

Chapitre 2 : Evaluation des risques liés aux sols pollués et objectifs de réhabilitation

Dr Balli Nassima

1. Pollution du sol : origines et généralités

- Un sol pollué est un site qui, de fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement. Ces situations sont souvent dues à d'anciennes pratiques sommaires d'élimination des déchets, mais aussi à des fuites ou à des épandages de produits chimiques accidentels ou pas
- Donc, la pollution du sol est la présence ou l'accumulation de plusieurs éléments toxiques, à des teneurs dépassant celles du bruit de fond, et présentant des risques ou des nuisances pour la santé de l'homme, les ressources biologiques, et les écosystèmes présents sur ce site.
- Les principaux responsables de la pollution des sols sont :
 - 1.1. **Les activités anthropiques** : Les activités humaines, qu'elles soient de nature agricole, commerciale, industrielle, institutionnelle ou simplement résidentielle, donnent naissance à des quantités importantes de résidus très variés tels que les déchets de construction (bois, acier, béton, plâtre, briques), les déchets municipaux (boues d'épuration, résidus provenant de l'entretien des rues), l'utilisation des pesticides, d'engrais chimiques, les résidus provenant du transport et de la distribution de l'électricité, ou encore les déchets découlant des modes de transport (résidus de travaux de carrosserie et d'entretien mécanique, carcasses d'automobiles, pneus,...etc.

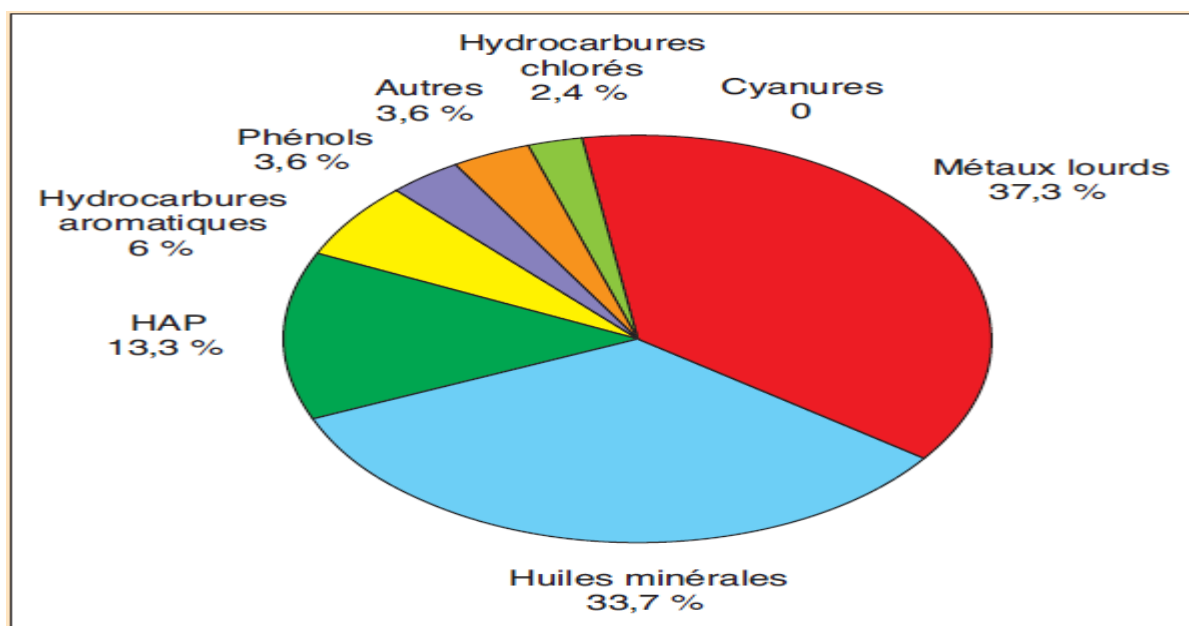


Figure 01 : Composition des sols en polluants (Morel, 2020).

