

Chapitre IV Méthodes biologiques

Phytoremédiation

Principe

La phytoremédiation consiste à employer des plantes pour traiter les sols de subsurface par dégradation, transformation, volatilisation ou stabilisation. D'une manière générale, les composés inorganiques sont immobilisés ou extraits alors que les composés organiques sont dégradés.

Parmi les mécanismes d'action des plantes contre la pollution, on distingue :

- la **phytostabilisation** : est consisté à réduire la mobilité des polluants essentiellement métalliques (par absorption, précipitation et maintien physique (confinement)) et par là-même à prévenir leur migration (biodisponibilité, lessivage, ...) grâce à l'action des enzymes racinaires ;
- la **phytoextraction** : absorption et concentration des polluants dans l'ensemble de la plante ;
- la **phytotransformation (phytodégradation)** : certaines plantes, à travers leur activité métabolique et donc la production de nombreuses enzymes, peuvent dégrader certains contaminants organiques. Cette dégradation peut avoir lieu dans la plante (ce qui suppose alors l'adsorption du contaminant au préalable), ou en dehors de la plante via la production d'enzyme extraracinaire (exsudation) ;
- la **phytovolatilisation** : évaporation de composés métalliques ou organiques volatils. Par ailleurs, les phénomènes d'évapotranspiration de l'eau de pluie par les plantes, limitent la migration des polluants dans le sol.

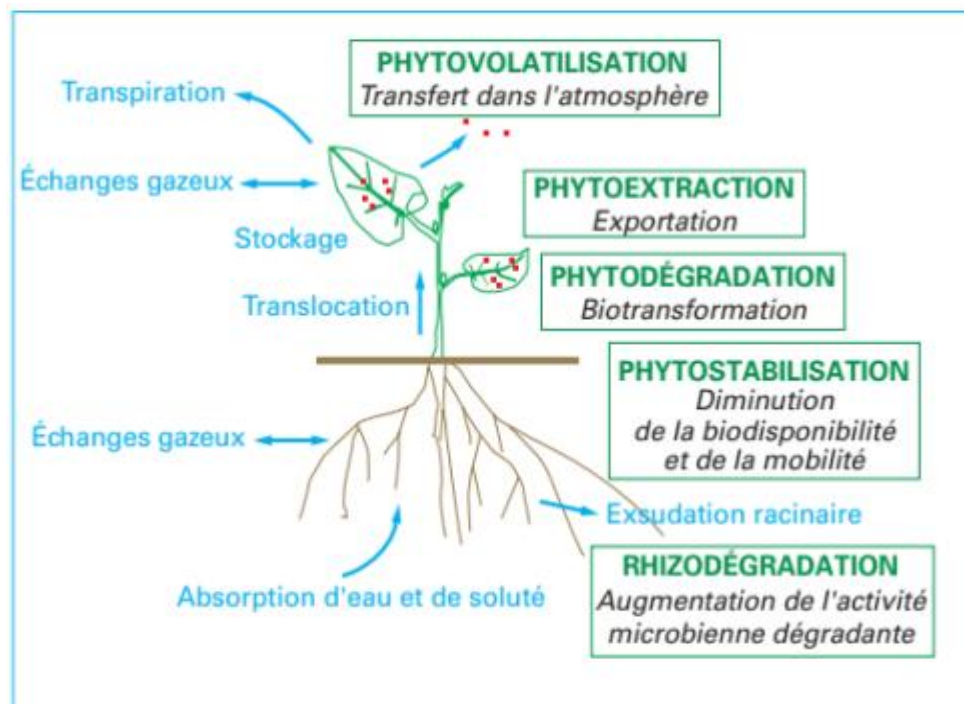


Figure 1 – Principaux processus dans la rhizosphère et dans la plante et les principaux procédés de phytoremédiation.

