

Chapitre II : Méthodes physico-chimiques

GENERALITES

La dépollution des sites est délicate puisque chaque site est spécifique. En effet, chaque site est une combinaison unique :

- de caractéristiques environnementales : géologie, hydrogéologie, topographie, hydrologie, météorologie,
- de polluants (nature, concentration, quantité, comportements physicochimiques, mélange, répartition spatiale, toxicité.....),
- d'usages présents ou futurs (captages, usage sensible.....).

Par conséquent, il est très difficile d'associer une technologie à un type de pollution. Par ailleurs, pour répondre aux exigences de temps, d'efficacité et d'espace, le traitement mis en œuvre est souvent une combinaison de différentes techniques.

D'une manière générale, le choix de la technique (ou filière de traitement) dépendra de caractéristiques intrinsèques des techniques (rendement, mise en place) mais aussi des contraintes spécifiques au site.

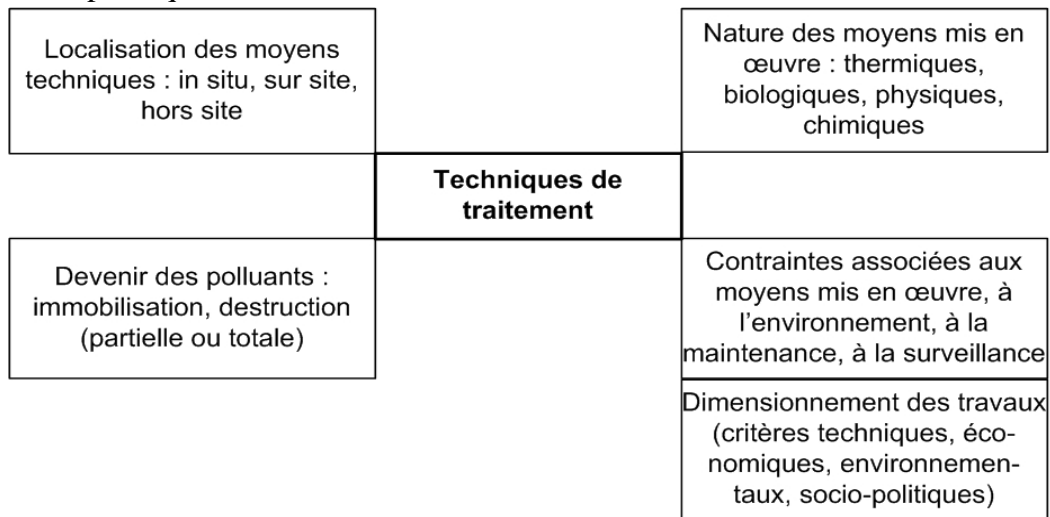


Figure : Eléments constitutifs du choix de la technique de traitement.

Après une présélection des techniques de dépollution applicables au site, le choix et le dimensionnement de(s) la technique(s) de dépollution seront réalisés en fonction de plusieurs critères spécifiques au site.

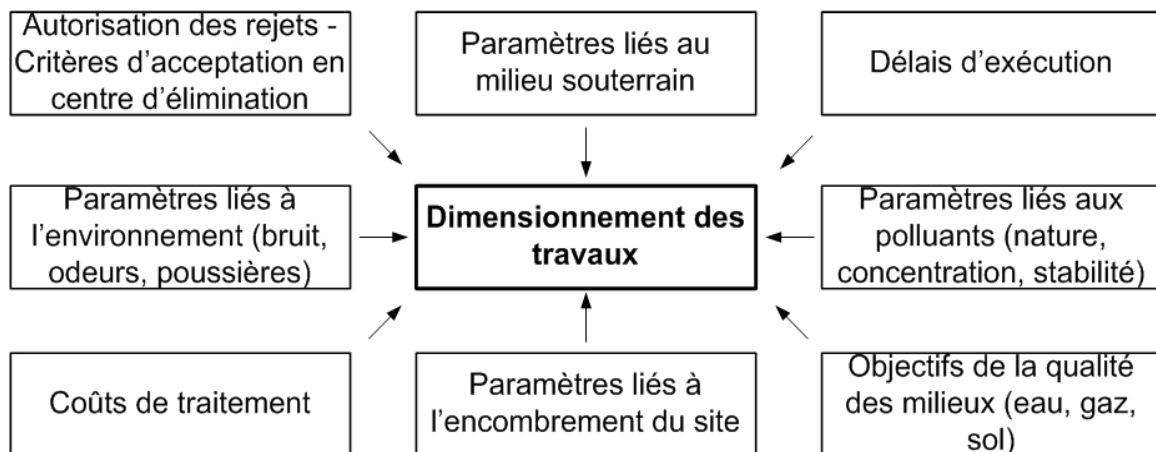


Figure : Schéma des paramètres entrant dans le dimensionnement des travaux.

SELECTION DES TECHNIQUES DE DEPOLLUTION

Après une présélection des techniques applicables, la comparaison des différents scénarii de gestion sera réalisée via des bilans coûts-avantages qui prennent en compte les familles de critères suivants :

- critères techniques et organisationnels,
- critères économiques,
- critères environnementaux,
- critères sociopolitiques.

METHODES PHYSIQUES PAR EVACUATION DE LA POLLUTION

Les procédés physiques sont les méthodes les plus largement utilisées. Le principe consiste à utiliser des fluides, présents dans le sol ou injectés, comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser.

Venting

Le *venting* est un procédé *in situ* permettant d'extraire les **composés organiques volatils** de la **zone insaturée** (phase pure, adsorbée, gazeuse et dissoute dans l'eau interstitielle). Cette technique consiste à mettre en dépression la zone insaturée et à induire des circulations d'air centrées sur et en direction de chaque point d'extraction.

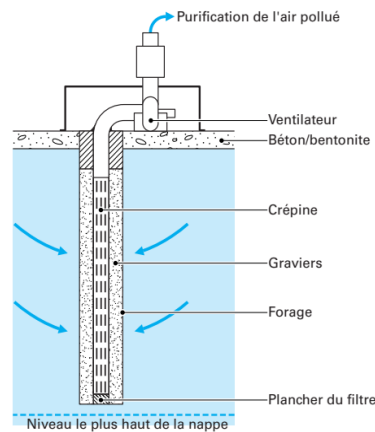


Figure : Principe du venting

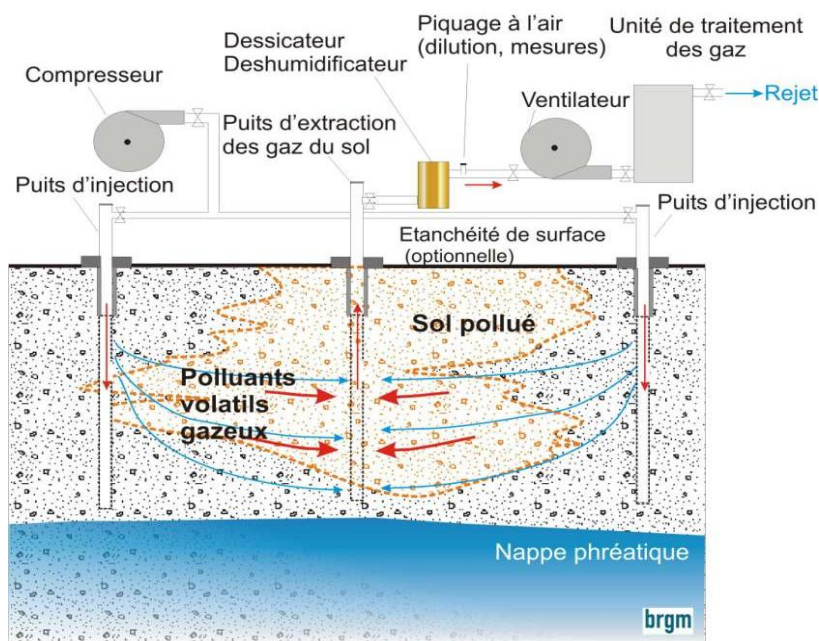


Figure : Schéma de principe du venting.

