

.. 0 . 0 . 0 0 . 0  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
0 . 0 0 0 0

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N°Ref :.....

## Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila

Institut des Sciences et de Technologie Département de sciences et Technique

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du  
diplôme LICENCE ACADEMIQUE  
en Hydraulique

Spécialité : Sciences Hydrauliques

# Différents procédés de pollution des eaux souterrains

Préparé par :

Dermouchi Said

Guerbaa Abdelhak Mr. Kabour Abdessalem

Bourihane Mohamed Amine

Dirigé par :

Année universitaire : 2014/2015



# Remerciement

*Nous remercions Allah, le tout puissant de nous avoir donné la santé, la volonté et la patience pour l'accomplissement de ce mémoire.*

*En premier lieu nous exprimons toute notre gratitude pour notre encadreur **Mr Habour Abdessalem** pour ses précieux conseils, ses disponibilités, la confiance, sa compréhension, sa gentillesse, ses encouragements.*

*Nous Remercions aussi nos familles pour le soutien chaleureux apporté lors de la réalisation de ce travail.*

*En fin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.*

Said

**Said**

Mohamed Amine

**Mohamed Amine**

Abdelhak

**Abdelhak**



# TABLAU DE MATIERES

## Introduction générale

### CHAPITRE I : Généralité sur la pollution de l'eau

I.1 Introduction .....	02
I.2. La définition de la pollution .....	02
I.3. Les sources de la pollution .....	02
I.4. Principaux types de pollution .....	03
I.5.Pollution temporaire et pollution chronique .....	05
I.6.Pollution ponctuelle et pollution diffuse .....	05
I.7.. pollution linéaire .....	06
I.8..pollution historique .....	06
I.9.. les impacts des déchets domestiques sur la pollution de l'eau .....	06
I.10. les impacts des activités industrielles sur la pollution de l'eau .....	06
I.11. l'impact de l'agriculture sur la pollution de l'eau .....	07
I.12. Transfert et évolution des polluants .....	07
I.12.1. Transfert dans le sol .....	07
I.12.2.. Transfert dans la zone non saturée .....	08
I.13. Evolution en milieu saturé .....	09
I.14. Conclusion.....	09

### CHAPITRE II : Les caractéristiques des polluants

II.1. Introduction .....	11
II.2. caractéristique physico-chimique des polluants .....	11
II.2.1. principaux polluants .....	11
II.2.2. principales propriétés des polluants et grandeur associées .....	13
II.3. Comportement des polluants par famille .....	17
II.3.1. Les métaux et métalloïdes lourds .....	17
II.3.2. Les autres polluants inorganiques.....	19

II.4. Les composés organiques : questions de nomenclature et de classification(DNAPL,COV,,,) .....	19
II.5. Conclusion.....	21

### CHAPITRE III : Processus qui influence l'évolution de la pollution

III.1. Introduction .....	22
III.2. Facteurs liés a la nature du sol et du sous –sol.....	22
III.2.1. Les milieux traversés .....	22
. III.2.2 Le sol .....	23
. III.2.3 Le sous-sol.....	24
. III.3. Principaux types de milieux souterrains.....	25
. III.3.1 La zone non saturée .....	26
. III.3.2 La zone saturée.....	27
. III.4. Caractéristiques Hydrauliques du milieu.....	27
. III.4.1 Écoulement d'une seule phase (pollution miscible) : cas des nappes.....	27
. III.4.2 Écoulement d'une seule phase (pollution miscible) : cas de la zone non saturée.....	28
. III.4.3 Milieu poreux saturé par plusieurs phases (pollution non miscible) .....	29
. III.4.4 Mécanismes physiques affectant le transport .....	30
. III.5 Convection et temps de parcours .....	30
. III.6 Diffusion .....	31
. III.7 Dispersion .....	32
. III.8 Adsorption .....	32
. III.9 Principaux mécanismes du transport de masse .....	33
. III.10 Conclusion .....	33
.Conclusion générale	

## **Liste des figures**

<b>Fig1.- Métaux lourds dans la classification périodique .....</b>	<b>18</b>
<b>Fig. 2 - Relations entre sol. Sous-sol, zone non saturée et zone saturée .....</b>	<b>23</b>
<b>Fig. 3 - Exemple de révolution d'un panache de pollution Laval d'une décharge (modélisation numérique eu coupe verticale réalisée avec logiciel MARTHE du BRGM.).....</b>	<b>25</b>
<b>Fig. 4 - Relation entre pression et texture du sol dans la ZNS.....</b>	<b>29</b>
<b>Fig. 5 - Flux de masse parconvection au travers d'une section S de milieu poreux.</b>	<b>30</b>

## **Liste des tableaux**

<b>Table.: sources potentielles de contamination des eaux souterraines. ....</b>	<b>03</b>
<b>Table. 1 - Contaminants inorganiques.....</b>	<b>12</b>
<b>Table. 2 -Contaminants organiques par famille de produits .....</b>	<b>13</b>
<b>Table. 3 - Caractéristiques physico-chimiques géant le comportement des contaminants (modifié d'après Pellet, 1994). ....</b>	<b>14</b>
<b>Table. 4 -Critères d'appréciation du comportement des produits organiques .....</b>	<b>17</b>
<b>Table. 5 - Conséquences des propriétés intrinsèques des polluants leur comportement.....</b>	<b>17</b>
<b>Table. 6 -Classement par familles « comportementales » des polluants organiques....</b>	<b>21</b>

## **Introduction générale :**

La protection de l'environnement nécessite la réalisation de nombreuses études sur les risques de pollution qu'engendrent les activités humaines, industrielles entre autres, peuvent être variés.

La pollution souterraine, qui ne sont pas immédiatement visibles, sont fréquentes sur les sites industriels anciens, friches, dépôts de déchets ou décharges sauvages. La responsabilité de l'exploitant peut être engagée par des impacts à long terme sur l'environnement ou sur les tiers. Un diagnostic doit être mis en œuvre lors d'une transaction, reconversion, extension, cessation d'activité ou par requête du préfet.

La croissance exponentielle de la démographie et des activités industrielles et agricoles au cours de ce siècle a entraîné dans certaines régions une pénurie quantitative et qualitative des eaux mobilisables.

Dans notre pays cette ressource est actuellement exposée à différentes formes de pollution, qui modifient sa qualité et restreignent son utilisation. Ceci peut entraîner des conséquences fatales sur l'homme et son activité, aussi est-il nécessaire de la protéger en prenant toutes les dispositions nécessaires à la localisation de toutes les sources de pollution et leurs éliminations, en assurant une utilisation et une gestion rationnelles.

La caractérisation de la pollution est basée sur l'étude de deux types d'éléments indicateurs de pollution : les éléments indicateurs de la pollution organique (ammonium, nitrite, etc.) et les éléments indicateurs de pollution métallique (micropolluants).





# Chapitre 1 : Généralité sur la pollution de l'eau

## I.1 Introduction :

L'eau est une substance unique parce qu'elle se renouvelle et se nettoie naturellement en permettant aux polluants de s'infiltrer (par le processus de sédimentation) ou de se détruire, en diluant les polluants au point qu'ils aient des concentrations qui ne sont pas nuisibles. Cependant, ce processus naturel prend du temps et devient très difficile lorsqu'il y a une quantité importante de polluants qui sont ajoutés à l'eau. Les gens utilisent de plus en plus des matières qui polluent nos sources d'eau potable. Dans les neuf des dix dernières années, des algues bleues-verts sont apparues dans le nord du lac Winnipeg. Ils ont causés un excès de phosphore dans l'eau. L'utilisation d'engrais est 15 fois plus importante qu'en 194. La fermeture de plusieurs plages devient de plus en plus commune. La liste des polluants est longue et les signes de la pollution de l'eau sont évidents, mais un problème majeur reste : nous déposons des polluants dans la petite partie de la planète qui nous est bonne à boire.

## I.2. La définition de la pollution :

On appelle pollution de l'eau toute modification défavorable chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet nocif sur les êtres vivants qui consomment cette eau. Quand les êtres humains consomment de l'eau polluée, il y a en général des conséquences sérieuses sur leur santé. La pollution de l'eau peut aussi rendre l'eau inutilisable pour l'usage désiré.

