

## 1. Définition de la pollution du sol

La notion de pollution du sol désigne toutes les formes de pollution touchant n'importe quel type de sol (agricole, forestier, urbain...).

Un sol pollué devient à son tour une source possible de diffusion directe ou indirecte de polluants dans l'environnement, via l'eau, les envols de poussières, émanations gazeuses ou via une reconcentration et transfert de polluants par des organismes vivants (bactéries, champignons, plantes à leur tour mangés par des animaux).

Un sol est dit pollué lorsqu'il contient une concentration anormale de composés chimiques potentiellement dangereux pour la faune et la flore.

Un polluant se définit comme un altéragène biologique, physique ou chimique, qui au-delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions développe des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou de l'environnement en général.

Autrement dit, la pollution du sol est comprise comme altération du biotope\* constitué par l'humus (ou tous autres types de sols) par l'introduction de substances toxiques, éventuellement radioactives ou d'organismes pathogènes entraînant une perturbation plus ou moins importante de l'écosystème.

Au sens large, un site pollué est défini comme un site présentant un risque pérenne, réel ou potentiel, pour la santé humaine ou l'environnement du fait d'une pollution résultant d'une activité actuelle ou ancienne [6].

Selon le polluant et le contexte, ses impacts seront :

- Directs ou indirects
- Immédiats ou différés

En effet, les substances elles-mêmes peuvent être directement nuisibles pour les plantes et dans certains cas aussi directement pour les animaux et les êtres vivants.

D'autre part, ces composés peuvent être enlevés du sol par lessivage et parvenir dans la nappe phréatique et dans les eaux de surface.

La pollution du sol influence tôt ou tard la qualité de l'eau potable.

Les polluants du sol peuvent apparaître de différentes manières.

Une grande partie des composés qui ont une influence sur les sols et sur les organismes qu'ils contiennent :

Provient directement de l'air par déposition sèche.

Arrivent avec les précipitations par déposition humide.

Les polluants peuvent aussi être introduits lorsqu'il y'a des inondations et lorsqu'on alimente les champs avec les eaux polluées ou des eaux de rejet communales.

Certains polluant s'accumulent dans les boues et aussi dans les stations d'épuration, de telles boues ne peuvent plus être utilisées par exemple comme engrais.

Le sol est une ressource très faiblement renouvelable au sens où sa dégradation peut être rapide (quelques années ou décennies) alors qu'il lui faut plusieurs milliers d'années pour se former et se régénérer.

### **1.1. Les formes de pollution des sols**

En fonction du mode d'arrivée des polluants au sol et de l'étendue des pollutions, on distingue deux grandes formes de pollution :

#### **a. Pollutions diffuses**

Elles impliquent des polluants à faibles concentrations sur de grandes surfaces. Elles proviennent généralement : d'épandages de produits solides ou liquides (emploi d'engrais ou de pesticides en agriculture) ou de retombées atmosphériques d'origine urbaine, industrielle ou routière. Les pollutions diffuses par les pesticides sont les plus étudiées. La dispersion puis l'accumulation de substances dangereuses sur ces sols donne ainsi des « *sites uniformément contaminés* ».

#### **b. Pollutions ponctuelles ou accidentelles**

Elles sont caractérisées par la présence ponctuelle dans les sols et sous-sols de substances dangereuses qui proviennent généralement de déversements, de fuites ou de dépôt de déchets très localisés dans l'espace et dans le temps.

Elles sont caractérisées par de fortes concentrations sur une petite surface et donnent naissance à des « *sites localement contaminés* ».

## **2. Méthodologie de traitement des polluants non biodégradables**

### **2.1. Introduction**

Un polluant non biodégradable est une substance qui ne peut pas être décomposée ou transformée par les micro-organismes présents dans le sol dans des conditions naturelles.

Les caractéristiques principales d'un polluant non biodégradable sont :

- **Stabilité chimique élevée** : résistance aux attaques enzymatiques et à l'oxydation naturelle.
- **Persistance dans le sol** : accumulation dans les sols, sédiments ou eaux souterraines.

- **Mobilité variable** : certains polluants sont peu mobiles (métaux lourds), d'autres peuvent migrer dans les nappes phréatiques (certains solvants chlorés).
- **Non minéralisables biologiquement** : ils ne se transforment pas spontanément en CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ou ions simples.
- **Toxicité durable** : ils peuvent rester toxiques ou écotoxiques même à faible concentration. Les polluants non biodégradables courants sont :
  - **Les métaux lourds** : plomb (Pb), cadmium (Cd), chrome hexavalent (Cr<sup>6+</sup>), mercure (Hg), arsenic (As).
  - **Les composés organiques persistants (COP)** : polychlorobiphényles (PCB), dioxines, hydrocarbures aromatiques polycycliques lourds (HAP).
  - **Les solvants chlorés résistants** : trichloroéthylène (TCE), perchloroéthylène (PCE).
  - Les hydrocarbures lourds et dérivés pétroliers : huiles moteurs, bitumes, goudrons.