1.2. **Pollution due à l'environnement** : ces pollutions peuvent être :

- ✓ Les conséquences des catastrophes naturelles, tels que le volcanisme
 - ✓ Liées à des phénomènes naturels, tels que et les contaminants inorganiques, qui peuvent se retrouver naturellement dans les sols, les éruptions solaires, les microorganismes pathogènes, les cadavres d'animaux,...
- On distingue 3 grandes catégories de sites pollués :
 - a- **Les anciennes décharges** réalisées sans respecter les règles techniques et notamment les décharges situées sur des sous-sols fragiles et pour lesquels une pollution des eaux souterraines a été constatée.
 - b- **Les dépôts de déchets** ou de produits chimiques abandonnés à la suite de faillites d'entreprises ou résultats de pratiques frauduleuses d'importation ou d'élimination des déchets.
 - c- **Les sols pollués par les retombés, infiltrations ou des déversements** de substances polluantes, liés à l'exploitation passée ou présente d'une installation industrielle ou à un accident de transport.
2. **Normes de pollution du sol** : pour les besoins de l'évaluation du caractère pollué ou non, le décret prévoit l'utilisation des valeurs du décret :
- ✓ **La valeur de fond** : valeur indicative concentration ambiante d'un polluant dans le sol, indicative de variations géologiques naturelles ou de l'influence d'une activité agricole, industrielle ou urbaine généralisée. Les valeurs de fond seront cartographiées et accessibles au public.
 - ✓ **La valeur de référence** : valeur indicative des concentrations de goudon en polluants attendues dans le sol en l'absence de variations géologiques naturelles et en l'absence d'influence d'une activité agricole, industrielle ou urbaine généralisée.
 - ✓ **La valeur seuil** : concentration en polluants dans le sol correspondant à un niveau au-delà duquel une étude de caractérisation du risque doit être entreprise.
 - ✓ **La valeur d'intervention** : concentration en polluants dans le sol correspondant à un niveau au-delà duquel une intervention est systématiquement entreprise.
3. **Voies d'exposition humaine et effets toxiques** :
- 3.1. Exposition direct : contact, ingestion, inhalation** : Trois types d'effets immédiats liés à l'exposition directe aux sols pollués sont répertoriés:
- ✓ au **contact avec la peau**, et surtout les muqueuses (brûlure chimique, effet corrosif; intoxication par passage dans les tissus); à ceci s'ajoutent, à terme, des effets carcinogènes;
 - ✓ à **l'ingestion directe**: des intoxications très sévères peuvent survenir; les toxicités d'ingestion accidentelle sont fréquentes avec les pesticides et les composés benzéniques ou phénolés.
 - ✓ **par inhalation**: cette forme d'intoxication par vapeurs toxiques est souvent mortelle quand sont respirés des composés soufrés (hydrogène sulfuré et mercaptans), certains composés organochlorés volatils, surtout les solvants. Ces produits sont neurotoxiques ou ont pour effet un blocage répertorié.
 - ✓ Enfin, un nombre limité de ces composés, ingérés à des doses très faibles, mais cumulatives, sont hautement mutagènes et, de ce fait, sont cancérigènes (le chlorure de vinyle en est un exemple-type, comme quelques alcènes ou alcanes organochlorés).

3.2. **Exposition indirecte : bioconcentration dans les chaînes trophiques** : Le cycle des polluants dans le système sol-plante, donnant une vue générale de leurs transformations avant d'atteindre des cibles telles que les eaux souterraines, les plantes, les eaux superficielles, et *in fi ne* l'homme.

- ✓ cette circulation des polluants du sol par l'intermédiaire des chaînes trophiques donne lieu à ce que l'on a appelé "**l'intensification biologique**" de leurs effets. C'est le cas par exemple de DDT et des isotopes radioactifs.

