

UNIVERSITE MOHAMED KHIDER -BISKRA-
Faculté De Sciences Et De Technologie
Département De Chimie Industrielle

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Sciences et génie de l'environnement

Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

Polycopié de la matière

Traitement des sols pollués

Cours

Fait par : Dr. Nouioua Asma

Maître de conférences « B »



2021-2022

Présentation du module

Domaine : Sciences et technologies

Unité d'enseignement: UEM 2.1

Filière : Sciences et génie de l'environnement

Matière: Traitement des sols pollués

Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

VHS: 22h30 (Cours : 1h30)

Semestre: 3

Crédits : 2 / **Coefficient :** 1

❖ **Objectifs de l'enseignement:**

Les sites pollués par les infiltrations de substances polluantes liées à l'exploitation des installations industrielles constituent un risque pour les eaux de surface et souterraines et pour l'usage des sols comme habitat, cultures ou implantation d'activités. Le but de ce cours est de porter à la connaissance des étudiants les différentes techniques existantes de décontamination des sites pollués par différents composés organiques et minéraux.

❖ **Contenu de la matière:**

CHAPITRE I : LES SOLS PROPRIETES ET FORMATION

CHAPITRE II : CONTAMINATION DES SOLS

CHAPITRE III : TRAITEMENT PHYSICO-CHIMIQUE DU SOL POLLUÉ

CHAPITRE VI : TRAITEMENT THERMIQUE DU SOL POLLUÉ

CHAPITRE V : TRAITEMENT BIOLOGIQUE DU SOL POLLUÉ

❖ **Mode d'évaluation :**

Examen: 100%.

Sommaire

CHAPITRE I : LES SOLS PROPRIETES ET FORMATION

I.1. Définitions.....	01
I.2. Elément constitutifs du sol.....	01
I.3. Formation des sols.....	02
I.4. Caractérisations et propriétés du sol.....	05
I.5. Distinction zone saturée et zone non saturée.....	09
I.6. Classification de sols.....	10

CHAPITRE II : CONTAMINATION DES SOLS

II.1. Définition du sol pollué.....	12
II.2. Sources de contamination.....	12
II.3. Les principaux contaminants des sols.....	13
II.4. Les conséquences de la pollution des sols.....	13
II.5. Gestion de la pollution des sols.....	14
II.6. Réglementation.....	19

CHAPITRE III : TRAITEMENT PHYSICO-CHEMIQUE DU SOL POLLUÉ

III.1. Venting.....	20
III.2. Lavage des sols (lessivage).....	22
III.3. Stripping.....	25
III.4. Stabilisation/solidification.....	27
III.5. Oxydation chimique.....	29
III.6. Réduction chimique.....	32
III.7. Extraction double phase.....	34
III.8. Confinement par couverture et étanchéification.....	37
III.9. Confinement vertical.....	39
III.10. Piège hydraulique.....	42

CHAPITRE VI : TRAITEMENT THERMIQUE DU SOL POLLUÉ

VI.1. Désorption thermique.....	45
VI.2. Incinération.....	48
VI.3. Vitrification.....	51

VI.4. Pyrolyse.....	53
---------------------	----

CHAPITRE V : TRAITEMENT BIOLOGIQUE DU SOL POLLUÉ

V.1. Phytoremédiation.....	56
V.2. Techniques de bioremédiation	58
V.3. Atténuation naturelle contrôlée.....	62
V.4. Bioventing.....	63
V.5. Biotertre.....	66
V.6. Compostage.....	68

CHAPITRE I : LES SOLS PROPRIETES ET FORMATION

Introduction :

Le sol est un milieu vivant, avec ses propres caractéristiques et au fonctionnement complexe, qui occupe une place privilégiée au sein de notre environnement. Au même titre que l'eau, l'air ou la biodiversité, le sol est une ressource naturelle capitale. En effet, elle remplit de nombreuses fonctions, tant d'un point de vue environnemental qu'économique ou socioculturel. Par exemple, le sol fournit de l'eau et des nutriments aux plantes et abrite une grande biodiversité. C'est un support essentiel pour l'agriculture. Il permet aussi de limiter les crues et de filtrer l'eau. Contrairement à l'eau, il doit cependant être considéré comme une ressource naturelle non renouvelable.

1.1. Définitions :

1.1.1. La pédologie :

C'est la science des sols, elle fait partie de géologie qui étudie l'organisation (structure et fonctionnement) des sols, de leurs propriétés, de leur distribution dans l'espace et leur évolution dans le temps.

1.1.2. Le sol

Le sol est la partie vivante de la géosphère constituant la couche la plus extrême de la croûte terrestre. Il résulte de la transformation de la roche-mère sous l'influence de divers processus physico-mécanique, chimique et biologique.

1.2. Eléments constitutifs du sol :

Le sol est un milieu tri-fractionnaire qui comprend

- **Une fraction solide;** sous forme des substances minérales (argiles, limons fins, limons grossiers, sable fins, sable grossiers), des matières organique formées de débris d'origines végétal et animal.
- **Une fraction liquide;** encore appelé solution du sol, elle est formée d'eau et de substance minérales dissoutes (acides organique, sucre, des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , ...).
- **Une fraction gazeuse;** ou atmosphère du sol remplissant les pores composée des mêmes gaz que l'air (O_2 , N_2 , CO_2) ainsi les gaz provenant de la décomposition des matières organiques (H_2 , CH_4 , CO_2).

1.3. Formation du sol :

1.3.1. Les facteurs qui influent sur la formation du sol

De nombreux facteurs interfèrent dans la formation des sols, ce qui explique la grande diversité des types de sols rencontrés. Les facteurs les plus importants entrant en jeu dans la formation d'un sol sont les suivants :

- La nature de la roche mère ou matériau d'origine ; magmatique, sédimentaire, métamorphique.
- Le climat ; température, précipitation.
- La végétation ; les végétaux sont les fournisseurs de la matière organique présent dans le sol.

1.3.2. Comment se forme le sol :

La formation du sol passe par les étapes suivantes :

1.3.2.1. Désagrégation physique :

C'est la fragmentation de la roche mère effectuée selon de divers processus ; gel, lumière, humidification, variation de température, dessiccation, fissuration, pénétration des racines, par l'action corrosive du vent chargé de débris minéraux, par l'action érosive des cours d'eau et de la mer. Ces processus entraînant la formation des cailloux, graviers, sables et limon.

1.3.2.2. Altération chimique :

À travers des différents processus de décomposition ou de transformation des minéraux de la roche mère par : dissolution (lixiviation), hydratation, hydrolyse, oxydation, réduction.

1.3.2.3. Enrichissement en matières organiques :

C'est l'incorporation de la matière organique par la minéralisation de molécules organique et humification. Le sol renferme une grande quantité d'organismes vivants (bactéries, champignons, acariens, vers de terre, limaces, escargots, scarabées, fourmis, larves, taupes, mulots, ...). Ce sont ces organismes qui vont décomposer la matière organique fraîche, libérer ses composés qui vont subir un processus de minéralisation ou d'humification.

a. Minéralisation

Une partie des composés subit un processus de minéralisation en libérant des composés minéraux solubles: sulfates (SO_4^{2-}), phosphates (PO_4^{3-}), ammonium (NH_4^+), nitrates (NO_3^-) ou gazeux: gaz carbonique (CO_2),

b. Humification

Une autre partie donne des molécules nouvelles complexes, de nature colloïdales qui vont constituer l'humus: c'est le processus d'humification. L'humus est composé de plusieurs composés humiques, les principaux sont les acides fulviques, les acides humiques et l'humine. Par la suite les composés humiques qui forment l'humus, vont se minéraliser lentement à leur tour. C'est la minéralisation secondaire: ils se transforment en minéraux solubles ou gazeux.

1.3.2.4. Différenciation des horizons par la migration et les accumulations :

Les horizons se différencient sous l'action des eaux d'infiltration (lessivage). Ce dernier dépend de la pluviométrie, de la perméabilité et la nature de l'humus formé.

1.3.3. Profils pédologiques:

Les migrations ascendantes ou remontées et l'accumulation des différents éléments solubles font évoluer et organiser le sol à plusieurs niveaux, en unités structurales élémentaire sous forme des horizons qui font déterminer le profil d'un sol (Figure I.I).

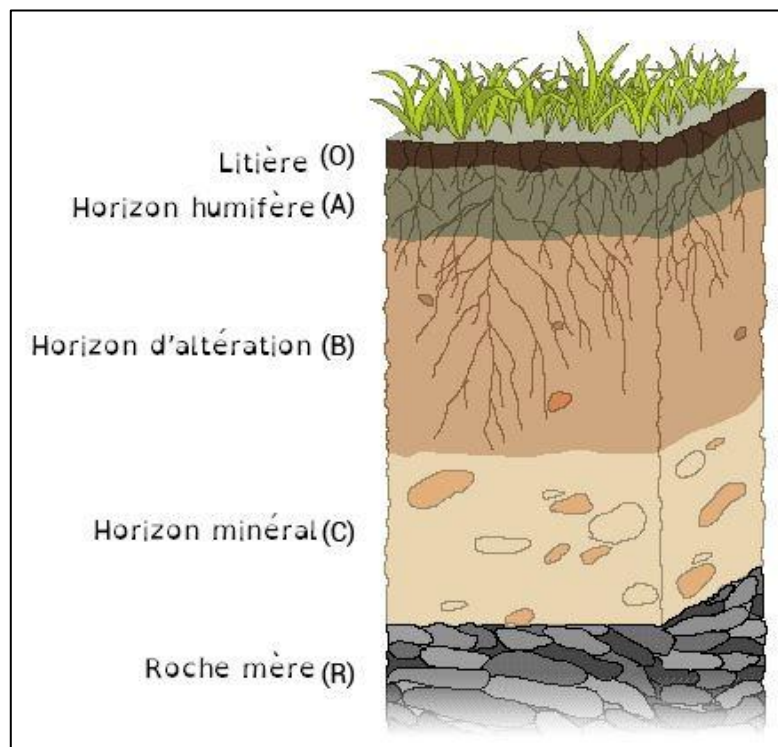


Figure I.I : le profil d'un sol

Les horizons sont des couches parallèles à la surface du sol, d'épaisseur variable et caractérisées par leur nature et par leurs relations.

Selon la nomenclature internationale les horizons sont dénommés par des lettres : O, A, B, etc. (Tableau I.I).

Tableau I.I : Nomenclatures des horizons

Horizon	Identification des horizons
O	Organique
A	Organo-minéral
LA	Organo-minéral labouré
E	Eluvial, appauvri en fer et/ou argile et/ou aluminium, faible structuration
BT	Argilluvial enrichi en fer et/ou argile et/ou aluminium
S	Structural, sans appauvrissement ni enrichissement
S/C	Intermédiaire entre les horizons Set C
C	Minéral de l'altération de la roche mère, conservant en grande partie sa structure lithologique originelle
R	Roche dure
M	Roche meuble
Js	Jeune de surface (présence da MO possible)
Jp	Jeune profond (sans ou avec très peu de MO)
g	Rédoxiques
G	Réductique

On distingue deux groupes d'horizons : les horizons humifères et horizons minéraux.

1.3.3.1. Horizons humifères (O) :

Les horizons humifères ou organique résulte de la transformation en matière organique des débris végétaux qui s'accumulent à la surface du sol.

1.3.3.2. Horizons minéraux:

- **Horizon A** : L'horizon A de couleur foncée, contient à la fois de la matière organique et de la matière minérale. Il est le résultat du travail des organismes vivants dans le sol (vers, insectes).
- **Horizon B** : C'est un horizon enrichi en divers constituants minéraux argileux, en sels, en carbonates, en hydroxydes, ou organiques.
- **Horizon C** : Ils correspondent à la roche mère plus ou moins altérée.
- **Horizon R, M ou D** : C'est la roche mère, on distingue les roches en fonction de leur dureté.
R : roche dures (granites, grès, calcaires)
M: roches meubles et tendres (sables, marnes, ...);
D: roche remaniée ayant donnée naissance ou non au matériau sus-jacent.

1.4. Caractérisations et propriétés du sol

1.4.1. Texture :

La texture désigne la sensation tactile produite par un sol. Elle précise la proportion des particules minérales de différentes tailles qui composent le sol. Elle ne tient pas compte du calcaire et de la matière organique. Elle influence la quantité d'eau, de chaleur et d'aliments qui seront stockée dans le profil pédologique.

La texture d'un sol peut s'apprécier sur le terrain ou être déduite d'une analyse granulométrique (laboratoire). La détermination de la texture permet d'attribuer au matériau observé le nom d'une classe texturale. Les classes de dimensions les plus couramment utilisées pour classer granulométriquement les particules minérale sont les suivantes (**Tableau I.2**):

Tableau I.2 : Classe granulométrique selon la dimension.

Classe granulométrique	Dimension (en μm)
Argile	< 2
Limon fin	2-20
Limon grossier	20-50
Sable fin	50-200
Sable grossier	200-2000

Cette classification est représentée à l'aide d'un triangle, appelé triangle des textures dont les trois côtés correspondent respectivement aux pourcentages de sable, de limon et d'argile (**Figure I.2**).

Il est possible de regrouper les textures en quatre classes fondamentales, qui permettent de définir les principales propriétés du sol :

- **Texture sableuse** : sol bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserve d'eau, pauvre en éléments nutritifs, faible capacité d'échange anionique et cationique.
- **Texture limoneuse** : l'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée de mauvaises propriétés physiques. Cette tendance est corrigée par une teneur suffisante en humus et calcium.
- **Texture argileuse** : sol chimiquement riche, mais à faibles propriétés physiques; milieu imperméable et mal aéré, formant obstacle à la pénétration des racines ; travail du sol difficile, en raison de la forte plasticité (état humide), ou de la compacité (sol sec). Une bonne structure favorisée par l'humification corrige en partie ces propriétés défavorables.
- **Texture équilibrée** : elle correspond à l'optimum, dans la mesure où elle présente la plupart des qualités des trois types précédents, sans en avoir les défauts.

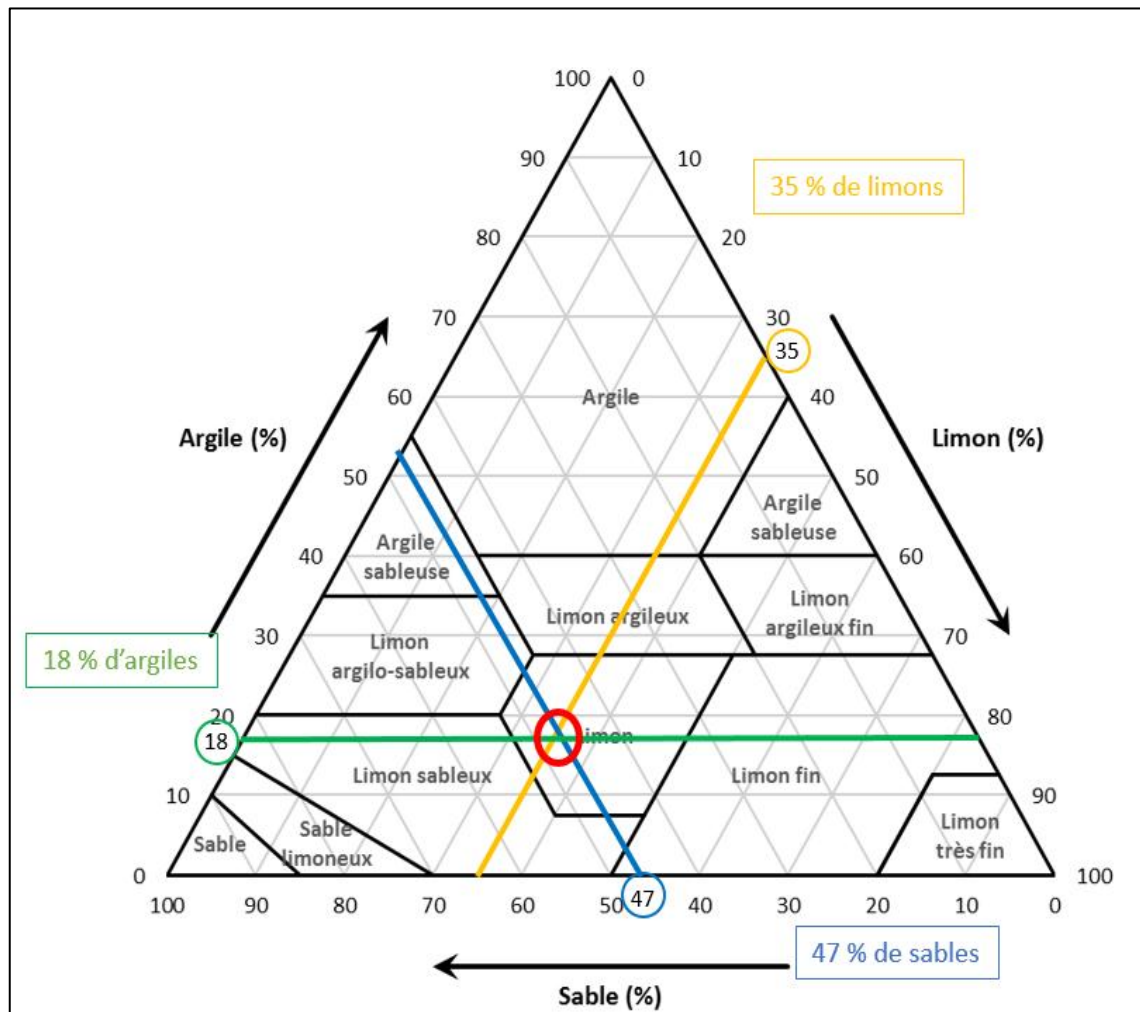


Figure I.2 : Triangle des textures du sol

1.4.2. Structure :

La structure du sol désigne le mode d'assemblage des particules de sol (Figure I.3). Caractériser la structure d'un sol sur le terrain est essentiel. En effet, la structure du sol a un impact direct sur le fonctionnement du couvert végétal (germination, développement racinaire, respiration racinaire...) et, ce qui est aussi lié au développement du végétal, au comportement vis à vis de l'eau (infiltration surtout).

On peut distinguer à la vue ou toucher divers types de structures :

- **Structure élémentaire ou particulaire :**

Éléments sableux de taille variable sans liaison (sol *filtrant*). Les éléments solides sont libre, non associés entre eux comme le sable.

- **Structure en agrégats ou fragmentaire :**

Éléments sableux et silteux liés en agrégats par un ciment argilo-humique, c'est un sol *perméable* assurant une bonne aération. Les constituents solides sont rendus solidaires par le complexe argilo-humique, c'est la structure des meilleures de culture.

- **Structure compacte ou massive :**

Éléments sableux noyés dans une masse d'argile (sol *asphyxiant*). Aucun vide n'existe entre les particules qui forment un bloc.



Figure I.3 : Les différentes structures du sol

1.4.3. Porosité :

La porosité est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique comprise entre 0 et 1 (ou, en pourcentage, entre 0 et 100 %). On la détermine à partir de mesures de la densité apparente d_a et la densité réelle d_r de la phase solide.

$$P = [1 - (d_a/d_r)] 100$$

1.4.4. Perméabilité :

On appelle perméabilité l'aptitude du sol à laisser passer l'eau vers les couches inférieures. Elle dépend de la texture et de structure de sol.

1.4.5. Pouvoir adsorbant :

Le sol retient certains éléments fertilisants, et cette propriété constitue son *pouvoir adsorbant*. Ce sont les colloïdes du sol argile et de l'humus qui possèdent le pouvoir adsorbant le plus élevé, d'où le nom de *complexe adsorbant* donné au complexe argilo-humique (Figure I.4).

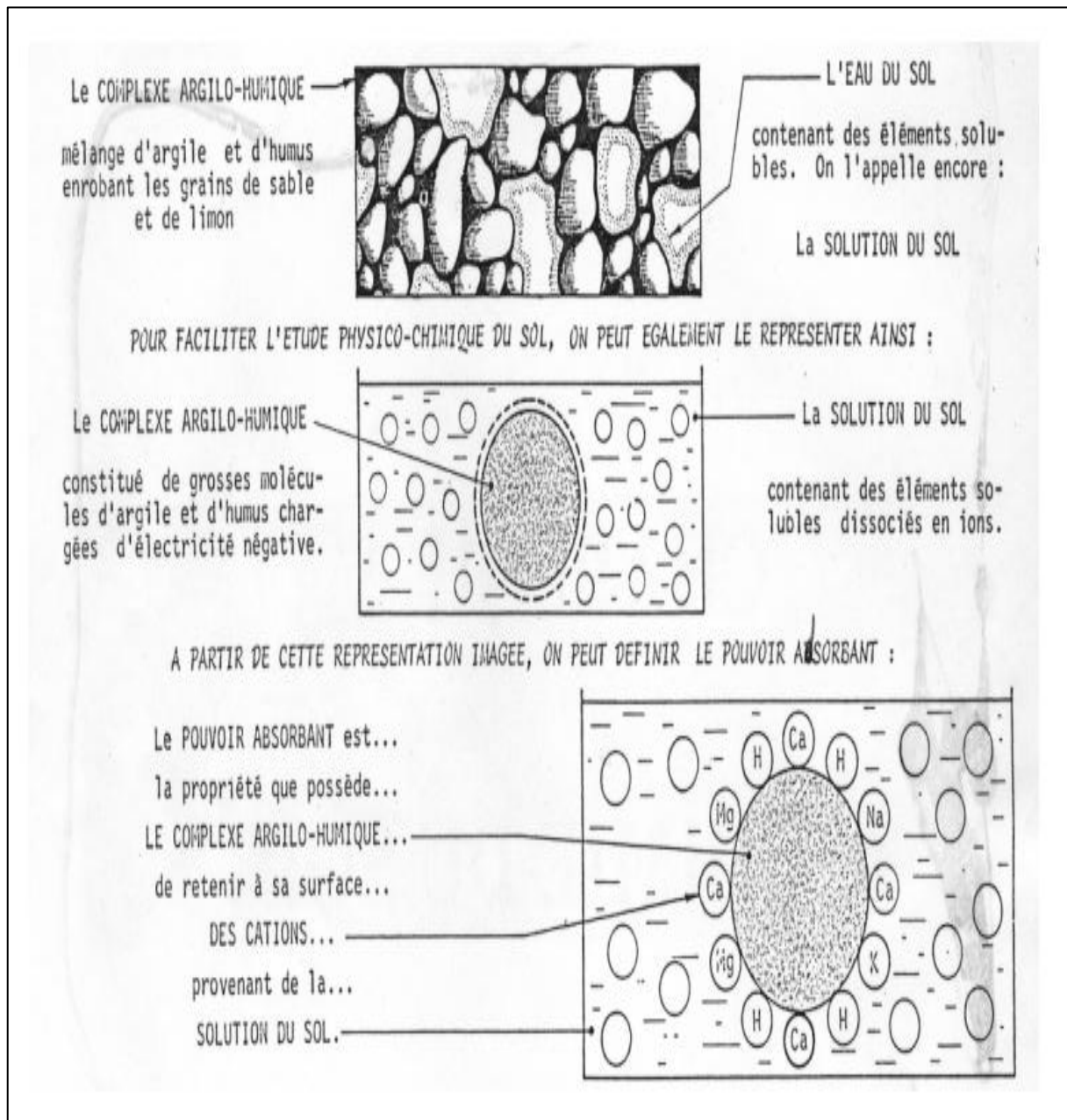


Figure I.4 : Le complexe adsorbant du sol « argilo-humique» (tiré de Soltner D., 1992)

1.4.6. pH:

Cet indice traduisant le degré d'acidité ou basicité du milieu est exprimé par : $\text{pH} = \log (1/ [\text{H}^+])$. Le pH du sol donne une indication de ses propriétés chimiques et de sa fertilité. L'activité des substances chimiques du sol affecte son pH. Certaines plantes ne poussent qu'à une valeur donnée de pH. Les agriculteurs mettent parfois des « additifs » pour changer le pH du sol en fonction de ce qu'ils veulent cultiver. Le pH du sol affecte également le pH des eaux souterraines ou des cours d'eaux et lacs avoisinants.