Description

Les composés volatils déversés dans les sols vont s'évaporer jusqu'à saturation des pores. Le venting va, par mise en dépression au niveau de chaque point d'extraction, induire des circulations d'air et provoquer un renouvellement de l'air pollué dans les pores. Ce renouvellement d'air a pour conséquence de modifier les équilibres chimiques entre les différentes phases présentes (air, eau, sol). Ainsi, au cours de son passage à travers la zone contaminée, l'air se "charge" en contaminants. Le déplacement d'équilibre des phases permet de dépolluer ainsi les phases solides et gazeuses de la zone non saturée. Les vapeurs sont récupérées via les points d'extraction puis traitées en surface.

Applicabilité

L'extraction des vapeurs ne peut être utilisée que pour le traitement de la zone vadose lorsque celle-ci se compose de matériaux relativement perméables (sols sablo-limoneux à graveleux) et lorsque les contaminants sont volatils (et dans une moindre mesure semi-volatils).

Le facteur limitant le plus contraignant pour l'utilisation de ce procédé est la tension de vapeur. Un composé ayant une tension de vapeur inférieure à 0,5 mm Hg (67 Pa) (à 20 °C) ne sera pas remobilisable dans les conditions normales d'utilisation du venting. De plus, la valeur limite de la constante de Henry pour une volatilisation significative est de 0,01 Pa.m³/mol (à 20 °C). Le venting est très utilisé pour la réhabilitation de sites pétroliers ou pétrochimiques présentant des pollutions de types hydrocarbures pétroliers légers ainsi que pour des pollutions liées aux composés halogénés volatils et aux composés non-halogénés volatils. Cette technique est, dans certaines conditions, potentiellement applicable sur certains composés halogénés semi-volatils et certains composés non-halogénés semivolatils.

Efficacité/Performances

Dans des conditions optimales, le rendement de ce procédé peut dépasser 90 %. Néanmoins, ce rendement peut être sensiblement affecté par l'hétérogénéité du milieu, la présence de matière organique et la présence de polluants semi-volatils.

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages du venting sont :

- elle est compétitive en termes de coût et de performance,
- elle est applicable à de nombreux polluants,
- elle génère peu de perturbation des sols,
- elle est utilisable préalablement à d'autres techniques de dépollution afin de limiter les émissions de polluants volatils,
- elle est 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 n'est pas destructif,
- 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 constitue un facteur limitant ($<10^{-5}$ m/s),
- le maillage des puits d'extraction doit être très serré en cas de perméabilité plus faible,
- la présence du toit de la nappe proche de la zone à traiter est pénalisante (<1 m),

- 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,
- la technique n'est pas applicable dans la zone saturée bien que le fait de baisser le toit de la nappe permette de dépolluer la zone rendue non saturée,
- l'injection d'oxygène peut provoquer le colmatage d'une partie des pores des sols (par précipitation de composés métalliques, de carbonate de calcium ou développement de microflore colmatante) ; néanmoins des techniques permettent de lutter contre ces colmatages (injection de peroxyde d'hydrogène pour le colmatage bactérien, rythme d'injection alterné, emploi de gaz spécifique comme l'azote),
- les émissions atmosphériques nécessitent un traitement d'air (surcoût).

Coûts et délais

Les coûts de traitement sont de l'ordre de 15 - 50 €/t des sols traités. Les délais sont de l'ordre de 4 mois à 18 mois.

Lavage *ex situ*

Le lavage *ex situ* est le lavage du sol par un solvant (le plus souvent de l'eau) après excavation. Cette technique permet le transfert des polluants du sol vers la phase solvant (ou aqueuse) qui sera ensuite traitée. Les machines à laver les sols existent sur le marché mais demeurent très coûteuses. Cependant, c'est un traitement moins onéreux que l'incinération qui trouve des applications pour certaines configurations de sol/polluants.

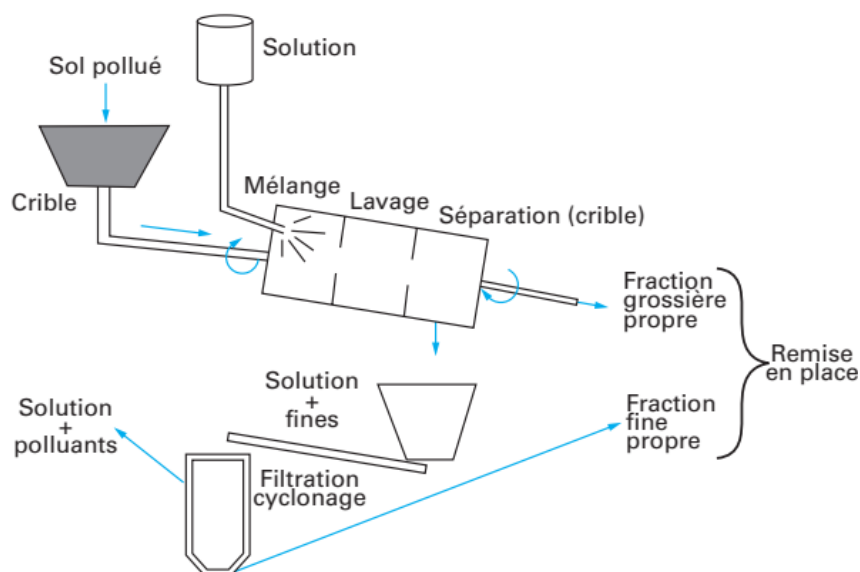


Figure : Principe du lavage *ex situ*.

■ **Principe :** Plusieurs procédés sont désignés par le terme *lavage ex situ*. Néanmoins, tous ces procédés utilisent le même principe : ajouter aux terres excavées un solvant adéquat ou de l'eau pour extraire les contaminants.

Le lavage *ex situ* permet de s'affranchir des hétérogénéités du sol et de s'assurer que l'ensemble des terres contaminées est traité. De plus, la récupération des effluents de lavage est aisée et totale. *Le lavage ex situ est donc préféré au traitement in situ (§ 17) si ce dernier présente un risque trop élevé d'étendre la pollution.*

Type de pollution traitée

Le lavage *ex situ* permet de traiter tout type de pollution organique (hydrocarbures, HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), PCB (PolyChloroBiphényles), solvants chlorés

ou non chlorés...). Toutefois, il s'adresse particulièrement aux polluants récalcitrants aux autres techniques de dépollution (HAP, PCB, ...) pour lesquels il constitue une alternative économique à l'incinération.

Lavage in situ

Ce procédé consiste à lessiver les sols sans excavation (zones saturée et non saturée) par injection d'eau (et d'agents mobilisateurs en solution) en amont ou au droit de la source de pollution. Par la suite, les eaux polluées sont pompées, traitées en surface puis rejetées dans les réseaux d'eaux usées/eaux pluviales, les eaux superficielles ou dans certains cas réinjectées dans la nappe.