Contrairement aux polluants biodégradables, ces substances persistent dans l'environnement pendant de longues périodes, parfois plusieurs décennies, sans se dégrader de manière significative. Leur traitement nécessite donc des méthodes plus intensives, visant soit à **les extraire, les transformer, soit à limiter leur mobilité.**

L'objectif principal de la dépollution des sols est de **rétablir un état aussi proche que possible de l'état initial**, tout en évitant tout **transfert de pollution** vers d'autres compartiments (eau, air, sous-sol).

Les techniques utilisées doivent également répondre à plusieurs critères :

- éliminer ou neutraliser la pollution,
- limiter la consommation de ressources (eau, énergie, matériaux),
- éviter les émissions secondaires,
- réduire la quantité et la toxicité des résidus,
- favoriser le recyclage du sol traité.

Le choix de la méthode dépend de la nature du polluant (organique, inorganique, volatil, soluble...), de l'état du site (activité en cours ou arrêtée), du type de procédé (in situ, on-site ou off-site) ainsi que du temps disponible (les traitements in situ sont plus longs).

Pour les polluants non biodégradables, trois grandes approches sont classiquement utilisées, dont les traitements physico-chimiques, les traitements thermiques ainsi que les méthodes de confinement, auxquelles s'ajoutent, dans d'autres contextes, les techniques de bioremédiation pour les polluants biodégradables.

## 2.2. Les traitements physico-chimiques

Les traitements physico-chimiques visent à extraire, séparer, fixer, ou neutraliser les polluants présents dans le sol. Ils reposent sur des processus mécaniques, physiques ou chimiques, appliqués le plus souvent à des sols excavés.

#### a. Traitements physiques

Les principales techniques physiques sont :

- **Le lavage des sols** : injection d'eau ou de solutions tensioactives pour extraire les polluants vers une phase liquide, suivie d'un traitement de l'effluent.
- **L'extraction par air ou venting** : extraction de composés volatils en injectant ou aspirant de l'air.
- **L'extraction électrocinétique** : migration des ions métalliques sous l'effet d'un courant électrique entre deux électrodes.

Ces procédés permettent de traiter efficacement les sols granulaires et certains sols fins.

#### b. Traitements chimiques

Les traitements chimiques consistent à introduire un réactif permettant de dégrader les polluants (oxydation chimique, réduction...), de les immobiliser (précipitation, complexation, stabilisation) ou de les extraire (lixiviation, extraction par solvants organiques).

L'extraction par solvant est l'une des techniques les plus performantes pour les polluants organiques persistants.

### 2.3. Les traitements thermiques

Les traitements thermiques permettent de détruire ou de vaporiser les polluants par chauffage du sol. Ils sont particulièrement adaptés pour les composés organiques volatils ou semi-volatils.

Deux grandes méthodes existent :

#### a. Chauffage direct

Le sol est chauffé en présence d'oxygène, souvent à des températures proches de 1000 °C. Les polluants organiques sont oxydés en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O.

**Avantages** : destruction complète.

**Inconvénients** : coûts élevés et perte des propriétés agronomiques du sol.

#### b. Chauffage indirect

Le sol est placé dans une chambre étanche, chauffée à ~800 °C sans contact direct avec la flamme. Les polluants sont vaporisés puis traités séparément.

C'est une méthode adaptée quand on veut limiter les émissions ou les réactions chimiques incontrôlées.

Ces technologies sont souvent réalisées **off-site**, dans des fours spécialisés, après excavation et préparation du sol (séchage, tamisage).

## 2.4. Les méthodes de confinement

Le confinement n'élimine pas la pollution : il vise à **empêcher sa migration** et à **réduire son impact** sur l'environnement et la santé humaine.

Il est utilisé lorsque :

- la pollution est trop profonde,
- les volumes de sol sont très importants,
- la dépollution est techniquement ou économiquement impossible.

Trois types de confinement existent :

### a. Confinement de surface

Installation de barrières imperméables (géomembranes, couches d'argile, couvertures étanches) pour empêcher l'infiltration d'eau et limiter la diffusion des polluants.

### b. Confinement vertical

Construction de parois étanches (béton, bentonite, mortiers spéciaux) pour éviter la migration latérale des polluants vers les sols voisins ou les nappes.

### c. Confinement horizontal profond

Mise en place d'une barrière étanche en profondeur pour isoler la zone contaminée des nappes phréatiques.

## 3. Procédés In situ, on site et hors site

Dans le traitement des sols contaminés, le choix du procédé dépend de la nature du polluant, de la profondeur de contamination et de la disponibilité des ressources. Les procédés sont classés en trois grandes catégories :

### 3.1. In situ

Les procédés in situ sont réalisés directement dans le sol sans excavation. L'avantage principal est de limiter l'impact environnemental et de réduire les coûts liés au transport des sols. Ces techniques peuvent inclure :

- L'injection d'oxygène ou d'air pour stimuler la bioremédiation aérobie.

