

Classement des différents techniques de dépollution

Les différentes techniques de dépollution peuvent être classées :

- En fonction de la nature des procédés employés,
- En fonction du lieu de traitement,
- En fonction du devenir des polluants.

Il faut noter que la réhabilitation d'un site mettra souvent en oeuvre différentes techniques.

Classement en fonction de la nature des procédés employés

Les différentes techniques de dépollution peuvent être classées en fonction de la nature des procédés employés, à savoir :

- **Les procédés physiques** : le principe consiste à utiliser des fluides (eau ou gaz), présents dans le sol ou injectés, comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser.
- **Les procédés biologiques** : ils consistent à utiliser des micro-organismes, le plus souvent des bactéries (mais aussi des champignons et des végétaux), pour favoriser la dégradation totale ou partielle des polluants. Certains bioprocédés permettent aussi de fixer ou de solubiliser certains polluants.

- **Les procédés thermiques** : ils utilisent la chaleur pour détruire le polluant (ex : incinération), l'isoler (ex : désorption thermique, thermolyse, etc.), ou le rendre inerte (ex : vitrification, etc.).
- **Les procédés chimiques** : ils utilisent les propriétés chimiques des polluants pour, à l'aide de réactions appropriées, les inertier (précipitation, etc.), les détruire (oxydation, etc.) ou les séparer du milieu pollué (surfactants, etc.).

Classement en fonction du lieu de traitement

Les techniques de dépollution peuvent aussi être classées en fonction du lieu de traitement. On distingue les traitements suivants :

- **Traitements hors site (ou *ex situ*)** : ils supposent l'excavation/extraction du milieu pollué (déchets, terre, eau) et son évacuation vers un centre de traitement adapté (incinérateur, centre d'enfouissement technique, etc.).
- **Traitements sur site (ou *on site*)** : ils consistent à excaver les terres ou les eaux polluées et à les traiter sur le site même.
- **Traitements *in situ* (ou *en place*)** : ils correspondent à un traitement sans excavation : le sol et les eaux souterraines sont laissés en place. Il s'agit alors soit d'extraire le polluant seul, soit de le dégrader ou de le fixer dans le sol.

Classement en fonction du devenir des polluants

Les techniques de réhabilitation peuvent être classées en fonction du devenir polluants. Il existe deux possibilités :

- **L'immobilisation** :techniques qui permettent de modifier mobilité et / ou la toxicité des polluants par deux types de processus :

-Modification du polluant (changement de la toxicité) en agissant sur le niveau d'oxydoréduction, la complexation, précipitation.

-Modification du milieu récepteur : réduction de la perméabilité et porosité

- **La destruction (totale ou partielle)** par les procédés chimiques, thermiques, physiques et biologiques précédemment cités.

La bioremediation

C'est l'emploi de procédés biologiques pour éliminer les polluants industriels qui contaminent le cycle biogéochimique des substances naturelles. La bioremédiation consiste à utiliser des systèmes biologiques pour réduire le niveau de pollution présents dans l'air, l'eau ou le sol. Ce sont des microorganismes ou des plantes qui sont normalement utilisés comme systèmes biologiques

La biodégradation parvient à détoxiquer des polluants jusqu'au stade du dioxyde de carbone, de l'eau et des sels minéraux inoffensifs.

Une biodégradation incomplète peut fournir des produits de dégradation moins toxiques que le polluant initial, mais pas forcément. Par exemple, la biodégradation du trichloro- ou du tétrachloro éthylène peut libérer du chlorure de vinyle qui est plus毒ique et plus cancérogène que les composés initiaux.

Une biodégradation incomplète peut fournir des produits de dégradation moins toxiques que le polluant initial, mais pas forcément. Par exemple, la biodégradation du trichloro- ou du tétrachloro éthylène peut libérer du chlorure de vinyle qui est plus毒ique et plus cancérogène que les composés initiaux.

les composés organiques :

- les produits pétroliers : hydrocarbures aliphatiques légers et lourds
- linéaires (hexane, octane, etc.)
- cycliques (BTEX : benzène, toluène, xylène, ...)
- polycycliques : HAP2, PCB3, pyrène, etc.
- les solvants et solvants halogénés
- phénolés (toluène)
- chlorés (TCE4, PCE5, etc.)

les métaux : cuivre, zinc, plomb, cobalt, nickel, mercure, cadmium, etc.

les pollutions mixtes : composés organiques et métaux

Quelques groupes de microorganismes utilisés dans la bioremediation

1. **Aérobies:** Exemples de bactéries aérobies reconnues par leur pouvoir de dégradation *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Sphingomonas*, *Rhodococcus*, and *Mycobacterium*. Ils sont capables de dégrader les pesticides et hydrocarbures, tous les deux sont alkanes et les composés polyaromatiques.
2. Anaérobie. Peu utilisées. polychlorinated biphenyls (PCBs), dechlorination des solvents trichloroethylene (TCE) et de chloroforme.
3. Champignons ligninolytiques: *Phanaerochaete chrysosporium* peut dégrader une gamme de polluants persistents ou toxiques.

