

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie des Procédés

Niveau : 3^{iem} Licence

Cours Pollution (Air, Eau, Sol).

Programme du Matière.

Objectifs de l'enseignement:

Faire découvrir les problèmes de pollution et de gestion de notre environnement (causes, conséquences, remèdes, influences de la gestion de notre environnement) ; La partie «pollution des sols" est construite de manière à être accessible sans connaissances préalables en sciences du sol.

Connaissances préalables recommandées:

Connaissances de base en chimie.

Contenu de la matière

Chapitre 1 :

(5semaines)

Pollution des Eaux : Le Cycle de l'eau ; Mesure de la qualité des eaux ; Sources, mécanismes et symptômes de la pollution des eaux courantes et des lacs ; Influence de la pollution sur les êtres vivants ; Oxygénation et désoxygénation, eutrophisation ; Notions sur le traitement et épuration des eaux usées ; Prévention de la pollution des eaux.

Chapitre 2 :

(5semaines)

Pollution des Sols : Bases en sciences du sol ; causes et conséquences de la dégradation/pollution des sols ; Comportement des éléments traces dans le sol ; Comportement des polluants organiques dans le sol ; Analyse de risques et législations ; Les techniques de décontamination et études de cas.

Chapitre 3 :

(5semaines)

Pollution de l'Air : Mise en situation : Environnement-Pollution-Développement durable-Énergie-Consommation d'énergie primaire et émission de CO₂ ; Constat ; Notions fondamentales de l'atmosphère et des paramètres météorologiques ; Evolution de la qualité de l'air et effet sur les organismes ; -Composants chimiques de l'air atmosphérique ; -Les polluants chimiques-Pollution par NO₂ ; Formation des polluants ; Quelques conséquences de la pollution de l'air : Effet de serre -Smog photochimique-Trou d'ozone.

Mode d'évaluation : Examen : 100%.

SOMMAIRE

Chapitre I. La Pollution de l'air

I. Introduction	01
I. 1. Définition	01
I. 2. Introduction sur les inventaires d'émissions	01
I.2.1.Définition	02
I. 2. 2. Principe de l'élaboration de l'inventaire	02
I.3. Substances	03
I.3.1.Introduction	03
I.4. Différents types de polluants	04
I. 4.1.Polluants réglementés	04
I.4.2.Composés organiques	05
I.4.2.1.Composés organiques volatiles - COV	05
I.4.2.2.Produits Organiques Persistants (POP)	05
I.4.2.3.Sources de COV	05
I.4.2.4.Sources potentielles de rejets des HAP	06
I.4.3.Métaux lourds	06
I.5.Effets des différentes substances	07
I.5.1.Effet de serre et changement climatique	07
I.6.Destruction de la couche d'ozone	08
I.7.Acidification, eutrophisation et photochimie	08
I.7.1.L'eutrophisation	08
I.7.2.Pluies acides	09
I.7.2.1.Effets sur les écosystèmes	09
I.7.2.2.Effets sur la santé	10
1.8. Différents types d'émetteurs	12
I.8.1.Les types d'émetteurs	12
I.8.2.Sources non-anthropiques (naturelles)	12
I.8.3.Sources anthropiques	12

Chapitre II La Pollution des eaux.

II. 1. Introduction	13
II.2. Pollution des eaux	13
II.2.1. Généralité	13
II.2.2. Type de pollution (classification selon la répartition géographique)	
II.2.2.1. Pollution ponctuelle	14
II.2.2.2. Pollution diffuse	14
II.2.3. Source de pollution	15
II.2.3.1. Pollution naturelle	15
II.2.3.2. Pollution atmosphérique	15
II.2.3.3. Pollution urbaine	16
II.2.3.4. Pollution industrielle	16
II.2.3.5. Pollution agricole	17
II.2.4. Principaux polluants des eaux	18
II.2.4.1. Pollution selon le type de polluant	18
II.2.4.1.1. Pollution physique	18
II.2.4.1.2. Pollution chimique	18
II.2.4.1.3. Pollution biologique	19
II.2.4.2. Principaux polluants	19
II.2.4.2.1. Matières en suspensions	19
II.2.4.2.2. Sels minéraux	19
II.2.4.2.3. Matières organiques	19
II.2.4.2.4. Métaux lourds (ETM)	20
II.2.4.2.5. Pesticides	20
II.2.4.2.6. Matières fertilisante	20
II.3. Conséquences de la pollution	21
II. 4. Principaux facteurs influençant le comportement des contaminants	21
II. 4. 1. Caractéristiques physicochimiques des contaminants	22
II. 4. 2. Caractéristiques gérant le comportement des contaminants	22