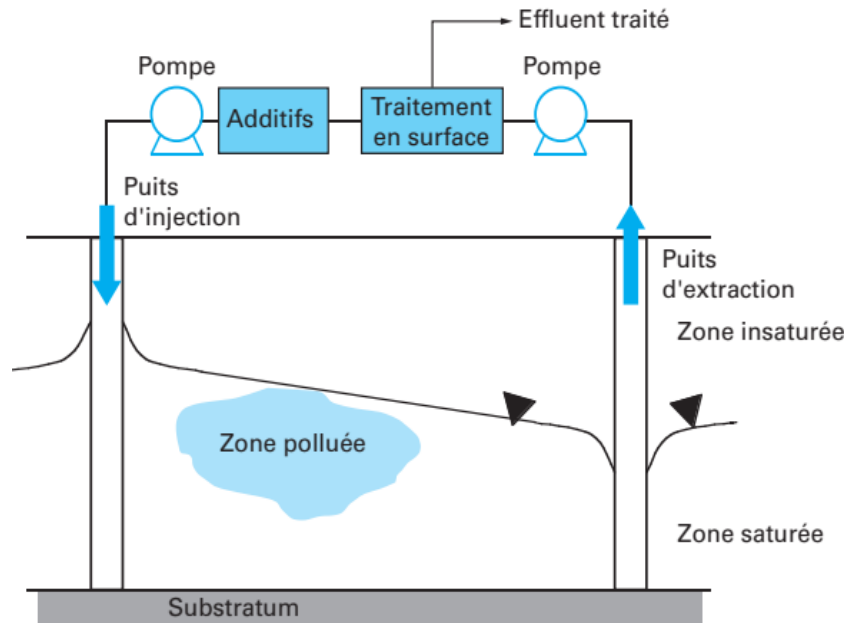


Figure : Principe du lavage *in situ*.

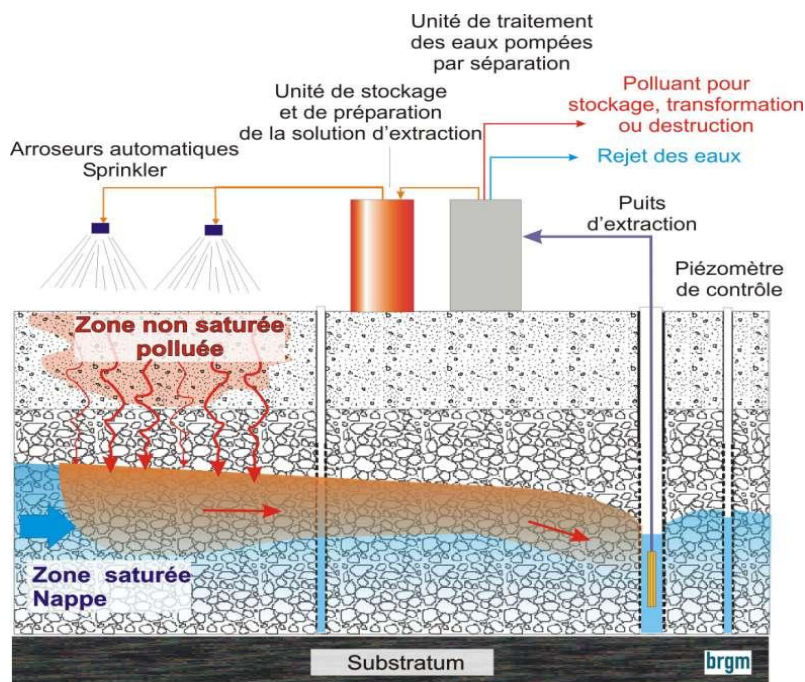


Figure: Schéma de principe du lavage chimique des sols in situ (injection dans la zone non saturée).

Description

Le lavage in situ consiste à faire percoler des fluides (eau le plus souvent avec des additifs (ex. agents extractants) dans le sol pour extraire les contaminants par désorption ou mise en solution) ; l'injection se fait en amont hydraulique ou au droit de la source de pollution. Un mouvement de fluide est engendré à travers la zone contaminée et le fluide se charge en polluant. Le mélange eau / solution de lavage chargé en polluant est alors pompé. Les contaminants mis en solution dans les fluides sont ensuite recueillis dans des puits peu profonds ou dans des dispositifs de drainage souterrains, puis pompés jusqu'à la surface où ils sont traités.

Applicabilité

Le lavage in situ concerne principalement les polluants organiques (hydrocarbures, solvants chlorés, HAP, PCB, explosifs) ... Il peut aussi être employé sur des métaux non-volatils.

Cette technique s'applique principalement dans des sols relativement perméables (sablonneux à graveleux) et homogènes dans les zones saturée et non saturée. Par contre, la profondeur du toit de la nappe, la localisation en profondeur de la pollution et le type de nappe (superficielle ou captive) ne sont pas des obstacles majeurs à son utilisation.

Efficacité/Performances

Dans des conditions optimales, le rendement de ce procédé peut dépasser les 50 à 80%. Néanmoins, ce rendement peut être sensiblement affecté par l'hétérogénéité du milieu, la présence de matière organique et la présence de polluants semi-volatils.

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de cette technique sont :

- grande facilité d'application sur les sols perméables (sols sableux) et homogènes,
- applicabilité en zone saturée et non saturée, même à de grandes profondeurs,
- peu de perturbation des sols,
- applicable aux contaminants qui sont hydrosolubles ou peuvent être solubilisés par l'agent mobilisateur employé (large spectre de contaminants),
- également efficace pour les contaminants qui sont physiquement suspendus (en émulsion),
- peut générer une dégradation in situ dans certains cas (bien que cet effet soit limité),
- possibilité d'utilisation en combinaison avec d'autres procédés ; par exemple, cela permet une réduction du temps de traitement par rapport au pump and treat.

Les inconvénients et facteurs limitants sont :

- transfert des contaminants dans les eaux souterraines avec possibilité de déplacement de la pollution : une bonne compréhension de la géologie et de l'hydrogéologie est nécessaire pour prédire le mouvement des solutions de lessivage et implanter les puits de récupération afin de permettre une récupération totale du contaminant et de la solution injectée initialement,
- génération d'un volume important d'eaux usées à traiter,
- altération possible des propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol, ce qui peut entraîner l'introduction de composés plus toxiques dans le sol,
- emploi de solutions parfois toxiques pour l'environnement,
- estimation difficile du temps de traitement,
- traitement des effluents requis,
- inefficace pour les contaminants fortement adsorbés,

- application limitée dans le cas de sols à faible perméabilité ou présentant de fortes hétérogénéités verticales ou horizontales (écoulements préférentiels),
- temps de traitement élevé par rapport à des procédés plus agressifs,
- nécessité d'étudier avec attention le devenir (biodégradation) des agents extractants,
- *une fois la solution de lavage extraite, il est parfois difficile de séparer les eaux usées (polluants/additifs/eau). Ceci peut alors empêcher la recirculation de la solution amendée, ce qui augmente la consommation en additifs et par conséquent les coûts. Le procédé n'est alors plus économiquement compétitif.*

Coûts et délais

Le coût d'un lavage in situ, varie entre 20 à 120 €/t de sols traités ; il dépend fortement de la solution employée et de la possibilité de la réutiliser.

Solidification/stabilisation

Les procédés de solidification et de stabilisation ont pour but de piéger les polluants afin de réduire leur mobilité. Les polluants sont soit liés physiquement, soit inclus dans une matrice stabilisée, soit liés chimiquement.



Des centres de traitement fixes ainsi que des unités mobiles sont disponibles sur le marché. La solidification et la stabilisation on site font partie des techniques les plus utilisées pour les sols pollués par les métaux.

La maturité de la solidification/stabilisation on site ou ex situ est beaucoup plus avancée que celle du procédé in situ (notamment en prétraitement dans les centres d'enfouissement technique).

