

CONSULTATION SUR PLACE

PRET

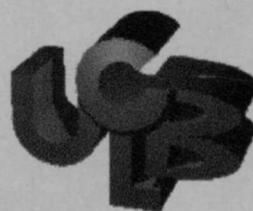
PEB

OUI

NON

NON

1428



## **DESS Informatique Documentaire**

### **Rapport de stage**

*Conception, rédaction d'un ouvrage scientifique et publicitaire  
pour A.T.E. :*

*« Guide d'aide à la décision pour le choix d'une technique de  
dépollution des sols »*

**François SERTOUR**

Sous la direction de

**Timothy VOGEL**

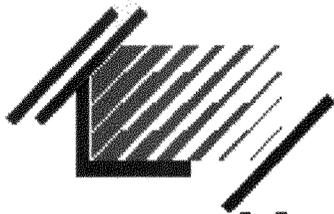
**Responsable de projets Recherche et Développement pour ATE-Rhodia**

BIBLIOTHEQUE DE L'ENSSIB



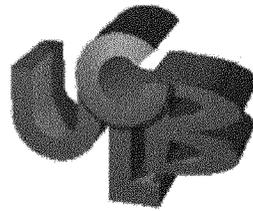
8133409

**1998**



**enssib**

Ecole Nationale Supérieure  
des Sciences de l'Information  
et des Bibliothèques



Université  
Claude Bernard  
Lyon I

## DESS Informatique Documentaire

### Rapport de stage

*Conception, rédaction d'un ouvrage scientifique et publicitaire  
pour A.T.E. :*

*« Guide d'aide à la décision pour le choix d'une technique de  
dépollution des sols »*

François SERTOUR



Sous la direction de

Timothy VOGEL

Responsable de projets Recherche et Développement pour ATE-Rhodia

1998

1998  
17/51  
28

**Titre :** *Conception, rédaction d'un ouvrage scientifique et publicitaire pour A.T.E. : « Guide d'aide à la décision pour le choix d'une technique de dépollution des sols ».*

**Auteur :** François SERTOIR

**Résumé :**

La société A.T.E., spécialiste et leader français de la dépollution des sols, souhaitait réaliser un ouvrage de référence dans son domaine ainsi qu'une base de données. Outil de communication à l'interne et à l'externe, véritable base de connaissance, sa sortie officielle est programmée pour le salon POLLUTEC. C'est tout le cheminement qui a précédé sa réalisation finale qui va être présenté dans ce rapport.

**Descripteurs :**

Livre, Scientifique, Chimie, Techniques de dépollution, Sols, Communication, Savoir-faire, POLLUTEC, Informatique, Polluants, Industrie, Environnement, Base de données.

**Abstract :**

The company A.T.E., leader in soil remediation in France, decided to write a reference book for use as a communication tool for A.T.E. (internal and external), knowledge database, its official publication is scheduled for POLLUTEC. All steps from conception to publication are presented here.

**Keywords :**

Book, Scientific, Chemistry, Soil remediation, soil, Communication, Know-how, POLLUTEC, Computer science, Pollutant, Industry, Environment, Database.

# Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Timothy Vogel (Tim) pour sa disponibilité et le réel investissement dont il a fait preuve à mon égard.



# SOMMAIRE



<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>5</b>
<b>2. PRÉSENTATION D’A.T.E.....</b>	<b>7</b>
2.1. CRÉATION ET IMPLANTATIONS .....	8
2.2. PRESTATIONS DE L’ENTREPRISE.....	9
2.2.1. <i>Département Etude et Ingénierie</i> .....	9
2.2.2. <i>Département Travaux</i> .....	10
2.2.3. <i>Département Recherche et Développement</i> .....	10
2.2.4. <i>Assurance Qualité / Qualifications</i> .....	11
2.3. UNE ÉQUIPE PLURIDISCIPLINAIRE POUR SATISFAIRE AUX EXIGENCES DES PRESTATIONS PROPOSÉES .....	11
2.3.1. <i>La pluridisciplinarité</i> .....	11
2.3.2. <i>Effectifs</i> .....	12
2.3.3. <i>Principaux dirigeants</i> .....	12
2.3.4. <i>Références commerciales</i> .....	13
<b>3. RECHERCHE ET COLLECTE DE L’INFORMATION .....</b>	<b>15</b>
3.1. DÉFINITION DES OBJECTIFS .....	16
3.1.1. <i>Objectifs d’A.T.E.</i> .....	16
3.1.2. <i>Objectifs du livre</i> .....	17
3.1.3. <i>Conclusion</i> .....	18
3.2. RECENSEMENT DES INFORMATIONS À RECUEILLIR.....	18
3.3. RECUEIL DE CES DONNÉES .....	19
3.3.1. <i>Connaissances générales</i> .....	20
3.3.1.1. <i>Données de chimie générale</i> .....	20
3.3.1.2. <i>Paramètres physico-chimiques</i> .....	20
3.3.2. <i>Savoir-faire A.T.E. : les connaissances internes</i> .....	20
3.4. CONCLUSION.....	21

<b>4. MISE EN FORME DE L'INFORMATION.....</b>	<b>22</b>
4.1. LES OBJECTIFS.....	23
4.2. LES CONTRAINTES.....	23
4.3. LA SOLUTION RETENUE.....	23
<b>5. CONCLUSION : UNE CONSERVATION ET TRANSMISSION DU SAVOIR-FAIRE.</b>	<b>26</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>29</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>33</b>

## 1. INTRODUCTION

L'environnement prend de plus en plus d'importance à l'échelle mondiale mais aussi dans la vie politique et économique française. Ce souci de préserver l'environnement est motivé par des exigences normées dans de nombreux pays. Ainsi, une étude d'impact est réalisée, avant l'installation d'une activité industrielle sur un site. Des études environnementales peuvent être exigées ou volontaires pendant le déroulement de l'activité, puis lors de la cessation de cette dernière. L'étude en phase finale précise les conditions de vente entre ancien et nouveau propriétaire, ainsi que la nécessité éventuelle de dépollution.

C'est dans ce contexte très favorable que la société A.T.E. a vu le jour et a pu suivre un tel développement. Si le marché de la dépollution stagne depuis quelques années, il est cependant fort probable qu'il croisse à nouveau si les directives européennes relatives aux déchets et à l'environnement sont mises en application rapidement.

Consciente que la communication tient une part importante dans le choix d'une société de dépollution, A.T.E. avait édité en octobre 1993 un premier ouvrage commercial sur les techniques de dépollution : « Descriptif des Techniques de Dépollution appliquées par la Société A.T.E. », par Pascal ROUDIER (Directeur Général de la S.A.). Cet ouvrage de 80 pages tiré à 1000 exemplaires, édité à compte d'auteur et distribué gratuitement auprès des institutions et clients, avait eu un très bon impact sur la société. Désireuse d'affirmer encore cette image de sérieux, A.T.E. a décidé de publier un livre scientifique de vulgarisation de la dépollution mais à caractère original. L'idée retenue était simple : concevoir et réaliser un ouvrage qui devienne une référence (interne et externe) dans le monde de la dépollution, comme l'avait été en son temps le premier livre. Le problème était de se distinguer des autres ouvrages traitant du sujet, tout en respectant un délai très court lié au salon POLLUTEC (salon professionnel sur la dépollution).

Cet ouvrage s'inscrit aussi dans un plan plus vaste de communication interne. En effet, l'ensemble des éléments rassemblés (données physico-chimiques, savoir-faire, ...) doivent pouvoir être utilisés dans une base de données générales de l'entreprise accessible par tous. C'est le deuxième pas avec la démarche qualité, vers une formalisation et une conservation du savoir faire de l'entreprise. A.T.E., de part sa rapide croissance et son rachat par Rhône-Poulenc est en pleine mutation. Elle évolue progressivement (et plus ou moins difficilement), du stade de la petite entreprise située à Meyzieu à une maison mère entourée de filiales mondiales nécessitant une gestion totalement différente des personnes mais aussi de l'information.

Après la présentation de la société A.T.E., le présent rapport s'articulera de manière concise autour de deux axes. Le premier est formé par le travail de recherche et la collecte de l'information, le deuxième par sa mise en forme dans l'ouvrage définitif. La conclusion élargira le sujet au problème plus général de la mutation d'A.T.E. à travers la gestion de son information, de sa communication interne et donc, de la conservation et transmission de son savoir-faire. Pour achever ce rapport, le livre, dans l'état d'avancement où il se trouve, est présenté dans sa globalité (sur support papier uniquement) en annexe.

*CHAPITRE II*

**Présentation d'A.T.E.**



## 2. Présentation d'A.T.E.

### 2.1. *Création et implantations*

Créé en octobre 1990 par Hervé Seguin, ATE a été rachetée à 80% par le groupe Rhône-Poulenc en 1995. Elle est rattachée à la branche environnement du groupe via Rhodia Eco Services (RES). Antipollution Techniques Entreprise (ATE) est une société anonyme au capital de 2 millions de FF dont le siège social est situé 17,rue du Périgord à Meyzieu (69).

Progressivement, un réseau régional a été développé afin d'assurer une rapidité d'intervention associée à un service de proximité. Ainsi sont nées :

- ↳ ATE Normandie,
- ↳ ATE Nord,
- ↳ ATE Méditerranée,
- ↳ ATE Est Strasbourg,
- ↳ ATE Ile de France.

De même, un réseau international en développement rapide sur l'Europe a été créé :

- ↳ ATE Bénélux (Gand),
- ↳ ATE CZ sro (Prague),
- ↳ ATE CZ Ostrava,
- ↳ ATE Slovakia (Bratislava),
- ↳ ATE Hungaria (Budapest),
- ↳ ATE Rumania (Bucarest).

## 2.2. *Prestations de l'entreprise*

ATE est une société prestataire de services en environnement. Ses compétences s'étendent depuis la réalisation de diagnostics de pollution jusqu'aux travaux de réhabilitation des sites et sols pollués.

L'activité de cette entreprise s'articule en plusieurs domaines : Etude et Ingénierie, Travaux, Recherche et développement, Assurance qualité/qualification.

### 2.2.1. Département Etude et Ingénierie

#### ↳ **Diagnostics de sites et évaluation de risques :**

ATE a audité plus de 500 sites pour un grand nombre d'industriels : P.M.E., grandes entreprises nationales ou privées, établissements publics et collectivités locales (cf. références).

Depuis 1996, ATE s'est doté d'outils et de compétences en matière de diagnostic et ingénierie.

ATE dispose des compétences et des outils de modélisation d'écoulements et de transferts de pollution dans les nappes d'eau souterraines et les sols. Ces méthodes prédictives lui permettent d'évaluer les risques de migration de pollution et d'élaborer des solutions de traitement plus performantes.

#### ↳ **Maîtrise d'œuvre :**

Le département ingénierie créé en 1996, a mené pour des grands comptes, des projets de conception d'assistance à la réhabilitation de sites pollués.

Les ingénieurs ATE ont piloté des projets concernant des friches industrielles d'anciennes usines à gaz ou de sites industriels en activité.

### 2.2.2. Département Travaux

ATE bénéficie d'une expérience de 150 chantiers de réhabilitation en France et à l'étranger. Spécialiste du traitement des pollutions par hydrocarbures et dérivés, ATE s'intéresse aujourd'hui à tous les types de polluants.

L'optimisation des techniques in situ, et les travaux de recherche en développement menés par ATE et Rhône-Poulenc, lui permettent aujourd'hui de proposer de nouvelles solutions de traitement pour les pollutions dites complexes et en particulier sur des produits de types: organo-chlorés, HAP, PCB, ... La société dépollue ainsi les sols et les nappes d'eau souterraines contaminées par des hydrocarbures, des solvants chlorés, des pollutions organiques diverses et certains métaux lourds.

Différentes techniques de dépollution ont été mises au point et des brevets déposés et/ou en cours de dépôt, ainsi qu'une marque commerciale : *l'Extraction Triple Phase*<sup>®</sup>.

### 2.2.3. Département Recherche et Développement

Rhône-Poulenc Environnement Service a lancé un important programme de recherche, développement et industrialisation de nouvelles technologies (50 millions de francs sur 5 ans). En effet, l'élaboration de techniques spécifiques est aujourd'hui nécessaire pour répondre correctement à la diversité des problèmes rencontrés. C'est notamment pourquoi ATE collabore étroitement avec des laboratoires de recherches spécialisés et développe des programmes innovants pour mettre sur pied des solutions qui garantissent le meilleur rapport qualité / prix. Les travaux de recherche et développement, conduits depuis deux ans par ATE, visent plusieurs objectifs :

↳ renforcer les compétences dans le diagnostic et l'évaluation des risques,

↳ traiter un spectre de polluants plus large en développant et optimisant de nouvelles technologies (traitement des HAP, PCB, métaux lourds, COHV, COV, ...),

↳ réduire les coûts de traitements des techniques existantes.

Le pôle recherche et développement est un élément moteur de l'activité et du développement de la société.

#### 2.2.4. Assurance Qualité / Qualifications

ATE est en cours de certification ISO 9001. Elle a déjà obtenue en juin 1997 un double agrément : qualification "Bureau d'études - Ingénierie" et qualification "Travaux", délivré par l'Union Professionnelle des Entreprises de Dépollution de Sites.

### 2.3. *Une équipe pluridisciplinaire pour satisfaire aux exigences des prestations proposées*

#### 2.3.1. La pluridisciplinarité

Ces trois dernières années, ATE a enrichi son équipe d'ingénieurs en génie civil, hydrogéologie, chimie, microbiologie, et géotechnie. ATE s'appuie en outre sur des centres de recherche du groupe Rhône-Poulenc et dispose d'un réseau de spécialistes dans de nombreuses disciplines: chimie, génie des procédés, toxicologie, écotoxicologie, hygiène industrielle, médecine du travail, ...

### 2.3.2. Effectifs

Les effectifs sont en France de 65 salariés dont 33 ingénieurs/cadres et 23 techniciens supérieurs. Ils sont au nombre de 15 à l'étranger (8 ingénieurs et 5 techniciens).

### 2.3.3. Principaux dirigeants

#### **Président Directeur Général**

Hervé SEGUIN  
Ecole Militaire Interarmes Saint-Cyr

#### **Directeur Technique**

Pascal ROUDIER  
Docteur en Hydrogéochimie

#### **Directeur Département Etudes et Ingénierie**

Thomas SCHLEGEL  
Docteur en Géologie appliquée/Hydrogéologie

#### **Directeur Département Travaux**

Bernard PIJOLAT  
Docteur en Géologie / MBA CESMA

#### **Directeur Département Recherche et Développement**

Timothy VOGEL  
Professeur et Docteur en Chimie et Microbiologie

#### 2.3.4. Références commerciales

Les références commerciales sont ici présentées par secteurs d'activité.

##### **Chimie - Peintures - Pharmacie - Cosmétiques**

*Appryl, Arco Chimie, Brenntag, Coates Lorilleux, CPE (Rhône-Poulenc), Docks des Alcools, Elf Atochem, Engelhard-clal, ICI Paints, Lambert Rivière, L'Oréal, Nestlé, Orchidis, Périchimie, PrestFrance, RCI, Rhône-Poulenc Agro, Rhône-Poulenc Chimie, Rhône-Poulenc Fibres, Rhône-Poulenc Rorer, Scarm*

##### **Pétrole**

*Air Total, Avia, Benzin(CZ), Bolloré Energie, BP France, BP Marine, Castrol France, Chemopétrol, Copitem Gms, DCA, DEA, Dresser and Dyneff, Elf Antar, Elf Aquitaine, Esso Raffinage, FINA France, Francilienne de Confort, FueLittoral, Interfuel, Labruyère, Lubrizol, Mobil, Mol (Hongrie), Perin, Picoty SA, Raf de Strasbourg, Raffinerie du Midi, Ralf des Flandres, Repsol, S.P.S.E (Pipe line), Shell, Sodialco, SPMR (Pipe line), Sté Havraise Pétrole, Stela, Streichenberger, Thermofina, Total RD, Trapil, Worex*

##### **Agro-alimentaire**

*Bénédicta, Bongrai, Cérégrain, France Boissons, Gds Moulin de Paris*

##### **Toutes Industries**

*ADG Camping Gaz, AFAM (aciérie), Alsthom, Bostik, Bouyer, Bouygues (CZ), Carbone Lorraine, Chimicolor, Dislavor, Jean Levebvre, Kennemetal, Pcaudouce, Sachs Industries*

##### **Distribution**

*Auchan, Docks de France, Euromarché, Leclerc, Match*

**Transport**

*Danzas, Dentressangle, LTS Freigh Ltd, RENFE (Espagne), SNCF, SNTL, Thomas Howel*

**Sociétés Immobilières**

*Ets Pellet, Morillon Corvol, SCI des Pyrénées, Slec, Sogetim, Syndic Berg*

**Mécanique - automobile**

*Excelsior, Fichou, Mario (Casse auto), Montabert, Peugeot, Renault, Robert Bosch, Saddier décolletage, Sofrastock, Sogen*

**Experts - Bureau d'Etudes - Assurances**

*A. Delezenne, Abeille, Cabinet Aurige, Cabinet Fachenetti, Cabinet Genet, Cabinet Poncy, CHEMHILL, Dames & Moore, Ecoaudit, Ecocon, Equad, ERM, KPMG, Objectif K, Pierrat Entreprise, Polyexpert, Sageri Gras Savoye, Seri Chapelle, Trias*

**Administration - Collectivités Locales**

*Armée de l'air, Armée de terre, Courly Grand Lyon, DDE, EDF, GDF, Mairie de St-Quentin, Mairie de Susville, Marepolis, Marine Nationale, Port autonome Bordeaux, S.E.M.A.PA, Syndicat des Abrets, Ville de Lyon*

*CHAPITRE III*

**Recherche et collecte de  
l'information**



### 3. Recherche et collecte de l'information

Cette partie correspond chronologiquement à la première étape de conception du livre. C'est aussi la plus importante car c'est elle qui présuppose de ce que devra être l'ouvrage. La définition précise des attentes d'A.T.E. conditionne fortement le contenu et la présentation du travail final, mais aussi les informations qu'il sera nécessaire de recueillir.

#### 3.1. Définition des objectifs

Les objectifs sont de deux types : ceux visés par A.T.E. en publiant le livre et ceux propres au livre.

##### 3.1.1. Objectifs d'A.T.E.

A.T.E., en décidant la rédaction d'un ouvrage continue l'engagement dans une politique de communication qu'elle avait entamé en 1993 avec un premier livre sur les techniques de dépollution. Communication axée sur son image de société de dépollution construisant des solutions sur mesure, adaptées à chaque problématique; et d'entreprise innovante, servant de référence scientifique et technique dans son domaine. Quant au public visé, il est constitué :

- ⇒ des *prescripteurs en dépollution* (organismes étatiques...),
- ⇒ des *industriels* concernés (acquéreurs potentiels, détenteurs d'un terrain...),
- ⇒ *d'associations de particuliers* concernés par la pollution potentielle engendrée par telle ou telle activité industrielle.

Les lecteurs ne doivent pas posséder obligatoirement de culture scientifique forte pour aborder le livre. Ils doivent pouvoir accéder aux informations nécessaires à la compréhension et l'approfondissement des choix de dépollution. D'une manière

générale, les informations chimiques et techniques seront destinées aux ingénieurs et techniciens de l'environnement.

Ces multiples objectifs imposent de réaliser un livre qui soit scientifiquement bien construit et complet, mais aussi pertinent, nouveau, et facile d'accès. Il ne peut donc s'agir d'un livre traitant des méthodes de dépollution comme c'est le cas des ouvrages existants. De plus, il doit s'agir d'un ouvrage de vulgarisation, ce qui de prime abord, paraît en contradiction avec son caractère scientifique.

*L'idée originale retenue consiste à aborder la dépollution non par les techniques elles-mêmes, mais par les polluants qui doivent être traités par ces techniques.*

### 3.1.2. Objectifs du livre

Ainsi les objectifs d'A.T.E. seront atteints en respectant la rigueur scientifique de l'ouvrage, une structuration logique du plan, et la collecte de données pertinentes, judicieuses et en relation avec ce que A.T.E. est capable de commercialiser.

Le but de l'ouvrage, quant à lui, est de permettre au lecteur de **trouver la ou les techniques de dépollution** envisageable(s) face à son cas de pollution. Que le lecteur connaisse ou non les polluants impliqués dans sa pollution, qu'il connaisse ou non l'activité commerciale qui occupait le site avant lui, enfin qu'il ignore ou non les produits qui ont été utilisés sur ce terrain, il doit pouvoir, à l'aide de ce livre, trouver quelle(s) technique(s) de dépollution peuvent être envisagées sur son site, et ce **de manière très simple**.

Le but recherché sera atteint en permettant au lecteur de trouver la (les) technique(s) de dépollution adaptée(s), au moyen de diverses entrées possibles :

- ⇒ **par** la ou les **activités industrielles** occupant ou ayant occupé le site,
- ⇒ **par** les **produits commerciaux** utilisés ou stockés sur les terrains,
- ⇒ **par** les **molécules de polluants** détectées par analyse sur le terrain.

### 3.1.3. Conclusion

Pour respecter les objectifs fixés, le livre doit être publié en même temps que ceux de la concurrence. En effet, le salon POLLUTEC (salon professionnelle sur la dépollution) qui se tient en novembre de chaque année, est le moment retenu par les auteurs pour le lancement d'ouvrages de ce type. A.T.E. sait qu'elle ne sera pas la seule à éditer un ouvrage pour le salon mais elle compte profiter de son stand et du caractère original et scientifique de son ouvrage pour prendre le dessus.

### 3.2. *Recensement des informations à recueillir*

Les informations qui devront figurer dans l'ouvrage sont schématiquement de trois types :

1. Le premier type comprend les données physico-chimiques des polluants, c'est-à-dire tous les paramètres susceptibles de renseigner A.T.E. sur les caractéristiques des molécules chimiques polluantes. Bien entendu, il ne s'agit pas de refaire un « Handbook of chemistry ». Les paramètres retenus sont ceux qui permettent de déterminer les techniques de dépollution applicables au polluant. Quant aux molécules, l'option retenue consiste à répertorier toutes celles pour lesquelles des informations ont été trouvées, sans présupposer du fait qu'elles soient réellement des polluants potentiels. De plus, compte tenu du choix des diverses entrées possibles, il faudra tenter de mettre en relation ces molécules avec les activités industrielles et les produits commerciaux les plus fréquents dans les cas de pollution.

2. Le deuxième type d'informations est propre au savoir-faire de la société et plus particulièrement de la Recherche et Développement.

Il s'agit pour une part de mettre en relation ces molécules avec les techniques de dépollution. Le choix a été fait de ne pas envisager toutes les

techniques existantes, mais uniquement celles commercialement intéressantes (rapport qualité prix pertinent). De plus, la plupart des techniques non abordées ne sont que des dérivées de celles retenues.

Pour une seconde part, il faudra recueillir les informations relatives aux cas de dépollution fréquemment rencontrés (polluants trouvés lors des différentes interventions de dépollution ou de diagnostic de site, contraintes d'intervention liées au site, ...).

La dernière part de ce travail consiste en la synthèse des techniques de dépollution retenues, avec une volonté de concision et de pertinence (critères principaux à prendre en compte pour le choix des techniques, comparaison des techniques, explication et justification des choix).

3. Le troisième type d'informations à synthétiser doit permettre la vulgarisation scientifique de l'ouvrage. Il s'agit des données nécessaires pour fournir les bases minimales et simplifiées de chimie permettant de comprendre et de retrouver les molécules polluantes (nom, paramètres physico-chimiques, substitution...).

### **3.3. *Recueil des données***

Cette partie du travail est la plus fastidieuse et s'apparente à un travail de recherche bibliographique. Les ouvrages pris en compte sont mentionnés dans la bibliographie. Compte tenu de l'aspect très pointu de la recherche, Internet a été abordé mais sans succès véritable. Les informations relatives au savoir-faire sont récupérées directement auprès de la Recherche et Développement où je suis physiquement et hiérarchiquement rattaché. Une équipe de travail a ainsi été formée pour permettre le recueil de l'ensemble des données. La partie collecte revient à Béatrice LEBEAUX et moi-même, l'alimentation des données « savoir-faire dépollution » à Timothy VOGEL et Pascal ROUDIER, enfin la mise en forme à moi-même.

### 3.3.1. Connaissances générales

#### 3.3.1.1. Données de chimie générale

Les informations relatives à la chimie générale doivent permettre de constituer une présentation simplifiée des règles de chimie. Il s'agit de réaliser une sorte de cours abrégé d'introduction à la chimie permettant d'appréhender dans de bonnes conditions les parties techniques du livre.

Il semblait donc logique d'utiliser des cours déjà existant afin de s'en inspirer. Les cours de DEUG et de MST Chimie ont été mis à profit, de même que certains ouvrages références.

#### 3.3.1.2. Paramètres physico-chimiques

Les ouvrages scientifique chimique tels que le *HandBook of chemistry*, les fiches toxicologiques des produits chimiques et autres recueils de chimie ont été la principale base d'alimentation d'un vaste tableau Excel référençant quelques 1200 molécules chimiques avec leurs propriétés physico-chimiques retenues, et indiquant l'appartenance de ces molécules à plus de 80 activités industrielles et produits commerciaux. Au final, c'est un tableau de plus de 1200 lignes sur 125 colonnes qui a vu le jour.

### 3.3.2. Savoir-faire A.T.E. : les connaissances internes

L'idée maîtresse du livre consiste à mettre en relation les techniques de dépollution et les polluants, ce que seul l'expertise du professionnel peut réaliser. C'est pourquoi chacune des 1200 molécules a été passée en revue par Timothy

VOGEL. Un certain nombre de Macro en Visual Basic ont permis d'automatiser une partie de ce travail (détermination en fonction de paramètres clefs de techniques de dépollution).

Les parties de l'ouvrage finale traitant des pollutions fréquemment rencontrées se basent sur les études réalisées par A.T.E. (rapport du bureau d'étude...) ou la D.R.I.R.E..

Le chapitre sur les techniques de dépollution elles-mêmes est basé sur les fiches techniques (en cours de réalisation à A.T.E.) mais aussi sur une part importante de l'expertise d'A.T.E..

### **3.4. Conclusion**

Une fois ce travail de recherche de l'information réalisé, tout le travail de mise en forme restait à faire. Pour une part, des parties presque complètes telles que la chimie générale, les activités industrielles et produits commerciaux en texte explicatif et descriptif sont écrites. Pour une seconde part, un vaste tableau Excel (1200 lignes x 125 colonnes), non exploitable directement et représentant un travail très important ayant une valeur ajoutée majeure a été constitué.

*CHAPITRE IV*

**Mise en forme de  
l'information**



## **4. Mise en forme de l'information**

### **4.1. Les objectifs**

Les objectifs imposent de suivre une présentation scientifique qui puisse intéresser des éditions scientifiques. L'éditeur de référence est Lavoisier avec sa collection Tec et Doc. Un premier contact lui a présenté le plan retenu en hypothèse de travail. L'éditeur est très intéressé mais doit achever sa collection de la rentrée avant la fin juin ce qui était incompatible avec nos possibilités.

Aucun autre éditeur ne semble pouvoir assurer une édition avec un manuscrit rendu mi-septembre. Les objectifs retiennent pourtant la date du salon POLLUTEC.

L'ouvrage doit de plus assurer la publicité de l'entreprise.

### **4.2. Les contraintes**

La date est la première de nos contraintes, tout comme le problème de l'éditeur. Un point supplémentaire réside dans le tableau contenant l'essence même du livre. Sa taille ne permet pas de l'exploiter tel quel. Il convient donc de le retravailler pour pouvoir l'inclure dans un ouvrage devant finalement être publié dans un format A5 (demi A4) et ce, dans la mesure où c'est à nous que revient par la force des événements, la publication et donc la mise en page.

### **4.3. La solution retenue**

Au vu des contraintes et objectifs liés à ce livre, ce n'est pas une solution unique mais deux qui ont été retenues.

1. Pour satisfaire aux exigences de la date et pouvoir être présent au salon POLLUTEC avec cet atout commercial, il a été décidé d'assurer nous-mêmes tous le travail de publication de l'ouvrage. Compte tenu du volume des tableaux et de leur valeur marchande, nous avons choisit/ de ne pas les inclure directement dans le texte du livre mais de les joindre à celui-ci par le biais de l'informatique. En effet, ils seront vendus avec l'ouvrage, sur support informatique non directement récupérable (afin d'éviter qu'ils ne puissent être réutilisés dans une base de données sans ressaisie...). Le logiciel Acrobat de ADOBE doit servir à concevoir un système simple de consultation, assurant une bonne protection des données, et permettant une consultation facile par tous les acheteurs sur support PC, MAC (le module de lecture étant gratuit). Pour assurer la promotion commerciale de la société, des encarts publicitaires expliquant qu'A.T.E. maîtrise ses techniques sont ajoutés au livre.

2. Pour satisfaire au exigences de référence scientifiques, A.T.E. a décidé de publier l'ouvrage en version complète papier chez Lavoisier, mais en anglais, Timothy VOGEL pouvant en assurer la traduction. La parution aura lieu après POLLUTEC et sera l'occasion d'une publicité supplémentaire. L'ouvrage sera étoffé et ne présentera pas d'encart publicitaire.

Ainsi, l'ensemble du cahier des charges est respecté. L'architecture générale du livre sera la suivante (hors sommaire, guide d'utilisation, préambule, bibliographie, index et glossaire) :

I. **Propriété Environnementales** : ce chapitre vise à présenter les paramètres environnementaux de base, indispensables à la compréhension des choix de dépollution.

II. **Caractéristiques des polluants** : cette partie va permettre de justifier et expliquer quels sont les paramètres physico-chimiques importants à prendre en considération pour choisir une méthode de dépollution.

III. **Classification des polluants** : le but est ici de donner au lecteur les éléments nécessaires à sa bonne navigation dans la chimie du livre. Il s'agit essentiellement de bases de nomenclature.

IV. **Mélanges commerciaux** : des produits commerciaux, parmi les plus caractéristiques en terme de pollution, sont présentés, non exhaustivement.

V. **Activités industrielles** : ce cinquième chapitre repose sur la même idée que le précédent, mais cette fois en prenant en compte les activités industrielles.

VI. **Choix des méthodes de dépollution** : Cette partie est la plus importante du livre. C'est celle utilisant le tableau Excel (1200 lignes x 125 colonnes). Afin de pouvoir utiliser un tel condensé d'informations, celui-ci est éclaté, au moyen de Macros Excel, en 4 tableaux qui seront proposés sous forme informatique. Le début de chacun de ces tableaux est cependant imprimé pour présenter les informations que l'on peut trouver sur la disquette.

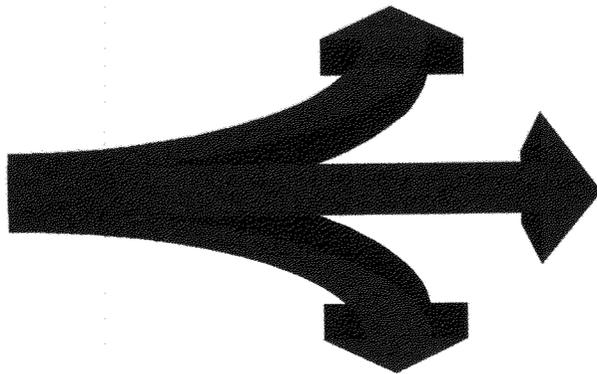
VII. **Présentation des différentes méthodes de dépollution** : ce chapitre final dresse un panorama descriptif et analytique des techniques de dépollution. Il donne les principes sur lesquels reposent les techniques.

Les tableaux informatiques sont présentés avec une navigation type Internet grâce au logiciel Acrobat (de ADOBE), sous un environnement conviviale/

Le résultat de ce travail est présenté en annexe. Il s'agit de la dernière version (non définitive) disponible à ce jour. Le fichier Acrobat n'est pas encore disponible.

**Conclusion :**

**une conservation  
et transmission  
du savoir-faire  
A.T.E.**



## 5. CONCLUSION : une conservation et transmission du savoir-faire

A.T.E. est en mutation complète. Créée il y a moins de dix ans, la société emploie aujourd'hui plus de 65 personnes à travers le monde et doit envisager une restructuration complète. D'une gestion individuelle, il lui faut envisager une gestion plus globale de sa structure avec une comptabilité analytique détaillée lui permettant de mieux maîtriser ses coûts. Sa taille et sa répartition géographique, mais aussi son appartenance à un grand groupe doivent la conduire à protéger son savoir-faire, clef de voûte de son activité. Le turn over est un paramètre fort chez A.T.E. (de l'ordre de 30%) qui conforte cette idée de protection et communication de son savoir-faire. Enfin, la société doit pouvoir, pour être efficace, connaître les évolutions des techniques et de leur mise en œuvre, mais aussi communiquer avec chacun des acteurs qui la compose.

Le livre s'inscrit naturellement dans ce cadre. Il est un moyen clair de faire savoir à tous ce qu'A.T.E. sait faire. L'ouvrage est un moyen simple de transmission du savoir-faire. Il servira de référence commerciale et promotionnelle pour toutes les entités.

Ce livre est aussi et surtout le point de départ de la base de données A.T.E.. Cette base qui doit permettre à chacune des entités (agences étrangères et française) de la société de gagner en efficacité, sera réalisée dans les mois à venir. L'ouvrage a été l'occasion de réunir les premiers éléments qui l'alimenteront. Ainsi, chaque acteur de la société accédera aux dernières nouveautés, à la dernière version de présentation des documents (structuration des informations en fonction du type de client), aux anciens rapports archivés... et ce, où qu'il se trouve. Le cahier des charges prévoit une base qui soit pour une partie en texte intégrale, pour l'autre en images et références, le tout interfacé sur Internet avec contrôle des droits et accès. Cette base est à la fois technique et commerciale. Ce vaste travail est à l'étude et un cahier des charges précis devra encore être élaboré. Cependant, un modèle conceptuel des données (présenté en annexe 2) a été rapidement préétabli afin de conceptualiser la tâche à accomplir.

En conclusion, toutes les conditions semblent réunies pour que cet ouvrage devienne pour quelques années la référence d'A.T.E., société de dépollution des sols, leader dans son domaine. Signalons enfin, et ce n'est pas une remarque sans importance, que ce livre aura une forte valeur interne en terme de formation et de communication. Son impact, avant même sa publication, est importante et aisément remarquable.

# BIBLIOGRAPHIE



**WALTERS, G., ZILIS, K., WESSLING, E., HOFFMAN, M.,** *Analytical methods for petroleum hydrocarbons.*, Hazardous Materials Control Resources Institute, Washington, Superfund'90, november 26-29 1990, Volatile Organics Control, p. 620-623., ISBN : 0-944989-94-2.

**ANDERSON, T., COASTS, J,** *Bioremediation through rhizosphere technology.*, American chemical Society, Washington, ACS Symposium Series 1994, 563, 249 pages., ISBN : 0-8412-2942-2.

**LANGENHOFF, A.,** *Biotransformation of toluene, benzene and naphthalene under anaerobic conditions.*, Thèse, Landbouwuniversiteit Wageningen, 1997, 131 pages., ISBN : 90-5485-660-2.

**FETTER, C.W.,** *Contaminant hydrogeology.*, Macmillan Publishing Compagny, New york, 1992, 458 pages., ISBN : 0-02-337135-8.

**KOSTECKI, P., CALABRESE, E.,** *Contaminated soils : diesel fuel contamination.*, Lewis Publishers, Michigan, 1992, 227 pages., ISBN : 0-87371-708-2.

**BAKER, A., MOREL, J.C, SCHWARTZ, C.,** *Des plantes pour dépolluer les friches industrielles.*, Biofutur, juillet - août 1997, n 169, p. 30-33.

**ROUDIER, P.,** *Descriptif des techniques de dépollution.*, Antipollution Techniques Entreprise, Meyzieu, 1993, 79 pages.

**VANDEGRIFT, G.F., REED, TASKER,** *Environmental remediation - Removing organic and metal ion pollutants.*, American chemical Society,

Washington, ACS Symposium Series 509, 1992, 275 pages., ISBN : 0-8412-2479-X.

NOONAN, D., CURTIS, J., *Groundwater Remediation and petroleum - A guide for underground storage tanks.*, Lewis Publishers, Michigan, 1990, 142 pages., ISBN : 0-87371-217-X.

LIDE, D., *Handbook of chemistry and physics.*, CRC Press, 1995-1996., Edition 76, ISBN : 0-8493-0476-8.

HOWARD, P., *Handbook of environmental fate and exposure data for organic chemicals.*, Lewis Publishers, Michigan, vol. I : Large production and priority pollutants, 1989, 574 pages., ISBN : -0-87371-151-3.

HOWARD, P., *Handbook of environmental fate and exposure data for organic chemicals.*, Lewis Publishers, Michigan, vol. II : Solvents, 1989, 546 pages., ISBN : -0-87371-204-8.

HOWARD, P., *Handbook of environmental fate and exposure data for organic chemicals.*, Lewis Publishers, Michigan, vol. III : Pesticides, 1989, 684 pages., ISBN : -0-87371-328-1.

THOMAS, J.C., BERGER, F., JACQUIER, M., BERMILLON, D., BAUDGRASSET, F., TRUFFAUT, N., NORMAND, P., VOGEL, T., SIMONET, P., *Isolation and characterization of a novel gamma-Hexachlorocyclohexane - Degrading bacterium.*, Journal of Bacteriology, 1996, n 20, vol. 178, oct. p. 6049-6055.

PELLET, M., LECOMTE, P., CARROZO, Ch., PAIRET, G., *La réhabilitation par voies biologiques de sites contaminés par des PCBs.*, TSM, septembre 1993, n 9, p. 453-458.

JEAN, L., *Le CO<sub>2</sub> supercritique dans le traitement des sols pollués.*, Environnement et technique, Mai 1997, n 166, Info - Déchets - Courants.

WAUQUIER, J.P., *Le raffinage du pétrole : pétrole brut, produits pétroliers, schémas de fabrication.*, Editions Technip, Publications de l'Institut Français du pétrole, 1994, tome 1, 478 pages., ISBN : 2-7108-0668-1.

SCHULER, C., *Le traitement thermique des sols - Dix ans d'expérience aux Pays-Bas.*, Courants, septembre - octobre 1993, n 23, p. 24-30.

LECOMTE, P., *Les sites pollués : traitement des sols & des eaux souterraines.*, Lavoisier Tec & Doc, Paris, 1995, 198 pages., ISBN : 2-7430-0023-6.

LALLEMAND-BARRES, A., *Méthodes de dépollution des eaux souterraines.*, BRGM, Orléans, Manuels et méthodes, 1995, n 27, 179 pages.

**KUMAR, N., DUSHENKOV, V., MOTTO, H., RASKIN, I.,** *Phytoextraction : the use of plants to remove heavy metals for soils.*, **Environmental Science & Technology**, 1995, vol. 29, n 5, p. 1232-1238.

**SALT, D., BLAYLOCK, M., KUMAR, N., DUSHENKOV, V., ENSLEY, B., CHET, I., RASKIN, I.,** *Phytoremediation : a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants.*, **Bio / Technology**, mai 1995, vol. 13, p. 468-474.

**BROOKS, R.R.,** *Plants that hyperaccumulate heavy metals : their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining.*, **Centre for Agriculture and Biosciences International, Oxon UK**, 1998, 380 pages., ISBN : 0-85199-236-6.

**SHIELDS, E.,** *Pollution control : engineer's handbook.*, **Pudvan Publishing Co**, 1985, 144 pages., ISBN : 0-934165-02-9.

**The World Bank Group,** *Pollution prevention and abatement handbook.*, **Annual Meetings Edition, 1997**, 544 pages.

**NICOT J.P.,** *Quelques techniques de l'exploitation pétrolière appliquées à la décontamination des sols et des nappes.*, **Revue Géologues**, juillet 1997, n 113, p. 57-61.

**Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement,** *Recensement 1996 des sites et sols pollués.*, **Ministère de l'Environnement - Direction de la prévention des pollutions et des risques - Service de l'environnement industriel**, 1996, 430 pages.

**LITHERLAND, S., ANDERSON, D., ALLEN, P., DYKES, R.,** *Remediation of contaminated subsurface soils by bioventing.*, **Hazardous Materials Control Resources Institute, Washington**, Superfund'92, december 1-3 1992, Vapor Extraction Control, p. 879-882., ISBN : 1-56590-008-1.

**KUMAR, N., DUSHENKOV, V., MOTTO, H., RASKIN, I.,** *Rhizofiltration : the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams.*, **Environmental Science & Technology**, 1995, vol. 29, n 5, p. 1239-1245.

**RICOUR, J., LALLEMAND-BARRES, A.,** *Sites pollués et déchets - 750 définitions pour un langage commun.*, **BRGM, Orléans, Manuels et méthodes n 26**, 127 pages.

