

Université Mohamed Khider Biskra
Faculté de Science et de Technologie
Département de Chimie industrielle



Domaine : Sciences et techniques
Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie des procédés et science et génie de l'environnement
Master II

Polycopié de la matière

Traitement des sols pollués

Cours

Fait par : Dr. HAMDJ Ines

Maître de conférences « A »
2020/2021

Programme : Traitement des sols pollués

Chapitre 1- Introduction

- Formation des sols
- Types de sols
- Analyse des sols pollués
- Propriétés des contaminants organiques et inorganiques
- Pollution en zone non saturée et saturée
- Traitements in situ, on site et hors site.

Chapitre II- Méthodes physico-chimiques

- Venting
- Lavage des sols (lessivage)
- Stripping
- Stabilisation/solidification
- Oxydation chimique
- Réduction chimique
- Extraction double phase
- Confinement par couverture et étanchéification,
- Confinement vertical
- Piège (confinement) hydraulique

Chapitre III- Méthodes thermiques

- Désorption thermique
- Incinération
- Vitrification
- Pyrolyse

Chapitre IV- Méthodes biologiques

- Phytoremédiation
- Biodégradation dynamisée
- Atténuation naturelle contrôlée
- Bioventing
- Biotertre
- Compostage

Introduction

Le sol est une couche ou un ensemble de couches d'épaisseur faible (quelques centimètres à quelques mètres) qui recouvre la plupart du temps les roches. Cette couche est en relation directe avec la vie végétale.

I-1-Formation des sols

La formation du sol est due à une série de phénomènes lents et complexes désignés sous le nom d'altération.

I-1-1- Processus de formation du sol

- *1er stade* : Considérons une surface de roche sur laquelle l'érosion vient de s'arrêter. Elle est soumise à l'action du climat. Les eaux de pluies qui tombent sur la roche ont dissous un peu de CO₂ de l'air et sont légèrement acides. En plus, elles contiennent quelques éléments azotés. Elles vont s'accumuler dans les fissures et les pores de la roche qu'elles vont attaquer. D'autres phénomènes vont se manifester en même temps : Le vent apporte des poussières et des débris de végétaux tandis que des spores de végétaux inférieurs ou des larves d'insectes pourront être déposés sur la roche en voie d'altération.

- *2ème stade* : La surface ainsi décomposée et recouverte d'une mince couche de dépôts minéraux et organiques va être rapidement colonisée par des éléments vivants : bactéries, lichens et insectes. Ceux-ci vont attaquer plus profondément la roche et constituer ainsi une couche assez importante de débris organiques qui permettra l'installation de végétaux supérieurs. Leurs racines vont sécréter des acides qui attaqueront la roche de surface pendant que l'altération des minéraux continue. La couche humique devient plus épaisse retenant de plus grandes quantités d'eau.

- *3ème stade* : formation des différents horizons du sol

Nous pouvons déjà distinguer dans le sol en cours de formation les phases suivantes :

* Matériaux ou phase minérale. Restes de la roche à partir de laquelle s'est formé le sol. (M)

* Phase résiduelle ou partie supérieure du sol, constituée par des éléments organiques et d'autres minéraux de petite taille (sables et limons) ou même colloïdaux (argiles, carbonates etc..). (S)

* Phase aqueuse. Elle peut exister soit dans le sol, soit dans les fissures de la roche. Cette eau provoque le déplacement des substances solubles (phase migratrice) qui se déposent à différents niveaux dans le sol pour donner des couches à constitution particulière. (H)

* Phase vivante : partie vivante du sol correspondant aux végétaux et aux animaux. (B)

Ces différentes phases du sol se disposent les unes par rapport aux autres suivant des modalités bien déterminées qui sont fonction du climat, de la pesanteur, de la perméabilité de la roche, etc.. Ces modalités varient au cours de l'année suivant les saisons. Cependant, chaque année le cycle varie assez peu de sorte que peu à peu s'individualisent dans le sol des couches à propriétés particulières et bien définies qui sont *les horizons*.

* 4^{ème} stade - sol développé.

Peu à peu, le volume de la phase résiduelle et de la matière organique s'accroît. L'altération de la phase minérale se poursuit ; fragmentation des cailloux, mise en solution de la plupart des minéraux. Seuls l'alumine et les oxydes de titane ainsi que quelques minéraux lourds sont invariants.

Les produits solubles se recombinaient en grande partie pour donner des édifices cristallins de type argiles. Mais les argiles peuvent aussi provenir de la transformation par dégradation d'autres minéraux.

La matière organique fraîche subit des évolutions très variables : très rapide et complète pour la matière animale (putréfaction), rapide pour une partie de la matière végétale et beaucoup plus lente pour une autre (humification).

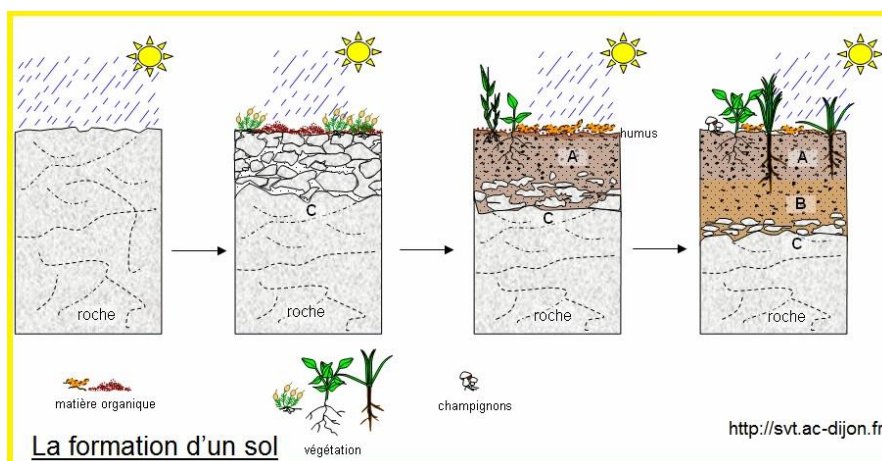


Figure I.1 : formation d'un sol.

I-2- L'organisation du sol

Le sol n'est pas une masse homogène. Il est possible de distinguer des couches superposées ayant des caractéristiques bien distinctes que l'on nomme « horizons ». Ensemble, ces horizons constituent ce que l'on appelle le « profil de sol ».

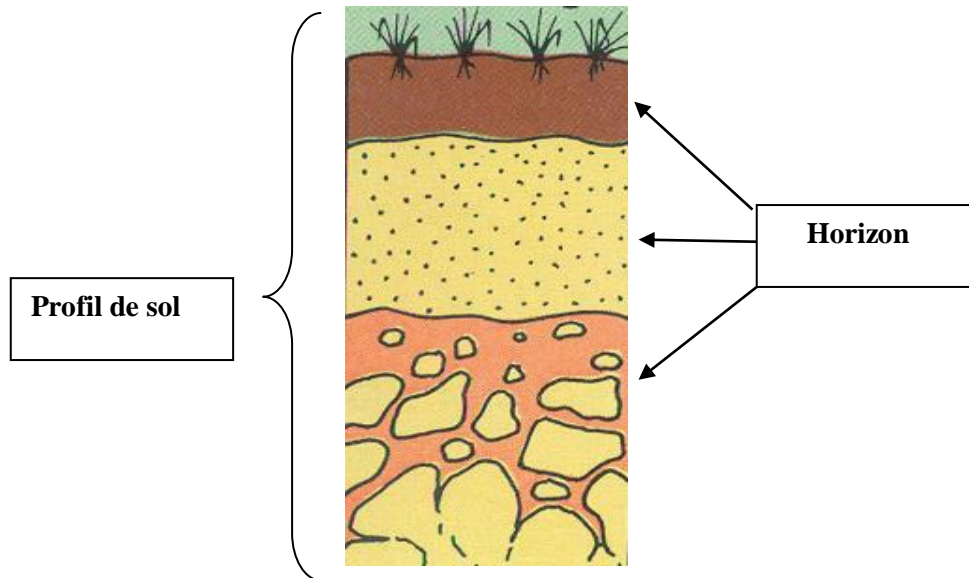


Figure I.2 : profil de sol

I-3- Type de sols:

La texture du sol est définie par la grosseur des particules qui le composent : % graviers, sable, limon, argile.

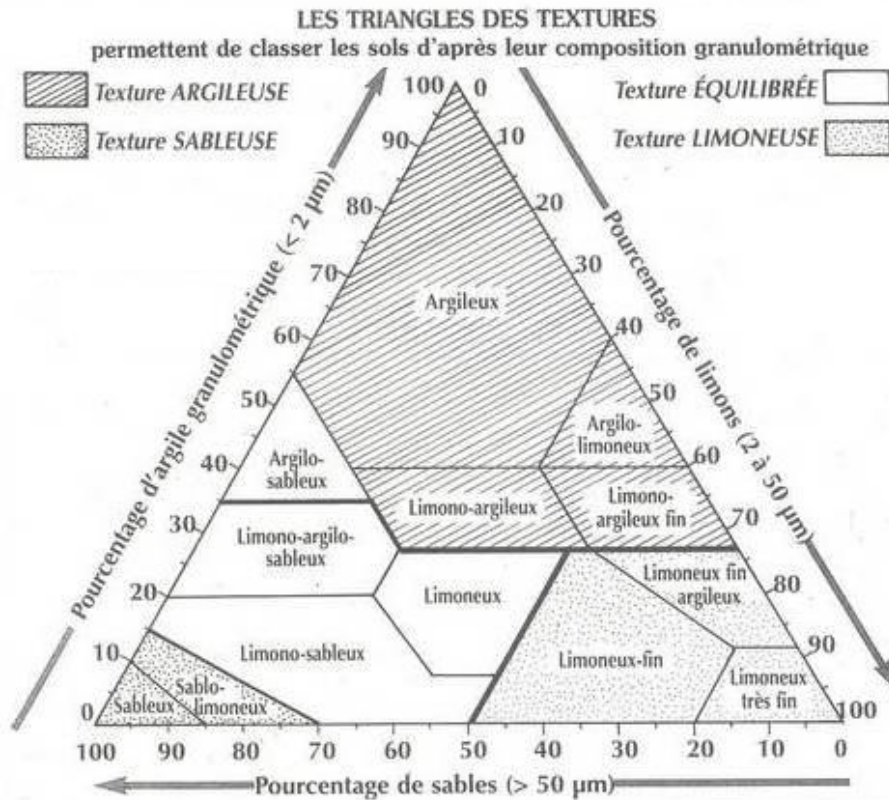


Figure I.3 : textures de sol

Sols sableux :

Les particules d'un sol sableux sont relativement espacées, ce qui permet à l'eau de s'écouler rapidement. Les sols sableux ont une structure instable, ce qui les rend très sensibles à l'érosion éolienne, de plus comme l'eau s'écoule rapidement, ils sèchent rapidement ce qui favorise l'érosion aérienne.

Sols limoneux :

Bien que tous les sols soient sujets à une éventuelle érosion par l'eau, le limon, le loam limoneux et le loam sont les plus menacés. Sur les pentes longues ou abruptes, l'érosion par l'eau s'intensifie et le ruissellement peut atteindre une vitesse impressionnante.

Sols argileux :

Les sols renfermant une forte proportion d'argile sont propices à l'agriculture en zone aride. La structure superficielle des sols argileux peut se dégrader, formant une croûte. L'encroûtement limite l'infiltration et accroît le ruissellement. Un sol argileux mouillé a tendance à se compacter, ce qui favorise également le ruissellement. Les sols argileux peuvent également être très sensibles à l'érosion éolienne. La sécheresse peut causer la pulvérisation de la couche superficielle des argiles lourdes, au point de réduire les mottes en particules de la

taille de gros grains de sable, très sensibles à l'érosion éolienne. Le compactage du sol, qui touche surtout les sols argileux, est dû au passage de véhicules lourds ou à une circulation fréquente au même endroit. Le compactage peut avoir des effets néfastes sur le drainage.

La texture d'un sol a une incidence directe sur sa teneur en nutriments, son humidité et sa capacité de drainage. Les sols argileux sont plutôt fertiles, mais sont souvent mouillés et mal drainés. Les sols sableux se drainent facilement, mais ils ont tendance à être secs et infertiles. Les loams conservent l'humidité; ils sont fertiles, friables et faciles à travailler. Un sol loameux contient environ 40 % de sable, 40 % de limon et 20 % d'argile, ainsi qu'une bonne quantité d'humus. Consultez la figure à la fin du tableau des types de sol suivante pour connaître la méthode employée pour effectuer les tests de la poignée de terre et le ruban de terre.