Description

Il convient de distinguer la solidification et la stabilisation qui sont deux procédés distincts et qui ont pour but de diminuer la fraction mobile des sols :

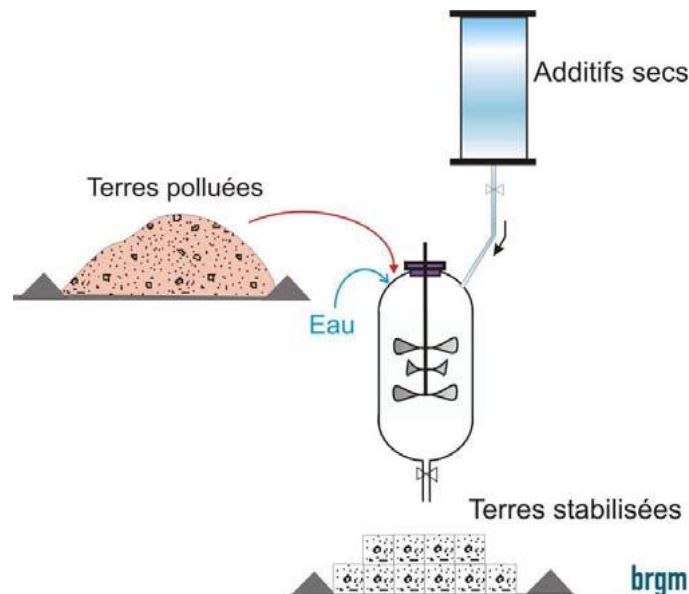


Figure : Schéma de principe de la solidification/stabilisation on site ou ex situ.

- **La solidification** : la solidification consiste à lier physiquement ou à emprisonner les polluants au sein d'une masse stable, dure et inerte. La solidification doit être appliquée sur l'ensemble

de la matrice polluée. L'objectif est de réduire le contact eau/polluants en agissant principalement sur la diminution de la porosité (réduction de la perméabilité).

• **La stabilisation** : il existe deux modes de stabilisation :

- la transformation chimique d'un polluant lessivable en un composé peu ou non soluble,
- l'augmentation des capacités de sorption du polluant avec les matériaux par mélange avec différents adjuvants afin de les rendre moins mobilisables.

Dans tous les cas, les polluants ne sont pas détruits, mais leur impact potentiel sur l'environnement est fortement diminué.

Ces techniques sont essentiellement utilisées sur les polluants non biodégradables (certains polluants organiques mais essentiellement des métaux lourds/métalloïdes). Elles nécessitent souvent un confinement après traitement.

Le procédé nécessite donc l'excavation des sols. La mise en contact entre les sols pollués et les différents réactifs (liants minéraux, additifs, eau) est réalisée à l'aide d'un malaxage à des conditions opératoires spécifiques (bétonnières, mélange à la pelle, malaxeurs). Une fois le mélange réalisé, les sols en cours de stabilisation/solidification sont conditionnés dans des big-bags, des caissons spécifiques, des containers ou dans des alvéoles de confinement spécifiques. L'opération nécessite la plupart du temps un prétraitement : criblage, trémie. Dans le cas de composés volatils, il convient de mettre en place un système de captage, de contrôle et de traitement des gaz.

Applicabilité

Ces techniques sont essentiellement utilisées sur les polluants de type métaux/métalloïdes (chrome, arsenic, plomb, cadmium, cuivre, zinc et mercure) ainsi que sur certains polluants radioactifs.

On les utilise, dans une moindre mesure, sur certains composés organiques non/peu biodégradables (polluants organiques persistants - POP de type PCB, créosotes et pesticides).

Variantes

Les principales techniques de stabilisation/solidification sont les suivantes :

• **Support cimenteux (cimentitious) :**

- **Ciment (cement) :** *les sols pollués sont mélangés avec du ciment afin de former des composés peu solubles (hydroxydes et silicates) et de les incorporer chimiquement dans la matrice solide de ciment (c'est-à-dire dans le silicate de calcium hydraté et l'aluminate de calcium hydraté formé par le ciment).*

- **Matériaux pozzolaniques (pozzolan) :** *ils présentent des propriétés similaires au ciment de Portland surtout quand les teneurs en silice sont élevées ; il s'agit d'espèces de silicates et d'aluminate qui réagissent avec de la chaux en présence d'eau pour former un silicate de calcium hydraté qui durcit pour former un matériau solide de faible perméabilité. Ces matériaux pozzolaniques sont souvent utilisés avec du ciment de Portland et de la chaux.*

- **Scories hydrauliques (hydraulic slag) :** *des scories granuleuses de hauts fourneaux ont été utilisées avec succès pour stabiliser des boues de désulfuration de gaz.*

- **Ajout à base de chaux (lime-based) :** *l'addition d'oxyde de calcium ou d'hydroxyde de calcium produit du silicate de calcium ou des aluminates hydratés, qui permettent de fixer les contaminants inorganiques.*

Efficacité/Performances

L'efficacité de la solidification/stabilisation ex situ ou on site est, d'une manière générale, plus importante que celle réalisée in situ. Les concentrations dans les lixiviats après traitement peuvent être diminuées de 95 % et peut, dans certains cas, permettre d'atteindre des concentrations dans les lixiviats inférieures à quelques microgrammes par litre et donc à certains critères légaux.

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de ce traitement sont :

- la solidification réduit l'accessibilité des polluants à l'environnement,
- la stabilisation réduit le potentiel de mobilisation des polluants dans l'environnement,
- les procédés ainsi que les moyens techniques et matériels sont déjà éprouvés pour le traitement des déchets,
- la stabilisation peut être couplée avec les besoins géotechniques,
- ce procédé permet de "traiter" des pollutions essentiellement inorganiques mais aussi mixtes,
- ce procédé est rapide,
- ce procédé est assez économique dans des cas classiques d'utilisation.

Ses inconvénients et facteurs limitants sont :

- ce procédé ne permet pas de détruire les polluants,
- les sols traités doivent être éliminés ou enfouis, ce qui génère des surcoûts dont il faut tenir compte dès le départ du projet,
- le procédé utilisé en traitement ex situ nécessite un transport parfois coûteux ;
- un suivi pérenne des sols traités est nécessaire,
- ce procédé s'applique essentiellement sur des matériaux homogènes et perméables,
- le contact entre les polluants et l'adjuvant doit être important pour que le traitement soit efficace,
- l'efficacité de la solidification ou stabilisation dépend étroitement des caractéristiques physico-chimiques de la zone contaminée,
- pour des contaminations multiples et complexes, il peut être parfois difficile de trouver la bonne formulation,
- pour des profondeurs de plus de 3 à 5 m (équivalent à une profondeur d'excavation à la pelle mécanique aisée), les procédés in situ deviennent plus rentables que les procédés ex situ.
- le traitement génère souvent une augmentation du volume (plusieurs dizaines de pourcents parfois), les terres en excédent doivent alors être gérées à part,
- l'approche classique de stabilisation basée sur le ciment n'est pas efficace pour les composés organiques.

Coûts et délais

Les coûts varient fortement en fonction de la complexité du procédé. Ils varient entre 25 et 120 €/t de sols traités pour un traitement on site (hors amenée-repli) ; pour un traitement hors site avant stockage, ils peuvent varier entre 70 et 190 €/t de sols traités.

Les plus grandes unités de traitement peuvent traiter jusqu'à 800 à 1000 t/j.

