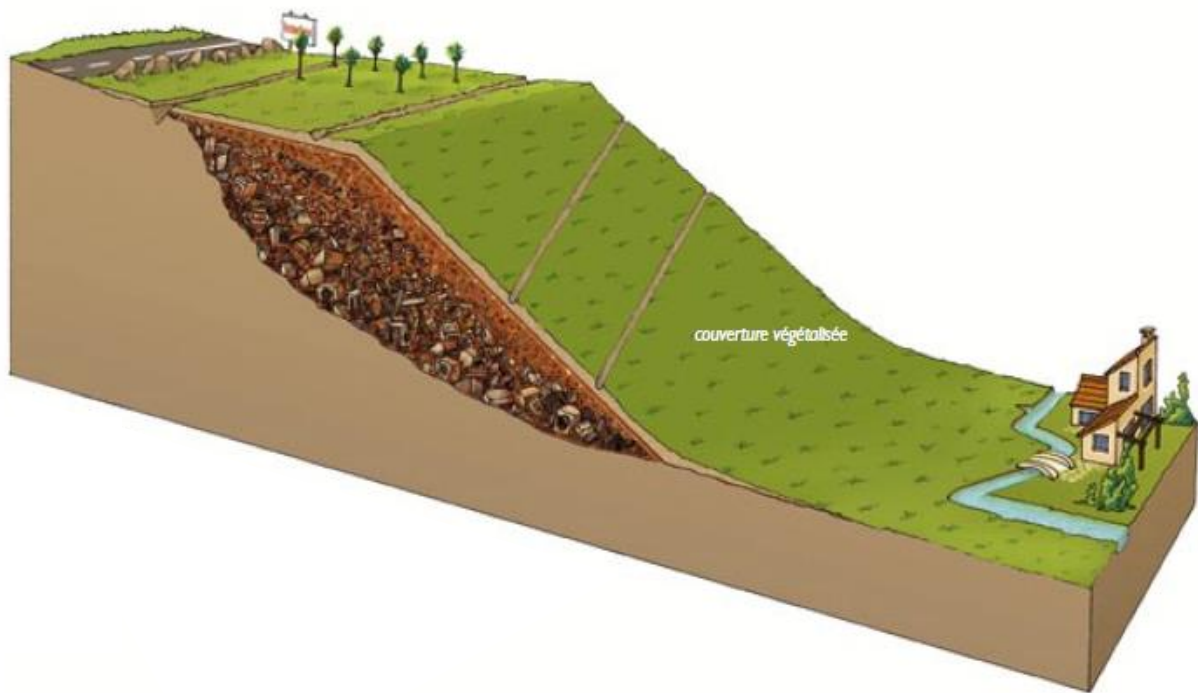


Moêz Smiri

## Dépollution et Réhabilitation des Sites Pollués



# SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION A LA REHABILITATION DES SITES POLLUES .....	2
I. Définition d'un sol pollué .....	2
II. Origine de la pollution du sol .....	5
III. Qu'est ce que la dépollution des sols ?.....	5
IV. Quelques exemples de sites à risques.....	7
V. Les grandes catégories de sols pollués .....	7
VI. Principaux polluants du sol .....	8
VII. Quelles sont les principales composantes d'une pollution ?.....	8
VIII. Quel est le danger pour la santé et l'environnement ?.....	8
CHAPITRE 2. ORIGINES ET CARACTERISTIQUES DE LA POLLUTION DES SITES.....	10
I. Activités Polluantes .....	10
II. Propriétés des substances polluantes .....	10
III. Classification des différentes formes de pollution d'un Site .....	11
IV. Facteurs de Risques Associés à la pollution rencontrée .....	12
CHAPITRE 3. EVALUATION DES SITES POLLUES .....	14
I. Caractérisation de la pollution .....	14
II. Collecte et exploitation des données disponibles. ....	14
III. Investigation du site .....	14
IV. Diagnostic du site et la détermination des objectifs de la réhabilitation .....	14
V. Proposition pour la réhabilitation .....	15
VI. Coûts des études de diagnostic .....	15
CHAPITRE 4. ÉTUDES DE SOL .....	16
I. Introduction .....	16
II. Réalisation d'une étude de sol .....	16
III. Phases d'une étude de sol .....	16
CHAPITRE 5. TECHNIQUES DE TRAITEMENT DE LA POLLUTION DES SOLS.....	18