Les types de sol			
Texture	Sensation au toucher	Poignée de terre (Moule mouillé)	Ruban de terre
Sable	Matière granuleuse, peu farineuse	Aucun moule	Ne peut pas former de ruban
Sable loameux	Matière granuleuse, légèrement farineuse	Moule très faible, ne se manipule pas	Ne peut pas former de ruban
Sable limoneux	Matière quelque peu farineuse	Ne se manipule pas	Ne peut pas former de ruban
Loam sableux	Matière granuleuse, modérément farineuse	faible moule, se manipule avec soin	Forme à peine un ruban – 1,5 à 2,5 cm (5/8 à 1 po)
Loam	Matière assez molle et lisse, mais manifestement granuleuse	Bon moule, se manipule facilement	Épais, mais très court – <2,5 cm (1 po)
Loam limoneux	Matière farineuse, légèrement granuleuse	Faible moule, se manipule avec soin	Forme des flocons plutôt qu'un ruban
Limon	Matière très farineuse	Faible moule, se manipule avec soin	Forme des flocons plutôt qu'un ruban

Loam sableux-argileux	Matière fortement granuleuse	Moule de consistance moyenne	Court et épais 2,5 à 5 cm (1 à 2 po)
Loam argileux	Matière modérément granuleuse	Moule robuste de toute évidence	Assez mince, se brise facilement, supporte à peine son propre poids
Loam limoneux-argileux	Matière lisse, farineuse	Moule robuste	Assez mince, se brise facilement, supporte à peine son propre poids
Argile sableuse	Matière fortement granuleuse	Moule robuste	Mince, assez long, 5 à 7,5 cm (2 à 3 po), porte son propre poids
Argile limoneuse	Matière lisse	Moule très robuste	Mince et assez long, 5 à 7,5 cm (2 à 3 po), porte son propre poids
Argile	Matière lisse	Moule très robuste	Très fin et très long, >7,5 cm (3po)

I-4-Analyse des sols pollués

I-4-1-Origine

Une contamination du sol a souvent pour origine une diffusion lente de produits stockés dans des conditions non réglementaires. Un site pollué peut apparaître ou être découvert en cas :

- D'incident ou d'accident d'exploitation :

Le préfet peut imposer une étude de sols et une évaluation simplifiée des risques.

- de découverte d'une pollution ancienne à l'occasion par exemple d'un changement de propriétaire.

I-4-2. Types de contaminants

Les contaminants sont des substances présentes dans le milieu en concentration supérieure à la normale (substance naturelle) ou simplement en concentration détectable (substance de synthèse, ou substance anthropique).

Il y a deux catégories de contaminants, soit les contaminants organiques, dont la présence est principalement due à l'homme, et les contaminants inorganiques, qui peuvent se retrouver naturellement dans les sols. Les contaminants organiques peuvent être toxiques, voire cancérigènes. On parle ici d'hydrocarbures pétroliers, de solvants, de pesticides, etc. Les contaminants inorganiques sont principalement des métaux (cuivre, fer, nickel, zinc, etc.) que l'on retrouve naturellement dans la croûte terrestre. Parfois, les concentrations sont tellement élevées que cela représente un danger pour la santé de la faune, de la flore et des humains.

I-4-3. Sources de pollution

- pollution diffuse

Elle touche une grande superficie. Elle peut être due aux pratiques agricoles ou aux retombées atmosphériques.

- pollution ponctuelle

Elle est très localisée et intense. Elle est liée à des sites industriels, à des dépôts de déchets ou à d'autres sites pollués de façon chronique ou accidentelle.

I-5-Propriétés des contaminants organiques

I-5-1-Principaux contaminants organiques:

On distingue différentes familles de composés organiques :

- **Les hydrocarbures ou huiles minérales**

Les hydrocarbures regroupent différents produits pétroliers (pétrole brut, pétrole raffiné, kérosène, essences, fuel, lubrifiants, huiles à moteurs). Cette famille inclut :

- les alcanes (hydrocarbures aliphatiques) constitués de chaînes linéaires ou ramifiées comprenant au minimum cinq atomes de carbone, caractérisés par un point d'ébullition compris dans l'intervalle 35 °C – 490 °C
- les hydrocarbures aromatiques monocycliques (benzène, toluène, xylènes,...) ou polycycliques (Benzo(a)pyrène).

- **Les hydrocarbures aromatiques volatils et les hydrocarbures halogénés volatils**

Les hydrocarbures halogénés volatils (COV), les chlorofluorocarbones (CFC) et les hydrocarbures aromatiques volatils (CAV ou BTEX) constituent une famille de composés dont les propriétés physico-chimiques sont très hétérogènes. Ils possèdent tous un point d'ébullition inférieur à 300 °C et une tension de vapeur supérieure à 0.2 kPa à 20 °C.

- **Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)**

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont généralement définis comme un groupe de composés comportant au moins deux noyaux benzéniques fusionnés entre eux et renfermant seulement des atomes d'hydrogène et de carbone.

- **Dioxine et furannes**

Les polychlorodibenzo-para-dioxines (PCBB) et les polychlorodibenzofurannes (PCDF) constituent un groupe comprenant 210 composés organiques tricycliques chlorés comprenant 75 dioxines et 135 furannes qu'il est convenu de nommer sous le terme générique de dioxines.

- **Les polychlorobiphényles (PCB) et les polychloroterphényles (PCT)**

Il existe 209 structures possibles de chlorobiphényles, appelés congénères, dans lesquelles de 1 à 10 atomes de chlore sont liés au groupement biphényle. 132 congénères ont été identifiés dans des spécialités industrielles. Les plus toxiques sont ceux non substitués en position ortho, ils sont qualifiés « planaires ». Leur teneur en chlore varie de 20 à 60 %. Ils sont présents à l'état de traces sous la forme de mélanges complexes renfermant plusieurs dizaines de congénères.

- **Les phénols et les chlorophénols**

Les phénols sont des composés aromatiques hydroxylés comprenant le phénol et ses substitués tels les chlorophénols (mono-, di-, tri-, tétra-, penta-), les nitrophénols, les crésols, les diméthylphénols ou xylols. Ils sont aussi présents dans les effluents de raffineries, de cokeries, de pétrochimie, ...

- **Les pesticides**

Les « pesticides » ou substances phytosanitaires constituent une famille très hétérogène de substances utilisées contre les parasites animaux ou végétaux des cultures. Les pesticides sont dispersés dans l'environnement en présence d'agents de formulation. .

- **Les cyanures**

Les cyanures correspondent chimiquement à l'ensemble des composés cyanés (ex. : cyanures alcalins, cyanures métalliques doubles tels les ferrocyanures et ferricyanures) qui, après traitement à chaud à l'acide sulfurique en présence de sulfate de cuivre (II) et de chlorure d'étain (II) libèrent de l'acide cyanhydrique (NF X 31-430).

- **Les phtalates ou esters phtaliques**

Ces produits résultent de l'estérification d'alcools (éthanol, butanol-1, 2-éthyl-hexanol) par l'acide phtalique (acide benzène 1,4-dicarboxylique).

- **Les tensio-actifs**

On distingue les agents de surface anioniques, non ioniques et cationiques. Les agents de surface anioniques comprennent des alkylbenzènes sulfonates à chaîne ramifiée résistants, peu biodégradables, des alkylsulfates et des alkylbenzènes sulfonates à chaîne linéaire (ABS) biodégradables. Les agents de surface non ioniques sont synthétisés par addition d'alcools à longues chaînes ou d'alkylphénols (ex. : le nonylphénol) sur un nombre variable de motifs d'oxyde d'éthylène. Les agents de surface cationiques comprennent essentiellement des dérivés d'ammoniums quaternaires et des chlorhydrates d'hydroxylamine.

I-5-2-Principales propriétés des molécules organiques retrouvées :

- **Solubilité aqueuse (en mg.L^{-1}) :**

Est définie comme la concentration d'une substance se dissolvant dans l'eau lorsque l'eau et la substance sont en équilibre. Par exemple, la solubilité dans l'eau du benzène pur est de 1780 mg/L, de 16,5 mg/L en mélange à l'essence à raison de 1% et de 1,8 mg/L en mélange au gazole à raison de 0,1%.

Une solubilité forte constitue un facteur aggravant des pollutions (dispersion accélérée dans l'eau, biodisponibilité fortement accrue). Par contre, les polluants très solubles sont en général plus facilement biodégradables.

- **Tension de vapeur (en Pa) :** est la pression partielle d'un composé dans la phase aqueuse, en équilibre avec le solide pur ou le liquide pur. La tension de vapeur à 20°C définit la volatilité d'un composé.

Il existe une relation entre la tension de vapeur et le point d'ébullition d'un composé organique : plus sa tension de vapeur est faible et plus son point d'ébullition est élevé.

- **Constante d'Henry ($\text{Pa.m}^3.\text{mol}^{-1}$):**

La volatilisation d'une molécule peut être également estimée par la constante de Henry (K_H). Ainsi, les composés présentant une constante de Henry élevée sont plus volatils (tableau 002). Plus un produit sera volatil, moins grande sera son affinité pour le sol. Il sera alors éliminé dans l'atmosphère avant d'être biodégradé.

La volatilité, fonction de la tension de vapeur et de la constante d'Henry, influe sur la manière dont ils s'infiltreront dans les sols, dont il s'en libère par évaporation naturelle ou dont il

peut être éliminé lors des opérations de dépollution ; ces propriétés sont importantes pour le choix de la technique de dépollution.

- **K_{oc} ou coefficient de distribution du carbone organique ($L.kg^{-1}$) :**

Traduit le rapport de la quantité de soluté adsorbé par unité de poids de carbone organique sur la matrice solide sur la concentration du soluté dans la phase aqueuse à l'équilibre. Plus le K_{oc} est élevé, plus le composé tend à quitter l'eau pour se fixer sur la matière organique du sol.

- **Coefficient de partage K_{ow} (sans unités) :**

Est le rapport des concentrations à l'équilibre d'une substance dissoute dans un système à deux phases constitué de deux solvants (octanol et eau) qui ne se mélangent pratiquement pas.

$$\ll K_{ow} = C_{octanol} / C_{eau} \gg$$

Le coefficient de partage est donc le quotient de deux concentrations. Il est habituellement donné sous la forme de son logarithme de base 10 ($\log K_{ow}$). Une molécule est considérée comme lipophile et potentiellement bioaccumulable dans les tissus organiques riches en lipides lorsque son $\log K_{ow}$ est supérieur à 4.

- **Coefficient de distribution d'une molécule K_d ($L.kg^{-1}$) :**

Est le rapport de la concentration du polluant adsorbé sur le sol sur la concentration du polluant à l'état dissous. Il est lié au coefficient de partage carbone organique-eau (K_{oc}) par la relation suivante : $K_{oc} = K_d \times 100 / (\%CO)$ avec $\%CO$ = pourcentage de carbone organique.

- **Viscosité dynamique d'un fluide (μ) (en $kg.s.m^2$) :**

Influe sur son aptitude à l'écoulement, à l'infiltration et à sa circulation dans le sol. Plus la viscosité du produit est élevée, plus son déplacement sera lent.

- **Stabilité :**

La dégradation d'un polluant est souvent représentée, en première approximation, par une réaction chimique de premier ordre :

$$\ll C = C_0 e^{-kt} \gg$$

Avec : C_0 : la concentration initiale du polluant

t : le temps (jours)

k : la constante de temps (jours⁻¹)

C : la concentration du polluant à l'instant t

La vitesse de dégradation est caractérisée par le temps de demi-vie.

- **Temps de demi-vie DT50 (jours) :**

C'est le temps durant lequel une fraction représentant 50% de la quantité initiale de la substance est dégradée. Plus la DT50 est grande et plus le composé est persistant dans l'environnement.

- **Concentration efficace 50 CE50 (g/L) :** cette valeur correspond à la concentration de polluant produisant 50 % de mortalité.
- **pKa ou constante d'ionisation acide/base:**

Définit la tendance à l'ionisation des composés dans des sols de pH compris entre 5 et 8. Plus cette valeur est élevée, plus faible est la tendance du composé à être ionisé. Les composés acides ayant un pKa inférieur à 3-4 seront mobiles dans les sols tandis que des composés basiques ayant un pKa supérieur à 10 seront retenus.

I-6-Propriétés des contaminants inorganiques

I-6-1-Les composés inorganiques

Les éléments traces métalliques sont généralement définis comme des métaux lourds. Cependant, la classification en métaux lourds est souvent discutée car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement « lourds » (par exemple le zinc), tandis que certains éléments toxiques ne sont pas des métaux (c'est le cas de l'arsenic qui est un métalloïde). Ce terme générique désigne donc indistinctement des métaux et métalloïdes réputés toxiques. Pour ces différentes raisons, l'appellation « éléments traces métalliques » -ETM- ou par extension « éléments traces » est préférable à celle de métaux lourds.