## I.3. Les sources de la pollution :

Origine	Sources potentielles de contamination des eaux souterraines			
	Municipal	Industriel	Agricole	Individuel
Sur ou près de la surface	pollution de l'air  déchets municipaux  sel pour le dégivrage des	pollution de l'air  produits chimiques: stockage et flaques  carburants :	pollution de l'air  flaques chimiques  engrais  pesticides	pollution de l'air  engrais  produits d'entretien

## Chapitre 1 : Généralité sur la pollution de l'eau

	<p>routes</p> 	<p>stockage et flaques</p> 		<p>détergents</p> <p>huile de moteur</p> <p>peinture</p> <p>pesticides</p> 
<p>Sous la surface</p>	<p>décharge</p> <p>égouts</p> 	<p>canalisations</p> <p>réservoirs de stockage souterrains</p>	<p>stockage en souterrain</p> <p>réservoirs</p> <p>puits: mal construits ou abandonnés</p>	<p>Système septique</p> <p>puits: mal construits ou abandonnés</p> 

**Tabla. :** Sources potentielles de contamination des eaux souterraines

### I.4. Principaux types de pollution

#### **\*Les types de la pollution :**

**La pollution chimique :** Les pesticides (produits phytosanitaires)

**La pollution physique :** telle que pollution radioactive.

**La pollution biologique :** Elle est liée à de micro-organismes (bactéries, virus...)

**La pollution thermique :** des usines utilisant l'eau comme liquide de refroidissement.

# Chapitre 1 : Généralité sur la pollution de l'eau

---

## **\*Les principaux polluants des eaux :**

### **.Les matières en suspension :**

Les matières en suspension sont de fines particules. Présentes naturellement dans l'eau des rivières pour certains (planctons, débris végétaux fins, minéraux), elles sont aussi des polluants d'origine humaine pour d'autres (matières organiques et minérales). Elles peuvent réduire la transparence de l'eau (turbidité), ce qui est néfaste pour la biologie des cours d'eau.

### **.La polluant organique :**

Certains rejets contiennent des matières organiques, Ces polluants sont biodégradables :

ils peuvent être transformés en eau et en CO<sub>2</sub> par des micro-organismes (bactéries, algues Mais cette biodégradation consomme de l'oxygène, qui ne sera donc plus disponible pour la faune aquatique (poissons, crustacés...). C'est pourquoi l'on mesure souvent la pollution organique par la " demande biologique en oxygène" (DBO), autrement dit la quantité d'oxygène qui sera consommée par des micro-organismes pour sa biodégradation. On mesure également la " demande chimique en oxygène" (DCO), c'est à dire la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder tout ce qui peut l'être par voie chimique

### **.Les matières fertilisantes :**

La présence d'azote et de phosphore en quantité excessive dans les cours d'eau entraîne la prolifération d'algues qui diminuent la luminosité et surtout consomment l'oxygène dissous dans l'eau (phénomène d'eutrophisation). Cette pollution est produite par les eaux usées urbaines, certains effluents industriels, et le ruissellement des eaux chargées d'engrais apportés en excès aux cultures.

### **.Les polluants métalliques et les polluants chimiques persistants :**

Certains polluants chimiques (des pesticides par exemple) sont particulièrement persistants : ils résistent à la dégradation chimique et biologique. Avec les métaux lourds (plomb, mercure, cadmium, cuivre, zinc, nickel, chrome...), ils forment une famille de polluants très dangereux : absorbés par des plantes ou des petits animaux, ils s'accumulent et se concentrent tout au long de la chaîne alimentaire, au sommet de laquelle se trouve l'homme

# Chapitre 1 : Généralité sur la pollution de l'eau

---

## **.Les sels minéraux :**

Les sels minéraux (chlorures ou sulfates de calcium, de magnésium, de sodium ou de Potassium) peuvent voir leur concentration s'élever à la suite de rejets industriels. Cela peut nuire à la biologie aquatique

## **La pollution microbiologique :**

L'eau peut contenir des micro-organismes pathogènes (des virus, des bactéries, des Parasites). Ils sont dangereux pour la santé humaine, et limitent donc les usages que l'on peut faire de l'eau (baignade, élevage de coquillage).

## **I.5.Pollution temporaire et pollution chronique :**

L'émission exceptionnelle de matière polluante à la suite d'un incident (mauvaise manœuvre en usine, accident de la circulation...) peut entraîner un transfert à la nappe et sa pollution dont la durée dépend de son pouvoir d'auto épuration et de sa vitesse de percolation.

Les pollutions chroniques sont plus insidieuses et dommageables; moins spectaculaires, elles peuvent passer inaperçues (pollution agricole par les nitrates; contaminations par hydrocarbures à partir de sols pollués).

## **I.6.Pollution ponctuelle et pollution diffuse :**

Le polluant émis sur une faible surface n'affectera qu'un secteur limité de la nappe, qui pourra s'étendre par diffusion. Seuls les captages à proximité de la zone polluée et en aval seront affectés. Selon la densité et la solubilité du polluant, la zone polluée sera circonscrite ou diffuse, à la surface ou à l'intérieur de la nappe. L'épandage de produits polluants sur une grande surface en revanche affecte l'ensemble de la nappe; elles sont de plus souvent chroniques et déclassent l'ensemble de la nappe pour la production d'eau potable, à moins de traitements adaptés (cas ces pollutions agricoles par pesticides).

## **Chapitre 1 : Généralité sur la pollution de l'eau**

---

### **I.7 pollution linéaire:**

Elle accompagne le trajet des routes et autoroutes, des canaux, des cours d'eau, des voies ferrées.

### **I.8 pollution historique :**

De nombreuses zones polluées l'ont été à une époque où les préoccupations environnementales étaient inconnues ou sommaires: pollution par les terrils de mines, les décharges non contrôlées...

### **I.9. les impacts des déchets domestiques sur la pollution de l'eau :**

La pollution de l'eau par les déchets ménagers sont classée dans les catégories des déchets biodégradables, des polluants chimiques dangereux et le PPCPS. Généralement, les équipements de traitements des eaux usées sont capables de traiter les déchets biodégradables. Les produits chimiques dangereux sont plus difficiles à traiter lorsqu'ils sont dans l'environnement, ils sont plus dangereux et sont évitables. Les produits chimiques comme les nettoyeurs, les teintures, de la peinture, des pesticides et des solvants lorsqu'ils sont utilisés sont des formes substantielles et dangereuse de pollution. Les équipements de traitement d'eaux usées ne sont pas équipés pour traiter le PPCPS dans l'eau. La pollution par le PPCPS est une forme de pollution en croissance. Pour plus d'informations sur les polluants dangereux présents dans les produits ménagers consultez la fiche d'information polluante émergente

### **I.10. les impacts des activités industrielles sur la pollution de l'eau :**

La pollution industrielle peut prendre plusieurs formes. Plusieurs règlements fédéraux existent par rapport aux quantités de polluants qui peuvent être émis par les industries. Dans certains pays, les sociétés peuvent, lorsqu'ils atteignent les quantités maximales de polluants, acheter des "crédit de pollution". La pollution thermique est généralement causée par les industries, mais beaucoup de régions ont imposées une législation concernant les centrales électriques et leur système de refroidissement de l'eau. La construction, les mines et les opérations d'extraction peuvent polluer un grand nombre de lacs et cours d'eau dû aux dépôts de sédiments. Tandis que les pratiques agricoles sont les principaux responsables de la pollution par le dépôt de sédiment les activités de constructions et les mines perdent jusqu'à 70 tonnes de sédiments par acre par année, qui est 15 fois plus élevé que le taux normal.

## **Chapitre 1 : Généralité sur la pollution de l'eau**

---

### **I.11. L'impact de l'agriculture sur la pollution de l'eau :**

Les activités agricoles contribuent à la pollution de l'eau surtout par le dépôt de sédiment et de substance nutritive. L'engrais et le bétail contiennent de l'azote et du phosphore. Quand ces produits sont déversés dans les lacs lors de l'écoulement ils peuvent créer de graves problèmes à ceux-ci comme le développement d'algues. Dans les dix dernières années le nombre de bétail a augmenté de 65% au Manitoba surtout le nombre de porcs et de vaches. Le bétail produit une très grande quantité de déchets et les fermiers utilisent, la plupart du temps, ces déchets comme engrais sur leurs champs. Dans le secteur de Winnipeg des milliers d'hectares de terres cultivées sont disposés pour un écoulement sécuritaire pour prévenir les inondations. Cependant, quand l'eau provenant des terres fertiles se déverse il porte les matières organiques provenant des engrais directement dans le lac Winnipeg. Les pratiques agricoles au Manitoba sont à l'origine de 17% du problème de phosphore. Il y a plusieurs façons de réduire la pollution dû aux pratiques agricoles comme rassembler les déchets provenant des animaux dans une lagune ou la pulvérisation de pesticide en petite quantité lorsque les écoulements sont bas. Les pratiques agricoles sont la cause principale de pollution par dépôt de sédiment. Beaucoup de pays sont susceptibles à cette pollution dû à leur grande quantité d'érosion. L'érosion cause des problèmes autant aux sources d'eaux et aux terres cult

### **I.12. Transfert et évolution des polluants**

#### **I.12.1. Transfert dans le sol**

Un soluté est une substance soluble dans l'eau et qui se meut avec elle par transport convectif et diffusif mais qui peut aussi interagir avec le milieu dans lequel la solution (eau + soluté) se déplace. La solution aqueuse est à la fois vecteur et milieu réactionnel. Les transferts de solutés impliquent différents mécanismes bio-physico-chimiques fortement couplés et très complexes.

