

Chapitre 5 : La Bioremédiation.

- Introduction

Ces dernières années, le développement de techniques efficaces pour la décontamination des sites pollués est devenu indispensable. L'une d'elles, la bioremédiation qui exploite les propriétés de certains organismes vivants à extraire les polluants et restaurer les milieux contaminés.

Les techniques conventionnelles utilisées pour l'assainissement et la restauration des sites consistent à extraire la partie contaminée et à l'évacuer vers une décharge. Ces méthodes présentent certains inconvénients. La première méthode ne fait que déplacer la contamination ailleurs et peut créer des risques importants liés à l'excavation, à la manipulation et au transport de matières dangereuses. En outre, il est très difficile et de plus en plus coûteux de trouver de nouveaux sites d'enfouissement pour l'élimination finale des matériaux.

Contrairement aux techniques physiques ou chimiques, la bioremédiation est la méthode économiquement viable et harmonieuse de l'environnement. D'autre part, la bioremédiation fait appel le plus souvent aux plantes (phyto-remédiation) ou aux microorganismes ou aux deux organismes ensemble. En effet, une stimulation microbienne dans la rhizosphère peut augmenter les performances des plantes dans la dépollution.

Dans ce chapitre, l'aspect microbien sera le plus développé car concordance avec le cours en question ; à savoir la microbiologie.

1. Historique

L'utilisation de microbes dans la biorémédiation moderne est attribuée, en partie, à George Robinson. Il a utilisé des microbes pour consommer une marée noire le long de la côte de Santa Barbara, en Californie, à la fin des années 1960. Depuis les années 1980, la biorémédiation des déversements d'hydrocarbures et d'autres déchets dangereux a été davantage prise en considération.

2. Définition

Le mot « bioremédiation » est composé de « bio » = être vivant et « remedium » = rétablissement de l'équilibre.

De manière générale, la biorémédiation est définie comme le processus par lequel les déchets organiques sont biologiquement dégradés dans des conditions contrôlées jusqu'à un état inoffensif ou à des niveaux inférieurs aux limites de concentration établies par les autorités réglementaires. C'est un mécanisme qui utilise les potentiels naturels des microorganismes et leurs produits pour éliminer les contaminants du sol.

La technologie de la biorémédiation vise à transformer en contaminants bénins les contaminants présents dans les sols, les sédiments, l'eau et l'air.

3. Principe

La biorémédiation utilise les réactions métaboliques microbiennes dans de conditions environnementales optimales et de nutriments suffisants pour décomposer les contaminants. Pour que la biorémédiation soit efficace, les micro-organismes doivent attaquer les polluants par voie enzymatique et les transformer en produits inoffensifs.

4. Les microorganismes utilisés en bioremédiation

Ils proviennent de milieux très variés et peuvent vivre dans des conditions extrêmes : des températures en dessous de 0°C ou au contraire, très élevées, dans des milieux inondés ou en plein désert, en présence d'un excès d'oxygène ou milieu anaérobie. En raison de leur pouvoir d'adaptation, ces microorganismes sont utilisés pour éliminer les composés xénobiotiques.

Parmi les bactéries aérobies reconnues pour leur pouvoir de dégradation, nous pouvons citer celles appartenant aux genres *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Sphingomonas* et *Mycobacterium*. Elles peuvent dégrader les pesticides, les hydrocarbures, les alcanes et les composés polyaromatiques. Souvent, elles utilisent le polluant comme source de carbone et d'énergie.

Les bactéries anaérobies sont moins fréquentes que les aérobies. Cependant, elles présentent un grand intérêt dans la bioremédiation des polyphényles polychlorés, du trichloroéthylène et le 1,2 dichloroéthane. Dans tous les cas, l'opération implique le contrôle non seulement de la disponibilité des dépollueurs mais aussi l'ajustement en permanence des conditions de leur efficacité: quantité et type de nutriments, concentration en oxygène, pH, température et salinité.

Donc les microorganismes sont subdivisés en groupes suivants:

- En présence d'oxygène (aérobie), exemples : *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Sphingomonas*, *Rhodococcus* et *Mycobacterium*. Ces microbes ont souvent été signalés comme dégradant les pesticides et les hydrocarbures, aussi bien les alcanes que les composés polyaromatiques. Beaucoup de ces bactéries utilisent le contaminant comme unique source de carbone et d'énergie.

- En l'absence d'oxygène (anaérobie), exemple : *Phanaerochaete chrysosporium* est un champignon qui a la capacité de dégrader une gamme extrêmement variée de polluants environnementaux persistants ou toxiques.