Les ETM sont tous potentiellement polluants. Cela dépend de leur concentration dans le sol mais surtout de leur forme chimique (spéciation). En effet, « ce n'est pas tant la présence de polluants dans le sol qui est problématique mais le fait que cette pollution soit mobilisable, et donc qu'elle risque d'affecter une population » (extrait document DRIRE Rhône-Alpes, 2003). C'est pourquoi la connaissance des formes physico-chimiques des éléments est nécessaire pour comprendre leur devenir dans l'environnement. Les ETM sont répartis dans

différentes fractions du sol selon leur mobilité, le compartiment ultime étant représenté par la solution de sol

Solubilité dans l'eau indique la tendance à la mobilisation du métal par lessivage ou par ruissellement. La solubilité dépend de l'élément, des conditions chimiques de la phase aqueuse (pH, potentiel d'oxydoréduction, concentrations en ligands) et des phases solides.

La stabilité : les ETM ne se dégradent pas dans le sol contrairement à ce que nous avons pu voir pour les composés organiques. Les ETM sont donc stables dans le sol.

La volatilité : influence sur la libération par évaporation naturelle des polluants infiltrés dans le sol. D'une façon générale, les ETM sont considérés comme non volatils à l'exception du mercure.

La distribution des éléments traces métalliques dans le sol est alors estimée grâce à des méthodes d'extractions séquentielles, développées au début des années 1980. A l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode d'extraction chimique universelle. Il apparaît alors difficile de choisir la bonne solution d'extraction dans un contexte précis car, dans la littérature scientifique, les conditions expérimentales mises en œuvre pour tester la valeur prédictive de ces solutions sont particulièrement variées : protocoles d'extraction chimique et propriétés physico-chimiques des sols multiples.

Néanmoins, le principe des extractions séquentielles est toujours le même : soumettre un échantillon à une série ordonnée de réactifs de force ionique croissante pour solubiliser les différentes formes ou phases d'un métal présent dans l'échantillon. Globalement, 5 fractions sont retrouvées (dépend de la méthode utilisée) :

Fraction échangeable (F1) : les espèces métalliques sont sous forme d'ions libres ou fixés aux particules de sol par des liaisons de faible énergie ;

Fraction liée aux carbonates (F2) : les éléments traces métalliques sont associés avec les carbonates ou adsorbés spécifiquement ;

Fraction liée aux oxydes de fer et de manganèse (F3) : les espèces métalliques sont complexés avec des oxy-hydroxydes métalliques ;

Fraction liée à la matière organique (F4) : les éléments traces métalliques sont complexés par des sulfures ou par des substances organiques de la phase soluble (acides fulviques, organiques, acides aminés, composés phénoliques) ou de la phase solide (acides humiques), ou encore incorporés dans les organismes vivants (végétaux, animaux, microorganismes) ;

Fraction résiduelle (F5) : cette fraction métallique est contenue dans les silicates, la matière organique récalcitrante et certains oxydes.

I-7-Pollution en zone non saturée et saturée

I-7-1-Définition

Une zone saturée est une zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches formant, dans un aquifère, une nappe d'eau souterraine.

On oppose généralement le terme de zone saturée au terme de zone non saturée, qui elle correspond à une zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre.

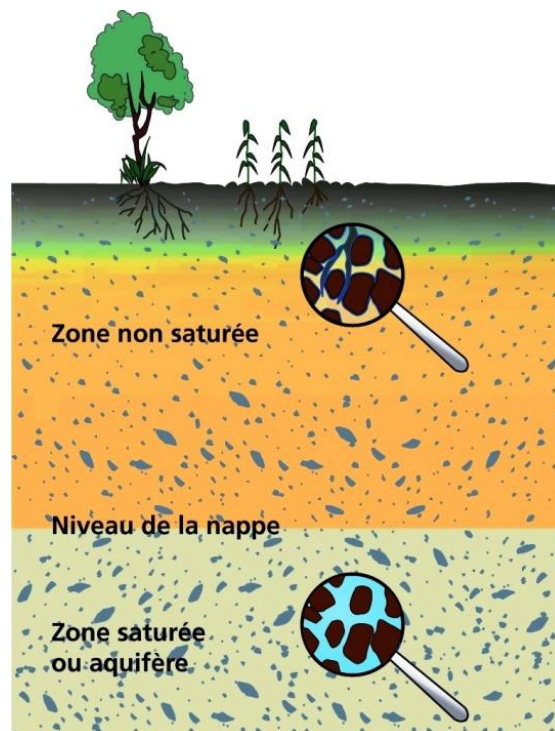


Figure I.4 : zone non saturée et zone saturée

I-8-Traitement in situ, on site et hors site :

- In situ

Le sol est laissé sur place, les polluants peuvent être extraits et traités en surface, dégradés dans le sol lui-même ou fixés dans le sol. Les eaux souterraines polluées sont généralement traitées sur place.

Type de traitement	Principe de traitement	Nature de la pollution	Avantages	Inconvénients
Venting (extraction sous vide)	Extraction des polluants volatils par mis en dépression	Produits volatils	Coût modère	résultats soumis aux aléas de l'hétérogénéité du col

Biodégradation	Dégradation des polluants par des bactéries	hydrocarbures	technique éprouvée pour les hydrocarbures aliphatiques	tests de biodégradabilité préalables. Durée de traitement, rendement limité, performances plus limitées pour les chlorés
Bio-venting	Combinaison des deux techniques précédentes	Hydrocarbures volatils et semi-volatils	coût modéré	durée de traitement, rendement difficile à contrôler
Stripping	Mise en phase vapeur des polluants dissous	Polluants vaporisables (solvants chlorés)	faible maintenance, coût modéré	
Lessivage	Entraînement des polluants à l'eau et récupération par pompage	Tous produits (notamment polluants organiques ou métaux)		traitement des effluents

- sur le site

Les terres et/ou les eaux polluées et excavées sont traitées sur le site au moyen d'installations spécifiques. Une fois traitée, la terre peut être remise en place ou évacuée.

Type de traitement	Principe du traitement	Nature de la pollution	Avantages	Inconvénients
Lavage	Extraction à l'eau ou avec un solvant	Hydrocarbures légers et lourds, métaux	possibilité de recyclage	traitement du résidu
Désorption thermique	Evaporation et/ou craquage et/ou combustion incomplète	Hydrocarbures volatils non chlorés (essence, fuel, kérosène)	bon rendement de dépollution, rapidité de traitement	

- hors site

Les déchets ou terres polluées sont excavés et évacués vers un centre de traitement ou d'élimination externe (incinération, traitement physico - chimiques, centre d'enfouissement technique).

Type de traitement	Nature de la pollution	Avantages	Inconvénients
Enfouissement des terres en site de classe I	Toutes (sauf contraintes d'acceptation)	site libéré rapidement	coût élevé
Traitement biologique en centre collectif	Hydrocarbures	coûts réduits	transport des terres
Incinération en centre spécialisé	Toutes (sauf contraintes d'acceptation)	destruction des polluants	délais d'acceptation, coût élevé

II- Méthodes physico-chimiques

II-1-Venting

II-1-1-Principe

L'extraction d'air de la zone vadose (la zone non saturée en eau) par mise sous vide ou dépression (le *venting*) est utilisée comme procédé de dépollution pour les composés volatils. Cette technique permet d'extraire les gaz du sol contaminé. Les vapeurs sont traitées en surface par incinération ou charbon actif. Le *venting* est la technique la plus utilisée et s'applique le plus souvent pour la réhabilitation de sites pétroliers ou pétrochimiques (stations essence, dépôts, stokages...).

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.

Le renouvellement de l'air dans les pores du sol a pour conséquence de modifier des équilibres chimiques entre les différentes phases présentes.

II-1-2-Les avantages du venting sont les suivants :

- cette technique est éprouvée et a démontré une grande fiabilité ainsi que des résultats extrêmement significatifs,
- 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).

II-1-3-Les inconvénients et facteurs limitant sont les suivants :

- 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,
- l'élévation de la teneur en eau dans la zone insaturée des sols peut réduire la perméabilité à l'air et donc diminuer l'efficacité des techniques à éliminer les produits volatils de cette zone. Généralement, avec des niveaux de saturation en eau d'environ 85 %, la circulation de l'air n'est plus possible car la perméabilité à l'air devient pratiquement nulle
- l'âge de la pollution peut intervenir à deux niveaux :

- on constate d'une part une altération du polluant au cours du temps. Sa composition change et cela peut affecter l'efficacité de l'extraction.

- d'autre part, l'adsorption d'un polluant sur un sol se fait en deux étapes, une étape rapide et une étape lente qui peut aller de quelques semaines à quelques années. Le prolongement du temps de contact entraîne une plus forte adsorption et ainsi une plus grande résistance à la désorption. Les composés de faible solubilité dans l'eau restent longtemps en contact avec le sol et sont en général fortement adsorbés sur les particules de sol.

- 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).

II-1-4-Moyens matériels

Le système de venting est constitué :

- De points d'extraction verticaux (dénommés aiguilles d'extraction) ou horizontaux (dénommés drains d'extraction),
- De points d'injection verticaux ou horizontaux (aiguilles d'injection ou drains d'injection),
-
- D'un réseau d'extraction permettant la mise en relation des points d'extraction et de la pompe à vide (pression variant de 0 à 300 mbar) ; ce réseau est muni de compteurs et de vannes de réglage des débits,
- D'un séparateur de condensas ou dévésiculeur,
- D'une unité d'extraction,
- D'une filière de traitement des gaz dont la nature dépend des pourcentages d'épuration, des débits et des concentrations en polluants ; cette filière peut être constituée de colonne de lavage, de torchère, d'unité d'oxydation catalytique, d'unité d'adsorption (généralement sur charbon actif), de biofiltre,
- D'un stockage des déchets solides et liquides issus du traitement

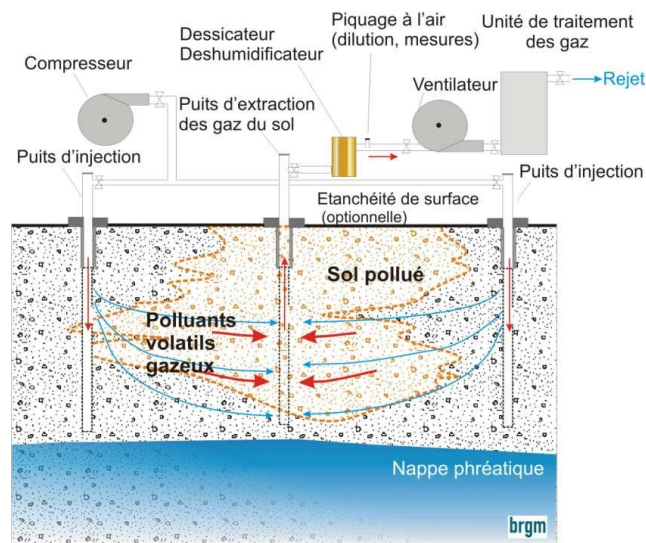


Figure II.1 : Venting

II-2- Lavage des sols (lessivage)

II-2-1-Principe

Les techniques de lavage des sols *in situ*, aussi appelées techniques de lessivage des sols ou extraction chimique, regroupent les techniques *in situ* de restauration des sols qui utilisent une solution de lavage (exemple : **solvants, acides, agents chélateurs**) afin de mobiliser les contaminants **organiques** (hydrocarbures, solvants chlorés, HAP, PCB, explosifs) ou **inorganiques** (les métaux non volatils) vers un système de récupération des eaux souterraines. Cette technologie implique l'injection en amont et le pompage en aval de la solution de lavage afin de favoriser la migration de la solution de lavage à travers la zone contaminée et de permettre la récupération des contaminants ainsi que de la solution de lavage.

L'injection de la solution de lavage peut s'effectuer à partir de drains, de tranchées ou de puits d'injection. Dans le cas où la contamination est localisée dans la zone vadose, la solution de lavage peut être injectée directement à partir de la surface au-dessus du secteur contaminé. Les techniques de lavage des sols *in situ* sont généralement implantées afin de compléter le traitement ou d'améliorer la performance de techniques conventionnelles de pompage et traitement de l'eau souterraine.

Les solutions généralement utilisées pour augmenter la mobilité des contaminants lors du lavage des sols *in situ* peuvent être de l'eau, des surfactants, des cosolvants, des acides, des bases, des oxydants chimiques, des agents chélateurs ou des solvants organiques. La sélection de la solution de lavage et son efficacité sont principalement fonction des propriétés physiques des contaminants présents et de la nature des sols en place.