Lorsque l'on parle de transfert de polluants dans un sol, on considère dans la plupart des cas, les polluants solubles dans l'eau (cependant les Composés Organiques Volatils peuvent aussi être transportés dans la phase gazeuse). L'eau est donc très importante en tant que vecteur

## **Chapitre 1 : Généralité sur la pollution de l'eau**

---

mais aussi en tant que cible potentielle ou réelle. Le rend quelque peu compte de la complexité des phénomènes qui interagissent entre eux dans le cas particulier des produits phytosanitaires : Une fraction du produit répandu, est assimilée par le sol et les plantes. La fraction Restante, volatilisée à la surface du sol et du feuillage des plantes, retourne à l'atmosphère. Une partie de ces produits sous forme vapeur, est susceptible de se dissoudre dans l'eau de pluie et d'être réinfiltrée dans le sol, pouvant ainsi former des zones d'accumulation. Lorsque la pluie est trop intense pour être entièrement infiltrée dans le sol ou que la zone non saturée disparaît par suite de la remontée de l'horizon saturé, le ruissellement apparaît. Les polluants accumulés dans les couches supérieures du sol peuvent alors être emportés par les eaux de ruissellement, soit sous forme dissoute, soit sous forme adsorbée quand l'eau de ruissellement transporte des particules fines sur lesquelles ces produits sont fixés

La partie des polluants qui parvient à s'infiltrer est soumise à de nombreux phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui sont détaillés ci-après.

### **I.12.2.. Transfert dans la zone non saturée**

Les simulations de transport des polluant dans l'aquifère négligent fréquemment la Présence d'une zone non saturée en eau située entre l'origine de la pollution et l'aquifère. Au mieux, la zone non saturée est prise en compte en introduisant un facteur de retard lié à l'épaisseur et à la teneur en eau moyenne de la zone. La raison essentielle de ce choix est que les outils numériques et les données pertinentes à acquérir sont généralement peu ou pas disponibles. L'objectif des travaux présentés est de réduire les conservatismes liés à notre méconnaissance des mécanismes de transfert de polluants dans la zone non saturée des sols.

Pour cela, un dispositif expérimental sur colonne destiné à caractériser simultanément la teneur en eau et la concentration en soluté (banc gamma métrique) a été mis au point en laboratoire. D'autre part, des expériences en réacteurs ont permis de caractériser les interactions radioéléments/sol dans des conditions physico-chimiques contrôlées. Enfin, ces travaux, focalisés sur la migration du césium et du strontium, se sont appuyés sur des observations de terrain conduites dans le cadre du programme "Site Pilote de Tchernobyl", (CPS). L'utilisation d'outils numériques de résolution des équations du transport en milieu non saturé a permis de définir, de dimensionner, puis d'interpréter

## **Chapitre 1 : Généralité sur la pollution de l'eau**

---

correctement des expériences de laboratoire. Le fonctionnement hydrodynamique des échantillons de sable a été caractérisé par des

Expériences de traçage, réalisées en fonction de la teneur en eau et de la vitesse D'écoulement.

Les paramètres introduits dans les modèles chimie-transport en non saturé ont pu être Estimés à partir des paramètres caractéristiques des réactions d'échanges cationiques, du comportement hydrodynamique du milieu poreux à saturation, et de la valeur de la teneur en eau moyenne dans l'échantillon de sable.

Les résultats obtenus en non saturé ont pu être modélisés en utilisant les outils classiques de calcul de transfert de polluants en milieu poreux saturé

### **I.13. Evolution en milieu saturé**

Ainsi, s'il y a suffisamment de DNAPL, le panache peut parvenir jusqu'à la surface de la nappe et entrer dans la zone saturée. Une fois la frange capillaire passée, le panache plonge rapidement vers le fond et les solvants chlorés atteignent ainsi le toit du substratum et migrent ensuite selon le pendage de celui-ci, à moins d'avoir rencontré précédemment d'autres couches imperméables. Par la suite, la migration du panache est fonction de sa continuité dans les pores du milieu. Si la phase polluée devient discontinue, sa migration sera stoppée. En effet, le milieu est composé de deux phases. La figure 3 montre en outre que la saturation en eau et en phase DNAPL sont dépendantes l'une de l'autre. Lorsqu'une des deux phases possède une faible saturation, l'autre est alors plus mobile et migre plus facilement

### **I.14. Conclusion**

La pollution des eaux souterraines, action d'autant plus nécessaire que la décontamination des nappes d'eaux souterraines polluées, est une entreprise longue et coûteuse, implique que soient élaborées et diffusées à l'attention des services publics responsables aussi bien que des particuliers, des informations décrivant l'existence ou l'absence de facteurs naturels protégeant les nappes d'eau souterraine contre les risques de pollution accidentelle ou due à des négligences, qu'elle soit d'origine atmosphérique ou superficielle, ponctuelle ou extensive.

## **Chapitre 1 : Généralité sur la pollution de l'eau**

---

La notion de vulnérabilité des nappes souterraines à la pollution intègre les différents facteurs physiques et stables déterminant la mesure dans laquelle ces nappes se trouvent, dans les conditions naturelles, plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol.

## Chapitre 2 : Les caractéristiques des polluants

---

### **II.1. Introduction :**

- Les polluants eux-mêmes avec leurs caractéristiques intrinsèques ; on trouvera ainsi les principales propriétés et grandeurs associées à prendre en compte, une classification des polluants basée sur la relation propriétés-comportement, et une description du comportement de familles types. On note ici que cette classification diffère un peu de celle présentée dans le Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués , basée sur les propriétés analytiques.

- Les propriétés du sol et du sous-sol contrôlant la migration des polluants : propriétés hydrogéologiques (milieu poreux : porosité, perméabilité ; milieu karstique, milieu fissuré) ; propriétés physico-chimiques (minéralogie, teneur en eau...) et biologiques (microflore, aptitude à la dégradation) des sols.

Quelques éléments sont fournis, enfin, sur les outils d'évaluation du transfert depuis le terme source vers les nappes, notamment les différents types de modèles numériques, l'incertitude liée aux prévisions, le suivi de l'évolution pour réduire ces incertitudes, ainsi que quelques recommandations pour la réalisation.

Certains paragraphes du texte sont complétés par des descriptions plus techniques en annexe, auxquelles le lecteur pourra faire référence.

### **II.2. caractéristique physico-chimique des polluants :**

#### **II.2.1. principaux polluants :**

Les contaminants étudiés ici sont des substances chimiques organiques (hydrocarbures, solvants, phytosanitaires...) ou inorganiques (métaux lourds, nitrates, ...), à l'exclusion de tout contaminant biologique. Les tableaux I et 2 récapitulent les principales familles de produits considérées comme polluantes.

## Chapitre 2 : Les caractéristiques des polluants

<b>Produits</b>	<b>Polluants types</b>
Métaux lourds Non-métaux et métalloïdes associés	V Cr Mn Co Ni Cu Zn Ag Cd Sn Hg Tl Pb Bi As Se Sb Te
Anioniques et autres	Nitrates, Sulfates, Nitrites Fluorures - Chlorures - Cyanures

**Tabl. 1 - Contaminants inorganiques.**

Les métaux et métalloïdes lourds sont présents de façon naturelle dans les sols. Ils proviennent en grande partie de l'altération de la roche mère du sous-sol. Toutefois, les concentrations les plus importantes rencontrées dans les sols sont liées à l'activité humaine.

La plupart des contaminants organiques sont générés par l'activité humaine. Néanmoins, certains contaminants peuvent avoir une origine naturelle. C'est le cas par exemple des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), présents dans les sols des forêts de sapins ou de hêtres autour des lacs, les suintements sous-marins, les zones constituant des champs pétrolifères.