Méthodes physiques par piégeage de la pollution

Le confinement in situ peut être appliqué de différentes façons (hors mesures constructives) :

• méthodes physiques :

- ✓ confinement par couverture et étanchéification ,
- ✓ confinement vertical,

• méthodes hydrauliques ou confinement hydraulique :

- ✓ *méthode active : pompage (piège hydraulique),*
- ✓ *méthode passive : tranchée drainante*

Par ailleurs, le confinement peut être réalisé :

- ✓ *on site : « mise en tombeau » sur site ou encapsulation,*
- ✓ *hors site : mise en décharge centre de stockage des déchets de classe I, II et III.*

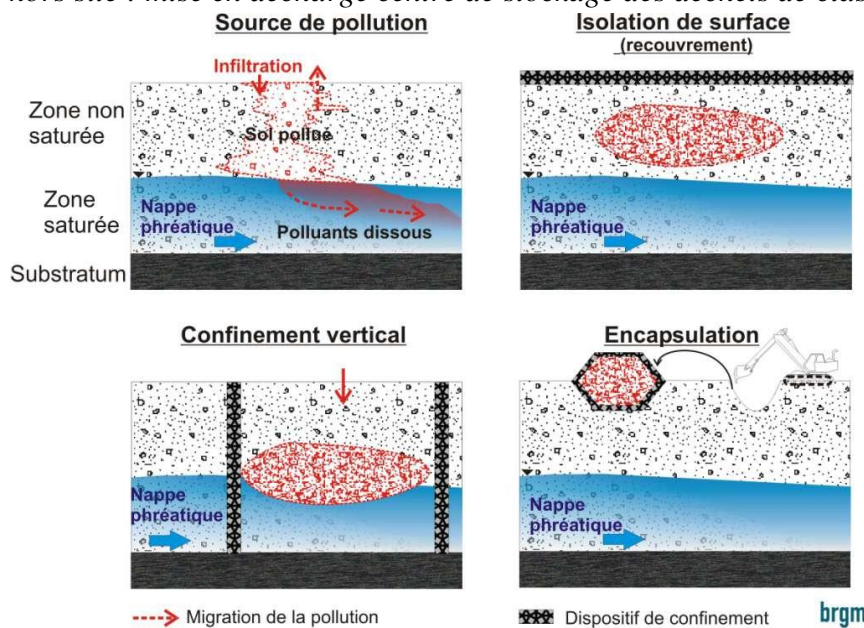


Figure: Exemples de modes d'application de confinement in situ et on site.

❖ Confinement par couverture et étanchéification

Principe

Les confinements physiques ont pour but d'empêcher l'écoulement des eaux souterraines hors du lieu contaminé.

Le confinement physique consiste à :

- isoler les contaminants de façon à prévenir d'une manière pérenne leur propagation,
- contrôler, c'est-à-dire s'assurer du maintien des mesures mises en place,
- suivre, c'est-à-dire s'assurer de l'efficacité de ces mesures.

Les mesures à mettre en place seront choisies et modulées en fonction des conditions particulières de chaque cas, tels que la nature et l'ampleur de la contamination, les caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques du terrain, l'usage qui en est fait (nappe d'eau souterraine utilisée comme source d'eau potable...) et, le cas échéant, les spécificités du projet envisagé (maisons, jardins...).

En fonction des enjeux identifiés, l'isolation de surface pourra mettre en jeu différents types de couverture (simple ou multicouche) :

1. la couverture multicouche terreuse : d'une perméabilité supérieure ou égale à 10^{-6} m/s, elle est peu performante vis-à-vis des infiltrations d'eau. Elle concerne :

- + les sites à faible potentiel polluant (ou faiblement évolutif) vis-à-vis des gaz, des eaux souterraines et superficielles,
- + les sites devant faire l'objet d'un confinement vis-à-vis du contact direct et de l'ingestion de sols souillés.

2. la couche multicouche semi-perméable : d'une perméabilité comprise entre 10^{-6} et à 10^{-9} m/s, elle limite moyennement les infiltrations et les émanations de gaz. Elle est utilisée pour :

- + les sites présentant un environnement peu vulnérable,
- + les sites dont on souhaite épuiser le potentiel polluant tout en limitant l'impact des rejets.

3. la couche multicouche imperméable : d'une perméabilité inférieure ou égale à 10^{-9} m/s, elle limite très fortement les infiltrations et les émanations de gaz.

C'est pourquoi, elle s'applique à :

- + des sites à fort potentiel polluant,
- + des sites à environnement vulnérable.

Applicabilité

Ce type de traitement peut être appliqué à presque tous les types de pollution COV, COHV, PCB, HAP, métaux/métalloïdes à condition que :

- + • les tests de percolation, l'infiltration à travers les sols pollués ainsi que la charge hydraulique soient compatibles avec l'usage des eaux souterraines,
- + • les émanations gazeuses soient compatibles avec l'usage futur.

Efficacité/Performances

On considère que les confinements, lorsqu'ils sont bien conçus et bien mis en place, sont très efficaces et ne permettent pas ou très peu de fuites vers l'extérieur. Dans tous les cas, les flux sortant du confinement doivent être compatibles avec les usages sur et hors site.

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de ce traitement sont :

- le procédé permet de confiner un très grand nombre de polluants,
- il est particulièrement bien adapté pour de grands volumes de pollution des composés inorganiques voire mixte,
- technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- compétitivité en termes de coût et de performance pour des volumes importants et des composés récalcitrants,
- fiabilité.

Ses inconvénients et facteurs limitants sont :

- les pollutions ne sont pas détruites et restent en place : aucune action n'est réalisée sur le volume et la toxicité des déchets. La seule action est relative à la réduction importante du transfert de pollution,
- il est nécessaire de réaliser un suivi à très long terme,
- il est nécessaire d'entretenir le confinement afin de s'assurer la pérennité de son bon fonctionnement (endommagement du confinement du au gel/dégel, tassement différentiel, passage d'engins, dessiccation, attaque de rongeurs, végétation, ...),
- la couverture permet seulement de limiter les transferts verticaux (eaux pluviales, gaz, contact, réenvols de poussières,) mais ne permet pas de contrôler les flux horizontaux,

- le confinement par couverture et étanchéification nécessite parfois d'autres mesures de confinements complémentaires (confinement vertical, encapsulation, mesures constructives...),
- la mise en place notamment au niveau des soudures doit être irréprochable,
- il est nécessaire de tenir compte des exigences d'entretien et de suivi dans le temps (servitudes ...),
- étant donné que les travaux n'ont que quelques dizaines d'années au plus, il est difficile de prouver l'efficacité du confinement sur le long terme.

Coûts et délais

Les coûts de traitement sont très variables. A titre indicatif, les coûts pour différents type de couverture sont les suivants :

- *couverture avec une couche de 0,25 m de sable-bentonite : 15-35 €/m² ;*
- *couverture avec une couche de 0,4 m d'argile naturelle : 5-15 €/m² ;*
- *combinaison membrane (PEHD 2 mm) et 0,25 mm de sable bentonite : 15-30 €/m² ;*
- *polymère de 0,07 m de sable-bentonite : 7-15 €/m² ;*
- *matelas bentonitique : 5-15 €/m² ;*
- *couverture avec une feuille synthétique (géotextile...) : 3-7 €/m² ;*
- *couverture béton : 75-100 €/m² ;*
- *couche externe 1 m de terre : 7-15 €/m² ;*
- *couche de drainage - 0,3 m : 2-5 €/m² ;*
- *géomembrane PEHD 2 mm : 7-15 €/m² ;*
- *système drainant : 1-3 €/m²*

❖ **Confinement vertical**

Principe

Le confinement consiste à :

- isoler les contaminants de façon à prévenir d'une manière pérenne leur propagation,
- contrôler, c'est-à-dire s'assurer du maintien des mesures mises en place,
- suivre, c'est-à-dire s'assurer de l'efficacité de ces mesures.

Le but du confinement vertical est multiple :

- mise en place d'une barrière entre la source de pollution et :
 - ✓ les eaux souterraines,
 - ✓ les eaux superficielles,
- renforcement de la stabilité mécanique du stockage.

Description

Le confinement vertical peut être réalisé de trois manières différentes :

- **confinement périphérique complet** : le confinement vertical est positionné autour de la source de pollution,
- **confinement en amont** : une paroi imperméable (déflecteur) est positionnée en amont de la source de pollution afin de dévier les eaux souterraines et de diminuer les contacts eaux/polluants,
- **confinement en aval** : ce type de confinement est plus rare et est principalement utilisé lorsque les conditions du site (encombrement ...) ne permettent pas de réaliser le confinement amont.