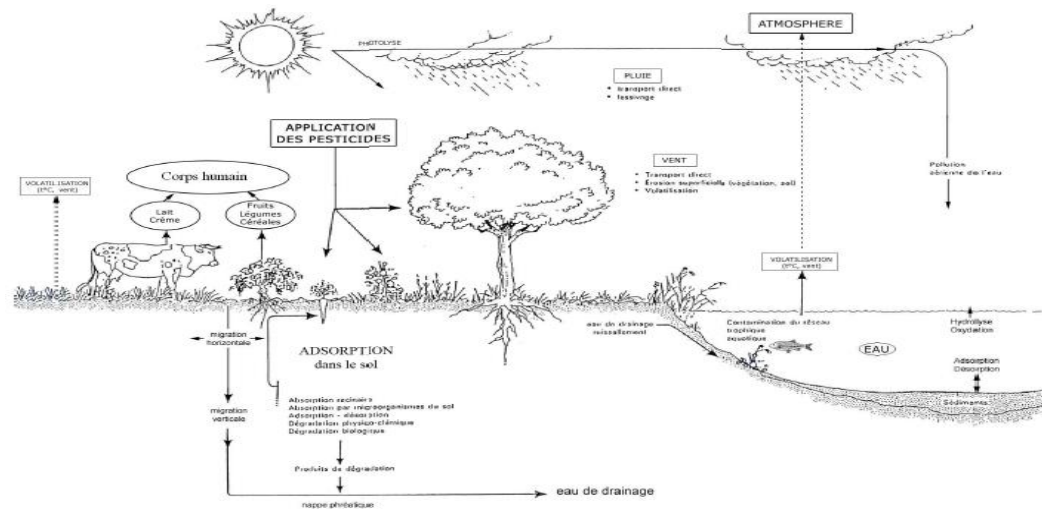


Figure 02 : circulation des polluants, cas des pesticides (Juc, L. 2007).

1. **Les techniques de réhabilitation des sols contaminés :**

- ✓ Est-il techniquement possible de soustraire en totalité les éléments ou molécules toxiques présents dans les sols ?
- ✓ Avant de procéder à la réhabilitation d'un terrain, il est important de bénéficier de données spécifiques. Ces données permettront de saisir l'ampleur de la contamination et ainsi déterminer la solution de traitement adaptée à la situation.
- ✓ La possibilité de décontaminer les sols dépend donc, d'une part, de la nature et de la concentration des polluants dans le milieu et, d'autre part, des propriétés du sol et du sous-sol
- ✓ La solubilité, la densité, la stabilité chimique, la polarité, l'affinité pour les matières organiques, la volatilité, l'ionisation au pH du sol et la viscosité constituent les paramètres principaux pour comprendre le devenir des polluants organiques dans les sols.
- ✓ Généralement, les différentes stratégies de remédiation des sols qui ont été développées suivent l'un des trois principes suivants : **immobilisation**, **destruction** ou **extraction du polluant**.

1.1. **Les critères de choix d'une technique de dépollution :**

- ✓ Le choix d'une technique de décontamination est démarche complexe, faisant intervenir de nombreux facteurs qui consistera à résoudre les points suivants :
 - Choisir la solution technique la mieux adaptée pour résorber la pollution constatée
 - En se basant sur un diagnostic préliminaire le plus exhaustif possible et sur une analyse de risque précise

- En combinant dans la plupart des cas, plusieurs techniques en séquence pour tenir compte de la variabilité pouvant être observée à tous les niveaux (produits, concentrations, milieu,...)
- En faisant prendre conscience à toutes les parties impliquées que les opérations de dépollution représentent toujours des coûts élevés, et demandent le plus souvent des temps d'intervention relativement longs

1.2. Les techniques de réhabilitation des sols pollués:

- ✓ En fonction de la pollution et des caractéristiques du site, trois variantes de mise en œuvre existent pour les différentes catégories de traitement :
 - **Les traitements in situ** : les sols sont traités en place sans être excavés ou pompés,
 - **Les traitements sur site (on site)** : les sols pollués sont traités, après excavation ou pompage, dans une installation présente sur le site
 - **Les traitements hors site (off site)** : les sols pollués sont enlevés et traités dans une installation extérieure au site (centre de traitement)