## Chapitre 2 : Les caractéristiques des polluants

Familles de produits	Polluants types	Molécules chimiques types (abréviations : voir § 2.2.3. et A1.2)	Familles de comportement
<b>Hydrocarbures ou huiles minérales</b> type carburants, combustibles	essence, diesel, fuel, naphta, goudrons...	<ul style="list-style-type: none"> <li>- alcanes (hydrocarbures aliphatiques)</li> <li>- cyclanes (hydrocarbures aliphatiques cycliques)</li> <li>- hydrocarbures aromatiques monocycliques</li> <li>- aromatiques polycycliques (HAP)</li> </ul>	BTEX, certains CAV (volatils)
<b>Produits organiques industriels</b>	Bases de chimie de synthèse  Solvants Traitements	Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques halogénés (chlorés, fluorés, bromés, iodés)  Aromatiques monocycliques, substitués (halogénés, phénolés, nitrés) ou non Aromatiques polycycliques (HAP) Composés Phénoliques, Phalates PCB, PCT, Dioxines, furanes	COV halogénés (volatils) Certains DNAPL (denses) SVOC halogénés (semi-volatils) La plupart des CFC
<b>Phyto-sanitaires</b>	Herbicides, Insecticides, acaricides, raticides et fongicides	Amides, urées, sulfonylurées, triazines, acides aryloxyalkanoïque, diphényl-éther, carbamates... Organophosphorés, organochlorés et pyréthroides, azoles, carbamates, dithiocarbamates...	Principale source de pollution diffuse dans l'environnement.
<b>Autres</b>	Tensioactifs Militaires	Détergents anioniques et cationiques Substances à usage militaire, explosifs	Tensioactifs PEP

*Tabl. 2 - Contaminants organiques par famille de produits.*

### II.2.2. principales propriétés des polluants et grandeur associées :

Un certain nombre de propriétés intrinsèques des contaminants organiques ou minéraux jouent un rôle essentiel dans leur comportement. En effet, elles vont être déterminantes sur la manière dont les contaminants vont migrer, et donc de fait sur les conséquences d'une pollution. Ces propriétés sont usuellement bien documentées.

## Chapitre 2 : Les caractéristiques des polluants

<b>Critères de comportement</b>	<b>Grandeurs caractéristiques</b>	<b>Polluant organique</b>	<b>Polluant inorganique</b>
Capacité à se solubiliser	Solubilité dans l'eau	X	X
Ecoulement vertical du fluide	Densité du liquide par rapport à l'eau Viscosité	X X	X (Hg)*
Capacité à se volatiliser	Tension de vapeur Température d'ébullition Constante de Henry	X X X	
Migration verticale des vapeurs	Densité des vapeurs, par rapport à l'air	X	
Affinité avec l'eau (polarité, hydrophobie)	Coefficient de partage eau/octanol ( $K_{ow}$ )	X	
Capacité à être piégé (adsorption)	Coefficient de partage eau/carbone organique ( $K_{oc}$ ) Coefficient de partage liquide/solide ? ( $K_d$ )	X	X
Stabilité biochimique**	Temps de demi-vie <i>Dérivés</i>	X	X
	<i>Ionisation (pKa)</i>		

Tabl. 3 - Caractéristiques physico-chimiques géant le comportement des contaminants (modifié d'après Pellet, 1994).

## Chapitre 2 : Les caractéristiques des polluants

### Polluants organiques

Noter que si un résultat d'analyse est supérieur à la solubilité du polluant, c'est vraisemblablement que celui-ci s'individualise comme phase séparée (surnageant, émulsion, suspension...).

Une solubilité forte (ex.: phénols) constitue un facteur aggravant des pollutions (dispersion accélérée dans l'eau, biodisponibilité fortement accrue). Par contre, les polluants très solubles sont en général plus facilement biodégradables

Paramètre	Symbole	Unité	Critères (à 20 — 25°C)	Interprétation
<b>SOLUBILISATION</b>				
• Solubilité dans l'eau		[mg/l]	S < 150 150 < S < 10 000 S > 10 000	» insoluble à peu soluble » peu soluble à soluble » soluble à très soluble
<b>VOLATILISATION</b>				
• Pression de vapeur	$P_v$	[Pa]	$P_v < 133$ $P_v \geq 133$	» non volatil » volatil
• Point d'ébullition	$T_e$	[°C]	$T_e < 80$ $80 \leq T_e < 200$ $T_e \geq 200$	indicatif  » faiblement volatil »
• Constante de Henry	kH	[Pa.m <sup>3</sup> /mol]	$K_H < 100$ $100 \leq K_H < 500$ $K_H \geq 500$	volatil » très volatil
<b>MIGRATION VERTICALE DES VAPEURS</b>				
• Densité par rapport à l'air	$d_v$	( $d_{air} = 1$ )	$d_v < 1$ $d_v \geq 1$	» mouvement ascendant » accumulation en surface de nappe
<b>MIGRATION VERTICALE DU FLUIDE</b>				

## Chapitre 2 : Les caractéristiques des polluants

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densité par rapport à l'eau</li> <li>• Viscosité</li> </ul>	$d_l$          $u$	$(d_{eau} = 1)$  [cP]	$d_l < 1$  $d_l \geq 1$  $u > 0,9$  $0,9 \leq u < 2$  $U \geq 2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>» flouant au toit de la nappe</li> <li>» écoulement vertical</li> <li>» plus fluide que l'eau</li> <li>» fluidité de l'eau</li> <li>» fluidité de l'huile ou moindre</li> </ul>
<b>PIÉGEAGE (PAR ADSORPTION) DANS LA PHASE SOLIDE</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coefficient de partage octanol-eau (<math>K_{ow}</math>);</li> <li>• ou carbone organique/eau (<math>K_x</math>)</li> </ul>	$K_{ow}/ec$	$\log K_{.ow/Dc}$	$\log K_{ow}/oc < 2$  $2 \geq \log K_{ow}/oc < 4$  $\log K_{ow}/oc > 4$	<ul style="list-style-type: none"> <li>» composé "hydrophile"</li> <li>» "hydrophile" à "hydrophobe"</li> <li>» composé "hydrophobe"</li> </ul>

**Tabl. 4 - Critères d'appréciation du comportement des produits organiques**

Propriété	Signification	Incidence
Solubilité dans l'eau ou hydrosolubilité	Tendance à la mobilisation de la substance par lessivage lors d'épisodes pluviométriques ou par ruissellement	Une forte solubilité constitue un facteur aggravant des pollutions. En revanche, les polluants organiques très solubles sont plus facilement biodégradables
Densité liquide Vapeur		Comportement vis-à-vis de la nappe superficielle ou sous-jacente
Temps de demi-vie	Stabilité	Persistance dans l'environnement

## Chapitre 2 : Les caractéristiques des polluants

<p>Kow (polarité ou hydrophobicité)  - Koc coefficient d'adsorption au carbone organique des sols  - pKa</p>	<p>Rétention</p>	<p>Influe sur la rétention d'un composé par la matière organique des sols, sur sa mobilisation par de l'eau d'infiltration, ou sur son extraction lors des opérations de dépollution</p> <p>Influe aussi sur la biodisponibilité et le potentiel de bioaccumulation.</p> <p>Tendance d'un composé à être retenu par les Sites neutralisables des minéraux des sols, argile notamment</p>
<p>Tension de vapeur à 20°C Point d'ébullition Constante de Henry</p>	<p>Volatilité</p>	<p>Influe sur la manière dont le polluant s'infiltré dans les sols, dont il s'en libère par évaporation naturelle ou dont il en est éliminé lors des opérations de dépollution ; cette propriété est importante pour le choix d'une technique de dépollution.</p>
<p>Viscosité</p>	<p>Vitesse de déplacement</p>	<p>Cinétique du modèle</p>

**Tabl. 5 - Conséquences des propriétés intrinsèques des polluants sur leur comportement.**

### **II.3. Comportement des polluants par famille :**

#### **II.3.1. Les métaux et métalloïdes lourds :**

##### **a) Définition**

L'expression « métal lourd » désigne pour les chimistes des métaux de numéro atomique élevé, de densité supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup> et qui forment des sulfures insolubles. Le cadmium, le manganèse, le cobalt, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel et le zinc sont les métaux lourds les plus souvent rencontrés dans les sols.

## Chapitre 2 : Les caractéristiques des polluants

Dans le domaine de l'environnement, on associe fréquemment aux métaux lourds l'arsenic, qui est un métalloïde lourd. L'arrêté du 2 février 1998, qui définit les éléments devant faire l'objet d'un contrôle pour les installations classées, prend en compte Cd, Mg, Ni, As, Co, Pb, Sb, Cr, Cu, I, V, Sn, Se, Te, 7n, Tl.

H	Elément															He					
Li Be																B	C	N	OF		Ne
Na Mg																Al	Si	P	S	Cl	Ar
K Ca Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
Rb Sr Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
Cs Ba La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
Fr Ra Ac	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr							

Métaux lourds

Non métaux et métalloïdes

Fig1.- Métaux lourds dans la classification périodique

### • Origine

Rappelons tout d'abord que les métaux et métalloïdes lourds sont présents de façon naturelle dans les sols. Ils proviennent en grande partie de l'altération de la roche mère du sous-sol. Toutefois, les concentrations les plus importantes de métaux lourds dans les sols sont liées à l'activité humaine : stockage de déchets industriels et urbains (mines et fonderies de métaux non ferreux, décharges publiques) ; pratiques agricoles (pratique de fertilisation à l'aide de compost urbain, de déjections animales ou de boues de station d'épuration) ; pollutions dues à des retombées atmosphériques (essence au plomb, poussières des industries métallurgiques, incinération des ordures ménagères,).