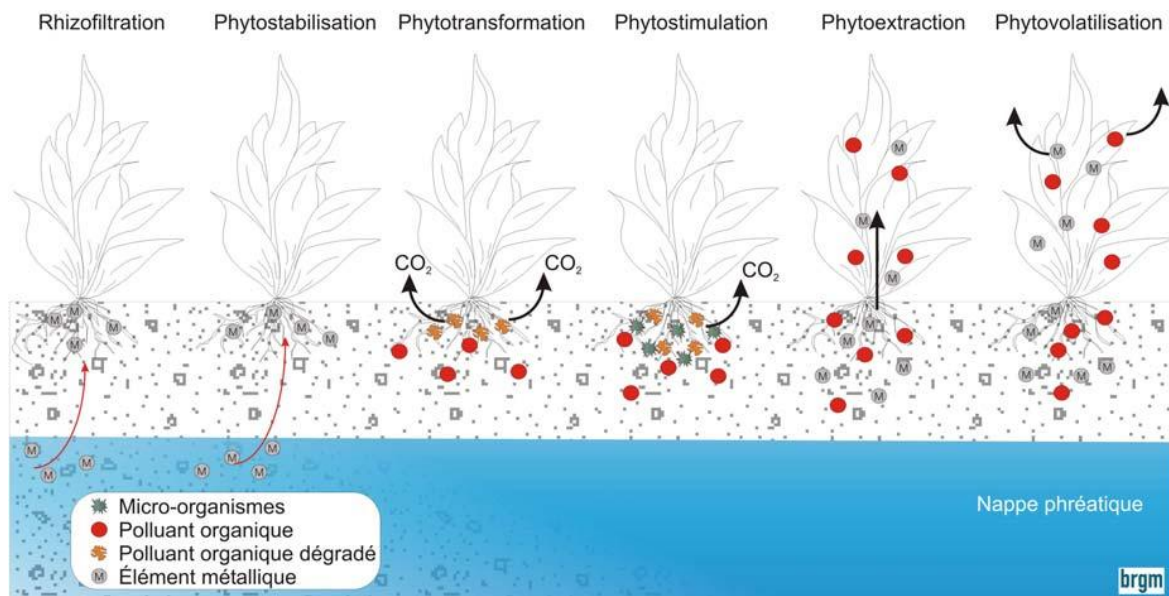


Figure 2 : Présentation des différents types de phytoremédiation.

■ Type de pollution traitée

La phytoremédiation peut s'appliquer tout aussi bien à l'air, aux sols, aux composts, aux effluents liquides et aux eaux de drainage. Ce procédé présente un avantage certain lors de contaminations peu profondes (de 50 cm à 3 m de profondeur) et de grandes superficies.

Néanmoins, compte tenu de temps de traitement élevés, la phytoremédiation est généralement utilisée dans le cas de contaminations présentant peu de risque à court terme pour la santé humaine et l'environnement.

Phytoextraction : métaux et radioéléments

Rhizofiltration : métaux, radioéléments et trinitrotoluène (TNT) Activité dégradatrice de la rhizosphère : TCE, atrazine, pyrène Phytovolatilisation : sélénium

La phytoremédiation est un procédé envisageable sur l'ensemble des contaminations par métaux lourds, substances inorganiques (CO₂, SO_x, NO_x, ozone, fertilisants) et organiques (TNT, RDX, pesticides, hydrocarbures, phénols, solvants chlorés...).

Applicabilité

Ce procédé s'applique essentiellement sur les sols de subsurface silteux à sableux jusqu'à 50 cm de profondeur lorsque les surfaces polluées sont importantes. Les polluants les plus couramment traités par phytoremédiation sont les métaux/métalloïdes par phytostabilisation et dans une moindre mesure par phytoextraction (cette technique s'appliquant aussi aux radioéléments). Par ailleurs, des traitements sur les autres substances inorganiques (fertilisants, nitrates) ainsi que sur des substances organiques (hydrocarbures, phénols, pesticides, COV, COHV, SCOV, SCOHV, TNT) sont reportés.

Plusieurs conditions doivent être vérifiées avant que cette technique puisse être appliquée :

- le site doit être adapté à la culture des plantes sélectionnées ;
- la pollution doit être accessible au système racinaire ;

— la concentration des polluants en place ne doit pas être toxique pour les végétaux.

Performances

● Avantages :

- coûts de traitement modérés par rapport aux autres technologies de traitement,
- traitement de contamination de grande superficie,
- faible perturbation du milieu contaminé,
- bonne image auprès du public.
- Application générant peu de perturbation de sols ;

● Inconvénients :

- Limitation aux contaminations superficielles,
- temps de traitement généralement long,
- Possible contamination de la chaîne alimentaire,
- superficie des sites suffisamment importante pour l'utilisation des techniques agricoles,
- l'hétérogénéité des répartitions des polluants interfère énormément sur l'efficacité du traitement
- technologie souvent limitée à des pollutions peu concentrées sur de grandes surfaces.

Coûts et délais

Les délais peuvent être de l'ordre de plusieurs années parfois (2 à 20 ans).