1.5. Distinction zone saturée et zone non saturée :

Au-dessous de la surface du sol, deux zones peuvent être identifiées de haut en bas (Figure I.5) :

- La zone non saturée, système à trois phases (solide, liquide, gaz) où seule une partie des espaces lacunaires sont remplis d'eau, le reste étant occupé par l'air du sol,
- La zone saturée, système à deux phases (solide, liquide) où tous les pores sont remplis d'eau.

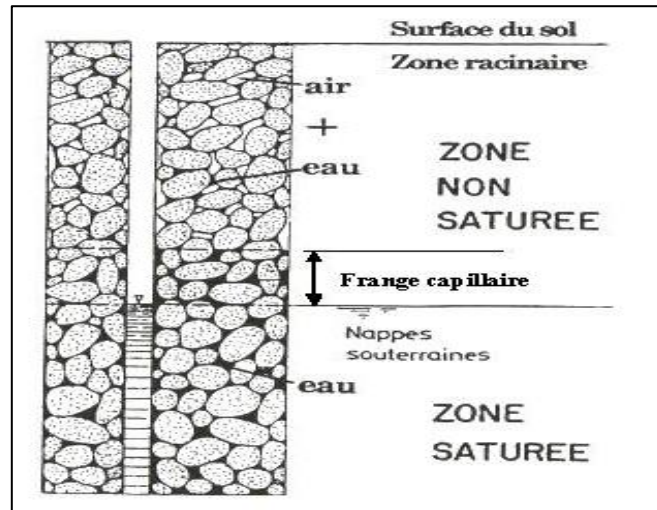


Figure I.5 : Distinction entre la zone non saturée et la zone saturée.

La distinction fondamentale entre la zone saturée et la zone non saturée réside dans le comportement hydrodynamique de l'eau dû à l'effet de l'air et se traduit notamment par une conductivité hydraulique différente. Cependant, les zones saturées et non saturées ne sont pas des domaines séparés, mais font partie d'un système d'écoulement continu.

Pour faciliter l'étude de l'eau souterraine, nous distinguons toutefois :

- L'eau du sol, assimilée à celle se trouvant dans la zone non saturée. La zone de l'eau du sol est le siège des racines des végétaux et constitue surtout une limite supérieure importante des nappes (alimentation, évaporation) ; elle est également le lieu de transit de matières et de substances. Ces processus font partie du continuum sol-plante-atmosphère.
- L'eau du sous-sol correspondant à celle de la nappe. L'infiltration renouvelle l'eau du sous-sol et des réservoirs souterrains et entretient, par son circuit dans les aquifères, le débit de l'écoulement souterrain (débit de base). Celui-ci alimente les sources et les cours d'eau. Le niveau de l'eau souterraine est influencé par le régime de percolation de la pluie ou de l'eau d'irrigation à travers la zone non saturée. L'étude des réservoirs souterrains intéresse

1.6. Classification de sols :

La classification des sols d'après Duchaufour sont:

I) Sols dont la pédogenèse est très liée à l'évolution des matières organiques.
Sols des régions soumises à des climats froids ou tempérés.

Sols peu évolués	Climatiques	Sols désertiques, Sols gelés ou cryosols
	D'érosion	Régosols, lithosols
	D'apport	Sols alluviaux et colluviaux
Sols peu différenciés, humifères, désaturés, avec un profil uniformément coloré par un humus riche en complexes organométalliques rapidement insolubilisés.	Pauvre en alumine, sur roches cristallines	Rankers
	Riche en alumine, sur roches volcaniques	Andosols
Sols calcimagnésiques, caractérisés par un blocage de l'humification, à un stade précoce, par le calcaire actif. Forte incorporation d'humus peu évolué dans le profil.	Humifères	Rendzines
	Peu humifères	Sols bruns calcaires Sols bruns calciques
	Très humifères	Sols humo calcaires Sols lithocalciques humifères
Sols isohumiques, caractérisés par une incorporation profonde, par voie biologique, de matières organiques stabilisées par une maturation climatique prolongée.	À complexe saturé	Chernozems, Sols châtaîns, Sols gris forestiers
	À complexe désaturé	Brunizems
	Sous climat de plus en plus aride	Sols marron Sierozems
Vertisols. Sols à argile gonflante. Incorporation profonde par mouvements vertiques de complexes organominéraux très stables et de couleur foncée.	Foncés	Vertisols
	Colorés	Sols vertiques
Sols brunifiés à profil ABC, caractérisés par un humus de type mull à rotation rapide, peu épais, résultant surtout de l'insolubilisation par le fer libre suffisamment abondant et formant un pont ferrique avec les argiles.	Horizon B d'altération	Sols bruns
	Horizon B d'accumulation d'argile	Sols lessivés
		Sols continentaux ou boréaux
Sols podzoliques. La matière organique est peu évoluée et forme des complexes organominéraux mobiles. Altération par complexolyse dominante. Migration du type chéluviation.	Pas ou peu hydromorphes	Sols podzoliques Podzols
	Hydromorphes (à nappe)	Sols podzoliques Podzols

II) Sols dont la pédogenèse est très liée au climat chaud et humide, mais assez indépendante de l'évolution des matières organiques.

Comportement particulier des sesquioxydes de fer et d'alumine.

Sols fersiallitiques. Évolution des oxydes de fer du type « rubéfaction ». Climats de type méditerranéen et tropical sec.	Rubéfaction incomplète	Sols bruns fersiallitiques
	Rubéfaction complète, complexe saturé ou presque	Sols rouges fersiallitiques
	Désaturation et dégradation partielle du complexe	Sols fersiallitiques acides
Sols ferrugineux. Abondance des oxydes de fer cristallisés (goéthite et hématite). Argile de néoformation dominante (kaolinite)	Altération incomplète	Sols ferrugineux
	Altération complète	Ferrisols
Sols ferrallitiques. Altération complète des minéraux primaires sauf le quartz. Teneur élevée en sesquioxydes. Oxydes de fer et d'alumine cristallisés	Kaolinite dominante	Sols ferrallitiques
	Hydromorphie	Sols ferrallitiques hydromorphes

III) Sols dont la pédogenèse est liée à des conditions locales de station.

Sols hydromorphes. Oxydoréduction du fer liée à la présence permanente ou temporaire d'une nappe.	Oxydoréduction marquée. Sols à nappe	Pseudogley, Stagnogley, Gley
	Oxydoréduction atténuée. Hydromorphie par imbibition capillaire	Pélosols, Planosols
Sols salsodiques. Évolution conditionnée par l'ion sodium.	Forme saline	Sols salins
	Forme sodium échangeable	Sols alcalins

CHAPITRE II : CONTAMINATION DES SOLS

Introduction

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparait en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine.

La pollution des sols est l'une des problématiques d'actualités. Avec son impact direct sur l'environnement et par conséquent, sur la santé des hommes, des animaux et des végétaux, la pollution des sols est un véritable problème qui mobilise autant les pouvoirs politiques que les citoyens.

Dans ce chapitre on va voir de quoi il retourne exactement, quelles peuvent être les causes et les conséquences ainsi les différentes méthodes et techniques de dépollution d'un site contaminé.

II.1. Définition du sol pollué

On dit qu'un **sol est pollué** lorsqu'il contient une **concentration anormale** d'un ou plusieurs polluant(s) ou contaminant(s) susceptibles de causer des altérations biologiques, physiques et chimiques.

Il existe deux formes de pollution des sols :

- La pollution ponctuelle ; elle demeure très localisée et intense
- La pollution diffuse : épandage ou retombée de polluants sur une grande superficie.

II.2. Sources de contamination

Les sources de cette pollution sont naturelles et anthropiques

II.2.1. Sources naturelles

- Le volcanisme
- La chute des météorites
- L'altération de la roche mère
- Les pluies acides
- Les incendies de forêts
- Érosion

11.2.2. Sources anthropiques

Le sol peut être pollué de nombreuses façons :

- Infiltration d'une décharge de déchets industriels.
- épandage de boues d'épuration et de composts d'ordure.
- Percolation de l'eau contaminée.
- Rupture de réservoirs de stockage souterrains.
- Une application excessive de pesticides, d'herbicides ou d'engrais.

11.3. Principaux contaminants des sols

Les polluants ou facteurs de pollution sont extrêmement nombreux et d'autant plus difficiles à cerner que leur nature, leur intensité et leurs effets sont changeants, dans le temps comme dans l'espace. Parmi les plus répandus, on trouve :

- Les métaux lourds (arsenic, chrome, cuivre, cadmium, mercure, nickel, plomb, zinc...)
- Hydrocarbures ou huiles minérales
- Les Hydrocarbures aromatiques volatils et Les Hydrocarbures halogénés volatils
- Dioxines et furannes
- Les polychlorobiphényles (PCB) et les polychloroterphényles (PCT)
- Les phénols et les chlorophénols
- Les produits phytosanitaires : (pesticides, herbicides).
- les cyanures
- Les substances chimiques à usage militaire et les explosifs ainsi radionucléides
- les polluants pathogènes : bactéries, virus, parasites ;

11.4. Conséquences de la pollution des sols

La pollution des sols peut ;

- Provoquer une réaction en chaîne.
- Altérer la biodiversité des sols,
- Réduire la matière organique du sol et la capacité des sols à agir comme un filtre.
- Contaminer l'eau stockée dans les sols et les eaux souterraines,
- Provoquer un déséquilibre des éléments nutritifs présents dans les sols.
- Nuire à la sécurité alimentaire car elle réduit les rendements et la qualité des cultures.
- Mettre notre santé en danger

II.5. Gestion de la pollution des sols

Avant de mettre en œuvre un traitement, le site doit être mis en sécurité en retirant les substances dangereuses éventuellement encore présentes. De même il faut veiller à éviter l'envol de poussières/particules de sols pollués.

Les techniques se répartissent en 4 classes :

- a. Transfert des contaminants,
- b. Traitements physico-chimiques, thermiques et biologiques,
- c. Atténuation naturelle,
- d. Immobilisation et confinement.

Les traitements peuvent être réalisés in situ, sur site et ex situ. Dans le cas de pollutions étendues, on privilégiera l'excavation suivie du traitement sur site si les surfaces doivent être réutilisées rapidement et la question de l'usage ultime des matériaux doit être posée :

- a. Maintien en place après traitement,
- b. Élimination des matériaux traités,
- c. Réemploi des matériaux décontaminés.

Le phasage de la solution de gestion choisie est le suivant :

▪ Phase I : diagnostiquer la pollution

Identifier et caractériser la pollution (prélèvements, analyses) ;

Définir la source et la cause de la pollution (ponctuelle/chronique, localisée/diffuse) ;

Caractériser le sol (propriétés physico-chimiques (géologie, hydrogéologie) et biologique (micro- et macro-faune, micro-organismes), analyser la diffusion des polluants dans le sol, les eaux de percolation et par ruissellement.

▪ Phase II : évaluer le traitement

Réaliser des essais éventuels en laboratoire (dégradabilité des molécules, tests de lixiviation, bio essais pour l'évaluation de l'écotoxicité) ;

Mettre en œuvre des pilotes in situ à petite échelle.

▪ Phase III : traiter le site et le suivre

Traiter in situ ;

Ou traiter ex situ (hors site ou sur site).

II.5.1. Analyse des sols pollués

II.5.1.1. Mesures initiales

Avant la dépollution proprement dite, on étudie généralement la nature et l'origine de la pollution, de manière à mieux cerner les produits mis en cause, l'établissement d'un périmètre d'investigation puis le volume de terre à traiter :

- Historique du site et des activités qu'il a supportées
- Carottages et étude physico-chimique des polluants rencontrés
- Évaluation en laboratoire et éventuellement in situ de différentes méthodes et processus de dépollution
- Bilan et plan de dépollution

II.5.1.2. Plan générale d'une analyse de sol

a. Echantillonnage

L'échantillonnage est une opération dans laquelle un ensemble est ramené à une quantité finie de matériau homogène dont la composition est représentative de l'ensemble et qui peut être facilement manipulée au laboratoire.

La procédure d'échantillonnage des matériaux en vrac comporte trois opérations :

- L'identification de l'ensemble dont il faut tirer un échantillon ;
- Le prélèvement d'un échantillon brut vraiment représentatif de l'ensemble ;
- La réduction de l'échantillon brut à quelques centaines de grammes d'un échantillon de laboratoire homogène qui sera analysé.

L'opération d'identification comporte plusieurs étapes :

- La définition du site.
- La sélection de l'échantillon.
- La sélection des paramètres de test.
- Le nombre d'échantillons.
- La profondeur.
- La quantité d'échantillon.

b. Conservation des échantillons

Durant le stockage des échantillons, il est indispensable de minimiser tous les causes de pertes liées aux propriétés physico-chimiques des micropolluants recherché au conditionnement et aux conditions des stockages.

- Volatilisation des polluants ayant un point d'ébullition inférieur à 300°C.
- Adsorption des polluants sur les parois des flacons des prélèvements.
- Transformation physique et photochimique.
- Transformation chimique.
- Transformation biologique pour les substances biodégradables.

Pour l'analyse des micros polluants organique, il faut éviter tout flacon en plastique, les composer sont photo sensibles, il est indispensable de ne prendre que du verre brune.

En règle générale les échantillons doivent être conservé une température inférieure a $T = 10^{\circ}\text{C}$ jusqu'à l'analyse et l'abri de la lumière.

Le temps de stockage maximum des échantillons dépend du risque de volatilisation de bio-dégradation et de transformation physico-chimique des contaminants. Il doit être bref que possible afin d'éviter les pertes.

Les échantillons maintenus dans des flacons de verre thématiquement clos il est préconise de ne pas dépasser (04) jours de stockage toute fois cette durée peut être prolongée en cas de congélation des échantillons

c. Préparation des échantillons

Cette étape est souvent la plus longue le plus de source d'erreur elle comprend différent taches précédent l'analyse proprement dit :

- Prétraitement des échantillons : séchage, broyage, tamisage, quartage,... etc.
- Extraction des polluants
- Purification des extraits avant analyse.

d. Analyse instrumentale des échantillons

L'analyse instrumentale a pour objectif d'effectuer une quantification directe par des méthodes spectroscopiques (absorption atomique, ICP/émission optique, ICP/MS) ou une séparation préalable des polluants, généralement par chromatographie ionique, liquide, gazeuse suivie d'une détection quantitative et (ou) de l'identification des polluants.

11.5.2. Dépollution des sols

La dépollution des sols consiste principalement à rendre le sol et le sous-sol d'une zone apte à un nouvel usage industriel ou un usage résidentiel, voire dans les cas extrêmes apte à un retour à la nature ou à un usage agricole, après qu'il eut été pollué par une activité ou un accident industriel.

11.5.2.1. Choix de la méthode de réhabilitation d'un site

Le choix de la technique de dépollution se fait en fonction de plusieurs critères. On peut citer notamment :

- La superficie du site et le volume de terres polluées,

- Le coût des traitements,
- La nature et le degré de pollution du site,
- La stabilité des substances à dépolluer,
- Les objectifs de dépollution.

Il sera aussi guidé par des contraintes techniques. Les contraintes techniques qui seront prises en compte sont les suivantes :

- Technique déjà expérimentée (gain de temps) ;
- Type de pollution (organique, inorganique, mixte) ;
- Volume et surface à traiter (impact sur le coût) ;
- Accessibilité du site (accès des machines) ;
- Type de sol (perméabilité, nature, physico-chimie) ;
- Présence d'une activité humaine ou non sur le site ;
- Délai de traitement – conditionne le choix de la technique ;
- Niveau de dépollution à atteindre.

11.5.2.2 Méthodes de traitement du sol pollué

Le choix d'une méthode particulière de dépollution va dépendre, au préalable, de certains paramètres comme le type de polluant et de la variabilité de son comportement (volatilité, adsorbabilité, polarité...), de la diversité des conditions locales (nature du sol, de la nappe, accessibilité, disponibilité, de surfaces utilisables à proximité, zone urbaine ou non), de voir s'il s'agit d'une pollution récente ou ancienne, de son étendue ou non. En plus, les exigences économiques et administratives sont à préalable, un diagnostic.

En fonction de ces différents aspects, différentes catégories d'actions peuvent être menées (**Figure II.I**) :

a. Confinement

Là où les technologies de traitement peuvent être mises en œuvre pour des raisons techniques ou économiques. Le confinement permet d'isoler la source de pollution en empêchant la propagation des polluants à l'aide de matériaux argileux et/ou synthétique. L'érosion des sols, la percolation de l'eau vers la nappe et le ruissellement sur les terres polluées sont ainsi évités.

b. 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. Cette approche nécessite des techniques de pompage, d'extraction sous vide, de confinement et de lavage. Elle peut mettre en œuvre des biotechnologies (bioremédiation).

c. On situ (Sur 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.

d. Ex situ (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). Le coût est élevé.

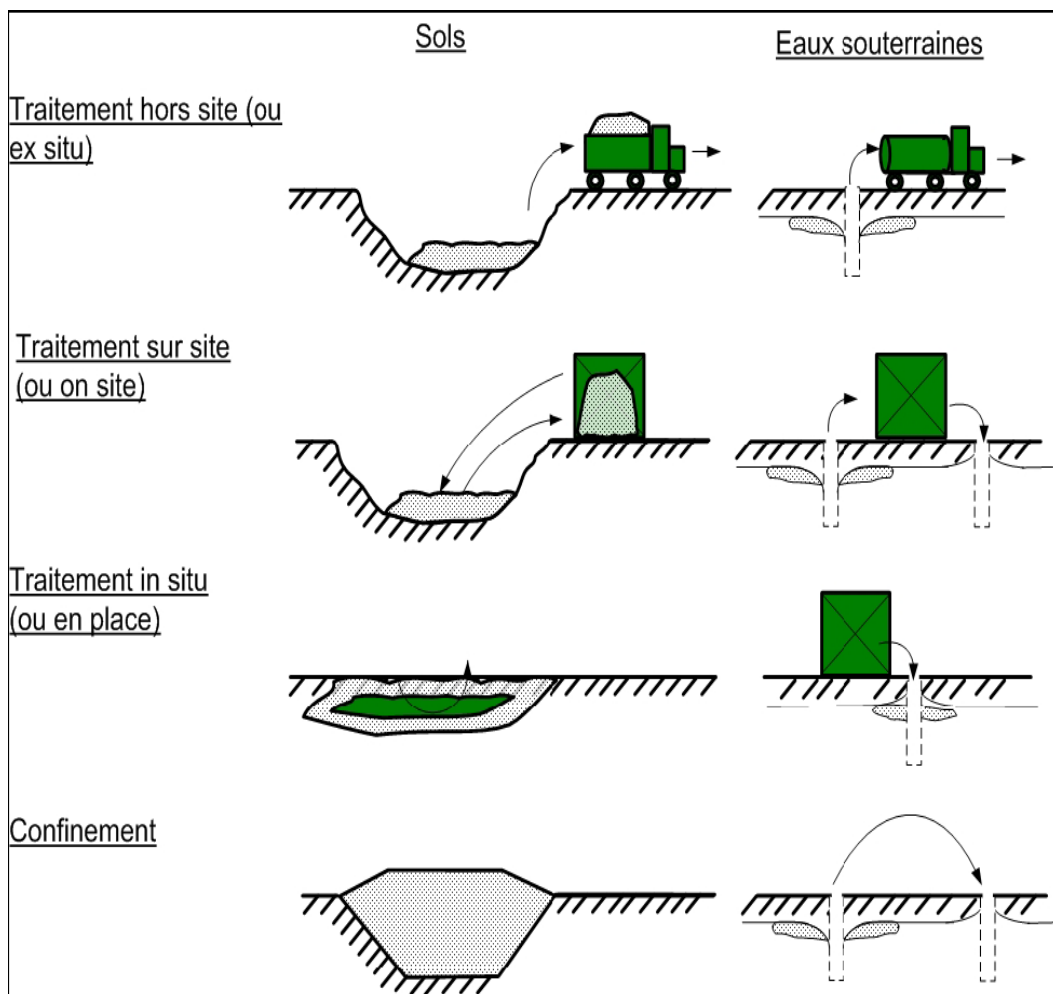


Figure II.I : Techniques de dépollution des sols par lieu de traitement.