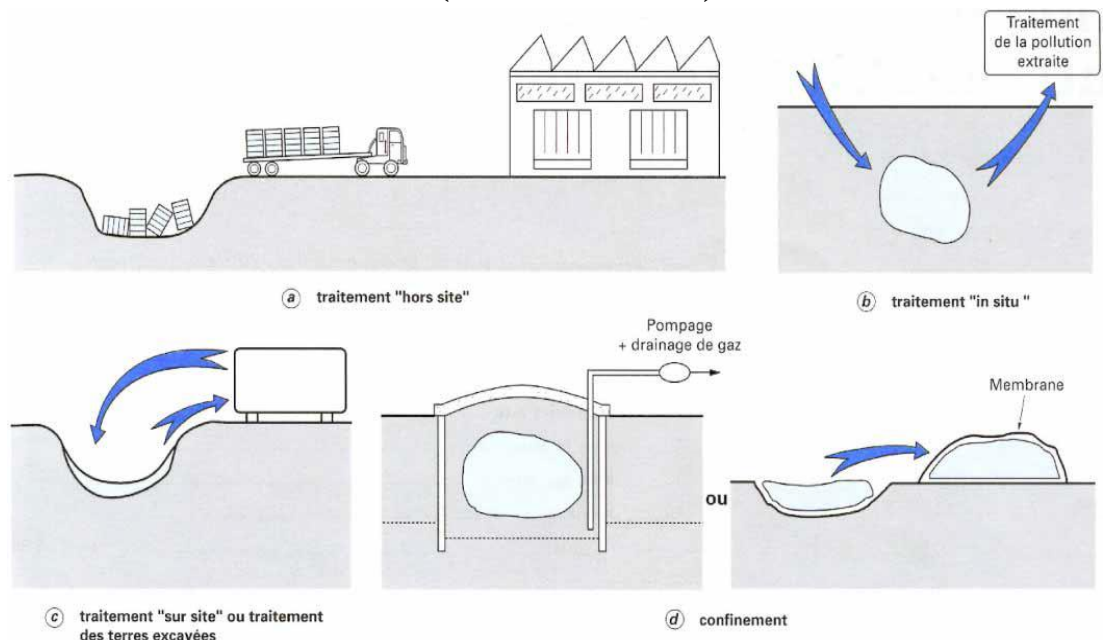


Figure 03 : Les principales catégories de traitement des sols (BERNHEIM, 1997).

- ✓ Il existe plusieurs techniques, on peut distinguer :

1.2.1. Les techniques destructives :

a. Incinération ou pyrolyse

- Cette technique est l'une des plus anciennes utilisées pour traiter les déchets. Elle expose des contaminants organiques contenus dans les sols, les boues, les sédiments ou autres, à des hautes températures (environ 540°C).
- Deux combustions sont effectuées afin de s'assurer d'éliminer tous les déchets organiques. Les gaz de combustion sont refroidis jusqu'à 170°C pour minimiser la reformation d'organiques dans les émissions de cheminées.

- Les gaz sont ensuite traités par un équipement de contrôle de la pollution de l'air pour enlever les particules et les acides avant leur rejet dans la cheminée.
- L'incinération est efficace pour traiter le PCP, les HAP et les PCDDF, mais n'élimine pas les métaux présents dans les sols traités qui doivent être traités par une technique de stabilisation ou de solidification.
- De plus, un incinérateur mal conçu ou mal opéré peut être la source d'émissions atmosphériques préoccupantes d'un point de vue de santé publique. Il est donc essentiel de réaliser, sur une base régulière, un suivi des émissions atmosphériques afin de s'assurer que ces dernières respectent les normes édictées par les autorités compétentes ou les niveaux déterminés comme sécuritaires dans le cadre d'une évaluation des risques pour la santé.