I. Technologie de traitement .....	18
II. Techniques de mise en oeuvre .....	18
II.1. Le traitement in situ .....	19
II.2. Le traitement sur site après excavation des terres .....	19
II.3. Le traitement hors site .....	20
II.4. Le confinement .....	20
CHAPITRE 6. REHABILITATION DES DECHARGES .....	21
I. Impacts majeurs des décharges sur l'environnement .....	21
II. Premiers terrassements .....	22
III. Remodelage du massif de déchets .....	24
IV. Couverture et végétalisation .....	27
V. Travaux de finition .....	32
CHAPITRE 7. CONCEPTS DE TRAITEMENTS BIOLOGIQUES .....	35
I. Micro-organismes .....	35
II. Biodégradation .....	36
II.1. Biodégradation aérobie.....	37
II.2. Biodégradation anaérobie .....	38
II.2.1. Utilisation du contaminant comme donneur d'électrons .....	38
II.2.2. Utilisation du contaminant comme accepteurs d'électrons .....	41
II.3. Intérêts et inconvénients des biodégradations aérobie et anaérobie.....	41
III. Métabolisme et cométabolisme.....	42
IV. Biostimulation .....	43
V. Bioaugmentation .....	43
VI. Caractéristiques des procédés biologiques .....	43
CHAPITRE 8. PROCEDES DE TRAITEMENT BIOLOGIQUE.....	45
I. Introduction .....	45
II. Bioventing (ventilation, tirage d'air) .....	45
III. Biosparging (lavage).....	45
IV. Bioslurping .....	45
V. Biotertre (Biopile).....	46
VI. Phytoremédiation .....	46
VI.1. Phytoextraction .....	47
VI.2. Phytostabilisation .....	47
VI.3. Phytodégradation/ Phytotransformation .....	47

VI.4. Phytovolatilisation/ Phytostimulation .....	47
VI.5. Rhizodégradation : Dégradation des polluants par les racines .....	47
VII. Landfarming (aération).....	48
VIII. Utilisation de procédés de traitement biologique.....	48
VIII.1. Bioremediation .....	48
VIII.2. Phytoremediation .....	49
CHAPITRE 9. PROCEDES DE TRAITEMENT PHYSICO-CHIMIQUE .....	59
I. Introduction .....	50
II. Lavage (méthodes chimiques).....	50
II.1. Principe .....	50
II.2. Description.....	50
II.3. Applicabilité .....	52
II.4. Avantages, inconvénients et facteurs limitants .....	52
III. Solidification-Stabilisation (méthodes physiques par piégeage de la pollution) .....	53
III.1. Principe .....	53
III.2. Description .....	53
III.2.1. Mélange mécanique in situ (deep soil mixing).....	53
III.2.1. Injection forcée (jet grouting) .....	54
III.2.1.1. Solidification.....	55
III.2.1.2. Stabilisation.....	56
III.3. Applicabilité.....	56
III.4. Avantages, inconvénients et facteurs limitants .....	56
CHAPITRE 10. PROCEDES DE TRAITEMENT THERMIQUE .....	58
I. Introduction .....	58
II. La désorption Thermique .....	58
II.1. Principe .....	58
II.2. Description .....	58
II.3. Applicabilité .....	58
II.4. Avantages, inconvénients et facteurs limitants .....	60
III. La vitrification .....	61
III.1. Principe.....	61
III.2. Description .....	61
III.3. Applicabilité .....	61
III.4. Avantages, inconvénients et facteurs limitants .....	62

## INTRODUCTION

Les pollutions deviennent des phénomènes de plus en plus prévalents. La contamination de la chaîne trophique est maintenant clairement un facteur de risque pour l'équilibre des écosystèmes, l'agriculture, la production animale et la santé humaine.