## Chapitre 2 : Les caractéristiques des polluants

---

### **II.3.2. Les autres polluants inorganiques :**

#### **a) Définition**

Certains composés inorganiques sont susceptibles d'être considérés comme des contaminants, dans la mesure où leur présence dans l'eau souterraine *est* susceptible de la rendre impropre à la consommation humaine. Citons :

- Les nitrates et nitrites
- Les fluorures
- Les cyanures

#### **Origine**

#### **Principales propriétés physico-chimiques**

- ❖ Les nitrates, nitrites et cyanures sont largement solubles dans l'eau dans les conditions physico-chimiques usuelles. Lorsqu'ils sont exposés sous forme solide au ruissellement, ils sont peu à peu dissous et entraînés par les eaux.
- ❖ Les nitrates et nitrites sont stables en tant que tels, et ne se dégradent que sous l'effet de réactifs oxydoréducteurs ou d'actions bactériennes.
- ❖ Les cyanures se dégradent rapidement sous l'effet de l'acidité du sol.

### **II.4. Les composés organiques : questions de nomenclature et de classification (DNAPL, COV, etc.) :**

#### **a) Définitions et classification**

Ces dénominations qui portent parfois à confusion ne reposent pas sur une classification chimique, mais proviennent souvent de regroupements analytiques (produits s'analysant de façon similaire) ou hydrochimiques (produits se comportant de façon similaire dans les nappes). Tentons ici de fournir la définition des principales familles et de préciser leur contenu. Les définitions anglophones proviennent de la Federal Remediation Technologies Roundtable.

## Chapitre 2 : Les caractéristiques des polluants

FAMILLES	Composés	Principales caractéristiques
<b>IMMISCIBLES DANS L'EAU</b>	<b>NAPL(Non-Aqueous Phase Liquide): Contaminants Liquides Organiques Ipo- lubies (dans l'eau) ou Immiscibles</b>	<b>cous les composés organiques se séparant de l'eau (immiscibles) et formant une phase liquide distincte des nappes_</b>
<b>DNAPL*</b>	<b>denses</b>	<b>densité supérieure à 1, migrent au fond des nappes</b>
<b>LNAPL</b>	<b>légers</b>	<b>densité inférieure à 1, surnagent sur les nappes et sur les eaux de surface.</b>
<b>VOLATILS</b>		<b>formant une phase vapeur distincte</b>
<b>COV (en anglais : VOC)**</b>	<b>non-Halogénée Volatil Organique Compounds (groupe hétérogène de composés organiques)</b>	<b>forte volatilité, et/ou le comportement hydrochimique (circulation sous la double forme liquide et vapeur dans la porosité du sol)_</b>
<b>Les COV halogénés</b>	<b>(en anglais - Halogenated VOCs)</b>	<b>faible solubilité, faible miscibilité et propriétés variant avec la masse moléculaire (densité, volatilité).</b>
<b>SVOC ***</b>	<b>(en anglais : Semi-volatil organique Compounds)</b>	<b>volatilité moindre, tension de vapeur inférieure à 5,35 bar autres propriétés et leur comportement diffèrent peu de ceux des COV La circulation sous la double forme liquide et vapeur dans la porosité du sol reste possible mais la volatilisation est bien moindre.</b>
<b>SVOC halogénés</b>		<b>faible solubilité, faible miscibilité et propriétés variant avec la masse moléculaire (densité, volatilité).</b>
<b>CAV ***'</b>	<b>(composés aromatiques volatils)</b>	<b>forment un groupe voisin des COV, de composés aromatiques défini par les propriétés physiques (forte volatilité, cf. 2.1.6) et/ou le comportement hydrochimique (circulation sous la double forme liquide et vapeur dans la porosité du sol).</b>

## Chapitre 2 : Les caractéristiques des polluants

<b>BTEX</b>	acronyme formé des initiales des CAV les plus usuels : Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylène.	
<b>AUTRES</b>		
<b>Phénols</b>	Composés phénoliques chlorés et non chlorés	Solubilité non négligeable
<b>PCB</b>	Polychlorobiphényles	
<b>Carburants lourds</b>	goudrons, naphta, fuel lourd, (HAP)	s'accumuleront au plancher de la nappe (densité supérieure à 1).
<b>Carburants légers</b>	essence, diesel (BTEX, CAV) (C5 à C26)	s'accumuleront sélectivement en surface de la nappe (densité inférieure à 1)

**Tabl. 6 -Classement par familles « comportementales » des polluants organiques.**

### **II.5. Conclusion :**

La pollution des eaux souterraines et des eaux en général s'effectue soit par infiltration d'eaux météoriques chargée en polluants, soit par déversement direct de polluants liquides à la surface du sol ou encore par contamination indirecte par les eaux de ruissellement qui sont chargées en produits plus ou moins toxiques et qui peuvent atteindre la nappe en traversant la zone non saturée ou par l'intermédiaire des cours d'eau. Après avoir atteint la nappe le polluant est entraîné par l'écoulement de celle-ci vers l'aval et c'est au cours de ce trajet qu'il voit sa concentration varier en fonction de la circulation des eaux souterraines et des différents facteurs biophysico-chimiques pouvant affecter sa mobilité et sa toxicité.

## **Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution**

---

### **III.1. Introduction :**

- quel est le rôle joué par la nature du milieu sur les processus qui influencent l'évolution de la pollution quels sont les processus physiques et/ou chimiques qui, dans une phase donnée (eau ou phase non aqueuse), déterminent le transport d'un polluant et l'évolution du panache de pollution ;quels sont les processus physiques et/ou chimiques qui, au contact entre cette phase liquide et les solides environnants, déterminent la répartition du polluant entre phase liquide et solide

Les définitions précises et les modes de calcul ne sont pas précisés ici afin de faciliter la lecture. Ces éléments sont reportés .Tout au long du trajet du polluant de la surface vers les nappes, des processus physiques et chimiques d'intensité variable selon la nature des milieux traversés et les caractéristiques du polluant contribueront à réduire les niveaux de concentration initiaux.

### **III.2.Facteurs liés a la nature du sol et du sous –sol :**

#### **III.2.1.Lesmilieuxtraversés :**

Selon qu'on aborde la question du point de vue du géologue ou del'hydrogéologue, on définira deux coupures distinctes :

- le sol et le sous-sol, pour le premier, distingués par l'état physique des formations
- la zone non saturée et la zone saturée, pour le second, par référence à la position du toit de la nappe la plus superficielle.

## Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution



Fig. 2 - Relations entre sol, sous-sol, zone non saturée et zone saturée

Si ce toit se situe dans le sous-sol, le sol sera situé dans la zone non saturée (ZNS), et il existera des horizons du sous-sol appartenant à la ZNS. Si ce toit est superficiel (nappe affleurant, zone marécageuse, etc.), tout ou partie du sol appartient à la zone saturée,

### .III.2.2Le sol :

Le sol est la couche la plus superficielle de la géosphère, il repose sur le sous-sol rocheux. Un sol est un milieu hétérogène, polyphasé, dispersé et poreux. C'est le substrat habituel de la croissance des plantes. Ses principaux constituants sont rappelés en ann.

Sol : Couche supérieure de la croûte terrestre composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes (selon le projet de norme internationale ISO / TC 190 sur la qualité des sols)

Ce projet de norme rappelle aussi que « dans le contexte de la protection du sol il

faut prêter attention au sol superficiel, au sous-sol et aux couches plus profondes, et aux gîtes minéraux associés à l'eau souterraine. Il faut aussi faire attention aux matériaux d'origine anthropique introduits dans ou sur le sol, comme les déchets domestiques ou industriels, les boues de curage d'eau et les résidus miniers. Ceux-ci sont importants, parce qu'ils peuvent influencer certaines fonctions du sol et constituer une source de substances dangereuses pour le sol et affecter les sols naturels voisins. Les processus pédologiques peuvent, en temps et lieu, intervenir dans ces matériaux anthropiques de la même manière que dans la roche mère naturelle et les dépôts de surface.

## **Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution**

---

Sol, sens pédologique : partie des formations naturelles superficielles soumises aux processus pédologiques et subissant des évolutions plus ou moins importantes dans la composition chimique et la constitution minéralogique, le type de sol qui va progressivement prendre naissance dépendra (1) de la nature de la roche mère de départ (conditions lithologiques), (2) de la nature des réactifs d'attaque (conditions physico-chimiques), (3) de la valeur des paramètres à l'équilibre thermodynamique (conditions thermo hydriques)

Sol, sens hydrogéologique : Partie des formations pédologiques et lithologiques comprises entre la surface et le niveau de la nappe phréatique (zone non saturée), dont les fonctions ou l'utilisation sont susceptibles d'être affectées, de façon négative, du fait de l'apport de substances ou polluants dangereux.