II-2-2-Avantages

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),
- Egalement 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

II-2-3-Limitations de la technologie

- Le contenu du sol en particules fines telles les argiles ou les limons ne doit pas dépasser 20 % de la masse totale du sol
- Une forte teneur en matière organique dans le sol diminue l'efficacité du traitement
- La profondeur de la contamination peut augmenter considérablement les coûts liés à l'utilisation de cette technologie
- La conductivité hydraulique devrait idéalement être supérieure à 10^{-3} cm/s. Dans certain cas, cette technologie peut être envisageable pour une conductivité hydraulique se situant entre 10^{-3} et 10^{-5} cm/s
- L'hétérogénéité de la formation et la présence d'infrastructures souterraines peuvent favoriser l'écoulement de la solution de lessivage par des chemins préférentiels
- Difficile de traiter toute la zone contaminée lorsque la contamination est localisée dans un remblai hétérogène
- Possibilité de générer des volumes importants d'effluents contaminés
- Une mauvaise connaissance de l'hydrogéologie peut engendrer une migration de la contamination pendant et à la suite du traitement de lavage
- La présence de composés résiduels de la solution de lavage à la fin du traitement peut rendre inacceptable cette technologie, selon la réglementation en vigueur
- Les sols contaminés situés dans la zone vadose peuvent être difficiles, voire même impossibles à traiter.

II-2-3-Moyens matériels

Les moyens matériels nécessaires au lavage in situ sont les suivants :

- Matériel relatif aux additifs : cuve de stockage, système de mélange avec l'eau, réseau de distribution,
- Matériel d'injection et d'extraction : puits verticaux, puits horizontaux, pompes, tuyauteries, tranchées, galeries, compteur...,
- Une filière de traitement des eaux usées récupérées en surface,
- Eventuellement un système de récupération des additifs,
- stockage des déchets solides et liquides issus du traitement,
- Un système piézométrique permettant de suivre les écoulements et la qualité des eaux souterraines.

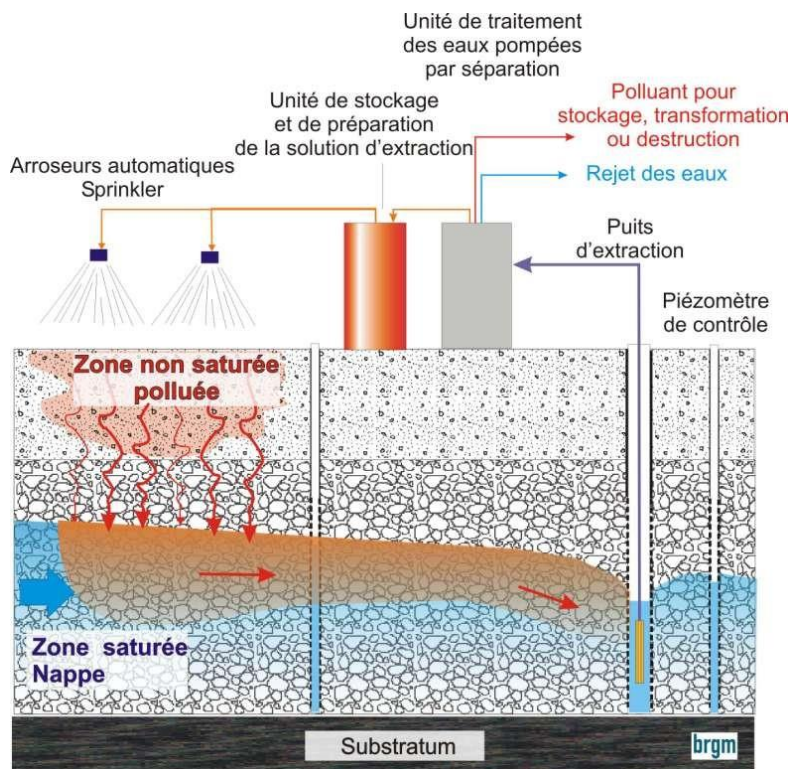


Figure II.2: lessivage

II-3- Stripping

II-3-1-Principe

Le principe du procédé repose sur un mélange et un temps de contact suffisant pour permettre un transfert du polluant entre la phase aqueuse et la phase gazeuse et donc une épuration importante.

Les deux principaux dispositifs utilisés sont constitués de tours :

- Les « Tray-Towers » : cylindres verticaux à plusieurs étages (aération en bassin à plateaux),
- Les « Packed-Towers » : cylindres verticaux remplis de matériaux développant de grandes surfaces - structure inerte poreuse (tour de garnissage).

Quel que soit le type de tours, le principe est identique : les eaux souterraines souillées sont introduites au sommet de l'unité et s'écoulent gravitairement au travers de la structure de la tour jusqu'à sa base où elles sont récupérées. De l'air pur est injecté à contre-courant, se charge en polluant et est rejeté par la partie sommitale de la tour. Si nécessaire l'air rejeté ainsi que les eaux traitées subiront un traitement ultérieur.

Les débits d'air (conventionnellement entre 100 et 200 fois celui des eaux à traiter), les hauteurs des tours (de 2 à 10 m) ainsi que leur diamètre, le type de plateau ou matériel de remplissage dépendent des charges massiques à épurer.

II-3-2 Applicabilité

Le stripping s'applique aux composés organiques volatils (COV, SCOHV de type BTEX, fuel, solvants polaires, solvants chlorés ...). D'une manière générale, le traitement sera efficace si la constante de Henry est supérieure à $0,01 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$.

II-3-3-Moyens matériels

La plupart des dispositifs comprennent une tour de contact, des ventilateurs, des pompes, des conduites et des distributeurs.

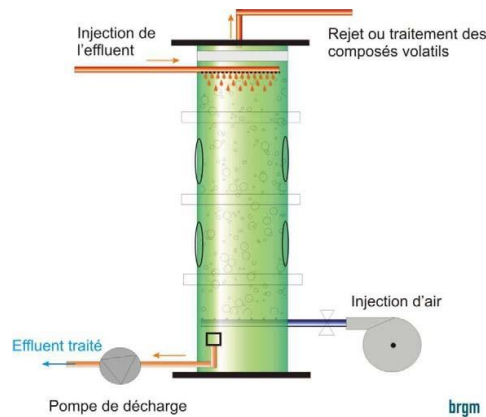


Figure II-3: principe de stripping

II-3-4-Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de ce traitement sont :

- Procédé non destructif,
- Rendements épuratoires élevés (en général plus de 90 %),
- Technique très répandue et procédé très bien maîtrisé,
- Nombreuses unités mobiles actuellement sur le marché (dont les capacités de traitement varient entre 10 à 20 m³/h, et exceptionnellement 50 m³/h),
- Les concentrations acceptées peuvent être importantes (10 000 mg/L pour les BTEX par exemple),
- Procédé peu sensible aux fluctuations de la concentration des contaminants,
- Applicabilité à une vaste plage de concentrations de contaminants dissous.

Ses inconvénients et facteurs limitants sont :

- Procédé physique non destructif,
- Les MES ou la formation de précipités de fer et de manganèse peuvent colmater l'unité de stripping, les concentrations importantes en calcium ou magnésium (eau dure) peuvent réagir avec le CO₂ de l'air et former des précipités qui peuvent colmater l'unité de stripping,
- Un développement bactérien important peut se développer dans les tours, ce qui peut nécessiter des entretiens réguliers, les systèmes ne peuvent

s'appliquer qu'à des composés volatils ou à défaut des composés semi-volatils lorsqu'ils sont préchauffés ou lorsque les temps de contact sont très importants,

II-4- Stabilisation/ solidification

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 :

- **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.

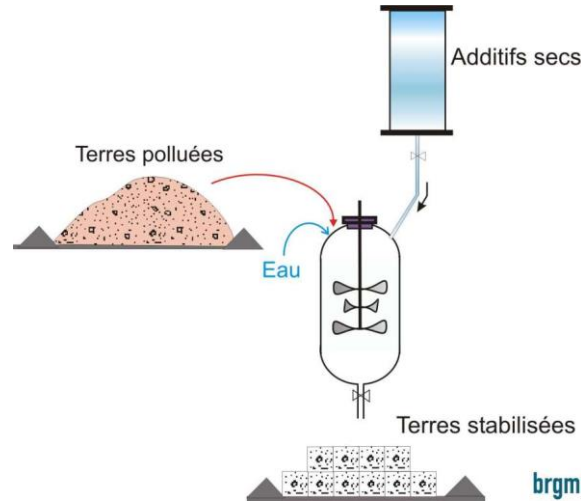


Figure II. 4 : stabilisation/ solidification

Les traitements par stabilisation reposent sur la mise en œuvre soit d'un traitement chimique à base d'acide phosphorique concentré, soit d'un traitement au liant hydraulique à base de chaux vive (par exemple), dont le but premier est de bloquer la lixiviation des polluants.

II-5- Oxydation chimique

L'oxydation chimique **in situ** est une technique physico-chimique de **dépollution des eaux souterraines et des sols contaminés** par des composés organiques. Elle consiste à **injecter dans la nappe ou le sol des réactifs oxydants, liquides, solides ou gazeux, afin qu'ils réagissent avec les polluants** au niveau du panache et/ou de la zone source. Le point déterminant est le contact entre le réactif oxydant et les polluants visés, sachant que les polluants sont partagés entre la phase aqueuse, la matrice poreuse et éventuellement une phase liquide non aqueuse (NAPL). L'oxydation s'adresse à des **polluants relativement légers** comme les **composés chlorés volatils**, le **benzène**, le **toluène**, les **xylènes** et à des composés de masse molaire plus élevée, comme les **hydrocarbures aromatiques polycycliques**. L'objectif du traitement est de dégrader les polluants en substances moins toxiques ou plus

rapidement biodégradables, voire dans le cas d'une oxydation complète, en **dioxyde de carbone, eau** et éventuellement **halogènes**.

Cette technique, bien adaptée et maîtrisée pour le traitement des nappes, se développe de plus en plus pour la zone non saturée du sol.

Les **oxydants** les plus utilisés sont le **permanganate de potassium ou de sodium**, le **peroxyde d'hydrogène combiné au fer (II)** (réactif de Fenton), le **persulfate de sodium**, le **percarbonate de sodium** et l'**ozone**. Le choix de l'oxydant dépend des polluants et des caractéristiques du site à traiter. Les oxydants usuels étant solubles dans l'eau, la dégradation s'opère principalement en phase aqueuse, ce qui favorise la dissolution des phases libres. La principale condition de réussite du traitement est d'arriver à privilégier le contact entre oxydant et polluant pendant une durée suffisante pour que la réaction soit possible.

La sélection de cette technique et son application nécessitent au préalable, de caractériser le site à traiter et d'effectuer des tests au laboratoire. Les tests en laboratoire sont destinés à sélectionner l'oxydant le plus approprié et à déterminer les quantités à mettre en œuvre. Si les résultats sont positifs à cette échelle, c'est-à-dire si l'on parvient à dégrader les polluants avec des doses raisonnables d'oxydant, la faisabilité est testée à l'échelle pilote, afin d'obtenir des données pour le dimensionnement, mettre en place le suivi, définir les conditions d'hygiène et sécurité et prévoir les coûts de traitement. On pourra ensuite mettre en œuvre le traitement sur site. L'oxydation **in situ** peut être combinée à des traitements de finition, notamment des traitements par biodégradation.

II-6- Réduction chimique

La réduction est souvent employée pour traiter les composés inorganiques. Les solvants chlorés peuvent être traités par déhalogénéisation (réduction par enlèvement des radicaux halogénés). Ces techniques peuvent être utilisées pour les composés fortement chlorés (**PCB**, pesticides ...). Pour ce faire, il existe deux techniques distinctes :

- La substitution via le polyéthylène glycolate : les sols sont chauffés et mélangés avec du polyéthylène glycolate, le plus souvent de potassium (KPEG), afin de substituer les atomes halogénés des polluants. Ceci a pour effet de rendre les polluants moins toxiques, de former des éthers de glycol et des sels métalliques alcalins. Les eaux usées contaminées par ces sous-

produits sont par la suite traités (précipitation, biodégradation, adsorption sur charbon actif, oxydation chimique).

- La décomposition catalytique (Based Catalyzed Decomposition) : les sols sont mélangés dans un réacteur avec du bicarbonate de sodium puis chauffés à plus de 330°C afin de volatiliser et de décomposer partiellement les polluants. Les contaminants volatilisés sont capturés, condensés et traités.

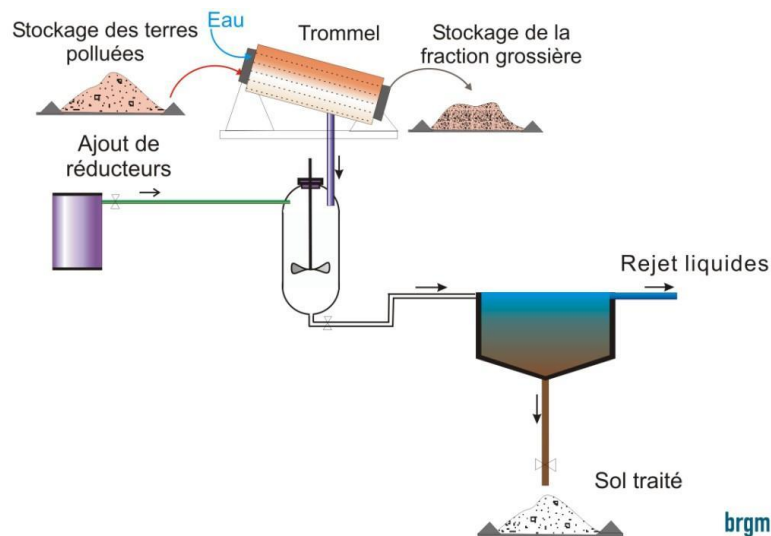


Figure II.6 : Réduction chimique

II-7-L'extraction double phase

L'extraction double phase consiste à exercer une dépression importante dans la zone non saturée, au niveau de la frange capillaire et au niveau de la partie supérieure de la zone saturée, ce qui a pour but d'extraire les gaz des sols, le surnageant (cas des produits flottants) et la phase dissoute. Les liquides et gaz extraits font l'objet d'une séparation et d'un traitement spécifique.