Les coûts sont très disparates et dépendent étroitement de la durée du suivi. Ils varient de 18 à 40 €/m² de surface de sols traités pour la phytoextraction (hors apport de terre végétale) et de 2 à 12 €/m² de surface de sols traités pour la phytostabilisation extraction (hors apport de terre végétale).

Biodégradation dynamisée (ou atténuation naturelle dynamisée)

Principe

L'atténuation naturelle dynamisée ou biodégradation dynamisée in situ nécessite l'ajout de composés spécifiques dans les sols ou les eaux souterraines afin de créer les conditions favorables à l'activité des microorganismes responsables de la biodégradation des contaminants.

Pour ce faire, les microorganismes sont maintenus dans les conditions optimales (oxygène, pH, température, potentiel d'oxydoréduction) et des nutriments sont ajoutés essentiellement sous forme liquide.

Maturité

Cette technique est couramment employée sur les sites présentant des hydrocarbures volatiles à semi-volatiles biodégradables ainsi que pour les solvants chlorés. Elle est en voie de développement avancé pour les composés plus récalcitrants (HAP ...).

Les différents composés (Tableau suivant) sont ajoutés dans la zone non saturée ou la zone saturée à cet effet. Leur nature et leur concentration dépendent des conditions du milieu, des contaminants, des processus de biodégradation envisagée (oxydation aérobie, réduction anaérobie, cométabolisme ...). Dans certains cas, un ensemencement des bactéries non endogènes est réalisé.

Les nutriments sont souvent injectés sous forme dissoute, des puits d'injection ou des drains.

En cas de dégradation aérobie, l'oxygène peut être apporté sous forme gazeuse (par pompage de l'air, par ajout d'oxygène pur, sous forme liquide (peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) ou solide (peroxyde de magnésium – MgO₂)).

Tableau : Composés ajoutés dans la bioremédiation.

Actions	Exemple	Mécanisme en jeu
Biaugmentation	Ensemencement avec bactéries non endogènes	Oxydation aérobie (directe ou cométabolisme)
		Réduction anaérobie (directe ou cométabolisme)
Ajout de nutriments	Ajout d'azote, phosphates ou autres facteurs de croissance qui pourraient être déficients dans le milieu	Oxydation aérobie (directe ou cométabolisme)
		Réduction anaérobie (directe ou cométabolisme)
Ajout de donneurs d'électrons	Ajout de substrat comme le toluène, le propane, le méthane	Oxydation aérobie (cométabolisme)
	Ajout d'hydrogène, d'une source d'hydrogène, de composés produisant de l'hydrogène	Réduction anaérobie (directe ou cométabolisme)
Ajout d'accepteurs d'électrons	Ajout d'oxygène par bioventing, biosparging ou d'une source d'oxygène comme le peroxyde d'hydrogène	Oxydation aérobie (directe)
	Ajout de nitrates	Réduction anaérobie

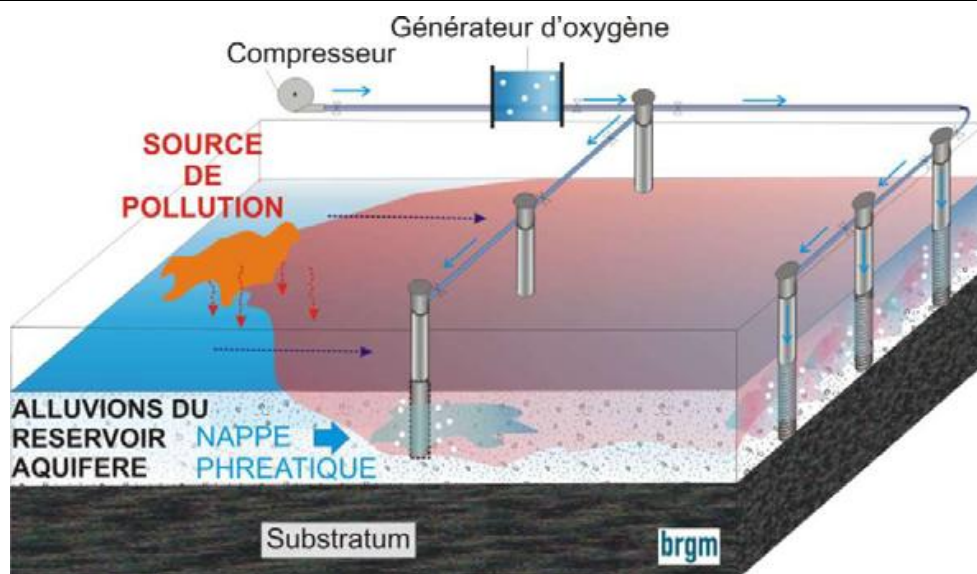


Figure : Schéma de principe d'une biodégradation in situ dynamisée utilisant de l'oxygène pur.

