées par "mycoremédiation".

6 Quels sont les champignons les plus efficaces

Ces techniques étant encore jeunes, peu de champignons ont été testés, et leur potentiel est sans doute très sous-estimé^{[8],[9]}.

Paul Stamets estime que les champignons xylophages ou saproxyliques (qui dégradent le bois mort) semblent particulièrement efficaces dans la dégradation de polluants aromatiques (composants toxiques de nombreux hydrocarbures et HAP, mais aussi pour décomposer des composés organochlorés, dont certains pesticides persistants et des toxiques de combat utilisées dans des armes chimiques). La plupart des champignons connus pour être efficaces dans la dégradation des polluants appartiennent aux embranchements des ascomycètes (Ascomycota) et des basidiomycètes (Basidiomycota), mais d'autres groupes et espèces ou souches sont encore sans doute à découvrir ou tester.

Il semble évident et naturel que la communauté microbienne contribue (comme elle le fait dans la nature) à l'efficacité des champignons en matière de décomposition des contaminants organiques qui finissent dégradés en dioxyde de carbone et en eau. Les champignons favorisent souvent le travail des bactéries qui utilisent le mycélium « comme une sorte de réseau routier à travers lequel elles peuvent circuler »^[10]. À l'avenir des associations fongo-bactériennes pourront probablement encore améliorer l'efficacité de la mycoremédiation.

7 Le cas des produits non biodégradables

Les champignons, comme les plantes et n'importe lequel de tous les êtres vivants connus ne peuvent dé-

grader (biodégradation) que de la matière organique, des molécules issues de la chimie organique ou certains minéraux complexes mais en aucun cas des toxiques inorganiques (éléments traces métalliques (ETM) tels que les métaux lourds ou des métalloïdes, éventuellement radioactifs. Certains champignons peuvent néanmoins, via leurs mycéliums (là où ces derniers peuvent coloniser le milieu ou avoir accès à l'eau interstitielle polluée), extraire un ou plusieurs de ces métaux lourds du milieu, et les concentrer dans leur fructification (le « chapeau » du champignon). Ce procédé demande un temps supérieur aux techniques industrielles mais ne nécessite pas ou très peu d'intrants chimiques, biologiques ou énergétiques.

8 Principe de la mycoremédiation

Elle repose essentiellement sur les interactions entre le champignon et ses métabolites, le sol ou l'eau et éventuellement des plantes ou micro-organismes participant aux cycles en jeu.

Champignons, plantes et micro-organismes ont coévolué pour disposer d'une stratégie à bénéfices mutuels leur permettant de gérer la toxicité naturelle de certains milieux. Ces processus peuvent être utilisés pour la bioremédiation. Les champignons symbiotes de nombreuses plantes étendent considérablement leur rhizosphère (le volume de sol soumis à l'influence de l'activité racinaire).

8.1 Principe de décontamination

Il est double et peut être résumé de la manière suivante ;

- Les champignons peuvent absorber de nombreux contaminants. Certains (métaux tels que le plomb, le mercure, le cadmium, le zinc), ou certains radionucléides (tels que le césium issu des retombées de la catastrophe de Tchernobyl) seront simplement transportés et/ou stockés dans le mycélium ou la fructification. En éliminant les parties du champignon où le polluant s'est accumulé on décontamine le milieu en question.
- D'autres composés (organiques, organométalliques ou organominéraux, xénobiotiques ou non) seront métabolisés et transformés en produits généralement moins toxiques ou moins persistants. Seuls les champignons évolués peuvent aujourd'hui jouer ce rôle.

Ce peut être dans certains cas un des éléments d'une bonne **phytorestauration** (technique visant la restauration complète de sols pollués vers un état proche du fonctionnement d'un sol naturel (Bradshaw 1997). Enrichir le sol en champignons microscopiques ou évolués (par un apport en bois raméal fragmenté (BRF), en paille, fumier, ou en matière organique non dégradée, peut contribuer à

améliorer sa capacité productive du sol via la **phytostimulation** (essentiellement localisée dans la rhizosphère, elle dope les activités microbiennes favorables à la dégradation des polluants. Cet aspect, quand il a été étudié, a été constaté chez tous les hyperaccumulateurs.

- la mycoremédiation, comme la phytoremédiation est limitée en surface et en profondeur à la zone susceptible d'être colonisée par le mycélium ou aux volumes d'eaux interstitielles susceptibles d'être captées par ces mêmes mycéliums (Cependant certains polluants ne migrent verticalement que lentement et restent donc longtemps accessibles aux champignons, dans la couche de sol supérieure (c'est le cas du plomb par exemple, sauf si le sol est très acide, drainant et pauvre en complexes argilo-humiques) ;

L'adjonction de chélateurs ou d'autres substances pourraient doper ces techniques (pour les pollutions inorganiques comme les ETM), mais ce domaine est encore émergent et demande plus de R&D.

9 Hyperaccumulateurs et interactions biotiques

Les champignons sélectionnés pour la myco-extraction doivent être choisis pour leur capacité à extraire des volumes importants de polluants du milieu où on les cultivera. Ils sont dits **hyperaccumulateurs**. On peut parfois directement les trouver sur des sites pollués par le polluant qu'on cherche à éliminer ou sur le site même que l'on veut traiter.