L'extraction multiphase est un procédé de traitement physique *in situ* par extraction des phases liquides et gazeuses des sols. Le système est composé d'aiguilles d'extraction reliées à un réseau d'extraction et à une pompe à vide. Les liquides extraits (surnageant en phase pure, eaux souterraines) ainsi que les gaz sont récupérés on site puis traités avant rejet.

Ce procédé s'applique essentiellement à des COV et des hydrocarbures de type pétroliers (essence, gasoil...) en phase pure (LNAPL). Il est notamment plus adapté pour la récupération de surnageant dans des milieux moyennement perméables et en condition parfois hétérogène. Toutefois, ce procédé ne peut s'appliquer qu'à de faibles profondeurs (10 m environ). Dans la zone non saturée, le traitement par extraction sous pression réduite ne s'adresse qu'aux polluants en équilibre entre la phase solide et la phase gazeuse et éventuellement la phase dissoute. Une phase liquide non aqueuse peut également être concernée par ce traitement si elle est uniquement constituée de composés organiques volatils.

Une pollution constituée par la partie d'une phase organique libre retenue par le sol lors de sa migration en profondeur, peut être aussi à l'origine d'une saturation des pores. La présence d'une telle phase peut limiter très fortement l'efficacité du traitement en diminuant la perméabilité de la zone, l'air aura tendance à contourner cette zone.

L'extraction multiphasique permet l'extraction simultanée de fractions de polluants sous forme liquide et gazeuse en agissant sur la zone saturée et la zone non saturée.

L'extraction double phase présente les avantages suivants :

- Technique fiable et éprouvée,
- Mise en œuvre relativement simple et rapide,
- Applicabilité à de nombreux polluants (LNAPL en phase pure),
- Peu de perturbation de sols,
- Envisageable sous des bâtiments,
- Le procédé permet de stopper la migration des polluants en créant des points de fixation de la contamination (confinement hydraulique),
- La position des puits d'extraction et des crépines permet de cibler précisément les zones à traiter,
- Le fait d'éliminer la phase flottante, les gaz et les eaux permet de diminuer considérablement les potentiels de relargage de la source, ceci permet de diminuer les effets rebonds,
- Ce procédé remplace avantageusement le couplage de techniques classiques de pompage/écrémage, pompage/traitement et venting dans les milieux peu perméables et hétérogènes,

- Procédé plus avantageux que le sparging pour confiner l'air et les eaux souterraines,
- Technique plus adaptée que le couplage de techniques classiques de pompage/écrémage, pompage/traitement et venting pour des délais relativement courts.

Ses inconvénients et facteurs limitants sont les suivants :

- Application uniquement dans le cas d'une nappe peu profonde (profondeur <7m),
- Technique valable uniquement pour les LNAPL,
- Inapplicable pour de petites épaisseurs de surnageant (< 1 cm),
- Débits de pompage souvent importants. Il est donc primordial de bien optimiser le nombre et l'emplacement des points d'extraction afin de limiter les coûts de fonctionnement,
- Efficacité limitée dans le cas d'aquifère de faible perméabilité (10^{-7} m/s), non homogène et/ou fracturé (passages préférentiels à travers les zones les plus perméables à l'eau), néanmoins cette technique est plus recommandée dans ce type de géologie que le pompage/écrémage classique,
- Sans une maîtrise totale du sens d'écoulement des eaux souterraines, il y a un risque de dissémination de la pollution.

II-7-2-Moyens matériels

Le système d'extraction double phase est constitué :

- de points d'extraction verticaux (dénommés aiguilles d'extraction),
- d'un réseau d'extraction permettant la mise en relation des points d'extraction et de la pompe à vide (ce réseau est muni de compteurs et de vannes de réglage des débits),
- d'un séparateur de condensas ou dévésiculeur,
- d'une unité d'extraction,
- d'un système de traitement des eaux usées on site :
- séparateur à hydrocarbures (déboureur/déshuileur),
- traitement de la phase dissoute : stripping ou charbon actif ou oxydation catalytique,

- d'une filière de traitement des gaz dont la nature dépend des pourcentages d'épuration, des débits et des concentrations en polluants ; cette filière peut être constituée de colonne de lavage, de torchère, d'unité d'oxydation catalytique, d'unité d'adsorption (généralement sur charbon actif), de biofiltre,

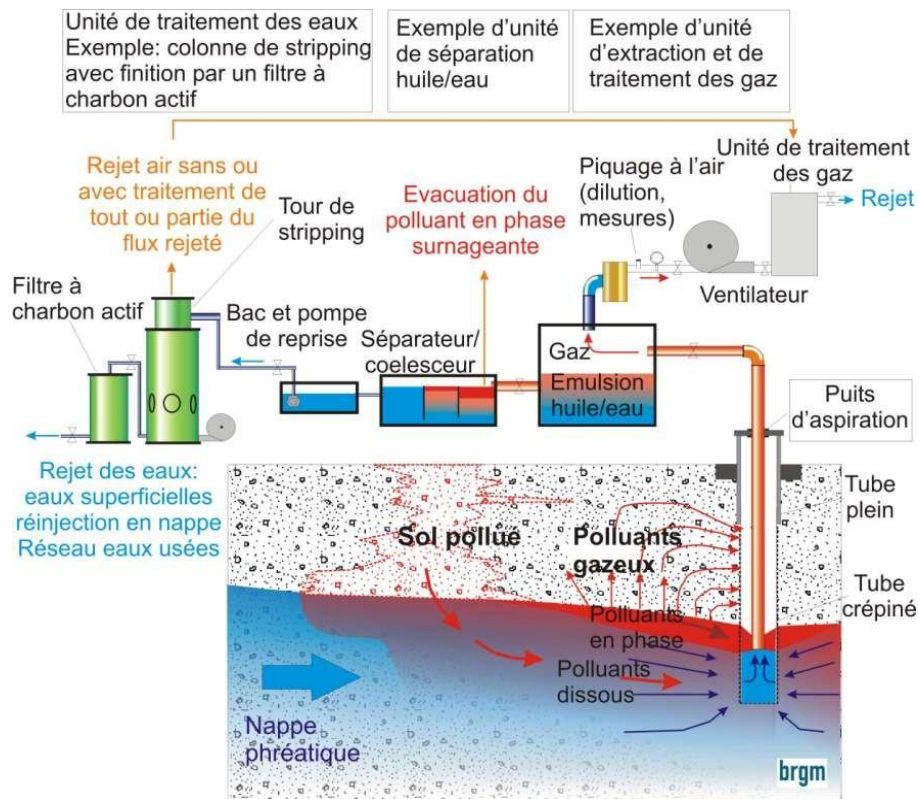


Figure I.7 : Schéma de principe de l'extraction double phase

II-8-le confinement

Le confinement in situ peut être appliqué de différentes façons :

- méthodes physiques :
 - confinement par couverture et étanchéification,
 - confinement vertical,
- méthodes hydrauliques ou confinement hydraulique :
 - méthode active : pompage (piège hydraulique),
 - méthode passive tranchée

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.

II-8-1- Confinement par couverture et étanchéification

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...).

De telles mesures de confinement doivent être pérennes dans le temps et doivent être adaptées aux usages du site. Aussi, doit-on apporter des éléments démonstratifs tangibles sur les performances du confinement et sur leur pérennité dans le temps (BRGM, 1996a).

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.

Ce type de confinement est essentiellement utilisé pour les métaux/métalloïdes présents en grande quantité (remblais) sous forme non ou peu lessivable.

Dans tous les cas, il conviendra de confiner les sols à une côte altimétrique supérieure à celle du niveau piézométrique le plus haut.

Le confinement peut être temporaire ou final.

II-8-1-1-Moyens matériels

La sélection des matériaux à mettre en œuvre se base non seulement sur leurs coûts mais aussi sur leurs caractéristiques vis-à-vis de la protection, l'étanchéité, du drainage, de la filtration, de la séparation, du renforcement, de la résistance à l'érosion, de la pérennité, du type de polluant...

La mise en place de ces matériaux est réalisée à l'aide d'engins de chantiers spécifiques.

Il est nécessaire de mettre en place des filets avertisseurs au-dessus du confinement.

II-8-2-Confinement vertical

II-8-2-1-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 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.

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.

II-8-2-2- 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.

II-8-3-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
- l'utilisation de cette technologie ne garantit pas forcément une absence de traitement future si nécessaire (non maîtrise de la pollution, reconversion nouvelle du site ...).
 - le confinement vertical est actuellement efficace sur les sols poreux et homogènes. Ce type de confinement reste très difficile à mettre en œuvre dans des terrains fracturés et à double porosité.

II-8-3- Piège hydraulique ou confinement hydraulique

II-8-3-1- 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).

Le procédé correspond à la première partie du pompage-traitement. A l'inverse du confinement physique (dont le but est d'empêcher les écoulements hydrauliques), le piège hydraulique consiste, quant à lui, à favoriser l'écoulement des eaux souterraines en un point prédéfini en vue d'un traitement.

II-8-3-2- 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).

II-8-3-3- 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. 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.

II-8-4-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.

II-8-5- Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de ce traitement sont :

- technique fiable et éprouvée,
- mise en œuvre relativement simple et rapide,
- le procédé permet de traiter la phase dissoute relativement efficacement (surtout pour des polluants solubles),
- applicabilité à de nombreux polluants,
- peu de perturbation de sols,
- envisageable sous des bâtiments,
- afin d'améliorer les rendements épuratoires, on peut y associer des procédés chimiques (lavage), biologiques et physiques (fracturation hydraulique),
- association possible à un traitement de la zone vadose (lavage, venting ...),
- le procédé permet de stopper la migration des polluants en créant des points de fixation de la contamination dissoute,
- un des rares procédés à pouvoir traiter les DNAPL,
- la position des piézomètres et des crépines permet de cibler précisément les zones à traiter,
- profondeurs de pompage de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres si nécessaire,

- la réinfiltration en amont des eaux pompées et traitées permet de limiter les flux vers l'extérieur et de forcer les écoulements au sein du piège hydraulique.

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 de la source. La seule action est relative à la réduction importante du transfert de pollution ; le confinement devra donc perdurer pendant tout le relargage de la source ;

- il est nécessaire de réaliser un suivi à très long terme ;

- une variation importante de la profondeur du toit de la nappe constitue un obstacle important au bon fonctionnement du procédé (lorsque le confinement concerne la partie haute de la nappe) ;

- il est nécessaire d'entretenir le confinement afin d'assurer sa pérennité de son bon fonctionnement (usure des pièces, colmatage..) ; il est d'usage dans des cas extrêmes de fonctionner avec un système de pompage en secours opérationnel ;

- le pompage de l'eau est une technique dont la durée peut être de plusieurs années, ceci est dû au fait que la source de pollution n'est pas traitée, le pompage ne fait que traiter les effets. Il faudra donc attendre l'épuisement au moins partiel de la source de pollution pour arrêter le confinement hydraulique ;

- le confinement hydraulique nécessite souvent d'autres mesures de traitements et de confinements complémentaires (traitement de la source de pollution, confinement par couverture et étanchéification, confinement vertical, encapsulation, mesures constructives...) afin d'en améliorer le fonctionnement et de diminuer les volumes pompés ;

- dans des aquifères de grandes perméabilités, les volumes traités et donc les coûts de fonctionnement sont importants ;

- dans certaines conditions, le confinement hydraulique peut s'étaler sur des décennies, ce qui engendre in fine des coûts de traitements importants (procédé énergivore) ;

- le traitement ou la réinjection de certains contaminants soulèvent des problèmes de sécurité ;

- toute la finesse du pompage réside dans le fait qu'il faut retenir la pollution et ne pas pomper des eaux non souillées. Le but est de ne pas générer des coûts de pompage importants et donc des coûts de fonctionnement élevés ;
- plus les polluants sont hydrophobes, plus leur récupération sera longue, car ces polluants ont des affinités avec les matières organiques présentes dans les zones saturées et non saturées et ont un coefficient de partage sol/eau élevé ;
- la prédiction notamment en termes de rétention de la pollution par modélisation est des plus difficiles ; il est arrivé de revoir l'intégralité du pompage après les premiers mois de confinement. La modélisation numérique est souvent requise

III-Méthode thermique

III-1-Incinération

Parmi les techniques de traitement les plus anciennes, l'incinération consiste à brûler les sols contaminés dans un four atteignant des températures extrêmes (870 à 1 200°C) (sur site ou hors site). Les contaminants sont donc détruits ou volatilisés. Depuis de nombreuses années utilisée comme technique de traitement des sols, l'incinération a été développée graduellement au fil des ans, s'appliquant maintenant à plusieurs polluants. Les contaminants visés sont principalement organiques.