La **dépollution** désigne l'élimination des pollutions et des contaminations des milieux ambiants tels les sols, les nappes phréatiques, les sédiments ou les eaux de surface. L'objectif consiste en une protection générale de la santé et de l'environnement.

Les objectifs de dépollution sont :

- ii) Objectifs quantitatifs : portent sur la quantité de sol ou d'eau ou de sédiments à traiter.
- ii) Objectifs qualitatifs : Respecter une norme minimale (la meilleure qualité possible), ou plus proactivement viser à retrouver le bon état écologique.

L'objectif de « bonne qualité » est généralement basé sur un état de référence ou "milieu de référence". Cet environnement considéré comme n'étant pas affecté par les activités du site étudié, mais situé dans la même zone géographique et dont les caractéristiques (géologiques, hydrogéologique, climatiques,...) sont similaires à celles du site pollué.

L'analyse comparative de ces deux situations doit permettre de distinguer les pollutions attribuables au site, des pollutions anthropiques n'impliquant pas le site et des substances naturellement présentes dans les milieux. Ce dernier doit parfois être modélisé à partir d'études de **l'écopotentialité** du site (qui précise ce qui « devrait être » en matière de richesse et d'état de la faune, flore, fonge et des écosystèmes). Des opérations de **génie écologique**, et d'éventuelles **réintroductions** permettent alors de retrouver cet état.

## **CHAPITRE 1 : INTRODUCTION A LA REHABILITATION DES SITES POLLUES**

Ensemble d'opérations (réaménagement, traitement de dépollution, confinement (éviter la dispersion dans l'environnement de matériel biologique indésirable), résorption des déchets, contrôles institutionnels...) effectuées en vue de rendre un site apte à un usage donné.

La réhabilitation des sites pollués - ou friches industrielles - est une nécessité pour l'environnement, la santé publique et la santé au travail, même si son coût financier reste élevé.

La réhabilitation peut intervenir dans différents cas : (i) lors de l'évolution normale d'une activité industrielle, (ii) en cas de changement d'activité, (iii) ou encore dans le cas d'un "site orphelin", c'est-à-dire dont les propriétaires sont défaillants.

La fiche préconise une démarche de prévention en plusieurs points :

- i) Procéder à une analyse approfondie des risques
- ii) Limiter la pollution dans l'espace
- iii) Éloigner les opérateurs de la pollution
- iv) Utiliser des dispositifs de captage de cette pollution
- v) Proscrire le travail isolé
- vi) Définir un rythme de travail compatible avec les exigences requises pour une tâche soignée et précise
- vii) Choisir des équipements de protection individuelle adaptés

### **I. Définition d'un sol pollué**

Les sols constituent des écosystèmes complexes, supports de nombreux organismes biologiques qui se retrouvent exposés à la pollution. Les microorganismes du sol et les plantes sont les premiers touchés et constituent les premiers maillons de la chaîne alimentaire qui peut à son tour être contaminée. De plus, les sols ne sont pas des ressources renouvelables, ce qui oblige à réutiliser des sites contaminés pour répondre aux besoins croissants de la société humaine.

- Un sol pollué est un sol qui, du 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. Il existe également autour de certains sites des contaminations dues à des retombées de rejets atmosphériques accumulés au cours des années voir des décennies. La pollution présente un caractère concentré, à savoir des teneurs souvent élevées et sur une surface réduite (quelques dizaines d'hectares au maximum). Elle se différencie des pollutions diffuses, comme celles dues à certaines pratiques agricoles ou aux retombées de la pollution automobiles près des grands axes routiers.

On estime qu'il existe 3 millions de sites pollués dans l'Union européenne et le volume de sédiments issus du curage des cours d'eau représenterait entre 100 et 200 millions de mètres cubes chaque année. Les problèmes posés par les sites et sols pollués et leurs impacts sanitaires potentiels sont d'autant plus cruciaux que le nombre de friches industrielles ne cesse de croître. Ces contaminations découlent, dans leur immense majorité, des activités humaines.