b. Déchloration

- La déchloration chimique utilise des mélanges chimiques spéciaux pour traiter les sols, les boues, les sédiments ou les huiles. Une réaction chimique provoquée par les additifs supprime les atomes de chlore des polluants comme le PCP, les PCDDF.
- Elle est utilisée en combinaison avec d'autres technologies telles que la désorption thermique ou la bioremédiation

c. Bioremédiation

- Basée sur l'utilisation de microorganismes (bactéries, champignons, levures) ou des plantes pour solubiliser les contaminants présents dans le sol.
- Ces microorganismes vont dégrader les contaminants organiques en dioxyde de carbone (CO₂), en eau (H₂O) et en méthane (CH₄) en conditions anaérobies ou les convertir en matériaux nécessaires aux cellules.
- L'un des avantages de la bioremédiation est le faible coût des matières premières et la possibilité de traitement des sols *in-situ* à condition d'ajouter des nutriments dans le sol afin de permettre le développement de la biomasse.
- Cette technologie ne s'avère cependant pas efficace pour les sols fortement contaminés ou pour ceux contaminés de longues dates en raison de la forte adsorption du contaminant au sol.
- Les principales technologies utilisées dans la bioremédiation sont les suivantes : --
 - **La bioaugmentation** : introduction des cultures de microorganismes et des éléments nutritifs à la surface du milieu contaminés,
 - **La biofiltration** : l'utilisation d'un biofiltre pour traiter les émissions gazeuses
 - **La biostimulation** : stimulation l'activité des populations microbiennes indigènes
 - **Le compostage** : la fermentation des ordures ménagères organiques et des déchets verts afin de produire un compost réutilisable en agriculture
 - **La biolixiviation** : solubilisation des métaux lourds grâce à des bactéries acidophiles

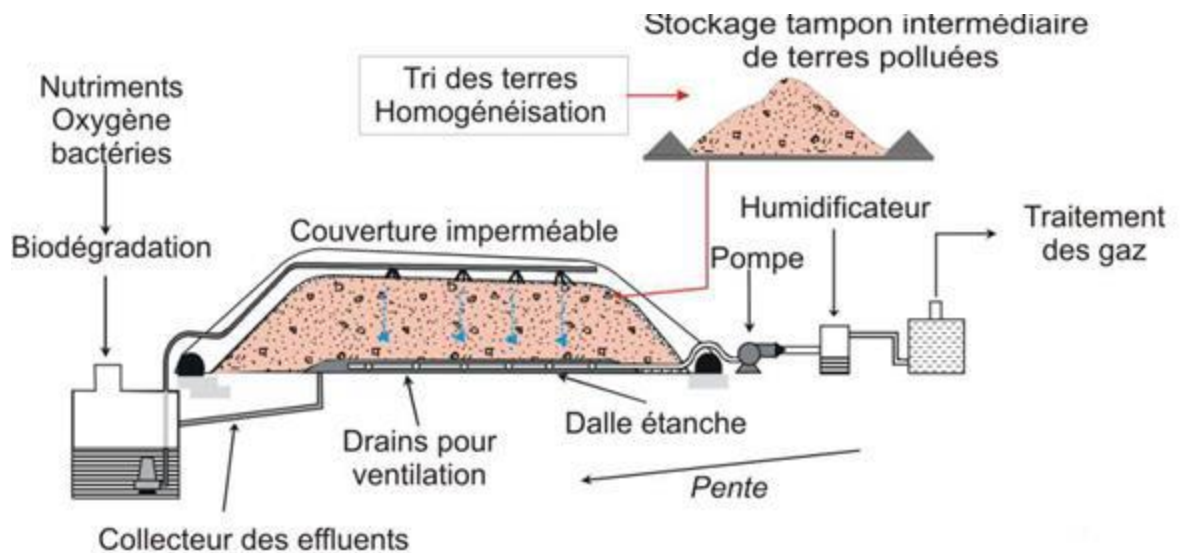


Figure 04 : technique de biolixiviation (tiré de Colombano et autres, 2010).