Le sol contient une quantité variable d'eau, issue des précipitations, de l'infiltration ruissellement. Cette eau est en interaction permanente avec l'atmosphère (infiltration des pluies, échanges avec les plantes, évaporation.) et avec l'eau souterraine (nappes).

### **III.2.3Le sous-sol :**

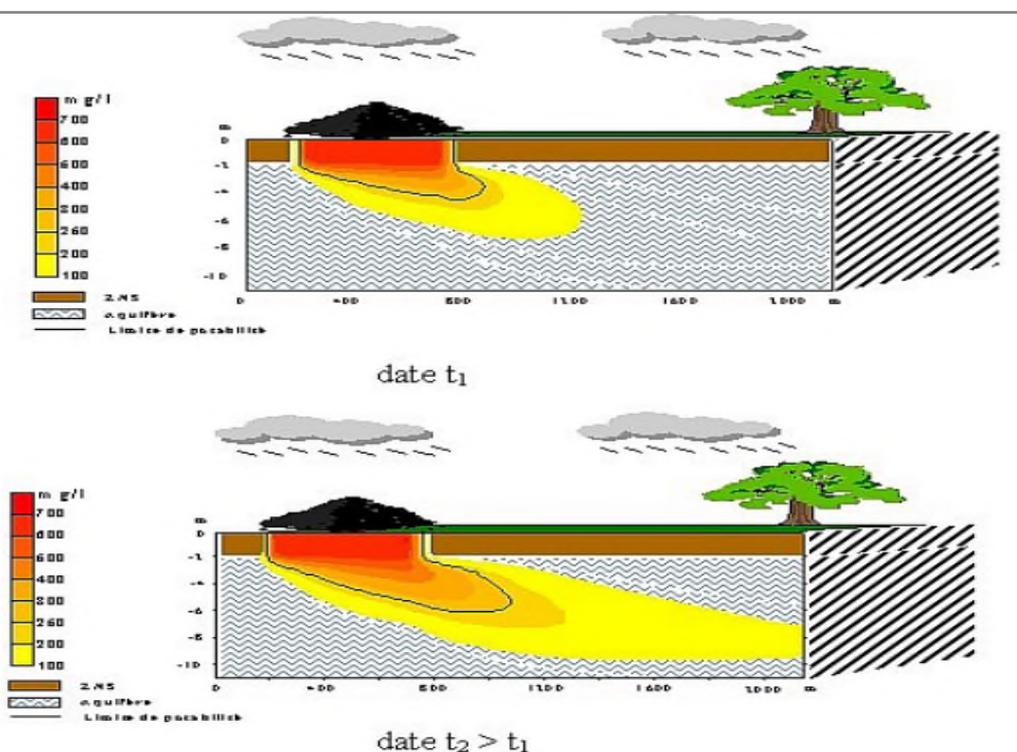
Le sous-sol comprend les autres couches de la géosphère, mais on ne s'intéressera ici qu'au sous-sol rocheux contenant une nappe d'eau (appelé aquifère) et au sous-sol rocheux compris entre les aquifères et le sol.

Les constituants du sous-sol sont les roches, sous leur forme initiale ou sous forme de produits d'altération. L'épaisseur de la zone d'altération est extrêmement variable. Elle peut être nulle ou peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Les roches « fraîches » non altérées sont reportées sur les cartes géologiques, que l'on consultera pour connaître la nature du sous-sol en un point donné. Les cartes disponibles en France ont une échelle de 1/50 000, ce qui ne permet pas d'y représenter les couches ou formations rocheuses de faible extension (moins de 250 m). Ceci peut expliquer des anomalies rencontrées lors des sondages de reconnaissance.

## Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution

### III.3. Principaux types de milieux souterrains :

Qu'il s'agisse d'une pollution diffuse de type agricole (nitrates par exemple) ou d'une pollution accidentelle (déversement d'hydrocarbures), le schéma général de contamination des eaux est le même le point de départ est la surface du sol puis le transit vertical dans la zone dite non saturée (ZNS) surplombant la nappe. l'arrivée à la nappe puis le cheminement subhorizontal du polluant dans celle-ci avec également progressif du panache de pollution (beaucoup plus prononcé suivant ta direction de l'écoulement) Ce schéma très général de contamination *des* eaux est illustre par la figure ci-dessous.



**Fig. 3 - Exemple de révolution d'un panache de pollution à Laval d'une décharge (modélisation numérique en coupe verticale réalisée avec logiciel MARTHE du BRGM.).**

Sous la zone non saturée, on peut rencontrer trois grands types de milieux souterrains pouvant contenir des nappes, plus ou moins vulnérables à une pollution suivant leur profondeur et le degré de fissuration de la zone non saturée. Le cas des nappes captives, protégées par des couvertures très peu

## Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution

---

perméables (les éponges) qui les rendent moins vulnérables à la pollution<sup>6</sup>, ne sera pas abordé dans ce guide. Dans tout ce qui suit, il ne sera donc question que de nappes libres.

La nature même des milieux traversés déterminera le comportement à grande échelle du transport, en particulier les trajectoires suivies et les ordres de grandeur des vitesses de propagation suivant ces trajectoires. Les grands traits de ces différents milieux dicteront le comportement « en grand » des polluants. En sus, des paramètres physiques du sol et du sous-sol interviennent dans le processus de transport. Ainsi, selon qu'il s'agisse de la zone non saturée, d'un milieu poreux saturé en eau, d'un milieu fissuré de socle ou d'un milieu karstique, les caractéristiques de la migration et les méthodes mises en œuvre pour décrire et prévoir le devenir de la migration seront différentes.

### **III.3.1 Lazonenonsaturée :**

La zone non saturée comprend l'ensemble des niveaux du sous-sol et du sol situés au-dessus de la nappe. Ces niveaux sont dits « non saturés » car leur porosité ne contient pas seulement de l'eau, mais également de l'air.

#### **\*Propriétés**

Première étape du parcours, elle est caractérisée par la grande complexité des processus physico-chimiques agissant sur le polluant en particulier dans la zone racinaire (les 30 à 40 premiers centimètres du sol) où se déroule une part importante des processus chimiques et biochimiques.

Dans cette zone, les mouvements de l'eau véhiculant le polluant (pour une pollution miscible) sont eux-mêmes complexes, dépendant de la teneur en eau. Celle-ci varie continûment au cours du temps sous l'influence des cycles pluviométriques et d'infiltration. Ils sont aussi affectés par le degré d'hétérogénéité et le degré de fissuration de la ZNS, ce qui déterminera la plus ou moins grande rapidité de la propagation du polluant jusqu'à la nappe.

## Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution

---

### **III.3.2 Lazon saturée :**

Sous la zone non saturée, on peut rencontrer trois grands types de milieux souterrains pouvant contenir des nappes, plus ou moins vulnérables à une pollution suivant leur profondeur et le degré de fissuration de la zone non saturée :

- les milieux poreux ;
- les milieux fissurés ;
- les milieux karstiques.

### **III.4. Caractéristiques Hydrauliques Du Milieu :**

Le transport d'un polluant est indissociable de l'écoulement du fluide qui le véhicule (eau pour une pollution miscible et phase non aqueuse). Le devenir d'une pollution est donc sous la dépendance des lois et des paramètres descriptifs de l'écoulement de la phase fluide.

Ces lois, variables et paramètres, en particulier la loi de Darcy et la perméabilité, revêtent des formes différentes selon le nombre de phases et selon que l'on étudie la pollution dans la zone non saturée (sous-entendu partiellement en eau) ou dans la nappe. Dans ce qui suit, on rappelle donc quelles sont les grandeurs hydrodynamiques (variables et paramètres) dont la connaissance est nécessaire pour prévoir l'évolution d'une pollution en distinguant le cas des polluants miscibles à l'eau (une seule phase à considérer : la phase eau) de celui des polluants non miscibles (deux ou plus de deux phases à considérer suivant les cas).

#### **III.4.1 Écoulement d'une seule phase (pollution miscible) : cas des nappes**

La variable descriptive des écoulements est la charge hydraulique, somme d'un terme de pression et d'un terme gravitaire. Dans le cas d'une nappe libre, la charge est égale à la cote de l'eau dans un piézomètre calculée par rapport à un plan de référence (en général, le substratum de l'aquifère).

Des mesures synchrones (autant que possible) faites à partir d'un réseau de piézomètres captant une nappe permettent d'établir la carte piézométrique de cette nappe à la date des mesures.

## Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution

---

Une telle carte, si elle est suffisamment précise et si les fluctuations de niveau de la nappe ne sont pas trop importantes, fournira une indication sur la direction probable que suivra le polluant une fois dans la nappe. Si l'on dispose par ailleurs d'une valeur ou d'une estimation probable de perméabilité, il est possible d'évaluer le temps que mettrait une particule de polluant se déplaçant à la vitesse moyenne de l'eau pour parvenir à un point donné de sa trajectoire estimée.

Pour cette évaluation, on utilise la loi de Darcy qui relie le flux d'eau passant au travers d'une section de la nappe à la perméabilité du milieu et au gradient de charge.

La vitesse de Darcy est en fait une vitesse fictive, calculée comme si toute la section était offerte à l'écoulement. Pour obtenir la vitesse réelle, il faut tenir compte de la section à travers laquelle l'eau passe réellement. Le rapport de cette section réelle à la section totale définit une porosité appelée porosité cinématique. Le temps de parcours (à la vitesse moyenne de l'eau) est directement proportionnel à la porosité cinématique et il est nécessaire d'approcher au mieux ce paramètre important du transport.

### **III.4.2Écoulement d'une seule phase (pollution miscible) : cas de la zone nonsaturée**

Dans ce cas, deux phases occupent l'espace poral: l'air et la phase aqueuse. On considère que le seul fluide en déplacement est l'eau (transportant le polluant), et que l'air est immobile et à la pression atmosphérique. Les paramètres d'un tel milieu sont fonction de sa teneur en eau, variable dans le temps et dans l'espace.

#### **\*Pressioncapillaireetsuccion**

Pour traduire l'existence de forces capillaires dans un matériau non saturé on introduit la notion de pression capillaire, souvent exprimée sous la forme d'une hauteur d'eau équivalente. Dans la zone non saturée, la pression de l'eau est une grandeur négative. Sous forme positive, on l'appelle succion.

Dans la zone non saturée, pression et teneur en eau sont deux grandeurs qui dépendent l'une de l'autre et la relation de dépendance est une caractéristique spécifique du sol. Les forces

## Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution

capillaires dépendent en effet de l'organisation de l'espace poral du sol (structure du sol) et de la surface spécifique de ses particules constitutives (texture du sol). Pour des succions élevées, la teneur en eau est plus forte dans un sol à texture fine (argileux par exemple) que dans un sol à texture grossière (sableux par exemple) et la décroissance de la succion, lorsque la teneur en eau augmente, est beaucoup plus progressive avec le premier type de sol qu'avec le second, comme l'illustre le schéma ci-dessous :

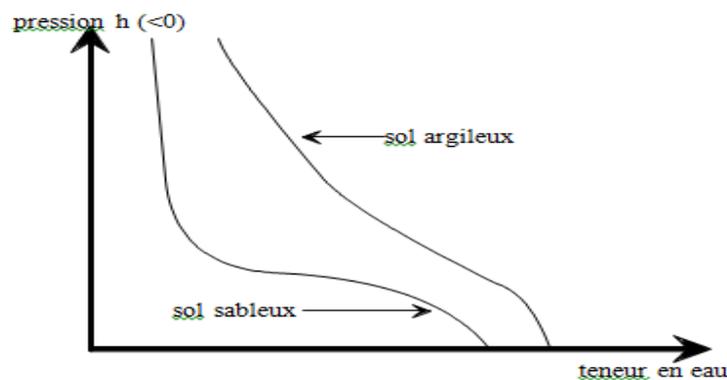


Fig4. - Relation entre pression et texture du sol dans la ZNS.

### III.4.3 Milieu poreux saturé par plusieurs phases (pollution non miscible) :

Les variables utilisées pour décrire les écoulements sont dans ce cas les pressions dans chaque phase et les saturations. Les pressions de chacun des fluides présents sont souvent exprimées en hauteur d'eau équivalente. Dans un volume de terrain de porosité donnée, la saturation de chaque fluide est le rapport du volume occupé par ce fluide au volume des pores.

A l'interface entre deux fluides non miscibles, il existe une différence de pression appelée pression capillaire. Par convention, la différence de pression s'écrit entre le fluide non mouillant et le fluide mouillant occupant préférentiellement les parois des pores. Cette pression capillaire est une fonction de la saturation en fluide mouillant.

On introduit, dans le cas d'un système d'écoulements à plusieurs fluides, la notion de perméabilité relative pour tenir compte de l'influence mutuelle de ces fluides sur la perméabilité.

## Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution

### III.4.4 Mécanismes physiques affectant le transport :

Les chapitres précédents étaient consacrés aux variables, paramètres et lois de comportement régissant les écoulements d'un ou de plusieurs fluides en milieu poreux saturé ou non.

Dans ce chapitre, on examinera quels sont les mécanismes physiques qui, dans une phase liquide donnée (eau ou phase non aqueuse), déterminent le transport d'un polluant et l'évolution du panache de pollution. Pour simplifier, il sera uniquement question des nappes mais les mêmes mécanismes de transport s'appliquent aussi dans la zone non saturée et aux pollutions non miscibles. Certains mécanismes présentés ici sont détaillés en annexe 3

### III.5 Convection et temps de parcours :

Un flux d'eau  $Q$  (en m<sup>3</sup>/s) passant au travers d'une section  $S$  de milieu poreux véhicule une concentration  $C$  (en kg/m<sup>3</sup>). Par définition, le flux de masse par convection au travers de la section  $S$  est le produit du débit  $Q$  par la concentration  $C$  :

$$\Phi_{\text{conv}} = Q.C [\text{kg /si}]$$

L'évaluation du transport par convection fait appel à différentes notions

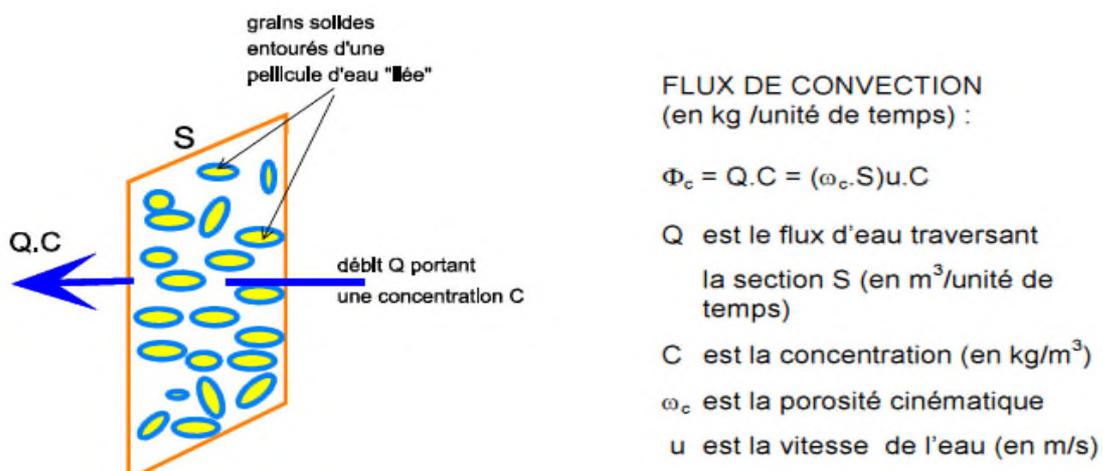


Figure 5 : Flux de masse par convection au travers d'une section  $S$  de milieu poreux.

## Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution

---

### III.6 Diffusion :

La diffusion recouvre l'ensemble des phénomènes qui tendent à homogénéiser les Concentrations dans un fluide où existent des gradients de concentration. A la dispersion cinématique décrite précédemment, résultant de l'écoulement du fluide on ajoute la diffusion moléculaire, phénomène physique qui provient de l'agitation moléculaire. On utilise souvent le terme de diffusion pour parler à la fois de la dispersion cinématique et de la diffusion moléculaire. La diffusion moléculaire préexiste dans un fluide au repos et provient de la distribution non homogène du soluté dans la phase fluide. Le soluté va migrer des zones plus concentrées vers les zones moins concentrées afin d'établir une distribution de concentration uniforme. Ce mouvement est généré par la pression osmotique, commandé par le gradient de concentration qui varie d'une zone à l'autre du milieu poreux. On modélise le phénomène de diffusion (dispersion cinématique et diffusion moléculaire) par la loi de Fick explicitée précédemment où on considère que le coefficient de diffusion  $D$  (coefficient de diffusion apparent), est la somme du coefficient de dispersion cinématique  $D_{cin}$  et du coefficient de diffusion moléculaire  $D_{mol}$ .

$$D = D_{cin} + D_{mol}$$

La dispersion cinématique étant liée à la vitesse d'écoulement,  $D_c$ , devient nul quand la vitesse de l'écoulement tend vers 0. Le coefficient de dispersion cinématique est lié à la vitesse de l'écoulement par une loi semi-empirique

$D_{cin} = \lambda V$  ; où  $V$  est la vitesse de l'écoulement.