L'activité industrielle en Tunisie est diversifiée et s'est régulièrement accrue au cours des vingt dernières années. Les activités les plus importantes, du fait de leur taille et de leurs impacts sur l'environnement, sont : l'agro-alimentaire, l'extraction minière, la transformation des phosphates, l'industrie des matériaux de construction, la production d'énergie et l'industrie du textile. D'autres activités de moindres importances telles que le tannage du cuir, les petites industries mécaniques et chimiques .... Ces petites industries qui sont dispersées et de ce fait difficiles à contrôler, sont à l'origine de fortes charges polluantes. Toutefois les données relatives à la distribution des sites pollués, de la nature du polluant et de sa charge ne sont pas encore disponibles à notre connaissance.

Cette activité se déroule principalement autour des grandes agglomérations urbaines (Tunis, Bizerte et Menzel Bourguiba, Sfax, Gabès, Gafsa et Kasserine) et le long des côtes où est concentré environ 80% de la population. En fait, 13% des unités industrielles sont considérées polluantes (voir carte).



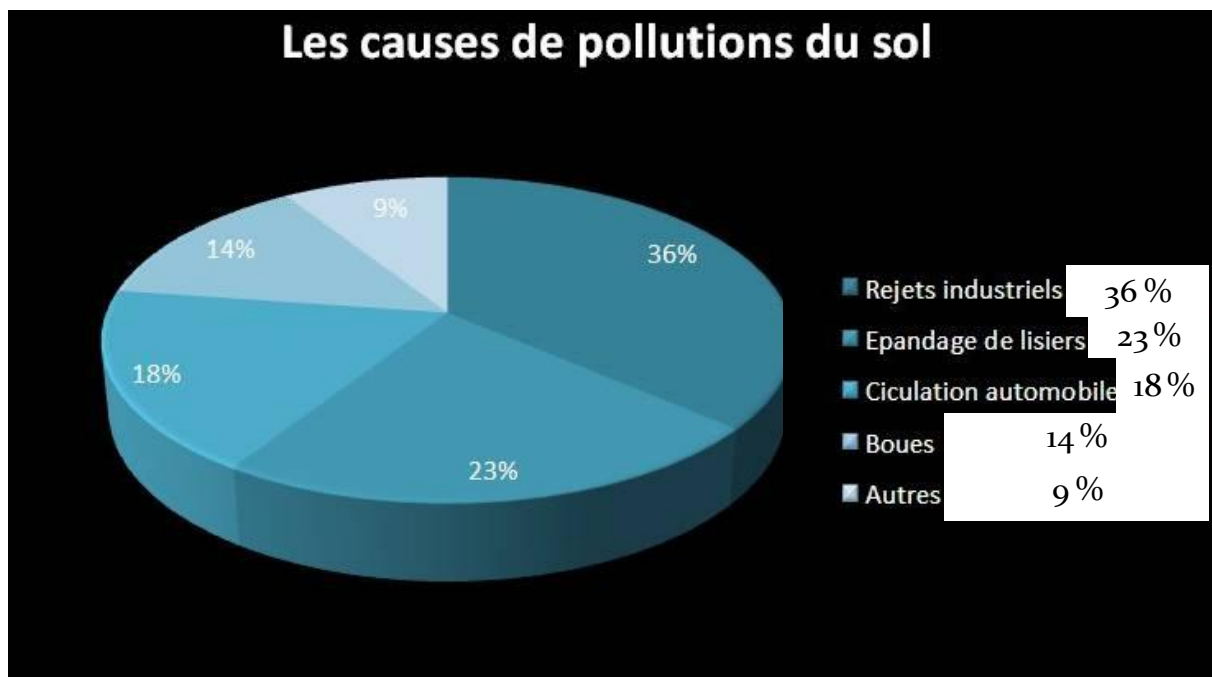
■ **LES POLES INDUSTRIELS** (Source : <http://www.environnement.nat.tn>)



## II. Origine de la pollution du sol

La pollution des sols provient le plus souvent :