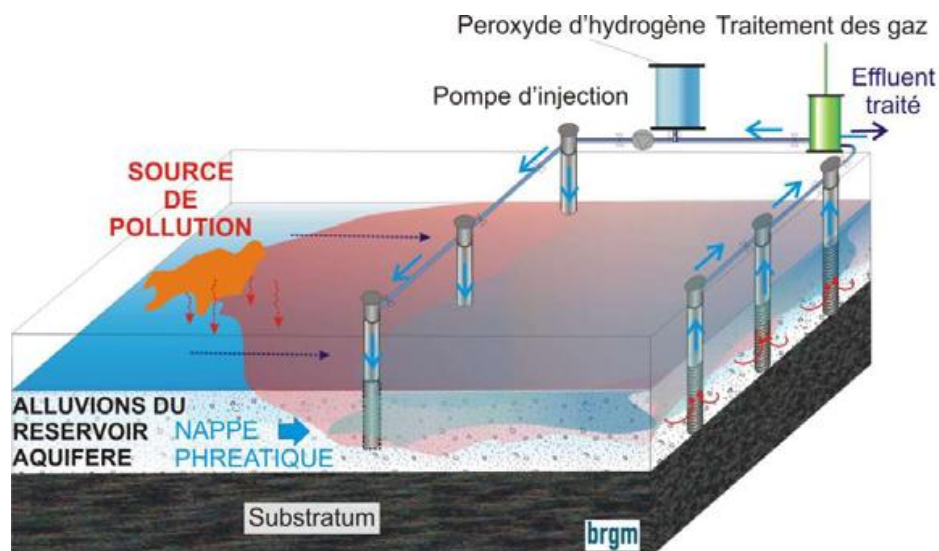


Figure : Schéma de principe d'une biodégradation in situ dynamisée utilisant du peroxyde d'hydrogène.

Applicabilité

Ce procédé est utilisé de préférence dans le cas de matériaux perméables à semiperméables comme le sable, le gravier, le limon grossier. Les polluants préférentiellement concernés sont les hydrocarbures pétroliers de taille courte à moyenne, les COV et les SCO.

Certains solvants chlorés comme le TCE, le TCA, le DCE peuvent être dégradés par cométabolisme.

Certains HAP, SCOHV et SCOV ont pu être dégradés dans certaines conditions.

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de ces procédés sont :

- procédé destructif,
- technique pouvant être employée en soutien des techniques d'extraction physiques classiques (venting, pompage, écrémage....) lorsque ces dernières ont atteint leurs limites,
- compétitivité en termes de coût et de performance,
- application générant peu de perturbation de sols,
- technologie nécessitant moins de débits d'air ou d'eau que les techniques physiques classiques ; les débits d'air et d'eau à traiter (si nécessaire) sont donc plus faibles ;
- applicable sous des bâtiments (forages horizontaux) et dans le cas de pollutions à de grandes profondeurs (plusieurs dizaines de mètres).

Les inconvénients et facteurs limitants sont :

- le procédé nécessite une expertise importante, et sa performance est extrêmement variable suivant les conditions spécifiques du site.
- la biodisponibilité limite l'accès aux polluants et donc leur biodégradation
- l'hétérogénéité des sols de subsurface peut interférer sur l'homogénéité de la distribution de la circulation d'air et donc sur l'efficacité du traitement,
- la faible perméabilité des sols ($<10^{-5}$ m/s) est une limite au traitement biologique,
- l'injection de certains oxydants à des teneurs importantes peut inhiber les microorganismes (par exemple, une concentration en peroxyde supérieure à 100 - 200 ppm peut être néfaste),
- les concentrations élevées en métaux/métalloïdes sont incompatibles avec ce procédé.

Compostage

Principe

Le compostage consiste à mélanger des sols excavés avec des amendements organiques (dénommés compost) et à les disposer en tas trapézoïdaux (andains) régulièrement espacés afin de favoriser la biodégradation.