Le coefficient  $h$  est appelé la dispersivité et a la dimension d'une longueur. Sa valeur déterminée au laboratoire est de quelques centimètres; in situ elle de l'ordre du mètre voire des centaines de mètres suivant l'hétérogénéité de la formation (Lallemand-Barrès et al. Cités par de Marsily). La dispersivité peut varier avec la direction de l'écoulement. L'étude du transport dispersif nécessite la mesure du coefficient de diffusion moléculaire et de la dispersivité. Le coefficient de diffusion du soluté dans le sol est différent du coefficient de diffusion des ions dans l'eau appelé coefficient de diffusion libre.

## Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution

---

### III.7Dispersion :

La dispersion est liée à l'hétérogénéité du milieu poreux à petite et grande échelle ; elle est à l'origine de « l'étalement » d'un panache de pollution et contribue à diluer les concentrations.

De même qu'il existe un flux de convection, il existe aussi un flux de dispersion, qui est proportionnel au gradient de la concentration (loi de Fick). Il existe un coefficient de dispersion longitudinale (suivant le sens de l'écoulement) et un coefficient de dispersion transversale. Les coefficients de dispersion sont proportionnels à la vitesse effective de l'eau. Les notions de dispersivité et d'effet d'échelle, et les hypothèses sous-jacentes à l'équation classique du transport sont abordées

### III.8Adsorption :

Dans un aquifère certains éléments (ou composés) migrent, en première approximation, à la même vitesse que l'eau, tandis que d'autres migrent plus lentement, voire même très lentement. Le tritium, les nitrates, les chlorures, appartient à la première catégorie, le Plutonium et le Césium par exemple à la seconde.

L'affinité d'un élément en solution pour la matrice solide peut être représenté par un coefficient de sorption nommé  $K_d$  (inverse d'une masse volumique, souvent exprimé en  $\text{inl/g}$  et appelé aussi coefficient de distribution).

Ce coefficient  $K_d$  correspond à l'hypothèse selon laquelle, pour un élément donné, à tout instant la concentration dans l'eau est proportionnelle à la quantité adsorbée sur la matrice de l'aquifère ; le coefficient de proportionnalité est précisément  $K_d$ , et on suppose en plus qu'il ne varie pas dans le temps. Dans ces conditions, l'équation du transport se trouve très simplifiée.

Généralement, on combine ensuite simplement la valeur de  $K_d$  avec celle du rapport solides/vides de l'aquifère (ce qui implique la porosité du milieu ainsi que, pour des raisons d'unités, la densité ou la masse spécifique de la matrice solide). On obtient alors un nouveau coefficient  $R$  appelé facteur de retard. L'emploi de ce nouveau coefficient permet de décrire de façon très simple

## Chapitre 3 : Processus qui influencent l'évolution de la pollution

---

La migration d'un élément qui tend à se fixer sur la matrice solide de l'aquifère : par rapport à un élément n'ayant pas d'affinité pour cette matrice solide, comme le tritium contenu dans l'eau, tout se passe comme si la migration de cet élément était retardée d'un facteur  $R$ . Par exemple si  $R = 10$ , tout se passe comme si la vitesse de migration de l'élément en solution était 10 fois plus lente que celle de l'eau de l'aquifère.

### **III.9 Principaux mécanismes du transport de masse :**

La propagation d'éléments dissous dans une nappe est sous la dépendance des principaux mécanismes suivants :

- 1) La convection, qui est l'entraînement de l'élément à la vitesse moyenne de l'eau.
  - 2) La dispersion, qui provoque l'étalement du nuage de pollution sous l'effet de l'hétérogénéité du milieu.
  - 3) Les échanges avec la phase solide et la phase eau immobile. Ces échanges induisent un retard à l'avancement du polluant et atténuent les concentrations. La vitesse de ces échanges est réglée par une cinétique.
- Dans certains cas, lorsqu'il y a adsorption des éléments sur la matrice solide, il est possible de rendre compte du retard à l'avancement par l'intermédiaire d'un simple coefficient appelé facteur de retard.
- 4) La dégradation ou la biodégradation pour certains éléments.
  - 5) et pour les radionucléides, la décroissance radioactive, qui provoque une diminution de la concentration durant le trajet avec éventuellement l'apparition d'éléments dérivés (filiation radioactive).

### **III.10 Conclusion :**

Les propriétés du sol et du sous-sol qui influencent le transfert des contaminants vers les nappes sont la porosité, le degré de saturation, la texture, la composition chimico-minéralogique, l'acidité, l'état redox, la teneur en matière organique, la fissuration et les discontinuités dans les milieux rocheux.

Ces différentes propriétés sont détaillées ci-après :

## Chapitre 3 :Processus qui influencent l'évolution de la pollution

---

- > La porosité du sol est très variable suivant le type de sol (sableux, silteux, argileux) et son état de compacité. Généralement, près de la surface, le sol n'est pas saturé, de l'eau et de l'air y coexistent dans les pores. Lorsqu'il y a un déficit en oxygène certaines réactions anaérobies peuvent être à l'origine de la dégradation de certaines substances en sous-produits potentiellement toxiques ;
- > La texture d'un sol peut être de deux natures. Peu compact tel qu'un sol grossier et sableux bien aéré, drainé et perméable. L'eau polluée ou non y circule rapidement. Au contraire, un sol fin argileux est beaucoup plus imperméable ;
- > La composition chimico-minéralogique influe fortement sur l'aptitude du sol à retenir momentanément ou à fixer les polluants apportés par L'acidité du sol et son état rédox influent sur la spéciation des polluants. Ils influent directement sur la mobilité des polluants ;
- > La matière organique fixe les polluants et retient momentanément la pollution. Les réactions biochimiques entraînent la dégradation des polluants.
- > La fissuration et les discontinuités en milieu rocheux représentent des voies de propagation rapides de la pollution, avec de plus une faible capacité du milieu à retenir la pollution.
- > Par ailleurs, la profondeur de la nappe phréatique est très importante. Plus elle est profonde, plus la filtration par les terrains superficielle est importante. Si la pollution atteint la surface de la nappe, la pollution peut, suivant les cas, si elle est peut dense et mobile, surnager et se propager en panache suivant les lignes d'écoulement de la nappe, ou au contraire si elle est dense, descendre vers la base de l'aquifère et s'y accumuler en amas qui évoluera lentement infiltration.

## **Conclusion générale :**

Le présent travail a pour objectif de faire le point sur les différents facteurs qui influent sur le comportement des polluants dans les sols et notamment ceux qui contrôlent le transfert des polluants vers les ressources en eau souterraine. Le comportement d'un polluant dans le sol et dans le sous-sol dépend directement de ses propriétés intrinsèques. Tous les polluants présents lors d'une pollution diffuse ou chronique ne se comporteront donc pas de la même manière.

L'impact de ces polluants sur le milieu souterrain dépend en outre de ses caractéristiques spécifiques à l'échelle locale (perméabilité, porosité, teneur en eau, etc.), ainsi que des variations spatiales de ces grandeurs. La connaissance de ces caractéristiques locales nécessite des études de terrains relativement détaillées ; c'est l'objet du diagnostic approfondi préalable à l'évaluation détaillée des risques sur les ressources en eau.

D'une manière générale, l'interaction entre les polluants et les milieux traversés (sol et sous-sol) aboutira à ralentir la migration du polluant. Le transfert de la pollution sera donc plus lent ou atténué par rapport au transfert de l'eau à travers le milieu. Cette atténuation, ou ce retard, dépend à la fois des propriétés des substances polluantes et de celles des milieux. Ces propriétés doivent être reconnues avant le choix d'un modèle de transfert.

Un aspect délicat de l'EDR-Eau est le choix du modèle de transfert, utilisé pour prévoir l'évolution de la pollution et son impact potentiel sur une cible vulnérable. D'une manière générale, on s'attachera à sélectionner ce modèle sur la base d'un modèle conceptuel du site établi sur la base des résultats de la phase de diagnostic, plutôt qu'à choisir *a priori* un outil de calcul, et supposer en quelque sorte que « le terrain colle au modèle ».

## Références bibliographiques

- BRGM,2001 : - Guide sur comportement des polluants dans les sols et les nappes RP-50662-France , 17p
- François Renard-2002 : Master Professionnel Cours D'hydrogéologie- France ,49p
- RECORD,1997 :Simulation des transferts de polluants dans les sols- Etat de l'art ETUDEN° 95-0504/1A, École des Mines de St Etienne France,15p
- <http://www.lenntech.fr/eaux-souterraines/pollution-sources.htm#ixzz3VTvhhNwd>  
/14.04.2015
- Guide Technique N°7-2002- : Pollution Toxique et écotoxicologie ,LYON France ,45p
- [http://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub\\_302\\_365997./26.04.2015](http://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_302_365997./26.04.2015)