- d'anciennes pratiques sommaires d'élimination des déchets
- de fuites ou d'épandage de produits chimiques (accidentels ou pas)
- de retombées de rejets atmosphériques accumulés au cours des dernières décennies



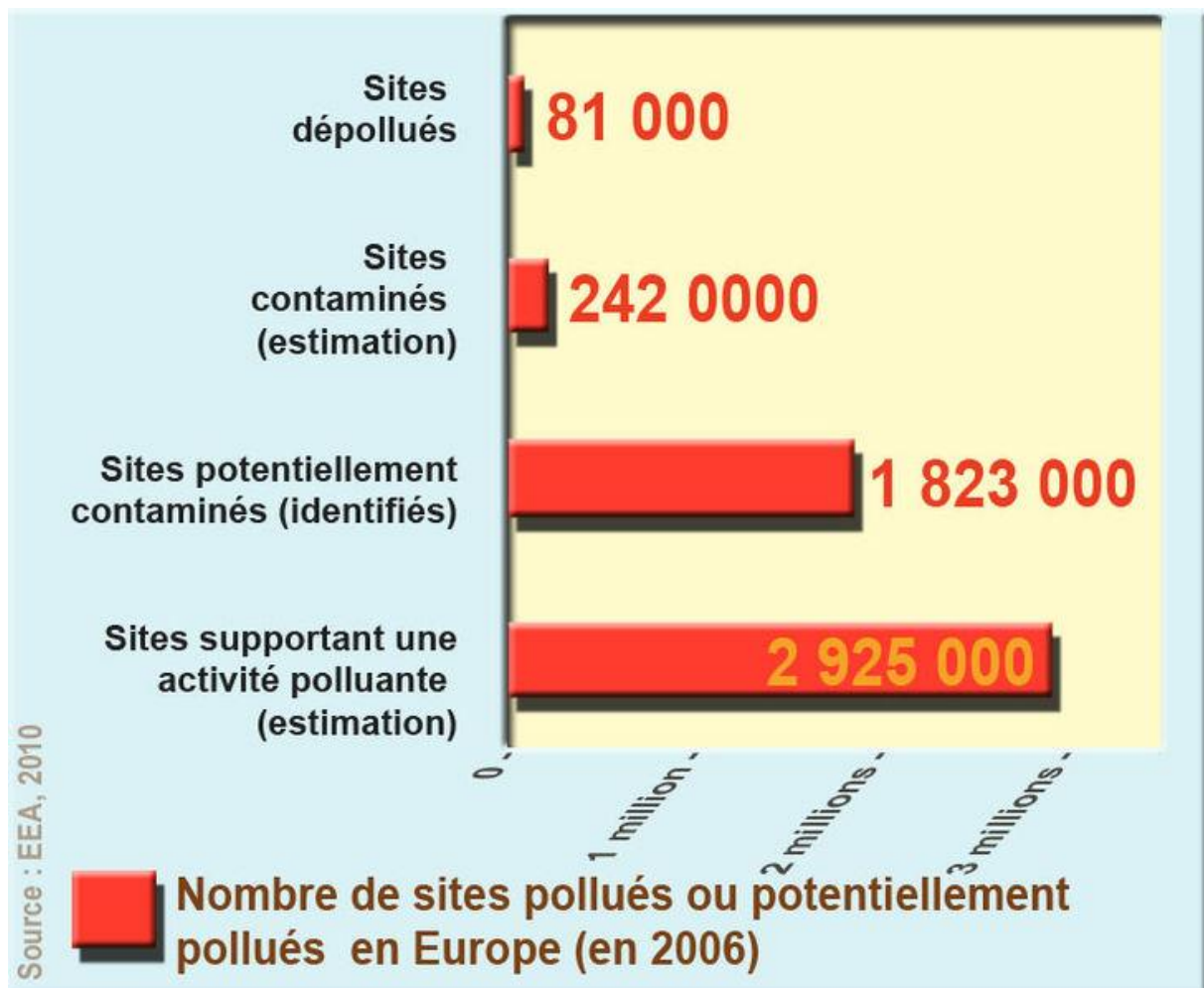
## III. Qu'est ce que la dépollution des sols ?