5. Les techniques de Bioremédiation

En bioremédiation, les microorganismes utilisés peuvent être originaires à la zone contaminée ou isolés d'ailleurs et transportés vers le site contaminé. Par ailleurs, il existe cinq principaux concepts qui sont développés dans les paragraphes qui suivent.

5.1. La biodégradation

C'est l'action de plusieurs organismes pour stimuler les capacités naturelles des microorganismes à décomposer les polluants organiques. Elle peut être utilisée pour le sol et les eaux souterraines. De manière générale, cette technique implique l'infiltration de nutriments contenant de l'eau et de l'oxygène ou d'autres accepteurs d'électrons.

5.2. La bioaugmentation

La **bioaugmentation** est une technique mettant en œuvre des **micro-organismes** (généralement des bactéries, nématodes, protozoaires, champignons) afin de traiter des zones touchées (sol et eau) par divers polluants carbonés, azotés ou phosphorés.

Les micro-organismes déjà présents dans les sols ou l'eau, ne sont pas capables de dépolluer, c'est pourquoi l'utilisation de microorganismes extérieurs est nécessaire. Généralement les microorganismes sont sélectionnés sur la base de leur aptitude à dégrader les composés organiques présents dans le site à dépolluer. La culture peut comprendre une ou plusieurs espèces de microorganismes. Des éléments nutritifs sont généralement apportés dans la solution contenant les microorganismes. Cette suspension de microorganisme est apportée à la surface du sol dans les conditions naturelles ou injecte dans le site contaminé sous pression.

L'utilisation de la bioaugmentation a pour exemple principal le traitement des eaux des villes par des **boues actives** (stations d'épuration). Les microorganismes présents dans ces boues, vont utiliser les polluants comme source d'énergie ainsi que de l'oxygène, c'est pourquoi il est nécessaire d'aérer les boues activées afin de permettre la survie et la croissance des microorganismes.

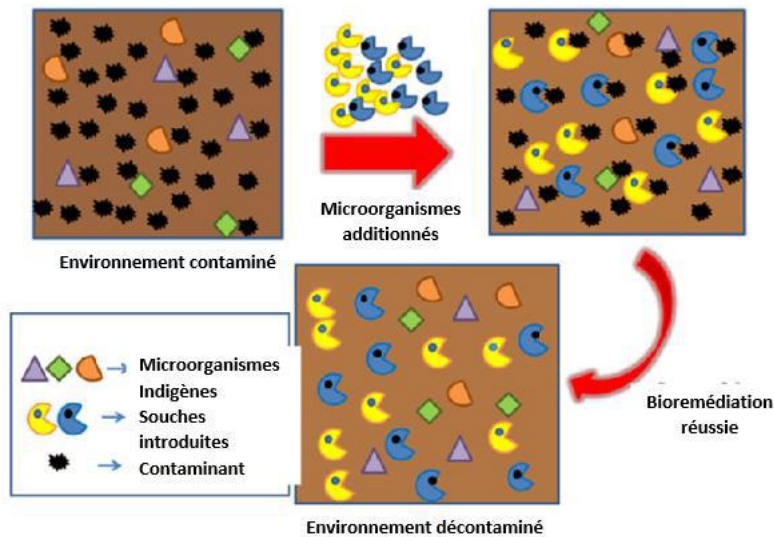


Figure 1 : Principal diagramme de bioaugmentation.

5.3. Biostimulation

Elle est considérée comme la méthode la plus efficace de dépollution des hydrocarbures. C'est une technologie d'assainissement très efficace, rentable et respectueuse de l'environnement. Elle consiste à ajouter des nutriments limitant la croissance tels que le phosphore, l'azote, l'oxygène et les donneurs d'électrons à des sites fortement pollués pour stimuler les bactéries existantes à dégrader les polluants dangereux et toxiques.