- **Phytoremédiation** : emploie des végétaux pour traiter le sol contaminé en surface par des molécules organiques ou des métaux. Elle regroupe toutes les technologies utilisant les plantes pour transformer, dégrader, concentrer, stabiliser ou volatiliser des polluants.

Les **technologies existantes ou en cours de commercialisation** comprennent :

- la **phytoextraction** : utilisation de plantes accumulatrices pour extraire, transporter et concentrer les polluants du sol dans les parties récoltables de la plante. Pour que cette technique soit efficace, il faut que le polluant soit disponible pour les racines et que celles-ci puissent le tolérer et l'absorber ;
- la **phytostabilisation** : utilisation des plantes pour réduire la biodisponibilité, la mobilisation ou le lessivage des polluants et, par conséquent, leur entrée dans la chaîne alimentaire ou les nappes phréatiques ;
- la **rhizofiltration** : utilisation des racines pour absorber, concentrer ou précipiter les polluants d'un effluent liquide.

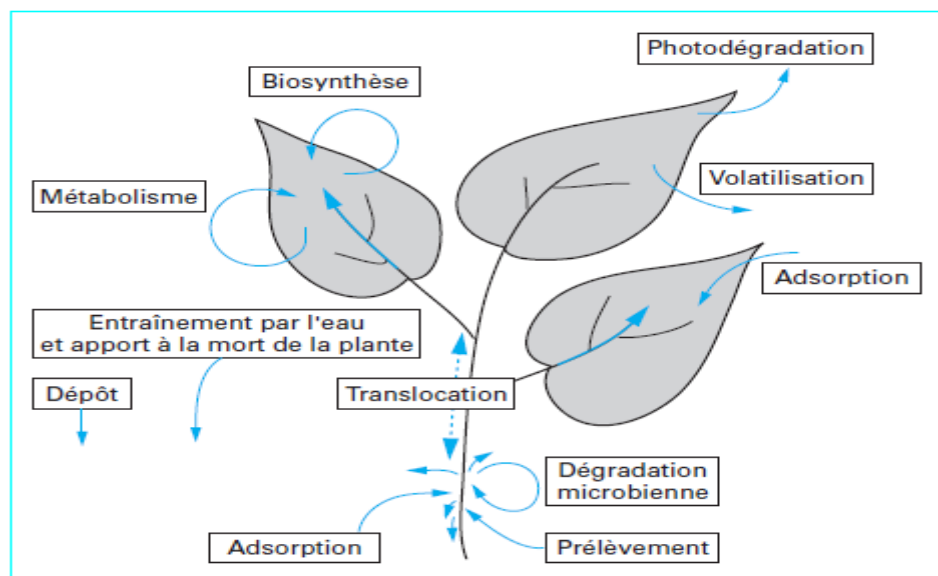


Figure 05 : principe de la phytoremédiation (VOGEL, 2001).

1.2.2. Techniques séparatives

a. Lavage des sols

- Le traitement des sols avec un solvant consiste, en d'autres mots, à laver les sols. Les contaminants adsorbés sur les sols s'accrochent aux solvants ou à l'eau, dépendamment du type de lavage, permettant aux sols d'être réutilisés sur le site.
- Ce procédé ne s'applique pas de façon in-situ. Le lavage des sols est une technique de traitement des sols de plus en plus employée dans le cas de contamination mixte.