- L'injection de solutions chimiques pour neutraliser ou immobiliser les polluants.
- Le lavage du sol sur place pour transférer les polluants vers des points de récupération.

Ces méthodes sont particulièrement adaptées aux sites encore en activité ou aux sols profonds, mais elles nécessitent des temps de traitement plus longs et un suivi rigoureux de l'oxygénation, du pH et de l'humidité du sol.

### **3.2. On site**

Les procédés on site impliquent l'excavation des sols contaminés, leur traitement sur le site même, puis leur remise en place. Cette approche permet un contrôle plus précis des conditions de traitement (température, humidité, ajout de nutriments) et est adaptée aux sols fortement contaminés. Les méthodes typiques incluent :

- Le lavage mécanique ou chimique.
- Les biopiles et systèmes de compostage contrôlé.
- Les traitements thermiques à petite échelle.

### **3.3. Hors site**

Les procédés hors site (ou ex situ) nécessitent le transport des sols vers des installations spécialisées. Ils offrent le maximum de contrôle et permettent l'application de technologies sophistiquées comme :

- L'incinération ou le traitement thermique intensif.
- L'extraction chimique avancée avec solvants ou réactifs spécifiques.
- Les traitements biologiques dans des installations optimisées.

Le choix entre ces procédés dépend de la rapidité souhaitée, des coûts, de l'ampleur de la contamination et des contraintes logistiques.

## **4. Traitement biologique par aération du sol**

Le traitement biologique par aération du sol, ou bioremédiation aérobie in situ, consiste à stimuler l'activité microbienne naturelle en améliorant l'apport d'oxygène. Cette technique est efficace pour dégrader partiellement certains polluants organiques persistants et pour limiter leur mobilité.

### **4.1. Principe de la méthode**

Le sol contient naturellement des microorganismes capables de transformer les polluants. L'injection d'air ou d'oxygène favorise :

- La dégradation partielle des polluants organiques.
- La transformation chimique de certains métaux.
- La production de substances intermédiaires moins toxiques.

#### **4.2. Méthodes utilisées**

- Injection d'air ou d'oxygène à travers des tuyaux perforés.
- Extraction et traitement de l'air chargé en vapeurs toxiques par filtration sur charbon actif.
- Mélange mécanique du sol pour améliorer la circulation de l'air et la porosité.

#### **4.3. Avantages et limites de la méthode**

- Technique respectueuse de l'environnement et peu coûteuse en énergie.
- Efficace uniquement pour les polluants partiellement biodégradables et les sols poreux.
- Processus long nécessitant un suivi régulier de l'humidité et de l'oxygénation.

### **5. Biopile**

La biopile est une méthode ex situ où les sols excavés sont traités dans des tas contrôlés. Cette technique optimise la bioremédiation grâce à une aération et un apport de nutriments adaptés.

#### **5.1. Principe de la biopile**

Les sols sont disposés sur des membranes étanches pour éviter la contamination des nappes phréatiques. L'air est injecté par des tuyaux perforés et des amendements nutritifs (azote, phosphore, carbone) stimulent l'activité microbienne.

#### **5.2. Étapes de traitement**

- Préparation du sol : tamisage et homogénéisation.
- Formation des tas : implantation des systèmes d'aération.
- Suivi du traitement : contrôle de l'humidité, température, nutriments et polluants.
- Réintégration : une fois dépollué, le sol peut être remis en place ou réutilisé.

### **5.3. Avantages et limites de la biopile**

- Contrôle optimal des paramètres de traitement.
- Convient aux volumes importants de sol.
- Nécessite excavation et transport, et l'efficacité pour les polluants inorganiques est limitée.

## **6. Épandage contrôlé**

L'**épandage contrôlé** est une technique simple et peu coûteuse pour traiter les sols faiblement contaminés. Elle consiste à étaler le sol sur une surface plane pour maximiser l'action des processus naturels.

### **6.1. Principe de l'épandage contrôlé**

L'étalement en couches minces favorise :

- L'aération et l'oxygénation du sol.
- L'activité microbienne et la dégradation partielle des polluants.
- L'évaporation des composés volatils et la photodégradation.

### **6.2. Étapes de l'épandage contrôlé**

1. Préparation de la surface avec barrières pour protéger les nappes phréatiques.
2. Étaler le sol en couches de 10 à 30 cm.
3. Surveiller et ajuster humidité, aération et nutriments.
4. Réintégration ou réutilisation du sol après traitement.

### **6.3. Avantages et limites de l'épandage contrôlé**

- Simple, économique et adapté aux surfaces étendues.
- Convient surtout aux sols superficiels et faiblement contaminés.
- Rendement limité pour les polluants fortement persistants ou adsorbés.