Avantages et inconvénients:

- C'est un processus naturel, les microbes qui peuvent dégrader le contaminant se multiplient lors de la présence de contaminant; quand le contaminant sera dégradé, la population microbienne sera réduite (diminuée).
- Moins coûteuse que les autres technologies.
- Les contaminants sont généralement convertis en produits moins dangereux.

Les inconvénients:

- Difficile à contrôler
- Amendements introduits pour améliorer la bioremediation peuvent causer d'autres problèmes de contamination.
- Dans certains cas, la bioremediation ne peut pas réduire la concentration de contaminants aux niveaux désirés.
- prendre beaucoup du temps (lente).
- peut nécessiter plus de surveillance.

Limitations de la Bioremediation :-

- la Bioremediation est limitée aux composés biodégradables. Les composés ne sont pas tous susceptibles à une dégradation rapide et complète.
- Dans certains cas, les produits de la biodégradation peuvent être plus persistants ou toxiques que les composés de départ. Les processus biologiques sont souvent hautement spécifiques. Ce qui demande la présence de populations microbiennes spécifiques, conditions environnementales adéquates et des niveaux de nutriments et de contaminants appropriés.
- la Bioremediation est souvent plus lente que les autres traitements (excavation and removal of soil or incineration). La définition "clean, propre" n'est pas sûre, et donc évaluer la performance de la bioremediation est difficile.

• Le métabolisme

Les polluants sont utilisés par les microorganismes pour la production d'énergie (les polluants sont métabolisés). Le métabolisme se divise en :

- **Catabolisme** qui met en jeu des réactions d'oxydoréduction ; ces réactions ayant pour but de produire de l'énergie stockée par les microorganismes,
- **Anabolisme** (qui se sert de cette énergie pour le maintien et la reproduction cellulaire).

On distingue deux sortes de dégradations biologiques suivant le type d'accepteur d'électrons :

- dégradations aérobies : l'accepteur final d'électron est l'oxygène,
- dégradations anaérobies : l'accepteur final d'électron est un composé autre que l'oxygène : nitrates (NO_3^-), manganèse ($\text{Mn} \text{ (IV)}$), fer ferrique ($\text{Fe} \text{ (III)}$), sulfates (SO_4^{2-}), dioxyde de carbone (CO_2).

Le cométabolisme

Lors du cométabolisme, le polluant n'est pas utilisé pour la croissance bactérienne mais est dégradé du fait de l'activité métabolique avec une autre molécule, dénommée inducteur cométabolique. Les enzymes synthétisées pour cette autre molécule dégradent donc en parallèle le polluant. Le microorganisme ne tire pas de bénéfice de cette dégradation.

Biostimulation et bioaugmentation

La biodépollution peut être réalisée par bioaugmentation et par biostimulation.

La **biostimulation** consiste à mettre les microorganismes indigènes dans les conditions favorables à la biodégradation envisagée. La majorité des traitements biologiques utilise la biostimulation.

La **bioaugmentation** consiste à ajouter des microorganismes afin de permettre ou d'améliorer la biodégradation.

La bioaugmentation peut être réalisée selon deux méthodes :

- Par introduction de microorganismes spécifiques non indigènes,
- Par extraction des microorganismes en vue d'une acclimatation et réintroduction dans la zone polluée.

La bioaugmentation est réalisée lorsque les microorganismes indigènes ne sont pas adaptés à la dégradation de la pollution (matériel génétique non adapté) ou lorsque les polluants sont présents à des concentrations toxiques pour les microorganismes indigènes.

Principaux facteurs influençant la biodégradabilité

Les principaux facteurs qui influencent la biodégradabilité d'un polluant sont :

- la présence de microorganismes compétents,
- la disponibilité d'accepteurs d'électrons nécessaires à l'action microbienne,
- la teneur en eau,
- le pH,
- la température,
- la disponibilité de nutriments minéraux (N, P, K, ...),

la nature, la concentration et la bioaccessibilité des polluants.

En plus des paramètres « classiques » de la biodégradation, les paramètres essentiels au bon fonctionnement de la biostimulation sont :

- le transport jusqu'à la zone polluée (mode d'injection),
- l'attachement à la matrice sols,
- la survie et la croissance des microorganismes.

La dégradabilité des hydrocarbures varie en fonction du nombre d'atome de carbone et de la structure des molécules :

- les taux de dégradation sont plus importants pour les composés saturés (alcanes) que pour les composés mono-aromatiques (BTEX, phénols) et les HAP légers (2,3 voire 4 HAP),
- le traitement de composés halogénés est d'autant plus délicat que le nombre d'atomes de Cl est important ; de même la biodégradation de composés fortement chlorés est plus problématique au-delà de 5-6 atomes de C,

- les hydrocarbures comportant peu d'atomes de C sont les composés les plus facilement biodégradables, les composés C₆-C₂₀ sont considérés comme facilement dégradables, les composés C₂₁-C₂₉ sont considérés comme moyennement biodégradables, les composés ayant plus de 30 atomes de C sont considérés comme beaucoup moins dégradables,
- les composés linéaires sont plus biodégradables que les composés ramifiés,
- les composés solubles sont généralement plus biodégradables.