Description

Il existe différentes sortes de matière organique naturelle (compost) pouvant être ajoutées aux sols pollués :

- les matières organiques animales : déjection de porcs, chevaux, vaches (enrichies si nécessaires),
- les matières organiques végétales : légumes, fruits, copeaux de bois, herbes, foin, paille.

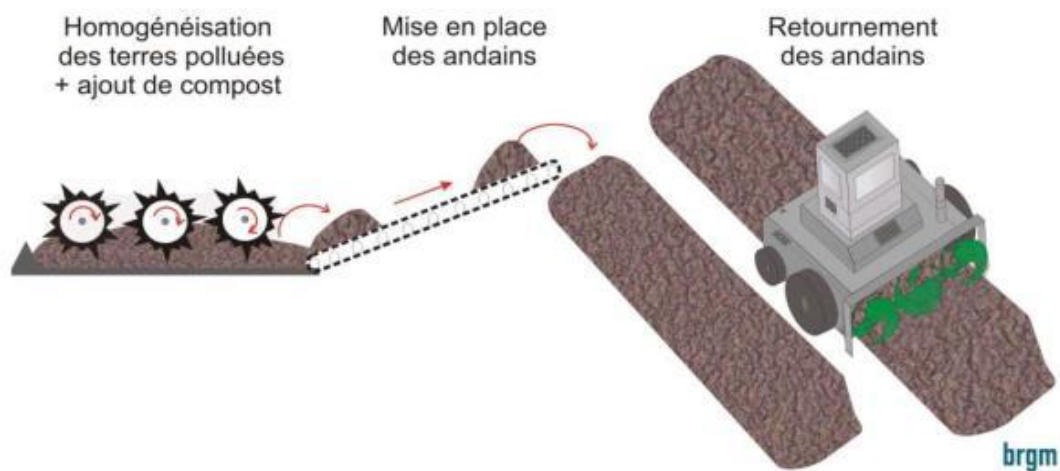


Figure : Schéma de principe du compostage.

Le compost agit sur la biostimulation (apport de nutriments, de carbone, d'azote), la bioaugmentation (apport de bactéries) et l'aération (apport d'agents structurants et d'éléments rigides augmentant la porosité).

Le choix des différents amendements dépend du type de sols et de pollution. Des tests de traitabilité sont toujours nécessaires pour optimiser le choix des amendements : état de maturité, type de biodégradabilité du compost (lente ou rapide), apport structurant, température souhaitée.

Les sols doivent être préparés avant leur mélange avec le compost (élimination des fractions grossières non biodégradables et émottage). Le ratio compost/sols pollués peut varier entre 0,2 et 0,7. Le mélange est par la suite stocké sous forme d'andains de forme trapézoïdale étudiée afin de conserver la chaleur en son sein.

Applicabilité

Le compostage est efficace pour traiter les sols souillés par les composés monoaromatiques (BTEX), phénols, HAP (les plus légers de type naphthalène et phénanthrène), hydrocarbures pétroliers (essence, diesel, lubrifiant, huiles), herbicides/pesticides (par exemple, l'atrazine) mais aussi PCB, PCP, chlorobenzène et certains explosifs (trinitrotoluène...).

Les avantages du compostage sont :

- procédé destructif,
- technique fortement utilisée pour les sols hétérogènes et facilement biodégradables,
- technique permettant d'accélérer les traitements biologiques ex-situ classiques,

- technique permettant un meilleur contrôle que les traitements biologiques in situ (et donc de meilleurs rendements épuratoires),
- faible maintenance,
- compétitivité en termes de coût et de performance, • applicabilité à de nombreux polluants,

Les inconvénients et facteurs limitants sont :

- technique nécessitant l'excavation des sols,
- le compostage « classique » doit être de préférence utilisé pour des polluants facilement biodégradables et peu volatils (ex. : gasoil) pour éviter les risques de contamination de l'air par évaporation,
- le procédé nécessite une surface au sol parfois conséquente, contamination de l'air par évaporation,
- le système nécessite souvent un tri au préalable ; les granulométries supérieures à 60 mm sont souvent exclues du procédé,
- les concentrations élevées en métaux/métalloïdes sont incompatibles avec ce procédé.

Biotertre

Principe

Le biotertre consiste à mettre des sols pollués en tas en vue d'un traitement biologique. Pour ce faire, les sols pollués font généralement l'objet d'un amendement et les conditions dans le biotertre sont contrôlées (aération, ajouts de nutriments ...).