11.5.2.3. Techniques de traitement des sols pollués

La dépollution est la dernière étape de la gestion d'un site pollué. Cette dernière phase comprend :

- La fixation d'objectifs de dépollution en fonction de l'usage ultérieure du site.
- L'étude de la faisabilité d'un traitement adapté.
- Le choix de traitement.
- L'évaluation de l'impact résiduel.

Le traitement peut être mise en œuvre en utilisant les techniques suivantes :

- **Techniques physiques** ; par évacuation et/ou piégeage de la pollution.
- **Techniques chimiques** ; qui font appel à un principe réactionnel (action d'un solvant, oxydation...) pour transformer le polluant en un composé moins toxique et inerte vis-à-vis de l'environnement.
- **Techniques thermiques** ; qui consistent à chauffer le matériel contaminé pour en extraire le polluant et le détruire.
- **Techniques biologiques** ; qui favorisent la biodégradabilité des polluants.

II.6. Réglementation

La réglementation mise en place par le Ministère pour assurer la protection des sols permet de concrétiser les trois mesures suivantes :

- **Le maintien de la qualité existante;**
Il est interdit de contaminer des sols en place en y apportant des sols plus contaminés que les sols récepteurs. Il est question ici de sols contaminés par des activités humaines.
- **La décontamination à l'état initial;**
À la suite de tout déversement accidentel de matières dangereuses dans l'environnement, le responsable est dans l'obligation de récupérer dans les plus brefs délais toute la matière dangereuse déversée. Il est également dans l'obligation de récupérer ou traiter toutes les matières (sols, eaux souterraines, etc.) qui auraient été contaminées par ces matières dangereuses, redonnant ainsi au terrain la qualité qu'il avait avant l'événement
- **La caractérisation pré-installation ;**
Cela permet d'établir la qualité d'un terrain avant d'y entreprendre une construction, un ouvrage, une activité ou d'y exécuter des travaux. Elle consiste à prélever des échantillons de sols et d'eau pour déterminer les caractéristiques des sols pouvant être altérés par l'activité. Cela permet de déterminer l'état initial du terrain et ainsi de fixer les objectifs de décontamination à respecter en cas de déversement ou au moment de la cessation d'activité.

CHAPITRE III : TRAITEMENT PHYSICO-CHIMIQUE DU SOL POLLUÉ

Introduction :

La détermination des meilleures techniques de traitement de sols pollués ne fait à ce jour l'objet d'aucune méthodologie particulière. Le choix se fait après un diagnostic approfondi et une analyse de risques, et les critères à retenir sont la faisabilité, l'efficacité et l'évaluation du coût. Ce chapitre est consacré au traitement physico-chimique adapté à la dépollution des sols contaminés.

III.1. Venting

III.1.1. Définition

Le venting est un procédé in situ de décontamination des sols pollués permettant d'extraire les polluants par extraction des gaz du sol. Il est efficace pour les matériaux suffisamment perméables et les polluants volatils comme les COHV (Composés Organiques Halogénés Volatils) ou encore les BTEX (Benzène-Toluène-Ethylbenzène-Xylènes).

III.1.2. Principe

Une partie des composés volatils déversés sur le sol s'évapore jusqu'à saturation de sa porosité. L'autre partie contamine l'eau et la dernière se sorbe sur les particules de sol. A l'équilibre, les composés se partagent entre les phases gazeuse, liquide et solide en fonction des caractéristiques des composés. Pour éliminer ces composés, on injecte de l'air « propre » en périphérie de la zone contaminée et en même temps, une dépression est exercée au niveau de chaque puits d'extraction implanté dans la zone contaminée. Cette circulation d'air permet, d'une part, d'évacuer progressivement l'air « pollué » et, d'autre part, de modifier les équilibres chimiques entre les différentes phases (air, eau, sol), ce qui permet aussi de contribuer à dépolluer les phases solide et liquide.

III.1.3. Description

Le Venting est mis en œuvre à partir (**Figure III.I**) :

- 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 condensats ou dévésiculateur,
- 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.

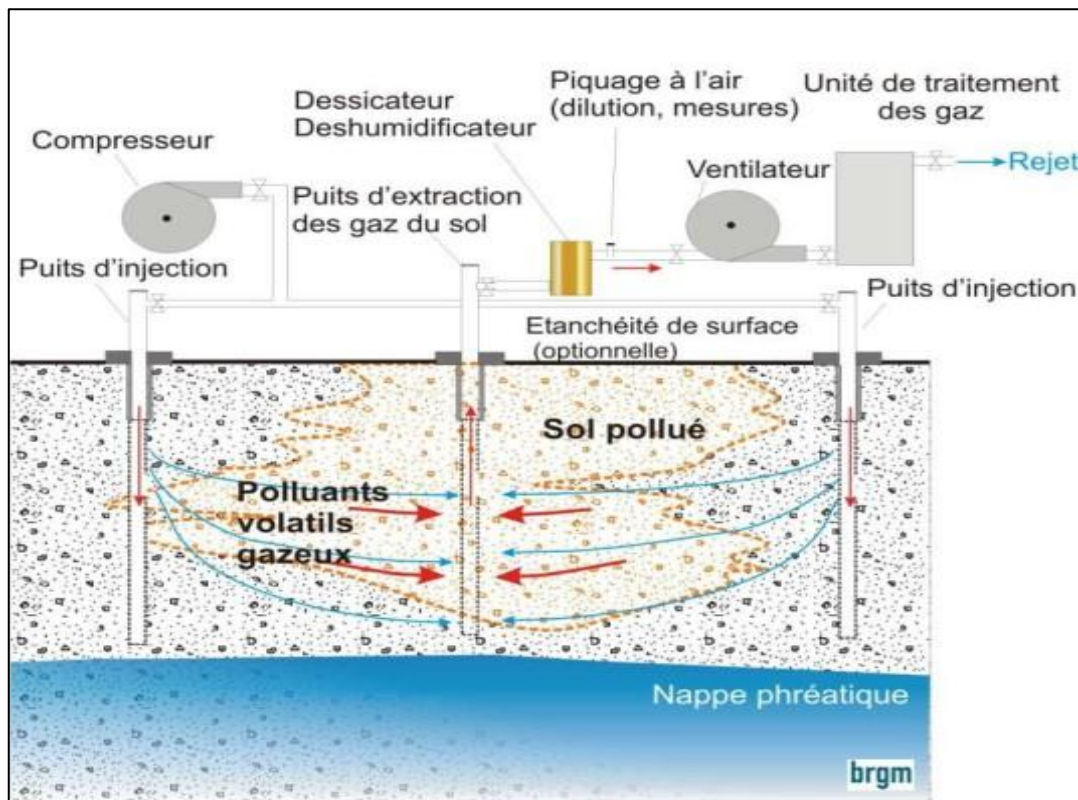


Figure III.I : Venting (BRGM 2010).

III.1.4. Avantages et inconvénients

III.1.4.1. Avantage

- Technique éprouvée et le rendement de dépollution peut dépasser 90%.
- Applicable à de nombreux polluants organiques, peu coûteuse,
- Perturbant peu les sols,
- Applicable sous les bâtiments et à des profondeurs de plusieurs dizaines de mètres.

III.1.4.2. Inconvénients

Le procédé n'est pas destructif,

- Ne fonctionne que pour des sols perméables avec toit de la nappe à 1m de profondeur minimum,
- 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,
- Risque de colmatage avec l'air injecté (précipitation des composés métalliques et CaCO_3 , développement de biofilms microbiens).
- Les émissions atmosphériques nécessitent un traitement d'air (surcoût).

III.2. Lavage des sols (lessivage)

III.2.1. Définition

Le **Lavage à l'eau** est un procédé couramment employé après le tri granulométrique. Les contaminants adsorbés sur les particules fines, préalablement séparés des particules grossières, sont transférés vers la phase aqueuse (ou la solution extractante). Cette solution polluée est par la suite traitée. Afin d'augmenter les transferts des polluants des particules fines vers les eaux, il est couramment fait usage d'ajouts des agents chélatants, d'ajustement de pH, d'ajouts de surfactants (on parle alors de **Mise en solution et extraction chimique**). La mise en œuvre de ce procédé peut être sur site «in situ » ou hors site « ex situ):

III.2.2. Principe

III.2.2.1. Lavage ex situ

Le lavage in situ consiste à faire percoler sur un sol en place une solution permettant d'extraire le polluant. L'eau ou une solution d'agents mobilisateurs peuvent être utilisées comme solution de lavage. Cette technique génère des volumes importants d'effluent à traiter mais elle a déjà été éprouvée sur quelques chantiers pour le traitement de molécules solubles.

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

III.2.2.2. Lavage ex situ

Le lavage ex situ est le lavage du sol par un solvant (le plus souvent de l'eau) après excavation. Cette technique permet le transfert des polluants du sol vers la phase solvant (ou aqueuse) qui sera ensuite traitée. Cependant, c'est un traitement moins onéreux que l'incinération qui trouve des applications pour certaines configurations de sol/polluants.

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

III.2.3. Description :

III.2.3.1. Lavage ex situ

Le Lavage in situ consiste à faire percoler des fluides, le plus souvent de l'eau avec des additifs (ex. agents extractants), dans le sol pour extraire les contaminants par désorption ou solubilisation ; l'injection se fait en amont hydraulique ou au droit de la source de pollution. Un mouvement de fluide est engendré à travers la zone contaminée et le fluide se charge en polluant. Le mélange eau / solution de lavage chargé en polluant est alors pompé. Les contaminants mis en solution dans les fluides sont ensuite recueillis dans des puits peu profonds ou dans des dispositifs de drainage souterrains, puis pompés jusqu'à la surface où ils sont traités. Une fois débarrassés des contaminants qu'ils contiennent, les agents extractants peuvent être recyclés (Figure III.2). 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.

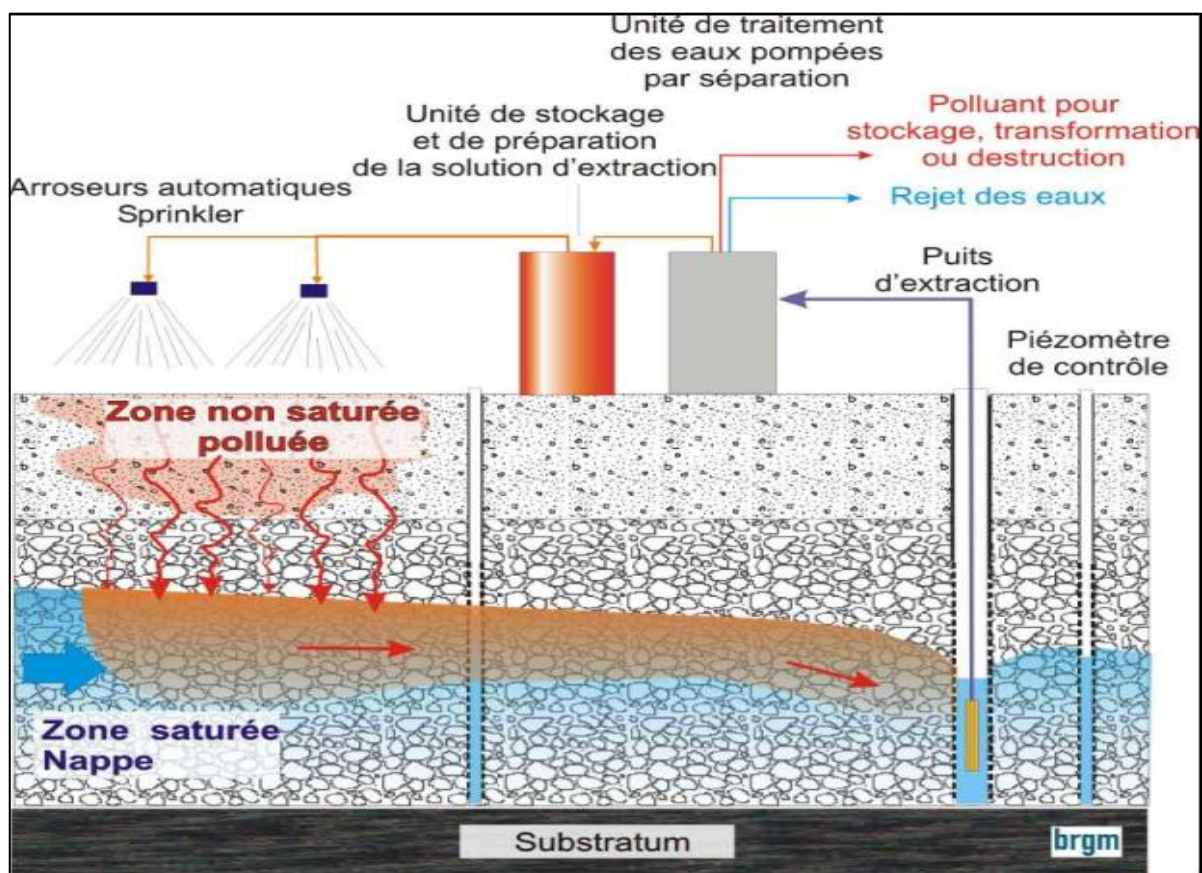


Figure III.2 : Schéma de principe du lavage chimique des sols in situ (injection dans la zone non saturée).

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,
- éventuellement un système de récupération des additifs,
- un stockage des déchets solides et liquides issus du traitement,
- un système piézométrique permettant de suivre les écoulements et la qualité des eaux souterraines.

III.2.3.2. Lavage ex situ

Cette technique est essentiellement issue du traitement de minerais. Le principe repose sur la séparation des particules fines et l'extraction des polluants dans l'eau (Figure III.3):

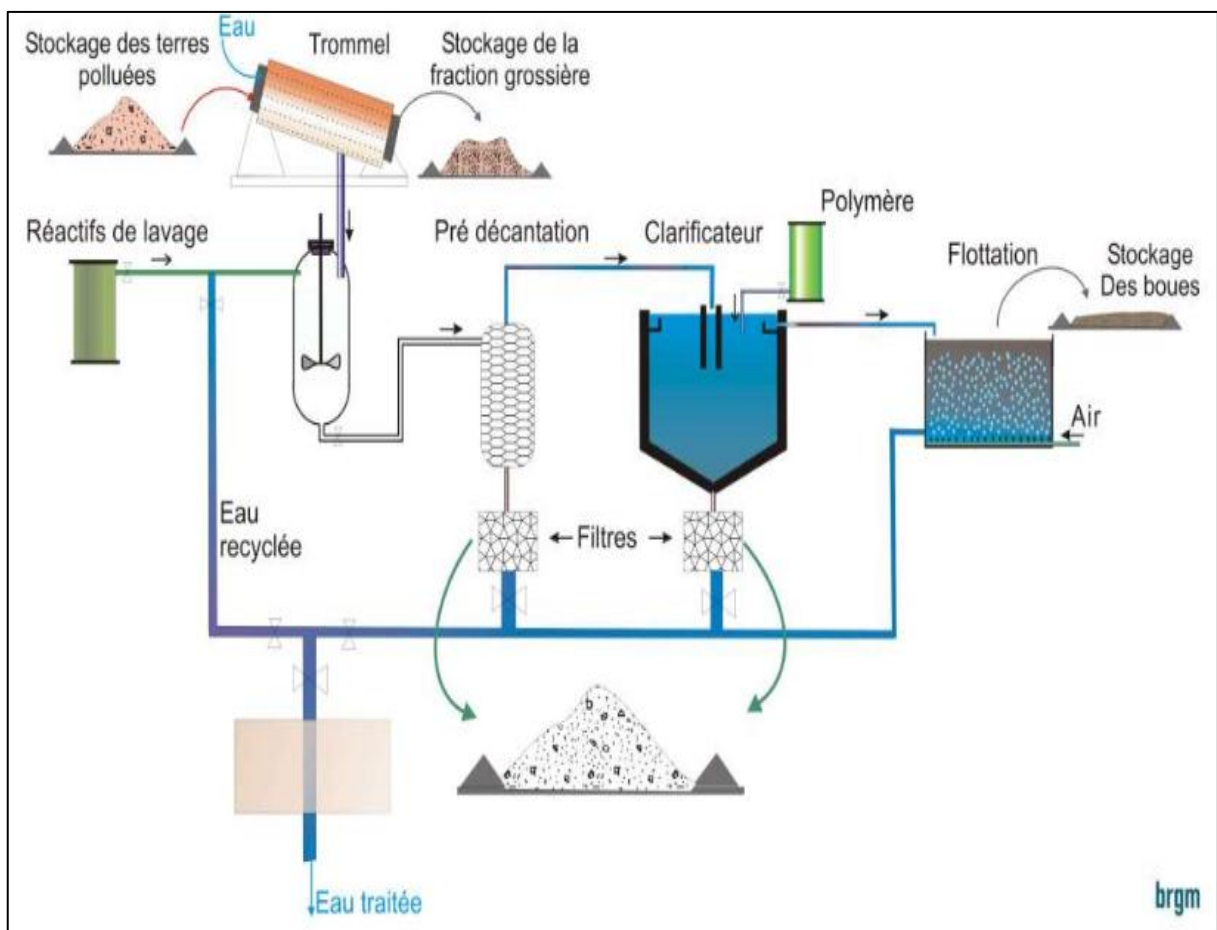


Figure III.3 : Schéma de principe du lavage ex situ.

III.2.4. Avantages et inconvénients

III.2.4.1. Avantages

- 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),

III.2.4.2. Inconvénients

- 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
- 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

III.3. Stripping

III.3.1. Définition

Stripping, désignant le procédé de décontamination d'un sol destiné à éliminer les polluants vaporisables; consiste à créer une circulation d'eau par injection et pompage et à dépolluer cette eau par une mise en phase vapeur des polluants dissous. Les rendements épuratoires de ce procédé sont généralement très élevés (supérieurs à 90%).

III.3.2. Principe

Le stripping est une méthode de traitement physique sur site qui consiste, après pompage, à faire passer les polluants de l'eau en phase vapeur pour ensuite traiter les gaz extraits (**Figure III.4**). Cette technique est adaptée au traitement des polluants organiques volatils.

Les composés suivants sont principalement éliminés lors du stripping des eaux souterraines:

- Composés aromatiques (BTEX); Benzène, Toluène, Ethyl benzène, Xylène
- Volatile chlorinated hydrocarbons ; Chlorure de méthylène, Composés perhalogénés (PER), Tétrachlorométhane, Trichloroéthylène
- Hydrocarbures aliphatiques ; Cyclohexane, Pentane, Hexane

III.3.3. Description

Ce procédé non destructif implique un transfert des polluants organiques dissous dans les eaux souterraines vers l'air (par volatilisation).

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).

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

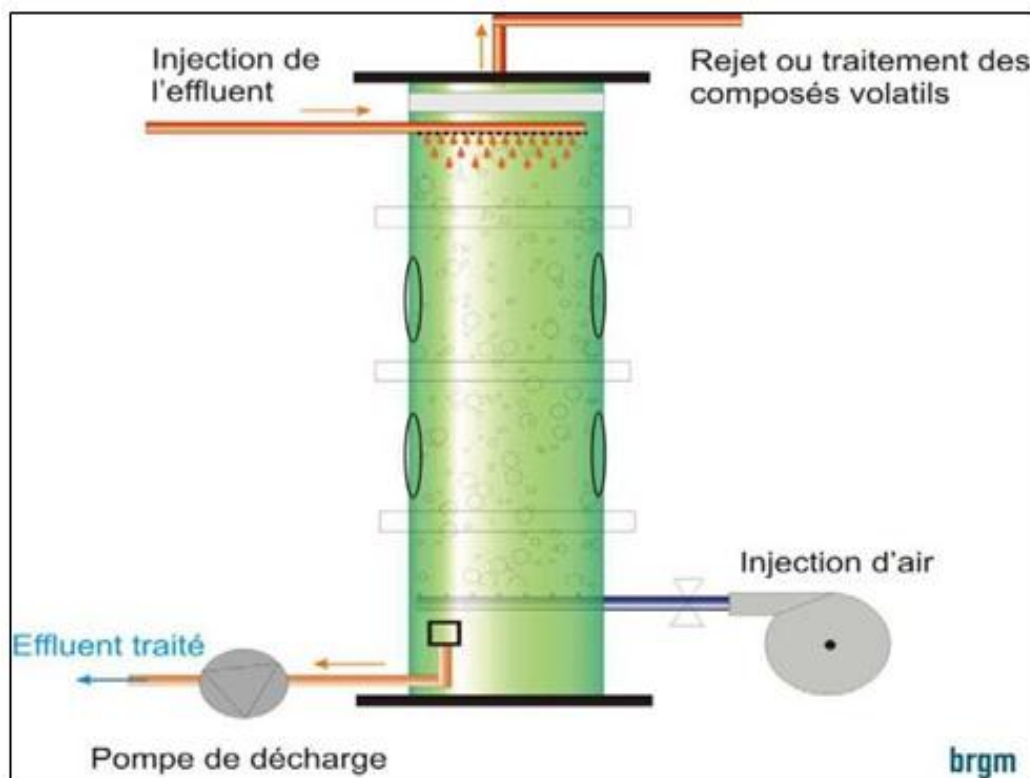


Figure III.4: Schéma de principe du stripping

III.3.4. Avantages et inconvénients

III.3.4.1. Avantages

Les avantages de ce traitement sont :

- procédé non destructif,
- technique très répandue et procédé très bien maîtrisé,
- applicabilité à une vaste plage de concentrations de contaminants dissous.

III.3.4.2. Inconvénients

Ses inconvénients et facteurs limitants sont :

- 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,
- l'air rejeté peut nécessiter un traitement préalable.

III.4. Stabilisation/solidification

III.4.1. Définition

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.

III.4.2. Principe

Les procédés de Solidification-stabilisation sur site ou hors site ont pour but de piéger les polluants afin de réduire leur mobilité par la mise en œuvre de mécanismes physico-chimiques (précipitation, adsorption, neutralisation, complexation, oxydo-réduction, substitution) (**Figure III.5**). Dans tous les cas, les polluants ne sont pas détruits, mais leur impact potentiel sur l'environnement est fortement diminué. La technique de stabilisation physico-chimique s'applique en priorité aux polluants métalliques, tels que le plomb, zinc, cadmium, arsenic, mercure, chrome.

III.4.3. Description

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.