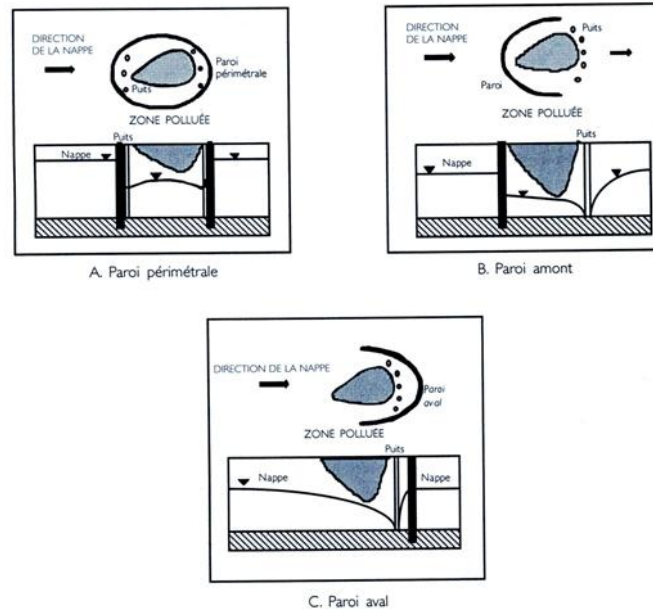


Figure 19 : Exemples de confinements verticaux associés à des pompages.

Applicabilité

Ce type de traitement peut être appliqué à presque tous les types de pollution COV, COHV, PCB, HAP, métaux/métalloïdes à condition que :

- que la pollution des eaux souterraines issue du confinement soit compatible avec les usages du milieu,
- les émanations gazeuses soient compatibles avec l'usage futur.

Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de ce traitement sont :

- le procédé permet de confiner un très grand nombre de polluants,
- il est particulièrement bien adapté pour des volumes significatifs de pollution de composés inorganiques voire mixte,
- technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- compétitivité en termes de coût et de performance pour des volumes importants et des composés récalcitrants,
- fiabilité,
- le confinement vertical permet seulement de limiter les transferts horizontaux mais ne permet pas de contrôler les flux verticaux.

Ses inconvénients et facteurs limitants sont :

- les pollutions ne sont pas détruites et restent en place : aucune action n'est réalisée sur le volume et la toxicité des déchets. La seule action est relative à la réduction importante du transfert de pollution,
- le procédé nécessite des engins de chantier conséquents et spécifiques ainsi qu'un savoir-faire d'une haute technicité,
- il est nécessaire de réaliser un suivi à très long terme,
- il est nécessaire d'entretenir le confinement afin de s'assurer la pérennité de son bon fonctionnement,
- il est primordial de vérifier la compatibilité polluants/matériaux de confinement,

- le confinement vertical permet seulement de limiter les transferts horizontaux mais ne permet pas de contrôler les flux verticaux.
- le confinement vertical nécessite souvent d'autres mesures de confinements complémentaires (confinement par couverture et étanchéification, pompage et piège hydraulique, encapsulation, mesures constructives...);
- il est nécessaire de tenir compte des exigences d'entretien et de suivi dans le temps (servitude ...);
- étant donné que les travaux n'ont que quelques dizaines d'années au plus, il est difficile de prouver l'efficacité du confinement sur le long terme.

Piège hydraulique ou confinement hydraulique

Principe

Le piège hydraulique ou confinement hydraulique n'est pas un traitement en tant que tel. Il consiste seulement à maintenir les eaux souterraines polluées dans un espace prédéfini afin de ne pas générer de pollution en aval.

Ce confinement peut être réalisé de manière active (par pompage) ou de manière passive (via des tranchées drainantes).

Description

Piège hydraulique actif (pompage)

Le pompage permet d'extraire les eaux souterraines ainsi que les polluants organiques ou minéraux en phase dissoute dans la zone saturée et la frange capillaire et de les diriger vers des points d'extraction en vue de traitement. Un rabattement en un ou plusieurs points de la nappe est alors créé (augmentation du gradient hydraulique).

Le confinement hydraulique actif consiste à contenir ou réduire le panache de pollution par pompage en bloquant ou en inversant l'écoulement naturel des eaux souterraines.

Ces techniques peuvent être réalisées seules ou en complément du confinement vertical ou du confinement par couverture et étancheification. Ces techniques nécessitent une surveillance accrue des installations de pompage ou de drainage.

Ces techniques traitent le panache plutôt que la source de pollution. Il est donc judicieux de traiter, si possible, au préalable la source de pollution.

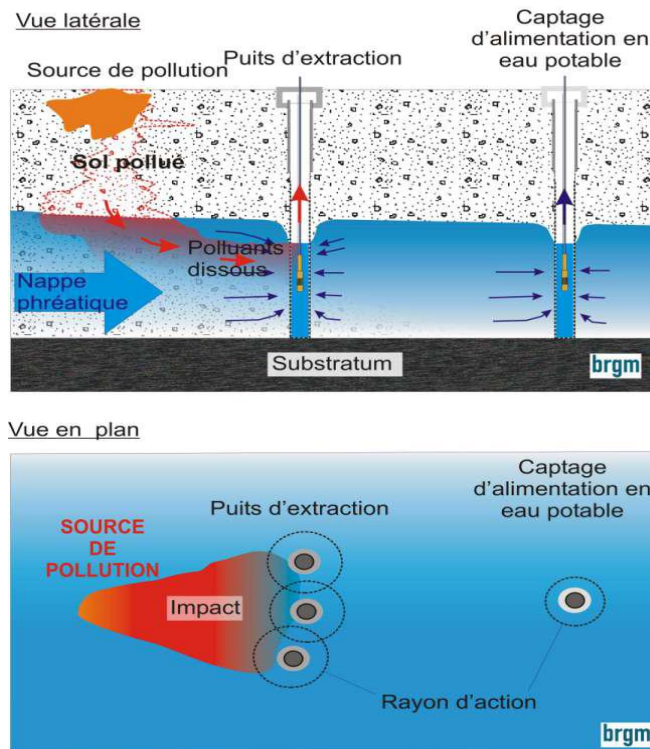


Figure : Exemple de piège hydraulique actif (pompage).

Piège hydraulique passif (tranchée drainante)

L'autre approche consiste à creuser des tranchées et y installer des drains afin d'intercepter les eaux souterraines en vue d'un traitement.

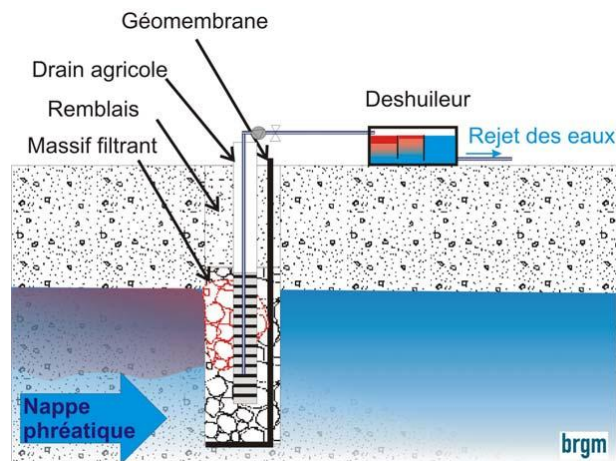


Figure: Exemple de piège hydraulique passif (tranchée drainante).

La position de la tranchée drainante est soit en amont soit en aval de la source de pollution. Les massifs filtrants doivent présenter une perméabilité suffisante, par rapport à celle du terrain, pour obtenir un rabattement maximal de la tranchée, avoir une granulométrie adaptée au terrain, et dans le cas de tranchées drainantes composites, présenter des capacités rétentrices envers la pollution à traiter (le traitement est alors proche de BPR – cf. 3.6.1). Les tranchées sont généralement composées de matériaux très perméables (de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-3} m/s).