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.

Il s'agira par exemple de :

- Empêcher la diffusion d'un polluant dans l'environnement et une aggravation de la situation par d'éventuelles synergies avec d'autres polluants ou de nouveaux polluants

- Améliorer la santé publique et la qualité de vie
- Reconstruire la ville sur elle-même ou sur des friches industrielles pour limiter la périurbanisation et l'étalement urbain
- Restaurer et protéger l'environnement, restaurer la trame verte et bleue
- Restaurer des terres pour les rendre à la nature, l'agriculture ou à la sylviculture
- Améliorer le cadre de vie
- Adapter l'état d'un site à un nouvel usage (par exemple: transformer une friche industrielle en école, hopital, zone d'habitations...).



#### **IV. Quelques exemples de sites à risques**

Devant les pollutions, certaines zones sont particulièrement sensibles, telles que celles qui reçoivent des engrais depuis de longues durées, celles qui sont proches des exploitations minières, ainsi que les terrains d'épandages, et les zones proches des voies ferrées, des routes et des grandes villes.

Quelques exemples de sites à risques :

- usines à gaz
- pressings
- ateliers de mécanique
- ateliers de traitement de surface
- casses automobiles, garages automobiles
- imprimeries
- sites ayant abrité des dépôts d'hydrocarbures ou substances dangereuses
- stations-services
- sites chimiques et pharmaceutiques

#### **V. Les grandes catégories de sols pollués**

La nature et l'origine des pollutions sont très variées (industrie, agriculture, transport, rejets domestiques, etc.). Parmi les pollutions localisées pour lesquelles on dispose d'informations chiffrées, on peut distinguer :

- les pollutions accidentelles, qui proviennent d'un déversement ponctuel dans le temps de substances polluantes,
- les pollutions chroniques correspondant à des apports de longues périodes, qui ont souvent pour origine des fuites sur des conduites ou autres réseaux enterrés, sur des cuvettes de stockage non parfaitement étanches, etc.

Les sites connus sont en général :

- des dépôts de déchets réalisés sans respect des règles techniques en vigueur et pour lesquels une pollution des eaux souterraines a été constatée.

- des sols ou des nappes pollués par des retombées, des infiltrations ou des déversements de substances liés à l'activité d'une installation industrielle ou à un accident de transport.
- des dépôts de produits dangereux tels que ceux qui peuvent être occasionnés lors des cessations d'activité.

## **VI. Principaux polluants du sol**

Les familles de produits susceptibles de se retrouver dans le sol sont :

- inorganiques : métaux, métalloïde, sels, acides
  - organiques : polluants carbonés, comme la matière organique (lisier, boues d'épuration, etc.), les organochlorés (DDT) ou encore les polychlorobiphényles (PCB).
  - organiques pathogènes : bactéries, virus, parasites
  - radionucléides : radioéléments naturels présents dans le milieu comme le potassium <sup>40</sup>, le polonium <sup>210</sup>, de l'uranium <sup>238</sup> et du thorium <sup>232</sup>.
- les 10 principaux polluants constatés seuls ou en mélange sont : Hydrocarbures, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), Plomb, Zinc, Solvants halogénés (produits chlorés), Chrome, Cuivre, Arsenic, Nickel et Cadmium.

## **VII. Quelles sont les principales composantes d'une pollution ?**

Elles sont au nombre de 3 :

- la source qui peut être primaire (produits, résidus à l'origine de la pollution), ou secondaire (milieu dans lequel la pollution s'est accumulée)
- le transfert constitué par les voies de propagation de la pollution
- les cibles que sont les récepteurs pouvant être affectés par la pollution (homme, milieux, biens matériels)

## **VIII. Quel est le danger pour la santé et l'environnement ?**

La pollution des sols peut entraîner des dangers pour la santé publique et la qualité des eaux souterraines et de surface, sur une échelle temps plus ou moins importante.