**ADEME,** *Sites pollués.*, **La Lettre de l'ADEME**, numéro spécial mars 1994, 55 pages., ISBN : 2-86817-074-9.

**ZEHNDER, A.**, *Soil and groundwater pollution : fundamentals, risk assessment and legislation.*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1995, 164 pages., ISBN : 0-7923-3743-3.

**TATE, R.**, *Soil microbiology.*, John Wiley & Sons, Inc., 1995, 398 pages., ISBN : 0-471-57868-1.

**HALLORAN, A., TROAST, R., GILROY, D.**, *Solvent extraction of a PAH-contaminated soil.*, Hazardous Materials Control Resources Institute, Washington, Superfund'91, december 3-5 1991, Contaminated Soil and Debris Treatment, 1991, p. 354-361., ISBN : 1-56590-001-4.

**WALLIN, M., SERBON, J.C.**, *Traitement des sols pollués.*, La Technique Moderne, 1994, n°7-8, p. 29-32., 1994.

**Centre de Prospective et d'Etudes, Ministère de la Recherche et de la Technologie**, *Traitement et valorisation des déchets toxiques.*, Innovation 128, TechTendances Etudes Technologies, Paris, 1991, 166 pages.

**KOEGLER, S.S, KINDLE, C.H.**, , *Ceramic Bulletin*, 1991, vol. 70, n 5, p. 832-835.

# ANNEXES



Annexe 1 (ouvrage en l'état d'avancement au 17 septembre 1998).....1

Annexe 2 (ébauche du modèle conceptuel des données).....115

## *Annexe 1*

L'ouvrage dans son état d'avancement au 16 septembre 1998.

Les tableaux qui seront mis en forme sous Acrobaté sont présentés sur une page  
afin de donner une idée de leur contenu.

## PRESENTATION DE L'OUVRAGE

### ➤ But de l'ouvrage

Le but de l'ouvrage est de permettre au lecteur *d'identifier une ou des techniques de dépollution* envisageable(s) répondant au mieux à l'adéquation polluants/milieu/contraintes. Que le lecteur connaisse ou non les polluants impliqués dans sa pollution, qu'il connaisse ou non l'activité commerciale qui occupait le site avant lui, enfin qu'il ignore ou non les produits qui ont été utilisés sur ce terrain, il doit pouvoir, à l'aide de ce livre, trouver quelle(s) technique(s) de dépollution peuvent être envisagées sur son site, et ce *de manière très simple et rapide*.

### ➤ Principe de fonctionnement du livre

Le lecteur trouve la ou les techniques de dépollution adaptées à sa problématique, au moyen de diverses clefs d'entrées possibles :

- ⇒ *par* la ou les **activités industrielles** occupant ou ayant occupé le site,
- ⇒ *par* les **produits commerciaux** utilisés ou stockés sur les terrains,
- ⇒ *par* les **molécules de polluants** détectées par analyse sur le terrain.

### ➤ Organisation de l'ouvrage

L'ouvrage présente les *facteurs pédologiques* et les *propriétés physico-chimiques des polluants* nécessaires au choix des méthodes de dépollution.

Sont ensuite présentés des *rappels de nomenclature générale* correspondant à un classement des polluants, avec dans chaque cas les propriétés chimiques et méthodes de dépollutions des molécules.

Un chapitre concerne directement un grand nombre de **produits commerciaux** rencontrés dans les pollutions. Le suivant, basé sur le même principe, prend en compte les **activités industrielles** et les polluants qui en sont issus. Les contraintes liées au site sont abordées.

Enfin, une partie majeure du livre propose quatre tableaux aidant aux choix des techniques de dépollution (cf. : disquette jointe). Ces tableaux mettent en adéquation :

- **les molécules chimiques, produits commerciaux et activités industrielles,**
- **les produits commerciaux, molécules chimiques et techniques de dépollution,**
- **les activités industrielles, molécules chimiques et techniques de dépollution,**
- **les molécules chimiques, leurs paramètres physico-chimiques et techniques de dépollution.**

Ces tableaux ont été réalisés à l'aide des paramètres trouvés dans la littérature. Afin de faciliter la compréhension du lecteur dans le choix des techniques, ces dernières sont décrites ainsi que leurs contraintes et conditions d'application.

### ➤ Techniques de dépollution

Notons dès à présent que les techniques de dépollution qui seront proposées ne sont pas exhaustives (d'importants et rapides progrès en recherche et développement laissant entrevoir de nombreuses autres possibilités dans un avenir proche). De plus, des techniques telles que l'excavation, l'incinération, la solidification/confinement ne seront pas systématiquement proposées car elles peuvent d'emblée s'appliquer à la quasi totalité des polluants si les conditions de milieu le permettent. Elles n'ont en effet pas de spécificité. Elles seront cependant explicitées dans la dernière partie regroupant les techniques de dépollution.

Ce dernier chapitre permettra de comprendre le principe sur lequel est basé chaque technique de dépollution. Il présentera aussi le type de polluant que peut traiter chacune des techniques avec une estimation de la performance et du coût (valeur indicative et non contractuelle) pour chacun des cas. De plus, des exemples concrets de dépollution seront présentés et justifiés pour différents produits polluants.

➤ **Mise en garde**

Ce livre ne prétend absolument *pas remplacer l'expert* mais juste fournir de manière rapide et simple des *pistes précises et justifiées* de techniques possibles de dépollution de site, en fonction des polluant. Enfin, ce livre n'est en aucun cas totalement exhaustif et n'a pas de valeur contractuelle.

**A.T.E. s'est dotée d'un programme  
Recherche et Développement qui lui  
permet d'innover en permanence et  
de proposer des variantes techniques  
de plus en plus fiables et  
performantes.**

## TABLE DES MATIERES

<b>1. PROPRIETES ENVIRONNEMENTALES</b>	<b>12</b>
1.1. Introduction	12
1.2. Les facteurs physico-chimiques du sol	12
1.2.1. Texture	12
1.2.2. Structure	13
1.2.3. Hygrométrie (ou teneur en eau du sol)	14
1.2.4. pH du sol	14
1.2.5. Potentiel rédox	15
1.2.6. Température	15
1.2.7. Teneur en éléments nutritifs	15
1.3. Conclusion	16
<b>2. CARACTERISTIQUES DES POLLUANTS</b>	<b>17</b>
2.1. Introduction	17
2.2. Solubilité dans l'eau ou solubilité aqueuse	17
2.3. Coefficient de partition octanol / eau (Kow)	17
2.4. Pression ou tension de vapeur	18
2.5. Constante de Henry	18
2.6. Biodégradabilité	18
2.7. Poids spécifique	19
2.8. Conclusion	19
<b>3. CLASSIFICATION DES POLLUANTS, familles de polluant</b>	<b>20</b>
3.1. Introduction	20
3.2. Les hydrocarbures	20
3.3. Nomenclature	20
3.4. Hydrocarbures aliphatiques	21
3.4.1. Introduction	21
3.4.2. Alcanes (méthane, éthane, propane, butane...) : Hydrocarbures aliphatiques saturés	21
3.4.2.1. Formule chimique	22
3.4.2.2. Provenances et utilisations	22
3.4.2.3. Propriétés physico-chimiques	22
3.4.3. Alcènes (éthène, propène, butène...) : Hydrocarbures aliphatiques insaturés	22
3.4.3.1. Formule chimique	22
3.4.3.2. Provenances et utilisations	23
3.4.3.3. Propriétés physico-chimiques	23
3.4.4. Techniques de dépollution	23
3.4.5. Conclusion	23
3.5. Hydrocarbures cycliques saturés : Cyclanes (cyclopentane, cyclohexane...)	24
3.5.1. Introduction	24
3.5.2. Formule chimique	24
3.5.3. Provenances et utilisations	24
3.5.4. Propriétés physico-chimiques	24

3.5.5. Techniques de dépollution	24
3.5.6. Conclusion	24
<b>3.6. Hydrocarbures Aromatiques (Arènes, BTEX Benzène Toluène Ethylbenzène Xylène, HAP...)</b>	<b>24</b>
3.6.1. Introduction	24
3.6.2. Formule chimique	25
3.6.3. Provenances et utilisations	25
3.6.4. Propriétés physico-chimiques	25
3.6.5. Techniques de dépollution	25
3.6.6. Conclusion	26
<b>3.7. Hydrocarbures hétérocycliques (THF, THP, époxy-, dioxane-...)</b>	<b>26</b>
3.7.1. Introduction	26
3.7.2. Formule chimique	26
3.7.3. Provenances	26
3.7.4. Propriétés physico-chimiques	26
3.7.5. Techniques de dépollution	26
3.7.6. Conclusion	27
<b>3.8. Aliphatiques substitués</b>	<b>27</b>
3.8.1. Introduction	27
3.8.2. Alcools (méthanol...), aldéhydes (méthanal...), acides (acide acétique...), cétones (acétones...)	27
3.8.2.1. Formule chimique	27
3.8.2.2. Provenances et utilisations	27
3.8.2.3. Propriétés physico-chimiques	27
3.8.2.4. Techniques de dépollution	28
3.8.3. Amines (nylon..., isocyanate...)	28
3.8.3.1. Formule chimique	28
3.8.3.2. Provenances et utilisations	28
3.8.3.3. Propriétés physico-chimiques	28
3.8.3.4. Techniques de dépollution	28
3.8.4. Composés chlorés (solvants : trichloroéthylène...), bromés (pesticides : dibromoéthane...), iodés et plus rarement fluorés	28
3.8.4.1. Formule chimique	28
3.8.4.2. Provenances et utilisations	29
3.8.4.3. Propriétés physico-chimiques	29
3.8.4.4. Techniques de dépollution	29
3.8.5. Conclusion	29
<b>3.9. Aromatiques substitués (phénols, alcools, aldéhydes, cétones, acides, PCB, dioxines...)</b>	<b>30</b>
3.9.1. Introduction	30
3.9.2. Phénols : phénoplastes, hydroquinone... (substitution par un groupement hydroxyle (-OH))	30
3.9.2.1. Formule chimique	30
3.9.2.2. Provenances et utilisations	30
3.9.2.3. Propriétés physico-chimiques	30
3.9.2.4. Techniques de dépollution	30
3.9.3. Substitution par un atome d'azote (amines : kévlar, polyuréthane...)	30
3.9.3.1. Formule chimique	30
3.9.3.2. Provenances et utilisations	31
3.9.3.3. Propriétés physico-chimiques	31
3.9.3.4. Techniques de dépollution	31
3.9.4. Substitution par un halogène (PCB, chlorobenzène, hexachlorobenzène, chlorobutadiène, ...)	31
3.9.4.1. Formule chimique	31
3.9.4.2. Provenances et utilisations	31
3.9.4.3. Propriétés physico-chimiques	31
3.9.4.4. Techniques de dépollution	32
3.9.5. Conclusion	32
<b>3.10. Hétérocycliques substitués par un halogène</b>	<b>32</b>
3.10.1. Formule chimique	32
3.10.2. Provenances et utilisations	33
3.10.3. Propriétés physico-chimiques	33

3.10.4. Techniques de dépollution	33
<b>3.11. Acides gras (matières grasses : savons, peintures, vernis, huiles...)</b>	<b>33</b>
3.11.1. Formule chimique	33
3.11.2. Provenances et utilisations	33
3.11.3. Propriétés physico-chimiques	33
3.11.4. Techniques de dépollution	33
<b>3.12. Métaux</b>	<b>33</b>
3.12.1. Introduction	33
3.12.2. Métaux (plomb, arsénic, mercure...)	34
3.12.2.1. Présentation	34
3.12.2.2. Provenances et utilisations	34
3.12.2.3. Propriétés physico-chimiques	35
3.12.2.4. Techniques de dépollution	35
3.12.3. Sels organo-métalliques : (bromure d'éthylmagnésium, chlorure de méthylmercure, dichlorure d'éthylaluminium...)	35
3.12.3.1. Formule chimique	35
3.12.3.2. Provenances et utilisations	35
3.12.3.3. Propriétés physico-chimiques	35
3.12.3.4. Techniques de dépollution	35
<b>3.13. Composés inorganiques non métalliques (cyanures, nitrates, nitrites, phosphates, carbonates, chlorates, sulfites, chlorures, fluorures, bromures, iodures...)</b>	<b>36</b>
3.13.1. Introduction	36
3.13.2. Formule chimique	36
3.13.3. Provenances et utilisations	36
3.13.4. Propriétés physico-chimiques	36
3.13.5. Techniques de dépollution	36
<b>3.14. Conclusion</b>	<b>36</b>
<b>4. PRODUITS COMMERCIAUX</b>	<b>38</b>
<b>4.1. Introduction</b>	<b>38</b>
<b>4.2. Produits pétroliers (hydrocarbures)</b>	<b>38</b>
4.2.1. Gaz naturel (méthane...)	38
4.2.1.1. Composition chimique	38
4.2.1.2. Provenances et utilisations	38
4.2.1.3. Propriétés physico-chimiques	38
4.2.1.4. Techniques de dépollution	38
4.2.2. Essences (alcane, BTEX Benzène Toluène Ethylbenzène Xylène...)	38
4.2.2.1. Composition chimique	38
4.2.2.2. Provenances et utilisations	39
4.2.2.3. Propriétés physico-chimiques	39
4.2.2.4. Techniques de dépollution	39
4.2.3. Gasoil (n-alcane, iso-alcane, naphthène... et aromatiques)	39
4.2.3.1. Composition chimique	39
4.2.3.2. Provenances et utilisations	39
4.2.3.3. Propriétés physico-chimiques	39
4.2.3.4. Techniques de dépollution	39
4.2.4. Fuel (mazout)	39
4.2.4.1. Composition chimique	39
4.2.4.2. Provenances et utilisations	40
4.2.4.3. Propriétés physico-chimiques	40
4.2.4.4. Techniques de dépollution	40
4.2.5. Lubrifiants	40
4.2.5.1. Composition chimique	40
4.2.5.2. Provenances et utilisations	40
4.2.5.3. Propriétés physico-chimiques	40
4.2.5.4. Techniques de dépollution	40
4.2.6. Goudron (HAP...)	40

4.2.6.1. Composition Chimique	40
4.2.6.2. Provenances et utilisations	41
4.2.6.3. Propriétés physico-chimiques	41
4.2.6.4. Techniques de dépollution	41
4.2.7. Pétrole brut	41
4.2.7.1. Composition Chimique	41
4.2.7.2. Provenances et utilisations	41
4.2.7.3. Propriétés physico-chimiques	41
4.2.7.4. Techniques de dépollution	42
4.2.8. Conclusion	42
<b>4.3. Composés dérivés des produits pétroliers</b>	<b>42</b>
4.3.1. Solvants non halogénés	43
4.3.1.1. Alcools	43
4.3.1.2. Cétones	43
4.3.1.3. Techniques de dépollution	43
4.3.2. Solvants halogénés	43
4.3.2.1. Formule chimique	43
4.3.2.2. Provenances et utilisations	44
4.3.2.3. Propriétés physico-chimiques	44
4.3.2.4. Techniques de dépollution	44
<b>4.4. Isolants électriques (PCBs...)</b>	<b>44</b>
4.4.1. Formule chimique	44
4.4.2. Provenances et utilisations	44
4.4.3. Propriétés physico-chimiques	44
4.4.4. Techniques de dépollution	44
<b>4.5. Aérosols (chlorofluorocarbones...)</b>	<b>45</b>
4.5.1. Composition chimique	45
4.5.2. Provenances et utilisations	45
4.5.3. Propriétés physico-chimiques	45
4.5.4. Techniques de dépollution	45
<b>4.6. Engrais (l'azote, le phosphate, la potasse, la magnésie...)</b>	<b>45</b>
4.6.1. Composition chimique	45
4.6.2. Provenances et utilisations	45
4.6.3. Propriétés physico-chimiques	46
4.6.4. Techniques de dépollution	46
<b>4.7. Produits phytosanitaires (organophosphorés, carbamates, dérivés organomercuriels, acides phénoxyarylcarboxyliques, triazines, urées, organochlorés...)</b>	<b>46</b>
4.7.1. Nature chimique	46
4.7.2. Provenances et utilisations	46
4.7.3. Propriétés physico-chimiques	46
4.7.4. Techniques de dépollution	47
<b>4.8. Colorants (acides gras et sulfonâtes...)</b>	<b>47</b>
4.8.1. Composition chimique	47
4.8.2. Provenances et utilisations	47
4.8.3. Propriétés physico-chimiques	47
4.8.4. Techniques de dépollution	47
<b>4.9. Peinture (huiles, matières plastiques, résines phénoliques, xylène, toluène, alcools, esters, éthers...)</b>	<b>48</b>
4.9.1. Composition chimique	48
4.9.2. Provenances et utilisations	48
4.9.3. Propriétés physico-chimiques	48
4.9.4. Techniques envisageables	48
<b>4.10. Résines (acides résiniques : acide abiétique..., colophane, térébenthine...)</b>	<b>48</b>
4.10.1. Composition chimique	48
4.10.2. Provenances et utilisations	49
4.10.3. Propriétés physico-chimiques	49

4.10.4. Techniques de dépollution	49
<b>4.11. Graisses / huiles</b>	<b>49</b>
4.11.1. Composition chimique	49
4.11.2. Provenances et utilisations	49
4.11.3. Propriétés physico-chimiques	49
4.11.4. Techniques de dépollution	49
<b>4.12. Détergent (oléate, palmitate, stéarate de sodium...)</b>	<b>49</b>
4.12.1. Composition chimique	49
4.12.2. Provenances et utilisations	50
4.12.3. Propriétés physico-chimiques	50
4.12.4. Techniques envisageables	50
<b>4.13. Verres</b>	<b>50</b>
4.13.1. Composition chimique	50
4.13.2. Provenances et utilisations	50
4.13.3. Propriétés physico-chimiques	50
4.13.4. Techniques de dépollution	51
<b>4.14. Batteries</b>	<b>51</b>
4.14.1. Composition chimique	51
4.14.2. Provenances et utilisations	51
4.14.3. Propriétés physico-chimiques	51
4.14.4. Techniques envisageables	51
<b>4.15. Conclusion</b>	<b>51</b>
<b>5. ACTIVITES INDUSTRIELLES</b>	<b>52</b>
<b>5.1. Introduction</b>	<b>52</b>
<b>5.2. Aciérie (chrome, nickel, molybdène, tungstène...)</b>	<b>52</b>
5.2.1. Polluants	52
5.2.2. Contraintes dues au site	52
5.2.3. Techniques envisageables	53
<b>5.3. Industries chimiques</b>	<b>53</b>
5.3.1. Polluants	53
5.3.2. Contraintes dues au site	53
5.3.3. Techniques envisageables	53
<b>5.4. Industrie pharmaceutique</b>	<b>53</b>
5.4.1. Polluants	53
5.4.2. Contraintes dues au site	53
5.4.3. Techniques envisageables	54
<b>5.5. Pétrochimie</b>	<b>54</b>
5.5.1. Polluants	54
5.5.2. Contraintes dues au site	54
5.5.3. Techniques envisageables	54
<b>5.6. Industrie pétrolière</b>	<b>54</b>
5.6.1. Station service	54
5.6.1.1. Polluants	54
5.6.1.2. Contraintes dues au site	54
5.6.1.3. Techniques envisageables	54
5.6.2. Zone de transfert et dépôt de produits pétroliers	54
5.6.2.1. Polluants	55
5.6.2.2. Contraintes dues au site	55
5.6.2.3. Techniques envisageables	55
5.6.3. Raffineries	55
5.6.3.1. Polluants	55
5.6.3.2. Contraintes dues au site	55
5.6.3.3. Techniques envisageables	55

5.6.4. Usines à gaz (goudron, naphthalène, benzol, ammoniac, sulfure d'hydrogène, hydrate de fer, acide cyanhydrique...)	56
5.6.4.1. Polluants	56
5.6.4.2. Contraintes dues au site	56
5.6.4.3. Techniques envisageables	56
5.6.5. Sites d'exploitation / forages	56
5.6.5.1. Polluants	56
5.6.5.2. Contraintes dues au site	56
5.6.5.3. Techniques envisageables	57
<b>5.7. Exploitation minière</b>	<b>57</b>
5.7.1. Polluants	57
5.7.2. Contraintes dues au site	57
5.7.3. Techniques envisageables	57
<b>5.8. Energie</b>	<b>57</b>
5.8.1. Nucléaire	57
5.8.1.1. Polluants	57
5.8.1.2. Contraintes dues au site	57
5.8.1.3. Techniques envisageables	57
5.8.2. Hydroélectrique	58
5.8.2.1. Polluants	58
5.8.2.2. Contraintes dues au site	58
5.8.2.3. Techniques envisageables	58
5.8.3. Thermique	58
5.8.3.1. Polluants	58
5.8.3.2. Contraintes dues au site	58
5.8.3.3. Techniques envisageables	58
<b>5.9. Réfrigération (ammoniac, chlorure de méthyle, Fréon, chlorure de calcium ou de sodium...)</b>	<b>58</b>
5.9.1. Polluants	58
5.9.2. Contraintes dues au site	59
5.9.3. Techniques envisageables	59
<b>5.10. Industrie automobile</b>	<b>59</b>
5.10.1. Polluants	59
5.10.2. Contraintes dues au site	59
5.10.3. Techniques envisageables	59
<b>5.11. Industries textile (pesticides, phénols, composés halogénés, cuivre, chrome, arsenic...)</b>	<b>59</b>
5.11.1. Polluants	59
5.11.2. Contraintes dues au site	60
5.11.3. Techniques envisageables	60
<b>5.12. Industrie du bois (préservation) (phénylphénoxyde de sodium, arséniate de cuivre et de chrome, pentachlorophénol, lindane, naphtéates, créosotes...)</b>	<b>60</b>
5.12.1. Polluants	60
5.12.2. Contraintes dues au site	60
5.12.3. Techniques envisageables	60
<b>5.13. Industrie du papier (bisulfite, soude...)</b>	<b>60</b>
5.13.1. Polluants	60
5.13.2. Contraintes dues au site	60
5.13.3. Techniques envisageables	61
<b>5.14. Agro-chimie</b>	<b>61</b>
5.14.1. Polluants	61
5.14.2. Contraintes dues au site	61
5.14.3. Techniques envisageables	61
<b>5.15. Agriculture (azote, phosphore, potassium, nitrates...)</b>	<b>61</b>
5.15.1. Polluants	61
5.15.2. Contraintes dues au site	61
5.15.3. Techniques envisageables	61

<b>5.16. Pressing / nettoyage à sec (solvants chlorés...)</b>	<b>62</b>
5.16.1. Polluants	62
5.16.2. Contraintes dues au site	62
5.16.3. Techniques envisageables	62
<b>5.17. Traitement de surface</b>	<b>62</b>
5.17.1. Polluants	62
5.17.2. Contraintes dues au site	62
5.17.3. Techniques envisageables	62
<b>5.18. Conclusion.</b>	<b>62</b>
<b>6. CHOIX DES METHODES DE DEPOLLUTION</b>	<b>64</b>
<b>6.1. Introduction</b>	<b>64</b>
<b>6.2. Mise en garde</b>	<b>64</b>
<b>6.3. Choix</b>	<b>64</b>
6.3.1. Bilan des différentes étapes préalables	64
6.3.2. Introduction sur l'utilisation des tableaux	64
6.3.3. Molécules de polluant détectées / produits commerciaux / activités industrielles	65
6.3.3.1. Introduction	65
6.3.3.2. Tableau	66
6.3.3.3. Conclusion	68
6.3.4. Produits commerciaux et molécules les composant / techniques de dépollution	68
6.3.4.1. Introduction	68
6.3.4.2. Tableau	69
6.3.4.3. Conclusion	71
6.3.5. Activités industrielles / molécules chimiques impliquées / techniques de dépollution	71
6.3.5.1. Introduction	71
6.3.5.2. Tableau	72
6.3.5.3. Conclusion	74
6.3.6. Molécules de polluants / propriétés physico-chimiques / techniques de dépollution	74
6.3.6.1. Introduction	74
6.3.6.2. Tableau	75
6.3.6.3. Conclusion	76
<b>6.4. Conclusion</b>	<b>76</b>
<b>7. PRESENTATION DES DIFFERENTES METHODES DE DEPOLLUTION</b>	<b>77</b>
<b>7.1. Introduction</b>	<b>77</b>
<b>7.2. Présentation des principes de fonctionnement des techniques de dépollution</b>	<b>77</b>
7.2.1. Introduction	77
7.2.2. Atténuation naturelle	77
7.2.2.1. Principe de l'atténuation naturelle	77
7.2.2.2. Polluants potentiellement traitables par atténuation naturelle	77
7.2.2.3. Illustration de la technique d'atténuation naturelle	78
7.2.3. Barrières réactives	78
7.2.3.1. Principe des barrières réactives	78
7.2.3.2. Polluants potentiellement traitables par les barrières réactives	78
7.2.3.3. Illustration de la technique des barrières réactives	78
7.2.4. Biolixiviation	78
7.2.4.1. Principe de la biolixiviation	78
7.2.4.2. Polluants potentiellement traitables par biolixiviation	79
7.2.4.3. Illustration de la technique de biolixiviation	79
7.2.5. Biosparging	79
7.2.5.1. Principe du biosparging	79
7.2.5.2. Polluants potentiellement traitables par biosparging	79
7.2.5.3. Illustration de la technique du biosparging	79
7.2.6. Biotertre	79
7.2.6.1. Principe du biotertre	79

7.2.6.2. Polluants potentiellement traitables par biotertre	80
7.2.6.3. Illustration de la technique du biotertre	80
7.2.7. Bioventing	80
7.2.7.1. Principe du bioventing	80
7.2.7.2. Polluants potentiellement traitables par bioventing	80
7.2.7.3. Illustration de la technique de bioventing	80
7.2.8. Excavation / Mise en décharge	81
7.2.8.1. Principe de l'excavation / mise en décharge	81
7.2.8.2. Polluants potentiellement traitables par excavation / mise en décharge	81
7.2.8.3. Illustration de la technique d'excavation / mise en décharge	81
7.2.9. Flushing ou lavage in situ	81
7.2.9.1. Principe du flushing ou lavage in situ	82
7.2.9.2. Polluants potentiellement traitables par flushing ou lavage in situ	82
7.2.9.3. Illustration du flushing ou lavage in situ	82
7.2.10. Incinération	82
7.2.10.1. Principe de l'incinération	82
7.2.10.2. Polluants potentiellement traitables par incinération	82
7.2.10.3. Illustration de la technique d'incinération	83
7.2.11. Neutralisation	83
7.2.11.1. Principe de la neutralisation	83
7.2.11.2. Polluants potentiellement traitables par neutralisation	83
7.2.11.3. Illustration de la technique de neutralisation	83
7.2.12. Phytoremédiation	83
7.2.12.1. Principe de la phytoremédiation	84
7.2.12.2. Polluants potentiellement traitables par phytoremédiation	84
7.2.12.3. Illustration de la technique de phytoremédiation	84
7.2.13. Pump and Treat	84
7.2.13.1. Principe du Pump and Treat	84
7.2.13.2. Polluants potentiellement traitables par Pump and Treat	85
7.2.13.3. Illustration de la technique de Pump and Treat	85
7.2.14. Slurping ou Extraction triple phase®	85
7.2.14.1. Principe du slurping ou extraction triple phase®	85
7.2.14.2. Polluants potentiellement traitables par slurping ou extraction triple phase®	85
7.2.14.3. Illustration de la technique de slurping ou extraction triple phase®	86
7.2.15. Solidification, confinement	86
7.2.15.1. Principe de la technique de solidification, confinement	86
7.2.15.2. Polluants potentiellement traitables par solidification, confinement	86
7.2.15.3. Illustration de la technique de solidification, confinement	86
7.2.16. Sparging	87
7.2.16.1. Principe du sparging	87
7.2.16.2. Polluants potentiellement traitables par sparging	87
7.2.16.3. Illustration de la technique de sparging	87
7.2.17. Venting	88
7.2.17.1. Principe du venting	88
7.2.17.2. Polluants potentiellement traitables par venting	88
7.2.17.3. Illustration du venting	88
7.2.18. Venting thermique	88
7.2.18.1. Principe du venting thermique	89
7.2.18.2. Polluants potentiellement traitables par venting thermique	89
7.2.18.3. Illustration du venting thermique	89
7.2.19. Conclusion	89
<b>7.3. Techniques de dépollution et polluants traitables par chaque technique</b>	<b>89</b>
7.3.1. Introduction	89
7.3.2. Mise en garde	90
7.3.3. Tableau Techniques / Familles de polluants traitables	90
7.3.4. Tableau des paramètres optimaux de l'environnement pour une efficacité maximum des techniques de dépollution	91
7.3.5. Tableau des paramètres optimaux des polluants pour une efficacité maximum des techniques de dépollution <sup>92</sup>	92
7.3.6. Tableau récapitulatif des caractéristiques des techniques de dépollution	93

7.3.7. Conclusion	95
<b>7.4. Exemples industriels de dépollution</b>	<b>97</b>
7.4.1. Introduction	97
7.4.2. Produits traités et exemples industriel associés	97
7.4.3. Conclusion	103
<b>7.5. Conclusion</b>	<b>103</b>

## 1. PROPRIETES ENVIRONNEMENTALES

### 1.1. Introduction

Les propriétés environnementales correspondent aux paramètres qui définissent, caractérisent le milieu environnant la pollution, à savoir pour nous le sous-sol. Ces paramètres sont fondamentaux car ils influencent directement les pollutions et par là même, les techniques de dépollution qui pourront être envisagées.

Un sol non pollué est un complexe dynamique à trois phases interagissantes : l'eau, l'air et la phase solide. C'est cette dernière qui est à l'origine des propriétés du sol, et son organisation définit le volume et la structure des espaces lacunaires, siège des processus de transfert des fluides et de développement des micro-organismes. Le sous-sol comprend le sol et la nappe phréatique. Il peut être défini par les propriétés environnementales suivantes :

- ⇒ la composition minérale et texture du sol (argiles / limons / sables / matières organiques),
- ⇒ la structure,
- ⇒ l'humidité,
- ⇒ le pH et son contrôle,
- ⇒ le potentiel d'oxydoréduction,
- ⇒ la température et son contrôle,
- ⇒ les nutriments,
- ⇒ les matières organiques,
- ⇒ ...

Il est indispensable dans le cadre d'une dépollution de considérer les principaux facteurs physico-chimiques du sol, à savoir :

1. sa composition et texture,
2. sa structure,
3. son hygrométrie (teneur en eau),
4. son pH,
5. son potentiel rédox,
6. sa température,
7. sa teneur en éléments nutritifs.

Ces paramètres environnementaux vont être détaillés ci-après. Précisons qu'ils ne sont pas tous obligatoirement considérés à chaque pollution. Ils font parti des facteurs qui conditionnent certaines techniques de dépollution et sont donc étudiés en relation avec les techniques envisageables afin de confirmer ou infirmer les choix initiaux.

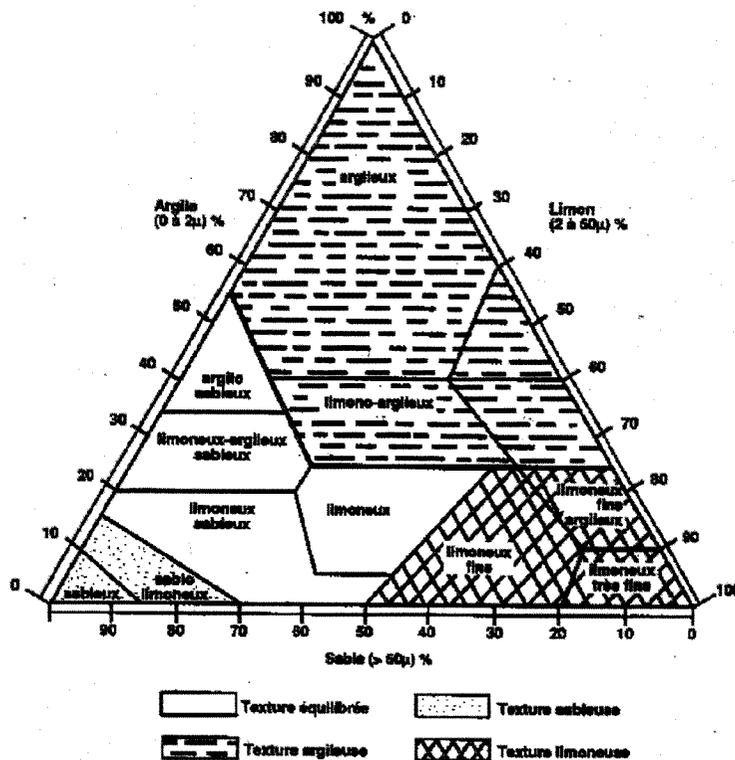
### 1.2. Les facteurs physico-chimiques du sol

#### 1.2.1. Texture

La composition d'un sol peut être décomposée en trois fractions minérales :

1. les argiles (particules de 0 à 2 $\mu$ m),
2. les limons (2 à 50  $\mu$ m),
3. les sables (>50 $\mu$ m).

La proportion de chacun de ces constituants détermine la texture du sol (cf. : schéma Triangle des sols).



**Schéma Triangle des sols**

Il faut souligner que les caractéristiques minéralogiques de certains éléments jouent un rôle déterminant sur les processus d'échanges entre la matrice solide et les phases liquide et gazeuse. C'est ainsi que l'influence de la texture sur les qualités physiques d'un sol provient des propriétés colloïdales\* des minéraux argileux qui, par suite de l'existence de charges, exercent ainsi une forte attraction sur les molécules d'eau, les ions et certaines molécules organiques (adsorption\*, échange ionique\*, floculation\*, dispersion\*).

L'intensité des phénomènes d'adsorption dépend d'une part de la densité de charges et d'autre part de la surface spécifique, définie comme le rapport de la surface totale des particules à leur volume. *A titre indicatif, la surface spécifique d'un sol sableux ou limoneux est inférieure à 1 m<sup>2</sup>/g alors que celle d'un sol argileux peut attendre plusieurs centaines de m<sup>2</sup>/g.*

Les argiles sont peu perméables à l'eau et peuvent former une couche totalement imperméables. Les sables quant à eux ont une forte porosité et n'adsorbent pas les polluants ou molécules organiques. Enfin, les limons ont des propriétés intermédiaires aux sables et argiles. C'est la proportion de ces différents éléments qui va permettre de déterminer si telle ou telle technique de dépollution reste applicable au cas envisagé.

La texture, en jouant un rôle important sur la perméabilité et la porosité influent sur le choix des techniques de dépollution. Ainsi, les sols argileux sont rarement très perméables ce qui empêche l'utilisation de techniques in situ telles que le **Biosparging**, le **Bioventing**, le **Flushing**, le **Venting** et le **Sparging**. Les **Barrières réactives** par contre fonctionnent toujours.

La texture n'est que très rarement un facteur déterminant d'une technique ex situ. Cependant, elle influe sur la mise en place (dessin) de ces techniques.

### 1.2.2. Structure

Le terme de structure évoque l'arrangement spatial des particules minérales de faible taille et leurs éventuelles liaisons avec des matières organiques. Cette association, comparable à un ciment, enrobe les particules minérales plus grossières en présence d'ions floculants (Ca<sup>+</sup> en milieu neutre ou légèrement alcalin, Al<sup>3+</sup> en milieu acide). Le résultat finale est la formation des agrégats (de taille très variable, <2 mm jusqu'à 500 mm), responsables partiellement de la porosité du sol. Entre ces formations, les lacunes formées permettent la circulation des gaz et de l'eau.

La fraction organique de la phase solide est constituée d'un ensemble de substances dont la teneur pondérale doit être complétée par des considérations qualitatives (matière organique fraîche ou libre, humus\* stable, produits exogènes provenant soit directement d'une pollution soit des étapes de sa dégradation). Notons ainsi que les argiles favorisent la complexation des matières organiques (complexes argilo-humiques) et ainsi l'adsorption de nombreux polluants.

Trois grands types de structure peuvent ainsi être décrites :

1. la structure particulaire : les éléments du squelette ne sont pas liés, le sol est très meuble (en général c'est le cas des sols sableux).
2. la structure massive ou continue : les éléments structuraux sont liés plus ou moins modérément et le sol peut se déliter en « mottes » cohérentes mais non persistantes.
3. la structure fragmentaire plus ou moins fine : les mottes sont persistantes.

La structure, malgré sa complexité d'analyse, tient un rôle important au niveau des cinétiques de traitement. Ainsi, les sols à structures complexes (incluant de la matière organique) piègent les polluants hydrophobes et ralentissent la désorption. C'est pourquoi une augmentation de matière organique naturelle du sol et donc de la complexité de la structure engendre un ralentissement des techniques de dépollution nécessitant un transfert de masse. Il s'agit des techniques telles que le **Venting**, **Sparging**, **Flushing**, **Bioventing**, **Biosparging**. Cependant, d'autres techniques (**Bioterre**, **Phytoremédiation**, ...) peuvent fonctionner plus rapidement grâce à des pré-traitements.

### 1.2.3. Hygrométrie (ou teneur en eau du sol)

L'eau joue un rôle essentiel dans tous les processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent dans le sol. La proportion d'eau dans un sol varie beaucoup avec le type de sol. Le paramètre le plus intéressant à prendre en compte est la capacité au champ (CAC). Il s'agit de la quantité d'eau maximum retenue par un sol donné. Cette CAC est maximale pour les sols limoneux, plus faible pour les sols sablonneux qui manquent de capacité de rétention et se drainent facilement, ainsi que pour les sols argileux dont les pores de petites taille conduisent à des forces de rétention considérables.

Remarquons que l'on parle de zone insaturée (zone dans laquelle une partie seulement des pores est remplie d'eau, elle est située entre la surface du sol et la nappe phréatique), par opposition à la zone saturée (= nappe phréatique).

L'humidité du sol est un des paramètres les plus importants dans le choix d'une technique de dépollution. C'est l'humidité qui va déterminer l'efficacité de la méthode. Tout processus biologique a besoin d'eau pour assurer la survie des organismes.

Les techniques comme le **Biosparging**, le **Bioventing** nécessitent une Capacité au champ comprise entre 50 et 80%. Des taux supérieures correspondent à une inondation du sol qui ne permet pas la circulation de l'air et des taux inférieures sont défavorables aux activités des organismes. Pour le **Bioterre** aérobies, la fourchette est la même. Par contre, le Bioterre peut aussi être utilisé en conditions anoxiques (100% de CAC). Une CAC de 100% est un indicateur qui permet de choisir entre les techniques applicables en zone saturée (nappe phréatique : **Sparging**, **Barrières réactives**, **Slurping**, **Pompage**) et celles applicables en zone insaturée (**Phytoremédiation**, **Venting**).

### 1.2.4. pH du sol

Le pH du sol concerne l'eau interstitielle. Selon sa valeur, il est possible de distinguer :

1. les sols acides (pH < 7)
2. les sols basiques (pH autour de 7)
3. les sols basiques (pH > 7)

Il peut être nécessaire de corriger le pH du sol contaminé pour promouvoir les capacités de dégradation d'une communauté microbienne. Beaucoup de sols naturels sont trop acides pour une activité microbienne optimale et le problème est exacerbé par une forte fertilisation avec certains. La fixation biologique de l'azote crée également une acidité par production d'ions H<sup>+</sup>.

L'adsorption ou l'inactivation des ions H<sup>+</sup> ou la libération d'ions adsorbés pour neutraliser les ions OH<sup>-</sup> entraîne une protection contre les changements de pH quand des constituants acides ou basiques sont ajoutés au sol. Le pouvoir tampon, différent selon les sols, est souvent le reflet d'une différence de capacité d'échange cationique qui influence directement la quantité de chaux ou d'acide nécessaire pour ajuster le pH. Le niveau d'ajustement du pH dépend également de la profondeur de la contamination dans un site

(volume à traiter). Il est important de noter que des changements de pH peuvent influencer la dissolution ou la précipitation de certains composés dans le sol. Il faut vérifier que l'augmentation ou la diminution du pH ne mobilise pas des composés dangereux. Par exemple, aux faibles pH, des ions cyanures sont convertis en HCN toxique, et certains métaux solubilisés.

Un pH proche de la neutralité est favorable aux processus biologiques. Ainsi, un pH de 7 est une valeur optimale pour les techniques de dépollution telles que les **Bioventing**, **Biosparging**, **Bioterre**. Par opposition, toutes les techniques de solubilisation des métaux (**Biolixiviation**, **Flushing**, **Phytoremédiation**) nécessitent un pH acide (pH<7).