Maturité

Cette technique est couramment employée sur les sites présentant des hydrocarbures volatils à semi-volatils biodégradables. Le biotertre est très largement utilisé pour les dépollutions on site. Les biocentres (centre de traitement biologique) sont environ une vingtaine en France.

Description

Le procédé nécessite au préalable une excavation. Les sols pollués sont mélangés avec un amendement (agent structurant) et sont par la suite dirigés vers une aire de traitement contenant a minima un système de collecte de lixiviats et des unités d'aération (extraction ou insufflation d'air) afin d'optimiser le transfert de l'oxygène et la stimulation de la biodégradation. La biodégradation est contrôlée (température, taux d'humidité, nutriments, oxygène, pH).

Les biotertres sont le plus souvent recouverts par une géomembrane imperméable afin de limiter les infiltrations d'eaux pluviales, la volatilisation des polluants, le maintien/l'augmentation de la température. Les lixiviats sont en partie recyclés et en partie traités sur site avant d'être rejetés. Les rejets atmosphériques sont traités si nécessaire (présence de COV notamment).

Les tas ne sont d'une manière générale pas d'une hauteur supérieure à 3 m (afin d'éviter le compactage).

Applicabilité

Le biotertre s'applique à des sols pollués par les produits pétroliers de type gasoils, fuels, kérosène. Les COHV, SCOV, pesticides, certaines coupes pétrolières lourdes (HAP, huiles

organiques ...) peuvent aussi, dans certaines conditions, être traités mais avec des rendements épuratoires plus faibles.

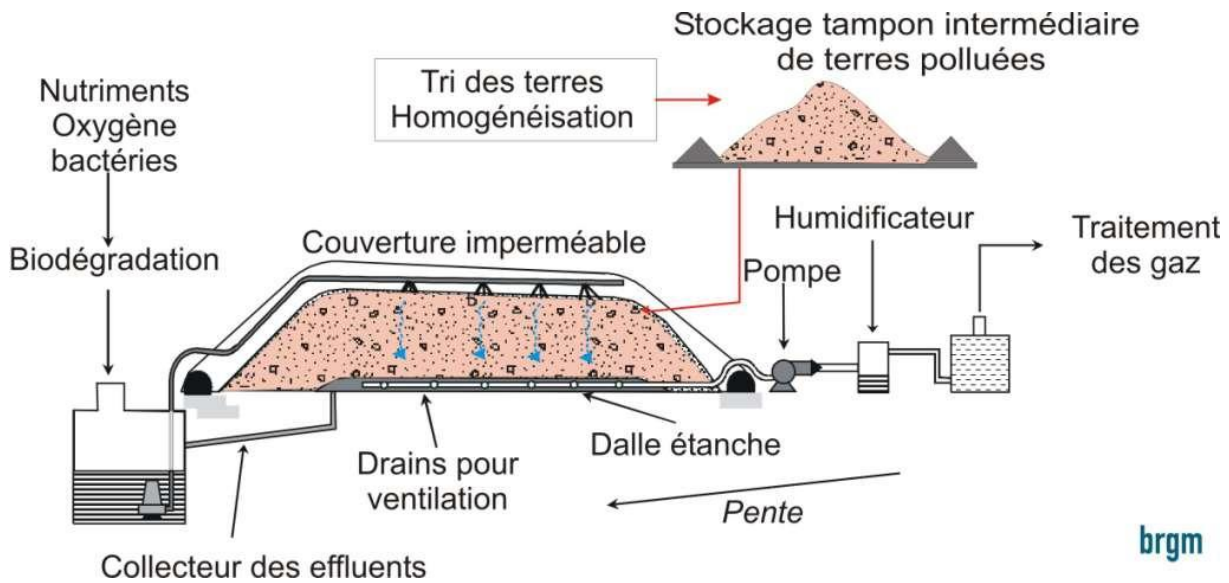


Figure : Schéma de principe du biotertre.

Efficacité/Performances

Le rendement de ce procédé varie fortement en fonction des conditions du milieu ; il peut dans certains cas atteindre plus de 90 % si le temps de traitement est suffisamment long.

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages du biotertre sont :

- technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- procédé destructif,
- technique fortement utilisée pour les sols hétérogènes et facilement biodégradables,
- technique permettant un meilleur contrôle des paramètres intervenant dans le processus de biodégradation que les traitements biologiques in situ (et donc de meilleurs rendements épuratoires),
- technique permettant un excellent contrôle microbien (oxygénation du milieu, humidité, concentration des nutriments, température, densité de la population microbienne en place...),
- compétitivité en termes de coût et de performance,
- fiabilité,
- applicabilité à de nombreux polluants,
- amélioration des qualités physiques des sols (taux de matière organique notamment).