Des pompes de faibles débits positionnées à l'intérieur de ces tranchées permettent de récupérer les polluants. Afin de faciliter la récupération des polluants, des géomembranes

sont souvent positionnées en aval immédiat du massif filtrant. On se rapproche alors d'un pseudo-confinement. Les débits en jeu sont nettement inférieurs à ceux du piège hydraulique actif.

Applicabilité

Le confinement hydraulique est une technique relativement universelle puisqu'elle s'applique sur les pollutions organiques et minérales, qu'elles soient sous forme libre ou dissoute : composés organiques (semi-)volatiles, composés halogénés organiques (semi)-volatils, PCB, certains métaux/métalloïdes.

Barrières réactives

Cette technique consiste à implanter une barrière perméable depuis la surface du sol jusqu'à la base de l'aquifère pour intercepter un panache de pollution. La barrière est remplie d'un réactif permettant la dégradation des polluants dissous dans l'eau. Deux types de barrières existent : les barrières perméables classiques et les barrières « système porte ».

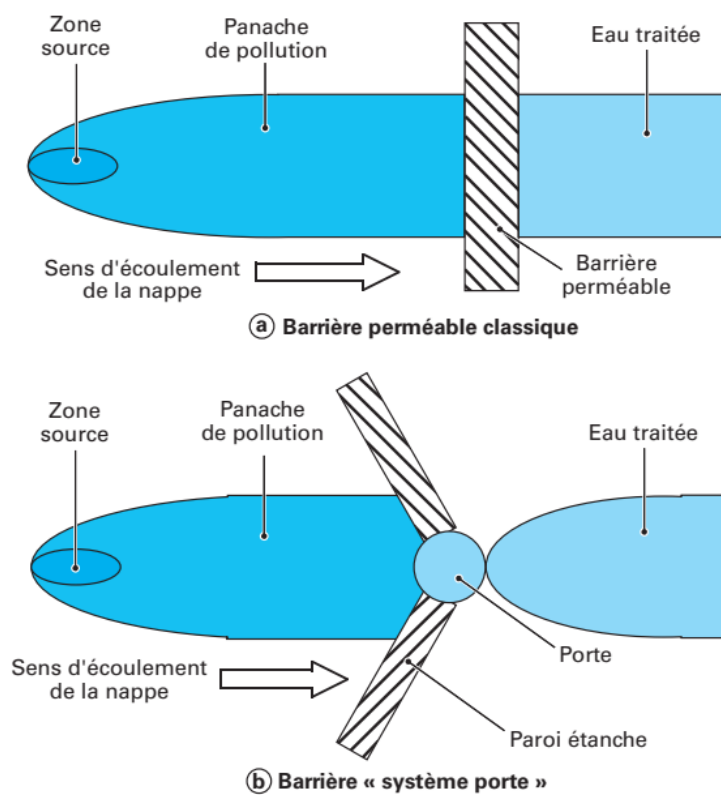


Figure : Principe des barrières réactives.

Principe

Une barrière réactive est une tranchée réalisée entre la surface du sol et le substratum, orientée perpendiculairement au sens d'écoulement de la nappe phréatique. Cette tranchée est entièrement remplie par un principe actif de traitement, adapté au type de pollution traité.

Le panache de pollution qui passe à travers le principe actif de traitement est dépollué.

Les dimensions de la barrière sont ajustées de façon à intercepter la totalité du panache de pollution (longueur de la barrière) et à assurer un temps de contact suffisant entre l'eau à traiter et le principe actif de traitement (largeur de la barrière).

Le gros avantage de ce procédé est qu'il s'agit d'un traitement qui ne nécessite pas de pompage. De plus, il peut être installé pour de nombreuses années avec une maintenance réduite.

■ Type de pollution traitée

Le type de pollution traitée dépend du principe actif de traitement mis en place dans la barrière. Les barrières réactives permettent le traitement de nombreux polluants organiques et de certains métaux.

Toutefois, dans la majorité des cas, les polluants traités sont des solvants chlorés. En effet, ces polluants, plus denses que l'eau et peu solubles, s'accumulent sur des lentilles de terrain imperméables difficiles à localiser, puis se dissolvent très lentement en formant un panache de pollution. Ils sont difficiles à traiter par les techniques classiques de pompage. En revanche, les barrières réactives permettent l'interception de la totalité du panache de pollution. Dans le cas des solvants chlorés, le principe actif de traitement consiste en une réduction, catalysée ou non, du ou des polluants chlorés présents.

Moyens techniques

On trouve deux types de barrières réactives: les barrières perméables classiques et les barrières « système porte ».

Les barrières perméables classiques sont des tranchées allant de la surface du sol jusqu'au substratum, orientées perpendiculairement au sens d'écoulement de la nappe. Cette tranchée est entièrement remplie par le principe actif de traitement. Le principe actif doit toujours avoir une perméabilité très supérieure à celle du sol. La longueur de la barrière doit être suffisante pour permettre le traitement de tout le panache de pollution. La largeur de la barrière (généralement de 20 cm à 1 m) et la vitesse d'écoulement de la nappe fixent le temps de séjour de l'eau dans la barrière. Ce temps de séjour est un paramètre important pour le procédé de traitement, quel qu'il soit. A faible profondeur, ce type de barrière peut être installé par des techniques de terrassement classiques (trancheuse, pelle mécanique). Les temps de contact généralement longs dans ce type de barrière permettent l'utilisation de réactifs peu efficaces (lents). Toutefois, ce type de barrière est inapplicable à grande profondeur, il nécessite de très gros volumes de réactif, et donc l'utilisation de réactifs peu chers. De plus, une fois l'installation réalisée, l'intervention est très complexe sur le réactif.

Les barrières « système porte » consistent à canaliser la nappe à traiter à l'aide de parois étanches et à la diriger vers une porte de traitement. Le principe actif de traitement est placé au niveau de cette porte. Le gradient hydraulique résultant de l'installation de la paroi étanche permet l'écoulement de l'eau dans la porte de traitement sans pompage. Le principe actif doit toujours avoir une perméabilité très supérieure à celle du sol. Les longueurs des parois étanches de part et d'autre de la porte doivent être suffisantes pour permettre le traitement de tout le panache de pollution. Le volume de réactif et la vitesse d'écoulement de la nappe fixent le temps de séjour de l'eau dans la porte. Ce temps de séjour est un paramètre important pour le procédé de traitement, quel qu'il soit.

La porte consiste en un puits inox (d'un diamètre de l'ordre de 1 m) implantée dans la paroi étanche. Le réactif est placé dans une cartouche inox amovible que l'on descend dans le puits et qui se connecte de façon étanche au fond de l'ouvrage. Cette cartouche amovible permet d'intervenir facilement sur le réactif. Toutefois, la quantité de réactif utilisée est limitée (à quelques m³ maximum) et on concentre au niveau de la porte le débit de toute une tranche d'aquifère. Les temps de contact eau / réactif sont donc beaucoup plus faibles que pour une barrière perméable classique et il faut utiliser des réactifs beaucoup plus performants.

Oxydation chimique *in situ*

L'oxydation *in situ* consiste en une injection dans le sol (zone saturée ou insaturée) d'un oxydant qui va détruire les polluants présents dans le milieu. Cette oxydation peut aboutir à une destruction totale du polluant ou à une transformation en un composé moins toxique et/ou plus facilement biodégradable. Différents types d'oxydants, adaptés à la pollution et au sol à traiter, sont disponibles sur le marché. Cette technique est actuellement commercialisée.