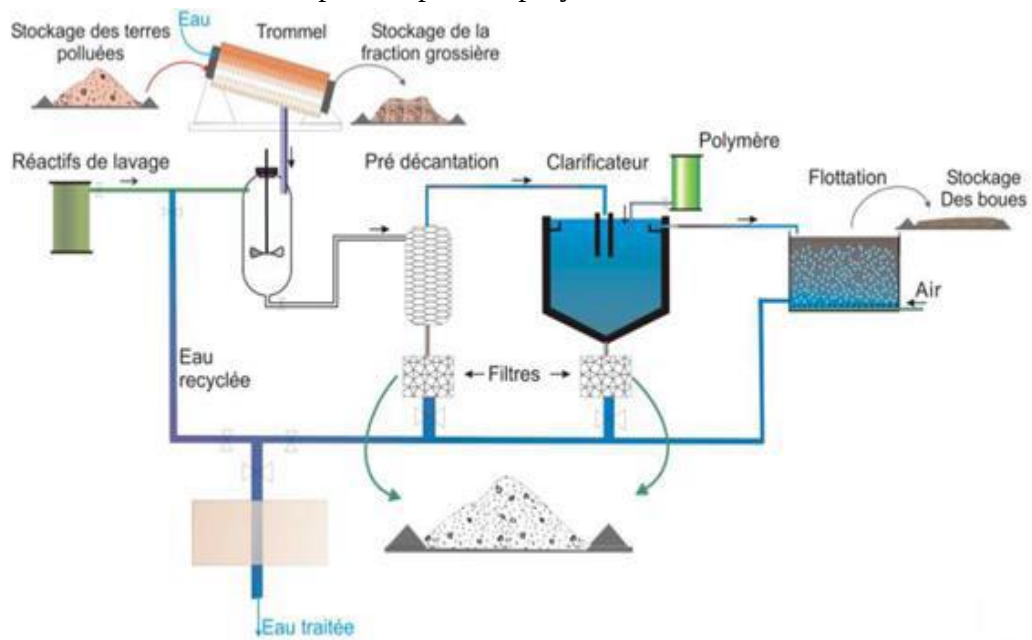


Figure 06 : Lavage des sols (tiré de Colombano et autres, 2010).

d. Désorption thermique :

- cette technique consiste en la dégradation des molécules des contaminants par l'effet de l'augmentation de la température.
- La technique de désorption thermique 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).

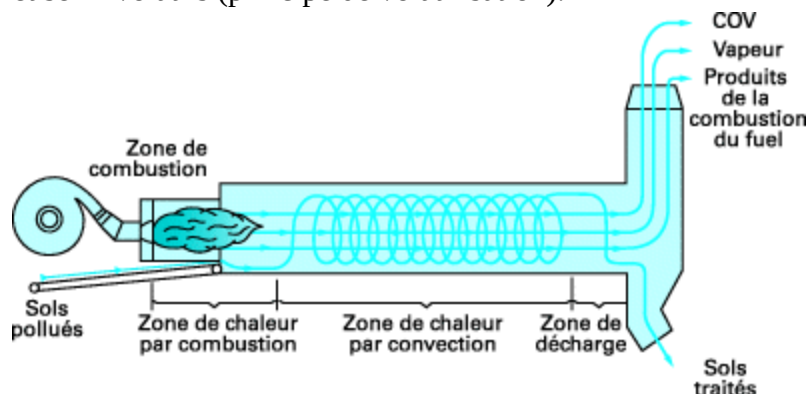


Figure 07 : Désorption thermique des sols pollués (Tiré de Roudier, 2005).

1.2.3. Techniques d'immobilisation des contaminants

a. Stabilisation et solidification

- C'est une stratégie de contrôle à long terme sont utilisées pour limiter l'exposition humaine.
- La zone contaminée peut être couverte par de la terre non-contaminée ou par des plantes adéquates. Des techniques plus sophistiquées peuvent être utilisées comme une barrière en argile composite, une géo-membrane (plastique) une couche de drainage, une couche protectrice, une couche de végétation ou un bouchon d'asphalte durci.
- Ces techniques peuvent limiter l'exposition humaine directe, permettant un meilleur ruissellement de l'eau et drainage, et de limiter les infiltrations d'eau de surface et la contamination des eaux souterraines.

b. Isolation physique

- La solidification désigne des techniques qui intègrent les déchets dans un matériau solide. La stabilisation désigne des techniques qui modifient chimiquement ou lient le matériau pour réduire sa mobilité.
- Ces techniques d'immobilisation sont les plus fréquemment utilisées pour le contrôle des contaminants inorganiques, tels que les composés métalliques utilisés sur des sites de traitement de bois.