Les inconvénients et facteurs limitants sont :

- technique nécessitant l'excavation des sols,

- l'hétérogénéité des sols peut interférer sur l'homogénéité de la distribution de la circulation d'air et donc sur l'efficacité du traitement,
- le pourcentage de fines contenues dans le sol est un facteur limitant,
- les sols contenant de l'argile et un taux de matière organique élevé engendrent une grande adsorption des polluants sur la matrice solide, ce qui diminue les rendements épuratoires,
- le système nécessite souvent un tri au préalable ; les granulométries supérieures à 60 mm sont souvent exclues du procédé ;
- le devenir des sols excavés doit être examiné avec attention (une fois excavés, les sols pollués sont considérés comme des déchets),
- les émissions atmosphériques nécessitent parfois un traitement d'air (surcoût),
- la hauteur des tertres est généralement comprise entre 1 et 3 m au maximum, ce qui implique une surface au sol parfois conséquente,

Coûts et délais

Les coûts varient de 30 à 70 €/t pour les biotertres sur site et de 50 à 80 €/t pour les biotertres hors site.

Les temps de traitement nécessaires varient de quelques semaines à plusieurs mois (18-24 mois).

Biotertre

Principe

Le biotertre consiste à mettre des sols pollués en tas en vue d'un traitement biologique. Pour ce faire, les sols pollués font généralement l'objet d'un amendement et les conditions dans le biotertre sont contrôlées (aération, ajouts de nutriments ...).

Maturité

Cette technique est couramment employée sur les sites présentant des hydrocarbures volatils à semi-volatils biodégradables. Le biotertre est très largement utilisé pour les dépollutions on site. Les biocentres (centre de traitement biologique) sont environ une vingtaine en France.

Description

Le procédé nécessite au préalable une excavation. Les sols pollués sont mélangés avec un amendement (agent structurant) et sont par la suite dirigés vers une aire de traitement contenant a minima un système de collecte de lixiviats et des unités d'aération (extraction ou insufflation d'air) afin d'optimiser le transfert de l'oxygène et la stimulation de la biodégradation. La biodégradation est contrôlée (température, taux d'humidité, nutriments, oxygène, pH).

Les biotertres sont le plus souvent recouverts par une géomembrane imperméable afin de limiter les infiltrations d'eaux pluviales, la volatilisation des polluants, le maintien/l'augmentation de la température. Les lixiviats sont en partie recyclés et en partie traités sur site avant d'être rejetés. Les rejets atmosphériques sont traités si nécessaire (présence de COV notamment).

La dégradation biologique est, la plupart du temps, réalisée par biostimulation. Les tas ne sont d'une manière générale pas d'une hauteur supérieure à 3 m (afin d'éviter le compactage).

Applicabilité

Le biotierre s'applique à des sols pollués par les produits pétroliers de type gasoils, fuels, kérosène. Les COHV, SCOV, pesticides, certaines coupes pétrolières lourdes (HAP, huiles organiques ...) peuvent aussi, dans certaines conditions, être traités mais avec des rendements épuratoires plus faibles.

Les traitements en biotierre s'appliquent de préférence à des pollutions inférieures à 15-20 000 mg/kg de HCT pour les produits pétroliers « classiques ».