■ Principe

L'oxydation *in situ* permet le traitement de pollution par des composés organiques présents sous deux formes : les zones sources (zone très localisée où le polluant est présent pur ou à des concentrations très élevées) et les panaches de pollution (zone de pollution diffuse où le polluant est présent sous forme dissoute à des concentrations faibles).

L'oxydant utilisé est injecté dans le sol sous forme liquide ou gazeuse. Il entre en contact direct avec les polluants à traiter. Ces polluants peuvent alors être détruits en composés plus facilement biodégradables et / ou moins toxiques. Dans certains cas, le processus d'oxydation du polluant peut conduire à sa minéralisation, c'est-à-dire à sa transformation en eau, gaz carbonique et sels.

L'oxydation *in situ* présente le gros avantage d'être efficace sur un large spectre de polluants organiques. De plus, c'est un procédé destructif. Toutefois, les oxydants utilisés sont parfois peu sélectifs et réagissent sur toutes les espèces oxydables qu'ils rencontrent (matière organique du sol, composés inorganiques oxydables...), ce qui impose l'utilisation d'une plus grande quantité d'oxydant. Le risque de remobilisation de certaines espèces présentes dans le sol sous formes réduites et précipitées doit également être pris en compte lors d'un apport en oxydant.

Différents oxydants sont utilisés en oxydation *in situ*. Les principaux sont : le permanganate (MnO_4^-), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), le réactif de Fenton (H_2O_2 / Fe^{2+}) et l'ozone (O_3). Chacun de ces oxydants est caractérisé par un potentiel d'oxydation (Tableau). Plus le potentiel d'oxydation d'un composé est élevé, plus il s'agit d'un oxydant puissant, capable d'agir sur un grand nombre de composés oxydables.

Le permanganate (MnO_4^-) est un oxydant qui réagit par oxydation directe sur les polluants. On le trouve sous forme de sels ou en solution. C'est un oxydant « doux » et donc très stable dans le sous-sol : lors de son injection, il est efficace sur un rayon plus important que les oxydants plus puissants. Toutefois, en raison de son faible potentiel oxydant, il permet le traitement d'un spectre de polluant moins large.

Le peroxyde d'hydrogène utilisé seul agit, tout comme le permanganate, par oxydation directe sur les polluants. On le trouve sous forme de liquide, à différentes concentrations dans l'eau. C'est un oxydant légèrement plus puissant que le permanganate. Il est le plus fréquemment utilisé avec l'ion ferreux (réactif de Fenton). A forte concentration, c'est un produit très corrosif et sa manipulation est très délicate.

Tableau : Potentiels d'oxydation des principaux oxydants utilisés en oxydation *in situ*.

Oxydant	Potentiel d'oxydation (V)
Réactif de Fenton (OH°)	2,80
Ozone (O_3)	2,07
Peroxyde d'hydrogène (H_2O_2)	1,78
Permanganate (MnO_4^-)	1,68

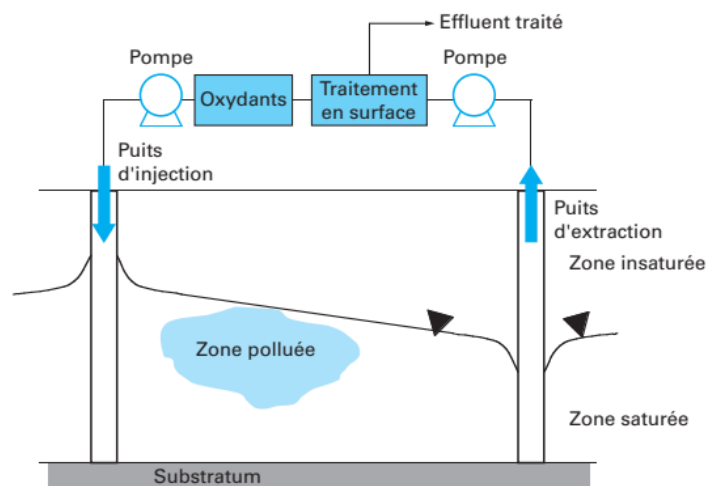


Figure : Principe d'oxydation *in situ*.

Le choix de l'oxydant sera dicté par le type de polluant à traiter, le type de pollution (zone source ou panache de pollution), la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie du site.

Peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) et réactif de Fenton

En raison de sa forte réactivité, le H₂O₂ est rarement utilisé seul. Même s'il est injecté à faible concentration, la concentration en oxygène produit dépasse facilement sa solubilité dans l'eau, ce qui entraîne l'apparition de bulles et une très forte augmentation de volume et de température. Le H₂O₂ est plutôt utilisé en présence de Fe²⁺ selon la réaction de Fenton : OH• est un oxydant très puissant. Les conditions optimales requièrent l'ajout de Fe²⁺ et un pH faible (2 à 4). Le traitement peut ainsi s'avérer inadapté aux sols calcaires. L'oxydation par le réactif de Fenton s'applique aux hydrocarbures (BTEX, HAP, MTBE : Méthyl *Tert*-Butyl Ether - CH₃OC(CH₃)₃, solvants chlorés) dans la zone saturée et la frange capillaire, si la conductivité hydraulique est suffisante.

- **Ozone :** L'ozone est un oxydant très puissant qui agit soit directement, soit par l'intermédiaire de radicaux hydroxyles *OH. L'ozone vise les mêmes types de polluants, avec une efficacité plus limitée pour le MTBE.

- **Permanganate :** il est un oxydant plus faible que les précédents. Il n'attaque pas le benzène mais oxyde les autres composés organiques dont le MTBE. L'oxydation est en général peu ou pas sélective. Les oxydants réagissent aussi avec les autres composés organiques que les polluants, comme la matière organique du sol. Ils peuvent également modifier la spéciation des métaux éventuellement présents et dans certains cas favoriser leur mobilisation. Les **réactions de type Fenton** sont exothermiques et l'augmentation de température de l'eau souterraine peut générer de la vapeur. Elles peuvent aussi induire des risques d'explosions de vapeur d'hydrocarbures. De plus, le stockage sur site d'eau oxygénée concentrée (50 %v/v) comporte aussi des risques d'explosion. Il faut donc prendre les mesures de sécurité adaptées. Les solutions sont injectées dans un ou plusieurs puits sous pression ou par gravité. Le risque de ce procédé est la volatilisation des produits et la migration ou la déformation du panache de pollution. Il est préférable alors de l'associer à une extraction de vapeur. L'injection gravitaire, plus longue, est moins risquée. On peut aussi fracturer les sols de faible perméabilité pour permettre le contact des réactifs et des polluants. Le niveau de pollution dans l'eau doit être surveillé et en général, deux ou trois injections de réactifs sont nécessaires avant d'atteindre les

niveaux de concentrations visés. L'accroissement transitoire de la concentration en oxygène dans la zone traitée favorise la biodégradation aérobie.

L'**ozone** est généré sur site et injecté dans l'eau souterraine ou dans la zone insaturée soit directement en phase gazeuse (air contenant jusqu'à 5 % vol. d'ozone), soit dissous dans l'eau. Il réagit avec les composés organiques mais comme il est instable, il se décompose facilement en oxygène. Il favorise ainsi la biodégradation. Comme dans le cas de la réaction de Fenton, il peut y avoir génération de chaleur et formation de vapeurs d'hydrocarbures. Un système conjoint d'extraction de vapeur est nécessaire. Le **permanganate** quant à lui est injecté sous forme de liquide. Cette réaction provoque la précipitation de MnO_2 , qui risque de colmater le milieu poreux et qui, de plus, agit comme un adsorbant de métaux. Concernant les quantités de réactifs à utiliser, outre la stœchiométrie de la réaction, il faut tenir compte de la « demande naturelle en oxydant » due aux réactions d'oxydation annexes qui consomment le réactif. Cette demande est très variable et son évaluation requiert des essais en laboratoire.