#### 1.2.5. Potentiel rédox

Le potentiel rédox (ou potentiel d'oxydoréduction) d'un sol varie de 800 mV (conditions oxydantes) à -300 mV (conditions très réductrices). Ce potentiel est essentiellement fonction de la teneur en oxygène. Il dépend aussi de différents systèmes rédox où sont impliqués les ions métalliques (par exemple  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ ) des gaz ( $H_2S / CO_2$ ) ou des substances organiques réductrices. Le potentiel rédox diminue avec la disparition de l'oxygène. Ainsi, le potentiel rédox peut être encore plus fortement diminué en ajoutant de la matière organique facilement assimilable qui lors de sa transformation, entraînera la disparition des dernières traces d'oxygène. C'est la méthode utilisée pour dépolluer les composés halogénés, en particulier les hydrocarbures chlorés très substitués qui nécessitent des conditions réductrices.

Le rédox est utilisé comme mesure d'oxygénation et de force réductrice du milieu. Il permet de choisir entre les techniques nécessitant de l'oxygène (**Bioventing**, **Biosparging**, **Bioterre aérobie**) et celles qui n'en nécessitent pas : **Bioterre anaérobies**, **Barrières réactives** (qui sont elles-mêmes capables de transformer le milieu oxydant en milieu réducteur).

#### 1.2.6. Température

De même, l'eau intervient directement dans la régulation de la température du sol grâce à sa forte chaleur spécifique et à l'énergie qu'elle consomme pour se vaporiser (600 cal/g), ou qu'elle restitue en se condensant. Elle amortit ainsi les variations de température. Cet effet permet de dire que les sols humides sont moins sujets aux changements diurnes que les sols secs. D'autres facteurs tels que l'aspect du sol, l'importance de la pente, le degré d'ombrage, la couleur du sol et la couverture de surface affectent également la température.

La température influence directement la cinétique de réaction des techniques physico-chimiques et biologiques de dépollution. En règle générale, les techniques physico-chimiques ou chimiques augmentent en rapidité avec la température (**Venting**, **Sparging**, **Flushing**, **Barrières réactives**). Dans le cas des techniques biologiques, une valeur optimale de 35°C existe souvent (**Bioventing**, **Biosparging**, **Bioterre**, **Phytoremédiation**).

#### 1.2.7. Teneur en éléments nutritifs

Le rapport C/N est toujours pris en compte car ces deux éléments rentrent dans la composition de base de toutes les cellules (animales ou végétales) et c'est un paramètre fondamental de la caractérisation de l'environnement du sol. Notons que les sols contiennent d'autres minéraux et nutriments comme le phosphore et les oligo-éléments, mais aussi certains métaux (Co, Ni,...).

En fonction des objectifs d'un traitement biologique, on pourra être amené à corriger le rapport C/N d'un sol contaminé par l'ajout de substances nutritives minérales et/ou organiques que sont les engrais. À côté de l'oxygène, moléculaire ou combiné, il est nécessaire de fournir un apport d'autres éléments tels que l'azote, le phosphore, le soufre et divers oligo-éléments. Cet ensemble de nutriments, qui inclut d'ailleurs d'autres matières organiques pouvant servir de cométabolites, est nécessaire en développement de la biomasse du sol.

Les traitements biologiques nécessitent la présence de nutriments et minéraux. Parfois, ces éléments sont inhibiteurs de certaines techniques (*Bioterre, Incinération...*). La limite entre le besoin et le caractère inhibiteur repose sur les besoins biologiques et le devenir de ces éléments dans les processus chimiques (*Barrières réactives*) et thermique (*Incinération* produisant des cendres).

### 1.3. Conclusion

La connaissance de l'environnement sol dans sa globalité (eau, air, sol) conditionne la mise en œuvre et la réussite des méthodes de dépollution. Il convient donc de tenir compte de ces différents facteurs avant de décider du choix et des modalités de mise en place de telle ou telle technique.

**L'équipe d'ingénieurs d'A.T.E. est  
composée de géologues,  
hydrogéologues, géochimistes,  
microbiologistes.**

***La dépollution des sols, une affaire de  
spécialistes.***

## 2. CARACTERISTIQUES DES POLLUANTS

### 2.1. Introduction

Le devenir des polluants dans un sol est très largement dépendant de leurs caractéristiques physico-chimiques. Ainsi, ces paramètres influent directement sur les techniques de dépollution qui pourront être envisagées sur les polluants concernés. Les propriétés retenues sont, comme pour le milieu, les propriétés principales à prendre en compte pour choisir une technique de dépollution adaptée à chaque polluant. Dans le cas de pollution multi-produits, deux cas sont possibles :

- soit une technique commune est applicable aux polluants,
- soit il faudra envisager une dépollution multiprocédés.

Les caractéristiques prises en compte sont détaillées ci-dessous et seront données à chaque fois que ce sera possible, pour les molécules et familles de polluants concernés. Il s'agit de la solubilité dans l'eau, du coefficient de partition octanol/eau ( $K_{ow}$ ), de la pression de vapeur, du coefficient de partage air/eau (constante de Henry), de la demi-vie biologique et de la densité des polluants.

### 2.2. Solubilité dans l'eau ou solubilité aqueuse

La solubilité est la quantité maximale dissoute d'un composé dans l'eau à une température spécifique. La solubilité de la plupart des composés organiques est comprise entre 1 et 100 000 mg/l à température ambiante (20 à 25°C). Les composés très solubles sont facilement transportés avec l'eau. Ils sont souvent peu adsorbés sur les sols, et plus facilement biodégradés.

La solubilité varie avec la température, la fraction molaire de chaque composé dans le mélange de polluants ainsi que la teneur en matières organiques dissoutes. C'est pourquoi dans le cas le plus fréquent d'un mélange de polluant, la solubilité aqueuse d'une molécule de polluant est modifiée. Par exemple, une essence qui renfermerait une teneur de 1% en naphthalène présente une solubilité dans l'eau diminuée d'un facteur 300 (loi de Raoult). Il convient donc de nuancer cette donnée suivant que l'on se trouve dans le cas d'un mélange, dans le cas de conditions extrêmes de température.

Ainsi, en analysant ce paramètre pour chaque polluant il est possible d'envisager différentes techniques de dépollution. Plus la solubilité est forte et plus ces techniques seront favorisées :

- ⇒ **Biolixiviation,**
- ⇒ **Barrières réactives,**
- ⇒ **Pompage,**
- ⇒ **Flushing.**

Par opposition, plus la solubilité est forte et plus le **Slurping (extraction triple phase ®)** est défavorisé.

### 2.3. Coefficient de partition octanol / eau ( $K_{ow}$ )

Le coefficient de partition (ou partage) ( $K_{ow}$ ) est défini comme le rapport de la concentration du produit ( $C_0$ ) dans la phase octanol à sa concentration ( $C_w$ ) dans l'eau.

$$K_{ow} = C_0 / C_w$$

Ces valeurs vont de  $10^{-3}$  à  $10^7$ . Des composés à faibles valeurs de  $K_{ow}$  (<10) sont considérés comme hydrophiles, donc très solubles dans l'eau et peu dans les phases organiques. Ils ont de faibles coefficients d'adsorption et de faibles facteurs de bioconcentration. Les composés à  $K_{ow}$  élevés (>100) sont, par opposition, très hydrophobes et ont de forts coefficients d'adsorption. Ils seront donc adsorbés en grande quantité dans le sol.

Ce paramètre peut être relié à la solubilité dans l'eau et aux effets de bioconcentration, mais il est surtout utilisé pour être relié à l'adsorption sur les sols ou les sédiments comme nous venons de le voir. En association avec la teneur en matière organique du sol, ces valeurs peuvent être utilisées pour prévoir la quantité de produit adsorbée sur le sol et le facteur retard pour le mouvement dans l'aquifère. Ces propriétés physico-chimiques donnent des indications sur la répartition probable du polluant dans l'eau et dans le sol.

Remarquons que l'adsorption dépend aussi des caractères géologiques du sol (porosité, perméabilité, fraction de matière organique...).

Un coefficient de partition octanol / eau faible favorisera les techniques de dépollution suivantes :

- ⇒ **Slurping (extraction triple phase ®)**,
- ⇒ **Flushing**,
- ⇒ **Bioventing**,
- ⇒ **Bioterte**.

Par opposition, un coefficient fort favorisera l'**Atténuation naturelle**.

## 2.4. Pression ou tension de vapeur

Elle permet d'estimer la tendance d'un produit à se volatiliser et donc à passer dans l'atmosphère gazeuse à partir de la phase pure, du sol ou de la phase organique. Dans le cas de mélange de polluants, la composition du mélange influe directement sur la valeur des tensions de vapeur de chaque produit selon une équation déterminée :

$$P_i = X_i \gamma_i P_{i0}$$

- avec :
- $P_i$  : pression partielle à l'équilibre du composé i
  - $X_i$  : fraction molaire du composé i dans le mélange
  - $\gamma_i$  : coefficient d'activité du composé i dans le mélange
  - $P_{i0}$  : tension de vapeur du composé i lorsqu'il est pur

La volatilisation en milieu aqueux d'un polluant dépend étroitement de sa solubilité et de sa tension de vapeur. Par exemple, un composé ayant une faible solubilité dans l'eau ainsi qu'une tension de vapeur élevée sera vite volatilisé, incitant à des techniques de volatilisation de ce polluant. C'est la loi de Henry qui décrit les équilibres phase liquide-phase gazeuse.

Une tension de vapeur forte favorise les techniques de dépollution suivantes :

- ⇒ **Venting**,
- ⇒ **Sparging**,
- ⇒ **Venting thermique**.

Par opposition, des tensions de vapeur fortes défavorisent le **Bioterte**.

## 2.5. Constante de Henry

La constante de Henry est le ratio pression de vapeur / solubilité dans l'eau. Plus la constante de Henry est élevée (> 160), plus un composé est volatil et plus il peut être éliminé facilement d'une solution par venting ou aération. Cette constante vient en appui de la solubilité et de la tension de vapeur.

$$H = C_{ig} / C_{il}$$

- avec :
- $H$  : constante de Henry
  - $C_{ig}$  : concentration en phase gazeuse de constituant i
  - $C_{il}$  : concentration en phase liquide du constituant i

Plus un produit est volatil, moins son affinité pour le sol est grande.

De fortes valeurs de la constante de Henry sont favorables au :

- ⇒ **Venting**,
- ⇒ **Sparging**,
- ⇒ **Venting thermique**.

## 2.6. Biodégradabilité

La biodégradation des composés organiques se produit en conditions aérobies ou anaérobies selon la structure moléculaire et les conditions environnementales. Les tests normalisés avec les boues activées donnent une idée de la biodégradation aérobie. Le potentiel de biodégradation permet de classer les composés en dégradables, persistants (ne changent pas d'état spontanément) et récalcitrants (résistent avec opiniâtreté). Généralement, plus une molécule est substituée plus elle est résistante à la biodégradation. La position des substituants joue un rôle important, les positions méta et ortho conférant

une plus grande stabilité aux molécules aromatiques. Il en est de même pour les substitutions de carbones en alpha par rapport à celles en oméga. Les remplacements par du S, N, O des atomes de carbones ainsi que les branchements multiples sur un même carbone limitent eux aussi la biodégradation probable des polluants organiques. La biodégradation anaérobie se fait aussi par fermentation et déchloration réductive.

La présence excessive de substrat ou de produits du métabolisme peut parfois engendrer une inhibition ou inactivation d'enzyme(s) du métabolisme microbien.

Certaines biodégradations nécessitent l'action d'un consortium bactérien dont une ou plusieurs espèces peuvent venir à manquer.

Plus la biodégradabilité augmente et meilleure sera l'efficacité des techniques suivantes :

- ⇒ **Bioventing,**
- ⇒ **Biosparging,**
- ⇒ **Biotertre.**

## 2.7. Poids spécifique

Le poids spécifique est sans dimension et dérive de la densité. On utilise comme base le poids spécifique de l'eau à 4 °C, car à cette température la densité de l'eau est de 1,000 g/ml.

Il est important de connaître le poids spécifique pour savoir si le composé flottera sur la nappe ou s'enfoncera. Les composés ayant un poids spécifique supérieure à 1 ne flottent pas.

Un poids spécifique faible est favorable au **Sturping (Extraction triple phase ®)**.

## 2.8. Conclusion

L'ensemble de ces paramètres permet d'envisager pour chaque type de polluant dans des conditions déterminées une ou plusieurs techniques de dépollution. Dans le cas de mélange de polluants, les données sont plus difficiles à appréhender car les propriétés physico-chimiques résultantes du mélange ne sont pas une fonction linéaire des paramètres pris individuellement. Cependant, ils fournissent des indications précieuses mais qui n'ont pas force de loi.

***La dépollution, une affaire de spécialistes :***

**A.T.E. est au sein du groupe Rhône-Poulenc un élément majeure de la dépollution de Rhodia Eco Service, soit plus de 1000 personnes à votre disposition.**

### 3. CLASSIFICATION DES POLLUANTS, familles de polluant

#### 3.1. Introduction

Dans un premier temps, une introduction rapide sur les hydrocarbures puis un bref rappel sur la nomenclature (dénomination des molécules) sera présenté afin de faciliter la compréhension de la relation « noms de polluants/molécules chimiques ».

Nous envisagerons dans un second temps les différentes familles d'hydrocarbures puis leurs produits substitués. Dans chaque cas, la formule chimique, l'origine des molécules, les propriétés physico-chimiques intéressant la pollution/dépollution ainsi que les techniques de dépollution proposées pour ces polluants potentiels seront présentées. C'est l'adéquation « milieu (sol, profondeur, nappe phréatique...) / polluant » qui permet de trancher entre les différentes techniques mentionnées.

Enfin, une dernière partie sera consacrée aux métaux et inorganiques, éléments chimiques souvent incriminés dans les pollutions.

#### 3.2. Les hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés organiques dont les molécules de bases ne contiennent que du carbone et de l'hydrogène (ce sont des hydrates de carbone). Ces éléments constituent le pétrole brut ou en sont issus par craquage. Selon leur structure se distinguent les hydrocarbures :

- ◆ aliphatiques saturés (ou alcanes, paraffines),
- ◆ aliphatiques insaturés (ou alcènes, oléfine),
- ◆ cycliques saturés (ou cyclanes, naphènes),
- ◆ hydrocarbures aromatiques (arènes et HAP),
- ◆ hétérocycliques.

Les hydrocarbures permettent la fabrication de nombreux polymères (fibres acryliques, vinyliques...), des plastiques, des engrais azotés, des détergents, des solvants, des lubrifiants... Ils sont à la base de la chimie organique. La modification de la formule chimique des différentes familles d'hydrocarbures énoncées par des substitutions permettent la chimie du pétrole et la fabrication des produits commerciaux issus de cette chimie.

#### 3.3. Nomenclature

Cette partie n'a pas pour objectif d'expliquer ou de présenter la nomenclature internationale, pas plus que de permettre au lecteur de nommer une molécule. Elle offre simplement les bases permettant de comprendre la relation entre le nom d'une molécule et sa formule chimique, donc son appartenance à telle ou telle famille chimique. Ceci est intéressant du point de vue des propriétés propres à chaque famille expliquant la pollution/dépollution.

Le tableau ci-dessous décrit la partie principale de la molécule polluante :

<b>Nombre de carbone</b>	<b>Nom de l'hydrocarbure saturé correspondant (alcane)</b>	<b>Cas d'une molécule insaturé : racine de l'alcane + (voir suite)</b>
1	méthane (CH <sub>4</sub> )	méth
2	éthane (CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> )	éth
3	propane (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> )	prop
4	butane (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> )	but
5	pentane (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> )	pent
6	hexane (...)	hex
7	heptane	hept
8	octane	oct
...	...	...

Dans le cas d'une molécule insaturée, le suffixe suivant se rajoute à la racine de l'alcane :

double liaison : *-ène*

triple liaison : *-yne*

Dans le cas d'une ramification sur la molécule principale (la plus longue, portant le plus de carbones), les ramifications sont nommées en partant de la racine de l'alcane correspondant plus les suffixe *-yl*. Par exemple :  $\text{CH}_3$  = méthyl       $\text{CH}_3\text{CH}_2$  = éthyl      ...

Dans le cas d'hydrocarbures aromatiques, les ramifications peuvent être *ortho* (sur 2 carbones voisins), *méthà* (sur 2 carbones séparés par 1 carbone) ou *para* (sur 2 carbones opposés).

Des suffixes sont adjoints pour caractériser une fonction chimique précise :

*-oïque* : acide (-COOH)

*-al* : aldéhyde (-CHO)

*-one* : cétone (-CO-)

*-ol* : alcool (-OH)

*-imine* : imine (-CNH)

*-oxine* : oxine (-CNOH)

De même, des préfixes caractérisent d'autres fonctions :

*amino-* : amine (-N)

*halogéno-* : halogène (par exemple : chloro (Cl), bromo (Br), ...)

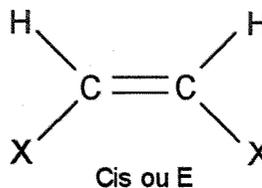
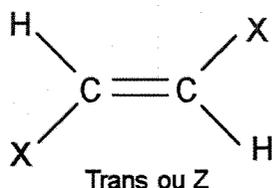
*thio-* : thiol (-SH)

*hydroxy-* : alcool en fonction secondaire

*oxo-* : CO en fonction secondaire

Les molécules cycliques saturées sont nommées par le préfixe *cyclo-* suivi de l'alcane correspondant (ou sa racine et le suffixe adéquats). Par exemple, cyclohexane (cycle à six carbones), cyclopentane (cycle à cinq carbones)...

Dans le cas des alcènes, les substitutions peuvent être de deux types stéréochimiques (voir schéma ci-dessous).



## 3.4. Hydrocarbures aliphatiques

### 3.4.1. Introduction

Le terme d'hydrocarbure aliphatique recouvre toutes les molécules non aromatiques, qu'elles soient linéaires ou ramifiées, saturées ou insaturées, substituées (c'est-à-dire ayant d'autres atomes en plus de leurs carbones et hydrogènes) ou non. Nous ne présenterons pas les molécules substituées dans cette partie mais plus avant dans l'ouvrage, de même nous présenterons dans la partie suivante les aliphatiques cycliques.

### 3.4.2. Alcanes (méthane, éthane, propane, butane...) : Hydrocarbures aliphatiques saturés

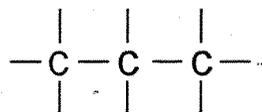
### 3.4.2.1. Formule chimique

La formule chimique linéaire des molécules est de la forme :  $C_nH_{2n+2}$

n : nombre de carbones de la molécule.

C : carbones de la molécule

H : hydrogènes de la molécule



La formule développée en deux dimension est la suivante :

### 3.4.2.2. Provenances et utilisations

Les alcanes existent en grande quantité sous forme de gisements naturels de gaz ou de pétrole dont l'origine est généralement attribuée à la fermentation de la cellulose des végétaux des temps géologiques, sous l'action de bactéries.

Les pétroles contiennent un mélange très complexe d'hydrocarbures de 1 à 40 atomes de carbone environ. Excepté pour les tous premiers termes de la série (C1 à C6), il est pratiquement impossible de retirer à partir du pétrole brut un hydrocarbure particulier à l'état pur, du fait de la complexité du mélange et de la proximité des points d'ébullition des constituants de poids moléculaires voisins. Les méthodes de préparation artificielles restent donc les seuls moyens d'obtenir un hydrocarbure déterminé.

Les stations services présentent souvent des pollutions à base d'alcanes (gasoil, lubrifiants, hydrocarbures divers...).

Le gaz naturel est constitué principalement de méthane.

Les alcanes (par exemple l'éther de pétrole qui est un mélange d'alcanes en C5 et C6), sont considérés comme de bons solvants.

### 3.4.2.3. Propriétés physico-chimiques

Elles sont régies par le nombre d'atomes de carbone constitutifs de la molécule :

- pour  $n < 4$  : ce sont des gaz,
- $4 < n < 8$  : essences (volatiles),
- $8 < n < 13$  : fuels (moins volatils),
- $13 < n < 16$  : fuels plus lourds,
- $16 < n < 23$  : huiles lourdes (industrie),
- $23 < n$  : composés presque solides (bitumes, goudrons...).

Une des propriétés chimiques qui les caractérise est l'oxydation brutale (combustion). En effet, les alcanes réagissent avec l'oxygène ou l'air par une réaction lente et/ou explosive, en donnant naissance à du dioxyde de carbone et de l'eau.

Les alcanes ont une polarité faible qui les rend peu solubles dans l'eau et dans les solvants polaires. Ils sont donc solubles dans les solvants apolaires.

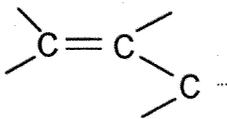
### 3.4.3. Alcènes (éthène, propène, butène...) : Hydrocarbures aliphatiques insaturés

#### 3.4.3.1. Formule chimique

La formule chimique linéaire des molécules est de la forme :  $C_nH_{2n}$  (pour une double liaison).

n : nombre de carbones de la molécule.

La formule chimique en deux dimension est de la forme :



Les atomes d'hydrogène manquant par rapport à l'alcane correspondant sont expliqués par la double liaison qui caractérise les alcènes.

### 3.4.3.2. Provenances et utilisations

Les alcènes sont rares à l'état naturel. La liaison éthylique qui les caractérise existe cependant dans le règne végétal. Les pétroles ne contiennent pas d'alcènes à l'état brut. Ceux-ci sont notamment obtenus par craquage du pétrole. Leur polymérisation permet la fabrication de nombreux produits commerciaux.

<b>Alcène polymérisé</b>	<b>Nom du produit</b>	<b>Utilisation</b>
éthylène	polyéthylène	isolants, sacs plastiques
propène	polypropène	isolants, sacs plastiques
chlorure de vinyle	polyvinyle (PVC)	fibres textiles
dérivés fluorés	téflon	revêtement
...	...	peintures...

### 3.4.3.3. Propriétés physico-chimiques

Les alcènes sont gazeux jusqu'en C4, liquides jusqu'en C16 et solides au-delà. Ils possèdent une ou plusieurs liaisons doubles.

La stéréochimie de ces molécules (cis ou trans) conditionne leur impact toxicologique dans l'environnement.

### 3.4.4. Techniques de dépollution

Les hydrocarbures aliphatiques (alcanes ou alcènes) sont tous biodégradables de manière aérobie (en présence d'oxygène). En effet, ils ont souvent une origine naturelle et les liaisons éthyliques se rencontrent fréquemment dans le règne végétal, ce qui explique leur biodégradabilité. Ainsi, toutes les techniques biologiques sont applicables (**Bioventing**, **Biosparging**, **Bioterte**). Les plus petites molécules ( $n \leq 12$ ) étant volatiles, on peut leur appliquer les techniques de **Venting** et **Sparging**. Ces molécules polluantes étant peu solubles, elles se retrouvent en flottaison sur la nappe phréatique (elles sont moins denses que l'eau). On peut par conséquent les récupérer par **Slurping (extraction triple phase ®)**. Ces composés étant facilement biodégradables, si aucun risque n'est présent, **l'atténuation naturelle** est envisageable. Notons que comme pour la plupart des polluants, **l'excavation, la mise en décharge, l'incinération**, et la **solidification/confinement** sont applicables mais souvent sans intérêt (sauf cas particuliers) compte tenu des coûts plus élevés. C'est en générale l'absence d'autres solutions ou l'importance d'un facteur économique (pression d'associations, d'institutions, la nécessité d'une dépollution très rapide...) qui oriente le choix vers ces techniques.

### 3.4.5. Conclusion

Les hydrocarbures aliphatiques sont à la base de beaucoup de produits commerciaux (gaz, essences, fuel, goudrons... Cf. : chapitre sur les produits commerciaux), et par-là même, ils sont à l'origine de nombreuses pollutions. Leur existence ou leurs analogies avec des molécules naturelles les rendent relativement facilement biodégradables.

### 3.5. Hydrocarbures cycliques saturés : Cyclanes (cyclopentane, cyclohexane...)

#### 3.5.1. Introduction

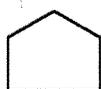
Le terme d'hydrocarbures cycliques saturés (cyclanes) recouvre toutes les molécules dont la chaîne carbonée forme un cycle saturé.

#### 3.5.2. Formule chimique

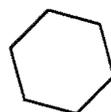
La formule chimique linéaire des molécules est de la forme :  $C_nH_{2n}$ .

n : nombre de carbones de la molécule.

Les cycles sont généralement constitués de cinq à six atomes de carbones (cyclopentane, cyclohexane).



Cyclopentane



Cyclohexane

#### 3.5.3. Provenances et utilisations

Les cyclanes " moyens " (cyclopentane, cyclohexane) constituent la majeure partie de certains gisements de pétrole (Europe Centrale).

#### 3.5.4. Propriétés physico-chimiques

Les caractéristiques physico-chimiques des hydrocarbures cycliques (état physique à température ambiante, solubilité, etc...) ne présentent pas de particularités notables par rapport à ceux des hydrocarbures acycliques.

La stéréochimie des molécules les rend plus ou moins toxiques dans l'environnement.

#### 3.5.5. Techniques de dépollution

Les Cyclanes ont des propriétés physico-chimiques proches des alcanes ce qui explique que les mêmes techniques soient applicables : **Bioventing**, **Biosparging**, **Bloterte**, **Venting** et **Sparging**, **Slurping (extraction triple phase ®)**, **Atténuation naturelle**. Notons que comme pour la plupart des polluants, **l'excavation/mise en décharge**, **l'incinération**, et la **soiidification/confinement** sont applicables mais sans intérêt compte tenu des coût plus élevés.

#### 3.5.6. Conclusion

On trouve les cyclanes en grand nombre dans les produits industriels et notamment parmi les solvants.

### 3.6. Hydrocarbures Aromatiques (Arènes. BTEX Benzène Toluène Ethylbenzène Xylène, HAP...)

#### 3.6.1. Introduction

Les aromatiques sont des hydrocarbures cycliques poly-insaturés, ramifiés ou non, c'est-à-dire dont le noyau central est benzénique. Nous ne présenterons pas les hydrocarbures cycliques substitués (c'est-à-dire ayant d'autres atomes en plus de leurs carbones et hydrogènes) dans cette partie, mais plus avant dans l'ouvrage.

### 3.6.2. Formule chimique

La formule chimique linéaire des molécules est de la forme :  $C_nH_n$   
n : nombre de carbones de la molécule.

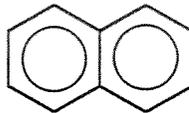


On symbolise souvent le cycle aromatique à six carbones par  $\Phi$  ou (benzène,  $C_6H_6$ )

### 3.6.3. Provenances et utilisations

Les arènes sont relativement toxiques ou bien solides. Les BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylène (ortho, méta et para), Styrène) font partie du groupe des arènes. Ils sont obtenus par distillation fractionnée des goudrons de houille et des pétroles. Les BTEX sont des liquides à forte odeur constituant d'excellents solvants de l'iode, du soufre, et surtout des graisses et caoutchoucs. On les trouve en très grande quantité dans les essences. Ainsi, de nombreuses pollutions de stations services mettent en cause ces molécules. Ces molécules sont des indicateurs de pollution par hydrocarbures.

Les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) proviennent principalement des processus de pyrolyse et en particulier de la combustion incomplète de la matière organique. Ils représentent donc un ensemble complexe de molécules dont le nombre est supérieur à 1 000. On les trouve en nombre dans les goudrons, les usines à gaz, les créosotes... On trouve parmi eux, le phénantrène, anthracène, benzopyrène notamment dans les eaux de pluies et les rivières.



HAP : ...

### 3.6.4. Propriétés physico-chimiques

Ce sont de bons solvants. Ils sont odorants, solides ou liquides suivant leur masse molaire. Tous les constituants des arènes sont peu solubles dans l'eau. Les hydrocarbures aromatiques sont très stables et résistent aux hautes températures.

### 3.6.5. Techniques de dépollution

Les hydrocarbures aromatiques, quand ils sont de petite taille, sont en général plus ou moins volatils et solubles. Ainsi, les aromatiques à un noyau (ex : Xylènes...) peuvent être traités par **Bioventing**, **Biosparging**, **Venting**, **Sparging** et dans le cas d'une phase flottante par **Slurping (extraction triple phase ®)**. Pour les aromatiques ayant plus d'un noyau, (ex : HAP), on peut envisager des techniques de **Bioventing**, **Biosparging** mais aussi le **Bioterte** et la **Phytoremédiation** qui deviennent potentiellement intéressantes. Le **Venting thermique** en augmentant la volatilité des polluants à deux ou trois noyaux aromatiques (ex : HAP, naphthalène, anthracène...) permet la dépollution. De même, malgré leur faible solubilité, les hydrocarbures aromatiques peuvent être traités parfois par la technique des **Barrières réactives**. Enfin, comme toujours, **l'excavation/mise en décharge**, **l'incinération**, et la **solidification/confinement** sont applicables mais sans intérêt compte tenu des coûts plus élevés.

### 3.6.6. Conclusion

Les hydrocarbures aromatiques sont très nombreux et variés. On les trouve en grand nombre dans les produits industriels et notamment parmi les solvants organiques (benzène, toluène...), les essences...

## 3.7. Hydrocarbures hétérocycliques (THF, THP, époxy-, dioxane-...)

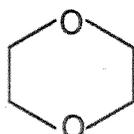
### 3.7.1. Introduction

Les hétérocycles sont des composés dérivés des hydrocarbures mais pour lesquels un à plusieurs atomes de carbone constituant le cycle sont remplacés par un hétéroatome qui peut être : N, O, S, B, Al, Si, P, Sn, As, Cu, etc.. Il existe deux classes d'hétérocycles : les non aromatiques et les aromatiques. Ces molécules prennent une place de plus en plus importante dans la chimie organique.

### 3.7.2. Formule chimique

La formule chimique linéaire est la même que pour leurs analogues non substitués mais avec un carbone en moins et un nombre d'hydrogène qui dépend du type de substitution. On peut par exemple citer les hydrocarbures hétérocycliques à :

- |                               |                                  |
|-------------------------------|----------------------------------|
| • 2 carbones, un oxygène :    | époxy- = oxirane (radical)       |
| • 4 carbones, deux oxygènes : | dioxane- (radical)               |
| • 4 carbones, un oxygène :    | tétrahydrofurane = THF (solvant) |
| • 5 carbones, un oxygène :    | tétrahydropyrane = THP (solvant) |



exemple : 1,4 dioxane

### 3.7.3. Provenances

Ces hétérocycles sont des molécules constitutives du pétrole brut. Des hétérocycles plus complexes sont présents dans les végétaux. On rencontre aussi ces molécules dans de nombreux solvants impliqués dans des pollutions. Les hétérocycles sont aussi utilisés dans les colorants et ils sont à la base de la photographie couleur. Les époxydes sont utilisés pour produire des matières intermédiaires de l'industrie chimique.

### 3.7.4. Propriétés physico-chimiques

Les composés hétérocycliques simples ne se trouvent pas à l'état naturel mais sont très fréquents au sein de molécules plus ou moins complexes de nombreux composés naturels appelés alcaloïdes (composés naturels d'origine végétale). Par exemple, le tabac avec la nicotine, l'opium avec la morphine, la quinine de la quinina.

### 3.7.5. Techniques de dépollution

Souvent les substitutions tendent à rendre les molécules plus solubles mais moins volatiles. La biodégradabilité est variable ce qui explique que dans le cas de techniques biologiques, les micro-organismes sont souvent sélectionnés (*Bioterte* alors que ce n'est pas le cas avec les *Bioventing* et *Biosparging* qui utilisent des micro-organismes indigènes). Dans des configurations où les risques sont minimales, on peut envisager de l'*Atténuation naturelle*. Dans le cas de polluants assez solubles présents dans la nappe phréatique, on peut utiliser le *Flushing*.

### 3.7.6. Conclusion

Cette famille de molécule peut être séparée en deux classes : les non aromatiques, qui présentent des propriétés proches de leurs homologues non substitués, et les aromatiques pour lesquels la substitution modifie profondément les propriétés.

## 3.8. Aliphatiques substitués

### 3.8.1. Introduction

Les alcanes ou alcènes ayant un ou plusieurs atomes d'hydrogène remplacés par un substituant oxygéné, azoté, ou halogéné présentent des propriétés modifiées. En effet, ces substitutions créent de nouvelles fonctions réactives et donc des molécules différentes avec une racine commune, celle de l'alcane servant à nommer la chaîne carbonée du produit.

### 3.8.2. Alcools (méthanol...), aldéhydes (méthanal...), acides (acide acétique...), cétones (acétones...)

#### 3.8.2.1. Formule chimique

La formule chimique linéaire des molécules est variable et dépend du nombre d'oxygènes et de leur liaisons avec la molécule. Pour simplifier, plusieurs cas sont possibles :

Avec  $R$  = chaîne carboné de l'alcane ou alcène correspondant

- $RCH_2OH$  : fonction alcool primaire
- $R_1R_2CHOH$  : fonction alcool secondaire
- $R_1R_2R_3COH$  : fonction alcool tertiaire
- $RCHO$  : fonction aldéhyde
- $R_1OR_2$  : fonction cétone
- $RCOOH$  : fonction acide carboxylique
- $R_1COOR_2$  : fonction ester

#### 3.8.2.2. Provenances et utilisations

Les alcools sont fréquents à l'état naturel (ils sont souvent des produits de fermentation). Bons solvants polaires, ils sont utilisés en pharmacie et parfumerie, ainsi que dans l'industrie chimique.

Les aldéhydes, cétones, acides carboxyliques et esters sont présents dans les plastiques (résines urée-formol, Bakélite...). Les aldéhydes sont des contaminants occasionnels des eaux souterraines (formaldéhyde, isobutyraldéhyde...).

Les acides carboxyliques sont présents naturellement et portent souvent un nom issu du produit où ils ont été découverts (par exemple, les acides butyrique (du beurre), palmitique (de la palme), acétique, formique,...). Ils représentent 5 à 8% du carbone organique des eaux de surface. Ils sont très importants dans les lisiers et sont issus de fermentation anaérobie. En produits industriels on rencontre le 2,4-D, le silvex, le 2,4,5-T. Ce sont des produits de l'industrie alimentaire.

Les esters sont dans les eaux souterraines le résultat d'une contamination. On les trouve dans des pesticides (oxyde butyle mésityle, diméthrine, diméthycarbonate, dinobutone, omite, taburex, acétate de vinyle, warfarine...) et dans des produits chimiques industriels.

#### 3.8.2.3. Propriétés physico-chimiques

Les alcools (primaires, secondaires et tertiaires) ont des propriétés communes :

- composés fortement associés (liaisons hydrogènes inter et intramoléculaires), et liquides,
- ce sont de bons solvants polaires,

- leur solubilité dans l'eau diminue avec l'augmentation de la chaîne carbonée R.

Les aldéhydes et les cétones présentent une forte polarité de la liaison C=O ce qui les rend généralement solubles dans l'eau. Comme pour les alcools, la solubilité va décroissante avec l'augmentation de la chaîne carbonée.

Les acides carboxyliques sont très solubles dans l'eau et leur solubilité suit la même règle que précédemment.

Les esters sont peu solubles dans l'eau.

### 3.8.2.4. Techniques de dépollution

S'agissant de polluants solubles, les techniques de *Flushing*, *Pump and Treat* peuvent être envisagées. Ces polluants étant biodégradables (on les trouve à l'état naturel), le *Bioventing*, *Biosparging*, *l'Atténuation naturelle* sont aussi des méthodes à prendre en compte.

### 3.8.3. Amines (nylon..., isocyanate...)

#### 3.8.3.1. Formule chimique

La formule chimique linéaire des molécules est variable et dépend des liaisons entre l'azote et la molécule.

Avec R = chaîne carboné de l'alcane ou alcène correspondant

- $\text{RNH}_2$  : fonction amine primaire
- $\text{R}_1\text{R}_2\text{NH}$  : fonction amine secondaire
- $\text{R}_1\text{R}_2\text{R}_3\text{N}$  : fonction amine tertiaire
- $\text{R-C}\equiv\text{N}$  : fonction nitrile

#### 3.8.3.2. Provenances et utilisations

Les amines sont présentes dans les insecticides, les pesticides (isocyanate, très toxique). Les Nylons sont des polyamines (polymérisation d'amines). On rencontre parmi ces produits polluants des molécules communes comme le diéthylamine, diméthylamine, l'éthylamine, le méthylamine, l'aniline, le bezidine, le naphthylamine et la pyridine.

#### 3.8.3.3. Propriétés physico-chimiques

Les propriétés chimiques ne dépendent pas de la place de l'amine sur la chaîne. Ce sont des molécules :

- très polaires et fortement associées (liaisons intra et intermoléculaires): la première amine est un gaz (ammoniac),
- toxiques,
- à solubilité variable (l'ammoniac est le plus soluble dans l'eau).

#### 3.8.3.4. Techniques de dépollution

Les amines peuvent être traitées par des méthodes biologiques comme le *Biotertre*.

- 3.8.4. Composés chlorés (solvants : trichloroéthylène...), bromés (pesticides : dibromoéthane...), iodés et plus rarement fluorés

#### 3.8.4.1. Formule chimique

Les dérivés halogénés résultent du remplacement d'un ou de plusieurs atomes d'hydrogène d'un hydrocarbure par un halogène (chlore, brome, iode et plus rarement fluor). Les liaisons carbone/halogène augmentent en force depuis l'iode, puis le Brome, le Chlore, et le Fluor. Elles sont donc de plus en plus difficiles à rompre.

### 3.8.4.2. Provenances et utilisations

Ces composés organiques sont les plus nombreux et trouvent diverses applications dans l'agriculture, l'industrie, la médecine et activités domestiques. Des hydrocarbures halogénés sont employés comme intermédiaires de synthèse, solvants (chlorure de méthylène, chloroforme, tétrachlorure de carbone, trichloroéthane, trichloroéthylène...), anesthésiques, fluides extincteurs, fluides frigorigènes et propulseurs des bombes pour aérosols, insecticides, pesticides (aldrine, dieldrine, DDD, DDE, dichlorobenzène, les PCB...) et matières plastiques. Ils sont fabriqués par halogénéation des hydrocarbures.

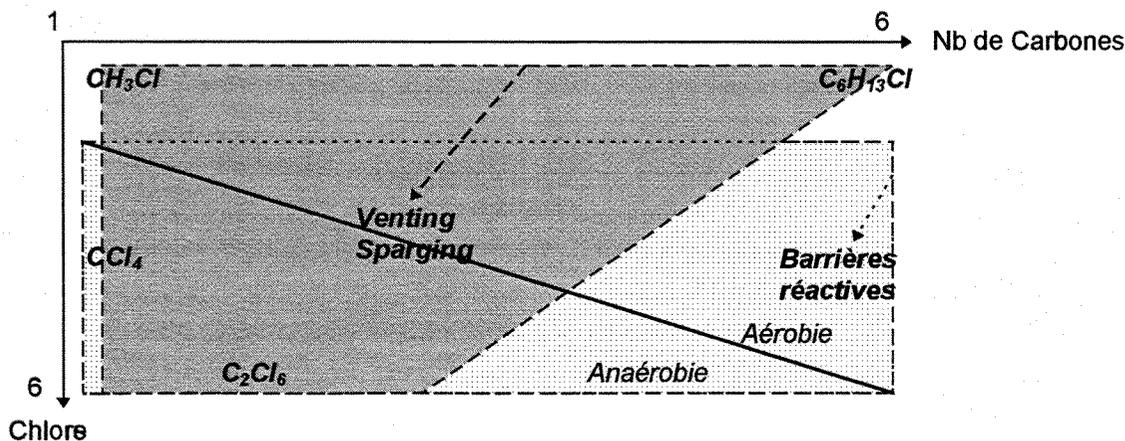
### 3.8.4.3. Propriétés physico-chimiques

Les propriétés de ces molécules sont très variables. Il est préférable de se reporter au tableau récapitulatif des propriétés pour les appréhender.

### 3.8.4.4. Techniques de dépollution

Les molécules iodées se dégradent pratiquement instantanément dans l'eau. De même, la demi vie des composés bromés est très limitée dans l'eau. Des traitements biologiques anaérobies et aérobies (*Bioterte*, *Bioventing* et *Biosparging*...) peuvent être utilisés. Les schémas ci-dessous récapitulent, en fonction du degré d'halogénéation et du nombre de carbone du polluant, les techniques de dépollutions envisageables.

Techniques de dépollution envisageables en fonction du nombre de carbones et chlores du polluant



### 3.8.5. Conclusion

Avec les hydrocarbures aromatiques substitués, les hydrocarbures aliphatiques substitués représentent la majorité des polluants à traiter. La présence de plusieurs fonctions chimiques sur une même molécule ne permet souvent pas de présager du devenir du produit dans un environnement aussi complexe que le sol. Il convient donc de se reporter au tableau récapitulatif des propriétés de chaque molécule (plus avant dans l'ouvrage) pour envisager une technique de dépollution adaptée.

### 3.9. Aromatiques substitués (phénols, alcools, aldéhydes, cétones, acides, PCB, dioxines...)

#### 3.9.1. Introduction

Tout comme dans le précédent chapitre sur les alcanes (hydrocarbures aliphatiques) substitués, c'est l'introduction de nouvelles fonctions chimiques qui va être à l'origine des propriétés des molécules formées.