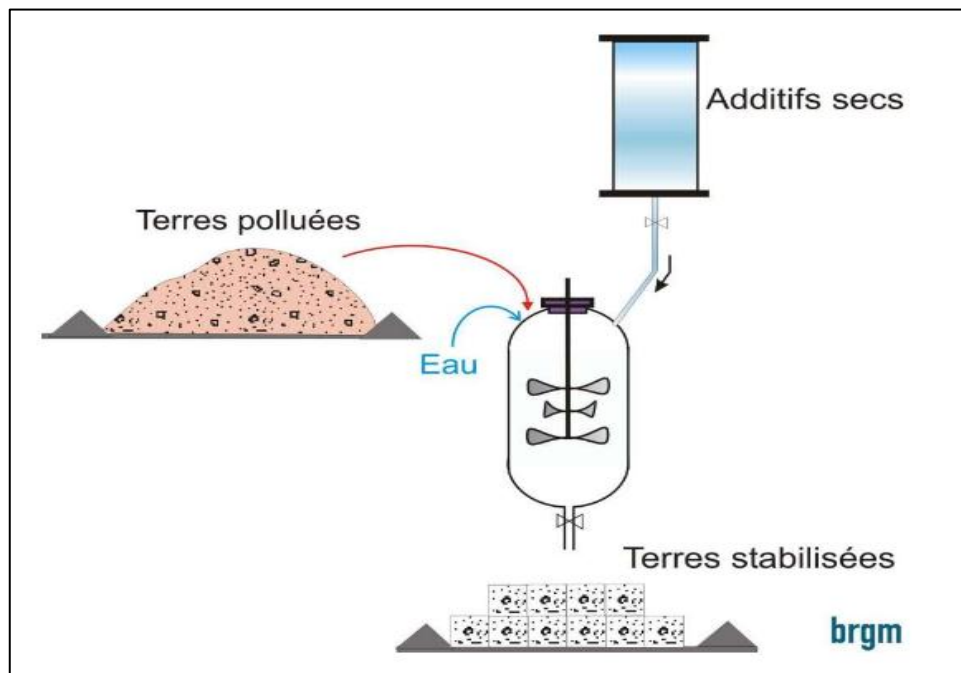


Figure III.5 : Schéma de principe de la solidification, stabilisation on site ou ex situ.

Les moyens matériels nécessaires à la **Solidification-Stabilisation sur site ou hors site** sont les suivants :

- Prétraitement des sols : précriblage ou calibrage, séparation magnétique, unité de désagrégation ou compacteur, criblage, tamisage...
- Bandes transporteuses pour le convoyage des matériaux,
- Centrale de préparation : silos de stockage, malaxeur de reprise, cuve avec agitateur, réservoirs de réactifs,
- Malaxeurs,
- Pompe d'injection avec automate et enregistreur des paramètres (pression, volumes, débits, températures, pH ...),
- Zone de stockage temporaire de déchets et de terres en excédent,
- Si nécessaire, en cas de présence de composés organiques volatils, système de captage de contrôle et de traitement des gaz (zéolithes, charbon actif, strippers,...).

III.4.4. Avantages et inconvénients

III.4.4.1. Avantages

Les techniques de solidification-stabilisation présentent les avantages suivants :

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

III.4.4.2. Inconvénients

Leurs inconvénients et facteurs limitants sont les suivants :

- ce procédé ne permet pas de détruire les polluants,
- les sols traités doivent être éliminés ou enfouis, ce qui génère des surcoûts dont il faut tenir compte dès le départ du projet,
- ce procédé s'applique essentiellement sur des matériaux homogènes et perméables,
- le contact entre les polluants et l'adjuvant doit être important pour que le traitement soit efficace.
- pour des contaminations multiples et complexes, il peut être parfois difficile de trouver la bonne formulation,

III.5. L'oxydation chimique *in situ*

III.5.1. Définition :

L'oxydation est une réaction électrochimique, dans laquelle un composé perd un ou plusieurs électrons.

L'oxydant est le composé accepteur d'électron(s), qui devient après réaction un composé réduit.

III.5.2. Principe

L'oxydation chimique *in situ* consiste à injecter un oxydant dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation (**Figure III.6**). Cet oxydant va détruire totalement ou partiellement les polluants. Cette méthode permet donc d'aboutir à la destruction des polluants (aboutissant à la transformation en eau, gaz carbonique et sels) ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus facilement biodégradables ou moins toxiques.

III.5.3. Description

L'Oxydation chimique *in situ* peut être appliquée dans les zones non saturée et saturée sur un large spectre de polluants organiques même à des concentrations très importantes. Elle s'applique de préférence sur des sols homogènes et relativement perméables. A priori, une perméabilité supérieure à 10^{-5} m/s est souhaitable pour une mise en contact de la solution oxydante avec la zone source.

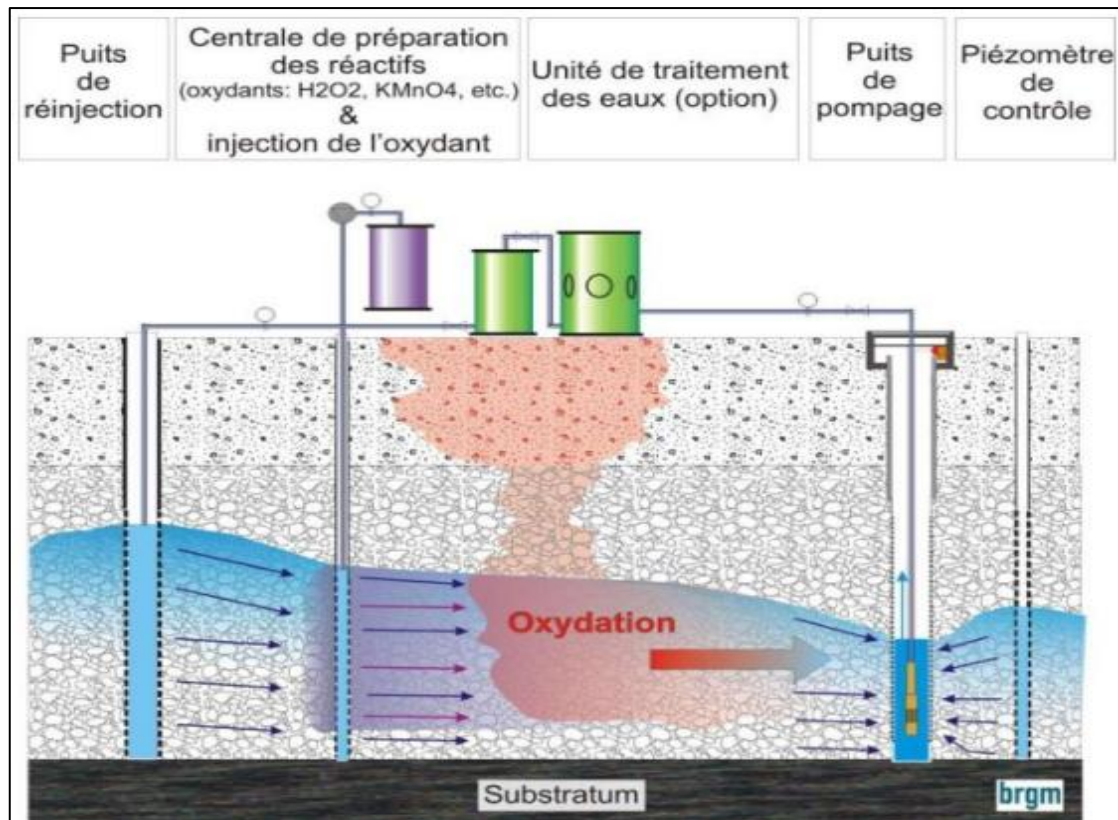


Figure III.6: Oxydation chimique in situ (BRGM2010).

III.5.3.1. Choix de l'oxydant

Les oxydants les plus couramment utilisés sont l'ozone, le peroxyde d'hydrogène, l'hypochlorite, le chlore et le dioxyde de chlore (il s'agit donc d'oxydants liquides et gazeux). Le choix de l'oxydant dépend de la géologie, de l'hydrogéologie, de la géochimie du site et de la nature de la pollution. Les oxydants sont principalement utilisés sous forme liquide (permanganate, persulfate de Na, peroxyde d' H_2 , etc) sauf cas de l'ozone.

Les oxydants les plus puissants ont les caractéristiques suivantes :

- Temps de $\frac{1}{2}$ vie et donc rémanence plus faible,
- Rayon d'action plus faible,
- Spectre de polluants oxydables plus faible.

III.5.3.2. Modes d'injection

Il existe trois modes d'injection :

- Oxydants liquides : procédé proche du lavage *in situ*,
- Oxydants gazeux : procédé proche du sparging/venting,
- Malaxage *in situ* : procédé proche de la solidification/stabilisation *in situ*, adapté aux sols moins perméables et moins hétérogènes.

III.5.3.3. Matériels nécessaires

Les moyens matériels nécessaires à l'Oxydation chimique *in situ* (par injection « classique » avec des oxydants liquides) sont les suivants :

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

III.5.4. Avantages et inconvénients :

III.5.4.1. Avantage :

- Procédé destructif adapté à un large spectre de polluants,
- Réactions rapides,
- Oxydation pouvant être complète,

5.4.2. Inconvénients :

- Risque de transfert des contaminants et des oxydants dans les eaux souterraines.
- Risque d'altération des propriétés physique, chimique et biologique du sol.
- Sous-produits parfois plus toxiques que le polluant initial si oxydation incomplète.
- Solutions oxydantes parfois toxiques pour l'environnement,
- Oxydants peu sélectifs (n'oxydent pas que le polluant).
- Traitement des effluents souvent requise,

III.6. Réduction chimique in situ

III.6.1. Définition

La réduction est une réaction électrochimique, dans laquelle un composé gagne un ou plusieurs électrons. Le réducteur est le composé donneur d'électron(s), qui devient après réaction un composé oxydé.

III.6.2. Principe

La réduction chimique in situ consiste à injecter un réducteur dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation (**Figure III.7**). Ce réducteur est utilisé dans le but :

- soit de détruire totalement ou partiellement des polluants organiques (destruction aboutissant à la minéralisation totale des polluants ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables),
- soit de réduire les polluants inorganiques afin de les stabiliser ou de les rendre moins toxiques.

Cette technique peut être utilisée pour les composés fortement chlorés (PCB, pesticides ...). Des réactions de réductions sont aussi employées pour la transformation de Cr(VI) en Cr(III).

III.6.3. Description

Les traitements durent en général entre quelques semaines à quelques mois. La dégradation des polluants par oxydation / réduction est basée sur une réaction rapide mais peu stable dans le temps. Selon les caractéristiques du sol, le traitement peut être plus ou moins long et nécessiter plusieurs campagnes d'injection de réactif ce qui peut rallonger de façon significative sa durée.

Les performances de l'opération sont étroitement liées au mode d'application, aux caractéristiques de la source de pollution (hétérogénéité...) ainsi qu'aux contextes géologiques et hydrogéologiques (perméabilité, hétérogénéité...). D'une manière générale, dans des bonnes conditions, les rendements épuratoires peuvent varier entre 70 et 95%.

Les réducteurs les plus couramment utilisés sont le Fe⁰ (sous forme de micro ou nanoparticules) associé parfois avec d'autres composés (Zn, compost ou HRC pour le couplage avec la biodégradation...).

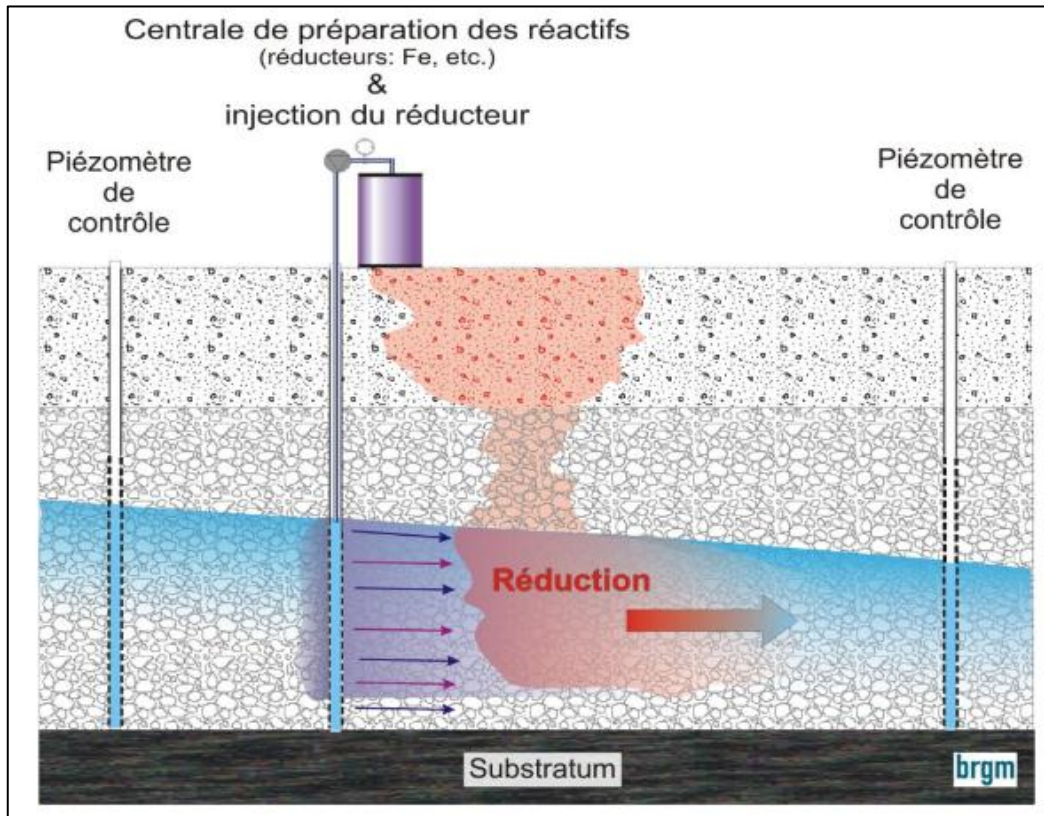


Figure III.7 : Schéma de principe de la réduction chimique in situ (injection).

III.6.4. Avantages et inconvénients :

III.6.4.1. Avantages

La réduction chimique in situ présente les avantages suivants :

- procédé destructif dans le cas des polluants organiques ;
- dans le cas des polluants inorganiques, les métaux/métalloïdes restent en place (stabilisation),
- les réactions sont rapides,
- la réduction peut être complète (minéralisation totale),

6.4.2. Inconvénients

Ses inconvénients et ses facteurs limitants sont les suivants :

- il existe une possibilité de transfert des contaminants et des réducteurs dans les eaux souterraines
- les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol peuvent être altérées
- si la réduction n'est pas totale, les sous-produits de dégradation générés peuvent être parfois plus toxiques que les polluants initiaux
- les réducteurs sont peu sélectifs et réagissent avec de nombreuses espèces réductibles,
- le traitement des effluents est parfois requis,
- des solutions parfois toxiques pour l'environnement sont employées,

III.7. Extraction double phase,

III.7.1. Définition

L'Extraction double phase est un procédé de traitement physique *in situ* qui permet l'extraction des phases liquides et gazeuses des sols. Cette technique est actuellement couramment commercialisée, elle est particulièrement adaptée et utilisée pour la récupération du surnageant dans les milieux moyennement perméables. Les rendements épuratoires peuvent atteindre dans les meilleures conditions 95 %. Son efficacité dépend énormément des caractéristiques du sol et de la profondeur de la pollution.

III.7.2. Principe

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.

III.7.3. Description

Le système d'extraction double phase 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 sur site puis traités avant rejet.

L'Extraction double phase est mise en place à partir de :

- 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 condensats ou dévésiculeur,
- d'une unité d'extraction,
- d'un système de traitement des eaux usées on site muni :

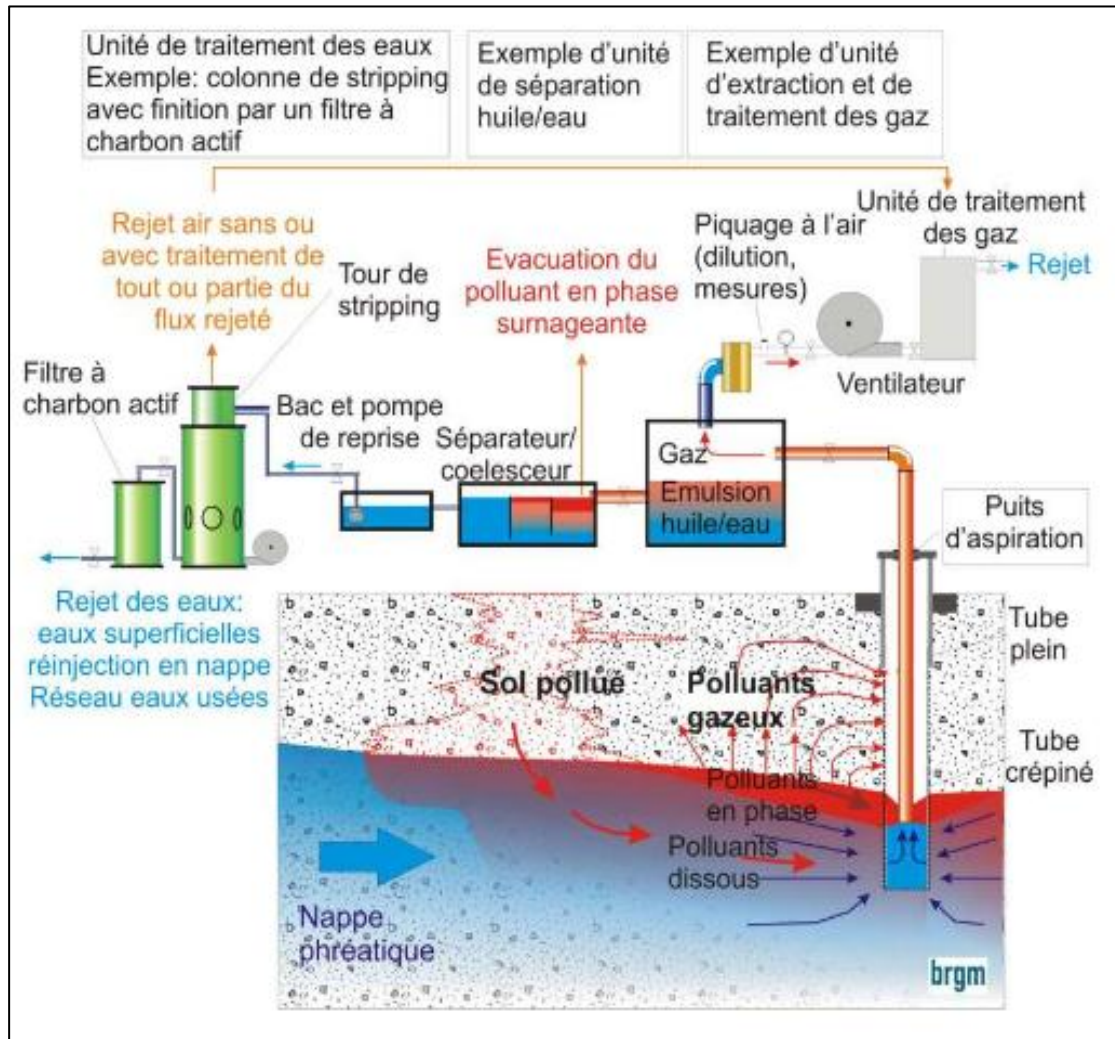


Figure III.8: Schéma de principe de l'extraction double phase (réseau unitaire).

Il existe deux types d'extraction en fonction de la position d'une canne rigide pleine placée au sein de l'aiguille d'extraction :

- le **réseau unitaire** : l'extrémité de la canne est placée au niveau de l'interface zone saturée/zone non saturée ; le surnageant, les eaux souterraines, les gaz sont pompés en même temps ; les liquides et les gaz sont alors séparés au niveau de la cuve à vide. Cette technique est souvent appliquée pour les sols peu perméables ;
- le **réseau séparé** : la canne d'extraction est placée sous le niveau piézométrique (dynamique) et assure le pompage des eaux et du surnageant ; les gaz sont pompés séparément grâce à la mise en dépression du puits.

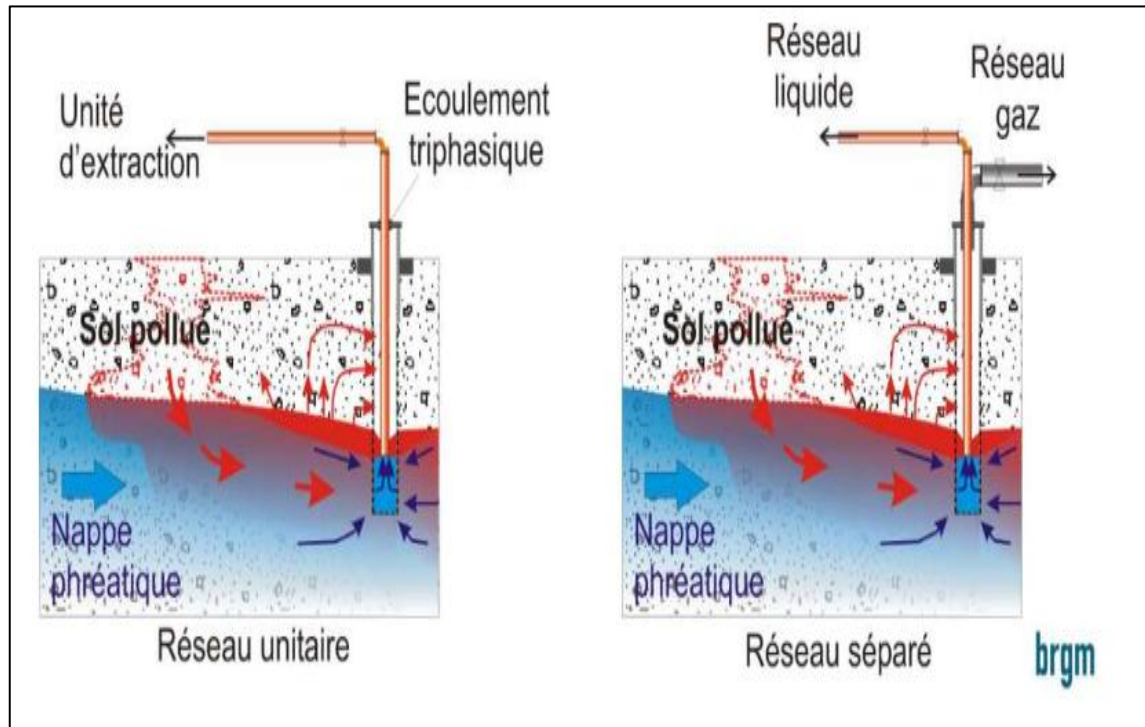


Figure III.9: Schéma de principe des réseaux unitaire et séparé de l'extraction double phase.