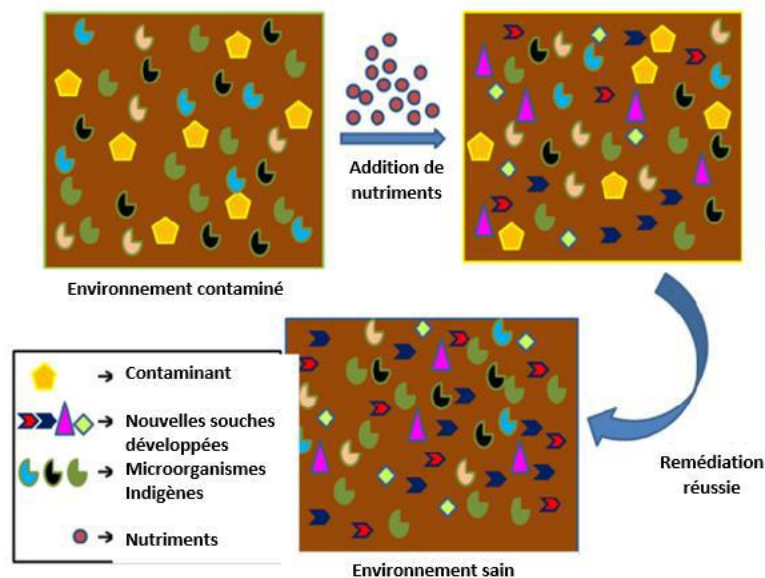


Figure 2: Principal diagramme de biostimulation.

-Le bioventing (bioventilation) : c'est le traitement in situ le plus courant. Il consiste à transporter de l'air et des nutriments vers le sol contaminé à travers des puits pour stimuler le métabolisme naturel des bactéries. Autrement dit, la ventilation biologique utilise un faible débit d'air et ne fournit que la quantité d'oxygène nécessaire à la biodégradation tout en minimisant la volatilisation et le rejet des contaminants dans l'atmosphère.

-Le biosparging consiste à injecter de l'air sous pression en dessous du niveau de la nappe phréatique pour augmenter la concentration d'oxygène dans la nappe phréatique et augmenter le taux de biodégradation des polluants par les bactéries présentes dans la nature. Ce processus augmente le mélange dans la zone de saturation, renforçant ainsi le contact entre le sol et les eaux souterraines.

5.4. La biofiltration

Consiste à l'utilisation d'un biofiltre pour traiter les émissions gazeuses : Le principe consiste à utiliser des microorganismes pour dégrader les polluants contenus dans l'air à traiter : la phase aqueuse (l'air contaminé) est mise en contact avec une phase aqueuse dans laquelle se développe la population microbienne, connue aussi sous le nom de la biomasse. Dans une unité de biofiltration, l'air à épurer (à dépolluer) traverse d'abord un filtre et un humidificateur afin de supprimer les particules (poussières, graisses) présentes dans le gaz et d'amener le niveau d'humidité à 100%. L'air est ensuite introduit dans un réacteur (une cuve) contenant un garnissage formé de matériaux très poreux (très avide pour l'humidité). A la surface des particules qui constituent le garnissage se trouve un biofilm qui correspond à une pellicule d'eau contenant des microorganismes (bactéries et champignons) dont la fonction est de dégrader les polluants présents dans l'air à traiter. Cette technologie est par exemple utilisée pour traiter l'air pollué par le xylène ou par des composés azotés.

5.5. La biolixiviation

C'est la lixiviation favorisée par la voie biologique (généralement bactérienne). Elle correspond à une méthodologie de solubilisation des métaux lourds grâce à des bactéries acidophiles fonctionnant en présence ou en l'absence d'oxygène. Deux facteurs sont importants pour la biolixiviation : la température qui doit être comprise entre 25 et 35 °C. La taille des particules qui doivent être très proches de celle des bactéries.

6. Utilisation des microorganismes en bioremédiation

L'étude des microbes dans les systèmes de biorémédiation permet de sélectionner des microorganismes ayant un potentiel pour la dégradation et la production de composés ayant des applications biotechnologiques dans l'industrie pétrolière et pétrochimique.

La dégradation des composés organiques toxiques, nécessite le contact des bactéries et les contaminants. Certaines bactéries sont mobiles et présentent une réponse chimiotactique, détectant le contaminant et se déplaçant vers lui. D'autres microbes, comme les champignons, se développent sous forme filamenteuse vers le contaminant.

En particulier, les microorganismes indigènes du sol jouent un rôle clé dans la biorémédiation du sol en tant qu'agents biogéochimiques pour minéraliser les composés organiques complexes en composés inorganiques simples ou en leurs éléments constitutifs. En général, les particules du sol ont une charge négative, et le sol et les bactéries peuvent se tenir ensemble par une liaison ionique impliquant des cations polyvalents.

6.1. Exemple d'une bactérie qui dégrade les nitrates

La bactérie *Pseudomonas halodenitrificans* est capable de dégrader les nitrates. Ces derniers, utilisés en agriculture sous forme d'engrais, deviennent une menace pour la qualité de l'eau lorsqu'ils sont répandus dans l'environnement.