#### 3.9.2. Phénols : phénoplastes, hydroquinone... (substitution par un groupement hydroxyle (-OH))

##### 3.9.2.1. Formule chimique

Le nom de phénols est donné aux dérivés des arènes à six carbones obtenus par substitution d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène par un groupement hydroxyle (-OH). La formule est alors  $\Phi$ -OH, c'est donc un alcool.

##### 3.9.2.2. Provenances et utilisations

Les phénols se rencontrent notamment dans les essences végétales (par exemple sous forme de thymol, essence de thym). Ils sont utilisés dans la fabrication de résines, colorants (diazotiques pour le textile...), réducteurs photographiques (hydroquinones), matières plastiques (phénoplastes), médicaments (aspirine : acide salicylique) et insecticides. Dans les eaux souterraines non contaminées, on peut rencontrer jusqu'à 1µg/l de phénol, crésol ainsi que des acides p-hydroxybenzoïques, vanilliques ou syringiques. Si les phénols sont associés aux hydrocarbures naturels leur origine dans les eaux souterraines est surtout liée aux déchets industriels ou aux biocides. Dans les pesticides on rencontre des dinitrocrésols, des pesticides phénoliques chlorés, du -2,4 dinitrophénol. Ce sont des produits utilisés dans le traitement des bois.

##### 3.9.2.3. Propriétés physico-chimiques

Les phénols :

- sont assez solubles dans l'eau,
- forment dans l'eau une solution à deux phases : une avec de l'eau et peu de phénols, l'autre avec un peu d'eau et beaucoup de phénols,
- sont généralement sous forme cristallisée en conditions naturelles.

##### 3.9.2.4. Techniques de dépollution

Les phénols étant assez solubles, des techniques telles que le **Flushing, Pump and Treat**, sont utilisables. De même, compte tenu de leur biodégradabilité en faible concentration, on peut envisager l'application du **Bioventing, Biosparging, Biotrertre, Phytoremédiation**.

#### 3.9.3. Substitution par un atome d'azote (amines : kévlar, polyuréthane...)

##### 3.9.3.1. Formule chimique

La formule générale est  $\Phi$ -NH<sub>2</sub> (=aniline) mais la fonction amine est rarement seule présente.

### 3.9.3.2. Provenances et utilisations

Ces molécules sont utilisées dans de nombreux domaines comme dans l'industrie textile (ex:  $\Phi$ -NN- $\Phi$ -OH, colorant azoïque). Le groupement  $\text{NH}_2$  des phénols peut être oxydé en  $\text{NO}_2$  et apporter ainsi un caractère explosif à la molécule. De même, le polyuréthane est un diisocyanate aromatique couramment utilisé. Le kévlar, obtenu à partir de l'aniline par polymérisation, présente une succession de fonctions aminées.

### 3.9.3.3. Propriétés physico-chimiques

Les propriétés relèvent à la fois du noyau aromatique et des substituants associés.

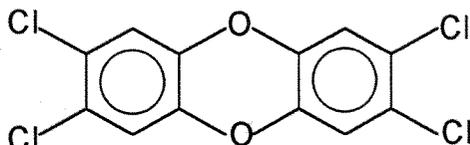
L'aniline est un liquide gris brun, toxique à l'odeur désagréable, peu soluble dans l'eau (deux phases, une aqueuse avec peu d'aniline, et une phase organique où surnage un peu d'eau et beaucoup d'aniline).

### 3.9.3.4. Techniques de dépollution

- 3.9.4. Substitution par un halogène (PCB, chlorobenzène, hexachlorobenzène, chlorobutadiène, ...)

#### 3.9.4.1. Formule chimique

Les dérivés halogénés résultent, comme précédemment, du remplacement d'un ou de plusieurs atomes d'hydrogène par un halogène (chlore, brome, iode et plus rarement fluor). Cette substitution est rarement seule sur le noyau, et la molécule présente diverses fonctions chimiques rendant difficile la caractérisation chimique du produit de manière générale.



Exemple :

2,3,7,8 tétrachlorodioxine, extrêmement toxique

### 3.9.4.2. Provenances et utilisations

Ces composés organiques sont les plus nombreux et trouvent diverses applications dans l'agriculture, l'industrie, la médecine et les activités domestiques. Les hydrocarbures halogénés peuvent être employés comme intermédiaires de synthèse, solvants, anesthésiques, fluides extincteurs, fluides frigorifiques et propulseurs des bombes pour aérosols, insecticides, matières plastiques et isolants électriques.

### 3.9.4.3. Propriétés physico-chimiques

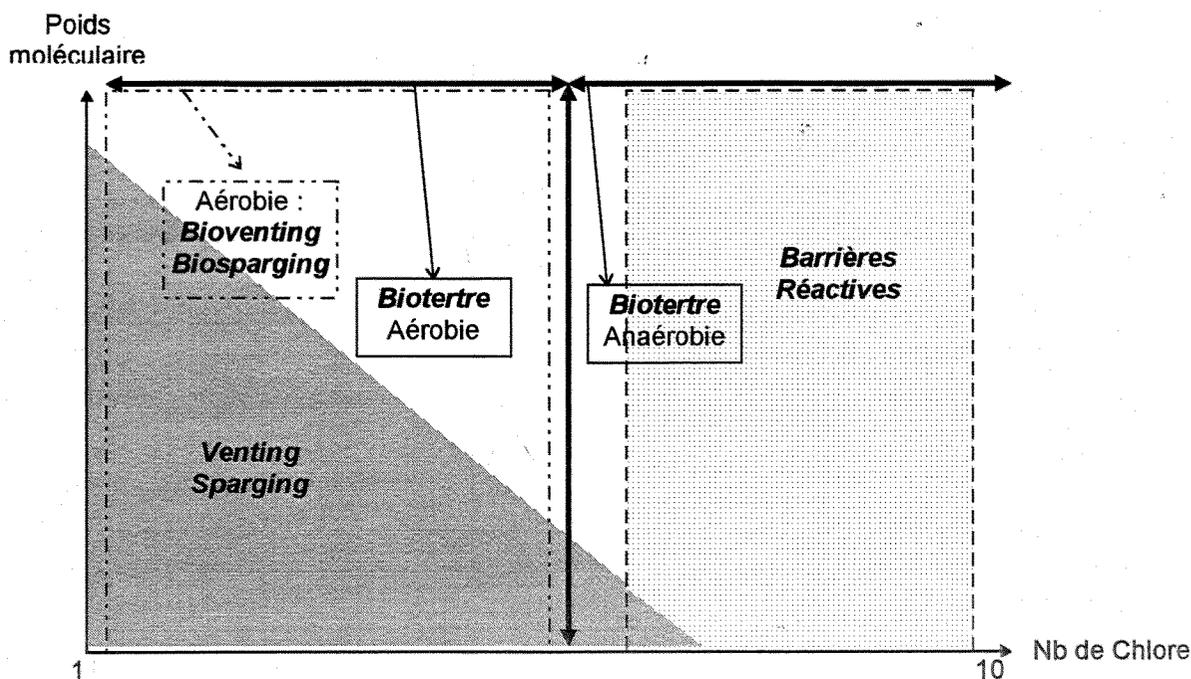
Les PCB se présentent sous forme de liquides visqueux, incolores ou jaunâtres, de faible tension de vapeur. Leur solubilité dans l'eau est extrêmement faible ; ils sont en revanche solubles dans l'huile minérale et la plupart des solvants organiques.

Les polluants aromatiques halogénés sont en général toxiques.

### 3.9.4.4. Techniques de dépollution

Le schéma ci-dessous présente les différentes méthodes de dépollution à considérer en fonction du nombre de chlores présents sur le polluant. Il explique aussi quelles sont alors les conditions de milieu permettant ces dépollutions (aérobie / anaérobie).

#### Méthodes de dépollution envisageables en fonction du nombre des substituants chlorés



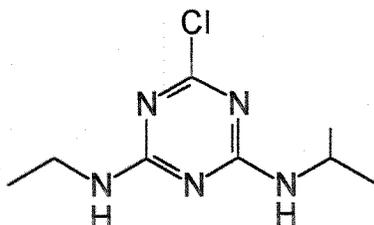
### 3.9.5. Conclusion

Avec les hydrocarbures aromatiques substitués, les hydrocarbures aliphatiques substitués représentent la majorité des polluants à traiter. La présence de plusieurs fonctions chimiques sur une même molécule ne permet souvent pas de présager du devenir du produit dans un environnement aussi complexe que le sol. Il convient donc de se reporter au tableau récapitulatif des propriétés de chaque molécule (plus avant dans l'ouvrage) pour envisager une technique de dépollution adaptée.

## 3.10. Hétérocycliques substitués par un halogène

### 3.10.1. Formule chimique

Ces hétérocycles peuvent être substitués par un chlore.



ATRAZINE

D'autres peuvent être substitués par une chaîne carbonée comportant un halogène.

### 3.10.2. Provenances et utilisations

D'une manière générale, les hétérocycles sont des composés qui peuvent se trouver dans les herbicides, insecticides, fongicides etc... L'atrazine est utilisée comme herbicide. Les hétérocycles sont des molécules synthétiques que l'on trouve rarement à l'état naturel.

### 3.10.3. Propriétés physico-chimiques

Les propriétés physico-chimiques sont sensiblement les mêmes que pour les hétérocycles non substitués mais les halogènes greffés sur la molécule augmentent la toxicité. Dans le cas d'utilisation en tant que pesticides et herbicides, les hétérocycles halogénés sont très volatils et engendrent ainsi une migration du polluant en fonction des vents. Ils ont une forte rémanence dans les eaux.

### 3.10.4. Techniques de dépollution

## 3.11. Acides gras (matières grasses : savons, peintures, vernis, huiles...)

### 3.11.1. Formule chimique

Les acides gras sont des esters d'acides carboxyliques à longues chaînes. Leur formule simplifiée est  $R(COO)R'$ .

### 3.11.2. Provenances et utilisations

Les matières grasses sont destinées à des emplois divers : savon, peinture, vernis, bougie, huiles, huile d'ensimage de l'industrie textile. Elles sont utilisées comme tensioactifs pour leurs capacités à former des émulsions (dentifrice).

### 3.11.3. Propriétés physico-chimiques

Elles sont dues pour une part à la fonction chimique (partie hydrophile, COO) et pour l'autre part à la chaîne carbonée (partie hydrophobe, R). Les acides gras sont insolubles dans l'eau mais peuvent former des émulsions.

### 3.11.4. Techniques de dépollution

Le **Bioterre** et tous autres biotraitements sont utilisables. On peut aussi pratiquer le **Flushing**, le **Pump and Treat**, et l'**Atténuation naturelle**.

## 3.12. Métaux

### 3.12.1. Introduction

Les métaux sont présents comme polluants sous différentes formes chimiques :

- élémentaires

- oxydes,
- carbonates,
- sulfures,
- nitrates,
- chlorures,
- phosphates,
- ...

ainsi que dans différents compartiments dans l'environnement sol :

- fractions liées à la matière organique,
- fractions liées aux argiles et plus ou moins échangeables,
- ...

La nature de ces différents paramètres oriente l'accessibilité du polluant et conditionne l'ampleur de la fraction résiduelle après traitement. Notons que dans le cas des nitrates, ce n'est pas le métal en lui même qui est polluant mais le plus souvent, ce sont les nitrates eux-mêmes.

### 3.12.2. Métaux (plomb, arsénic, mercure...)

#### 3.12.2.1. Présentation

Certains métaux sont toxiques de nature (plomb...) alors que d'autres, utiles à la vie, le sont uniquement en concentrations élevées. Citons parmi ces toxiques potentiels, l'aluminium, le cobalt, le nickel, le cuivre, le zinc, l'étain, l'arsenic, le sélénium, l'argent, le cadmium, le platine, l'or, le mercure, le chrome, le molybdène et le plomb. Enfin, les métaux sont considérés comme polluants soit du fait de leur toxicité propre, soit par rapport à des concentrations différentes de leurs concentrations naturelles.

#### 3.12.2.2. Provenances et utilisations

Les métaux lourds sont surtout utilisés dans les industries chimiques en tant que métal pur ou catalyseur. Le plomb se retrouve aussi bien dans la fabrication de batteries ou dans le raffinage de produits pétroliers.

**Arsenic :** Anciennement l'arsenic entraît dans la composition des herbicides et pesticides, aujourd'hui son utilisation dans le domaine agricole se limite aux antifongiques. De même, en association avec d'autres molécules, il sert en électronique, en médecine pour traiter des leucémies et autres maladies, dans l'industrie du cristal... Si ce métal se trouve naturellement dans le sol, il n'en demeure pas moins un toxique fort.

**Cadmium :** Dans le milieu naturel, le cadmium se retrouve essentiellement dans les zones volcaniques. Les pollutions au cadmium sont souvent liées à la présence de batteries nickel-cadmium, de combustion d'énergies fossiles, de rejets industriels, et à l'utilisation d'engrais issus de boues de stations d'épuration. Le cadmium, susceptible d'être accumulé par des plantes cultivées, risque après ingestion de celles-ci par l'homme d'induire des troubles digestifs sérieux et une atteinte des reins ou du foie.

**Plomb :** La pollution au plomb la plus importante provient des rejets des véhicules automobiles. Le plomb a été longtemps utilisé comme pigment de peinture mais cette application est aujourd'hui interdite. Les composés du plomb peuvent être employés comme stabilisateurs du plastique.

**Mercuré :** La principale pollution au mercure provient de la combustion des énergies fossiles. Le mercure sert essentiellement à la fabrication de cathodes au mercure utilisées pour l'électrolyse de solutions de chlorure de sodium pour la synthèse de la soude caustique qui est utilisée dans de nombreuses industries (papier...). Désormais, ces électrodes sont de moins en moins utilisées car des techniques employant des membranes ont vu le jour. Le mercure a beaucoup servi à l'extraction d'or, à la fabrication de batteries, dans l'industrie cosmétique, l'industrie pharmaceutique et dentaire mais cela tend à diminuer. Son utilisation dans les herbicides et pesticides est actuellement interdite.

### 3.12.2.3. Propriétés physico-chimiques

Certains métaux s'accumulent dans les racines de plantes parce qu'ils sont peu volatils à l'état métal. Le mercure ne fait pas partie de ces métaux.

La volatilité du métal va être conditionnée par l'anion associé. Par exemple, le plomb n'est pas volatil mais il le devient par association au chlore (chlorure de plomb).

### 3.12.2.4. Techniques de dépollution

Les traitements applicables aux pollutions métalliques consistent soit :

- à déplacer la pollution (eau à solide) : **Barrières réactives**, **Phytoremédiation** avec au final une **mise en décharge**.
- à solidifier la pollution : **Bioiixiviation**, **Flushing** et traitement de l'eau par **coagulation sur résine et recyclage**.

Les traitements de dépollution sur d'autres polluants en présence de métaux donnent des résultats variables. Les traitements biologiques capables de résister à la toxicité des métaux peuvent s'appliquer. Les traitements physico-chimiques ont peu d'influence. Enfin, l'incinération est peu indiquée du fait de la présence des métaux.

- 3.12.3. Sels organo-métalliques : (bromure d'éthylmagnésium, chlorure de méthylmercure, dichlorure d'éthylaluminium...)

#### 3.12.3.1. Formule chimique

Les composés organo-métalliques sont formés d'un cation et d'un anion. Les anions sont généralement des composés organiques appelés carbanions. Le cation est le métal sous sa forme ionisée. On nomme ces composés comme dérivés organiques du sel inorganique correspondant : bromure d'éthylmagnésium, chlorure de méthylmercure, dichlorure d'éthylaluminium.

Les atomes métalliques comme le nickel et le vanadium appartiennent en partie à des molécules de la famille des porphyrines où le motif de base est constitué par des ensembles de cycles pyrroliques, le métal étant au centre de l'ensemble sous forme de Ni<sup>++</sup>.

Dans cette catégorie se classe l'ammonium, le sodium, le potassium, etc...

#### 3.12.3.2. Provenances et utilisations

Ces molécules peuvent être utilisées dans des pigments de peinture. La couleur étant définie par le métal impliqué (cas des phtalocyanines, bleu avec le cuivre). Les composés organo-métalliques sont caractéristiques des résines ou asphaltènes dans lesquelles sont concentrés des hétéro-éléments comme le soufre, l'azote, le nickel, le vanadium.

#### 3.12.3.3. Propriétés physico-chimiques

La particularité de ces composés réside dans leurs liaisons de type ionique. Cette caractéristique entraîne une plus grande mobilité de la molécule dans l'environnement

A titre indicatif, dans le cas des phtalocyanines, la forme structurale de la molécule (toile d'araignée) peut emprisonner des molécules plus petites. Ainsi on peut trouver des PCB « bloqués » présents à l'état de traces au sein de ces molécules...

#### 3.12.3.4. Techniques de dépollution

Différentes techniques de dépollution peuvent être proposées telles que la **Biolixiviation**, les **Barrières réactives**, le **Flushing**, ou la **Phytoremédiation**. Comme toujours, ce sont les conditions du milieu qui vont conditionner le choix de la méthode.

### 3.13. Composés inorganiques non métalliques (cyanures, nitrates, nitrites, phosphates, carbonates, chlorates, sulfites, chlorures, fluorures, bromures, iodures...)

#### 3.13.1. Introduction

Ces composés sont plus communément appelés anions (ions chargés négativement). Quelques uns de ces anions ne sont pas directement toxiques pour l'environnement. Mais c'est leur évolution dans le milieu qui peut les rendre nocifs.

Ainsi les nitrates (présents dans les engrais) peuvent se réduire en ammoniac et les sulfates en soufre ou sulfure d'hydrogène.

D'autres, comme les cyanures, les chlorates (explosifs), sont naturellement très dangereux.

#### 3.13.2. Formule chimique

Il existe deux types d'anions. Le premier correspond aux anions formés d'un groupement d'atomes (ions polyatomiques). Les atomes sont liés entre eux par liaisons covalentes, la charge électrique est globale. Dans la deuxième catégorie ce sont les atomes électronégatifs appelés aussi halogènes qui se sont ionisés. On obtient ainsi les chlorures (Cl<sup>-</sup>), les bromures (Br<sup>-</sup>), les fluorures (F<sup>-</sup>) ...

#### 3.13.3. Provenances et utilisations

#### 3.13.4. Propriétés physico-chimiques

#### 3.13.5. Techniques de dépollution

### 3.14. Conclusion

Cette partie a donné des pistes de dépollution en fonction des familles chimiques de molécules polluantes mais sans aborder le problème par mélange de polluant qui est un cas fréquent. Il est en effet plus complexe de dépolluer un ensemble de molécules aux propriétés différentes. C'est ce qui va être abordé dans le chapitre suivant.

A.T.E. possède son propre  
laboratoire d'analyses à Meyzieu,

**ainsi qu'un laboratoire mobile lui  
permettant d'assurer des  
interventions rapides sur sites.**

## 4. PRODUITS COMMERCIAUX

### 4.1. Introduction

Cette partie permet d'aborder la dépollution en fonction de produits commerciaux qui sont souvent à l'origine d'une contamination de site. Par exemple, une pollution par infiltration de gasoil peut être analysée dans ce chapitre. Ainsi, une ou plusieurs techniques de dépollution pourront être proposées en fonction des produits commerciaux à l'origine de la contamination. Notons que cette partie est assez détaillée et présente les produits les plus courants. Le chapitre présentant le choix des méthodes de dépollution (Chap. 7) concerne un nombre de produits commerciaux plus large.

### 4.2. Produits pétroliers (hydrocarbures)

#### 4.2.1. Gaz naturel (méthane...)

##### 4.2.1.1. Composition chimique

Le constituant principal du gaz naturel est le méthane (alcane de formule  $\text{CH}_4$ ) qui est mélangé à d'autres hydrocarbures aliphatiques saturés (R allant jusqu'à 8 carbones). Les gaz naturels liquéfiés contiennent de 1 à 3 atomes de carbone.

##### 4.2.1.2. Provenances et utilisations

Le gaz naturel provient de gisements issus de la biodégradation de matières végétales et organiques en gaz. Il est composé majoritairement de méthane, de sulfure d'hydrogène, dioxyde de carbone et de résidus d'hydrocarbures de faible chaîne carbonée ( $n=2, 3$  ou  $4$ ). Le plus connu de ces gisements est celui de LACQ (Pyrénées).

Les gaz commerciaux contenus dans les bouteilles de propane renferment des gaz de 2 à 4 atomes de carbone alors que les bouteilles de butane sont constituées par des gaz de C3 à C5.

##### 4.2.1.3. Propriétés physico-chimiques

L'éthane, le propane et le butane sont des gaz beaucoup plus facilement liquéfiables que le méthane, d'autant plus facilement que leurs molécules comptent plus d'atomes de carbone ; les homologues suivants sont des liquides de moins en moins volatils. Le pouvoir calorifique des molécules augmente avec le nombre de carbone (à débit identique, le butane chauffera 1 litre d'eau en 10 mn environ pour 15 mn avec du propane).

##### 4.2.1.4. Techniques de dépollution

Les molécules, à l'état gazeux, se rencontrent rarement comme polluants. Cependant, quand c'est le cas, le **Sparging** et le **Venting** s'avèrent très efficaces.

#### 4.2.2. Essences (alcane, BTEX Benzène Toluène Ethylbenzène Xylène...)

##### 4.2.2.1. Composition chimique

Les essences contiennent des alcanes allant de 6 à 10 atomes de carbone. Elles renferment aussi des BTEX.

#### **4.2.2.2. Provenances et utilisations**

Les pollutions à l'essence proviennent principalement de stations services, d'accidents de la circulation avec des camions citernes, de fuites de cuves ou conduites (raffineries, stockage et distribution chez des particuliers...).

#### **4.2.2.3. Propriétés physico-chimiques**

Les essences sont assez volatiles, toxiques (inhalation des BTEX...) et inflammables. Elles flottent sur l'eau et polluent les nappes.

#### **4.2.2.4. Techniques de dépollution**

La dépollution peut être effectuée par *Venting*, *Sparging*, *Slurping (Extraction triple phase ®)* et si nécessaire par *Bioventing*, *Biosparging*. De même on peut appliquer des méthodes telles que l'*Atténuation naturelle* et le *Slurping (Extraction triple phase ®)*.

#### 4.2.3. Gasoil (n-alcanes, iso-alcanes, naphènes... et aromatiques)

##### **4.2.3.1. Composition chimique**

Il s'agit d'hydrocarbures linéaires ou ramifiés, allant de 9 à 21 carbones.

##### **4.2.3.2. Provenances et utilisations**

Le gasoil est un produit de distillation du pétrole, utilisé pour les moteurs Diesel, tracteurs, tanks... Le gasoil est composé d'hydrocarbures saturés (n-alcanes, iso-alcanes, naphènes) à plus de 60%, les 40% restant étant des composés aromatiques. On rencontre fréquemment des pollutions au gasoil sur les autoroutes, stations services, fermes, dépôts de carburants, voies de chemin de fer...

##### **4.2.3.3. Propriétés physico-chimiques**

Le liquide est visqueux. On peut juger d'une biodégradation des gasoils en étudiant les proportions de deux composés similaires qui sont deux hydrocarbures, l'un ramifié, l'autre linéaire.

##### **4.2.3.4. Techniques de dépollution**

On peut appliquer des méthodes de dépollution telles que le *Bioventing*, *Biosparging*, *Bioterre*, le *Slurping (Extraction triple phase ®)* ou encore l'*Atténuation naturelle*.

#### 4.2.4. Fuel (mazout)

##### **4.2.4.1. Composition chimique**

Le nombre des carbones des chaînes linéaires varient de 21 à 40.

#### 4.2.4.2. Provenances et utilisations

Les fuels sont des résidus de distillation du pétrole brut anciennement utilisés comme principale source de production d'énergie avant le développement de l'énergie atomique.

#### 4.2.4.3. Propriétés physico-chimiques

On distingue trois types de fuels en fonction de la densité :

- |   |                  |
|---|------------------|
| 1. le fuel domestique avec une densité comprise entre | 0,86 et 0,89,    |
| 2. le fuel léger                                      | // 0,89 et 0,92, |
| 3. le fuel lourd                                      | // 0,92 et 0,95. |

#### 4.2.4.4. Techniques de dépollution

Concernant ces hydrocarbures plus lourds, des techniques de dépollution comme le **Bioterre**, la **Phytoremédiation** ou encore le **Slurping (Extraction triple phase ®)** peuvent être envisagées.

### 4.2.5. Lubrifiants

#### 4.2.5.1. Composition chimique

Le nom de lubrifiant (huiles, graisses, silicones, acide sulfurique, graphite...) est donné à toute substance servant à adoucir le frottement de 2 pièces mobiles en contact.

Les lubrifiants sont généralement des mélanges d'hydrocarbures lourds ( $n > 40$ ), ou bien d'esters (esters d'acides gras...), de composés minéraux (sulfure de molybdène...), de silicone, et huiles animales ou végétales.

#### 4.2.5.2. Provenances et utilisations

Des huiles d'origine animale ou végétale sont utilisées en tant que composés d'addition dans des lubrifiants spéciaux afin de leur conférer des propriétés particulières. La plupart des lubrifiants liquides modernes ont une origine minérale et s'obtiennent à partir du pétrole brut.

#### 4.2.5.3. Propriétés physico-chimiques

Liquides de haute viscosité, ils ont une très bonne stabilité thermique de part leur haute masse molaire (macromolécules). Ils sont insolubles dans l'eau.

#### 4.2.5.4. Techniques de dépollution

La dépollution de ces polluants peut être envisagée par **Bioterre**, **Flushing**, **Phytoremédiation** ou **Slurping (Extraction triple phase ®)**.

### 4.2.6. Goudron (HAP...)

#### 4.2.6.1. Composition Chimique

Le goudron contient surtout des phénols, des hydrocarbures polycycliques, des dérivés sulfurés et pyridiques, de nombreuses molécules de haute masse molaire (ex : le naphthalène ( $C_{10}H_8$ ) qui entre dans la composition du goudron de houille). Une norme américaine a répertorié 16 de ces molécules comme étant

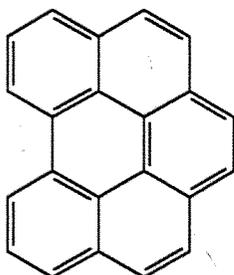
les plus importantes dans une dépollution par goudrons. Ces composés nommés HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) ont leur toxicité et biodégradation variant en fonction du nombre de cycles.

#### 4.2.6.2. Provenances et utilisations

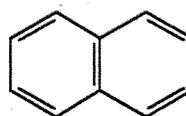
Le goudron est un résidu noirâtre, visqueux, provenant de la distillation de la houille. Les goudrons servaient à faire des enrobés, de l'asphalte. On rencontre des pollutions aux goudrons principalement sur les anciens sites houillers.

#### 4.2.6.3. Propriétés physico-chimiques

Les composés aromatiques polycycliques (HAP) sont les principaux toxiques du mélange. Ils sont formés de deux à six cycles aromatiques, par exemple :



Benzo(g,h,i)pérylène



Naphtalène

Le facteur limitant de la biodégradation sera le nombre de cycles. Plus celui-ci est élevé, plus la biodégradation sera difficile. Le plus toxique dans l'environnement est le benzo(a)pyrène.

#### 4.2.6.4. Techniques de dépollution

On peut utiliser le *Bioterte*, le *Traitement par des champignons*, ainsi que le *Flushing*.

#### 4.2.7. Pétrole brut

##### 4.2.7.1. Composition Chimique

Le pétrole brut est composé de toutes les molécules vues précédemment (depuis les produits commerciaux).

La composition élémentaire des " bruts " se situe dans les limites suivantes :

- Carbone : 84 à 87%,
- Hydrogène 11 à 14%,
- Soufre 0 à 5%,
- Oxygène 0 à 1 %,
- Azote 0 à 1 %.

##### 4.2.7.2. Provenances et utilisations

Le pétrole brut provient de la transformation géochimique de la matière organique végétale. Il est constitué d'un mélange complexe d'hydrocarbures liquides ou gazeux mais renferme une petite quantité de composés organiques oxygénés, azotés ou soufrés ainsi que des métaux chimiquement liés à des molécules organiques.

##### 4.2.7.3. Propriétés physico-chimiques

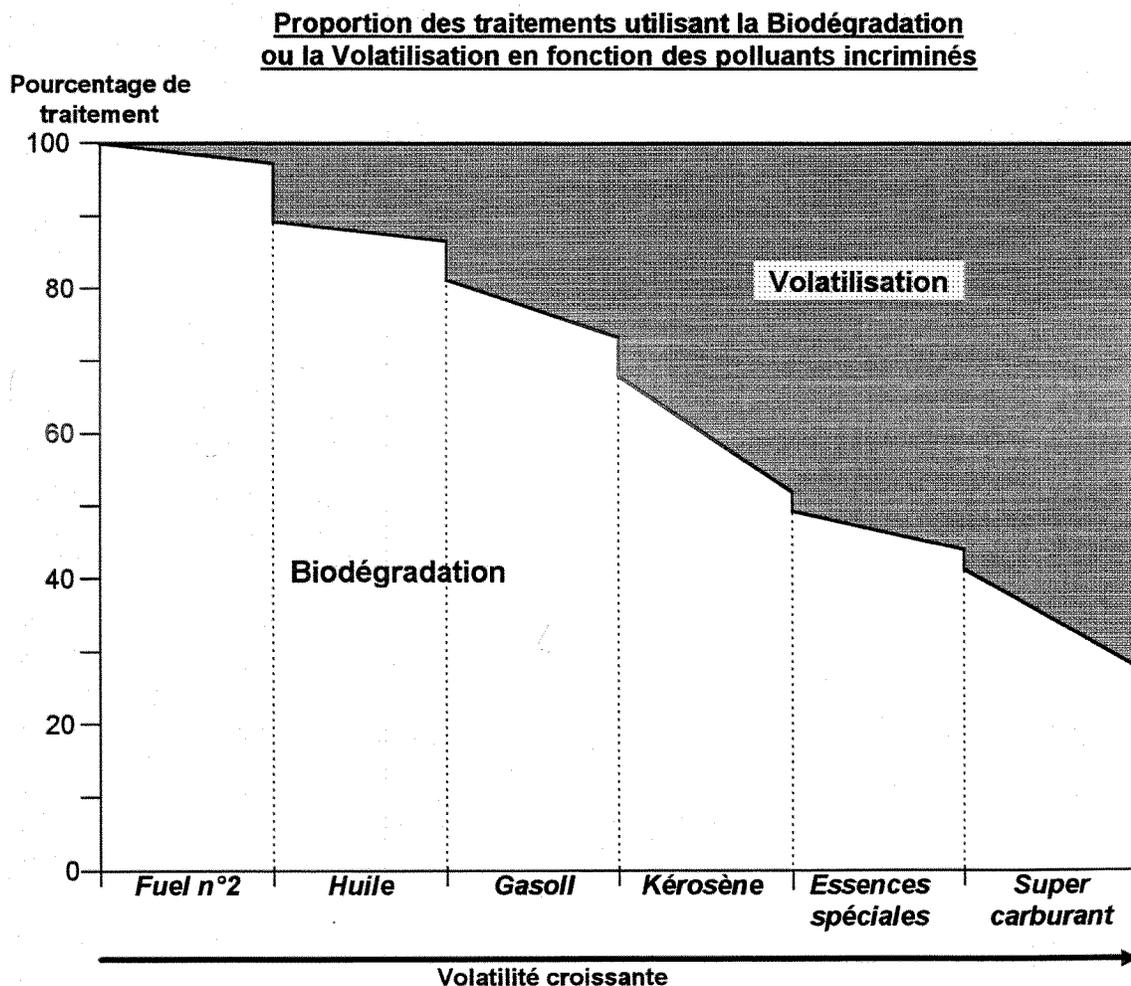
Le pétrole brut est un liquide huileux, plus ou moins visqueux, de couleur sombre, formé d'un mélange très complexe d'hydrocarbures liquides. On le distille pour obtenir les différentes fractions pétrolières qui formeront par la suite les hydrocarbures désirés.

#### 4.2.7.4. Techniques de dépollution

Le pétrole brut, ensemble complexe de polluants en concentrations variables, peut être traité par *Bioterre*, *Flushing* et *Slurping* (*Extraction triple phase*®).

#### 4.2.8. Conclusion

Les hydrocarbures pétroliers sont parmi les principaux polluants fréquemment rencontrés. Le schéma ci-dessous résume le type de traitement généralement appliqué en fonction des molécules impliquées.



#### 4.3. Composés dérivés des produits pétroliers

#### 4.3.1. Solvants non halogénés

##### 4.3.1.1. Alcools

Les alcools sont des composés organiques sur lesquels un groupement -OH est substitué.

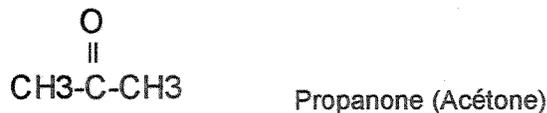
Il existe trois familles d'alcools :

- les alcools primaires où un carbone est substitué par un seul groupement -OH (ex : CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>OH = 1-Propanol),
- les alcools secondaires où un carbone (déjà lié à deux autres) est substitué par un groupement -OH (ex : CH<sub>3</sub>-CHOH-CH<sub>3</sub> = 2-Propanol),
- les alcools tertiaires où un carbone (déjà lié à trois autres) est substitué par un groupement -OH (ex : CH<sub>3</sub>-CH<sub>3</sub>COHCH<sub>3</sub>-CH<sub>3</sub> = 2-Méthyl-2-propanol).

La réactivité des alcools dépend donc de la famille à laquelle ils appartiennent : les alcools I sont très réactifs, les alcools II et III un peu moins. Les alcools sont utilisés parfois comme solvants, le plus connu étant l'éthanol (CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>OH). Les polyols (polyalcools) ont un point de solidification très bas, on les utilise entre autre dans les liquides antigels de voitures. En effet, ils sont toujours liquides à -20°C.

##### 4.3.1.2. Cétones

Les cétones sont des composés organiques dans lesquels un carbone lié par une double liaison à un atome d'oxygène.



La caractéristique principale des cétones est leur grande stabilité chimique conférée par la double liaison (C=O). On utilise principalement les cétones en tant que solvants.

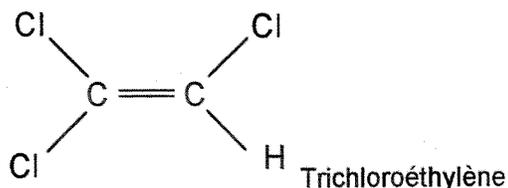
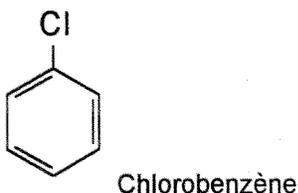
##### 4.3.1.3. Techniques de dépollution

Les alcools et cétones peuvent notamment être traités par **Bioventing**, **Biosparging** et **Atténuation naturelle**.

#### 4.3.2. Solvants halogénés

##### 4.3.2.1. Formule chimique

Cette famille de composés est très diversifiée : elle comprend des composés aromatiques et aliphatiques. D'une manière générale ce sont des composés organiques sur lesquels des halogènes sont substitués. Les substitutions sont très variables : du mono substitué aromatique (Chlorobenzène) jusqu'au polysubstitué aliphatique (trichloroéthylène).



#### 4.3.2.2. Provenances et utilisations

Ces composés halogénés sont essentiellement utilisés comme solvants dans l'industrie chimique. Les laboratoires d'analyses se servent de ces composés comme solvant d'extraction. Un des plus utilisés est le tétrachlorure de carbone pour l'analyse des hydrocarbures dissous dans l'eau selon la norme NFT 90-114. Cependant en raison de sa haute toxicité, ce solvant devrait être remplacé. Le chlorobenzène est utilisé comme solvant dans les formulations de pesticides

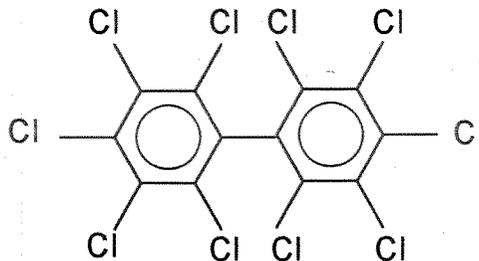
#### 4.3.2.3. Propriétés physico-chimiques

D'une manière générale ces composés sont de très bons solvants, mais sont aussi très toxiques vis-à-vis de l'environnement. Le chlorobenzène a la possibilité de percoler jusqu'à l'eau souterraine, particulièrement si le sol est sableux et pauvre en matières organiques.

#### 4.3.2.4. Techniques de dépollution

### 4.4. Isolants électriques (PCBs...)

#### 4.4.1. Formule chimique



La formule proposée est un exemple. La principale caractéristique des PCBs est le fait qu'ils sont plus ou moins chlorés (PCB signifie Polychlorobiphényles). Ainsi, il a été répertorié 207 molécules toxiques de PCB.

#### 4.4.2. Provenances et utilisations

Les PCBs sont des produits de synthèse à rémanence élevée. Ils sont essentiellement utilisés dans la construction de transformateurs électriques et de condensateurs en raison de leur pouvoir isolant et de leur grande stabilité face à la chaleur.

#### 4.4.3. Propriétés physico-chimiques

Les molécules de PCB sont particulièrement toxiques de part leur noyau aromatique et leurs substituants chlorés. Elles sont très hydrophobes donc très fortement adsorbées sur les molécules du sol. Leur densité est supérieure à 1 et leur stabilité est très importante (chaleur, oxydation).

#### 4.4.4. Techniques de dépollution

Les PCBs peuvent être traités par **Bioterre** (anaérobie ou aérobie).

## 4.5. Aérosols (chlorofluorocarbones...)

### 4.5.1. Composition chimique

Un aérosol est une dispersion ou suspension fine de particules d'un liquide, d'une solution ou d'un solide dans un gaz. Ces particules ont en général un diamètre compris entre  $10^{-4}$  et  $10^{-2}$  mm. Afin d'obtenir ce résultat, un gaz dit propulseur est utilisé pour disperser des particules (aérosols courants). Ce gaz propulseur doit être choisi pour son innocuité vis à vis du produit dispersé. Cependant le compromis est très difficile car un gaz propulseur doit avoir certaines caractéristiques physico-chimiques.

Les gaz les plus couramment utilisés étaient les CFC (Chlorofluorocarbones) mais ils attaquaient la couche d'ozone et ont donc progressivement été interdits. Ces gaz sont donc aujourd'hui remplacés par de l'azote ou par un autre système de pulvérisation sans gaz.

### 4.5.2. Provenances et utilisations

### 4.5.3. Propriétés physico-chimiques

### 4.5.4. Techniques de dépollution

## 4.6. Engrais (l'azote, le phosphate, la potasse, la magnésie...)

### 4.6.1. Composition chimique

Un engrais est une substance ou mélange, naturel ou artificiel, utilisé pour enrichir le sol en éléments utiles à la croissance des végétaux (azote, phosphore, potassium...oligo-éléments). Ainsi, l'azote, par exemple, peut être disponible sous forme d'urée, de nitrates, de composés ammoniacaux, ou d'ammoniac pur, formes ayant une efficacité différente selon les espèces végétales.

Bien que les engrais soient essentiels à l'agriculture moderne, leur utilisation excessive entraîne des effets nocifs pour les végétaux et les cultures, mais aussi une altération de la qualité des sols. De plus, l'abondance de ces nutriments dans les cours d'eau peut créer des problèmes de pollution de l'eau pouvant engendrer une croissance excessive des végétaux aquatiques.

De nos jours, les épandages abusifs de matières organiques, de fumiers, lisiers, d'apports d'engrais minéraux conduisent à des pollutions par excès de nitrates. Ces nitrates (sels de l'acide nitrique) présents dans l'eau potable peuvent être la cause de maladies mortelles chez les enfants en bas âge.

Le cadmium, présent dans les engrais dérivés des boues d'épuration et susceptible d'être accumulé par des plantes cultivées, risque après ingestion de celles-ci par l'homme d'induire des troubles digestifs sérieux et une atteinte des reins ou du foie.

### 4.6.2. Provenances et utilisations

Les engrais sont des substances propres à fertiliser le sol en y introduisant des principes utiles à la végétation. On distingue les engrais :

- organiques ou d'origine animal : fumier, eaux-vannes, tourteaux, guano, engrais vert (c'est-à-dire des plantes semées puis enfouies par un labour),...
- chimiques ou commerciaux qui apportent un ou plusieurs éléments chimiques, tels que l'azote, le phosphate, la potasse, la magnésie,

- mixtes qui correspondent à des mélanges d'engrais animaux et végétaux : fumier, compost.