1.3.Évaluation des risques liés aux sols pollués

- Il est possible d'appliquer aux pollutions du sol la démarche d'évaluation des risques sanitaires, même si ce milieu très particulier rend les études plus délicates encore que pour tout autre compartiment de l'environnement.
- Si les étapes d'identification des dangers, de définition des relations dose-réponse et de caractérisation des risques ne distinguent pas ce champ d'application des autres, l'évaluation de l'exposition humaine atteint ici une grande complexité et mobilise la plupart des moyens à mettre en œuvre.
- Il est alors demandé à l'évaluateur de fournir une estimation quantifiée des risques pour la santé humaine en fonction de la pollution existante et d'un aménagement donné du site. Il peut s'agir aussi de calculer les concentrations de substances chimiques qui peuvent être laissées dans le sol en fonction d'un niveau de risque sanitaire jugé admissible et d'un réaménagement donné des surfaces.

Références bibliographiques

ABDELLY, C. (2007). Bioremédiation/phytooremédiation.

BALLERINI (D.), GATELLIER (G.) et VOGEL (T.M.). – L'état de l'art du traitement biologique du sol. ADEME, Angers, France, 1998.

BERNHEIM, Y. (1997). Inventaire des techniques de réhabilitation des sites pollués. *Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés*, 4(J3980), J3980-1.

Colombano, S., Bataillard, P., Séré, G., Morel, J. L., & Rouvreau, L. (2014). Le sol en contexte de sites pollués. 1. Connaissance et remédiation.

Colombano, S, Saada, A, Guerin, V, Bataillard, P, Bellenfant, G, Beranger, S, Hube, D, Blanc, C, Zornig, C, Giradeau, I. (2010) *Quelles technique pour quels traitements-Analyse coûts-bénéfices* (Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 08POLA06 correspondant à la convention BRGM-MEEDDAT 2008 n°0001386). France, BRGM Géosciences pour une Terre durable, 403 p.

COOKSON (J.T.). – Bioremediation Engineering. McGraw Hill Publisher, New York, États-Unis, 1995.

Dufresne, M. (2013). *Les technologies de traitement des sols contaminés : Lesquelles sont durables?* (Doctoral dissertation, éditeur non identifié).

Gérin, M., Gosselin, P., Cordier, S., Viau, C., Quénel, P., & Dewailly, É. (2003). *Environnement et santé publique : Fondements et pratiques.* Édisem/Tec & Doc.

Juc, L. (2007). *Étude des risques liés à l'utilisation des pesticides organochlorés et impact sur l'environnement et la santé humaine* (Doctoral dissertation, Université Claude Bernard-Lyon I).

Morel, J. L. (2020). **Chapitre 8 :** Phytoremédiation des sols contaminés : des plantes pour guérir les sols. In *La chimie et la nature* (pp. 157-184). EDP Sciences.

NORRIS (R.D.), HINCHEE (R.E.), BROWN (R.), McCARTY (P.L.), SEMPRINI (L.), WILSON (J.T.), KAMPBELL (D.H.), REINHARD (M.), BOUWER (E.J.), BORDEN (R.C.), VOGEL (T.M.), THOMAS (J.M.) et WARD (C.H.). – Handbook of Bioremediation. Lewis Publishers, Ann Arbor, MI, États-Unis, 1994.

Reynier, N. (2012). *Décontamination des sols pollués par des métaux, du pentachlorophénol et des dioxines et furanes* (Doctoral dissertation, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).

Roudier, P (2005). Techniques de réhabilitation des sites et sols pollués-Fiches de synthèse. In Pack : Génie civil. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/desorption-thermique-in-situ-c5582niv10011.html> (Page consultée le 20 janvier 2013)

VOGEL, T. M. (2001). Bioremédiation des sols. *Techniques de l'ingénieur. Bioprocédés*, (J3982).