II. 4. 2. 1. Solubilité dans l'eau ou hydrosolubilité	22
II. 4. 2. 2. Densité	22
II. 4. 2. 3. Stabilité	22
II. 4. 3. Comportement des polluants par famille	23
II. 4. 3. 1. Métaux et métalloïdes lourds	23
II. 4. 3. 2. Autres contaminants inorganiques	
II. 5. Processus qui influencent l'évolution de la pollution	25
II. 5. 1. Facteurs liés à la nature du sol et du sous-sol	25
II. 5. 1. 1. Milieux traversés	25
II. 5. 1. 1. 1. Sol	26
II. 5. 1. 1. 2. Sous-sol	27
II. 5. 1. 2. Principaux types des milieux souterrains	29
II. 5. 1. 2. 1. Zone non saturée	30
II. 5. 1. 2. 2. Zone saturée	31
II. 6. Caractéristiques du milieu traversé	32
II. 6. 1. Loi de darcy	32
II. 6. 2. Perméabilité	32
II. 6. 2. 1. Écoulement d'une seule phase (pollution miscible) cas des nappes	33
II. 6. 2. 2. Écoulement d'une seule phase (pollution miscible)	33
II. 6. 2. 3. Milieu poreux saturé par plusieurs phases (pollution non miscible)	33
II. 7. Caractéristiques physicochimiques du milieu	34
II. 7. 1. Phénomènes physico-chimiques généraux	34
II. 7. 1. 1. Oxydo-réduction	34
II. 7. 1. 2. Complexations	34
II. 7. 1. 3. Réactions acide-base	35
II. 7. 1. 4. Solubilité	35
II.7.2. Transfère des eaux polluées	36
II.7. 2. 1. Profondeur de l'entrée	36
II.7. 2. 2. Vitesse de propagation	37
II.7. 2. 3. Intensité et la durée de la pollution	37

II.7.2. 4. Temps de transfère des polluants	37
---	----

Chapitre III La Pollution des sols

III. 1. Polluants présents dans le sol	39
III.2. Acidification des sols	40
III. 2. 1. Sols et pH	40
III. 2. 2. Le sol et sont effet tampon	40
III. 3. Pesticides	41
III. 3. 1. Formules chimiques de quelques pesticides	42
III. 3. 2. Conséquences de la pollution des sols par l'agriculture	43
III. 3. 3. 1. Le problème des fertilisants	43

Chapitre I. Pollution de l'air.

Introduction

Pour mieux connaître et maîtriser la pollution de l'air, il est nécessaire de savoir quelles sont les sources de pollution, de les identifier et les quantifier. Cette connaissance permet ensuite de prendre des mesures de réduction des émissions à la source. Les inventaires d'émissions sont également une donnée de base nécessaire pour réaliser des évaluations de qualité de l'air et estimer les impacts de cette pollution sur la santé, les écosystèmes ...

Signée en 1979, la convention de Genève sur la pollution atmosphérique à longue distance a été l'élément déclencheur des réflexions et tentatives pour organiser et structurer les données relatives aux rejets de polluants sous la forme d'inventaires d'émissions de polluant. Cette dynamique a ensuite été relayée par un programme de la Commission Européenne, qui a permis de générer le premier inventaire d'émission. Mais qu'est-ce qu'un inventaire d'émission exactement ?

I.1.Définition

Un **inventaire d'émission** est une évaluation de la quantité d'une substance polluante émise par un émetteur donnée pour une zone géographique et une période de temps donnée. On parle également de cadastres d'émission. Dans ce cas, il s'agit d'inventaires d'émission qui ont été spatialisés sur une grille d'espace et souvent découpés en plusieurs tranches de temps.