#### 4.6.3. Propriétés physico-chimiques

Les engrais chimiques sont solubles et facilement lessivables dans les sols ce qui explique leur fréquente apparition dans les nappes phréatiques. Les engrais organiques le sont moins mais renferment parfois des éléments polluants (en concentrations excessives par exemple).

#### 4.6.4. Techniques de dépollution

### 4.7. Produits phytosanitaires (organophosphorés, carbamates, dérivés organomercuriels, acides phénoxyarylcarboxyliques, triazines, urées, organochlorés...)

#### 4.7.1. Nature chimique

La nature chimique des produits phytosanitaires est très variée. Une trentaine de familles sont reconnues. Les plus importantes sont les :

- organophosphorés,
- carbamates,
- dithiocarbamates,
- dérivés organomercuriels,
- acides phénoxyarylcarboxyliques,
- triazines,
- urées,
- hydrocarbures organochlorés : DDT, HCH, aldrine, toxaphène...

#### 4.7.2. Provenances et utilisations

Sont appelés sensu stricto produits phytosanitaires, *les pesticides, herbicides, insecticides et fongicides*. Par extension, la notion de pesticide s'intéresse aux molécules organiques qui, par leur action, régulent la vie de certaines espèces animales ou végétales. Ainsi, les biocides (sens large des produits phytosanitaires) sont en fait une famille de composés très divers, par leur structure, leur cible, leur efficacité et leur impact sur l'environnement, la santé animale ou humaine.

Ces produits utilisent par exemple l'hypochlorite de sodium, le cyanure de potassium, l'eau oxygénée, les sels de mercure... Tous les biocides ont une action sur la vie et présentent donc un danger.

Les pesticides de synthèse sont dérivés d'hydrocarbures chlorés et leur utilisation massive a eu des conséquences catastrophiques sur l'environnement. Ils sont très stables et s'accumulent dans les tissus. Ils arrivent à se diffuser dans l'atmosphère, polluant ainsi des zones très éloignées de leur application (arctique, antarctique...). Le DDT est encore employé dans certains pays.

Notons que le chlorobenzène est utilisé comme solvant dans les formulations de pesticides et comme solvant industriel.

#### 4.7.3. Propriétés physico-chimiques

Les organochlorés utilisés dans des produits phytosanitaires, se dégradent lentement, sont peu solubles et s'accumulent dans la chaîne alimentaire dont l'homme est le maillon terminal.

Le chlorobenzène a la possibilité de percoler jusqu'à l'eau souterraine, particulièrement si le sol est sableux et pauvre en matières organiques.

#### 4.7.4. Techniques de dépollution

### 4.8. Colorants (acides gras et sulfonâtes...)

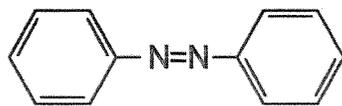
#### 4.8.1. Composition chimique

Un colorant est une substance capable de colorer durablement un autre corps. Il y a 3 conditions requises pour qu'un composé puisse être utilisé comme colorant :

- il faut qu'il soit constitué par une substance fortement colorée de façon à ce qu'une faible quantité soit suffisante pour teindre une surface étendue,
- il faut qu'il ait une affinité pour la substance à colorer, fixation soit par liaison chimique, adsorption ou dissolution,
- il faut que le produit fixé résiste au soleil, à l'eau, au gaz, lavages, etc...

#### 4.8.2. Provenances et utilisations

On peut trouver des colorants dans les résidus de goudrons, ce sont les HAP mais compte tenu de leur toxicité très élevée, ils ne sont pas utilisés. D'autres colorants de synthèse sont plus connus comme l'azobenzène.

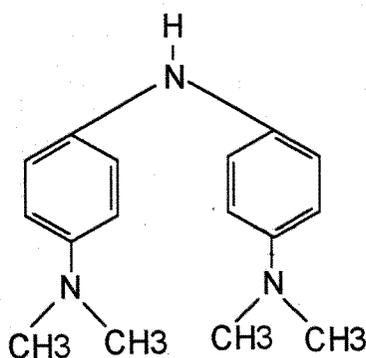


Azobenzène (Orangé)

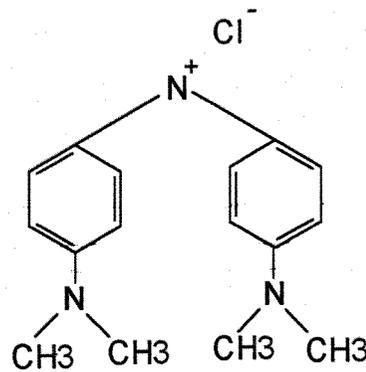
#### 4.8.3. Propriétés physico-chimiques

La particularité des colorants se situe dans leur composition chimique. En effet, les substituants jouent un rôle déterminant dans la couleur finale du colorant.

Exemple :



Incolore



Vert

#### 4.8.4. Techniques de dépollution

## 4.9. Peinture (huiles, matières plastiques, résines phénoliques, xylène, toluène, alcools, esters, éthers...)

### 4.9.1. Composition chimique

A quelques exceptions près, tous les constituants de la peinture, pigments, liants et solvants ou diluants, sont aujourd'hui produits synthétiquement. Une laque ou un vernis transparent contiennent un liant et un solvant.

Les pigments donnent aux peintures leur couleur et leur opacité. Ils contribuent également à les rendre durables et brillantes. On en distingue 2 types : les pigments inorganiques et pigments organiques. A la première catégorie appartiennent les terres (ocre, terre d'ombre et terre de Sienne) ; les pigments minéraux tels que l'oxyde de fer, le bioxyde de titane, le jaune de chrome, les pigments métalliques comme la poudre d'aluminium.

La seconde catégorie comprend le noir animal, poudre finement broyée d'os calcinés, et, surtout, une foule sans cesse croissante de produits de synthèse obtenus à partir du carbone. Certains pigments comme le minium et le chromate de zinc sont anticorrosifs.

Les liants donnent la cohésion interne et le pouvoir adhésif. Dans la fabrication des laques industrielles on a surtout recours aux divers types de résines synthétiques (matières plastiques). Les huiles (notamment l'huile de lin) s'emploient encore en décoration intérieure. On peut, schématiquement, distinguer liants naturels et liants synthétiques, bien qu'il existe des produits intermédiaires. Parmi les premiers on peut citer, entre autres, les huiles végétales (huile de lin, huile de soja), la cellulose sous ses différentes formes, le bitume, le caoutchouc et la colle végétale ; parmi les seconds, une grande variété de résines, telles que les résines phénoliques, styréniques, maléiques, alkydiques, méiques, uréiques, mélaminiques, vinyliques et acryliques.

Les solvants et les diluants permettent d'obtenir, pour chaque méthode d'application, une consistance convenable. Citons : les huiles essentielles, comme la térébenthine ; les solvants aliphatiques tirés du pétrole, comme le bitume à laque ; les solvants aromatiques dérivés de la houille, comme le xylène et le toluène ; les alcools, les esters, les éthers et l'eau.

On trouve par exemple des pollutions de sols et de nappes phréatiques par des BTEX et des solvants chlorés.

### 4.9.2. Provenances et utilisations

Les peintures sont utilisées dans tous les domaines ou presque (habitations, voitures, aciéries, usines, façades...). On les retrouve aussi dans les décharges...

### 4.9.3. Propriétés physico-chimiques

### 4.9.4. Techniques envisageables

## 4.10. Résines (acides résiniques : acide abiétique..., colophane, térébenthine...)

### 4.10.1. Composition chimique

Les résines sont constituées principalement d'acides résiniques, dont le plus connu est l'acide abiétique. Il existe plusieurs types de résines:

- les résines solides (résines proprement dites), parmi lesquelles il faut citer la colophane, la gomme laque et le copal (utilisés dans les vernis et cires), l'ambre (bon isolant électrique) qui se charge électriquement par frottement,

- les résines molles (gomme - résine),
- les résines visqueuses (baumes) comme la térébenthine.

#### 4.10.2. Provenances et utilisations

Avec les bases, les acides résiniques donnent des sels, des savons, utilisés entre autres pour l'encollage du papier. La distillation des résines donne des substances oléagineuses utilisées comme lubrifiants; certaines sont aussi employées comme carburants et comme solvants.

#### 4.10.3. Propriétés physico-chimiques:

Les résines sont insolubles dans l'eau, mais solubles dans l'alcool, le benzène et divers autres solvants.

#### 4.10.4. Techniques de dépollution

### 4.11. Graisses / huiles

#### 4.11.1. Composition chimique

Les acides gras (huiles, graisses) sont des esters d'acides carboxyliques à chaînes longues. Pour donner aux huiles de base des propriétés spéciales on leur incorpore, en proportions bien définies, des composés et des additifs d'origines diverses. Ces additifs renferment du baryum, du calcium, du soufre, du phosphore ou du zinc, sous forme de sulfonates.

#### 4.11.2. Provenances et utilisations

Les matières grasses sont destinées à des emplois divers : savon, peinture, vernis, bougie, huile d'ensimage de l'industrie textile.

#### 4.11.3. Propriétés physico-chimiques

Les graisses peuvent être dégradées rapidement par des micro-organismes lipolytiques.

#### 4.11.4. Techniques de dépollution

### 4.12. Détergent (oléate, palmitate, stéarate de sodium...)

#### 4.12.1. Composition chimique

Les savons d'usage courant sont des mélanges de sels de sodium d'acide gras, principalement d'oléate, de palmitate et de stéarate de sodium. On ajoute souvent aux produits des adjuvants de type surfactants, ainsi que des parfums.

#### 4.12.2. Provenances et utilisations

Les détergents sont employés dans toutes les habitations, les usines (nettoyage des sols...), les commerces... mais aussi en agro-alimentaire, industries... Ils se retrouvent fréquemment dans les eaux usées des égouts mais aussi dans les nappes ou le sol.

#### 4.12.3. Propriétés physico-chimiques

Leurs propriétés résident dans leur utilisation. Il sont solubles dans l'eau, et ont une action détergente.

#### 4.12.4. Techniques envisageables

Les savons d'usage courant sont d'excellents détergents qui ont l'avantage d'être complètement biodégradables.

### 4.13. Verres

#### 4.13.1. Composition chimique

On distingue différents types de verres :

- La fusion à température convenable d'un mélange de sable quartzueux (silice), de soude et de chaux donne un produit servant à la fabrication d'objets d'usage courant, bouteilles, verres à boire ordinaires, vitres..
- En substituant de la potasse à la soude, on obtient des verres potasso-calciques dits de Bohême, qui ont plus d'éclat et de dureté.
- Les verres potasso-plombeux (cristal), à base de potasse et d'oxyde de plomb se caractérisent par la pureté, l'éclat, la densité et la sonorité.
- Les borosilicates, tel le Pyrex, ont une teneur élevée en silice et faible en soude ou en potasse, dont une partie est remplacée par de l'acide borique.
- Le verre de silice, à base de sable pur ou quartz, est très isolant, transparent aux ultraviolets - à la différence des autres verres - et très réfractaire: il ne fond que vers 2000 °C.
- Les verres colorés s'obtiennent par addition d'oxydes métalliques, par exemple de cobalt pour le bleu, de chrome pour le vert, de manganèse ou de nickel pour le violet. Les verres rouges peuvent être produits de l'oxyde de cuivre en présence d'un réducteur.
- Le verre incolore exige des matières premières très pures, à teneur particulièrement faible en fer.
- Le verre opale, à l'aspect laiteux, s'obtient en ajoutant des fluorures (de calcium ou de sodium notamment).
- L'addition de phosphates, en quantité variable, permet aussi d'obtenir un verre plus ou moins opaque.

#### 4.13.2. Provenances et utilisations

Les verres servent à de multiples usages: contenants (pots pour l'agro-alimentaire, flacons en parfumerie, verres...), vitres (locaux, habitations, véhicules), écrans (ordinateurs, télévision), écrans protecteurs ou correcteurs (montres, lunettes...), isolants électriques, ...

#### 4.13.3. Propriétés physico-chimiques

Les verres ont pour principales caractéristiques leur très grande stabilité (très peu dégradables), leur absence de conductivité électrique, de réactivité et leur insolubilité. C'est d'ailleurs ces propriétés qui font

des verres un outil de dépollution (cf. : Activités industrielles, Energie nucléaire : technique de la vitrification pour inerte certains déchets radioactifs).

#### 4.13.4. Techniques de dépollution

### 4.14. Batteries

#### 4.14.1. Composition chimique

Les batteries renferment différents polluants en fonction de leur type. Les batteries au mercure (piles de montres...) renferment ce toxique. Celles au nickel-cadmium (batteries de véhicules électriques...) renferment en plus de ces métaux de l'acide, le tout contenu dans du plastique. Il en est de même pour les batteries des véhicules à carburateur qui ont des accumulateurs au plomb (et non au nickel-cadmium).

#### 4.14.2. Provenances et utilisations

Les batteries sont utilisées par tous les appareils à piles, les véhicules à carburateur ou électriques... Il est hélas encore fréquent d'en trouver dans les décharges sauvages, au fond d'un jardin....

#### 4.14.3. Propriétés physico-chimiques

Ce sont des polluants complexes ayant un ensemble de propriétés différentes du fait de l'assemblage d'un nombre d'éléments hétérogènes les constituant.

#### 4.14.4. Techniques envisageables

### 4.15. Conclusion

Les produits industriels abordés dans cette partie sont représentatifs des principales pollutions. Un nombre plus important de produit est abordé dans le tableau des produits commerciaux correspondant au chapitre sur le choix des techniques de dépollution. Rappelons une fois encore que les techniques proposées doivent être confrontées aux réalités de l'environnement où est localisée la pollution.

## 5. ACTIVITES INDUSTRIELLES

### 5.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les polluants potentiels (et les techniques de dépollutions associées) générés par diverses activités industrielles. Les activités industrielles envisagées ici sont parmi les plus représentatives des problèmes de pollution industrielles rencontrés. La liste n'est en aucune manière exhaustive.

### 5.2. Aciérie (chrome, nickel, molybdène, tungstène...)

#### 5.2.1. Polluants

L'acier est composé de fer, de carbone (0,03 à 2 %) et d'autres éléments :

- le manganèse pour 0,6 %,
- le soufre et le phosphore, qui nuisent aux qualités que l'on demande à un acier, ne doivent être présents qu'en très faible proportion,
- on ajoute souvent du silicium dans l'acier de qualité inférieure.

Les aciers qui ne contiennent pas d'autres éléments d'addition que ceux mentionnés ci-dessus sont dits aciers ordinaires. Les aciers spéciaux ont une teneur plus forte en silicium et manganèse. Ils contiennent en outre d'autres métaux: chrome, nickel, molybdène, tungstène... Par exemple, l'acier inoxydable contient 18 % de chrome et 8 % de nickel. L'acier rapide pour les fraiseuses et les tours ont 5 % de molybdène, 4 % de chrome, 6,5 % de tungstène et 2 % de vanadium.

La pollution potentielle due à cette activité industrielle peut comporter les différentes substances énumérées précédemment mais aussi des hydrocarbures ayant servi à la chauffe et divers produits chimiques nécessaires au fonctionnement de l'activité :

- des résines phénoliques et furanniques (confection des moules),
- des résines et de l'isocyanate (confection des noyaux),
- des catalyseurs (amines liquides pour le noyautage, des acides phosphoriques ou arylsulfoniques pour accélérer la prise des sables de fonderie),
- de la diméthylisopropylamine,
- des couches (produits à base d'alcool améliorant la qualité de revêtement des moules),
- des colles (noyautage),
- des peintures et diluants (solvants à base de xylène et alcool pour la finition des pièces produites),
- des huiles et lubrifiants pour les machines,
- des PCBs (équipant certains transformateurs et compresseurs EDF).

De plus, l'activité engendre des déchets solides qui peuvent être classés en cinq classes :

1. sables de fonderies (matériaux siliceux et argileux : sables silico-argileux, phénoliques, furanniques, siliceux à résine, et sables Ahsland),
2. réfractaires et crasses (rebuts métalliques),
3. les fines des dépoussiéreurs (issues de la grenailleuse et d'opération d'ébardage),
4. huiles et condensats usagés (huiles de vidange des machines, du bac de trempe, des condensats des compresseurs),
5. containers et fûts usagés.

#### 5.2.2. Contraintes dues au site

### 5.2.3. Techniques envisageables

## 5.3. Industries chimiques

### 5.3.1. Polluants

Les progrès de la chimie ont été tels que la plupart des industries en sont aujourd'hui plus ou moins tributaires. Toutefois on peut ranger plus particulièrement sous le nom d'industries chimiques :

- la grande industrie chimique de fabrication de base (acides minéraux, sodes commerciales, engrais, combustibles),
- des industries où la chimie joue un rôle essentiel : industrie des matières colorantes, des matières plastiques, du caoutchouc et des textiles artificiels, des produits pharmaceutiques, des produits photographiques, des explosifs, des insecticides, des huiles essentielles et des parfums...

Tous les polluants se retrouvent dans cette activité. Pour limiter cette liste, il faut se référer à l'activité découlant de celle-ci (ex: une industrie chimique qui fabrique essentiellement des bases pour la parfumerie...).

Cependant, de manière fréquente, les pollutions dans les usines chimiques comportent des solvants chlorés que l'on retrouve dans les nappes et zones non saturées, ainsi que des molécules aromatiques et des hydrocarbures.

### 5.3.2. Contraintes dues au site

Les industries chimiques de manière générale, ont pour principale caractéristique la grande complexité de leurs installations. La présence sur le site de produits dangereux (toxiques, inflammables, explosifs, corrosifs...) et le nombre important de conduites aériennes ou souterraines, de cuves de stockages... qui rendent toute intervention délicate.

### 5.3.3. Techniques envisageables

## 5.4. Industrie pharmaceutique

### 5.4.1. Polluants

Le médicament est devenu aujourd'hui un produit de synthèse grâce aux progrès de la chimie, de la biochimie, de la médecine, et aux travaux de recherche des laboratoires.

Les molécules utilisées et produites sont variées, nombreuses et en quantités très variables, ce qui explique que les polluants soient très divers. Citons par exemple :

- les antibiotiques (pénicilline, streptomycine, tétracycline, chloramphénicol...),
- les drogues synthétiques (analgésiques,...),
- les vitamines, hormones, vaccins, tranquillisants...

### 5.4.2. Contraintes dues au site

### 5.4.3. Techniques envisageables

## 5.5. Pétrochimie

### 5.5.1. Polluants

La pétrochimie est la chimie du pétrole (transformation des hydrocarbures et des molécules résultantes). Les polluants seront très divers mais d'origine pétrolière. On pourra ainsi fréquemment rencontrer des hydrocarbures. Les produits les plus basiques issus de cette activité industrielle sont :

- des alcènes (éthylène, propylène, butylène et butadiènes)...
- des aromatiques (benzène, toluène, xylènes)...

Ces molécules permettront la fabrication du polyéthylène, polypropylène, polystyrène, polychlorure de vinyle (PVC), de fibres synthétiques (polyester, acrylique...), de solvants, détergents,... qui sont autant de polluants potentiels.

### 5.5.2. Contraintes dues au site

Les contraintes sont les mêmes que pour la chimie en générale : nombre important et complexité des conduites, présence de produits dangereux (toxiques, explosifs, inflammables...)...

### 5.5.3. Techniques envisageables

## 5.6. Industrie pétrolière

### 5.6.1. Station service

#### **5.6.1.1. Polluants**

Les polluants sont classiquement des hydrocarbures, fuels, ...

#### **5.6.1.2. Contraintes dues au site**

Les stations services sont toujours situées en bordure de route et fréquemment entourées d'habitations. De plus, l'espace disponible pour intervenir est souvent limité. Enfin, elles offrent parfois en plus de la vente de carburants, des services de lavage et d'entretien de véhicules.

#### **5.6.1.3. Techniques envisageables**

### 5.6.2. Zone de transfert et dépôt de produits pétroliers

### **5.6.2.1. Polluants**

Ces zones permettent le stockage et/ou le transit de produits pétroliers. Il est donc naturel de s'attendre à des pollutions par hydrocarbures ou huiles lubrifiantes (coupes pétrolières lourdes allant de C20 à C40). Les hydrocarbures moins denses que l'eau flottent sur la nappe et l'épaisseur de flottants peut varier du centimètre aux mètres. Les hydrocarbures plus denses que l'eau peuvent poursuivre leur cheminement plus ou moins verticalement jusqu'au bas de la nappe où ils s'accumulent dans les irrégularités du fond. Les particules de sol quant à elles adsorbent une partie de ces contaminants.

Enfin la nappe renferme parfois dans une moindre mesure des hydrocarbures aliphatiques semi-volatils provenant de produits type gasoil ou d'impuretés d'huiles, des HAP pouvant être issus d'huile antracénique, et des BTEX.

### **5.6.2.2. Contraintes dues au site**

La grande difficulté d'intervention réside ici dans le risque d'explosion lié aux produits pétroliers. De plus, le site est souvent encombré par de nombreuses cuves, conduites aériennes et souterraines exigeant l'application rigoureuse des consignes de sécurité.

### **5.6.2.3. Techniques envisageables**

## **5.6.3. Raffineries**

### **5.6.3.1. Polluants**

Le pétrole brut est fractionné en gaz liquéfié, naphta (utilisé pour la production d'essence), kérosène, gasoil, et résidus. Les principaux polluants issus de cette activité (hormis ceux énoncés préalablement) sont :

- des particules,
- du monoxyde et dioxydes de carbone (gaz),
- des oxydes d'azote et de soufre.

Les raffineries sont particulièrement polluantes : pour chaque tonne de brut traité, on retrouve en moyenne 0,8 kg de particules diverses, 1,3 kg d'oxydes de soufre, 0,3 kg d'oxydes d'azote, 2,5 g de BTX (benzène, toluène, xylène). De plus, elles utilisent de grands volumes d'eau (3,5 à 5 m<sup>3</sup> par tonne). Ces eaux se chargent en moyenne de 20 à 200 mg/l de phénol, 100 à 300 mg/l de pétrole, de métaux lourds (chrome, plomb) et d'autres molécules. Des pollutions importantes peuvent se produire du fait de largages accidentels ou dysfonctionnement des stations d'épuration internes aux raffineries. Enfin, des polluants solides sont produits (de l'ordre de 3 à 5kg/t de brut) qui renferment des toxiques divers (aromatiques et métaux).

### **5.6.3.2. Contraintes dues au site**

Comme pour les industries chimiques de manière générale, elles présentent une grande complexité d'installations. La présence sur le site de produits dangereux (toxiques, inflammables, explosifs, corrosifs...) et le nombre important de conduites aériennes ou souterraines, de cuves de stockages... rend toute intervention délicate. Les consignes de sécurité sont draconiennes.

### **5.6.3.3. Techniques envisageables**

#### 5.6.4. Usines à gaz (goudron, naphtalène, benzol, ammoniac, sulfure d'hydrogène, hydrate de fer, acide cyanhydrique...)

##### **5.6.4.1. Polluants**

Dans les usines à gaz on utilise du charbon cokéifiable qui, par distillation sèche (chauffage à l'abri de l'air) produit un résidu nommé coke dur et sec, utilisable dans les hauts fourneaux et les fonderies. Le gaz brut obtenu est très impur. Il contient de l'eau, du goudron, du naphtalène, du benzol, de l'ammoniac, du sulfure d'hydrogène, de l'hydrate de fer et de l'acide cyanhydrique dont il faut se débarrasser. Le schéma de fabrication du gaz consommable fait donc intervenir différentes infrastructures et unités de préparation dont les caractéristiques sont communes à toutes les usines à gaz. Les sous produits obtenus sont en général valorisés : le coke pour les hauts fourneaux, les eaux ammoniacales pour fabriquer le sulfate d'ammonium (engrais agricoles), les goudrons pour les enrobés des routes, les hydrocarbures aromatiques et composés phénolés pour l'industrie chimique (fabrication de solvants...). Les polluants potentiels à envisager sont donc principalement :

- des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP) et des hydrocarbures totaux,
- du plomb, arsenic, cyanures,
- du benzène, toluène, éthylbenzène, xylène (BTEX),
- des composés phénolés.

##### **5.6.4.2. Contraintes dues au site**

Les contraintes liées au site tiennent essentiellement au fait que les installations s'étendent sur de grands espaces avec de multitudes d'interconnexions par tuyauteries. De plus, sur des sites en activité, les risques d'explosion sont réels et les nombreuses cuves enterrées doivent être précisément localisées pour éviter toute contamination supplémentaire ou explosion.

##### **5.6.4.3. Techniques envisageables**

#### 5.6.5. Sites d'exploitation / forages

##### **5.6.5.1. Polluants**

Un forage est par définition l'ensemble des opérations permettant de creuser des trous. La principale utilisation de cette technique est l'exploitation de gisements pétroliers et de gaz naturels. Afin d'éliminer les débris de roches découpés par la foreuse, on utilise des fluides (boues) constitués d'eau et d'argiles. Ceux-ci servent aussi à refroidir la tête de forage, à maintenir les parois du trou (en empêchant l'éboulement grâce à la pression hydrostatique), à retenir les fluides sous pression pouvant venir des roches traversées. Afin d'améliorer les propriétés du fluide, des adjuvants sont ajoutés :

- tanins ou polyphosphates (abaissement de la viscosité),
- amidons pour réduction du filtrat (quantité d'eau pouvant filtrer à travers les parois du trou),
- barytine (ajustement de la masse volumique pour obtenir une pression hydrostatique en bout de puits supérieure à la pression des fluides contenus).

Il est parfois possible de forer en utilisant de l'air sous pression.

Les polluants potentiels sont donc principalement les hydrocarbures et les résidus des fluides (boues).

##### **5.6.5.2. Contraintes dues au site**

### **5.6.5.3. Techniques envisageables**

## **5.7. Exploitation minière**

### 5.7.1. Polluants

### 5.7.2. Contraintes dues au site

### 5.7.3. Techniques envisageables

## **5.8. Energie**

### 5.8.1. Nucléaire

#### **5.8.1.1. Polluants**

Malgré l'interdiction des essais nucléaires dans l'atmosphère (source importante de pollution radioactive), la radioactivité nucléaire demeure un problème important. Les centrales dégagent des quantités limitées de déchets radioactifs dans l'environnement mais les risques d'accidents et problèmes de stockage des déchets demeurent. La catastrophe de Tchernobyl, par exemple, a répandu des matières radioactives telles que de l'iode 131, césium 137 qui se concentrent dans les tissus vivants (animaux et végétaux) et remontent ainsi la chaîne alimentaire jusqu'à l'homme.

De même, l'exploitation de mines d'uranium engendre des pollutions. Les rejets de roches dites « stériles » sont susceptibles de provoquer une pollution des eaux superficielles par divers polluants comme le radium.

Les principaux problèmes de pollution résident cependant dans les usines de retraitement ou de stockage des déchets nucléaires. (manganèse 54, cobalt 60, uranium 235 non brûlé, plutonium, krypton 85, strontium 90, iode 131, césium 137, tritium, plutonium 239, americium, curium...).

De manière générale, les problèmes de pollution liées au nucléaire sont assez complexes et difficilement traitables. En effet, il est très difficile de modifier ou d'arrêter le rayonnement des produits radioactifs. La seule parade repose dans la dissolution des rejets ou l'interposition d'écran afin de diminuer la densité des rayonnements.

#### **5.8.1.2. Contraintes dues au site**

Les contraintes sont principalement liées au danger des rayonnements radioactifs pour l'homme.

#### **5.8.1.3. Techniques envisageables**

Après déshydratation des effluents contaminés, les déchets radioactifs sont emprisonnés dans des verres. Il s'agit de la technique de vitrification à haute température. Les cylindres de verre obtenus sont ensuite stockés sous contrôle.

## 5.8.2. Hydroélectrique

### 5.8.2.1. Polluants

### 5.8.2.2. Contraintes dues au site

### 5.8.2.3. Techniques envisageables

## 5.8.3. Thermique

### 5.8.3.1. Polluants

Les centrales thermiques, comme toute installation utilisant l'énergie calorifique (issue de la combustion) peuvent engendrer diverses pollutions. Cependant un certain nombre de polluants potentiels émergent. Il s'agit des combustibles utilisés et de leurs produits de combustion. Ainsi, la majeure partie des pollutions a pour origine les zones de stockage des combustibles et les salles des chaudières. Les molécules polluantes que l'on peut trouver sont :

- des PCBs,
- des métaux lourds (arsenic, plomb, cadmium, chrome, cuivre, nickel et mercure),
- des hydrocarbures aromatiques monocycliques (BTEX : benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes),
- des composés organohalogénés volatils,
- du trichlorobenzène présent dans les huiles de PCB à l'état d'impureté.

Cette liste n'est pas exhaustive mais est représentative des produits générés, manipulés sur un tel site et potentiellement dangereux pour l'environnement.

### 5.8.3.2. Contraintes dues au site

### 5.8.3.3. Techniques envisageables

## 5.9. Réfrigération (ammoniac, chlorure de méthyle, Fréon, chlorure de calcium ou de sodium...)

### 5.9.1. Polluants

La réfrigération est la technique des milieux réfrigérants et des méthodes propres à tenir et à maintenir de basses températures. Ces températures sont produites dans des installations frigorifiques par vaporisation de certains fluides dans des organes refroidisseurs. Dans les petites installations on utilise comme agent frigorifique l'ammoniac, le chlorure de méthyle ou le Fréon. Dans les installations plus

importantes (type chambre froide), on a recours à un refroidissement indirect par couches de glace. Dans ce cas la vaporisation est obtenue en faisant circuler une solution de chlorure de calcium ou de sodium dans des serpentins entourant l'espace à refroidir.

#### 5.9.2. Contraintes dues au site

#### 5.9.3. Techniques envisageables

### 5.10. Industrie automobile

#### 5.10.1. Polluants

De nombreux polluants sont susceptibles d'être présents: huiles, hydrocarbures, métaux (arsenic, plomb, cadmium, chrome, cuivre, nickel, mercure, zinc), PCBs (transformateurs au pyralène)...

#### 5.10.2. Contraintes dues au site

#### 5.10.3. Techniques envisageables

Les techniques à considérer sont nombreuses. La **Biodégradation (Atténuation naturelle)**, par exemple pour les huiles de laminage, est parfois pratiquée. Le **Venting** et **Bioventing** sont aussi pratiqués sur les pollutions par hydrocarbures.

### 5.11. Industries textile (pesticides, phénols, composés halogénés, cuivre, chrome, arsenic...)

#### 5.11.1. Polluants

L'industrie textile utilise des fibres végétales comme le coton, des fibres animales comme la laine et la soie, et une variété de matériaux synthétiques tels le Nylon, le polyester et l'acrylique. Toutes les étapes de production de textile (production de fibres, traitement et filage des fibres, préparation des fils, production d'étoffes, blanchiment, teinture, impression et finition) génèrent des déchets, des produits polluants. Parmi eux peuvent être cités les solvants, les phénols (teinture et finition), les composés halogénés (blanchiment), le cuivre, le chrome, l'arsenic et le mercure.

Pour la préservation des fibres naturelles (élimination de bactéries ou autres pathogènes de la laine), des pesticides sont utilisés comme antimite avant de se retrouver à l'égout ou dans le sol.

Prenons par exemple le cas d'une teinturerie imprimerie. Ses rejets sont composés de white-spirit, d'acides et bases (dérivées de la soude), de métaux lourds (titane, zinc, chrome, nickel, cuivre, cadmium, baryum, plomb, fer... utilisés dans les colorants et pigments), d'alcools, d'eau oxygénée, de produits halogénés (chlorés...) et de dérivés aminés (adoucissants, épaississants), de composés phénolés (détergents) et de divers composés organiques. Il est également possible de retrouver parmi les polluants des esters, cétones, alcènes, dérivés soufrés, des composés azotés et phosphorés. Les quantités incriminés sont faibles car ce sont des restes de bains.

### 5.11.2. Contraintes dues au site

### 5.11.3. Techniques envisageables

## 5.12. Industrie du bois (préservation) (phénylphénoxyde de sodium, arséniate de cuivre et de chrome, pentachlorophénol, lindane, naphtésates, créosotes...)

### 5.12.1. Polluants

La préservation du bois contre l'attaque du temps et de parasites nécessite l'emploi de divers produits. Les principaux types de produits utilisés sont :

- à base d'eau tels que le phénylphénoxyde de sodium, l'arséniate de cuivre et de chrome,
- à base de solvant organique tels que le pentachlorophénol substitué par du lindane, du perméthrin, des triazoles, du tributylétain, des naphtésates de cuivre et de zinc,
- les borates,
- les goudrons (créosotes).

Les principaux polluants liés à cette activité et se retrouvant dans les eaux de ruissellement et les sols sont les HAPs avec particulièrement le benzo(a)pyrène, le pentachlorophénol, les pesticides, les dioxines, le furane, le chrome, le cuivre, l'arsenic, le phénol, les fluorures...

### 5.12.2. Contraintes dues au site

### 5.12.3. Techniques envisageables

## 5.13. Industrie du papier (bisulfite, soude...)

### 5.13.1. Polluants

La pâte à papier chimique s'obtient à partir du bois de conifères et aussi d'arbres à feuilles caduques tels que le bouleau et le tremble, en éliminant la matière ligneuse par un solvant, après écorçage, réduction en copeaux et criblage. Il existe 2 procédés principaux:

1. le procédé au bisulfite qui utilise surtout l'épicéa jeune comme matière première et un bisulfite, le plus souvent de calcium, comme solvant,
2. le procédé à la soude qui s'accommode de bois inférieurs: vieil épicéa, pin, déchet de scierie dont les copeaux sont généralement traités par des levures alcalines qui dissolvent non seulement la lignite mais aussi la résine de l'écorce.

Les polluants peuvent être des produits chlorés (phénols...), des dioxines, des produits divers (phosphore, nitrates, ...).

### 5.13.2. Contraintes dues au site

### 5.13.3. Techniques envisageables

## 5.14. Agro-chimie

### 5.14.1. Polluants

Les polluants sont ici constitués des molécules chimiques utilisées pour la formulation des pesticides, herbicides, fongicides... Ainsi, la majeure partie de ces polluants est constituée par différentes familles de molécules :

- Carbamates et dithiocarbamates (chlorofuran, carbaryl, ziram, benthocarb),
- Chlorophénoxy (2,4-D, 2,4,5-T et silvex),
- Organochlorine (dicofol, endosulfan),
- Organophosphorus (malathion, diméthoate, phorate, méthylparathion),
- Nitrés (trifluralin),
- Diverses molécules comme des biopesticides (*Bacillus thuringiensis*, des phéromones...), des hétérocycles (atrazine), des dérivés d'urée (diuron...)...

### 5.14.2. Contraintes dues au site

### 5.14.3. Techniques envisageables

## 5.15. Agriculture (azote, phosphore, potassium, nitrates...)

### 5.15.1. Polluants

De l'Antiquité au XIX<sup>ème</sup> siècle, les techniques agricoles demeurèrent rudimentaires. On pratiquait seulement la sélection des graines, la jachère et la fertilisation du sol par le fumier ou les engrais verts. Désormais, l'agriculture utilise des matières fertilisantes qui sont l'addition d'engrais et d'amendements dans le sol. Les engrais sont des agents qui contiennent un ou plusieurs éléments comme l'azote, le phosphore et le potassium. Ils agissent directement sur les cultures. Les amendements sont eux des matières fertilisantes dont le but est d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

Les polluants peuvent être de l'ammoniac, de l'urée, du sulfate d'ammonium, du nitrate d'ammonium, des phosphates... De nos jours, les épandages excessifs de matières organiques, de fumiers, lisiers, les apports d'engrais minéraux conduisent fréquemment à des pollutions par abus de nitrates.

### 5.15.2. Contraintes dues au site

### 5.15.3. Techniques envisageables

## 5.16. Pressing / nettoyage à sec (solvants chlorés...)

### 5.16.1. Polluants

Le principal polluant rencontré dans l'activité de nettoyage est le TCE. On trouve aussi des résidus inhérents aux lessives (phosphates, tensioactifs anioniques et cationiques). Le TCE est utilisé pour nettoyer avec un apport d'eau limité. Le solvant est injecté dans le linge puis une fois le traitement terminé, il est volatilisé par injection d'air chaud. La pollution se situe donc au niveau des condensats chargés par le TCE.

### 5.16.2. Contraintes dues au site

### 5.16.3. Techniques envisageables

## 5.17. Traitement de surface

### 5.17.1. Polluants

Dans le traitement de surface, les polluants sont généralement des composés inorganiques (métaux) présents sous forme de complexes. Cependant, des polluants de type organique correspondants aux additifs utilisés pour améliorer le traitement de surface peuvent être à la source de pollution.

D'une manière générale dans l'industrie automobile on trouve des pollutions par des métaux dit réfractaires tel que le chrome, l'aluminium, ..., métaux qui ont la particularité de résister à la corrosion. De même, le zingage de certaine pièce est source de pollution.

Enfin, avant de traiter une surface, il convient de la préparer. Ainsi, les bains d'acides peuvent être pris en compte comme polluant potentiel.

### 5.17.2. Contraintes dues au site

### 5.17.3. Techniques envisageables

## 5.18. Conclusion.

Les activités industrielles présentées sont parmi les principales pouvant engendrer des pollutions importantes ou fréquentes. Un nombre plus important d'activité est envisagé dans le tableau sur les activités industrielles dans la partie suivante. Remarquons qu'il s'agit toujours de spéculations sur d'éventuelles pollutions. En aucun cas les produits polluants cités ne se retrouvent obligatoirement dans une pollution impliquant telle ou telle activité.

## 6. CHOIX DES METHODES DE DEPOLLUTION

### 6.1. Introduction

Cette partie est la plus importante et doit permettre de trouver la ou les techniques de dépollution appropriées en connaissant, soit:

- ◇ les molécules de polluants à traiter,
- ◇ les produits industriels à l'origine de la pollution,
- ◇ l'activité industrielle à l'origine de la pollution.

De plus, les tableaux permettent de retrouver à partir des polluants détectés, l'activité industrielle probable et/ou les produits commerciaux potentiellement à l'origine de la pollution. De même, il est possible d'estimer le produit commercial ou/et l'activité industrielle à la source de la pollution en connaissant les molécules polluantes détectées sur le terrain à dépolluer.

Les paramètres physico-chimiques des polluants sont donnés lorsqu'ils ont pu être rassemblés.

### 6.2. Mise en garde

Comme nous l'avons signalé en début d'ouvrage, les indications fournies ne remplaceront jamais l'expert. Dans le cadre d'une dépollution, de nombreux facteurs sont à prendre en considération (pédologie, polluants présents, biodégradation, biotransformation, toxicité, risques encourus en utilisant tel ou tel traitement...). Il est important de bien comprendre qu'un type de dépollution appliqué sur une famille de produits donnés, dans un cadre déterminé, ne donnera pas obligatoirement les mêmes résultats dans un cadre différent avec pourtant des polluants identiques. Chaque cas est particulier même si les grands principes lui restent applicables.

### 6.3. Choix

#### 6.3.1. Bilan des différentes étapes préalables

Avant toute dépollution il convient de dresser un diagnostic environnemental. Cette phase d'investigation initiale doit permettre de définir l'état environnemental du site et de ces alentours au moment de l'étude. Ainsi, il faut :

- ⇒ estimer les polluants en cause, essayer de les quantifier dans les milieux (sol, nappe phréatique, air)
- ⇒ déterminer la source de la pollution (et la cause de la pollution)
- ⇒ caractériser les conditions physico-chimiques et hydrogéologiques du milieu.

#### 6.3.2. Introduction sur l'utilisation des tableaux

 Notons qu'il convient de se reporter aux principes des différentes techniques de dépollution afin de vérifier que la méthode de dépollution est bien applicable dans le cas qui vous intéresse. En effet, une méthode peut s'appliquer à la molécule polluante mais uniquement si celle-ci est dans un sol et non dans la nappe phréatique...

Quatre tableaux sont ici présentés :

1. Le premier permet une *entrée par la/les molécules polluantes*. Il indique dans *quels produits commerciaux* ou *activités industrielles* ces molécules polluantes peuvent être trouvées. L'exhaustivité n'étant pas atteinte, l'information est purement informative.

Les deux tableaux suivant permettent une entrée par :

2. *produits commerciaux* (avec un colonne présentant non exhaustivement les molécules fréquemment rencontrées dans ces produits) avec les *techniques de dépollution associées*.

3. *activités industrielles* (avec un colonne présentant, comme précédemment, non exhaustivement, les molécules fréquemment rencontrées pour ces activités) avec les *techniques de dépollution associées*.

Le dernier tableau liste :

4. *les molécules polluantes* et leurs *propriétés physico-chimiques* quand elles ont été trouvées dans la littérature, avec les *techniques de dépollution associées*.