Les sols pollués peuvent présenter un risque :

- à court ou moyen terme pour les eaux souterraines, les eaux superficielles et les écosystèmes,
- à moyen et long terme pour les populations (les risques pour la santé résultent le plus souvent d'une exposition de longue durée pouvant équivaloir à une vie entière).
  - Il est rare qu'un site pollué crée des dangers et des risques immédiats pour les populations avoisinantes. Dans ce cas, des mesures d'urgence doivent être adoptées telles que le confinement des substances, la pose d'une clôture ou l'enlèvement des produits, etc.

## CHAPITRE 2. ORIGINES ET CARACTERISTIQUES DE LA POLLUTION DES SITES

Après plus d'un siècle de forte industrialisation et de consommation excessive, les habitants de la planète ressentent les conséquences des dépotoirs encombrés, des lieux contaminés, des pluies acides ainsi que de l'air et de l'eau pollués. À l'instar des activités industrielles, les activités quotidiennes d'une personne – tels que la conduite, le jardinage et l'utilisation d'énergie à la maison ainsi que l'utilisation d'eau – représentent des sources principales de déchets et de pollution.

### I. Activités Polluantes

Liste des activités qui rentrent dans la catégorie des activités polluantes et soumises à la TGAP (taxe générale sur les activités polluantes):

- ▶ **Tout exploitant** d'une installation d'élimination par stockage ou par incinération de déchets ménagers et assimilés
- ▶ **Tout exploitant** d'une installation d'élimination des déchets industriels spéciaux
- ▶ **Tout exploitant** d'une installation émettant dans l'air des substances polluantes
- ▶ **Toute personne** qui livre et/ou utilise des lubrifiants, huiles et préparations lubrifiantes, des préparations pour lessives, y compris des préparations auxiliaires de lavage, ou des produits adoucissants ou assouplissants pour le linge, des matériaux d'extraction
- ▶ **Tout exploitant** d'un établissement industriel ou commercial ou d'un établissement public à caractère industriel et commercial dont certaines installations sont soumises à autorisation ou dont les activités font courir, par leur nature ou leur volume, des risques particuliers à l'environnement
- ▶ **Toute personne** qui a émis ou fait émettre des imprimés papiers.

### II. Propriétés des substances polluantes

Les substances polluantes se caractérisent par 4 propriétés qui sont les suivantes :

**Toxicité** : elles présentent un ou plusieurs impacts prouvés sur la santé humaine

**Persistance dans l'environnement** : ce sont des molécules résistantes aux dégradations biologiques naturelles.

**Bioaccumulation** : ce sont des molécules qui s'accumulent dans les tissus vivants et dont les concentrations augmentent le long de la chaîne alimentaire.

**Transport longue distance** : de par leurs propriétés de persistance et de bioaccumulation, ces molécules ont tendance à se déplacer sur de très longues distances et se déposer loin des lieux d'émission.

### III. Classification des différentes formes de pollution d'un Site

Il existe 5 types de pollution essentiellement:

- **La pollution radioactive:** c'est la pollution provoquée par les déchets nucléaires. 90% des déchets radioactifs ont une durée de vie qui n'excède pas quelques jours, mais d'autres, comme l'uranium 238 (utilisé à des fins commerciales ou militaires) ou le potassium 40 peuvent durer plus d'un milliard d'années.
- **La pollution chimique:** c'est celle qui est produite par les insecticides, les transports en commun. On la retrouve essentiellement dans l'eau et dans l'air. On peut y ajouter l'accumulation de gaz carbonique provoquée par la déforestation.
- **La pollution organique:** c'est l'ensemble des cadavres et des excréments. En quantité raisonnable, ils sont nécessaires à l'écosystème, car ils sont recyclés par la nature. En quantité astronomique, comme c'est le cas dans les égouts..., ils sont une source de pollution.
- **La pollution due aux hydrocarbures** : que l'on trouve surtout dans le pétrole.
- **La pollution par les déchets solides:** des dizaines de tonnes de déchets déversées dans les océans par les paquebots de croisière aux milliers de bouteilles, mouchoirs, matières plastique, polymères... jetés dans la nature, la pollution par les déchets solides vient dénaturer gravement les eaux et les sols de la planète.