« L'incinération est utilisée pour de nombreux polluants organiques (volatils, semi-volatils, voire peu volatils) à des teneurs très concentrées (de l'ordre de plusieurs pour cent parfois), hydrocarbures pétroliers (essences, gazoles, kérosènes), fractions plus lourdes d'hydrocarbures, solvants chlorés, huiles, PCB, pesticides, dioxines/furanes, HAP, composés explosifs. Exception faite des composés radioactifs, l'intégralité des polluants peut être traitée par incinération. »

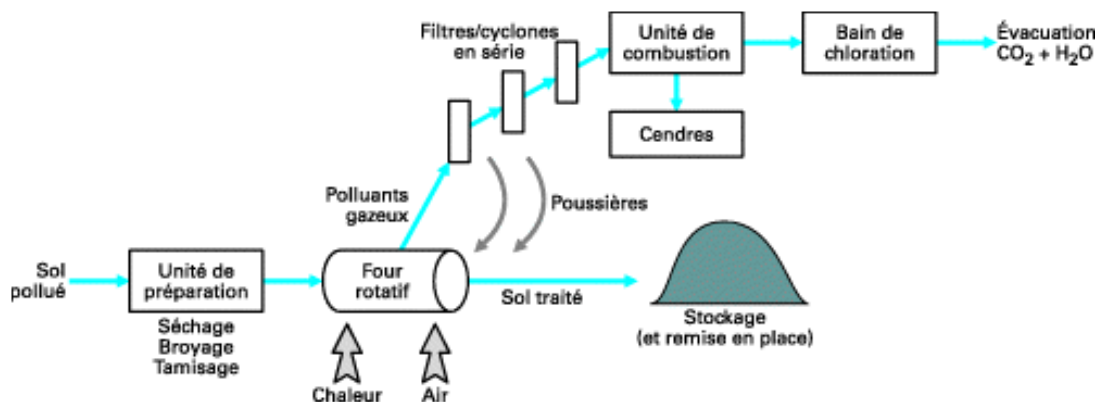


Figure III-1 Système d'incinération par four rotatif

L'incinération est la seule technique qui détruit réellement les polluants. Cependant cette technique est extrêmement coûteuse (380 €/t-1) et les fumées toxiques qui se dégagent lors de la combustion nécessitent d'importants engendrant ainsi des surcoûts. L'incinération se réalise en deux étapes. La première à 400°C, dite de volatilisation et une seconde dite de destruction se produisant à une température supérieure à 1 000°C.

La méthode la plus largement utilisée est celle du désorbeur ou four rotatif. Selon cette méthode, le sol débarrassé des fractions grossières, est porté à une température suffisamment élevée pour permettre la désorption de l'humidité et des contaminants. Il est bien adapté aux sols contaminés par des hydrocarbures

La combustion aérobie permet de détruire les polluants organiques en vapeur d'eau, gaz carbonique et résidus de combustion (cendres). Les métaux ne sont pas détruits et se retrouvent soit dans les effluents gazeux soit dans la fraction solide (cendres). Les métaux présents dans la fraction gazeuse peuvent faire l'objet d'une oxydation et d'une récupération spécifique.

L'incinération présente les avantages suivants :

- technique permettant de détruire les polluants,
- technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- technique permettant de traiter de nombreux polluants notamment les composés semi-volatils et peu volatils,
- technique permettant de traiter les sols très fortement pollués ; les teneurs en composés organiques peuvent être de l'ordre de plusieurs pourcents,
- technique permettant de traiter certains métaux "volatilisables" comme le zinc, le cadmium, le plomb...,
- technique efficace même pour des sols argileux et hétérogènes,
- technique permettant d'atteindre des taux de dépollution très importants,
- technique rapide,
- technique moins onéreuse que les autres traitements thermiques,
- traitement sur site possible grâce à des unités mobiles.

Ses inconvénients et ses facteurs limitants sont les suivants :

- procédé nécessitant l'excavation des sols,
- technique très énergivore,
- une des techniques les plus onéreuses du marché,
- traitement on site nécessitant une surface importante,
- très haut niveau de technicité nécessaire,
- il est primordial d'atteindre de très hautes températures afin de ne pas dégager une partie des polluants dans l'atmosphère (ou leurs métabolites comme les dioxines et les furanes par exemple),
- procédé utilisé en traitement hors site nécessitant un transport coûteux,
- préalablement à l'installation d'une unité sur site, il faut monter un dossier d'autorisation d'exploiter,
- traitement poussé et coûteux des rejets atmosphériques,
- les gaz doivent la plupart du temps être refroidis afin de protéger les unités de traitement en aval,
- les débouchés de cendres très fortement contaminées notamment en métaux/métalloïdes doivent être considérés dès le départ du projet car ils peuvent poser des problèmes non négligeables ; la plupart du temps, ces cendres sont éliminées en centre de stockage de déchets ultimes,
- les métaux volatils (comprenant notamment le plomb, le cadmium, le mercure, l'arsenic) quittent l'unité de combustion et sont entraînés dans les rejets atmosphériques ; ce qui nécessite des unités de traitement spécifique (condenseurs..),
- certains métaux forment temporairement des composés toxiques notamment avec les atomes de chlore et de soufre et doivent être traités au niveau de la neutralisation,
- l'hétérogénéité et le taux de matière organique des sols peuvent impacter notablement les rendements épuratoires,
- les températures réellement atteintes au cœur de la pollution influent le rendement opératoire,
- les composés organiques peu volatils peuvent être volatilisés et donc extraits du sol en phase gazeuse à condition que leur tension de vapeur ait augmenté de manière significative,

- les coûts de production de température (coûts d'exploitation) sont souvent importants et sont souvent un frein à l'application de ce procédé, notamment ceux générés par la vaporisation de l'eau,

III-2-Pyrolyse

La pyrolyse consiste à introduire les terres excavées dans un four afin de les chauffer en l'absence d'oxygène à des températures comprises entre 150 et 540°C. Dans les faits, il est impossible d'obtenir une concentration en oxygène proche de 0%, les techniques actuelles permettent néanmoins de travailler avec des concentrations en oxygène inférieures aux conditions stœchiométriques. La méthode de traitement est donc très proche de celle utilisée pour l'incinération, la différence réside dans le fait que les conditions d'opération sont réalisées à des températures plus basses et en présence de peu d'oxygène.

Le but est de désorber les contaminants adsorbés sur la matrice sol et d'augmenter la tension de vapeur des composés peu volatils afin de les volatiliser et de les transférer dans la phase gazeuse.

La pyrolyse est particulièrement adaptée pour traiter les sols riches en matière organique contaminés par des composés semivolatils ou peu volatils : fractions lourdes d'hydrocarbures, huiles, pesticides, PCB, dioxines, furannes, HAP, résidus de raffinerie, produits de traitement du bois (pentachlorophénols), certains métaux lourds (mercure), mais aussi des sols pollués par des hydrocarbures plus légers mais fortement adsorbés sur certains types de sols (taux de matière organique très élevés) : essences, gasoils, kérosènes, solvants chlorés.

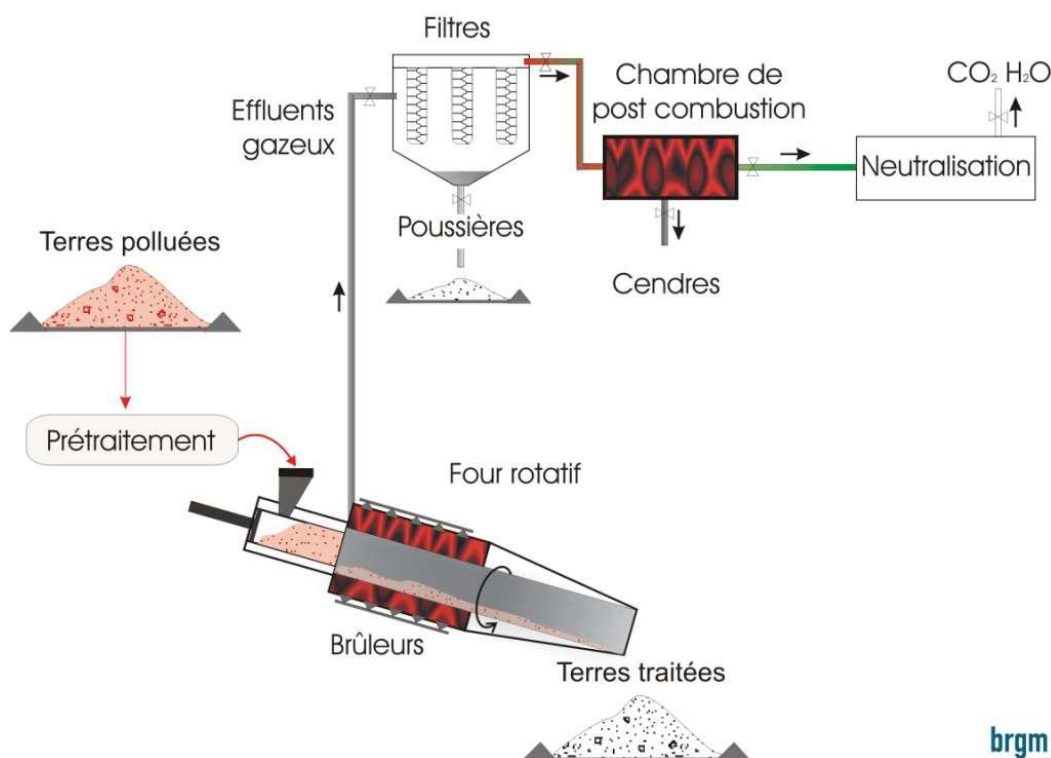


Figure III-2 pyrolyse

La pyrolyse présente les avantages suivants :

- technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- technique permettant de traiter de nombreux polluants notamment les composés semi-volatils et peu volatils,
- technique permettant de traiter les sols fortement pollués,
- technique efficace même pour des sols argileux et hétérogènes,
- technique permettant d'atteindre des taux de dépollution très importants,
- technique rapide,
- technique moins onéreuse que l'incinération et la vitrification,
- volume de gaz à traiter faible par rapport à l'incinération,
- cette technique permet de traiter tous les types de déchets et est particulièrement adaptée pour le traitement des sols riches en matière organique,
- revalorisation énergétique possible des sous-produits solide

Ses inconvénients et ses facteurs limitants sont les suivants :

- la technique de désorption ne permet pas de détruire les polluants,
- le procédé nécessite l'excavation des sols,
- le procédé utilisé en traitement hors site nécessite un transport coûteux,
- les rejets atmosphériques doivent faire l'objet d'un traitement poussé et coûteux,
- les gaz doivent la plupart du temps être refroidis afin de protéger les unités de traitements en aval,
- les débouchés des sous-produits doivent être considérés dès le départ du projet car ils peuvent poser des problèmes non négligeables,
- l'hétérogénéité des sols peut impacter notablement les rendements épuratoires,
- les sols présentant un taux d'humidité supérieur à 20 % doivent faire l'objet d'un prétraitement par chauffage,
-

III-3-Vitrification

La **vitrification** consiste à transformer par élévation de température. Un sol contaminé en un matériau fondu inerte. C'est donc une méthode thermique in situ se rapprochant de la stabilisation. Cette méthode est utilisée sur des sites difficiles à traiter par d'autres méthodes. La fusion du sol est obtenue en enfonçant dans le sol des électrodes jusqu'à une profondeur nécessaire pour le traitement, et en provoquant, par un courant électrique, une intense augmentation de température, de l'ordre de 2000°C. A cette température, la matrice du sol entre en fusion et est transformée par pyrolyse en un verre silicaté, où tous les composés présents sont fondus ou vaporisés. Cette méthode évite l'excavation et le déplacement de composés hétérogènes. Elle minimise le risque l'exposition aux contaminants, tout en durable. De plus, sa vitesse d'exécution est rapide : 3 à 5 tonnes par heure.

Le produit obtenu à un taux de lessivage très bas, Cependant, il existe quelque inconvénient à cette méthode, comme la position des électrodes qui limite la profondeur et la surface à traiter. De plus, il peut se produire un dégagement de gaz toxiques, devant alors être traités. Elle nécessite également un potentiel important et coûteux : la consommation est évaluée à 750 kWh .t⁻¹, enfin, bien que permettant une bonne stabilité, cette méthode présente l'inconvénient d'empêcher la réapparition d'un tapis végétal.