III.7.4. Avantages et inconvénients

III.7.4.1. Avantages

L'Extraction double phase présente les avantages suivants :

- technique fiable, simple, rapide et éprouvée,
- peu de perturbation de sols ; la position des puits d'extraction et des crépines permet de cibler précisément les zones à traiter,
- le procédé permet de stopper la migration des polluants en créant des points de fixation de la contamination (confinement hydraulique),

III.7.4.2. Inconvénients

Ses inconvénients et facteurs limitants sont les suivants :

- application uniquement dans le cas d'une nappe peu profonde (profondeur < 7m),
- sans une maîtrise totale du sens d'écoulement des eaux souterraines, il y a un risque de dissémination de la pollution,
- une forte teneur en matière organique est néfaste au processus à cause de la forte adsorption du contaminant sur la matrice solide,

III.8. Confinement par couverture et étanchéification :

III.8.1. Définition :

Une barrière réactive est une tranchée réalisée entre la surface du sol et le substratum, orientée perpendiculairement au sens d'écoulement de la nappe phréatique. Cette tranchée est entièrement remplie par un principe actif de traitement, adapté au type de pollution traité. Le panache de pollution qui passe à travers le principe actif de traitement est dépollué. Les barrières réactives permettent le traitement de nombreux polluants organiques et de certains métaux.

III.8.2. Principe :

Cette méthode consiste à empêcher l'écoulement des eaux hors du lieu contaminé. Elle comporte trois phases :

- Isolement des contaminants de manière durable,
- Contrôle de la pérennité de l'isolement,
- Suivi de l'efficacité des mesures.

Il s'agit d'une part de confiner les sols pollués par la mise en place

- D'une isolation de surface imperméable ou semi-perméable afin d'empêcher (ou de limiter) la percolation des eaux de pluie à travers la zone non saturée, puis l'infiltration des eaux souillées vers les eaux superficielles et souterraines,
- D'une barrière entre la source de pollution et l'homme, la faune, la flore,
- D'une barrière au-dessus de la source de pollution pour éviter l'envol de poussières.

Il s'agit d'autre part de

- Surélever la surface de la zone de sol pollué pour que les ruissellements périphériques ne soient pas en contact avec la zone polluée,
- Limiter les flux de gaz vers l'atmosphère et les habitations (les récupérer),
- Éviter les phénomènes d'érosion de la zone confinée (par exemple en la végétalisant).

III.8.3. Description :

En fonction des enjeux identifiés, l'isolation de surface pourra mettre en jeu différents types de couverture simple ou multicouche (Figure III.10) :

- **La couverture multicouche terreuse :**

D'une perméabilité supérieure ou égale à 10^{-6} m/s, elle est peu performante vis-à-vis des infiltrations d'eau. Elle doit être réservée aux sites ;

- à faible potentiel polluant,

- ou dont le contact direct et/ou l'ingestion doivent être évités,

▪ **La couverture multicouche semi-perméable :**

D'une perméabilité comprise entre 10^{-6} et à 10^{-9} m/s, elle limite moyennement les infiltrations et les émanations de gaz. Elle est employée pour :

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

▪ **La couverture multicouche imperméable :**

D'une perméabilité inférieure ou égale à 10^{-9} m/s, elle limite très fortement les infiltrations et les émanations de gaz. C'est pourquoi, elle s'applique à :

- Des sites à fort potentiel polluant,
- Des sites à environnement vulnérable.

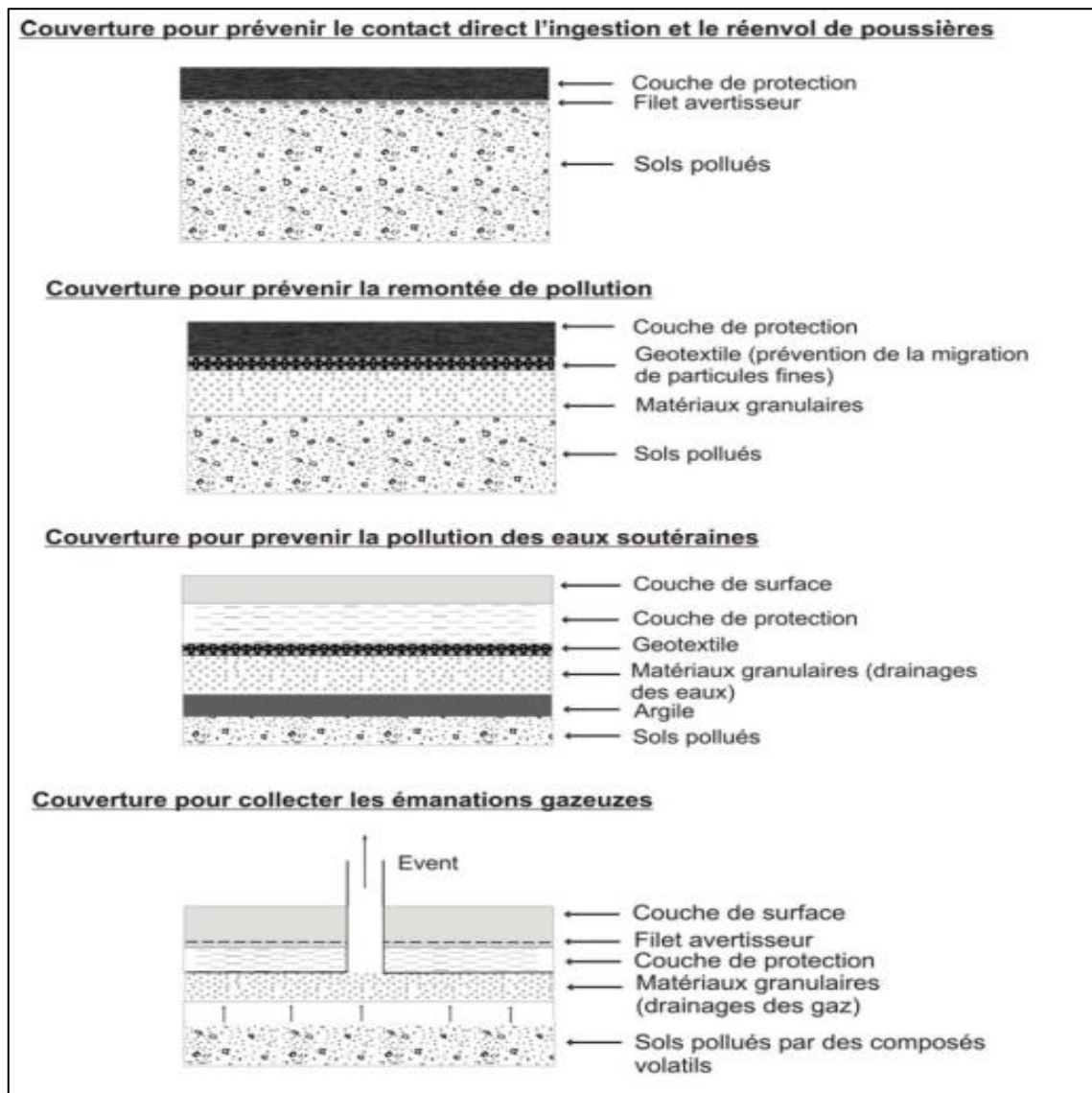


Figure III.10 : Rôle et exemples d'isolations de surface (partiellement adapté et traduit de Nathanail, 2002)

III.8.4. Avantages et inconvénients :

III.8.4.1. Avantage :

Le Confinement par couverture et étanchéification présente les avantages suivants :

- Un traitement qui ne nécessite pas de pompage.
- Adapté à un grand nombre de polluants à de grands volumes de pollution
- Particulièrement bien adapté pour les grands volumes de pollution par des composés inorganiques voire mixte,
- Technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité avec des résultats extrêmement significatifs et peu coûteuse.
- Compétitivité en termes de coût et de performance pour des volumes importants et des composés récalcitrants,
- Il peut être installé pour de nombreuses années avec une maintenance réduite.

III.8.4.2. Inconvénients :

Ses inconvénients et facteurs limitants sont les suivants :

- N'élimine pas la pollution (nécessité de garder la mémoire du site) ;
- Demande un suivi à très long terme
- L'entretien du confinement,
- La couverture permet seulement de limiter les transferts verticaux (eaux pluviales, gaz, contact, réenvols de poussières) mais ne permet pas de contrôler les flux horizontaux,
- Le confinement par couverture et étanchéification nécessite parfois d'autres mesures de confinements complémentaires (confinement vertical, encapsulation, mesures constructives...),
- La mise en place notamment au niveau des soudures doit être irréprochable,
- Il est nécessaire de tenir compte des exigences d'entretien et de suivi dans le temps (servitudes ...),
- étant donné que les confinements existants n'ont que quelques dizaines d'années au plus, il est difficile de prouver l'efficacité du confinement sur le long terme.

III.9. Confinement vertical :

III.9.1. Définition :

Méthode de traitement physique « *In situ* » par piégeage de la pollution. Ce type de traitement peut être appliqué à presque tous les types de pollution COV, COHV, PCB, HAP, métaux/métalloïdes.

Le but du Confinement vertical est multiple :

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

On considère que les confinements, lorsqu'ils sont bien conçus et bien mis en place, sont très efficaces et ne permettent pas de fuites vers l'extérieur (ou très peu). Il a été démontré que les confinements verticaux permettaient de retenir plus de 95 % des flux de pollution.

III.9.2. Principe :

Le confinement consiste à :

- isoler les contaminants de façon à prévenir leur propagation de manière pérenne,
- s'assurer du maintien de cet isolement par des mesures de contrôles rigoureux,
- s'assurer de l'efficacité de cet isolement par des mesures de suivi à long terme.

III.9.3. Description :

Le Confinement vertical peut être réalisé de trois manières différentes (**Figure III.II**):

- **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.

La mise en place de ces différents types de confinement verticaux nécessite des engins de chantiers très spécifiques : excavation à la pelle rétro, excavation à la benne preneuse, excavation à la haveuse de paroi, vibrofonçage, pieux sécants, engins de malaxage, dispositif de levage et de déroutage de membrane, glissière et mat vertical pour l'enfoncement des palplanches, mélange *in situ*, foreuse en ligne, appareillage d'hydrofracking.

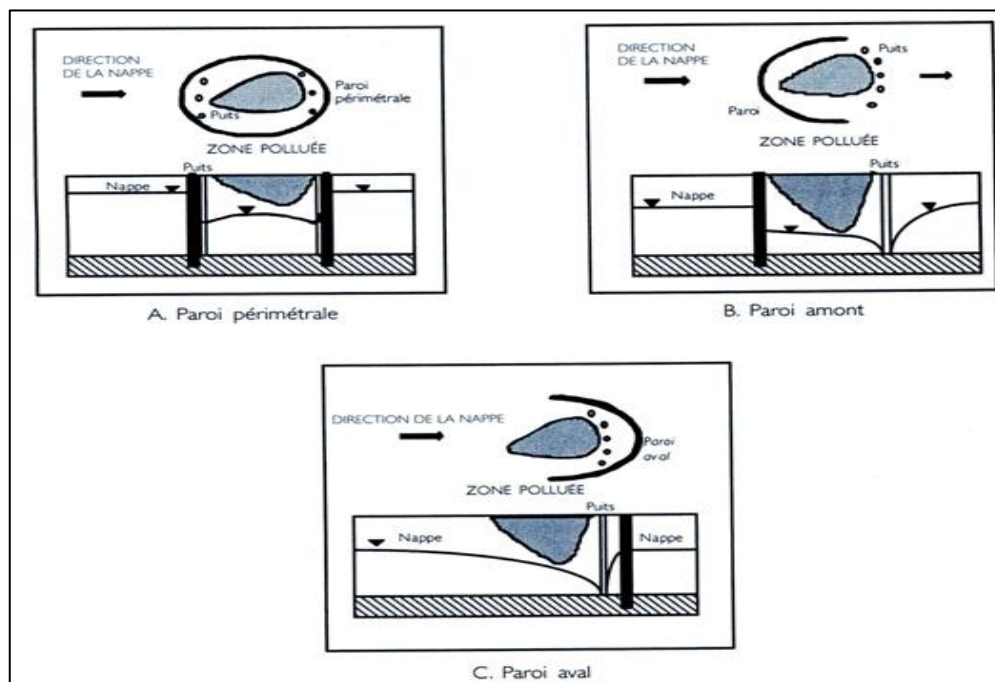


Figure III.II : Exemples de confinements verticaux associés à des pompages (ADEME, 1999).

III.9.4. Avantages et inconvénients :

III.9.4.1. Avantage :

Le Confinement vertical présente les avantages suivants :

- Le procédé permet de confiner un très grand nombre de polluants et il est bien adapté pour des volumes significatifs
- 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,

III.9.4.2. Inconvénients :

Le Confinement vertical permet seulement de limiter les transferts horizontaux mais ne permet pas de contrôler les flux verticaux.

- Les pollutions ne sont pas détruites et restent en place
- 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 et d'entretenir le confinement afin de s'assurer la pérennité de son bon fonctionnement
- Il nécessite souvent d'autres mesures de confinements complémentaires (confinement par couverture et étanchéification, pompage et piège hydraulique, encapsulation, mesures constructives...),

III.10. Piège hydraulique

III.10.1. Définition

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. 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, et certains métaux/métalloïdes.

Le rendement de ce procédé peut atteindre 95 % dépendamment du contexte hydrogéologique (perméabilité, hétérogénéité..), des polluants (solubles ou hydrophobes) et de l'enlèvement de la source de pollution.

III.10.2. Principe

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.

III.10.3. Description

Ce confinement peut être réalisé de manière active (par pompage) ou de manière passive (via des tranchées drainantes) (Figure III.12, III.13).

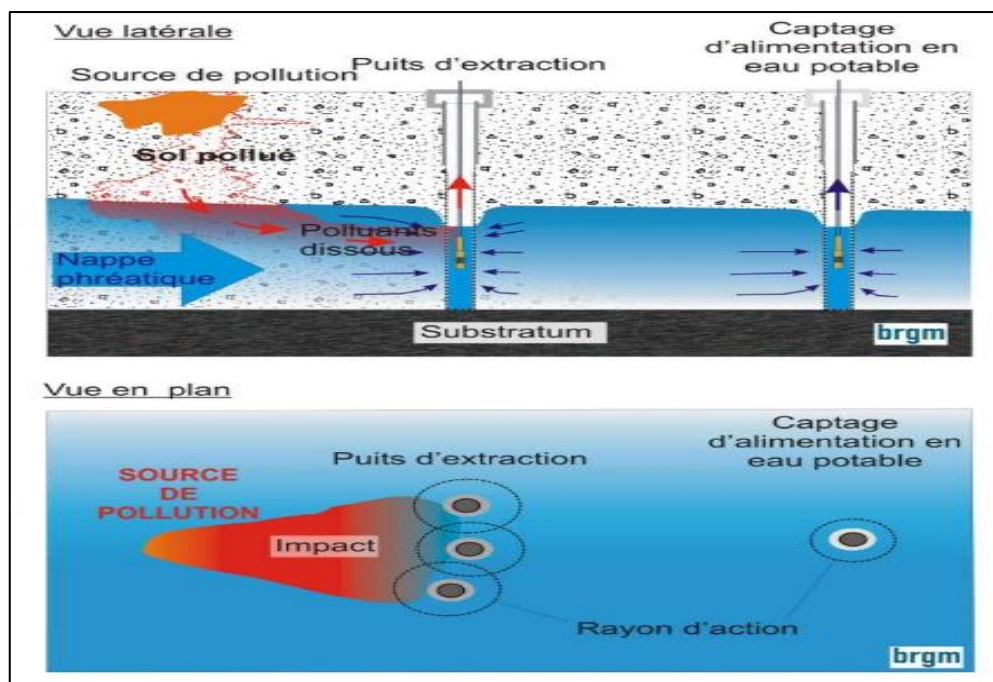


Figure III.12 : Exemple de piège hydraulique actif (pompage).

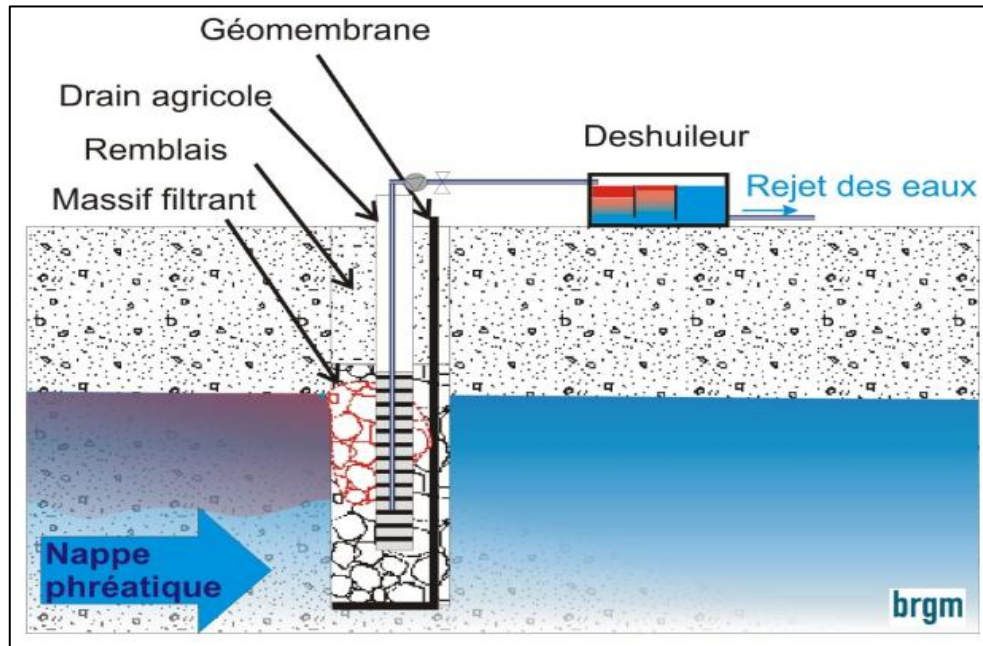


Figure III.I3 : Exemple de piège hydraulique passif (tranchée drainante).

Les moyens matériels nécessaires au **Piège hydraulique** ou confinement hydraulique sont les suivants :

a. Piège hydraulique actif (pompage) :

- Matériel d'extraction : puits verticaux, puits horizontaux, pompes (immergées, de surface ...), tuyauteries, tranchées, galeries d'infiltration, compteur...
- Un système de traitement des eaux usées on site,
- Un stockage des déchets solides et liquides issus du traitement,
- Un système piézométrique permettant de suivre les écoulements et la qualité des eaux souterraines.

b. Piège hydraulique passif (tranchée drainante) :

- Matériel pour la tranchée drainante : matériaux drainants (ballast, gros graviers), drains (agricoles par exemple), pompes (immergées, de surface ...), si nécessaire géomembrane, matériel imperméable,
- Un système de traitement des eaux usées on site,
- Un stockage des déchets solides et liquides issus du traitement,
- Un système piézométrique permettant de suivre les écoulements et la qualité des eaux souterraines.

III.10.4. Avantages et inconvénients

III.10.4.1. Avantages

Le **Piège hydraulique** présente les avantages suivants :

- technique fiable et éprouvée, relativement simple et rapide,
- applicabilité à de nombreux polluants,

- le procédé permet de stopper la migration des polluants en créant des points de fixation de la contamination dissoute,
- la position des piézomètres et des crépines permet de cibler précisément les zones à traiter,

III.10.4.2. Inconvénients

Ses inconvénients et facteurs limitants sont les suivants :

- les pollutions ne sont pas détruites et restent en place
- il est nécessaire de réaliser un suivi à très long terme,
- le traitement ou la réinjection de certains contaminants soulèvent des problèmes de sécurité,
- efficacité limitée dans le cas d'aquifère de faible perméabilité, non homogène et/ou fracturé

CHAPITRE VI : TRAITEMENT THERMIQUE DU SOL POLLUÉ

Introduction

Les traitements thermiques utilisent la chaleur pour dégrader les contaminants présents dans les sols contaminés. Parmi les traitements thermiques existants, on compte la vitrification, la pyrolyse et la thermolyse. Ces procédés ne sont toutefois pas encore assez développés pour que leur utilisation soit préférable à celle de la désorption thermique ou de l'incinération.

VI.1. Désorption thermique,

VI.1.1. Principe

La désorption thermique est une technique de dégradation des molécules des contaminants par l'effet de l'augmentation de la température. Ce procédé est une amélioration apportée au procédé de venting. La désorption thermique est utilisée pour traiter des sols pollués par des hydrocarbures pétroliers, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), pesticides, solvants chlorés.... Donc le sol est chauffé par différents moyens afin d'augmenter la volatilisation des polluants qu'il contient.

VI.1.2. Description

Cette technique est appliquée par l'injection de chaleur dans les sols (in-situ) ou dans un four (ex-situ) afin d'en extraire les contaminants volatils et semi-volatils (principe de volatilisation). Ce principe est applicable de façon ex-situ, une fois les sols contaminés excavés, et in-situ, directement dans la zone de sols contaminés.

VI.1.2.1. Désorption thermique in-situ

Quant à lui, consiste à injecter de la vapeur dans la zone contaminée, à chauffer le sol par résistance électrique (courant électrique), à chauffer par micro-ondes ou encore avec un puits thermique (**Figure VI.I**). Les contaminants, sous forme liquide, sont alors vaporisés et les composés volatils, sont ensuite extraits à l'aide de puits situés à proximité de la tige chauffante. Les vapeurs sont dans un dernier temps traitées par différents moyens.