Enfin, rappelons comme nous l'avons mentionné en préambule de l'ouvrage que les techniques de dépollution qui seront proposées ne sont pas exhaustives (d'importants et rapides progrès en recherche et développement laissant entrevoir de nombreuses autres possibilités dans un avenir proche). **De plus, des techniques telles que l'excavation, l'incinération, la solidification/confinement ne seront pas systématiquement proposées car elles peuvent d'emblée s'appliquer à la quasi totalité des polluants si les conditions de milieu le permettent.** Elles n'ont en effet pas de spécificité.

### 6.3.3. Molécules de polluant détectées / produits commerciaux / activités industrielles

#### **6.3.3.1. Introduction**

Ce tableau a pour but de dresser des hypothèses concernant l'origine d'une pollution. Ainsi, suite à une analyse chimique, vous déterminez un certains nombre de molécules chimiques polluantes. A partir de celles-ci, vous recherchez dans le tableau ci-après les activités industrielles ayant pu occuper le site et/ou produits commerciaux dans lesquels il est probable de rencontrer ces polluants. Par recoupement des informations obtenues de la sorte vous obtenez diverses hypothèses qu'il vous faudra probablement finir de croiser avec une enquête de terrain.

Attention: ce n'est pas parce qu'une molécule polluante ne figure pas dans une activité ou un produit qu'elle n'y est pas présente de manière absolue.

### 6.3.3.2. Tableau

<b>Molécule chimique potentiellement polluante</b>	<b>Produits commerciaux pouvant être à l'origine d'une pollution par ce polluant</b>
Activités commerciales ou Activités de fabrication des produits mentionnés, utilisant potentiellement ce polluant	
<b>Acénaphthalène / Acénaphtylène</b>	
<b>Acénaphène</b>	
<b>Acétal / Acétal diéthylique / 1,1-Diéthoxyéthane</b>	
Résines	
<b>Acétaldéhyde / Aldéhyde acétique / Ethanal</b>	
Chimie: fabrication acide acétique, anhydre acétique, 1butanol, Colorants / pigments, Ind. pharmaceutique, Parfumerie / Cosmétique, Pétrochimie, Plastiques	
<b>Acétanilide / n-Phénylacétamide</b>	
Ind. pharmaceutique, Médecine: antipyrétique et analgésique, Médicaments: antipyrétique et analgésique	
<b>Acétates</b>	
Electrotechnique	
<b>Acétate d'amyle / Acétate de pentyle</b>	Solvants
<b>Acétate de benzyle / Phénylméthylester</b>	
Parfumerie / Cosmétique: odeur de jasmin	
<b>Acétate du 2-(2-butoxyéthoxy)éthanol / Acétate d'éther butylique du diéthylène glycol</b>	
<b>Acétate de butyle / Butylester / Ethanoate de butyle</b>	
Electrotechnique, Encre: solvant, Ind. cuir: artificiel, Parfumerie / Cosmétique, Peinture: solvant, Photographie: film, Plastiques: solvant, Vernis: solvant	Solvants, Verreries: de sécurité
<b>Acétate d'éther monoéthyllique du diéthylène glycol / Acétate du 2-(2-éthoxyéthoxy)éthanol</b>	
<b>Acétate d'éther monométhyllique de l'éthylène glycol / Acétate de 2-méthoxyéthanol / Acétate de 2-méthoxyéthyle</b>	
Adhésifs / colles: formulation d'adhésifs à base d'esters cellulosiques, Encre: formulation, Imprimeries: formulation liquides de procédés reprographiques, Imprimeries: formulation de produits de traitement, Ind. textile: formulation de préparations, Peinture: formulation, Photographie: solvant dans la fabrication de films photographiques, Vernis: formulation	
<b>Acétate d'éthyle</b>	
Encre: solvant pour préparation, Ind. cuir: solvant dans la fabrication de cuir artificiel, Ind. textile: soie artificielle, Parfumerie / Cosmétique: solvant, Photographie: solvant dans la fabrication de films photographiques, Vernis: solvant pour préparation	Solvants: de la nitrocellulose
<b>Acétate de 2-éthylhexyle</b>	
<b>Acétate d'isoamyle / Acétate de 3-méthylbutyle</b>	Solvants
<b>Acétate d'isobutyle / Acétate de 2-méthylpropyle / Ethanoate de 2-méthylpropyle</b>	
Adhésifs / colles: solvant, Encre: solvant, Imprimeries: solvant d'encre, Parfumerie / Cosmétique, Peinture: solvant, Vernis: solvant	Solvants
<b>Acétate de 3-méthoxybutyle</b>	

### 6.3.3.3. Conclusion

Un nombre important de produits commerciaux et activités industrielles ont été listés ici, ils correspondent au plus fréquents. L'inventaire des molécules impliquées n'est pas exhaustif et l'on comprendra aisément pourquoi (ampleur de la tâche, informations spartiates, ...).

### 6.3.4. Produits commerciaux et molécules les composant / techniques de dépollution

#### 6.3.4.1. Introduction

Ce tableau présente en entrée les produits commerciaux les plus fréquents en terme de pollution. La deuxième colonne répertorie une partie des molécules chimiques entrant pour une part dans leur composition. Enfin, la dernière colonne liste les techniques de dépollution qui peuvent être envisagées pour traiter une contamination par ces produits commerciaux. **Attention, ces techniques sont applicables aux produits commerciaux et non pas automatiquement aux constituants chimiques de ces produits pris individuellement.** Ainsi, ce n'est pas parce que l'on peut traiter tel produit commercial par telle méthode de dépollution que la molécule X entrant dans la composition de ce produit peut être traitée par la même méthode dans le cas d'une pollution par ce seul produit.

### 6.3.4.2. Tableau

 (1) Attention, ces techniques sont applicables aux produits commerciaux et non pas automatiquement aux constituants chimiques de ces produits pris individuellement.

(a mettre en bas de page pour ce tableau)

<b>Produits commerciaux</b>	<b>TECHNIQUES DE DEPOLLUTION envisageables<sup>(1)</sup></b>
Molécules polluantes pouvant entrer dans leur composition (non exhaustif)	
<b>Acaricides</b>	<i>Biotertre</i>
Acide 2,4,5-trichlorophénoxyacétique / 2,4,5-T, Aldicarbe, Azinphosméthyle, Carbaryl, Chlorobenzilate, Dicolfol, Ethion, Malathion	
<b>Accumulateurs / Piles</b>	<i>Biolixiviation, Flushing, Phytoremédiation, Barrières réactives</i>
Acide sulfurique, Antimoine, Arsenic, Baryum, Cadmium, Chlore, Chlorures, Chrome, Cobalt, Cuivre, Fer, Fluor, Fluorures, Hydrocarbures, Hydrocarbures halogénés aromatiques polycycliques, Hydroxyde de nickel, Hydroxyde de potassium / Potasse caustique, Hydroxyde de sodium / Soude caustique, Lithium, Manganèse, Mercure, Molybdène, Nickel, Oxyde de cadmium, PCB / Polychlorobiphényles, Phosphore, Plomb, Potassium, Sélénium, Silicium, Soufre, Tungstène, Vanadium, Zinc	
<b>Antigels</b>	<i>Biotertre, Biosparging, Flushing</i>
Chlorure de calcium, Diacétone-alcool / Diméthylacétonylcarbinol / 4-Hydroxy-4-méthyl-2-pentanone, Diéthylèneglycol / Diglycol / Bis (2-hydroxyéthyl) éther / 2-Hydroxyéthyl éther / 3-Oxapentane-1,5-diol / 2,2-Oxydiéthanol, 1,2-Ethanediol / Ethylèneglycol / Glycol / 2-Hydroxyéthanol, Ether hydroxy-2 diéthylique / Ether monoéthylique d'éthylèneglycol / 2-Ethoxyéthanol / Ethylglycol, Ether monoéthylique de l'éthylèneglycol / 2-Méthoxyéthanol, Hexylène glycol / 2-Méthyl-2,4-pentanediol, 1,2-Propanediol / Propylèneglycol	
<b>Anti-oxydants / Anticorrosifs</b>	
Alcool éthylique / Ethanol, Alcool thiobutylique / 1-Butanethiol / Butylmercaptan, 2-Aminoéthanol / Ethanolamine / Monoéthanolamine, 2-Aminopropane / Isopropylamine / 2-Propanamine, Anhydride cis-butènedioïque / Anhydride maléïque / 2,5-Furannedione, Anhydride hexahydroptalique, Aminobenzène / Aminophène / Aniline / Benzénamine / Phénylamine, 1,4-Benzènediol / p-Dihydroxybenzène / Hydroquinone, Chromate de zinc, Créosol / 2-Méthoxy-4-méthylphénol, 2-Crésol / o-Crésol / 2-Crésylol / 2-Hydroxytoluène / 2-Méthylphénol, 3-Crésol / m-Crésol / 3-Crésylol / 3-Hydroxytoluène / 3-Méthylphénol, 4-Crésol / p-Crésol / 4-Crésylol / 4-Hydroxytoluène / 4-Méthylphénol, Cyclohexanamine / Cyclohexylamine / Hexahydro-aniline, DADP / DADPM / DDM / 4,4'-Diaminodiphénylméthane / p,p'-Diaminodiphénylméthane / MDA / 4,4'-Méthylènedianiline, DEA / Diéthylamine / N-Ethyléthylamine, Diéthanolamine / 2,2'-Iminodiéthanol, N,N-Diéthyléthylamine / Triéthylamine, Diméthylamine, Hydrazine, 2-(1-Méthyléthyl) pyridine, Nitrocarbène / Nitrométhane, 2,2,2'-Nitrolotriéthanol / Triéthanolamine, Oxyde de plomb (II, II, IV) / Minium / Tétraoxyde de plomb, Sélénium, 1,1,2,2-Tétrachloroéthane, Thirame	
<b>Biocides</b>	<i>Flushing, Biotertre</i>
Biformal / Diformyle / Ethanedial / Ethane-1,2-dione / Glyoxal / Oxalaldéhyde, Chloropicrine / Nitrochloroforme / Trichloronitrométhane, Coumafène / Warfarine, Coumaphos, 1,4-Dichlorobenzène / p-Dichlorobenzène, 2,4,6-Trichlorophénol	
<b>Blanchiment (agents)</b>	<i>Biotertre, Flushing</i>
Acide azotique / Acide nitrique, Acide boréique sulfoné, Acide carbolique / Acide phénique / Hydroxybenzène / Phénol, Acide éthanedioïque / Acide oxalique, Acide sulfurique, Aldéhyde furannique / Aldéhyde furfurolique / Aldéhyde furfurylique / Aldéhyde furoïque-2 / Aldéhyde pyromucique / Formyl-2 furanne / 2-Furaldéhyde / Furfural / Furfuraldéhyde / Furol / Méthylal-2 furanne, Anhydride sulfureux / Dioxyde de soufre, Bore, Chlorate de sodium, Chlore, Chlorures, Chrome, Créosol / 2-Méthoxy-4-méthylphénol, Dichlore, Fer, Hydrocarbures, Hydroxyde de potassium / Potasse caustique, Hydroxyde de sodium / Soude caustique, Hypochlorite de sodium, Oxyde d'éthylène / 1,2-Epoxyéthane / Oxiranne, PCB / Polychlorobiphényles, Peroxyde d'hydrogène / Eau oxygénée, Phosphate, Sulfates	
<b>Carburants</b>	<i>Biotertre, Flushing, Sparging, Bioventing, Atténuation naturelle, Biosparging</i>
Acétylène / Ethyne, Alcools, Alcool éthylique / Ethanol, Alcool méthylique / Méthanol, Ammoniac, Benzène / Benzol, Chlorure de phosphoryle / Oxychlorure de phosphore / Trichlorure de phosphoryle, Diméthylamine, n-Heptane, Hydrazine, Isopentane / Méthyl-2 butane, Méthylbenzène / Toluène, 7-Méthyl-3-méthylène-1,6-octadiène / bêta-Myrcène, Nitrocarbène / Nitrométhane, Plomb tétraéthyle, Résines, 1,3,5-Triméthylbenzène / sym-Triméthylbenzène / Mésitylène, Xylène, 1,2-Xylène / o-Xylène, 1,3-Xylène / m-Xylène,	



### **6.3.4.3. Conclusion**

Comme nous l'avons dit, il ne faut pas perdre de vue que *ces techniques sont applicables aux produits commerciaux et non pas automatiquement aux constituants chimiques de ces produits pris individuellement*. Ainsi, ce n'est pas parce que l'on peut traiter tel produit commercial par telle méthode de dépollution que la molécule X entrant dans la composition de ce produit peut être traitée par la même méthode dans le cas d'une pollution par ce seul produit. De plus, une pollution par un produit commercial donné ne va pas obligatoirement pouvoir être traitée par la même méthode suivant que la pollution remonte à quelques jours ou à quelques mois... De même, il convient pour effectuer le bon choix de la technique de dépollution, de se reporter aux conditions d'applications de ces méthodes. Il faut en effet tenir compte du milieu à traiter...

## **6.3.5. Activités industrielles / molécules chimiques impliquées / techniques de dépollution**

### **6.3.5.1. Introduction**

Le but de ce tableau est de connaître les principales molécules impliquées dans une activité industrielle ou dans une partie d'une activité industrielle (production d'un produit commercial particulier...), afin d'estimer les polluants potentiels, donc le risque que représente cette activité. Les techniques de dépollution proposées reposent sur les produits polluants mentionnés et sont donc à considérer dans ce cadre industriel. Elles n'ont bien entendu pas force de loi et doivent être confrontées à la réalité du terrain.

### 6.3.5.2. Tableau

ACTIVITE COMMERCIALE	TECHNIQUES DE DEPOLLUTION envisageables
Molécules polluantes pouvant correspondre à l'activité commerciale (non exhaustif)	
<b>ACIERIE</b>	
Acides carboxyliques, Acide azotique / Acide nitrique, Acide carbolique / Acide phénique / Hydroxybenzène / Phénol, Acide chlorhydrique / Acide hydrochlorique / Acide hydrochlorure / Chlorure d'hydrogène, Acide éthanedioïque / Acide oxalique, Acide fluorhydrique / Acide hydrofluorique / Acide fluorique / Fluorure d'hydrogène, Acide sulfurique, Anhydride sulfureux / Dioxyde de soufre, Antimoine, Arsenic, Baryum, Benzène / Benzol, Brome, Cadmium, Calcium, Chrome, Cobalt, Cuivre, Cyanures, Cyanure de calcium, Cyanure de potassium, Cyanure de sodium, Dioxines, Fer, Fluor, Fluorures, Fluorure de calcium, Fluorure de sodium, Hydrocarbures, Hydrocarbures aromatiques, Hydrocarbures aromatiques polycycliques / HAP, Hydrocarbures acycliques, Hydroxyde de potassium / Potasse caustique, Hydroxyde de sodium / Soude caustique, Manganèse, Mercure, Méthylchloroforme / 1,1,1-Trichloroéthane, Molybdène, Nickel, Oxyde d'azote / Oxyde azotique / Oxyde nitrique, Oxyde de carbone / Monoxyde de carbone, Oxyde de fer, PCE / Perchloroéthylène / Tétrachloroéthène / Tétrachloroéthylène, Peroxyde d'hydrogène / Eau oxygénée, Phénols, Phosphore, Plomb, Potassium, Silicium, Sodium, Soufre, Sulfates, Sulfures, TCE / Trichloroéthène / Trichloroéthylène, Tellure, Titane, Tungstène, Vanadium, Zinc	
<b>ADHESIF / COLLE</b>	
<i>Biosparging, Flushing</i>	
Acétate d'éther monométhylque de l'éthylène glycol / Acétate de 2-méthoxyéthanol / Acétate de 2-méthoxyéthyle, Acétate d'isobutyle / Acétate de 2-méthylpropyle / Ethanoate de 2-méthylpropyle, Acétate de 1-propanol / Acétate de propyle, Acétate de 2-propanol / Acétate d'isopropyle / 1-Méthyléthylester, Acétone / Diméthylcétone / 2-Propanone, Acides carboxyliques, Acide carbolique / Acide phénique / Hydroxybenzène / Phénol, Acide chlorhydrique / Acide hydrochlorique / Acide hydrochlorure / Chlorure d'hydrogène, Acide formique / Acide méthanoïque, Acrylamide / 2-Propénamide, Acrylate d'éthyle / 2-Propénoate d'éthyle, Acrylate de méthyle / 2-Propénoate de méthyle, Alcools, Alcool éthylique / Ethanol, Alcool méthylique / Méthanol, Amines, Aminobenzène / Aminophène / Aniline / Benzénamine / Phénylamine, Azote, Baryum, Benzène / Benzol, Biformal / Diformyle / Ethanedial / Ethane-1,2-dione / Glyoxal / Oxalaldéhyde, 2-Butanone / Méthylacétone / Méthyléthylcétone, Chlore, Chloro-2 butadiène / Chloroprène, Chlorure de méthylène / Dichlorométhane, Cinnamène / Ethénylbenzène / Phényléthylène / Styrene / Styrol / Styrolène / Vinylbenzène, Cyclohexane / Hexahydrobenzène / Hexaméthylène / Naphtène, Diacétone-alcool / Diméthylacétonylcarbinol / 4-Hydroxy-4-méthyl-2-pentanone, 1,1-Dichloroéthane / Chloridène, 1,1-Dichloroéthène / 1,1-Dichloroéthylène / Chlorure de vinylidène, Diéthanolamine / 2,2'-Iminodiéthanol, Diéthylèneglycol / Diglycol / Bis (2-hydroxyéthyl) éther / 2-Hydroxyéthyl éther / 3-Oxapentane-1,5-diol / 2,2-Oxydiéthanol, Diisocyanate de 2,4-toluène, Diisocyanate de 2,6-toluène, Diméthoxyméthane / Formal / Formaldéhyde diméthylacétal / Formal diméthylque / Méthylal, 1,2-Diméthylbenzène / 1,2-Xylène / o-Xylène, Diméthylformamide / N,N-Diméthylformamide / Formyldiméthylamine, Esters, Ethers, Ether éthylique du diéthylène glycol / 2- (2-Ethoxyéthoxy) éthanol / Ethyldiglycol, Fluor, Fluorures, n-Heptane, Hétérocycles, Hexaméthylène tétramine / Hexamine / Méthénamine, n-Hexane, Hydrocarbures, Hydrocarbures aromatiques, Hydrocarbures monocycliques, Hydrocarbures acycliques, Hydrocarbures halogénés aliphatiques, Hydrocarbures halogénés aromatiques, Isophorone / 3,5,5-Triméthyl-2-cyclohexène-1-one, Méthacrylate de méthyle / 2-Méthylméthylester / 2-Méthylpropénoate de méthyle, Méthylbenzène / Toluène, Méthylchloroforme / 1,1,1-Trichloroéthane, Méthylisobutylcétone / 4-Méthyl-2-pentanone, 2-Nitropropane / Diméthylnitrométhane / Nitroisopropane, Oxydes, Oxyde de tétraméthylène / Tétrahydrofuranne, PCB / Polychlorobiphényles, Phénols, Phosphore, Plomb, Soufre, Sulfures, TCE / Trichloroéthène / Trichloroéthylène, Xylène, Zinc	
<b>AERONAUTIQUE</b>	
Acide carbolique / Acide phénique / Hydroxybenzène / Phénol, Aluminium, Azote, Baryum, Béryllium, Calcium, Chrome, Cyanures, Etain, Fluor, Hydrocarbures, Hydrocarbures aromatiques, Hydrocarbures halogénés aliphatiques, Magnésium, Potassium, Sodium, Strontium, Titane, Uranium	
<b>AEROPORT</b>	
Chlorure de calcium, Ethers, Hydrocarbures, Hydrocarbures aromatiques, Hydrocarbures acycliques, Hydrocarbures halogénés aliphatiques, Isopentane / Méthyl-2 butane, Organométalliques, Oxydes	

### **6.3.5.3. Conclusion**

La relation activité / technique de dépollution doit être prise dans sa globalité. En effet, une molécule polluante présente dans le cadre d'une activité industrielle à laquelle est associée une méthode de dépollution X, peut ne pas être dépolluée de manière satisfaisante par cette même technique si elle se retrouvait seule responsable de la pollution.

## **6.3.6. Molécules de polluants / propriétés physico-chimiques / techniques de dépollution**

### **6.3.6.1. Introduction**

Ce tableau recense l'ensemble des molécules chimiques abordées dans cet ouvrage ainsi qu'un grand nombre d'autres. Il liste ces polluants potentiels par ordre alphabétique et non par ordre alphabétique de la molécule mère. Ceci à pour extrême avantage de permettre de retrouver rapidement un polluant, sans question à se poser sur sa nature ou sa racine (chaîne principale). A chaque molécule sont associés les paramètres retenus dans le chapitre sur les caractéristiques des polluants (Solubilité, Kow, Constante de Henry, Biodégradabilité, Poids spécifique) quand ils ont été trouvés, ainsi que le numéro CAS de la nomenclature internationale et bien entendu, les techniques de dépollution envisageables sur ce polluant.

Notons qu'il faut prendre garde à ne pas simplifier à outrance un problème de pollution multiple en croisant les méthodes de dépollution en fonction des polluants trouvés. En effet, certaines méthodes peuvent être incompatibles et il convient là encore de se reporter aux descriptifs de ces techniques de dépollution.

**6.3.6.2. Tableau**

<i>Paramètres physico-chimiques</i> <i>POLLUANT potentiels</i>	Numéro CAS	FORMULE	Liq. Sol. Gaz	Densité	Densité vapeur	log Kow	Solubilité en mg/l à °C	P. de vapeur en mm Hg à °C	Volatilité	Const. Henry (atm·m <sup>3</sup> /mole) à °C	Biodegradation demi-vie (jours)	TECHNIQUES de dépollution envisageables
Acénaphthalène / Acénaphtylène	208-96-8	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>		0,898		3,69	4	0,029		114x10 <sup>-6</sup> - 25 28x10 <sup>-5</sup> 25	0 à 1	
Acénaphène	83-32-9	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>		1,0242		4,00	3,42	10 131		241x10 <sup>-6</sup> - 25 792x10 <sup>-7</sup> 25	0	
Acétal / Acétal diéthylique / 1,1-Diéthoxyéthane	105-57-7	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>		0,8254		1,20						
Acétaldéhyde / Aldéhyde acétique / Ethanal	75-07-0	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	L	0,778	1,52	-0,17	1 000 000 25	334,4 0	x		2	
Acétanilide / n-Phénylacétamide	103-84-4	C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> NO									2	
Acétates		CH <sub>3</sub> COO-										
Acétate d'amyle / Acétate de pentyle	628-63-7	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	L	0,8753	4,5	2,26	1 700 20	9,7 25		3,91 x 10 <sup>-4</sup> 25		BT
Acétate de benzyle / Phénylméthylester	140-11-4	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>		1,055							2	BT
Acétate du 2-(2-butoxyéthoxy)éthanol / Acétate d'éther butylique du diéthylène glycol	124-17-4	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>4</sub>									2	
Acétate de butyle / Butylester / Ethanoate de butyle	123-86-4	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	L	0,8813	4	1,82	6 710 25	12,48 25		3,2 x 10 <sup>-4</sup>		BT
Acétate d'éther monoéthylique du diéthylène glycol / Acétate du 2-(2-éthoxyéthoxy) éthanol	112-15-2	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>4</sub>		1,0096							2	
Acétate d'éther monométhylique de l'éthylène glycol / Acétate de 2-méthoxyéthanol / Acétate de 2-méthoxyéthyle	110-49-6	C <sub>3</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	L	1,0049	4,07		Miscible	2,698 20			2	
Acétate d'éthyle	141-78-6	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	L	0,8946	3,04	0,73	80 000 25	69 19		1,2 x 10 <sup>-4</sup>		
Acétate de 2-éthylhexyle	103-09-3	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>		0,8718								
Acétate d'isoamyle / Acétate de 3-méthylbutyle	123-92-2	C <sub>12</sub> H <sub>16</sub> O <sub>3</sub>	L	0,8664	4,5	2,13	2 000 25	4,5 20		5,87 x 10 <sup>-4</sup> 25		
Acétate d'isobutyle / Acétate de 2-méthylpropyle / Ethanoate de 2-méthylpropyle	110-19-0	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	L	0,872	4	1,60	6 700 20	17,92 25		4,47 x 10 <sup>-4</sup> 25		BT
Acétate de 3-méthoxybutyle	4435-53-4										2	
Acétate de 2-méthylbutanoïque				0,8719								BT
Acétate de méthyle	79-20-9	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	L	0,9273	2,8		245 000 20	205,2 24	x			BT
Acétate de 1-méthylpropyle				0,8745								BT
Acétate de 1-propanol / Acétate de propyle	109-60-4	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	L	0,8883	3,52		Peu soluble	40,508 29				BT

### **6.3.6.3. Conclusion**

Rappelons une fois encore que le choix final de la méthode doit tenir compte du milieu où se localise la pollution. Enfin, il faut prendre garde aux polluants traités qui peuvent être des toxiques, soit intrinsèquement, soit suite au traitement retenu (volatilisation de produit, transformation des polluants...). Là encore, l'expertise est indispensable.

## **6.4. Conclusion**

Cette vaste partie sur le choix des techniques de dépollution ne doit pas faire perdre de vue que la dépollution reste une affaire de spécialistes. Des investigations précises et méthodiques doivent être menées avec sérieux avant de pouvoir mettre en place de manière optimale une méthode de dépollution. Remarquons qu'il est possible de combiner certaines méthodes entre elles en fonction des pollutions à traiter mais que cela reste assez exceptionnel. Enfin, ce n'est pas parce qu'une technique de dépollution a été listée comme envisageable qu'automatiquement elle sera applicable dans tous les cas de figure. En effet, certaines conditions du milieu peuvent limiter et parfois empêcher la méthode de fonctionner correctement et/ou à des coûts raisonnables.

## 7. PRESENTATION DES DIFFERENTES METHODES DE DEPOLLUTION

### 7.1. Introduction

Ce dernier chapitre est fondamental. Il faut en effet comprendre le principe et les contraintes de mise en application des différentes techniques de dépollution abordées si l'on veut pour pouvoir choisir judicieusement celle qui sera effectivement applicable au cas particulier étudié. Comme nous l'avons déjà répété, ce n'est pas parce qu'une méthode de dépollution est applicable sur une pollution particulière que cette technique va fonctionner de manière optimale dans les conditions de milieu qui vous sont propres. Précisons que l'on entend par *in situ* que le procédé se passe dans le sol pollué en place et par *ex situ* qu'il se déroule hors sol (soit sur le site : *on site*, soit hors du site).

### 7.2. Présentation des principes de fonctionnement des techniques de dépollution

#### 7.2.1. Introduction

Cette partie a pour but d'expliquer le principe de fonctionnement sur lequel repose une technique de dépollution. Elle permet de comprendre ce qui a justifié le choix de cette technique pour la dépollution de tel polluant. De plus, il est rappelé en face de chacune des méthodes, les familles de polluants qui peuvent éventuellement être traitées par cette technique. Bien entendu, l'information donnée n'a pas de valeur absolue, chaque cas méritant d'être approfondi. Enfin, une illustration très schématique est fournie quand cela est possible afin de faciliter la compréhension du principe de la technique.

#### 7.2.2. Atténuation naturelle

##### 7.2.2.1. Principe de l'atténuation naturelle

Il arrive que la masse totale et/ou la concentration de contaminants dans les sols et les eaux souterraines décroisse avec le temps et avec l'éloignement à la source et ce sans intervention de l'homme. Ce phénomène est appelé « atténuation naturelle ».

Les mécanismes à l'origine de l'atténuation naturelle sont nombreux :

- volatilisation,
- dégradation abiotique au contact des matériaux du sol ou de l'eau (ex. : hydrolyse),
- biodégradation par les micro-organismes indigènes de la zone saturée et insaturée,
- advection,
- dispersion,
- dilution par les eaux de recharge,
- diffusion gazeuse et aqueuse,
- convection,
- sorption.

Parmi cette liste, les deux types de dégradations (biologique et abiotique) sont les seuls mécanismes entraînant l'altération du contaminant. Les autres mécanismes consistent en un transfert de phase ou un transport du contaminant au sein d'une phase.

##### 7.2.2.2. Polluants potentiellement traitables par atténuation naturelle

L'atténuation naturelle concerne aussi bien le sol solide que la nappe phréatique.

Tous les polluants sont potentiellement traitables par cette méthode, cependant il convient de se reporter au tableau des paramètres physico-chimiques des molécules afin de savoir si, compte tenu des

conditions environnementales du problème, l'atténuation naturelle est réellement une méthode de dépollution réaliste (critères socio-économiques).

### **7.2.3. Illustration de la technique d'atténuation naturelle**

Compte tenu de la grande diversité des processus mis en œuvre dans l'atténuation naturelle, il est pratiquement impossible de concevoir un schéma simple et synthétique pour cette technique. Nous n'en proposons donc pas.

#### 7.2.3. Barrières réactives

##### **7.2.3.1. Principe des barrières réactives**

Ce procédé consiste à utiliser des réactifs afin de réduire les contaminants. Ce principe fait donc partie des réactions d'oxydoréduction.

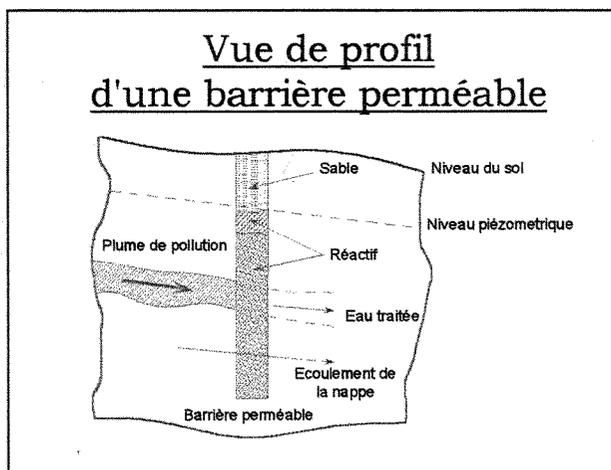
Afin de constituer la barrière réactive, de la limaille de fer est mélangée à des matériaux inertes, le tout venant remplir une tranchée à une profondeur permettant à l'eau de la nappe phréatique de traverser le mur souterrain ainsi construit. Au cours du séjour au sein de la barrière, les contaminants dissous dans l'eau de la nappe entrent en contact avec la barrière réactive et sont réduits.

##### **7.2.3.2. Polluants potentiellement traitables par les barrières réactives**

Les barrières réactives sont utilisées pour traiter les nappes phréatiques polluées.

Les polluants concernés sont les composés solubles et principalement les composés chlorés, mais aussi certains métaux (As, U, Cr).

##### **7.2.3.3. Illustration de la technique des barrières réactives**



#### 7.2.4. Biolixiviation

##### **7.2.4.1. Principe de la biolixiviation**

Cette technique consiste à induire des conditions anaérobies dans le sol permettant aux micro-organismes indigènes de favoriser la solubilisation et la mobilisation des métaux lourds. Ces métaux peuvent alors être récupérés dans les lixiviats (en surface pour les biotertres, par pompage pour la biolixiviation in situ).

#### **7.2.4.2. Polluants potentiellement traitables par biolixiviation**

Cette technique permet le traitement des sols pollués (phase solide). Sont concernés les polluants de type métaux lourds.

#### **7.2.4.3. Illustration de la technique de biolixiviation**

Compte tenu du principe de la technique, la conception d'un schéma est sans intérêt.

### 7.2.5. Biosparging

#### **7.2.5.1. Principe du biosparging**

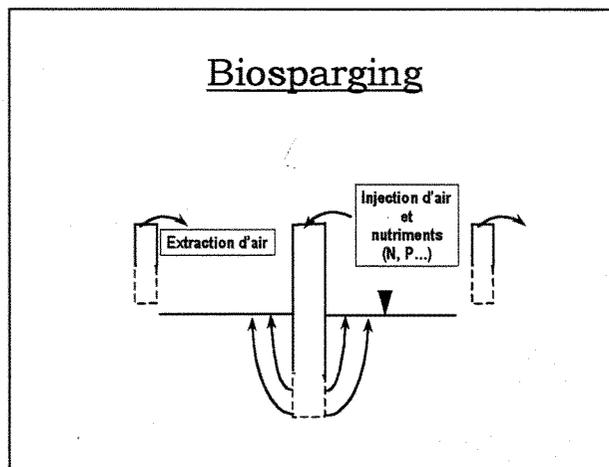
Le Biosparging est un procédé in-situ permettant de traiter localement la zone saturée (dissoute, adsorbée). Cette technique consiste à injecter de l'air dans la formation par des puits verticaux ou horizontaux. Cette injection a lieu en dessous du niveau de la nappe d'eau souterraine à traiter. Ensuite, l'air se propage à travers la zone saturée en créant des canaux d'air. En parallèle, la dissolution de l'oxygène de l'air dans la phase aqueuse permet d'augmenter la biodégradation aérobie de certains contaminants.

#### **7.2.5.2. Polluants potentiellement traitables par biosparging**

Le biosparging permet de traiter la nappe phréatique polluée.

Comme le nom de la technique l'indique, les polluants potentiellement traitables par Biosparging doivent être biodégradables.

#### **7.2.5.3. Illustration de la technique du biosparging**



### 7.2.6. Bioterre

#### **7.2.6.1. Principe du bioterre**

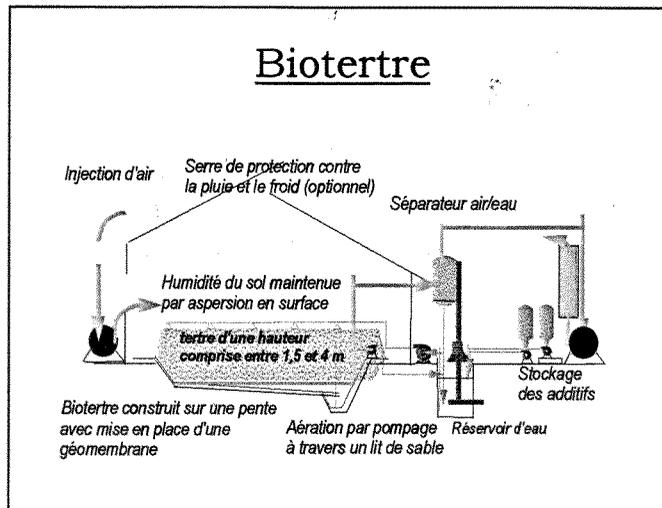
Le procédé dit « Bioterre » consiste en une biostimulation et une bioaugmentation micro-organismes. En favorisant ainsi l'activité et le développement des micro-organismes indigènes et non indigènes, on améliore la biodégradation (la plus fréquemment aérobie) des polluants. Ainsi, l'apport de nutriments, eau, chaleur, oxygène stimule la croissance des micro-organismes et l'apport de nouvelle souche.

### 7.2.6.2. Polluants potentiellement traitables par biotertre

La technique du biotertre permet de traiter la phase solide du sol.

Les produits biodégradables sont concernés par cette méthode puisque c'est l'action des micro-organismes qui permet la dépollution.

### 7.2.6.3. Illustration de la technique du biotertre



### 7.2.7. Bioventing

#### 7.2.7.1. Principe du bioventing

Le Bioventing est un procédé in situ permettant d'aérer la zone insaturée afin que les micro-organismes du sol puissent mieux respirer et dégrader les polluants. Cette technique consiste à mettre en dépression la zone insaturée et à induire des circulations d'air centrées sur et en direction de chaque point d'extraction.

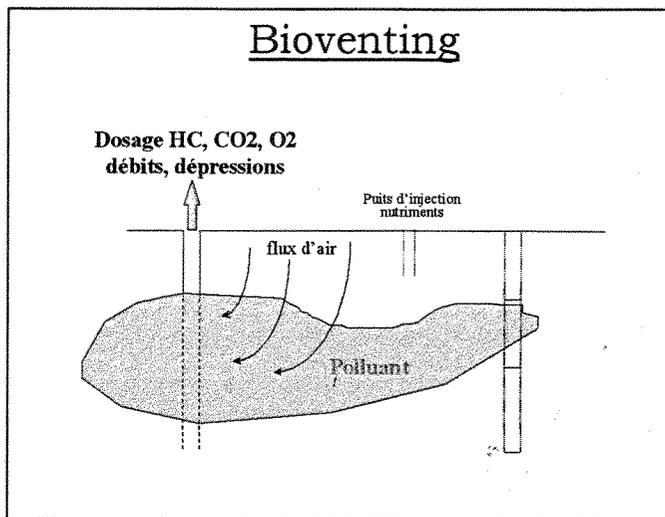
La circulation d'air engendrée par le système de Bioventing assure l'apport d'oxygène gazeux aux micro-organismes indigènes présents dans la zone contaminée. Ainsi, le Bioventing permet d'encourager la biodégradation aérobie de certains contaminants. Remarquons que lorsque la biodégradation joue un rôle plus important que la volatilisation dans le traitement de la zone contaminée, le système est décrit sous le nom de Bioventing, sinon il est décrit sous le nom de Venting.

#### 7.2.7.2. Polluants potentiellement traitables par bioventing

Le bioventing permet de traiter la phase insaturée du sol.

Les produits biodégradables (de manière aérobie), semi-volatils sont traitables par cette méthode biologique.

#### 7.2.7.3. Illustration de la technique de bioventing



## 7.2.8. Excavation / Mise en décharge

### 7.2.8.1. Principe de l'excavation / mise en décharge

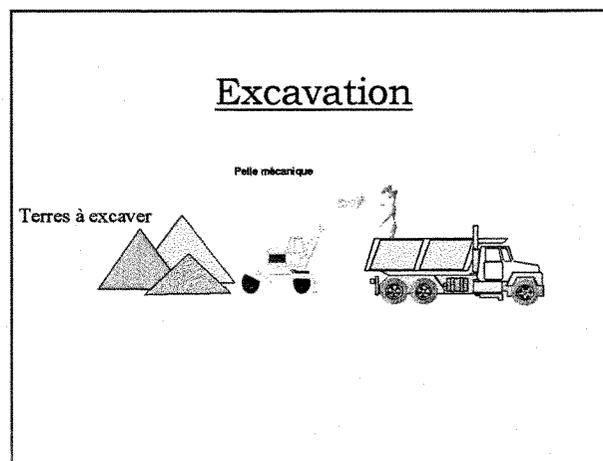
Le procédé d'excavation désigne stricto sensu l'enlèvement de sols contaminés sur une zone préalablement définie grâce à des investigations, prélèvements de sol. Néanmoins, on peut inclure un certain nombre d'étapes ultérieures dont le tri sur site des sols excavés, le stockage en C.E.T. (Centre d'Enfouissement Technique) des sols excédant une certaine concentration et le remblais de la fouille. La présence de bâtiments, l'exiguïté des lieux ou d'autres paramètres indépendants des analyses de sols peuvent gêner l'excavation et restreindre la zone possiblement excavable.

### 7.2.8.2. Polluants potentiellement traitables par excavation / mise en décharge

Cette méthode au large spectre permet de traiter la phase solide du sol.

Tous les polluants du sol peuvent être traité de la sorte puisque la méthode repose sur le déplacement de la pollution.

### 7.2.8.3. Illustration de la technique d'excavation / mise en décharge



## 7.2.9. Flushing ou lavage in situ

### 7.2.9.1. Principe du flushing ou lavage in situ

Le lavage in situ ou Flushing utilise un mouvement de fluide qui est engendré à travers la zone contaminée. Lors du passage, le fluide se charge en contaminant.

Une fois chargée, la solution est extraite, traitée et peut, dans certains cas, être réinjectée.

Les additifs ajoutés à l'eau injectée ont pour but d'augmenter la mobilité des contaminants que le système doit récupérer afin d'obtenir un rendement d'extraction supérieur. Ils agissent sur les points suivants :

- amélioration de la solubilisation des contaminants dans l'eau,
- formation d'une émulsion eau/contaminant,
- production d'une réaction chimique avec les contaminants.

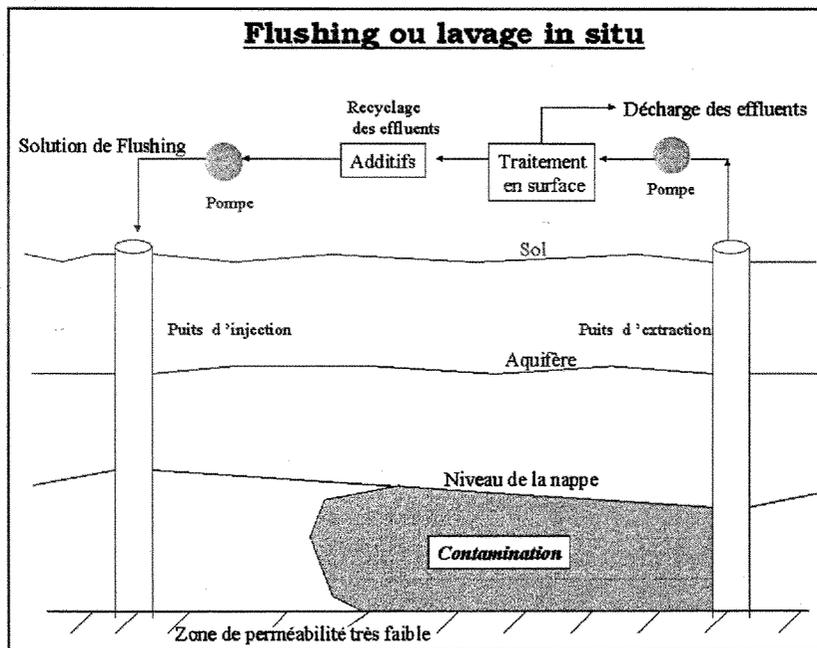
Ces agents mobilisateurs peuvent être des tensioactifs, des solvants, des co-solvants, des acides, des bases, des oxydants ou des chélateurs.