La bactérie est capable pour respirer d'utiliser des nitrates qu'elle transforme par réduction en azote moléculaire, élément gazeux inerte, qui retourne dans l'atmosphère et ne présente plus de danger de pollution. Cette capacité à réduire les nitrates en azote moléculaire (dénitrification) est très répandue chez les bactéries. Elle est mise en œuvre dans les stations d'épuration pour éliminer l'azote des eaux usées après une étape de nitrification de l'azote organique et ammoniacal en nitrate.

6.2. Des microorganismes contre les mauvaises odeurs

Ils sont capables d'éliminer les effluents gazeux simples ou composés organiques volatils (COV) : solvants, composés soufrés et azotés, aldéhydes, cétones, etc dont le principal inconvénient est leur odeur désagréable.

Pour être purifié, l'air pollué traverse un filtre à ruissellement alimenté en continu par un bioréacteur qui contient des micro-organismes spécialisés dans la dégradation de ces polluants. Le rendement est supérieur à 99 % pour les dérivés soufrés. Pour les dérivés azotés, les acides organiques, les aldéhydes / cétones et les autres COV, l'efficacité est supérieure à 80 %. Autre avantage : entièrement biologique, cette technique produit très peu de résidus. Cette technique s'adresse

principalement aux industries agro-alimentaires, aux stations d'épuration et aux centres de traitement des déchets solides.

6.3. Autres exemples

Quelques micro-organismes capables de dépolluer :

- Les Nitrates : *Comamonas*, *Hyphomicrobium*
- Les Phosphates : *Acinetobacter*, *Moraxella*
- Les Pesticides : *Enterobacter*
- Les Dioxines : *Brevibacterium*
- Les Cyanides : *Thiobacillus*, *Rhizoctonia*
- Les composés soufrés : *Thiobacillus*
- Caoutchouc : *Sulfolobus*, *Rhodococcus*, *Thiobacillus*
- Huiles, graisses : *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Bacillus*
- Les Hydrocarbures : *Acinetobacter*, *Flavobacterium*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Arthrobacter*
- Les métaux lourds : *Saccharomyces*, *Rhizopus*, *Chlorella*, *Thiobacillus*, *Zoogloea*

6.4. Influence de la microflore rhizosphérique sur la phytoremédiation

La **phytoremédiation** est un procédé basé sur l'utilisation des plantes pour dépolluer un sol. En effet, certaines plantes sont capables de fixer dans leurs cellules des polluants présents dans les sols contaminés. Elles ont la propriété d'accumuler et de tolérer des niveaux extrêmement élevés de métaux, par exemple, dans leurs tissus et dans leurs parties aériennes.

Les composantes du microbiote de la rhizosphère peuvent améliorer le potentiel phytoremédiateur de la plante par une action directe ou indirecte. L'aspect indirect se produit lorsque les microorganismes stimulent la résistance des plantes face aux phytopathogènes et aide la plante à rester saine en s'attaquant aux phytopathogènes. L'aspect direct est synthétisé par le pouvoir biofertilisateur des microorganismes dans le sol.

En résumé, le rôle des microorganismes dans la phytoremédiation est très important et peut être exprimé dans les points suivants :

- La détoxification de certains polluants pour mieux permettre leur assimilation par la plante ;
- L'augmentation des activités cataboliques entre le sol et la plante afin de promouvoir la croissance de cette dernière ;
- La stabilisation des polluants dans la rhizosphère pour augmenter leur phytodisponibilité.

7. Avantages et inconvénients de bioremédiation

La bioremédiation est une option qui offre la possibilité d'utiliser des activités biologiques naturelles pour détruire ou rendre inoffensifs divers polluants. Par conséquent, il utilise des technologies relativement bon marché et de faible technologie qui sont généralement acceptées par le public et peuvent généralement être mises en œuvre sur site.

-La bioremédiation est un processus naturel, elle est donc en harmonie avec l'environnement. Lorsque les polluants se dégradent, la population biodégradable diminue. Les résidus d'élimination sont généralement inoffensifs et comprennent le dioxyde de carbone, l'eau et la biomasse cellulaire ;

-La bioremédiation peut être utilisée pour détruire complètement divers polluants. De nombreux composés légalement considérés comme dangereux peuvent être transformés en produits inoffensifs ;

-Pas besoin de transférer des polluants d'un milieu environnemental à un autre, vous pouvez complètement détruire le polluant cible in situ ;

-La bioremédiation est économiquement plus intéressante que les autres technologies utilisées pour nettoyer les déchets dangereux.

Cependant, il n'est pas toujours approprié, car la gamme des contaminants sur lesquels elle est efficace est limitée, les délais sont relativement longs, et les niveaux de contaminants résiduels pouvant être atteints ne sont pas toujours appropriés.