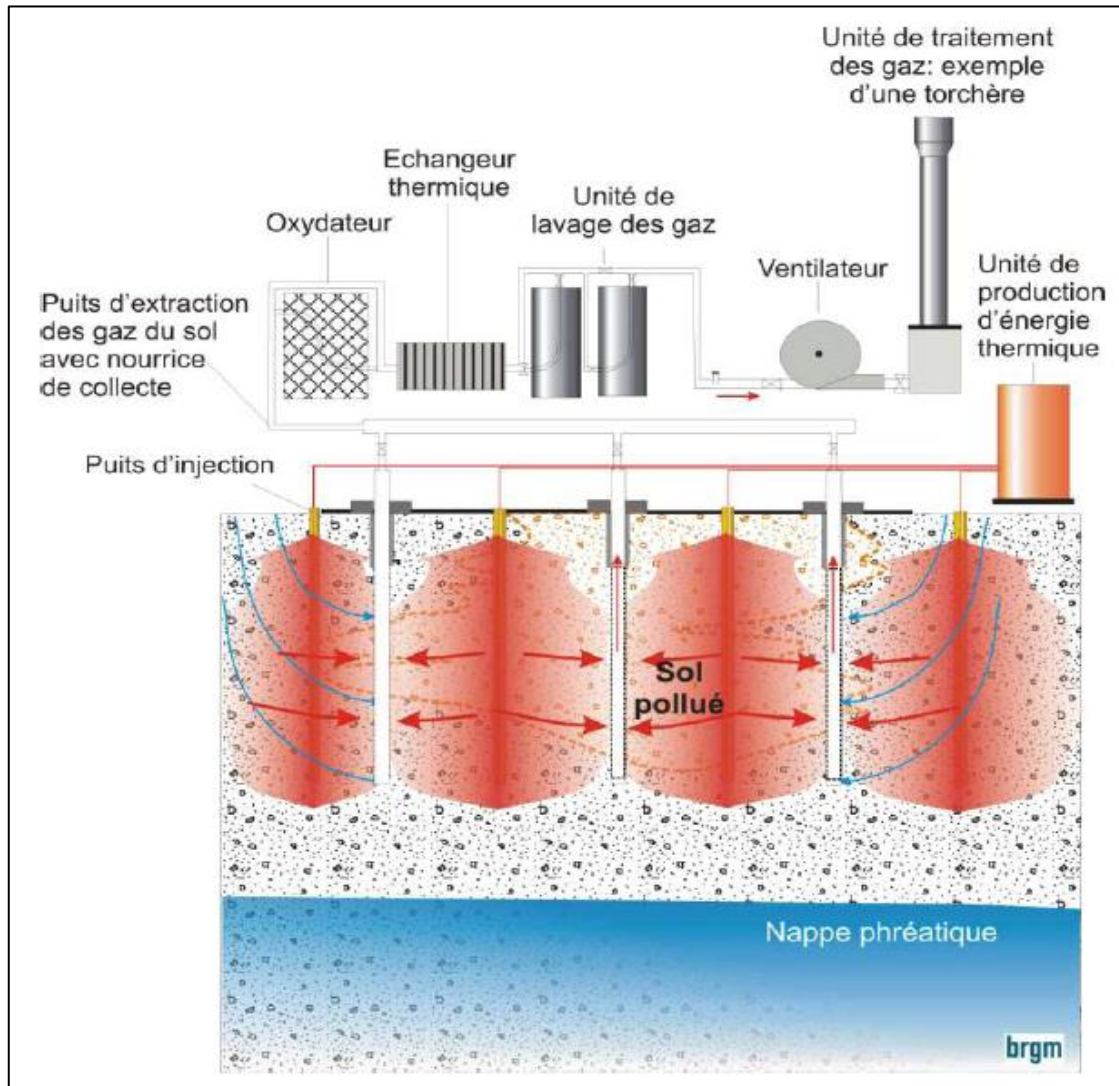


Figure VI.1: Principe de désorption thermique in-situ

VI.1.2.2. Désorption thermique ex-situ

La désorption thermique ex-situ consiste à mettre les sols contaminés dans une unité de désorption (four) qui atteint des températures comprises entre 150 et 540°C. Ceci permet aux contaminants adsorbés aux particules du sol de s'en détacher et favorise la volatilisation des composés qui seront par la suite récupérés sous forme gazeuse. Il existe trois catégories d'unités de désorption thermique, soit l'unité rotative, l'unité à vis ainsi que l'unité à tapis.

- L'unité rotative (Figure VI.2) comprend un réacteur cylindrique dans lequel les sols contaminés sont disposés. Le réacteur entreprend un mouvement circulaire, ce qui permet aux sols d'avancer dans le cylindre. Un brûleur permet d'augmenter la température au niveau requis.

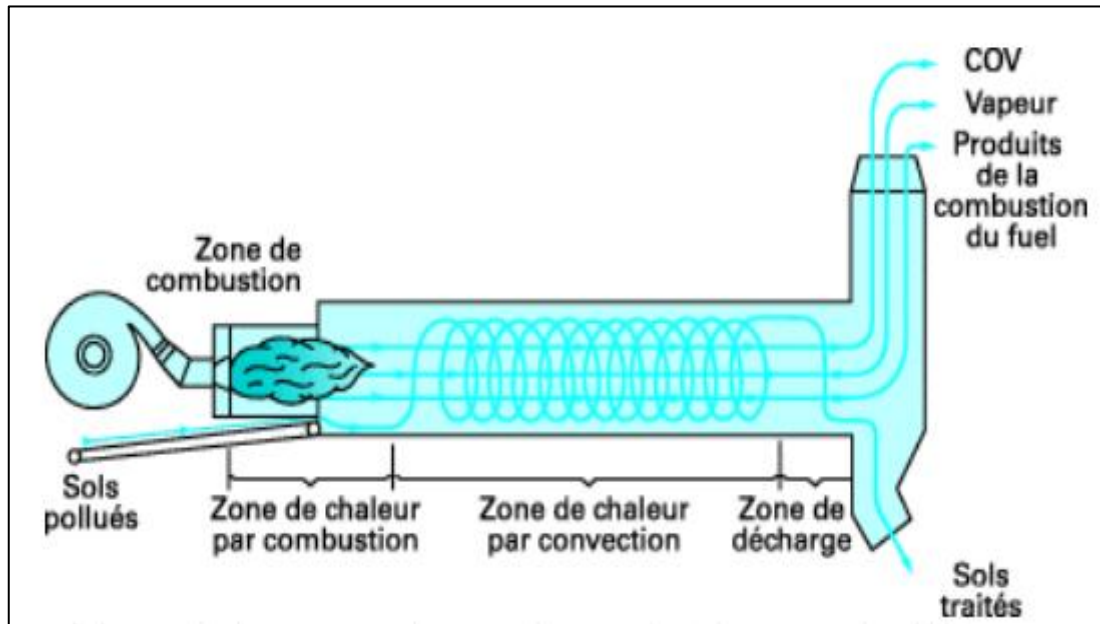


Figure VI.2: Principe de désorption thermique ex-situ (unité rotative) (Tiré de Roudier, 2005)

- L'unité à vis comprend également un réacteur cylindrique, mais les sols avancent grâce à une vis sans fin. La température dans ce système peut atteindre 260°C et traiter de 3 à 15 tonnes l'heure. L'unité à vis crée moins de gaz que l'unité rotative puisque les sols sont chauffés indirectement. Cela permet de baisser les risques d'explosion du système.
- Enfin, l'unité à tapis comprend un tapis souple qui transporte les sols à travers le réacteur. La température atteinte dans ce système atteint les 430°C, permettant de traiter environ 5 à 10 tonnes l'heure. Le choix de l'unité appropriée dépend du type et de l'ampleur de la contamination ainsi que du type de sol.

VI.1.3. Avantages et inconvénients

- La technique de désorption thermique in-situ présente quelques risques au niveau de l'environnement. Toutefois, puisque cette technologie n'est pas encore mise sur le marché, ces informations ne seront pas considérées. La technique ex-situ présente moins de risque pour l'environnement. Toutefois, il peut en résulter des émanations gazeuses nocives si elles ne sont pas traitées.
- L'efficacité du traitement peut dépasser les 95 %, mais l'hétérogénéité des sols, la présence de matière organique et de polluants très peu volatils peuvent influencer le taux d'efficacité. Cette technique éprouvée a démontré une bonne fiabilité et les résultats obtenus sont très positifs.
- L'utilisation d'unités mobiles permet de traiter les sols contaminés sur le site même, ce qui offre la possibilité de réutiliser les sols sur le site après le traitement. Toutefois, plusieurs précautions

doivent être apportées lorsque le procédé de désorption thermique est utilisé. Par exemple, les risques d'incendie et d'explosion sont réels, et donc doivent être considérés sérieusement. De plus, l'émanation des gaz doit être contrôlée afin de ne pas rejeter des contaminants dans l'atmosphère.

VI.2. Incinération

L'incinération est exploitée commercialement depuis de nombreuses années. Constamment développée, elle est aujourd'hui adaptée à une très grande variété de polluants et est très souvent utilisée pour des polluants présents à des concentrations importantes. L'incinération est la technique la plus ancienne et repose sur la combustion des déchets du sol.

VI.2.1. Principe

L'incinération consiste à brûler les sols contaminés dans un four atteignant des températures extrêmes (870 à 1 200°C). Les hautes températures détruisent les polluants ou les volatilisent, ce processus nécessite donc une excavation des sols. Les contaminants ciblés par cette technique sont : les polluants organiques (volatils, semi-volatils, voire peu volatils) à des teneurs très concentrées, hydrocarbures pétroliers, solvants chlorés, huiles, PCB, pesticides, dioxines/furanes, HAP.

VI.2.2. Description

La première étape consiste à excaver les sols, puis à les assécher. Après avoir été tamisés (seules les particules de taille centimétrique sont incinérées), les sols sont acheminés vers le système de chauffage. Généralement, l'incinération se décompose en deux phases :

- Une première chambre dans laquelle les polluants organiques sont désorbés et volatilisés (température > 400°C),
- Une seconde chambre de combustion dans laquelle les polluants organiques sont détruits (température > 1 000°C).

Le sol peut ensuite être réutilisé sur le site. Les émanations gazeuses doivent être récupérées et brûlées à plus de 1 300°C. Le temps du traitement varie en fonction des concentrations du polluant et des propriétés du sol. Quatre techniques sont connues à ce jour, soit les dispositifs à lit fluidisé, les dispositifs à circulation, la technique infrarouge et le four rotatif. Les **Figures VI.4** et **VI.5** présentent deux schémas de systèmes d'incinération.

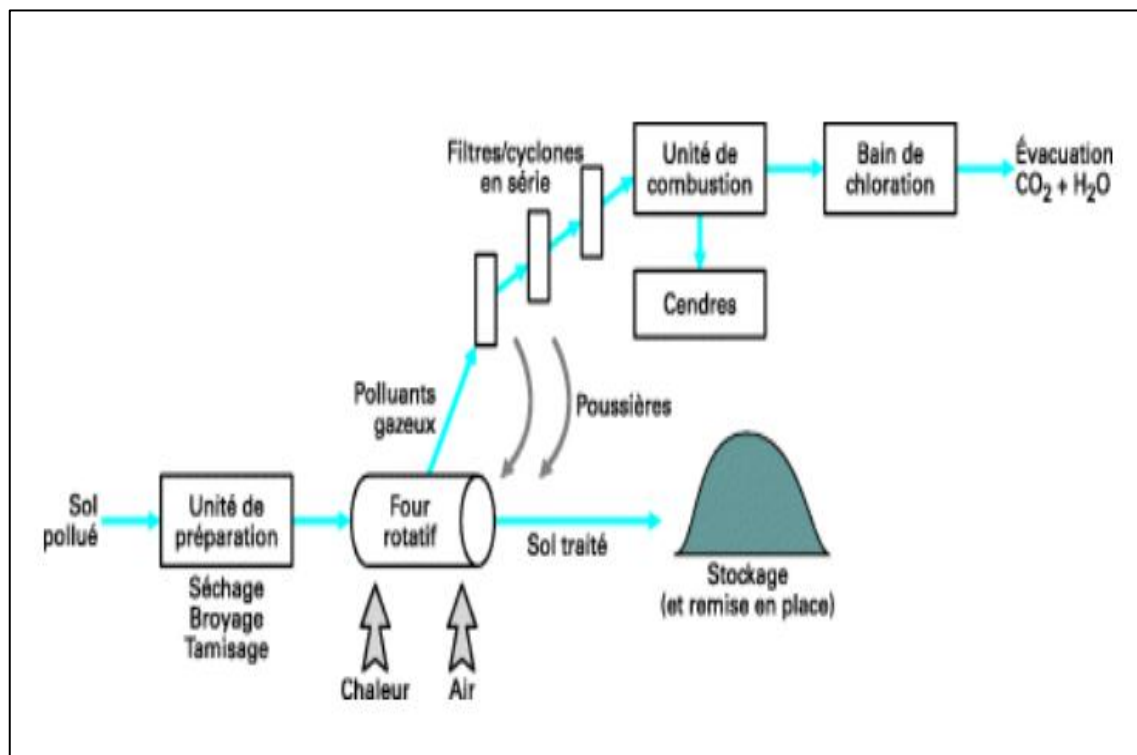


Figure VI.4 : Système d'incinération par four rotatif (tiré de Rodier, 2005)

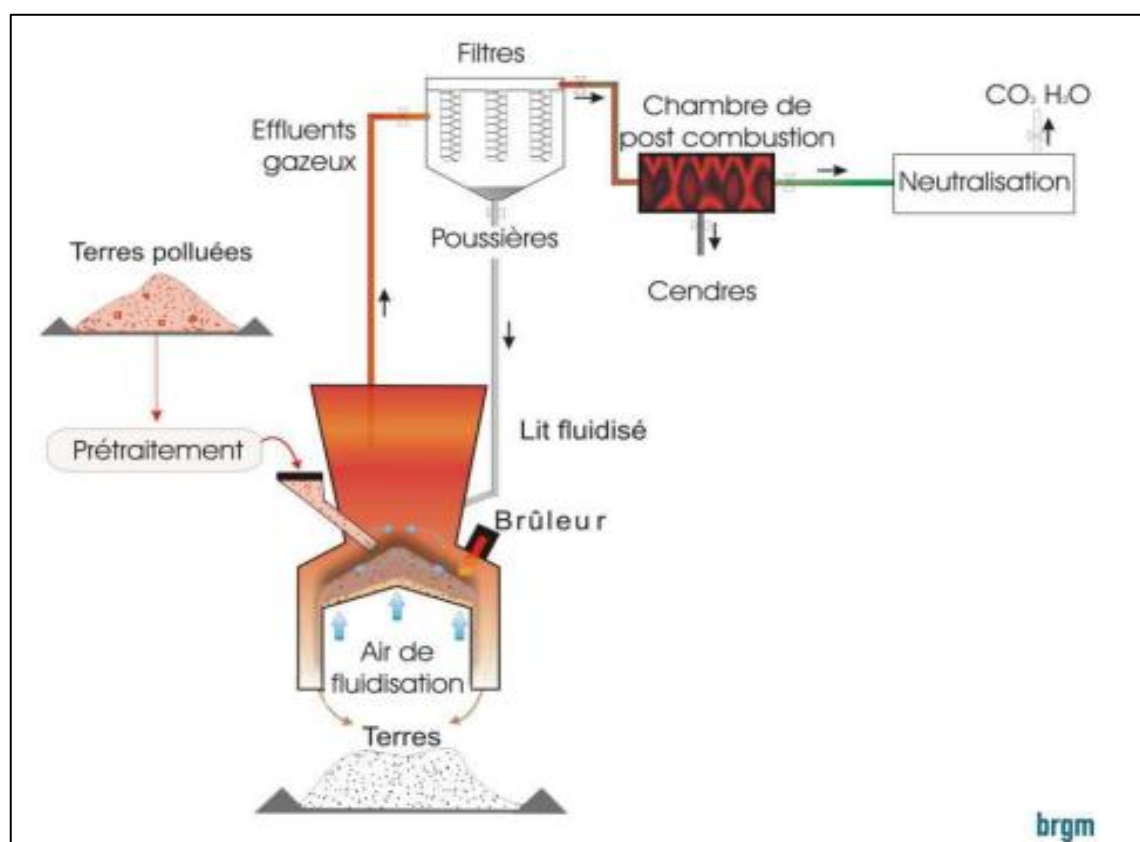


Figure VI.5 : Système d'incinération (tiré de Colombano et autres, 2010)

Le système d'incinération est constitué :

- Des unités de prétraitement :
 - Unité de broyage ou de ségrégation,
 - Unité de séchage,
 - Unité d'émottage,
 - Unité de mélange (avec des additifs de type chaux, gypse ...),
 - Unité d'homogénéisation,
 - Un four d'incinération,
 - Du matériel relatif à la création de flux et à l'ajustement des paramètres thermiques.
- Des unités de traitement des gaz :
 - Chambre de post combustion, brûleur, oxydation catalytique,
 - Échangeur thermique,
 - Dépoussiéreurs à filtres, dépoussiéreurs humides ou dépoussiéreurs électrostatiques,
 - Condenseur, adsorption sur charbon actif,
 - Unité de neutralisation des gaz (voie humide principalement ou semi-sèche),
 - Unité spécifique pour la récupération des métaux si nécessaire (condensation ...),
 - Un stockage des déchets solides et liquides issus du traitement.

VI.2.3. Avantages et inconvénients

VI.2.3.1. Avantages

L'incinération présente les avantages suivants :

- Dans les meilleures conditions, le traitement peut atteindre 99,99 % d'efficacité.
- Technique permettant de détruire complètement certains polluants, surtout les contaminants volatils et semi-volatils. De plus, certains métaux comme le zinc, le cadmium ou le plomb peuvent être détruits par la chaleur.
- L'efficacité du traitement concerne même les sols argileux et hétérogènes, ce qui est parfois plus difficile à traiter avec d'autres procédés.
- Traitement sur site possible grâce à des unités mobiles.

VI.2.3.2. Inconvénients

Ses inconvénients et ses facteurs limitants sont les suivants :

- Pour s'assurer de ne pas dégager une partie des contaminants dans l'atmosphère, il est important de chauffer à très haute température.

- Parfois, des polluants comme les métaux restent dans les cendres. Celles-ci doivent donc être acheminées dans un centre de déchets dangereux.
- Les émissions atmosphériques doivent également être traitées.
- L'excavation des sols est requise, ce qui implique parfois du transport et de l'enfouissement.
- Les unités peuvent être très dispendieuses, et leur taille considérable limite leur application sur le site.
- L'énergie demandée est également importante, de même que le niveau de technicité nécessaire.
- L'Incinération est la méthode la plus coûteuse notamment en raison des frais dédiés à l'énergie nécessaires au fonctionnement d'une telle installation, des coûts de traitement des rejets gazeux et des coûts de l'exutoire final des terres brûlées (prix de la mise en décharge généralement inclus).

VI.3. Vitrification in situ

VI.3.1. Définition

La **Vitrification** est un traitement thermique qui a pour but de solidifier/stabiliser les sols excavés par élévation de la température afin de les transformer en un matériau fondu qui se vitrifie en se refroidissant. 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. Les concentrations dans les lixiviats après traitement peuvent être diminuées de plus de 95%. La vitesse d'exécution est rapide : 3 à 5 tonnes par heure.

VI.3.2. Description

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 (**Figure VI.6**).

- Les composés organiques sont soit détruits soit volatilisés et 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.

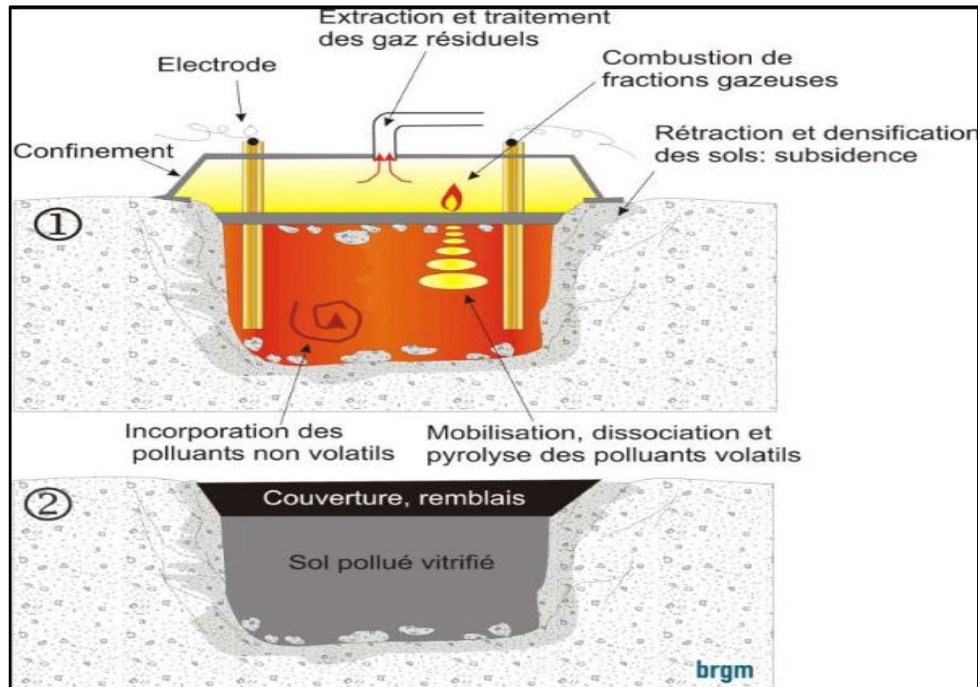


Figure VI.6 : Schéma de principe de la vitrification thermique in situ.