### 7.2.9.2. Polluants potentiellement traitables par flushing ou lavage in situ

Le lavage in situ permet de dépolluer la zone insaturée du sol.

Les polluants solubles peuvent être traités par Flushing ou lavage in situ.

### 7.2.9.3. Illustration du flushing ou lavage in situ



## 7.2.10. Incinération

### 7.2.10.1. Principe de l'incinération

En élevant fortement la température du sol pollué, les polluants sont convertis en dioxyde de carbone et vapeur d'eau, ainsi qu'en différents résidus de combustion.

La transformation des polluants en molécules inoffensives simples permet de classer cette méthode parmi les plus efficaces. Les cendres obtenues après incinération sont conduites en centre d'enfouissement technique.

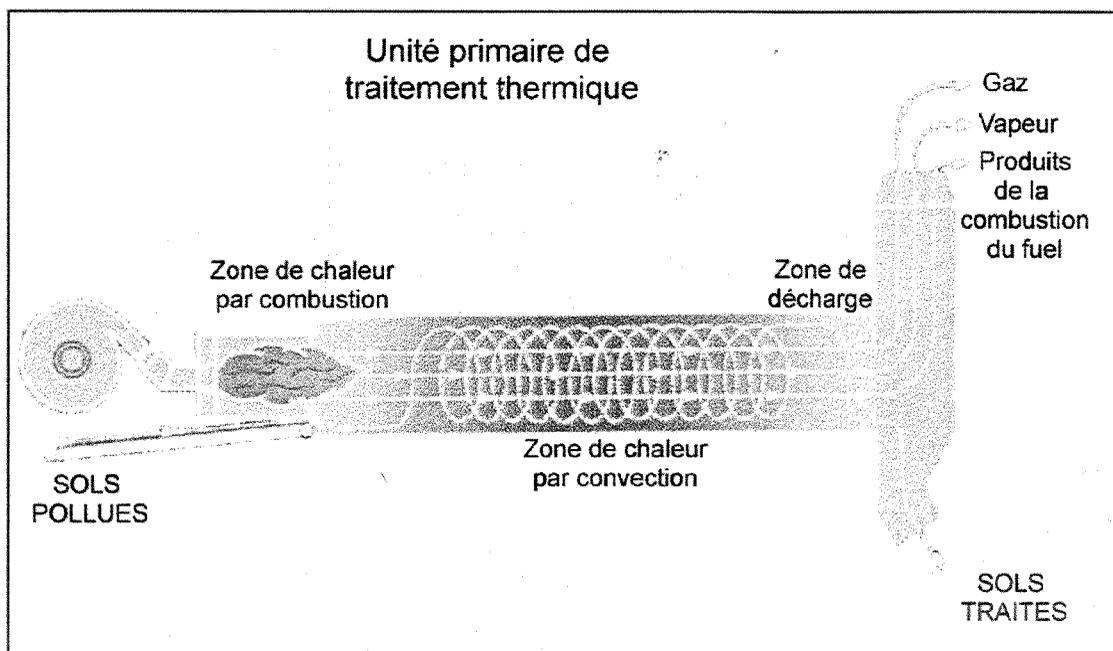
### 7.2.10.2. Polluants potentiellement traitables par incinération

La partie solide du sol peut être incinérée.

Tous les polluants exceptés les radioéléments sont potentiellement traitables par cette technique.  
Le problème va ensuite résider dans les coûts de mise en œuvre...

### 7.2.10.3. Illustration de la technique d'incinération

#### Incineration



### 7.2.11. Neutralisation

## PARTIE A CONTROLER

### 7.2.11.1. Principe de la neutralisation

La technique consiste à annuler chimiquement les caractéristiques physico-chimiques du polluant. Ainsi, par exemple, une pollution par un acide peut être stoppée par la mise en contact de manière adéquate d'une base en proportions judicieuses.

### 7.2.11.2. Polluants potentiellement traitables par neutralisation

Cette technique peut s'appliquer aussi bien à la partie liquide que solide du sol. Les polluants chimiques type acides et bases peuvent éventuellement être neutralisés par cette méthode chimique.

### 7.2.11.3. Illustration de la technique de neutralisation

### 7.2.12. Phytoremédiation

### 7.2.12.1.Principe de la phytoremédiation

La phytoremédiation regroupe toutes les technologies utilisant les plantes pour transformer, dégrader, concentrer, stabiliser ou volatiliser des polluants. Il s'agit d'une méthode de dépollution scientifiquement complexe qui ne se réduit pas à l'ensemencement de graines. Les technologies existantes ou en cours de commercialisation comprennent :

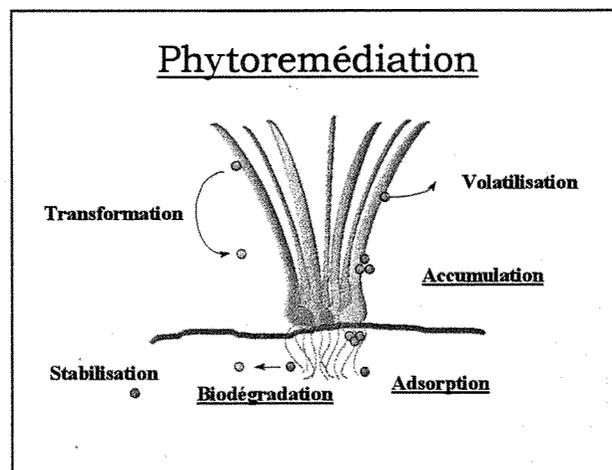
- **Phytoextraction** : utilisation de plantes accumulatrices pour extraire, transporter, concentrer les polluants du sol dans les parties récoltables de la plante. Pour que cette technique soit efficace, il faut que le polluant soit disponible pour les racines et que celles-ci puissent le tolérer et l'absorber.
- **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.
- **Rhizofiltration** : utilisation des racines pour absorber, concentrer ou précipiter les polluants d'un effluent liquide.
- **Activité dégradatrice de la rhizosphère** : utilisation de plantes pour stimuler les micro-organismes de la rhizosphère. La rhizosphère est caractérisée par une population microbienne plus nombreuse, plus diversifiée et par conséquent par une activité biodégradatrice plus élevée. En effet, les interactions entre plantes et micro-organismes sont nombreuses, complexes et certaines peuvent créer des synergies facilitant la transformation des composés organiques.
- **Phytovolatilisation** : stimulation de la volatilisation par l'intermédiaire des plantes qui vont absorber puis éliminer par transpiration les polluants.
- **Phytodégradation** : métabolisme du polluant dans la plante au niveau des racines ou des parties aériennes. En effet, les plantes contiennent de nombreuses enzymes responsables de réactions biochimiques variables capables de transformer les composés organiques.

### 7.2.12.2.Polluants potentiellement traitables par phytoremédiation

Cette technique de dépollution s'applique essentiellement à la partie solide du sol, et particulièrement au premier mètre du sol.

La Phytoremédiation concerne principalement les métaux lourds et les hydrocarbures.

### 7.2.12.3.Illustration de la technique de phytoremédiation



### 7.2.13. Pump and Treat

#### 7.2.13.1.Principe du Pump and Treat

Le pump and treat est un procédé in situ (pour la partie pompage) et ex situ (pour la partie traitement). Cette technique permet d'extraire, en solution dans l'eau, des substances polluantes (organiques ou minérales) se trouvant dans la zone saturée sous forme dissoute, pure, adsorbée ou

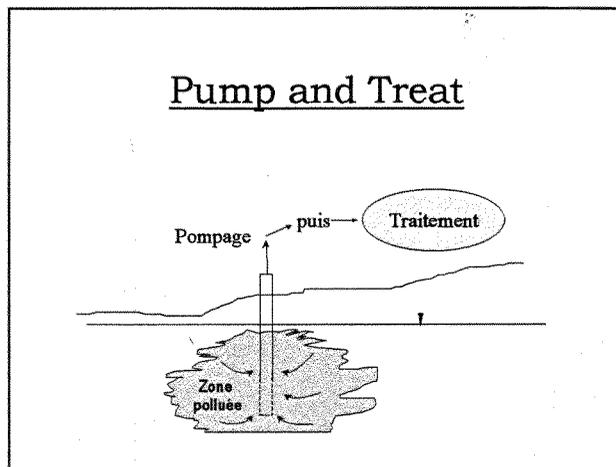
gazeuse. Cette technique consiste à induire des circulations d'eau radiales centrées sur et en direction de chaque point d'extraction.

### **7.2.13.2. Polluants potentiellement traitables par Pump and Treat**

Le pump and treat s'applique au traitement de la nappe phréatique.

Les polluants concernés sont les produits chimiques de densité inférieure à 1 ou supérieure à 1 si ils sont insolubles dans l'eau.

### **7.2.13.3. Illustration de la technique de Pump and Treat**



### **7.2.14. Slurping ou Extraction triple phase<sup>®</sup>**

#### **7.2.14.1. Principe du slurping ou extraction triple phase<sup>®</sup>**

Le slurping est un procédé in situ permettant de récupérer les contaminants organiques, de densité inférieure à 1 (donc flottants), sous les formes suivantes :

- sous forme libre flottant au dessus de la frange capillaire aqueuse,
- sous forme dissoute dans la zone saturée,
- sous forme gazeuse dans la zone insaturée.

La capacité de ce procédé à extraire trois phases a permis le développement du procédé breveté et d'une marque déposée : *l'extraction triple phase<sup>®</sup>*.

Le système de slurping se compose d'un puits de rabattement (ou aiguille d'extraction) et d'un tube rigide (ou canne) placé à l'intérieur de l'aiguille. L'ouverture supérieure de la canne est connectée à un extracteur afin d'y appliquer une dépression.

Dans un premier temps, le débit appliqué dans la canne permet d'instaurer le cône de rabattement indispensable à la récupération des produits purs.

Une fois le rabattement stabilisé au niveau de l'ouverture de la canne, cette dernière extrait alternativement un mélange [eau/produit pur] (lorsque l'ouverture est juste en dessous du niveau d'eau) ou de l'air (lorsque l'ouverture est juste au dessus du niveau d'eau).

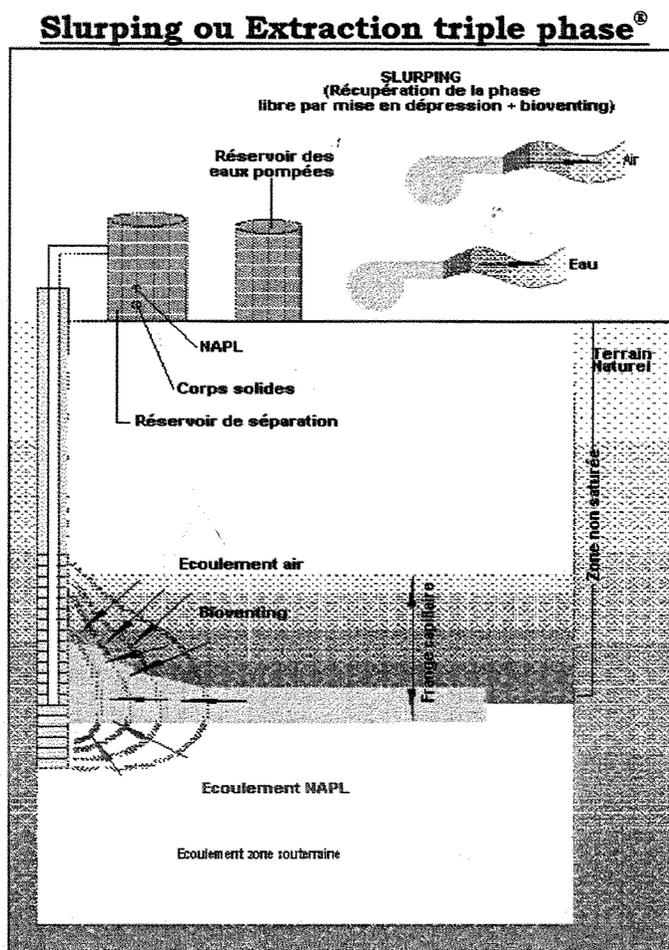
Par principe, ce procédé associe donc plusieurs techniques : le rabattement-écrémage, l'extraction des phases et le (bio)venting.

#### **7.2.14.2. Polluants potentiellement traitables par slurping ou extraction triple phase<sup>®</sup>**

Comme son nom l'indique, le traitement aborde les trois phases du sol.

La technique de l'*extraction triple phase*<sup>®</sup> permet de traiter des polluants organiques flottants et dissous. Cette technique offre le gros avantage de traiter aussi bien les gaz, flottants et solubilisés dans la nappe.

### 7.2.14.3. Illustration de la technique de slurping ou extraction triple phase<sup>®</sup>



## 7.2.15. Solidification, confinement

### 7.2.15.1. Principe de la technique de solidification, confinement

Les méthodes de solidification sont des techniques d'inertage: la solidification consiste à agir sur la matrice contaminée dans son ensemble. Les caractéristiques physiques de la zone polluée sont ainsi modifiées afin de réduire l'accès physique des fluides du sol au contaminant. Il s'agit majoritairement de réductions de perméabilité. La vitrification correspond par exemple à une solidification thermique.

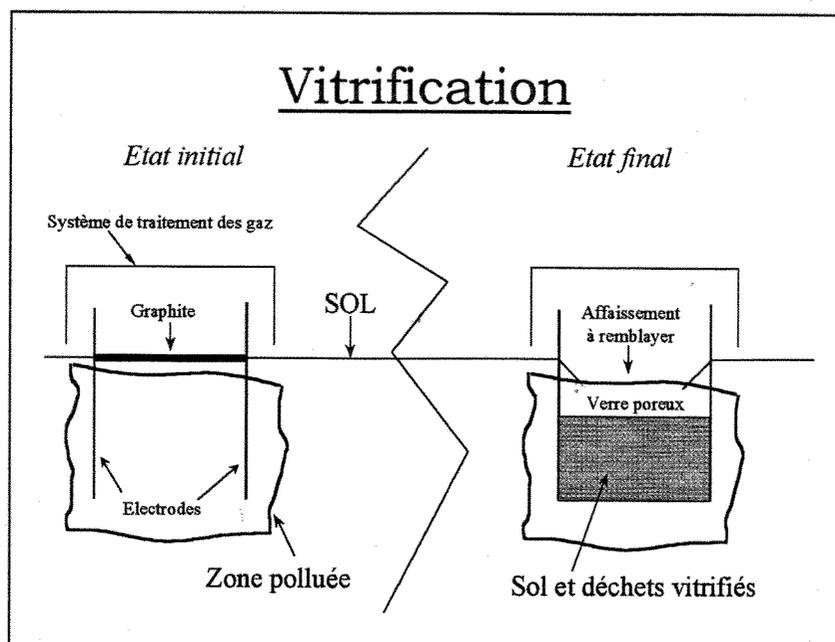
### 7.2.15.2. Polluants potentiellement traitables par solidification, confinement

La solidification/confinement permet de traiter la phase solide du sol.

La plupart des polluants peuvent être traités par cette technique. Le choix de la méthode de solidification/confinement va par contre varier avec le polluant, l'environnement et les coûts de mise en œuvre.

### 7.2.15.3. Illustration de la technique de solidification, confinement

Exemple de la vitrification in situ :



## 7.2.16. Sparging

### 7.2.16.1. Principe du sparging

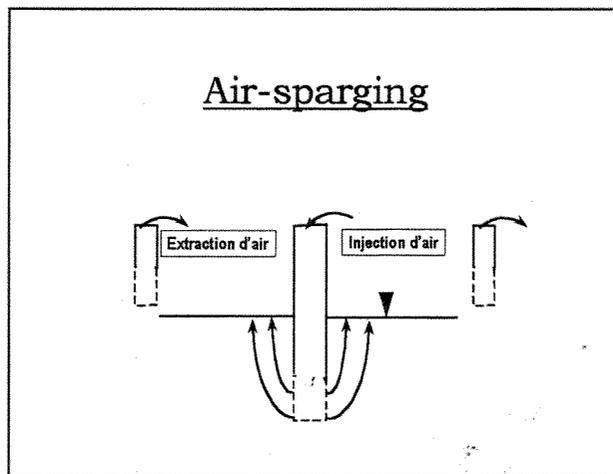
L'air sparging est un procédé in situ permettant de traiter localement la zone saturée (dissoute, adsorbée). Cette technique consiste à injecter de l'air dans la formation par des puits verticaux ou horizontaux. Cette injection a lieu en dessous du niveau de la nappe d'eau souterraine à traiter. Ensuite, l'air se propage à travers la zone saturée en créant des canaux d'air. En instaurant cette interface air/phases du sol (air/eau, air/sol, air/produit), l'air sparging favorise la volatilisation des substances chimiques volatilisables présentes dans la zone saturée, ainsi que celles présentes à l'état pur au dessus de la frange capillaire aqueuse.

L'air sparging est souvent couplé à un réseau de récupération des vapeurs installé dans la zone insaturée. Les vapeurs peuvent ensuite être traitées en surface (cf. venting).

### 7.2.16.2. Polluants potentiellement traitables par sparging

Le sparging permet de traiter les pollution de la nappe.  
La technique permet de traiter les polluants volatils.

### 7.2.16.3. Illustration de la technique de sparging



## 7.2.17. Venting

### 7.2.17.1.Principe du venting

Le venting est un procédé in situ permettant d'extraire les composés organiques volatils de la zone insaturée (phase pure, adsorbée, gazeuse et dissoute dans l'eau interstitielle). Cette technique consiste à mettre en dépression la zone insaturée et à induire des circulations d'air centrées sur et en direction de chaque point d'extraction.

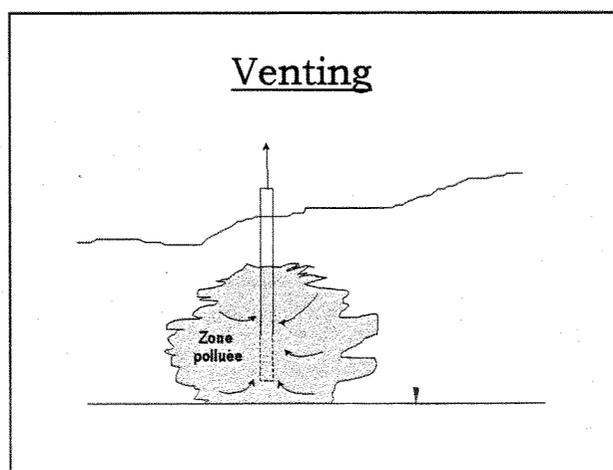
Le renouvellement de l'air dans les pores du sol a pour conséquence la modification des équilibres chimiques entre les différentes phases présentes. Ainsi, au cours de son passage à travers la zone contaminée, l'air se charge en contaminants. Ces vapeurs sont récupérées dans les points d'extraction sous vide et éventuellement traitées en surface. Ces composés peuvent alors être détruits (brûleur, oxydation catalytique) ou transférés sur un autre milieu (condenseur ou charbon actif).

### 7.2.17.2.Polluants potentiellement traitables par venting

Le venting permet de traiter les pollutions hors nappe.

Les produits volatils (solvants chlorés, essences, BTEX...) peuvent efficacement être traités par cette technique de dépollution.

### 7.2.17.3.Illustration du venting



## 7.2.18. Venting thermique

### 7.2.18.1.Principe du venting thermique

Le venting thermique consiste à chauffer les terres contaminées tout en extrayant l'air du sol. Le chauffage a deux buts :

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

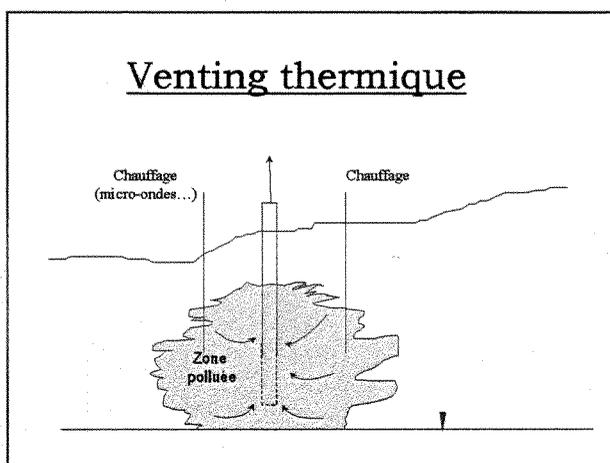
Le venting thermique est toujours accompagné d'une récupération de vapeurs émises durant le procédé. Ces vapeurs subissent une série de traitements après extraction et les composés contenus peuvent être soit détruits (brûleur, oxydation catalytique), soit transférés sur un autre milieu (condenseur ou charbon actif).

### 7.2.18.2.Polluants potentiellement traitables par venting thermique

Le venting thermique traite lui aussi les pollution hors nappe.

Comme dans le cas du venting, les polluants traités sont volatils mais en l'occurrence, ils peuvent l'être moins que dans le venting classique.

### 7.2.18.3.Illustration du venting thermique



### 7.2.19. Conclusion

Le panorama dressé ici ne reprend pas l'ensemble des techniques existant dans le cadre d'une dépollution, ce n'était en effet pas l'objet de l'ouvrage. Il dresse simplement un bilan des principales techniques intéressantes. Si les principes sur lesquels reposent la plupart des techniques sont relativement proches, c'est la mise en application et les polluants traitables en fonction des conditions du milieu qui vont orienter le choix sur telle ou telle technique. Remarquons aussi que ces techniques diffèrent suivant qu'elles reposent sur des principes Biologiques (Atténuation naturelle, Biolixiviation, Biosparging, Bioterre, Bioventing, Phytoremédiation), Chimiques (Barrières réactives, Flushing, Neutralisation) ou Physiques (Excavation/mise en décharge, Incinération, Pump and treat, Slurping ou extraction triple phase® Solidification/confinement, Sparging, Venting, Venting thermique).

## 7.3. Techniques de dépollution et polluants traitables par chaque technique

### 7.3.1. Introduction

La présentation par tableau des familles de polluants et techniques associées permet au lecteur de comparer les techniques entre elles. Ce tableau est prospectif pour une part (efficacité potentielle d'une technique sur une pollution) et concret pour une autre (efficacité démontrée). Il vient en appui de tout ce qui a été écrit préalablement.

Le deuxième tableau présente les conditions environnementales optimales pour chaque technique de dépollution.

Le troisième tableau présente les conditions à remplir par le polluant (solubilité, Kow, tension de vapeur, constante de Henry, biodégradabilité, poids spécifique) pour que chaque technique puisse être optimale.

Attention: les informations données dans ces deux derniers tableaux sont indicatives. Toutes les conditions énoncées n'ont pas à être remplies pour satisfaire au bon fonctionnement d'une technique de dépollution. Chaque paramètre a une importance qui est directement liée aux caractéristiques de la pollution (profondeur, concentration, type de sol, ...).

Le dernier tableau récapitule pour chaque technique la zone d'application du traitement, le type de polluant concerné, l'état de la technique (commercialisée, en recherche et développement avec premiers essais prometteurs), l'efficacité de la technique pour ces polluants, l'approximation du coût, les contraintes (ou limites) et particularités de la technique.

### 7.3.2. Mise en garde

Nous avons abordé la pollution en tenant présent les paramètres physico-chimiques des polluants nécessaire au choix d'une technique de dépollution. Nous avons aussi présenté les paramètres environnementaux dont il faut tenir compte pour ce choix. Enfin nous allons présenter les techniques de dépollution elles-mêmes et les facteurs qui les conditionnent. Il reste un point que nous avons simplement effleuré au cours de l'ouvrage tend il est particulier et d'importance très variable sur le choix de la techniques de dépollution. Il s'agit des problèmes de nappe phréatique. Ce problème est abordé pour une grande part dans la description des techniques et des paramètres les régissant. Notons que les caractéristiques à prendre en compte pour la zone saturée sont :

- sa profondeur,
- sa zone de battement,
- son débit et son sens d'écoulement.

Plus précisément, il est important de savoir si la pollution touche la nappe (et si oui, si la pollution est superficielle ou non...) ou simplement la zone instaurée.

**A.T.E. réalise des audits de site  
pour le compte de nombreux  
industriels.**

### 7.3.3. Tableau Techniques / Familles de polluants traitables

Ce tableau présente les familles de polluants les plus fréquentes, et envisage pour chacune toutes les techniques de dépollution présentées dans la partie précédente.

Familles de polluants	ORGANIQUES								INORGANIQUES				REACTIFS	
	Volatils halogénés	Volatils non halogénés	Semi volatils halogénés	Semi volatils non halogénés	PCB(s)	Pesticides	Dioxines	Cyanures organiques	Métaux volatils	Métaux non volatils	Matériaux radioactifs	Cyanures inorganiques	Oxydants	Réducteurs
Atténuation Naturelle														
Barrière Réactive	ED	EP	ED	EP										
Biolithiviation														
Biosparging														
Biotertre														
Bioventing	ENP	ED	EP (4)	ED	ENP	ENP	ENP	ENP	ENP	ENP	ENP	ENP	ENP	EP
Excavation/Mise en décharge														
Flushing														
Incinération														
Neutralisation														
Phytoremédiation														
Pump And Treat														
Slurping (Extraction Triple Phase®)														
Solidification, Confinement	X (1)	X (1)	EP (2)	EP (2)	EP	EP	EP	EP	ED EP (3)	ED	ED	ED	EP	EP
Sparging														
Venting														
Venting Thermique														

ED : Efficacité démontrée.

EP : Efficacité potentielle.

ENP : Efficacité non possible : aucun mécanisme de base indiquant que la technique peut fonctionner.

X : Effets secondaires possibles.

(1) : Vaporisation et émission de composés organiques volatils.

(2) : Les organiques semi-volatils sont difficiles à traiter, mais certains composés à faible concentration peuvent cependant être traités.

(3) : Le mercure et l'arsenic sont très difficiles à immobiliser avec les mélanges à base de ciment.

(4) : Possible à traiter par cométabolisme.

#### 7.3.4. Tableau des paramètres optimaux de l'environnement pour une efficacité maximum des techniques de dépollution

Le tableau indique la valeur idéale que devrait avoir chacun des paramètres environnementaux retenus (Texture, Structure, Humidité (CAC), pH, Rédox, Température) pour permettre un fonctionnement optimal des techniques de dépollution. Les nutriments ne sont pas envisagés car leur présence est un paramètre très particulier qui se juge au cas par cas.

Les cellules vierges du tableau indiquent que les paramètres n'ont pas, dans ces cas, d'importance majeure.

NOM DE LA TECHNIQUE	Zone d'application	Texture	Structure	CAC (en %)	pH	Rédox (mV)	T°C
Atténuation naturelle	saturée et insaturée	Perméable	Simple	50 à 80	7	*	35
Barrière réactive	saturée					< -100	→
Biolixiviation	insaturée	Perméable			< 6		→
Biosparging	saturée	Perméable	Simple		7	800	35
Bioterre	insaturée				7	*	35
Bioventing	insaturée	Perméable	Simple	50 à 80	7	800	35
Excavation/Mise en décharge	insaturée						
Flushing	insaturée	Perméable	Simple		< 7		→
Incinération	insaturée			< 50			
Neutralisation	saturée et insaturée	Perméable					
Phytoremédiation	insaturée			50	< 7	800	35
Pump and Treat	saturée	Perméable	Simple				
Slurping (extraction triple phase®)	saturée et insaturée	Perméable					
Solidification, confinement	insaturée		Simple				
Sparging	saturée	Perméable	Simple				→
Venting	insaturée	Perméable	Simple	< 50			→
Venting thermique	insaturée	Perméable		< 50			→

\* : les conditions doivent varier de +800 mV (aérobies : traitement des BTEX...) à -300 mV (anaérobies : traitement des solvants chlorés...)

### 7.3.5. Tableau des paramètres optimaux des polluants pour une efficacité maximum des techniques de dépollution

Ce tableau présente, sans tenir compte des caractéristiques du milieu, les conditions d'application des techniques de dépollution en fonction des paramètres physico-chimiques des contaminants. Il est cependant extrêmement difficile de généraliser ces paramètres. En effet, suivant le milieu environnement, les paramètres physico-chimiques peuvent avoir une importance tout à fait relative. De même, il arrive que dans des conditions particulières de pollution les valeurs reportées dans le tableau soient fausses. Une fois de plus, seule l'expertise peut lever l'ambiguïté. Rappelons que la dépollution est une science très pointue qui n'a pas force de loi. Chaque cas est particulier et la généralisation est ardue, voire parfois impossible.

NOM DE LA TECHNIQUE	Zone d'application	Solubilité	Kow	Tension Vapeur	Const. Henry	Biodégradab.	Poids spécifique
Atténuation naturelle	saturée et insaturée		FORT				
Barrière réactive	saturée	FORTE					
Biolixiviation	insaturée	FORTE					
Biosparging	saturée					FORTE	
Bioterre	insaturée		FAIBLE	FORTE		FORTE	
Bioventing	insaturée		FAIBLE	FORTE	FORTE	FORTE	
Excavation/Mise en décharge	insaturée						
Flushing	insaturée	FORTE	FAIBLE				
Incinération	insaturée						
Neutralisation	saturée et insaturée						
Phytoremédiation	insaturée	FORTE					
Pump and Treat	saturée	FORTE					
Slurping (extraction triple phase®)	saturée et insaturée	FAIBLE	FAIBLE				FAIBLE
Solidification, confinement	insaturée						
Sparging	saturée			FORTE	FORTE		
Venting	insaturée			FORTE	FORTE		
Venting thermique	insaturée			FORTE	FORTE		

7.3.6. Tableau récapitulatif des caractéristiques des techniques de dépollution

Ce tableau reprend une partie des informations précédentes (type de traitement : in situ, ex situ..., type de polluants) et présente les caractéristiques des techniques en terme d'efficacité, de coût, de restriction d'utilisation, d'état de développement (commercialisée, recherche et développement avec premiers essais prometteurs). Là encore, il faut relativiser les informations communiquées. Un taux d'efficacité de 99% signifie que la technique fonctionne très bien sur les polluants décrits (ici 99% de la pollution est retirée) mais cela ne signifie pas que ce taux sera toujours atteint, ni même qu'il soit intéressant de prolonger la méthode jusqu'à obtention de tels résultats.

TECHNIQUES	Type de traitement	Type de polluant	Etat de la technique	Efficacité	Coût en F/T HT	Limitations, particularités
Atténuation naturelle	In situ Zone saturée et insaturée	Tout	Concept en développement	variable	< 10	Aspects réglementaires, Attention à son utilisation et au détournement de son sens premier
Barrière réactive	In situ Zone saturée	Organiques chlorés et Certains métaux (As, U, Cr)	Développement avancé et commercialisation	99%	< 100	Profondeur, Techniques en barrières, Pas de maintenance, Durée de vie >100 ans
Biolixiviation	In situ Zone insaturée	Métaux lourds	Commercialisé		Faible	Perméabilité du sol
Biosparging	In situ Zone saturée	Produits biodégradables	Commercialisé	99%	50 à 250	Nutriments en concentration insuffisante
Bioterre	On site, Zone insaturée	Produits biodégradables	Commercialisé	99%	400 à 600	Bioaccessibilité
Bioventing	In situ Zone insaturée	Produits biodégradables et semi volatils	Commercialisé	80 à 90%	60 à 280	Perméabilité du sol
Excavation / Mise en décharge	Ex situ Zone insaturée	Tout	Commercialisé	99%	20 à 50 (excavation seule)	Gros volumes et Coût
Flushing	In situ Zone insaturée	Tous polluants organiques	Commercialisé	50 à 80%	100 à 1000	Suppose un traitement des eaux extraites, Biodégradabilité des agents extractants, Attention à la nappe, Difficile en terrain argileux Formation des agents extractants, Peut traiter sous des bâtiments
Incinération	Ex situ Zone insaturée	Tout sauf radioéléments	Opérationnelle et prouvée en Europe :50% du marché. Hollande : peu utilisée	> 90%	Elevé, toujours >1000 jusqu'à 10 000	Pratiquement aucun contrôle des rejets Suppose l'excavation et le transport des sols réduits en cendres puis envoyés en CET
Neutralisation	In situ (ou on site) Zone saturée et insaturée					
Phytoremédiation	In situ Zone insaturée	Organiques Métaux lourds HAP, hydrocarbures	Opérationnelle +pilote + R&D	30 à 90%	100 à 1000	Profondeur Durée de traitement très longue pour les métaux. Les végétaux doivent être incinérés = résidus

TECHNIQUES	Type de traitement	Type de polluant	Etat de la technique	Efficacité	Coût en FIT HT	Limitations, particularités
Pump & Treat	In situ Frangée capillaire et Zone de battement de la nappe	Produit de densité > 1 ou < 1 non soluble	Opérationnelle, épaisse, historiquement la plus ancienne	30 à 50 %	100 à 1000	Contexte géologique et hydrogéologique, Ne traite pas la ZNS ni la frangée capillaire, La plus utilisée, et une des moins efficace. Le traitement secondaire coûte cher
Slurping : Extraction triple phase®	In situ Zone saturée et insaturée	Phase flottante	Commercialisé	98% (confinement pollution)	variable avec profondeur	Profondeur de la nappe
Solidification, confinement	In situ Zone insaturée	Tout	Commercialisé	95%	250 à 1300	
Sparging	In situ Zone saturée	Produits volatils	Opérationnelle, approuvée à l'étranger comme en France	30 à 99%	< 100	S'applique aux sols homogènes et aux aquifères libres Souvent couplé au venting, Suppose le traitement des vapeurs
Venting	In situ Zone insaturée	Produits volatils	Opérationnelle depuis 20 ans	65 à 90%	< 100	Contexte géologique et hydrogéologique, ne traite pas la Zone saturée Doit être souvent utilisé en association avec d'autres techniques, Suppose le traitement des vapeurs
Venting Thermique	In situ Zone insaturée	Produits volatils	Commercialisé	supérieure au Venting		Contexte géologique et hydrogéologique, ne traite pas la Zone saturée Suppose le traitement des vapeurs

### 7.3.7. Conclusion

Les trois tableaux précédents ont montré les principales caractéristiques des techniques de dépollution que nous proposons dans cet ouvrage. Toutes les techniques disponibles sur le marché de la dépollution n'ont pas été abordées, certaines d'entre elles sont des aménagements de techniques décrites

ici, ou présentent un intérêt très limité (cas très particuliers, projets encore à l'étude...). Rappelons que dans certains cas, il est intéressant de conjuguer certaines méthodes entre elles, décalées ou non dans le temps et/ou l'espace.

## 7.4. Exemples industriels de dépollution

### 7.4.1. Introduction

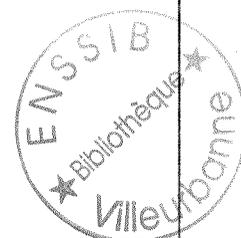
Afin d'établir une liaison avec tous les exemples que nous avons envisagés, cette partie va présenter des exemples industriels concrets de dépollution. Pour chaque type de polluant retenu, un ou plusieurs exemples industriels seront décrits (caractéristiques du site) avec les techniques de dépollution choisies justifiées et détaillées (durée, coût...) quand cela sera possible. Afin de conserver la confidentialité de nos clients, aucun nom d'entreprise ne sera donné.