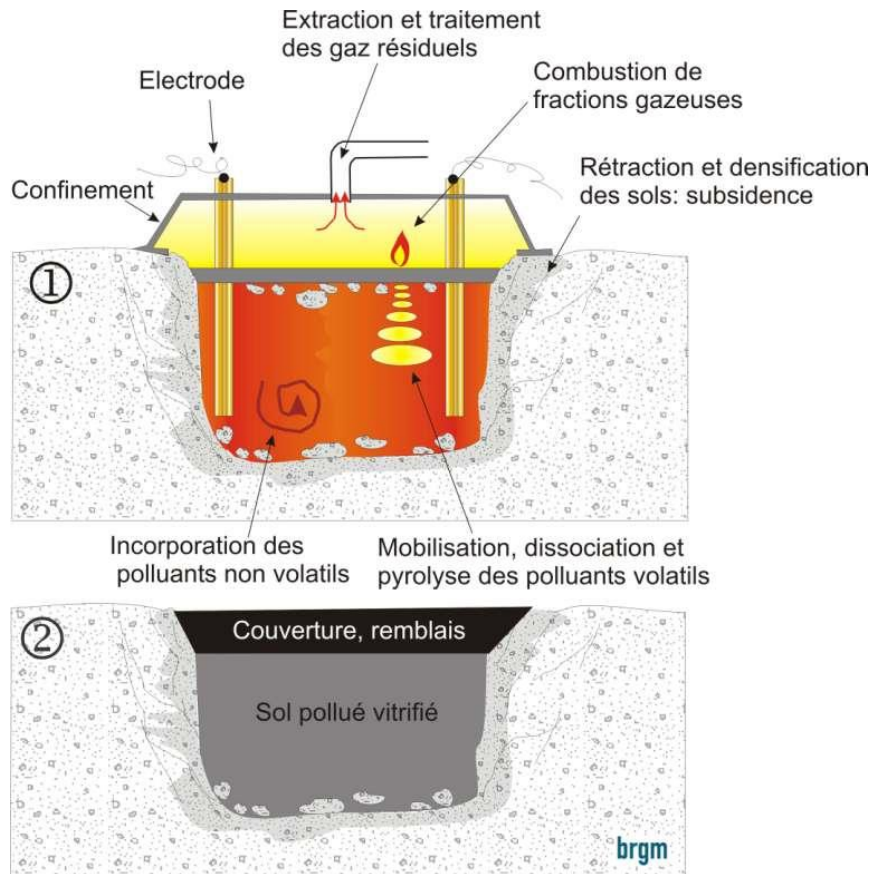


Figure III-3- : Schéma de principe de la vitrification thermique in situ.

Des électrodes en graphite (généralement au nombre de 4) sont introduites dans la source de pollution (zone vadose). Un courant électrique est alors imposé entre les électrodes ; le passage du courant dans les sols génère, par effet Joule, une augmentation importante de la température (1 600 à 2 000°C), ce qui entraîne la fusion des sols (puis une vitrification lors de son refroidissement). Les électrodes sont enfoncées au fur et à mesure de la vitrification de la surface du sol vers le bas de la zone à traiter.

Les composés organiques sont soit détruits soit volatilisés avant d'être acheminés vers une unité de traitement spécifique. Pour ce faire, l'ensemble de la zone à traiter doit être placée sous une hotte mise en dépression.

Les composés inorganiques mais aussi l'amiante et les radionucléides sont incorporés dans la matrice vitrifiée. Ce dernier est très stable inerte et très peu lixiviable.

Cette technique, à l'instar des autres techniques de solidification/stabilisation, est applicable à de nombreux composés organiques (destruction des COV, SCO, dioxines, PCB...) mais est principalement destinée à traiter (par immobilisation) les composés inorganiques mais aussi l'amiante et les radionucléides.

La vitrification in situ présente les avantages suivants :

- applicabilité à de très nombreux produits,
- les résidus solides sont peu lixiviables,
- technique particulièrement adaptée aux contaminants toxiques non combustibles,

- technique éprouvée (dans certains pays étrangers) ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- technique efficace même pour des sols argileux et hétérogènes.

Ses inconvénients et facteurs limitants sont :

- consommation énergétique très importante et constituant un frein à l'application de ce procédé,
- les contaminants peu volatils (métaux, radionucléides, amiante) restent dans le sol mais sont immobilisés,
- la proportion des contaminants organiques présents doit être inférieure à 5-10%,
- les surfaces des sols traitées sont faibles à chaque mise en place ($< 10 \text{ m}^2$),
- la profondeur de traitement maximale est de l'ordre de 6 m,
- la technique ne peut être employée à proximité de bâtiments, d'infrastructures, de réseaux et de canalisations enterrés du fait de l'affaissement des sols provoqué (stabilité géotechnique) et de la chaleur générée (risque d'impact sur les matériaux),
- le sol doit contenir suffisamment de silice pour que la vitrification soit efficace,
-

III-4-La désorption thermique

La désorption thermique est une technologie permettant de traiter les pollutions du sol en portant les terres à haute température.

La technologie s'applique aux terres polluées aux hydrocarbures (aliphatiques, mono-aromatiques ou poly-aromatiques), aux polluants organiques halogénés ou à certains polluants inorganiques.

III-4-1-La désorption in situ

La désorption thermique est l'application de chaleur pour extraire du sol par volatilisation les polluants volatils et semi-volatils.

Le sol en place est chauffé par différents moyens afin d'augmenter la volatilisation des polluants qu'il contient.

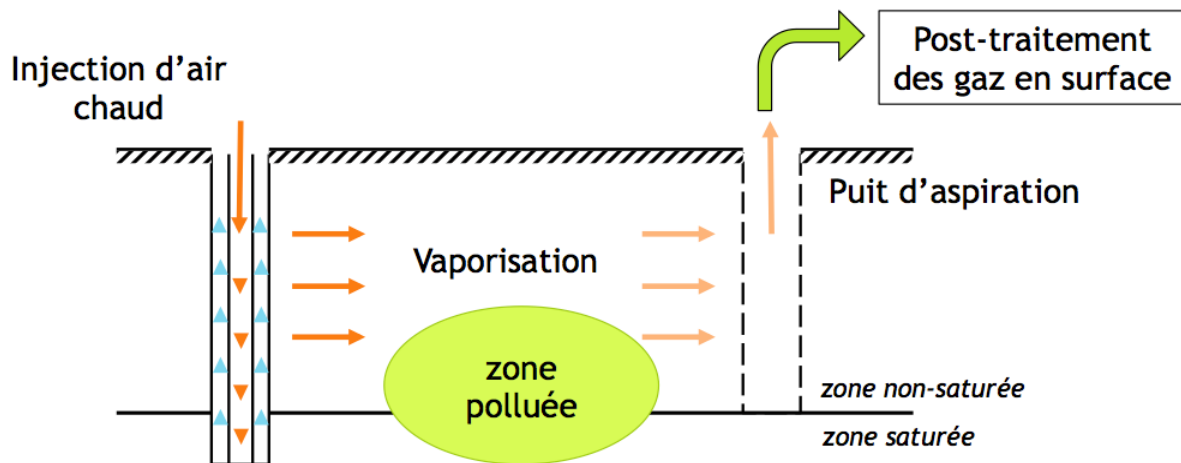


Figure III-4 : principe de désorption thermique in situ

III-4-1-1-Principe

La température du sol à traiter est augmentée par différents moyens. Cette élévation de température a pour conséquence une évaporation de l'eau contenue dans le sol. Les polluants ayant une température d'ébullition inférieure à celle de l'eau sont alors volatilisés par évaporation.

III-4-2- Désorption ex situ

La désorption thermique consiste, une fois les terres contaminées excavées, à les introduire dans une unité de désorption (communément appelée « four ») où elles seront chauffées jusqu'à des températures comprises généralement entre 150 et 540 °C. Cette augmentation de température a deux buts :

- favoriser la désorption des contaminants fortement adsorbés sur les particules du sol,
- augmenter la tension de vapeur des composés peu volatils afin de pouvoir les volatiliser et les extraire en phase gazeuse.

La désorption thermique est toujours accompagnée d'une récupération des vapeurs émises durant le procédé. Ces vapeurs subissent une série de traitements après extraction : récupération des particules puis élimination des composés organiques et du monoxyde de carbone. Ces composés peuvent être détruits (brûleur, oxydation catalytique) ou transférés sur un autre milieu (condenseur ou charbon actif).

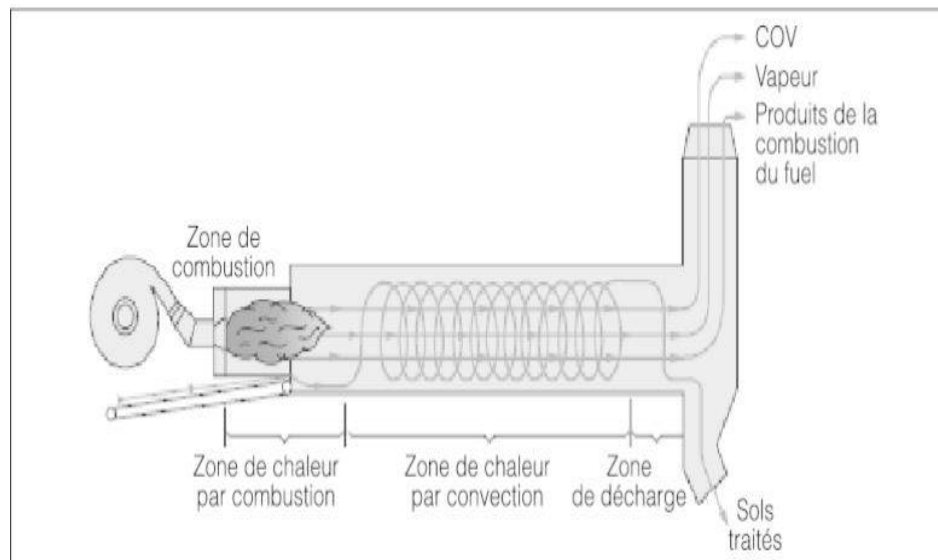


Figure III-5: principe de désorption thermique ex-situ

III-4-2-1-Les avantages

Coût nettement inférieur à l'incinération ;

- Technique permettant de traiter de nombreux polluants notamment les composés semi-volatils et peu volatils ;
- Technique efficace même pour des sols argileux et hétérogènes ;
- Technique permettant d'atteindre des taux de dépollution très importants ;
- Technique rapide.

III- 4-3-Les inconvénients

La technique de désorption ne permet pas de détruire les polluants ;

- Le procédé nécessite l'excavation des sols ;
- Le traitement on site nécessite une surface importante ;
- Le procédé utilisé en traitement hors site nécessite un transport coûteux ;

Introduction

Les techniques biologiques de dépollution des sols sont nombreuses. Selon la nature de la pollution à traiter, elles sont mises en œuvre seules ou combinées à d'autres procédés, physiques, chimiques, thermiques ou biologiques.

Bien que l'avantage principal des techniques biologiques réside dans leur mise en œuvre sur le site même (in situ), certaines nécessitent l'excavation des terres et sont réalisées sur site (excavation des terres qui sont traitées sur le site même) ou hors site (excavation et transport des terres vers un centre de dépollution).

L'identification des techniques biologiques existantes ou émergentes et l'analyse des procédés impliqués met en évidence l'existence de deux catégories principales : les techniques de **bioremédiation** qui utilisent essentiellement des bactéries et les techniques de **phyto-remédiation** qui exploitent les propriétés des végétaux (plantes, arbustes, arbres). Elles peuvent être classées en fonction de leur degré d'innovation :

Les techniques innovantes qui font l'objet de travaux de recherche et développement poussés et d'essais pilotes sur site

Les techniques plus anciennes, qui n'évoluent plus vraiment, à l'exception d'ajustements mineurs pour optimiser leur rendement et gagner en efficacité.

IV-1-Les techniques biologiques innovantes

Parmi les techniques biologiques innovantes, certaines sont commercialisées tout en faisant l'objet de travaux de recherche et développement en vue d'améliorer les conditions d'utilisation et d'optimiser les performances, d'autres n'ont pas dépassé le stade expérimental et sont étudiées soit en laboratoire, soit dans des serres, ou font l'objet d'essais sur le terrain (chantiers expérimentaux, sites pilotes). Figurent parmi ces technologies innovantes à la fois des techniques de bioremédiation et de phyto-remédiation.

IV-1-1-Les techniques de bioremédiation

Les techniques de bioremédiation utilisent les propriétés dépolluantes de microorganismes (des bactéries essentiellement, mais également des champignons) endogènes ou exogènes au terrain contaminé et peuvent être subdivisées en huit catégories selon le principe biologique ou mode de dépollution mis en œuvre.