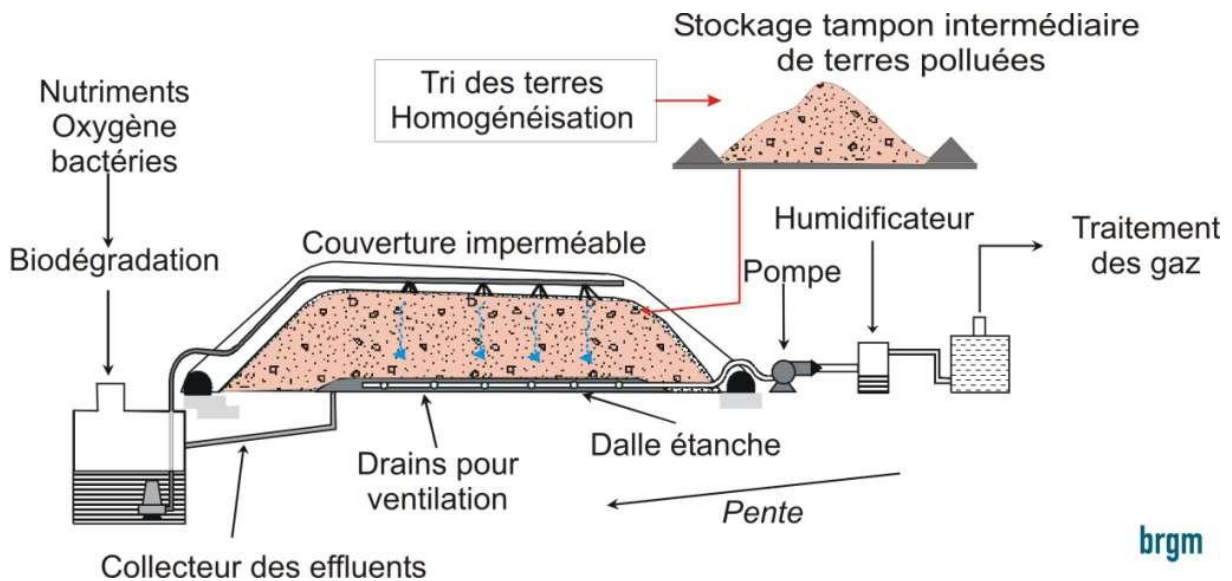


Figure : Schéma de principe du biotierre.

Efficacité/Performances

Le rendement de ce procédé varie fortement en fonction des conditions du milieu ; il peut dans certains cas atteindre plus de 90 % si le temps de traitement est suffisamment long.

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages du biotierre sont :

- technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- procédé destructif,
- technique fortement utilisée pour les sols hétérogènes et facilement biodégradables,
- technique permettant un meilleur contrôle des paramètres intervenant dans le processus de biodégradation que les traitements biologiques in situ (et donc de meilleurs rendements épuratoires),
- technique permettant un excellent contrôle microbien (oxygénation du milieu, humidité, concentration des nutriments, température, densité de la population microbienne en place...),
- compétitivité en termes de coût et de performance,

- fiabilité,
- applicabilité à de nombreux polluants,
- la surface au sol est moins importante que celle nécessaire au compostage et au landfarming,
- amélioration des qualités physiques des sols (taux de matière organique notamment).

Les inconvénients et facteurs limitants sont :

- technique nécessitant l'excavation des sols,
- l'hétérogénéité des sols peut interférer sur l'homogénéité de la distribution de la circulation d'air et donc sur l'efficacité du traitement,
- le pourcentage de fines contenues dans le sol est un facteur limitant,
- les sols contenant de l'argile et un taux de matière organique élevé engendrent une grande adsorption des polluants sur la matrice solide, ce qui diminue les rendements épuratoires,
- le système nécessite souvent un tri au préalable ; les granulométries supérieures à 60 mm sont souvent exclues du procédé ;
- le devenir des sols excavés doit être examiné avec attention (une fois excavés, les sols pollués sont considérés comme des déchets),
- la nature du contaminant (biodégradable) et les teneurs en polluants doivent être considérées avec attention,
- les biopiles statiques (sans retournement) peuvent aboutir à des résultats moins homogènes que ceux obtenus avec un retournement ou un mélange,
- taux d'humidité à maintenir autour de 40 à 60 % de la capacité de rétention,
- le ratio carbone/azote/phosphate/potassium doit être maintenu autour de 100/15/1/1,
- l'injection d'oxygène peut provoquer le colmatage d'une partie des pores des sols,
- les émissions atmosphériques nécessitent parfois un traitement d'air (surcoût),
- les concentrations élevées en polluants peuvent être toxiques pour les microorganismes (HCT > 50 000 à 100 000 mg/kg),
- les concentrations élevées en métaux/métalloïdes sont incompatibles avec ce procédé,
- des températures faibles diminuent considérablement l'efficacité du traitement, • la hauteur des tertres est généralement comprise entre 1 et 3 m au maximum, ce qui implique une surface au sol parfois conséquente,
- le fait de rajouter parfois des agents structurants augmente le volume de sols.

Coûts et délais

Les coûts varient de 30 à 70 €/t pour les biotertres sur site et de 50 à 80 €/t pour les biotertres hors site.

Les temps de traitement nécessaires varient de quelques semaines à plusieurs mois (18-24 mois).