### 7.4.2. Produits traités et exemples industriel associés

Polluant	Paramètres techniques	Technique retenue	Justification du choix de la technique
<b>Cadmium</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : site pollué par cadmium en Hollande.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : rendement de 95% (de 20 mg/kg à 1 mg/kg).</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : extraction à l'acide menée sur 30 000 m<sup>3</sup>, à 5 m de profondeur.</li> </ul>	<b>Lavage in situ Flushing</b>  (à l'acide)	
<b>Chrome(VI)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : site contaminé par chrome(VI) en Oregon.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : extraction de plus de 30 000 m<sup>3</sup> d'eau de nappe contenant un total de 11 000 kg de chrome(VI). Les concentrations en Cr(VI) sont passées de 1923 mg/l à 96 mg/l en trois ans.</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : 23 puits d'extraction.</li> <li>➤ <u>Durée</u> : plus de 3 ans.</li> </ul>	<b>Lavage in situ Flushing</b>	
<b>Créosote</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : site contaminé par créosote.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : réduction de la concentration en composés organiques extractibles totaux de 93 000 mg/kg à 24 500 mg/kg. Puis lavage avec additifs réduisant cette concentration à 4 000 mg/kg.</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : lavage par infiltration d'eau puis lavage avec additifs.</li> </ul>	<b>Lavage in situ Flushing</b>	
<b>Cyanures et des sulfates</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : site minier au Danemark.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : terriis.</li> </ul>	<b>Lavage in situ (Flushing)</b>  (à la soude)	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : décontamination.</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : lavage à la soude.</li> </ul>		
<b>Fuel (FOD)</b>	<p><u>Société de dépollution</u> : A.T.E.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : site agro-alimentaire (stockage céréales) en activité, fuite accidentelle sur cuve à fuel.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : alluvions récentes, grossières (sables et graviers).</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : 1000 mg/kg à traiter dans 1000 m<sup>3</sup> sol</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : alvéoles étanchées par du PEHD 1 mm, aération forcée, réseau injection de nutriments.</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 18 mois.</li> <li>➤ <u>Coût</u> : 500 FHT/m<sup>3</sup>.</li> </ul>	<b>Bioterre</b>	
<b>Gasoil</b>	<p><u>Société de dépollution</u> : A.T.E.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : dépôt pétrolier en activité.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : remblais et terrains sédimentaires hétérogènes (graviers avec intercalations de silts et argiles).</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : récupérer les flottants, confinement hydraulique.</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : 4 puits de diamètre 1000 équipés en diamètre 800. Système d'écumage automatique avec sondes de détection hydrocarbures.</li> <li>➤ <u>Coût</u> : 600 FHT/t.</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 12 mois.</li> </ul>	<p><b>Slurping ou extraction triple phase®</b></p> <p><i>(confinement hydraulique et récupération des flottants suite à une fuite accidentelle de 300 m<sup>3</sup>)</i></p>	
<b>Gasoil et ancien fuel partiellement dégradés</b>	<p><u>Société de dépollution</u> : A.T.E.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : ancien chantier naval.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : remblais et sables vasards.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : 500 mg/kg dans 8000 m<sup>3</sup> sol.</li> </ul>	<b>Bioterre</b>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : alvéole de 2500 m<sup>2</sup> étanchée par du PEHD 1,5 mm, aération forcée, injection de bactéries sélectionnées, injection de nutriments.</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 18 mois.</li> <li>➤ <u>Coût</u> : 500 FHT/m<sup>3</sup>.</li> </ul>		
<b>Gasoil et essence</b>	<p><u>Société de dépollution</u> : A.T.E.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : exploitation agricole, pollution lors d'un accident de la route dans lequel se trouvait un camion citerne transportant des produits pétroliers.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : remblais et alluvions quaternaires.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : 1000 mg/kg à traiter dans 1500 m<sup>3</sup> sol.</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : excavation pelle mécanique, alvéole 1000 m<sup>2</sup> étanchée par du PEHD 1,5 mm, aération forcée, injection de nutriments.</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 8 mois.</li> <li>➤ <u>Coût</u> : 400 FHT/m<sup>3</sup>.</li> </ul>	<b>Bioterre</b>	
<b>Gasoil lourd et supercarburant</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : pollué par gasoil lourd et supercarburant.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : site de 120 m<sup>2</sup> à traiter.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : essai pilote (mené par l'Institut Français du Pétrole en coopération avec Elf Aquitaine). Des rendements d'extraction de 55% ont pu être atteints correspondant à 500 kg de gasoil lourd.</li> </ul> <p><u>Moyens techniques</u> : tensioactif anionique dilué dans de l'eau à raison de 1% massique. A deux reprises, 3 volumes de pores ont été injectés.</p>	<b>agents mobilisateurs (Flushing)</b>	
<b>HAP</b>	<p><u>Société de dépollution</u> : entreprise tierce sous maîtrise d'œuvre d'A.T.E.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : ancienne usine à gaz.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : 400 m<sup>3</sup> à traiter.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> :</li> </ul>	<b>Solidification</b>	



	<p>concentration initiale des polluants : 2000-5000 mg/kg avec des pointes à 30 000 mg/kg. Pollution finale : 0,2 mg/kg (normes 31-210 et 31-211)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Durée</u> : 2 mois.</li> <li>➤ <u>Coût total</u> : 1 MF, (800 F/t).</li> </ul>		
<p><b>hydrocarbures type supercarburant</b> (avec présence de gaz)</p>	<p><u>Société de dépollution</u> : A.T.E.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : zone de stockage de carburants en activité.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : sables fins, 300 m<sup>2</sup> à traiter.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : extraction du produit (450 kg extraits, concentration résiduelle : 200 mg/kg après traitement) et des vapeurs de gaz (initiale : 1500 ppmV ; finale : &lt; 10 ppmV)</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : 4 aiguilles (prof. 7 m).</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 3 mois.</li> </ul>	<b>Venting</b>	
<p><b>Hydrocarbures divers (gasoil et super)</b></p>	<p><u>Société de dépollution</u> : A.T.E.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : raffinerie en activité.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : milieu fin, argileux de faible perméabilité. Zone soumise à un marnage.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : confinement hydraulique, récupération de liquide de la phase libre, traitement des vapeurs.</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : 50 aiguilles disposées en barrière hydraulique en bordure de raffinerie, reliées à deux unités d'extraction double phase réseau enterré. Traitement des eaux sur séparateur, traitement des gaz sur charbon actif.</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 2 ans.</li> <li>➤ <u>Coût</u> : de l'ordre de 150 FHT/m<sup>3</sup>.</li> </ul>	<p><b>Extraction triple phase<sup>®</sup></b> <i>(produit libre, phase gazeuse et eau), confinement hydraulique en milieu de faible perméabilité</i></p>	
<p><b>Hydrocarbures divers partiellement dégradés</b></p>	<p><u>Société de dépollution</u> : A.T.E.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : ancienne raffinerie.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : terres végétales, remblais, alluvions récentes, hétérogènes, grossiers à fins.</li> </ul>	<b>Biotertre</b> <i>(mélange avec un compost préenrichi en bactéries, aération mécanique des</i>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : 5000 mg/kg à traiter dans 20 000 m<sup>3</sup> sol.</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : mélange avec compost biocatalyserA et aération mécanique périodique par engins agricole.</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 18 mois.</li> <li>➤ <u>Coût</u> : 70 FHT/m<sup>3</sup>.</li> </ul>	terres)	
<b>Hydrocarbures type supercarburant</b>  <i>(dissous + gaz (pas de produit pur)</i>	<u>Société de dépollution</u> : A.T.E. <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : station service en activité.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : mames supra gypseuses, 600 m<sup>2</sup> à traiter, nappe à 4,50 m.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : 890 kg de produit extraits, traitement des gaz et produits dissous (concentration initiale gaz : 2500 ppmV, dissous : 35 mg/l; finale gaz : &lt; 100 ppmV, dissous : 5 mg/l).</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : 4 stripping in situ (prof. 6 m), 12 aiguilles de venting (prof. 6 m).</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 6 mois.</li> </ul>	Venting	
<b>Kérosène</b>	<u>Société de dépollution</u> : A.T.E. <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : dépôt pétrolier en activité sur aéroport.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : limons et argiles de décalcification.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : 8500 m<sup>3</sup> pollués à 1000 mg/kg à traiter.</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : 17 piezomètres d'extraction couplés à une unité d'aération et réseau d'injection de nutriments en tranchées.</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 18 mois.</li> <li>➤ <u>Coût</u> : 150 FHT/m<sup>3</sup>.</li> </ul>	Bioventing	
<b>PCE, TCE</b>  <i>(avec présence de gaz)</i>	<u>Société de dépollution</u> : A.T.E. <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : mames + sables, 500 m<sup>2</sup> à traiter.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : extraction du produit (600 kg extraits) et récupération des gaz (initiale : 1000</li> </ul>	Venting	

	<p>ppmV ; finale : &lt; 100 ppmV)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : 9 aiguilles à 6,50 m de profondeur et 4 aiguilles à 4 m de profondeur.</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 12 mois.</li> </ul>		
<b>Solvant chloré principalement TCE</b>	<p><u>Société de dépollution</u> : A.T.E.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : ancienne usine automobile.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : craie, nappe à 30 m de profondeur.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : 500 µg/l, 0,8 ha à traiter.</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : 2 plates-formes de venting 800 m<sup>3</sup>/h et un compresseur à vis 300 m<sup>3</sup>/h, 20 aiguilles de venting et 7 aiguilles de sparging pour une surface de 0,8 ha.</li> <li>➤ <u>Coût</u> : 150 FHT/t.</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 18 mois.</li> </ul>	<b>Sparging couplé à un Venting et pompage</b>	
<b>Supercarburant</b>	<p><u>Société de dépollution</u> : A.T.E.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : station service désaffectée, pollution chronique hydrocarbures gazeux, nappes polluées par des hydrocarbures dissous.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : remblais, silts, mames.</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : 1 mg/l eau, absence de vapeurs, 4000 m<sup>3</sup> sol à traiter.</li> <li>➤ <u>Moyens techniques</u> : 5 piezomètres d'extraction, 1 unité d'extraction double phase, 500 m<sup>3</sup>/h air, 5 m<sup>3</sup>/h eau, filtration des gaz et eau sur charbon actif.</li> <li>➤ <u>Durée</u> : 4 mois.</li> <li>➤ <u>Coût</u> : de l'ordre de 120 FHT/m<sup>3</sup> (sol).</li> </ul>	<b>Pump and treat</b>	
<b>TCE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <u>Type de site</u> : site allemand pollué par TCE.</li> <li>➤ <u>Type de roche/géologie</u> : aquifère de perméabilité élevée (5,1x10<sup>-2</sup> cm/sec).</li> <li>➤ <u>Objectifs de traitement</u> : 17 tonnes</li> </ul>	<b>Lavage in situ ou Flushing</b> <i>(infiltration de solution par tranchées)</i>	

	de TCE récupérées. ➤ <u>Moyens techniques</u> : 8 puits d'extraction. ➤ <u>Durée</u> : 18 mois.		
--	---	--	--

#### 7.4.3. Conclusion

Ces exemples, pris parmi les plus fréquents ou les plus typiques, sont des cas réels traités par ATE ou d'autres entreprises de dépollution. Les coûts ont été communiqués à titre indicatif.

#### 7.5. Conclusion

Ce chapitre sur les techniques de dépollution n'a pas détaillé la mise en œuvre de ces méthodes. En effet, le but à atteindre n'était pas de permettre à chacun de mettre en place lui même sa technique, mais juste d'appréhender le moyen de comprendre le choix d'une technique. Bien saisir le principe, les conditions générales de fonctionnement et d'optimisation d'une technique est essentiel dans le cadre d'une dépollution mais celle-ci reste une affaire de spécialistes. Les principes des techniques de dépollution sont simples et souvent proches mais chaque technique est en général spécifique à une problématique (polluant, environnement de la pollution) et/ou à un rapport efficacité/coût. La technique retenue ne relève en aucun cas d'un choix aléatoire.

## **CONCLUSION GENERALE**

L'ouvrage devait permettre au lecteur de comprendre et trouver une technique de dépollution adaptée à sa problématique. Nous pensons être parvenus à cet objectif. Les techniques qui ont été envisagées ici sont celles qui doivent permettre de traiter pratiquement toutes les pollutions avec efficacité et ce pour un coût qui doit demeurer acceptable.

Malgré toute l'attention portée à la rédaction de ce livre, nous prions le lecteur de nous excuser pour les quelques erreurs qui auraient pu nous échapper.

En conclusion, rappelons que le succès d'une dépollution repose sur :

- ⇒ la bonne analyse de l'environnement (géologie, bâtiments, voisinage),
- ⇒ le choix de la technique de dépollution qui doit tenir compte :
  - ◆ de la chimie du polluant,
  - ◆ des cinétiques de traitement,
  - ◆ des objectifs à atteindre (seuils de dépollution, durée de traitement).

Pour tout renseignement technique, vous pouvez contacter la société A.T.E. (Antipollution Techniques d'Entreprise) :

*Téléphone :*

*Internet :*

## **BIBLIOGRAPHIE**

**INDEX**

## GLOSSAIRE

**Absorption :** phénomène par lequel une substance est retenue à l'intérieur d'un minéral ou d'une autre substance.

**Acaricide :** tout produit propre à la destruction des acariens : soufre, baume du Pérou, pommade de l'hôpital Saint-Louis, benzène, pétrole, DDT...

**Accumulateur :** appareil mettant en réserve de l'énergie électrique pendant un certain temps, cette énergie peut être ensuite utilisée sous forme de courant continu. Son principe est celui des piles réversibles. // Alliage pour plaques accumulateur à 90 % de plomb, 9,5 % d'étain et 0,75 % d'antimoine.

Il existe 2 grands types d'accumulateurs.

L'accumulateur au plomb a comme électrodes des lames de plomb (l'électrode positive étant revêtue de bioxyde de plomb) et comme électrolyte de l'acide sulfurique. Montés en série, les accumulateurs au plomb sont très employés pour l'allumage des moteurs automobiles et comme batterie tampon dans les centrales électriques.

L'accumulateur alcalin a pour électrolyte une solution de soude; l'électrode positive est constituée par un tube d'acier perforé contenant des couches alternées de nickel et d'hydroxyde de nickel; l'électrode négative est constituée par des pochettes en acier perforé remplies d'oxyde de cadmium.

**Accumulation :** processus par lequel certaines substances endogènes ou exogènes présentes en faible quantité voient leur concentration augmenter dans un organisme vivant, un organe, une chaîne alimentaire, un écosystème.

**Action corrective :** action entreprise pour éliminer les causes de non-conformité, d'un défaut, d'une nuisance liée à une pollution ou de tout autre événement indésirable existant pour empêcher son renouvellement.

**Acrylique :** se dit de l'acide de formule chimique  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CO}_2\text{H}$  et des résines artificielles qui en découlent.

**Adsorption :** phénomène de fixation superficielle se produisant lorsqu'une substance liquide, dissoute ou gazeuse entre en contact avec une substance solide sans qu'il n'y ait combinaison chimique ou dissolution.

**Advection :** processus par lequel les solutés sont transportés horizontalement par l'eau souterraine et à la même vitesse.

**Aérobic :** processus exigeant la présence d'oxygène pour son développement.

**Aérosol :** système colloïdal dont le milieu de dispersion est un gaz, la phase dispersée pouvant être soit un solide, soit un liquide.

**Alcool :** corps organique résultant théoriquement du remplacement par le groupe OH d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène d'un hydrocarbure, sauf si cette substitution se fait directement sur un noyau non saturé.

**Amendement :** ajout d'une substance visant à améliorer les propriétés physiques du sol. L'amendement n'est pas toujours enrichi en éléments fertilisants, contrairement aux engrais.

**Anaérobic :** processus exigeant l'absence d'oxygène pour son développement.

**Analgésique :** se dit d'un médicament qui provoque l'insensibilité à la douleur.

**Andain :** dépôt constitué de cordeaux parallèles de déchets, boues, compost... permettant la fermentation aérobie des produits stockés.

**Anthracite :** variété de houille.

**Antipyrétique :** se dit d'un médicament dont l'adsorption provoque un abaissement de la température du corps.

**Antiseptique :** se dit d'une substance capable d'entraver (ou détruire) le développement des micro-organismes.

**Atrazine :** herbicide constitué par la chloro-2 éthylamino-4 isopropylamino-6 s-triazine.

**Audit environnemental :** action ayant pour objet de recenser et d'évaluer les conséquences avérées et potentielles des activités d'une entreprise ou d'un service sur l'environnement dans un intervalle de temps et d'espace géographique préalablement défini.

**Autoépuration :** processus naturel (biologique, chimique ou physique) qui permet à un milieu de détruire lui-même les déchets organiques ou minéraux (nitrates par exemple) qu'il produit ou qui lui sont apportés de l'extérieur.

**Azoïque :** se dit des colorants possédant le groupement azoïque  $-N=N-$ . // Composé organique du type  $R-N=N-R'$  avec R et R' désignant des restes de carbures.

**Barrière active :** barrière constituée d'un dispositif de drainage très performant incluant à sa base une géomembrane d'étanchéité.

**Bassin de décantation :** plan d'eau aménagé ou non permettant de traiter des effluents avec une séparation par gravité de la phase solide en suspension et du sumageant qui sera orienté vers une filière de traitement complémentaire ou sera rejeté dans le milieu naturel.

**Biocide :** toute substance qui tue ou empêche le développement de micro-organismes.

**Biodégradation :** changement d'un composant en un autre et éventuellement réduction de la masse du contaminant. C'est la modification structurale par un micro-organisme d'un polluant lui servant de source de carbone et d'énergie pour sa croissance. Le polluant se transforme en métabolites, biomasse et  $CO_2$ .

**Biodécontamination :** procédé de décontamination des eaux ou des sols qui s'appuient sur des organismes vivants, bactéries, champignons, biophytes et macrophytes notamment.

**Biodégradabilité :** aptitude d'une substance à se dégrader sous l'effet des micro-organismes.

**Biodégradation :** procédé naturel par lequel les micro-organismes altèrent et clivent les molécules organiques en d'autres substances plus simples telles que des acides gras ou du gaz carbonique. La biodégradation s'applique notamment à des polluants organiques ou minéraux tels qu'hydrocarbures, nitrates ou sulfates... les phénomènes mis en jeu sont soit aérobies, soit anaérobies.

**Biofiltre :** filtre naturel ou artificiel constitué de matière organique vivante et de micro-organismes se développant sur un support approprié.

**Biogaz :** gaz résultant de la fermentation anaérobie de matières organiques par des micro-organismes, au sein de décharges d'ordures ménagères notamment et composé de 55 à 60 % de méthane et de 40 à 45 % de gaz carbonique.

**Biolixiviation :** procédé qui consiste à lessiver un milieu naturel ou artificiel (déchets) ; cette technique peut être utilisée pour en extraire une ou plusieurs substances recherchées en s'appuyant sur des bactéries associées ou non à des nutriments.

**Bioréacteur :** enceinte permettant de faire appel à des organismes unicellulaires par voie aérobie ou anaérobie dans le but de dégrader des produits polluants ou d'améliorer la qualité d'effluents, de boues...

**Biostimulation :** biodégradation (à l'air libre ou en milieu confiné) accéléré par apport de bactéries et de nutriments (azote, phosphore, potassium) adaptées aux polluants à éliminer.

**Bioventing :** procédé de décontamination par voie biologique qui consiste à injecter un flux d'air dans un milieu à dépolluer pour en favoriser la dégradation aérobie.

**Bitume :** produit résultant de la distillation des hydrocarbures. Ce sont des mélanges complexes d'éléments minéraux et organiques ; ils font partie des NAPL, produits qui ne se solubilisent pas facilement dans l'eau, comme les goudrons.

**Borate :** nom générique des sels et esters des acides boriques. Les plus connus sont les métaborates  $MBO_2$ , les "diborates" ou pyroborates  $M_2B_4O_7$ , les (ortho)borates  $M_3BO_3$ , les hypoborates  $M_4BO$ , les "triborates"  $M_2B_6O_{10}$ , les "tétraborates"  $M_2B_8O_{13}$ , les "pentaborates"  $M_2B_{10}O_{16}$ .

**Bruit de fond :** concentration naturelle d'un sol ou d'une eau en un élément donné en l'absence de tout apport extérieur spécifique. En particulier, on qualifie de bruit de fond la concentration naturelle d'un sol ou d'une eau souterraine, par exemple, en un élément donné en l'absence d'une activité humaine.

**BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylène) :** abréviation désignant les composés aromatiques monocycliques, indicateurs d'une pollution par des hydrocarbures, car se sont les plus solubles.

**Caoutchouc :** substance élastique, élastomère, naturelle ou synthétique. Les caoutchoucs synthétiques s'obtiennent à partir de l'isoprène  $((C_5H_8)_n$ , haut polymère comme le méthylbutadiène) et d'hydrocarbures analogues.

**Captan :** nom déposé pour un gaz à odeur de mercaptan pour déceler des fuites de gaz inodores.

**Carbamate :** sel ou ester de l'acide carbamique de type  $NH_2-CO-OM$ .

Carbaryl : pesticide N-méthylcarbamate de naphthyle-1 de formule  $C_{10}H_7OOCNH-CH_3$ .

Carburant : gaz ou liquide très volatil formant avec l'oxygène ou un autre oxydant un mélange dont la combustion très rapide (et non l'explosion) provoque une augmentation brusque et considérable de pression, utilisée dans les moteurs à combustion interne. On distingue les carburants gazeux (acétylène, gaz de gazogène) et les carburants liquides (essence, pétrole, gasoil, benzol, gazoline, alcool).

Catalyseur : agent physique, chimique et biologique capable de modifier la vitesse d'une réaction.

Caustique : se dit de toute substance capable de détruire les tissus animaux et végétaux.

Céramique : fabrication d'objets en argile cuite.

C.E.T. : centre d'enfouissement technique.

Cétone : composé de la forme  $R-CO-R'$ .

Charbon : combustible solide, noir, formé essentiellement de carbone.

Charbon actif : carbone très poreux doué d'un grand pouvoir adsorbant (1 g peut engendrer une surface adsorbante de 1000 m<sup>2</sup>). On peut l'obtenir par distillation à sec de matières végétales, comme le bois, ou animales ou en chauffant du charbon sur lequel on a fait préalablement agir certains produits chimiques (ex : chlorure de zinc). On l'utilise comme adsorbant dans les masques à gaz et les stations d'épuration d'eau. En médecine on emploie une forme spéciale de charbon actif à usage interne pour adsorber les gaz et les produits nocifs.

Chimie agricole : étude de la terre arable, des engrais, des catalyseurs et d'une partie de la chimie biologique dans leur rapport avec la croissance des plantes cultivées.

Chlordane : non commun pour un insecticide organochloré pour sauterelles, limaces, mouches.

Chloroforme : composé de forme  $CHCl_3$  (trichlorométhane) servant de dissolvant ou anesthésique.

Coefficient de partition octanol-eau : coefficient représentant le rapport de la solubilité d'un composé dans une substance non polaire (octanol) à sa solubilité dans l'eau. Quand le coefficient de partition octanol-eau augmente, la solubilité et la miscibilité dans l'eau diminuent.

Coke : carbone amorphe résultant de la calcination de la houille et de l'antracite.

Contamination : pénétration d'une substance ou de micro-organismes dans un milieu ou dans un être vivant qui, à son tour, devient susceptible de constituer une source ou un vecteur de pollution pour son entourage.

Co-métabolisme : modification structurale par un micro-organisme d'un polluant ne lui servant pas de source d'énergie. La présence d'un co-substrat permettant sa croissance est alors nécessaire. Différents types de micro-organismes peuvent intervenir successivement (notion de communauté dégradante) et la dégradation du polluant peut être complète dans ces conditions.

Composé organométallique : substance dans laquelle un groupe organique est directement lié à un métal.

Corrosion : destruction progressive d'un matériau par une action chimique, électrique, bactérienne, mécanique ou par la combinaison de plusieurs de ces facteurs.

Coumaphène : marque d'un raticide.

Créosote : mélange de divers phénols et éthers phénoliques.

Cumène : nom vulgaire de l'isopropylbenzène  $(CH_3)_2CH-C_6H_5$ .

Décantation : séparation par gravité des matières solides ou liquides en suspension dans un liquide ou effluent.

Décontamination : élimination ou atténuation des effets d'une pollution en s'appuyant sur des moyens appropriés au milieu.

Dégradation : détérioration physique, chimique, biologique, énergétique ou esthétique d'un milieu.

Dépollution : élimination partielle ou totale d'un produit contaminant ayant dégradé un milieu naturel (sol, eaux souterraines) dans le but de restaurer ses fonctions et de le remettre en état pour un nouvel usage.

Désinfection : traitement général d'ordre physique ou chimique permettant de détruire les micro-organismes pathogènes d'un milieu.

Détergent : substance chimique qui, en dissolution dans l'eau, accroît son pouvoir de nettoyage. Les détergents organiques sont caractérisés par la présence d'un hydrocarbure à longue chaîne lié à un groupe hydrophile (groupes carboxyle, sulfate ou sulfonate) qui rend le composé soluble dans l'eau.

**Désinfectant :** se dit des substances capables de débarrasser les mains, les cavités organiques, une salle, ses accessoires, soit par voie chimique soit par voie mécanique des germes qui s'y trouvent : chlore, formol, eau oxygénée, mercurochrome...

**Diagnostic environnemental :** action visant à apporter un jugement sur les causes, l'étendue, les répercussions d'une pollution sur l'environnement.

**Dispersion :** processus d'étalement de polluants autour de leur direction de transport ; elle résulte de phénomènes mécaniques et de la diffusion moléculaire.

**Dithiocarbamates :** nom générique des sels de formule chimique  $MS-CS-NH_2$ , utilisés en analyse minérale.

**Drainage :** structure physique qui permet la collecte, et l'évacuation d'effluents liquides ou gazeux par la création de chemins préférentiels de circulation.

**Elastomère :** nom générique des hauts polymères naturels ou artificiels ressemblant au caoutchouc.

**Encre :** liquide coloré servant à écrire, dessiner, imprimer. On obtient l'encre noire ordinaire par l'action d'un sel de fer sur le tanin de la noix de galle ; les encres de couleur sont faites à l'aide de colorants synthétiques.

**Excavation :** enlèvement mécanique des terres polluées pour traitement externe.

**Explosif :** substance ou mélange pouvant subir une combustion brutale ou une transformation chimique avec libération de gaz à haute pression et à haute température. Un explosif est d'autant plus destructeur que la réaction est plus rapide. Les explosifs simples les plus importants sont : le nitrate de cellulose, la nitroglycérine et les dérivés nitrés parmi lesquels on peut citer le trinitrophénol (acide picrique), le trinitrotoluène (trotyle), la tétranitrométhylamine (tétyle) et l'hexanitrodiphénylamine (hexyle). Les explosifs mécaniques sont des mélanges combustibles : substances organiques et oxydants inorganiques susceptibles de libérer de l'oxygène, tels que chlorates et perchlorates.

**Ex situ :** par opposition à in situ, ne se déroule pas directement dans ou sur la pollution en place. L'action ex-situ peut être on site ou non.

**Fenthion :** insecticide brun liquide, d'odeur alliécée, contenant 95 à 98 % de thiophosphate.

**Fermentation :** transformation de matières organiques sous l'influence d'enzymes produits par des micro-organismes.

**Fonderie :** art de fondre et de purifier les métaux.

**Friche :** espace libéré et laissé à l'abandon temporairement à la suite de l'arrêt brutal d'une activité agricole, portuaire, industrielle, de service, de transformation, de défense militaire, de stockage, de transport. Les friches sont caractérisées par leur concomitance d'apparition dans le temps et dans l'espace, la dégradation des milieux et le coût élevé de la réhabilitation.

**Fumigant :** produit gazeux ou liquide aisément volatil utilisé à but thérapeutique sur les arbres fruitiers ou plants de légumes.

**Galvanoplastie :** action de déposer un métal par électrolyse, soit dans un but de protection, soit dans un but de décoration.

**Gaz de combat :** arme chimique constituée de substances solides, liquides ou gazeuses qui ont un effet toxique ou nocif sur l'organisme.

**Gaz de houille :** combustible gazeux obtenu dans les cokeries; on le prépare aussi dans les usines à gaz. Le gaz est produit par pyrogénéation de la houille, et purifié du goudron, de l'ammoniac, du benzène... La composition finale est de 50 % d'hydrogène, 30 à 35 % de méthane, 5 à 10 % d'oxyde de carbone, ainsi que de gaz carbonique, d'azote et d'un peu d'oxygène.

**Gaz naturel :** mélange gazeux riche en carbures saturés légers.

**Gazoline :** nom commercial de l'éther de pétrole, produit très volatil tiré du pétrole brut par distillation.

**Géomembrane :** produit adapté au génie civil et à l'environnement, mince, souple, continue, étanche aux liquides. Dans l'état actuel des techniques, ni les produits de faible épaisseur fonctionnelle (inférieure à 1 mm), ni les produits dont l'étanchéité est assurée par un matériau argileux, ne sont considérés comme des géomembranes.

**Géophysique :** ensemble des techniques d'études permettant la caractérisation du sous-sol en s'appuyant sur la mesure de paramètres physiques (résistivité, densité, susceptibilité magnétique...) à partir de la surface ou des sondages. Ces mesures doivent, le plus souvent, être étalonnées par des données et observations directes.

**Géoradar :** technique d'étude des couches superficielles du sous-sol s'appuyant sur la

réflexion et la mesure de courants haute fréquence émis à partir de la surface du sol.

Géotextile : matériau polymère perméable, qui peut être tissé, non tissé ou tricoté, utilisé dans les applications de génie civil, de géotechnique ou d'environnement.

Goudron : résidu lourd de distillation des charbons ou des lignites. Ce sont des mélanges assez complexes de différents composés : des produits minéraux dont les principaux sont des métaux et des cyanures ; des produits organiques dont les principaux sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les composés aromatiques volatils et les phénols. De couleur noire, leur densité moyenne est 1,2. Ils ont un comportement viscoélastique.

Houille : combustible solide formé en grande partie de carbone.

Huile légère : huile recueillie avant 180°C quand on distille le goudron de houille.

Huile lourde : huile passant au-dessus de 225 °C pendant la distillation fractionnée des pétroles. Source de lampant, de gasoil, de fuel ou de lubrifiants. On peut aussi l'utiliser à l'état brut pour l'alimentation des moteurs Diesel et semi-Diesel. L'expression "huile lourde" désigne aussi la fraction 240-360 °C d'où l'on retire l'anthracène.

Huile minérale : huile obtenue à partir du pétrole, du goudron de houille, de l'huile de schiste une fois que l'on a tiré, par distillation, l'essence et le pétrole lampant. En mélangeant différentes fractions de distillation on obtient alors des huiles de viscosités différentes convenant à différents usages.

Hydrocarbures : molécules organiques composées d'atomes de carbone et d'hydrogène reliés par des liaisons covalentes.

Ignifugeant : se dit des adjuvants pour les substances et, en particulier pour les polymères, pour les rendre insensibles à l'action du feu (inflammables).

Indicateur de pollution : variable synthétique chimique, physique ou biologique qui, à partir d'une certaine concentration, témoigne de la réalité ou de l'importance d'une pollution du milieu.

In situ : se déroule dans le sol en place.

Isodrine : nom commun de pesticide.

Isolant électrique : les isolants électriques se caractérisent par leur résistivité électrique très élevée, leur rigidité diélectrique (résistance à une

décharge), leur coefficient de perte diélectrique. Outre l'air, qui est un excellent isolant, citons le verre, le mica, l'amiante, la porcelaine, la résine, l'ébonite, le caoutchouc, le Nylon, les silicones, les polyéthylènes...

Isolant thermique : les isolants thermiques sont souvent des isolants électriques (air, amiante); le vide ou l'air compris entre des parois sont couramment utilisés dans la construction moderne, ainsi que la laine de verre, le liège, la fibre de bois comprimée, certaines matières plastiques et l'emploi de surfaces réfléchissantes qui s'opposent aux échanges de chaleur par rayonnement.

Landfarming : procédé de dépollution qui consiste à étendre les matériaux souillés sur le sol en couches minces qui seront régulièrement travaillées à l'aide d'engins agricoles pour favoriser la biodégradation des polluants organiques qu'ils contiennent.

Lavage des sols : procédé de dépollution qui consiste à injecter de l'eau sous pression dans le sol pour diluer ou entraîner les polluants qui s'y trouvent. Cette technique doit s'accompagner d'un traitement simultané de la nappe phréatique (piège hydraulique, pompage d'écumage...). Cette technique peut s'appliquer hors site ou sur site en réacteur ; elle suppose alors l'élimination ou le réemploi des résidus après lavage.

Lessivage : entraînement par une substance liquide de la fraction soluble ou miscible dans ce liquide contenu dans un solide.

Lit fluidisé : lit de petites particules maintenues en suspension par un courant ascendant de liquide, de gaz ou de liquide et de gaz.

Lindane : marque d'hexachlorure de benzène.

Lixiviation : passage lent d'un solvant ou d'un effluent à travers une couche de matériau brut, broyé ou bouleté disposé en tas ou en colonne pour en extraire des composés solubles. La lixiviation en tas ou en réacteur mobile est aujourd'hui couramment utilisée pour décontaminer des terres polluées par des éléments organiques ou minéraux.

Loi de Henry : loi empirique établissant que la quantité de gaz ou de vapeur dissous dans l'eau est proportionnelle à la pression du gaz au contact de l'eau, à une température donnée ; plus la pression du gaz est élevée, plus la concentration de gaz dans l'eau est élevée.

Loupe de pollution : volume d'effluents liquides se dispersant dans le sol ou dans un aquifère sous forme de panache à partir d'une source de pollution ponctuelle ; il se caractérise par le sens

d'écoulement, la nature et la densité du contaminant, et sa miscibilité à l'eau.

**Manèbe** : nom donné au fongicide manganéux de formule  $C_4H_6MnN_2S_4$ .

**Matière minérale** : composé provenant de la transformation de matières premières banales comme l'air, l'eau, le sel, le soufre, le gaz naturel, le calcaire, le sable, les phosphates, le spath fluor. La chimie minérale conduit aux acides et bases inorganiques, aux engrais, aux gaz comprimés.

**Matière organique** : composé de carbone présent dans les végétaux, la houille, le pétrole et le gaz naturel.

**Matte** : terme général désignant un minerai ayant subi un grillage incomplet.

**Matte blanche** : stade de grillage du minerai de cuivre, au moment où il ne renferme plus que le sulfure  $Cu_2S$ .

**MCPA** : désignation de l'herbicide constitué par l'acide (chloro-4 méthyl-2 phenoxy) acétique.

**Mercaptans** : composés organiques soufrés associés à la production de biogaz et qui se caractérisent par leur mauvaise odeur.

**Métal** : corps simple susceptible de libérer des cations simples, en général il est bon conducteur de la chaleur et de l'électricité à la température ordinaire.

**Métallurgie** : ensemble des traitements physiques, chimiques, calorifiques, électrolytiques que l'on fait subir aux minerais pour en extraire les métaux.

**Métaux lourds** : éléments métalliques dont les métaux de transition, comprenant des éléments nécessaires à l'alimentation des plantes et des animaux, en concentrations très faibles, mais qui devient toxiques à plus fortes concentrations (ex. : mercure, chrome, cadmium, plomb).

**Minéralisation** : résultat de la biodégradation d'un contaminant en un composé basic. Un hydrocarbure biodégradé donne du dioxyde de carbone  $CO_2$  et de l'eau.

**Miscibilité** : propriété de liquides différents de se dissoudre l'un d'en l'autre; elle peut être totale, partielle ou réciproque.

**Mobilisation** : action d'accélérer le mouvement d'un polluant dans une nappe en changeant les conditions physiques, chimiques ou d'oxydoréduction du milieu.

**Molécule** : assemblage d'atomes liés les uns aux autres par des liaisons chimiques et possédant une configuration géométrique définie.

**Morpholine** : huile d'odeur ammoniacale  $C_4H_9ON$  ; réactif analytique.

**Mutagène** : qualifie un agent chimique ou physique susceptible de provoquer des mutations chez une espèce, vivante animale ou végétale.

**Naphténate** : nom générique des sels et esters des acides naphéniques. Les sels sont très utilisés pour faire des savons et des siccatifs.

**NAPL Non Aqueous Phase Liquid** : polluant pouvant former une phase liquide différente de la phase aqueuse. C'est le cas des solvants halogénés, PCB, hydrocarbures. D'autres composés organiques parce que solubles (phénols) ou solides (pesticides) ne sont pas des NAPL.

**Nématocide** : substance tuant les vers.

**Nomenclature** : manière unique de nommer les éléments à partir de leurs caractéristiques.

**Nylon** : nom déposé d'une résine synthétique pour fibres textiles, de la classe des polyamides, obtenue par condensation d'un diacide (ex : acide adipique) avec une diamine (ex : éthylène diamine). Soluble dans le formole et dans le crésol.

**Oestrogène** : substance naturelle ou synthétique possédant la propriété de préparer l'utérus à la menstruation et à la gestation.

**On site** : l'action se situe sur le site même de la pollution.

**Peinture** : composé d'huile siccatif, d'un fluidisant (essence de térébenthine, White Spirit), d'un siccatif et d'un pigment de poudre fine.

**Péracétique** : se dit de l'acide de formule chimique  $H_3C-CO_3H$  ; explosif.

**Perméabilité** : aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de potentiel.

**PCBs (Polychlorobiphényles)** : produits de synthèse à rémanence élevée. Ils sont essentiellement utilisés dans la construction des transformateurs électriques et des condensateurs en raison de leur pouvoir isolant et de leur grande stabilité à la chaleur.

**Pesticide** : terme général comprenant les fongicides, herbicides et insecticides.

**Pétrochimie :** ensemble des méthodes de production des produits chimiques à partir du pétrole.

**Phosphite :** nom générique des sels et esters de l'acide phosphoreux.

**ppm :** parties pour millions.

**Piège hydraulique :** moyen de pompage permettant d'abaisser la surface de la nappe dans des conditions préalablement définies du point de vue du cône d'influence et visant à maintenir l'extension de la pollution à l'intérieur de ce cône.

**Plastifiant :** substance accroissant la plasticité. // Solvant solide ou liquide donnant notamment avec les esters de la cellulose, des matières élastiques, souples, desquelles il ne disparaît plus par volatilisation. On distingue les plastifiants par combinaison moléculaire et par insertion moléculaire. // Par généralisation, on distingue par plastifiant toute substance permettant d'améliorer la consistance de produits industriels divers : caoutchoucs, pâtes céramiques, béton...

**Polyester :** ester de haut poids moléculaire produit par self-estérification de deux ou plusieurs molécules d'hydroxy-acide gras. // La fibre de polyester est un polymère synthétique à longue chaîne formé entre un ester de glycol et l'acide téréphtalique.

**Propellant :** gaz liquéfié dans lequel les ingrédients actifs d'une préparation sont dissous et dont la détente provoque la dispersion en un aérosol : propulseur d'aérosol. // Propulseur moteur.

**Pyréthrine :** produit insecticide constitué par des principes toxiques extraits des fleurs et des parties aériennes du pyrèthre.

**Pyridine :** molécule à noyau aromatique contenant 5 atomes de carbone et un d'azote.

**Pyrimidine (métadiazine) :** diazine dans laquelle des atomes d'azote sont en position 1 et 5.

**Rabattement de nappe :** abaissement du niveau de la nappe par pompage suivant des modalités techniques permettant de dimensionner précisément le cône d'influence, les conditions de prélèvements et de rejet des effluents liquides.

**Raffinage du pétrole :** ensemble des traitements du pétrole brut qui permettent d'en extraire les gaz, les essences, les fuels, les huiles...

**Raffinerie :** établissement où se réalisent les opérations chimiques ou physico-chimiques destinées à donner à l'huile ou au pétrole

certaines qualités propres à les rendre marchands.

**Rémanence :** persistance dégressive dans le temps d'un effet après disparition de sa cause. Pour ce qui concerne les pesticides, durée pendant laquelle un pesticide conserve son activité.

**Rodenticide :** substance de préparation destinée à la destruction des rongeurs.

**Savon :** produit détergent, constitué par des sels de sodium ou de potassium d'acides gras supérieurs.

**Sidérurgie :** extraction et travail du fer, de la fonte et de l'acier.

**Simazine :** nom générique d'une famille d'herbicides de forme  $CIC_3N_3 (NHC_2H_5)_2$ .

**Sol pollué :** zone non-saturée comprise entre la surface du sol et le niveau de la nappe phréatique qui, du fait de négligence, défaut de conception ou de maintenance, non-respect de la législation à la suite d'activités diverses, conduit à l'apparition de dommages et risques immédiats ou différés pour les usagers ou pour l'environnement.

**Soluté :** corps dissous dans un solvant.

**Solvant :** substance capable d'en mettre une autre en solution.

**Solvant hydrocarboné :** coupe pétrolière relativement légère qui se situe dans la gamme des hydrocarbures de  $C_4$  à  $C_{14}$ , et dont les applications sont nombreuses dans l'industrie comme dans l'agriculture.

**Sondage :** action de reconnaissance du sol, du sous-sol, des eaux souterraines en s'appuyant sur des moyens matériels spécifiques : pelle mécanique, tarière, carottier, vibrocarottier... Suivant la nature des moyens utilisés, on pourra accéder à des échantillons intacts ou remaniés.

**Sorption :** effet combiné de l'adsorption et de l'absorption.

**Stabilisant :** se dit d'un phénomène, d'un corps, ... rendant un autre corps plus stable. // Qui diminue l'énergie d'une molécule donc augmente l'énergie de liaison.

**Stabilisation :** technique d'immobilisation des éléments polluants à l'intérieur d'un matériau à l'aide d'ajouts (chaux, pouzzolane, bitume...) permettant l'inertie chimique du mélange et un relargage contrôlé des éléments indésirables dans le milieu naturel.

**Stérilisateur (agent)** : Substance détruisant les micro-organismes (moisissures, microbes, spores...) souillant un appareil, un instrument, un pansement, un produit alimentaire. L'action se réalise souvent à l'aide d'une élévation de température.

**Stéréochimie** : Disposition spatiale des atomes dans la molécule en relation avec les propriétés optiques et chimiques de la substance.

**Stripping** : technique de traitement (sur site) ou de dépollution in situ des eaux polluées par des composés organiques volatils qui consiste à aérer le milieu.

**Surfactant** : composé chimique qui, dissous ou dispersé dans un liquide, est préférentiellement adsorbé à une interface, ce qui détermine un ensemble de propriétés physico-chimiques ou chimiques d'intérêt pratique. La molécule du composé comporte au moins un groupement susceptible d'assurer une affinité pour les surfaces nettement polaires, entraînant le plus souvent la solubilisation dans l'eau, et un radical ayant peu d'affinité pour l'eau. Parmi les agents de surface, on distingue les agents anioniques et les agents cationiques.

**Synthèse** : mode de transformation par lequel des polluants ou des produits de transformation sont liés entre eux (polymérisation) ou à d'autres composés (conjugaison) grâce aux enzymes des micro-organismes présents. La synthèse joue un rôle important dans l'immobilisation (stabilisation) des polluants dans le sol.

**Tannerie** : industrie de transformation de la peau des animaux en diverses sortes de cuirs. Les tannants chimiques utilisés sont les sulfates de chrome, les bicarbonates de potassium, l'acide sulfurique dilué pour le traitement, le sulfure de sodium pour l'épilage.

**Téflon** : marque déposée pour une famille de résines fluorocarbonées, fibres et films, y compris PTFE (polytétrafluoroéthylène) et le FEP (éthylène-propylène fluoré).

**Thiazole** : nom générique de composés organiques hétérocycliques triazolés et à 5 chaînons.

**Thirame** : nom commun du fongicide constitué par le disulfure de (bisméthylthiocarbamyle).

**Transformateur** : appareil électrique permettant d'élever ou d'abaisser la tension des courants alternatifs.

**Triazine** : composé hétérocyclique à 6 chaînons dont 3 sont azotés.

**Tributylétain (chlorure de)** : corps très toxique de formule chimique  $(C_4H_9)_3SnCl$  servant de rodenticide.

**Urée** : diamide carbonique ou monoamine carbamique de forme  $NH_2-CO-NH_2$ .

**Venting** : injection d'air sous pression dans le sol non saturé pour entraînement mécanique des polluants volatils qui s'y trouvent piégés.

**Vemis** : nom générique des solutions de diverses résines ou gommes - résines dans un solvant approprié servant à revêtir certaines surfaces d'un enduit mince, transparent et luisant qui les protège de l'air ou de l'humidité.

**Vitrification** : procédé thermique permettant de transformer une substance sous forme de verre ; l'objet est, en général, de diminuer la mobilité de la substance concernée.

**Vulcanisation** : association du latex du caoutchouc avec une certaine quantité de soufre ayant pour effet de le rendre insensible aux variations habituelles de température et de lui permettre de résister à l'action oxydante de l'air.

**White spirit** : liquide incolore, d'odeur faible qui, dans la distillation fractionnée des pétroles bruts, passe entre 150 °C et 200 °C ; employé comme solvant et succédané de l'essence de térébenthine.

**Zone insaturée du sol** : partie du sol hors nappe phréatique.

**Zone saturée du sol** : nappe phréatique.

## Annexe 2

Le modèle conceptuel des données dans sa première ébauche est ici présenté.

La liaison indiquée avec BATPRO correspond à une passerelle avec la base de données comptable type ORACLE de la société. Cette base renferme des informations financières qui intéressent la partie commerciale de la future base de données ATE. Les tables nécessaires ne sont pas encore définies.

# Modèle Conceptuel Des Données