Le système de **Vitrification *in situ*** est constitué des éléments suivants :

- électrodes en graphite fixées à un système de maintien et alimentées par du courant électrique,
- hotte (couvercle hermétique) recouvrant la totalité de la zone à traiter ainsi que la zone adjacente afin de prévenir tout risque de dispersion des polluants,
- une pompe à vide (si nécessaire un échangeur thermique permettra de refroidir les gaz avant le système de pompage et de traitement),
- séparateur de condensats ou dévésiculeur,
- filière de traitement des gaz dont la nature dépend des pourcentages d'épuration, des débits et des concentrations en polluants ; cette dernière peut être constituée d'une unité d'oxydation catalytique, d'incinérateur ou d'une unité d'adsorption (généralement sur charbon actif),
- stockage des déchets solides et liquides issus du traitement.

VI.3.3. Avantages et inconvénients

VI.3.3.1. Avantages

La **Vitrification *in situ*** présente les avantages suivants :

- applicabilité à de très nombreux produits,
- technique particulièrement adaptée aux contaminants toxiques non combustibles,
- technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- technique efficace même pour des sols argileux et hétérogènes.

VI.3.3.2 Inconvénients

Ses inconvénients et facteurs limitants sont :

- consommation énergétique très importante
- les contaminants peu volatils (métaux, radionucléides, amiante ...) restent dans le sol mais sont immobilisés,
- le sol doit contenir suffisamment de silice pour que la vitrification soit efficace,
- les sols se refroidissent en plusieurs mois à une année,
- les émissions atmosphériques nécessitent un traitement d'air (surcoût),
- les gaz doivent la plupart du temps être refroidis afin de protéger les unités de traitements en aval,
- la technique détruit les populations de micro-organismes et organismes des sols dans et en périphéries des zones traitées. La végétation est détruite dans la zone traitée.

VI.4. La Pyrolyse

VI.4.1. Définition

La Pyrolyse consiste à chauffer les sols en l'absence d'oxygène pour en extraire les polluants volatils et semi-volatils. Elle est particulièrement adaptée pour traiter les sols riches en matière organique contaminés par des composés semi-volatils 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. Dans de bonnes conditions, des rendements épuratoires supérieurs à 90% ont été obtenus.

VI.4.2. Description

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 (**Figure VI.7**). 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.

Préalablement à la **Pyrolyse**, les sols sont traités par tamisage, séchage... ; seules les particules de quelques centimètres sont acceptées dans le four.

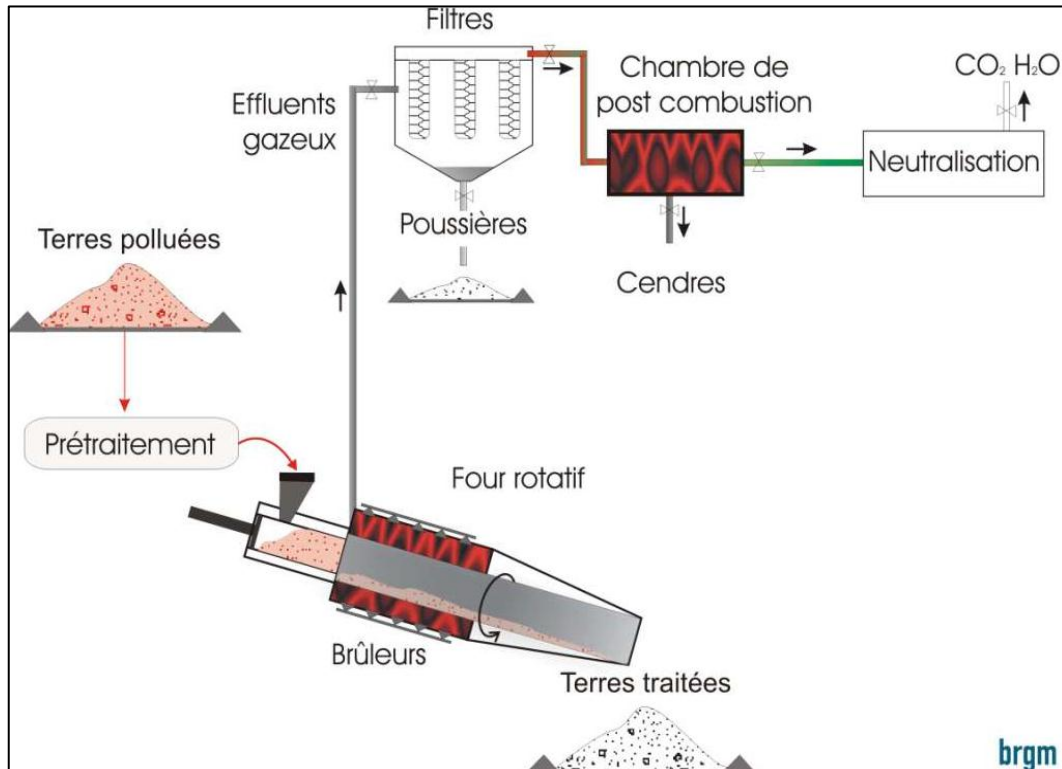


Figure VI.7 : Schéma de principe de la pyrolyse.

Les sols pollués sont ainsi transformés en gaz et en un résidu solide. La **Pyrolyse** provoque le « cracking » des polluants organiques en composés plus simples. Les gaz sont constitués de monoxyde de carbone, d'hydrogène, de méthane et d'hydrocarbures divers. La faible présence d'oxygène lors de la pyrolyse permet d'éviter la formation de sous-produits toxiques (par exemple, les dioxines).

- ✓ Les gaz sont récupérés en vue d'un traitement : élimination des particules (filtres, scrubbers) puis élimination des composés organiques et du monoxyde de carbone (brûleur, oxydation catalytique, seconde chambre de combustion, condenseur ou charbon actif).
- ✓ Un résidu solide formé de cendres et de carbone (coke) ainsi que de verres et de métaux est récupéré. Il est soit valorisé par production d'électricité et de chaleur (thermolyse intégrée), soit lavé, soit éliminé en centre de stockage des déchets.

La **Pyrolyse** est mise en œuvre à partir :

- d'unités de prétraitement :
 - unité de broyage ou de ségrégation,
 - unité de séchage,
 - unité d'émottage,
 - unité de mélange (avec des additifs de type chaux, gypse ...),
 - unité d'homogénéisation,

- d'un four de pyrolyse (unités rotatives : rotary kiln),
- de matériel relatif à la création de flux et à l'ajustement des paramètres thermiques,
- d'unités de traitement des gaz :
 - chambre de post combustion, brûleur, oxydation catalytique,
 - échangeur thermique,
 - dépoussiéreurs à filtres, dépoussiéreurs humides ou dépoussiéreurs électrostatiques,
 - condenseur, laveurs, adsorption sur charbon actif,
- d'une unité spécifique pour la récupération des métaux si nécessaire (condensation ...),
- d'une unité de récupération d'énergie (dans le cas de la pyrolyse intégrée),
- stockage des déchets solides et liquides issus du traitement.

VI.4.3. Avantages et inconvénients

VI.4.3.1. Avantages

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 argileux et hétérogènes fortement pollués,
- volume de gaz à traiter faible par rapport à l'incinération,
- revalorisation énergétique possible des sous-produits solides.

4.3.2. Inconvénients

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 coûts de production de température (coûts d'exploitation) sont souvent importants et sont souvent un frein à l'application de ce procédé,

CHAPITRE V : TRAITEMENT BIOLOGIQUE DU SOL POLLUÉ

Introduction

Les procédés biologiques permettent de dégrader les polluants par l'action de microorganismes (bactéries, champignons...). Elle consiste donc à stimuler un phénomène naturel pour en augmenter le rendement afin de détruire le polluant organique qui sera utilisé comme source de nutriment. La décontamination se fait in situ en introduisant dans le sol les éléments nécessaires au développement de la biomasse ou bien ex situ en traitant le sol excavé. Si la flore locale est inadaptée à la dégradation des polluants ou est peu abondante, des souches bactériennes performantes allochtones peuvent être ajoutées au sol.

V.1. Techniques de phytoremédiation

V.1.1. Définition

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 rhizosphère 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.

V.1.2. Catégories de la phytoremédiation

La phytoremédiation peut utiliser cinq catégories de procédés pour dépolluer un sol contaminé, listées et détaillées dans le tableau suivant :

Tableau V.I : Catégories de la phytoremédiation.

Technique	Principe	Polluant	Exemple
Phytoextraction	Utilisation de plantes capables d'extraire, de transporter et de concentrer les polluants du sol dans les parties récoltables (feuilles, tiges, racines).	métaux (Pb, Cd, Zn, Cu), nitrate	Plantes hyperaccumulatrices : <i>Thlaspi</i> , <i>Alyssum</i> , <i>Brassica</i> (moutarde)
Phytostabilisation	Séquestration des métaux par des plantes pour limiter le risque de lessivage des polluants et de contamination des nappes phréatiques	métaux (Pb, Cd, Zn, Cu, As, Cr, Se),	Plantes à racines fibreuses et profondes
Phytodégradation / Phytotransformation	Transformation par la plante de molécules organiques complexes en composés plus simples, qui seront intégrés dans les tissus de la plante.	Composés organiques, nitrate, phosphate	Arbres (famille du saule, peuplier), herbes, légumes
Phytovolatilisation / Phytostimulation	Stimulation de la volatilisation du polluant absorbé par la plante et éliminé par évapotranspiration.	métaux (As, Hg, Se), composés organiques volatils (COV)	<i>Brassica Juncea</i> (moutarde), plantes marécageuses
Rhizodégradation	Dégradation des polluants par les racines (processus interne) et l'activité microbienne associée (externe). Traitement plus profond, complémentaire aux traitements biologiques (phytostimulation)	Composés organiques (HAP, PCB, PCP, BTEX), solvants, produits phytosanitaires	Herbes à racines fibreuses : <i>Bermuda</i> , blé, seigle, fétuque

V.1.3. Avantages et inconvénients de phytoremédiation

V.1.3.1. Avantages

Les avantages de la phytoremédiation sont multiples :

- Utilisation de procédés biologiques et d'organismes végétaux,
- Coûts de mise en œuvre considérablement réduits par rapport aux techniques classiques,
- Procédés agréables du point de vue visuel ou sonore,
- Leur mise en œuvre est longue et peut durer quelques années.

V.1.3.2. Inconvénients

La phytoremédiation est une technique intéressante pour l'enlèvement des métaux lourds du sol, mais il a aussi quelques défis:

- Longue période (plusieurs années) nécessaires pour la remédiation des sols.
- L'efficacité de la phytoextraction de la plupart des plantes hyper-accumulatrices des métaux est généralement limitée par la faible biomasse et le lent taux de croissance.
- L'élimination de la biomasse polluée est nécessaire à la suite de la phytoextraction.
- La capacité d'accumulation de certaines plantes peut être inefficace à cause de l'attaque des maladies dans les climats touchés des régions tropicales et subtropicales.
- Difficulté de mobiliser la fraction des ions métalliques étroitement liée au sol.
- Les métaux accumulés peuvent être transférés dans la chaîne alimentaire en cas de mauvaise manipulation de la biomasse.

V.2. Techniques de bioremédiation

V.2.1. Définition

Les techniques de bioremédiation utilisent les propriétés dépolluantes de micro-organismes (des bactéries essentiellement, mais également des champignons) endogènes ou exogènes au terrain contaminé dans le but de dégrader ou transformer les contaminants à une forme moins contaminée. Pour ce faire, les microorganismes sont maintenus dans les conditions optimales (oxygène, pH, température, potentiel d'oxydoréduction) et des nutriments sont ajoutés essentiellement sous forme liquide. Ce procédé est utilisé de préférence en présence de matériaux perméables à semi-perméables comme le sable, le gravier, le limon grossier. Le rendement de ce procédé varie fortement en fonction des conditions du milieu, il peut dans certains cas atteindre plus de 90%.

V.2.2. Principe

Les micro-organismes ont besoin de nutriments et de source carbonée pour fournir l'énergie nécessaire à leur croissance et leur survie. La bioremédiation doit faire face à un environnement hétérogène dans lequel la plupart du temps, le(s) contaminant(s) est (sont) présent(s) en association avec des particules, dissous dans la solution du sol, etc. Pour cette raison, la bioremédiation se doit d'avoir une approche pluridisciplinaire prenant ainsi en compte la microbiologie, l'ingénierie, l'écologie, l'écotoxicologie, la pédologie et la chimie. La mise en œuvre de ces techniques se fait sur le site même (*in situ*). Certaines nécessitent l'excavation des terres et sont réalisés 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).

V.2.3. Catégories de la bioremédiation

Les techniques peuvent être subdivisées en sept catégories selon le principe biologique ou le mode de dépollution mis en œuvre, elles sont listées et détaillées dans le tableau suivant :

Tableau V.2 : Catégories de la bioremédiation.

Technique		Principe	Polluant	
In situ	Bioremediation	Biodégradation	Utilisation de la capacité de certains microorganismes à transformer le polluant en substrat (source de carbone, d'énergie)	Hydrocarbures pétroliers, (HAP, BTEX, solvants industriels (TCE, PCE, PCB, métaux lourds
		Bioimmobilisation	Utilisation de la capacité de certains microorganismes à immobiliser un ou plusieurs composants présents à l'état soluble (bactéries)	Métaux et produits pétroliers
		Biolixiviation	Solubilisation et entraînement dans la phase aqueuse par les microorganismes de polluants fixés ou piégés dans le sol	Minerais, métaux lourds (Cu, Cr, Fe, Pb, Zn, Co), phosphore

Hors site	Bioremediation	Traitement en bioréacteur (bioslurry)	Création d'une boue épaisse en mettant la partie fine du sol dans l'eau et ajout de nutriments pour stimuler la croissance de la population microbienne. Un système d'aération est employé pour les procédés aérobies. En fin de traitement, les phases solides et liquides sont séparées et le sol est remis en place.	Hydrocarbures, phénols, HAP, pétrole, PCB, pentachlorophénol, composés organiques halogénés volatils ou semi volatils
In situ et hors site	Bioremediation	Biorestauration	Ajout de nutriments (azote/phosphore) pour stimuler la croissance des microorganismes indigènes et favoriser la dégradation des polluants	pollution organique (hydrocarbures pétroliers, HAP), métaux lourds
		Bioaugmentation	Introduction dans le sol de microorganismes exogènes adaptés aux polluants à traiter	hydrocarbures lourds, HAP, PCB
		Biostimulation	Réensemencement de populations prélevées sur le site, dont la croissance a été stimulée en laboratoire ou en bioréacteurs installés sur site	hydrocarbures pétroliers, HAP

V.2.4. Description

Les différents composés sont ajoutés dans la zone non saturée ou la zone saturée. Leur nature et leur concentration dépendent des conditions du milieu, des contaminants, des processus de biodégradation envisagée (oxydation aérobie, réduction anaérobie, cométabolisme,...). Dans certains cas, un ensemencement avec des bactéries exogènes est réalisé. Les nutriments sont souvent injectés sous forme dissoute via des sprinklers (diffuseurs), des puits d'injection ou des drains (**Figure V.I**). En cas de dégradation aérobie, l'oxygène peut être apporté sous forme gazeuse (par injection d'air, par ajout d'oxygène pur...) ou sous forme liquide (peroxyde d'hydrogène H₂O₂) ou solide (peroxyde de magnésium MgO₂).

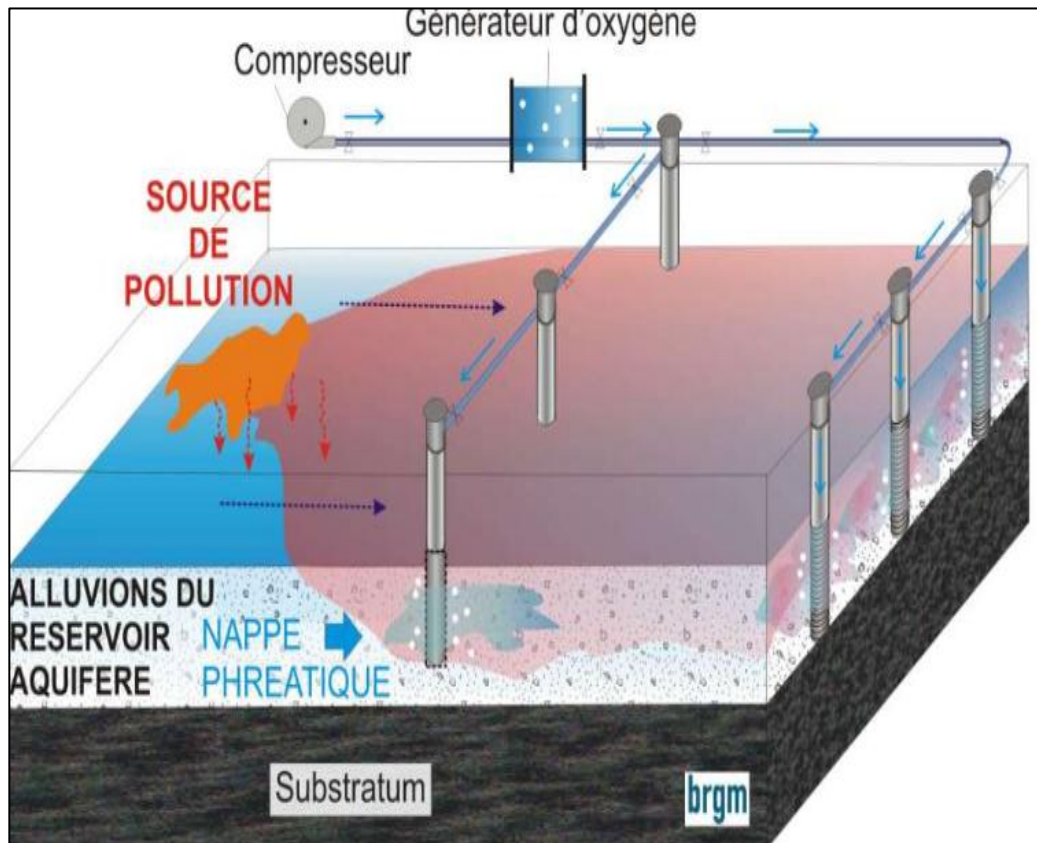


Figure V.I: Schéma de principe d'une biodégradation in situ dynamisée utilisant de l'oxygène pur.

La bioremédiation anaérobie nécessite l'ajout de nitrates, de fer(II), de sulfates, de CO₂ selon les conditions de biodégradation (principe du Terminal Electron Accepting Process - TEAP - Procédé de l'accepteur final d'électrons).

V.2.5. Avantages et inconvénients de la biodégradation dynamisée

V.2.5.1. Avantages

La Biodégradation dynamisée présente les avantages suivants :

- Procédé destructif des molécules polluantes,
- Technique pouvant être employée en soutien des techniques d'extraction physiques classiques (Venting, Barbotage *in situ* (Sparging), Pompage et traitement, Pompage-écrémage) lorsque ces dernières ont atteint leurs limites,
- Compétitivité en termes de coût et de performance,
- Fiabilité, applicabilité à de nombreux polluants,
- Technique nécessitant moins de débits d'air ou d'eau que les techniques physiques classiques ;

V.2.5.2. Inconvénients

Ses inconvénients et ses facteurs limitants sont les suivants :

- Les technologies ne sont bien évidemment applicables qu'aux polluants biodégradables, qui ne sont ni inhibiteurs des microorganismes ni toxiques pour eux,
- Le procédé nécessite un bon contrôle des mouvements des polluants dans les zones saturées et non saturée, cette technique requiert donc une surveillance de la qualité des milieux importants pendant traitement.
- Les concentrations élevées en composés organiques peuvent être toxiques pour les microorganismes,
- Les concentrations élevées en métaux/métalloïdes sont incompatibles avec ce procédé,
- Les durées de traitement des procédés de biorémédiation sont souvent importantes,

V.3. Atténuation naturelle contrôlée,

V.3.1. Définition

La définition la plus utilisée à l'heure actuelle est celle proposée par l'Agence de la protection de l'Environnement des États-Unis (US EPA, 1997) :

«Processus se produisant naturellement dans les sols et les eaux souterraines, sans intervention humaine, visant à réduire la masse, la toxicité, la mobilité, le volume ou la concentration des contaminants dans ces milieux. Les processus pris en considération sont : la dispersion, la dilution, la volatilisation, l'adsorption, les mécanismes de stabilisation ou de destruction des polluants, qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques.»

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

- un processus destructif des molécules polluantes,
- un processus de séquestration des molécules polluantes (exemple : adsorption).

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 (Cr(VI) et Cr(III) ; As(III) et As(V)). Les rendements épuratoires sont très disparates. Néanmoins, il n'est pas rare de mettre en évidence des abattements des concentrations de polluant de plus de 70% quand les conditions sont optimales.

V.3.2. Description

Le schéma classique d'évolution d'une pollution soumise à l'atténuation naturelle se fait en quatre étapes:

1. **une phase de développement** (généralement d'un panache),
2. **une phase de stabilisation**,
3. **une phase de résorption**,
4. **une phase de disparition**.

V.3.3. Avantages et inconvénients de l'atténuation naturelle contrôlée

V.3.3.1. Avantages

L'Atténuation naturelle contrôlée présente les avantages suivants :

- compétitivité en termes de coût par rapport aux techniques «actives»,
- 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),

V.3.3.2. Inconvénients

Ses inconvénients et ses facteurs limitants sont les suivants :

- les durées de traitement sont importantes,
- les sous-produits de dégradations générés peuvent être plus toxiques et plus mobiles que les molécules mères ; il conviendra de suivre avec attention les sous-produits de dégradation et notamment de vérifier leur toxicité avant tout développement d'un traitement ayant recours à la biodégradation,
- de nombreuses molécules organiques ne peuvent pas être intégrées dans le processus d'Atténuation naturelle contrôlée (composés récalcitrants ou conditions hydrogéochimiques inadaptées),
- les concentrations élevées peuvent être toxiques pour les microorganismes,

V.4. Bioventing,

V.4.1. Définition

Le Bioventing est un traitement biologique aérobie qui consiste à stimuler la biodégradation dans la zone non saturée par apport d'oxygène. 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. Le rendement de ce procédé varie fortement en fonction des conditions du milieu, il peut dans certains cas atteindre plus de 90%.

V.4.2. Principe

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.

V.4.3. Description

Le système d'injection est similaire mais de taille inférieure à celui du Venting. En effet, les débits aérauliques nécessaires au 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 leur et de favoriser la circulation d'air (**Figure V.2**). 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.