9.1 Le biofilm

Cette section est vide, insuffisamment détaillée ou incomplète. *Votre aide est la bienvenue !*

Voir aussi articles correspondants sur le biofilm.

10 Dans la littérature non scientifique

Le concept de mycoremédiation a été exploré dans le film de 1984 *Nausicaä de la vallée du vent*, où de vastes étendues de forêts de champignons réhabilitent la planète après une catastrophe polluante et une apocalypse.

11 Voir aussi

11.1 Articles connexes

- Champignon
- Mycologie
- Bioremédiation
- Bioturbation
- Phytostabilisation
- Plantes dépolluantes

11.2 Bibliographie

- Singh, Harbhajan ; *Mycoremediation : fungal bioremediation* ; Ed : Wiley-Interscience, New York ; 2006 ; ISBN 0-471-75501-X (en)
- S.A. Thomas, et al., *Mycoremediation : A method for test- to pilot-scale application*, API EnCompass, 1999/04/17 (en)

11.3 Liens externes

- Analyse par VisWiki des thèmes associés à celui de mycoremédiation

11.4 Notes et références

- [1] S Thomas, P Becker, MR Pinza, JQ Word ; Rapport de Recherche intitulé : *Mycoremediation of aged petroleum hydrocarbon contaminants in soil*, Washington State Department of Transportation, réalisé en coopération avec l'administration fédérale chargée des routes par le *Pacific northwest national laboratory* de la fondation Battelle, novembre 1998, pdf, 76 pages, (en) (Consulté 2009/05/31)
- [2] *Phytoremediation - Transformation and control of contaminants*. Par S.C. McCutcheon et J.L. Schnoor (2003). Dans Wiley-interscience, Inc., NJ, USA, 987 pages.
- [3] Battelle, 2000
- [4] Dr Susan A. Thomas, mycologue et spécialiste de la mycoremédiation au *Pacific Northwest National Laboratory Marine Sciences Laboratory*, de Sequim
- [5] *Thomas, Susan A., Pinza, Meg R., and Becker ; Technical Area : Sediment Remediation Mycoremediation of Marine Sediment : Feasibility Studies* ; Peter Pacific Northwest National Laboratory
- [6] *Battelle Laboratories* ou *Marine Sciences Laboratory* de la fondation *Battelle*, fondée par l'industriel Gordon Battelle, abrité par le *Pacific Northwest National Laboratory*
- [7] Page de la fondation *Battelle* sur son implication dans la démilitarisation
- [8] “Untapped potential : exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals.”, *Nature Reviews Microbiology* - 2011]

[9] UFZ “Ungenutzte Möglichkeiten : Pilze könnten künftig viel öfter gegen gefährliche Chemikalien eingesetzt werden” ; communiqué de presse du Centre Helmholtz de recherche environnementale (UFZ) ; 24/03/11

[10] ADIT, BE Allemagne numéro 520 (30/03/2011) - Ambassade de France en Allemagne / ADIT -

11.5 Sources

- (en) Paul Stamets (non daté) *Helping the Ecosystem through Mushroom Cultivation* (Aider les écosystèmes en cultivant des champignons). *Adapté de Paul Stamets, 1998*, « Earth's Natural Internet », *Whole Earth Magazine, automne 1999*.
- (en) S. A. Thomas, *Mushrooms : Higher Macrofungi to Clean Up the Environment*, Battelle Environmental Issues, Fall 2000. (*Des champignons supérieurs pour nettoyer l'environnement*)

-  Portail de la mycologie

-  Portail de la permaculture

12 Sources, contributeurs et licences du texte et de l'image

12.1 Texte

- **Mycoremédiation** *Source* : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Mycorem%C3%A9diation?oldid=115219142> *Contributeurs* : NicoRay, TED, Pautard, Lamiot, Cardabelle, Skiff, Vlaam, Dhatier, Alexbot, WikiCleanerBot, ZetudBot, Ggal, Luckas-bot, Margelaberge, Dark Attsios, Cantons-de-l'Est, SassoBot, EpopBot, Lomita, Botozor, EmausBot, Ediacara, ZéroBot, Narzil, Bertol, Gtaf, Goliath153, Addbot et Anonyme : 4

12.2 Images

- **Fichier:Kantarell_Iduns_kokbok.png** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/Kantarell%2C_Iduns_kokbok.png *Licence* : Public domain *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?
- **Fichier:Permaculture_flower_fleur_permashort_color-1331px.png** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d8/Permaculture_flower_fleur_permashort_color-1331px.png *Licence* : CC0 *Contributeurs* : <http://clipartist.net/svg/permaculture-flower-fleur-permashort-color-september-2011-clip-art-svg-openclipart-org-commons-wikimedia-org-clipartist-net/> *Artiste d'origine* : <http://openclipart.org/>
- **Fichier:Phorid_fly2.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Phorid_fly2.jpg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?
- **Fichier:Pleurotus_ostreatus_JPG7.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Pleurotus_ostreatus_JPG7.jpg *Licence* : CC BY 3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : voir ci-dessous / see below

12.3 Licence du contenu

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0