- Biodégradation
- Bioimmobilisation
- Biolixiviation
- Bioslurry (traitement en bioréacteur)
- Biorestauration
- Bioaugmentation
- Biostimulation

IV-1-2-Les techniques de phytoremédiation

Les techniques de phytoremédiation exploitent les propriétés de certaines espèces végétales (strates herbacées, plantes, arbustes, arbres, algues) à interagir avec des composés chimiques organiques ou minéraux pour dépolluer un terrain contaminé in situ. Le plus souvent, ce sont les microorganismes de la rhizosphère⁷ qui dégradent les composés organiques. Il arrive que les produits issus de la dégradation, qui peuvent ou non être accumulés par le végétal, soient plus dangereux que le polluant d'origine. La biomasse produite peut contenir le polluant (tiges, feuilles) et doit être traitée d'une façon adéquate, qui revient souvent à récolter les végétaux pour les incinérer. La phytoremédiation peut utiliser cinq catégories de procédés pour dépolluer un sol contaminé, phytoextraction

- Phytostabilisation
- Phytodégradation / phytotransformation
- Phytovolatilisation / phytostimulation
- Rhizodégradation

IV-2-Les diverses techniques de bioremédiation et de phytoremédiation,

Les principes qu'elles mettent en œuvre, les pollutions auxquelles elles s'appliquent, ainsi que quelques exemples concrets.

De plus, les principales techniques biologiques développées actuellement, c'est-à-dire la **bioremédiation** et ses deux formes les plus extrêmes, **l'atténuation naturelle** (ou bioremédiation naturelle) et le **bioslurry** (effectué en bioréacteur et nécessitant un équipement particulier) ainsi que la **phytoremédiation**.

Les techniques qui supposent d'injecter des microorganismes dans les sols, in situ, nécessitent de contrôler de nombreux paramètres et de prendre d'importantes précautions pour éviter la diffusion des microbes dans l'environnement proche. Ces techniques sont généralement moins bien acceptées du fait des risques de transfert des bactéries et des pollutions dans les sols environnants et les nappes phréatiques.

En ce qui concerne la phytoremédiation, l'éventualité que les polluants soient libérés par la plante par évapotranspiration, ou que des organismes OGM soient utilisés pour optimiser les propriétés dépolluantes du végétal sont autant d'obstacles à l'acceptation de cette technique par le public.

Du point de vue scientifique, les limites de la phytoremédiation varient selon les techniques mises en œuvre ; on citera toutefois les plus courantes :

- Fuite de gènes, possibilité d'invasion,
- Consommation faune sauvage/habitat faune sauvage
- Remobilisation
- Présence temporaire ou persistante de produits dérivés
- Limite de la zone prospectée par les racines

- Temps long et aléas climatiques, etc.

En revanche, les avantages de la phytoremédiation sont multiples : utilisation de procédés biologiques et d'organismes végétaux, coûts de mise en oeuvre considérablement réduits par Sol entourant les racines des plantes et qui en est directement influencé.

IV-3- Atténuation naturelle contrôlée

IV-3-1- principe

Il paraît indispensable de considérer que l'atténuation naturelle doit inclure au minimum l'un des processus suivants :

- Un processus destructif,
- Un processus de séquestration (exemple : adsorption).

De plus, pour les processus destructifs, il faut qu'ils ne génèrent pas de sous-produits gênants (plus toxiques par exemple), revenant à transférer la pollution ou à en changer ses caractéristiques sans en améliorer les effets néfastes.

L'atténuation naturelle n'a de sens que si elle s'accompagne :

- D'une surveillance appropriée des milieux,
- D'une vigilance pérenne sur les changements suivants d'usage éventuels et d'une information systématique.

L'atténuation naturelle, pour être considérée valablement comme l'équivalent d'une technique de réhabilitation, doit remplir un certain nombre de critères d'ordre technique. Ces critères peuvent être exposés de la façon suivante:

- L'atteinte effective des objectifs de réhabilitation ;
- La limitation de l'emprise spatiale ;
- Le respect de délais compatibles avec une gestion des risques.

IV-3-2- Applicabilité

L'atténuation naturelle contrôlée s'applique essentiellement dans la zone saturée. Les résultats les plus probants ont été obtenus sur les hydrocarbures légers, les COV, les SCOV et certains COHV.

Dans certains cas, des résultats intéressants ont été obtenus avec certains pesticides, explosifs (trinitrotoluène), phénols et certains composés inorganiques. Dans ce dernier cas, l'atténuation naturelle consiste essentiellement à changer la valence des éléments et donc leur mobilité (CrVI et CrIII ; AsIII et AsV).

IV-3-3- Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages de l'atténuation naturelle contrôlée sont :

- Technique éprouvée ayant démontré des résultats extrêmement significatifs lorsque les conditions optimales sont réunies,
- Compétitivité en termes de coût par rapport aux techniques « actives »,
- Technologie de soutien non négligeable après un traitement actif (partiel) de la source de pollution et de l'impact,
- Applicabilité à de nombreux polluants,
- Application générant peu de perturbation de sols,
- Activité liée à la dépollution générant peu d'impact,
- Applicable sous des bâtiments et dans le cas de pollutions à de grandes profondeurs (plusieurs dizaines de mètres),
- Fiabilité lorsque les conditions sont réunies.

Les inconvénients et facteurs limitants sont :

- L'hétérogénéité des répartitions des polluants
- L'hétérogénéité des perméabilités des sols interfèrent énormément sur l'efficacité du traitement,
- La performance de cette technique est extrêmement variable suivant les conditions spécifiques du site.
- Les durées de traitement sont importantes,
- Les aspects sociopolitiques doivent être pris en considération le plus en amont possible,
- L'information des différentes parties prenantes et la transparence doivent être une priorité,

IV-4-Bioventing

IV-4-1- Principe

Le bioventing est un traitement biologique aérobie qui consiste à stimuler la biodégradation dans la zone non saturée par apport d'oxygène.

Cette technique est couramment employée sur les sites présentant des hydrocarbures volatils à semi-volatils biodégradables.

Le bioventing consiste à augmenter les teneurs en oxygène dans la zone vadose en injectant la plupart du temps de l'air par le biais de puits d'injection. Le système d'injection est similaire mais de taille inférieure à celui du venting. En effet, les débits aérauliques nécessaires à un bon fonctionnement de l'activité biologique sont moins élevés que ceux du venting.

Dans la majorité des cas, des puits de récupération des vapeurs sont installés afin de contrôler la migration des vapeurs et de favoriser la circulation d'air.

Souvent, le venting et le bioventing sont confondus. Le terme de bioventing est adapté lorsque la biodégradation est plus importante que la volatilisation.

Afin d'augmenter la biodégradation, il est parfois nécessaire de fournir des nutriments (N, P, K ...) sous forme liquide par le biais de puits superficiels et/ou de drains.

Par ailleurs, des substrats spécifiques peuvent être parfois ajoutés afin de favoriser la dégradation par cométabolisme de certains composés récalcitrants.

IV-4-2- Applicabilité

Ce procédé est utilisé de préférence dans la zone vadose lorsque celle-ci se compose de matériaux perméables à semi-perméables comme le sable, le gravier, le limon grossier. Les polluants potentiellement concernés par le bioventing sont les COV et les SCOV.

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

IV-4-3- Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages du bioventing sont :

- Technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- Procédé destructif,
- Technique pouvant être employée en soutien du venting classique lorsque ce dernier a atteint ses limites,
- Compétitivité en termes de coût et de performance,
- Fiabilité,
- Applicabilité à de nombreux polluants,
- Application générant peu de perturbation de sols,
- Technologie nécessitant moins de débits d'air que le venting ; les débits d'air à traiter (si nécessaire) sont donc plus faibles ;
- Utilisable préalablement à d'autres traitements de dépollution afin de limiter les émissions de polluants volatils,
- 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.
- 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),
- Un faible taux hydrique dans les sols entrainera une faible biodégradation ?

- Un maillage très serré des puits d'extraction est nécessaire en cas de perméabilité plus faible,
- La présence du toit de la nappe proche de la zone à traiter (<1 m),
- Les sols contenant de l'argile et un taux de matière organique élevé engendrent

IV-5- Biotertre

IV-5-1- 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 ...).

Cette technique est couramment employée sur les sites présentant des hydrocarbures volatils à semi-volatils biodégradable. Le biotertre est très largement utilisé pour les dépollutions on site.

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).

IV-5-2-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.

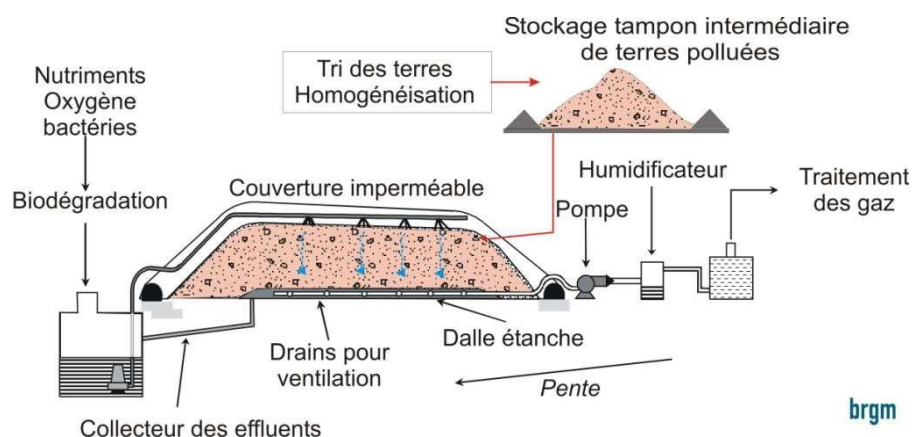


Figure IV.1 : Schéma de principe du biotertre**IV-5-3-Avantages et inconvénients**

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,
- 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 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),

IV-6-Compostage**IV-6-1- 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.

Cette technique est couramment employée sur les sites présentant des hydrocarbures volatils à semi-volatils biodégradables.

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.

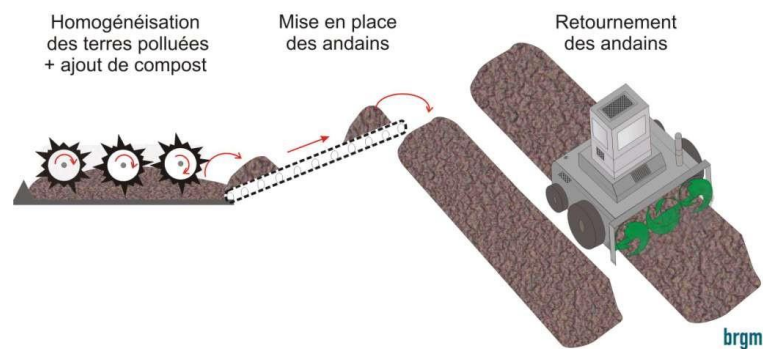


Figure IV.2 : Schéma de principe du compostage

IV-6-2-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...).

IV-6-3- Avantages, inconvénients et facteurs limitants

Les avantages du compostage 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 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,

- Aompétitivité en termes de coût et de performance,
- Applicabilité à de nombreux polluants,
- Possibilité de traiter des contaminants relativement récalcitrants dans d'autres conditions,
- La surface au sol est moins importante que celle nécessaire au landfarming,
- amélioration des qualités physiques des sols (taux de matière organique notamment).

IV-6-4-Les inconvénients et facteurs limitants :

- Technique nécessitant l'excavation des sols,
- Technique nécessitant un prétraitement conséquent,
- Technique de biodégradation plus lente et moins performante que le biotertre,
- 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 devenir des sols excavés doit être examiné avec attention (une fois excavés, les sols pollués sont considérés comme des déchets),
- Le fait de rajouter parfois des agents structurants augmente le volume de sols,
- Le procédé nécessite une surface au sol parfois conséquente,
- 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,

Références bibliographique

- 1- John Pichtel, Fundamentals of Site Remediation: For Metal and Hydrocarbon-Contaminated Soils, 2007.
- 2- Helmut Meuser, Soil Remediation and Rehabilitation, Treatment of Contaminated and Disturbed Land, 2013.
- 3- Rainer Stegmann, Gerd Brunner, Wolfgang Calmano, Gerhard Matz, Soil Treatment of Contaminated Soil, Springer, 2001.
- 4- S. Colombano, A. Saada, V. Guerin, P. Bataillard, G. Bellenfant, S. Beranger, D. Hube, C. Blanc, C. Zornig et I. Girardeau Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts- bénéfiques, Juin 2010, BRGM/RP - 58609 – FR.
- 5-Camille Dutheil, dépollution des sols par extraction sous pression réduite : étude de quelques paramètres, thèse de doctorat, 2003.