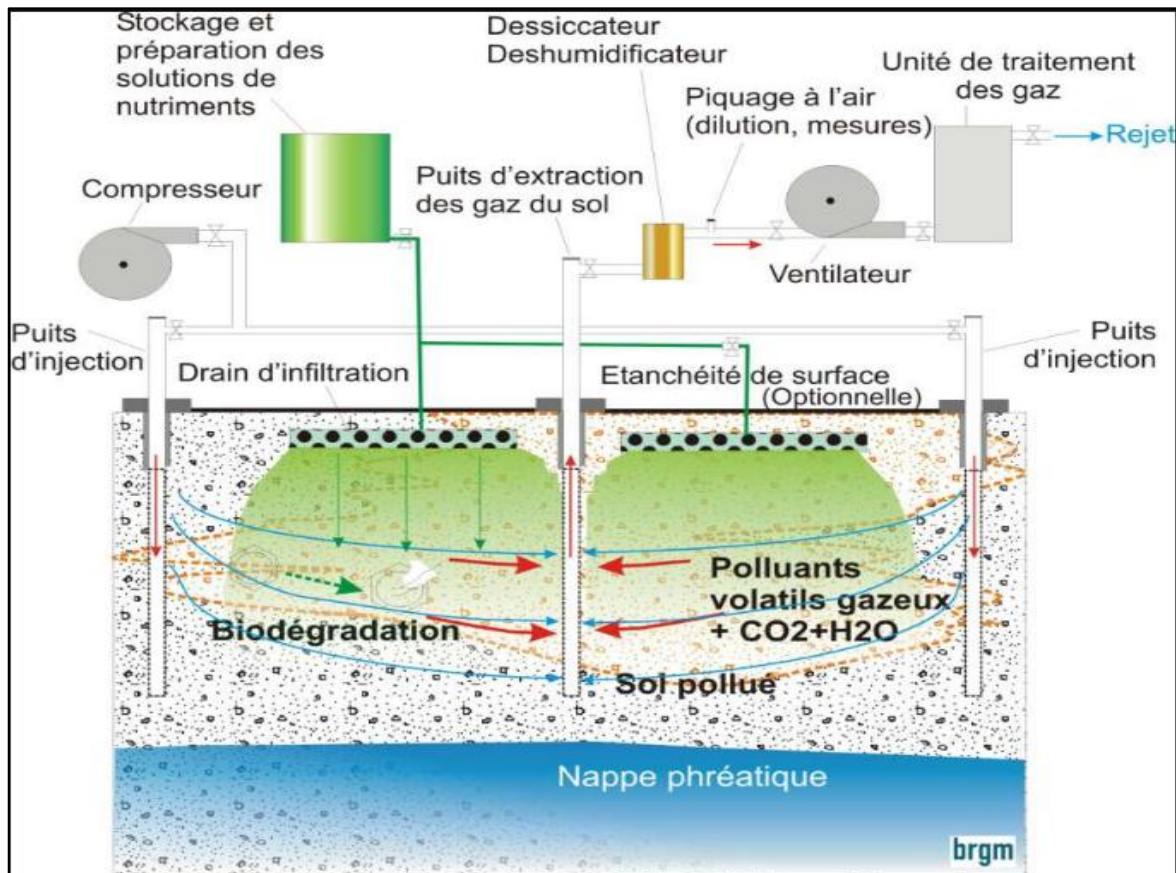


Figure V.2 : Schéma de principe du bioventing.

Le **Bioventing** est mis en œuvre à partir :

- 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 l'extracteur,
- d'un réseau d'injection permettant la mise en relation d'un compresseur et des points d'injection
- d'une unité d'extraction (extracteur volumétrique, intermédiaire, centrifuge),
- si nécessaire du matériel relatif aux additifs : cuve de stockage, système de mélange avec l'eau, réseau de distribution,
- si nécessaire d'un séparateur de condensats ou dévésiculeur et d'une filière de traitement des gaz,
- d'un stockage des déchets solides et liquides issus du traitement.

V.4.4. Avantages et inconvénients de bioventing

V.4.4.1. Avantages

Le Bioventing présente les avantages suivants :

- technique pouvant être employée en soutien du venting classique lorsque ce dernier a atteint ses limites,
- technologie nécessitant de moindres débits d'air que le venting ; les débits d'air à traiter (si nécessaire) sont donc plus faibles,
- technique utilisable préalablement à d'autres traitements de dépollution afin de limiter les émissions de polluants volatils,

V.4.4.2. Inconvénients

Ses inconvénients et ses facteurs limitants sont les suivants :

- les concentrations élevées en métaux/métalloïdes sont incompatibles avec ce procédé,
- technique inefficace dans la zone saturée bien que le fait de baisser le toit de la nappe permette de dépolluer la zone rendue ainsi non saturée,
- le procédé nécessite un bon contrôle des mouvements des polluants dans les zones saturées et non saturée, cette technique requiert donc une surveillance de la qualité des milieux importants pendant traitement,
- 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,

V.5. Biotertre

V.5.1. Définition

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 biodégradables. Le **Biotertre** est très largement utilisé pour les dépollutions on site. 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. Les traitements en Biotertre s'appliquent de préférence à des pollutions inférieures à 15-20 g/kg de d'hydrocarbures pour les produits pétroliers « classiques ».

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

V.5.2. Description

Le procédé nécessite au préalable une Excavation. Les sols pollués sont mélangés avec un amendement (agent structurant) et sont par la suite dirigés vers une aire de traitement contenant a minima un système de collecte de lixiviats et des unités d'aération (extraction ou insufflation d'air) afin d'optimiser le transfert de l'oxygène et la stimulation de la biodégradation (**Figure V.3**). La biodégradation est contrôlée (température, taux d'humidité, nutriments, oxygène, pH). Les Biotertres sont le plus souvent recouverts par une géomembrane imperméable afin de limiter les infiltrations d'eaux pluviales, la volatilisation des polluants, le maintien/l'augmentation de la température. Les lixiviats sont en partie recyclés et en partie traités sur site avant d'être rejetés. Les rejets atmosphériques sont traités si nécessaire (présence de COV notamment). La dégradation biologique est, la plupart du temps, réalisée par biostimulation. Les tas ne sont d'une manière générale pas d'une hauteur supérieure à 3 m (afin d'éviter le compactage).

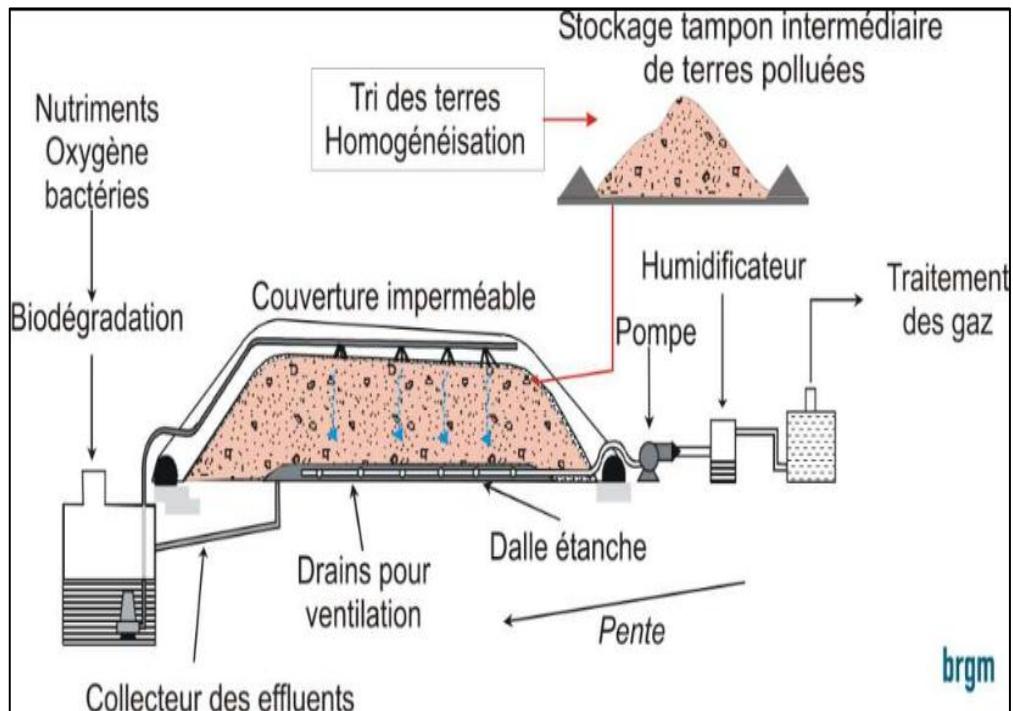


Figure V.3 : Schéma de principe du biotierre.

Le Biotierre est mis en œuvre à partir des éléments suivants :

- plateforme de prétraitement (homogénéisation, criblage, amendement de matière organique ou structurante si nécessaire ...),
- plateforme de traitement fixe ou mobile sur des alvéoles imperméabilisées (béton ou PEHD-polyéthylène haute densité),
- matériel relatif à l'ajout de nutriments : cuve de stockage, système de mélange avec l'eau, réseau de récupération et de recirculation des lixiviats,
- matériel relatif à l'ajustement de l'humidité (drain, sprinkler, pompes ...),
- matériel nécessaire à l'aération (drain, pompes ...),
- si nécessaire, filière de traitement des gaz (traitement biologique ou biofiltre le plus souvent),
- matériel de contrôle de conditions du milieu : oxygénation du milieu, humidité, concentration des nutriments, température, densité de la population microbienne en place,
- stockage des déchets solides et liquides issus du traitement.

V.5.3. Avantages et inconvénients de bioventing

V.5.3.1. Avantages

Le traitement par **Biotierre** présente les avantages suivants :

- technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité.
- 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...),

V.5.3.2. Inconvénients

Ses inconvénients et ses facteurs limitants sont les suivants :

- technique nécessitant l'Excavation des sols,
- le système nécessite souvent un tri au préalable ; les granulométries supérieures à 60 mm sont souvent exclues du procédé,
- le devenir des sols excavés doit être examiné avec attention,
- les biopiles statiques (sans retournement) peuvent aboutir à des résultats moins homogènes que ceux obtenus avec un retournement ou un mélange,
- la hauteur des tertres est généralement comprise entre 1 et 3 m au maximum, ce qui implique une surface au sol parfois conséquent,
- l'ajout d'agents structurants parfois, augmente le volume de matériaux à traiter.

V.6. Compostage

V.6.1. Définition

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. 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.

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

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

Le rendement de ce procédé varie fortement en fonction des conditions du milieu ; il peut dans certains cas atteindre plus de 95%.

V.6.2. Description

Les sols doivent être préparés avant leur mélange avec le compost (élimination des fractions grossières non biodégradables et émottage). Le ratio compost/sols pollués peut varier entre 0,2 et 0,7. Le mélange est par la suite stocké sous forme d'andains de forme trapézoïdale étudiée afin de conserver la chaleur en son sein (Figure V.4).

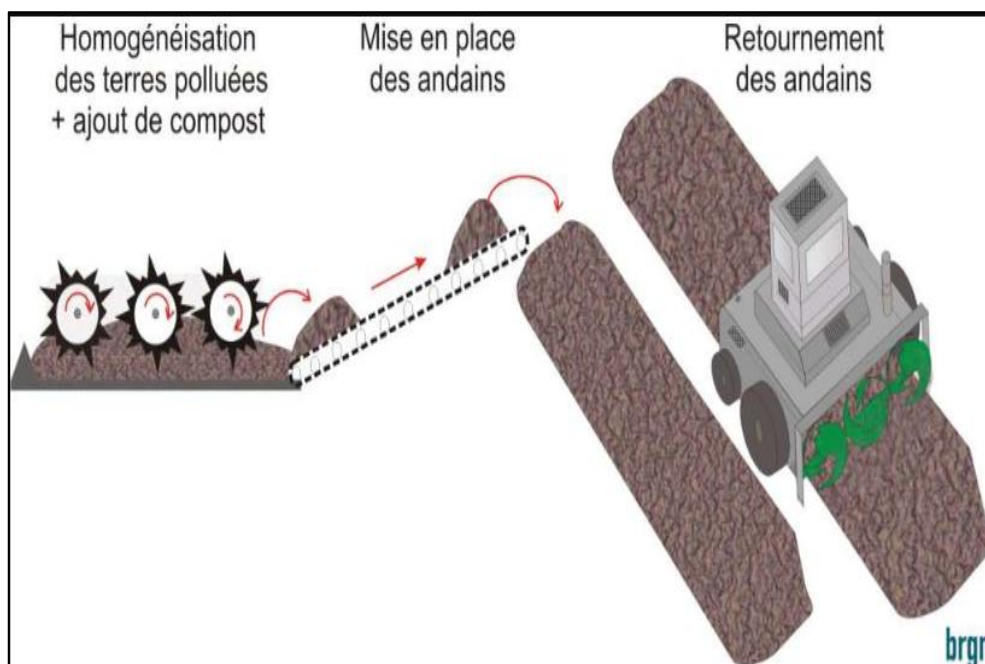


Figure V.4 : Schéma de principe du compostage.

Le Compostage est mis en œuvre à partir des éléments suivants :

- une plateforme de prétraitement (homogénéisation, criblage, matériel relatif à l'ajout de nutriments, amendement de matière organique ou structurante ...),
- une plateforme de traitement fixe ou mobile sur des alvéoles imperméabilisées (béton ou PEHD-polyéthylène haute densité) et inclinées permettant la récupération des lixiviats,
- un réseau de récupération et de recirculation des lixiviats et matériel relatif à l'ajustement de l'humidité (drain, sprinkler (diffuseurs), pompes ...),
- si nécessaire une membrane perméable à l'air et imperméable à l'eau (Gortex, polypropylène),
- un retourneur d'andains (aérateur mécanique de type agricole),
- du matériel de contrôle des conditions du milieu : oxygénation du milieu, humidité, concentration des nutriments, température, densité de la population microbienne en place,
- un stockage des déchets solides et liquides issus du traitement.

V.6.3. Avantages et inconvénients de compostage

V.6.3.1. Avantages

Le traitement par **Compostage** présente les avantages suivants :

- 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,
- possibilité de traiter des contaminants relativement récalcitrants dans d'autres conditions,
- amélioration des qualités physiques des sols (taux de matière organique notamment).

V.6.3.2. Inconvénients

Ses inconvénients et ses facteurs limitants sont les suivants :

- technique nécessitant l'**Excavation des sols**,
- technique nécessitant un prétraitement conséquent,
- technique de biodégradation plus lente et moins performante que le Bioterre,
- le **Compostage** « classique » doit être de préférence utilisé pour des polluants facilement biodégradables et peu volatils (ex. : gasoil) pour éviter les risques de contamination de l'air par évaporation,
- le procédé nécessite une surface au sol parfois conséquente,

Références bibliographiques

- A. Ruellan, M. Dosso, Foucher., (1993). Regards sur le sol, Paris.
- Michel-Claude Girard, Christian Walter, Jean-Claude Rémy, Jacques Berthelin, Jean-Louis Morel'. (2011). Sols et environnements, Dunod.
- Lozet Jean, Mathieu Clément., (2002). Dictionnaire de Science du Sol, Lavoisier.
- Bourguignon Claude et Lydia., (2008). Le sol, la terre et les champs, Sang De La Terre.
- Duchaufour Philippe., (2001). Introduction à la science du sol, Dunod.
- Girard Michel-Claude, Schwartz Christian, Jabiol Bernard., (2011). Etude des sols, Dunod.
- Baize Denis, Jabiol Bernard., (2011). Guide pour la description des sols, Editions Quae.
- Jamagne Marcel., (2011). Grands paysages pédologiques de France, Editions Quae.
- Mathieu Clément., (2009). Les principaux sols du monde, Lavoisier.
- Touyre Patricia, Delachaux et Niestlé., (2001). Le monde secret du sol, Paris.
- AFES., (2009). Référenciel pédologique 2008, Editions Quae.
- Laurent E., Douard S., (2017), Les principaux types de sols du PNR d' Armorique et leurs relations avec la végétation. Outil de référence. Brest : Conservatoire botanique national de Brest, 89 p.
- Annexes., (2017). Programme « Connaissance et cartographie des végétations sur de grands territoires : étude méthodologique » avril 2013- mars 2017.
- Akmouci- Toumi Sihem., (2009). Contribution à l'étude des boues de forage : Isolement et évaluation de la capacité de quelques souches microbiennes à dégrader le gasoil. Université M'hamed Bougara Boumerdes.
- Ballerini et Vandecasteele., (1999). La restauration par voie microbiologique des sols contaminés par les polluants organiques. Biotechnologie, coordinateur R. Scriban, 5ème édition, Edition Tech et Doc. 835-865 p.
- S. Colombano, A. Saada, V. Guerin, P. Bataillard., (2010). Rapport Final de Quelles techniques pour quels traitements – Analyse coûts –bénéfices, BRGM-58609-FR.
- Emilia Koller., (2004). Traitement des pollutions industrielles : Eau, Air, Déchets, Sols, Boues.
- BRGM., (2010). Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices.
- ADEME., (2011). Traitabilité des sols pollués : Guide méthodologique pour la sélection des techniques et l'évaluation de leurs performances.
- ADEME., (2009). Traitabilité des sols pollués - Guide méthodologique pour la sélection des techniques et l'évaluation de leurs performances. 123 p.

- ADEME., (2012) Les taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France. Étude Ernst & Young. Synthèses des données 2008-114 p.
- ADEME., (2015). Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France. Étude Ernst & Young. Synthèse des données 2012, 148 p.
- G. Card., (1996). Protecting Development from Methane. Report I49. CIRIA, 190 p.
- ESTRAPOL., (2019). Essais de faisabilité de traitement de sols pollués.
BRGM., (2004), Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives (BPR). Réalisations, expériences, critères décisionnels et perspectives. BRGM/RP-52973-FR, 131 p.
M.H.A. Van Eekert et G. Schraa., (2001). The potential of anaerobic bacteria to degrade chlorinated compounds. *Water Science and Technology* 44(8), 49–56 p.
- Y. Yin et H.E. Allen., (1999). *In situ* chemical treatment.. Rapport Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Technology Evaluation report TE-99-01, 74 p.
- J.L. Buel, L.E. Thompson., (1992). The *in situ* vitrification integrated program: focusing an innovative solution on environmental restoration needs. (No. PNL-SA-20853; CONF-920851-88). Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States)
- F. Colin., (2000). Pollution localisée des sols et des sous –sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés, Académie des sciences, rapport n° 44, Edition Tec & Doc .417 p.
- M. Nouri, A. Haddioui., (2016). *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(1)-6.
- M.M. Lasat., (2002). *Journal of Environmental Quality*, 31, 109-120 p.
- S.P. McGrath., (1998). In: R.R. Brooks (Eds.). CABI Publishing, Wallingford.
- M. Leblanc, D. Petit, A. Deram, B.H. Robinson., (1999). R.R. Brooks. *Economic Geology*, 94, 109-114 p.
- E. Pilon-Smits., (2005). *Annual Review of Plant Biology*, 56, 15-39 p.
- S.P. Bizily, C.L. Rugh, A.O. Summers, R.B. Meagher., (1999). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96, 6808-6813 p.
- W.R. Berti, S.D. Cunningham., (2000). In: I. Raskin, B.D. Ensley (Eds.), John Wiley & Sons, Inc.: New York
- J.L. Schnoor. In: I. Raskin, B.D., (2000). Ensley (Eds.), John Wiley & Sons: New York.
- C. Garbisu, I. Alkorta., (2001). *Bioresource Technology*, 77, 229-236 p.
- Kuiper, E.L. Lagendijk, G.V. Bloemberg, B.J.J. Lugtenberg., (2004). *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 17, 6-15 p.
- R. Boopathy., (2000). *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46, 29-36 p.

- M. Vidali., (2001). Pure and Applied Chemistry, 73, 1163-1172 p.
- T. Barkay, J. Schaefer., (2001). Current Opinion in Microbiology, 4, 318-323 p.
- T. Rohwerder, T. Gehrke, K. Kinzler, W. Sand., (2003). Applied Microbiology and Biotechnology, 63, 239-248 p.
- M.E. Zappi, B.A. Rogers, C.L. Teeter, D. Gunnison, R. Bajpai., (1996). Journal of Hazardous Materials, 46, 1-12 p.
- S.R. Hutchins, G.W. Sewell, D.A. Kovacs, G.A. Smith., (1991). Environmental Science and Technology, 25, 68-76 p.
- G.S. Saylor, S. Ripp., (2000). Current Opinion in Biotechnology, 11, 286-289 p.
- C.J. Cunningham, J.C. Philip., (2000). Land Contamination and Reclamation, 8, 261-269 p.
- ATTENA., (2013). Protocole opérationnel de gestion de sites par Atténuation Naturelle dans le contexte réglementaire français. Phase 2, 90 p.
- A. Sinke et I. Hecho., (1999). Monitored Natural Attenuation: Review of existing guidelines and protocols. TNO-Nicole report TNO-MEP R99/313.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA)., (1997). Proceedings of the Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water, Dallas (Texas), 11-13 sept 1996. Rapport EPA/540/R-97/504, 191 p.
- A. Leeson et B. Alleman., (1999). Engineered Approaches for In Situ Bioremediation of Chlorinated Solvent Contamination. Proceedings, The Fifth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium; San Diego, Californie. BattellePress.
- G.W Sewell and others., (1998). Designing and applying treatment technologies. Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. Battelle Press. Columbus, Ohio. 9-14 p.
- United States Air Force (US Air Force).,(1998). Installation Restoration Program, Aerobic Cometabolic *In Situ* Bioremediation Technology Guidance Manual and Screening Software User's Guide. Center for Environmental Excellence, 126 p.
- D.L. Koltuniak., (1986). In situ air stripping cleans contaminated soil. Chem. Eng.
- R.Preuffer., (1988). les techniques actuelles pour la rehabilitation des sites industriels pollués. Site industriels pollués- leur réhabilitation Afrit – Asprodet Eurexpo Lyon.
- Myriam Dufresne., (2013). Les technologies de traitement des sols contaminés : lesquelles sont durables ? Université de Sherbrooke.