I.2.Introduction sur les inventaires d'émissions

Pour mieux connaître et maîtriser la pollution de l'air, il est nécessaire de savoir quelles sont les sources de pollution, de les identifier et les quantifier. Cette connaissance permet ensuite de prendre des mesures de réduction des émissions à la source. Les inventaires d'émissions sont également une donnée de base nécessaire

pour réaliser des évaluations de qualité de l'air et estimer les impacts de cette pollution sur la santé, les écosystèmes ...

Signée en 1979, la convention de Genève sur la pollution atmosphérique à longue distance a été l'élément déclencheur des réflexions et tentatives pour organiser et structurer les données relatives aux rejets de polluants sous la forme d'inventaires d'émissions de polluant. Cette dynamique a ensuite été relayée par un programme de la Commission Européenne Corinair, qui a permis de générer le premier inventaire d'émission corinair. Mais qu'est-ce qu'un inventaire d'émission exactement ?

I.2.1.Définition

Un **inventaire d'émission** est une évaluation de la quantité d'une substance polluante émise par un émetteur donnée pour une zone géographique et une période de temps donnée. On parle également de cadastres d'émission. Dans ce cas, il s'agit d'inventaires d'émission qui ont été spatialisés sur une grille d'espace et souvent découpés en plusieurs tranches de temps. Le contenu de l'inventaire dépend de son objectif final. Cependant, on retrouve toujours les 4 composantes qui structurent quasiment tous les inventaires d'émissions.

- Substances
- Echelle d'espace
- Echelle de temps
- Emetteurs

I.2.2.Principe de l'élaboration de l'inventaire

Le principe méthodologique général repose sur l'équation de base :

$$E = A * Fem$$

E est l'émission (ou flux d'émission)

A est l'activité des émetteurs

Fem est un facteur unitaire d'émission

Pour élaborer un inventaire d'émission, il faut donc :

1. Identifier les sources (émetteurs), en correspondance avec les substances, dans la zone d'espace et de temps considérée.
2. Pour chaque source, déterminer son activité
3. Pour chaque source, déterminer son facteur unitaire d'émission
4. Pour chaque source, déterminer son émission en faisant le produit indiqué.
5. Sommer sur l'ensemble des sources recensées.

I.3.Substances

I.3.1.Introduction

Les différentes substances ont des durée de vie dans l'atmosphère qui sont extrêmes variables, ce qui explique que les problèmes de pollution se situent sur des différentes échelles de temps et d'espace très variables. Voici l'ordre de grandeur de la durée de vie dans l'atmosphère de quelques polluants : Les **polluants primaires** sont les polluants que l'on trouve à l'endroit de l'émission.

Tab 01. Durée de vie indicative de certaines substances polluantes dans l'atmosphère

Substance	Polluant
CH ₄	Année
CO	mois
SO ₂	Jours à mois
O ₃	quelques jours
COV	Heurs à jours
Aérosols 1-10 µm	Minutes à jours
Aérosols ≤ 1 µm	Jours à semaines

Une liste des substances les plus couramment évoquées dans les problèmes de pollution atmosphérique est proposée dans ce qui suit. Cette liste n'est pas exhaustive et évolue régulièrement en fonction des connaissances scientifiques liées à la pollution atmosphérique et à ses effets. La liste des polluants est donnée par famille : la notion de famille recouvre soit des caractéristiques physico-chimiques précises (COV, PM..), soit elle correspond à une réglementation particulière, ou encore elles sont parfois regroupées en fonction de leur effet.

I.4. Différents types de polluants

I.4.1. Polluants réglementés

7 polluants sont actuellement réglementés et font l'objet de mesures continues dans l'air réalisées par les associations de surveillance de la qualité de l'air.

- le dioxyde de soufre : SO_2
- le monoxyde de carbone : CO
- le dioxyde d'azote : NO_2
- l'ozone : O_3
- les particules (PM10)
- le benzène : C_6H_6
- le plomb : Pb

- les hydrocarbures aromatiques polycycliques : 6 (HAP)
- le cadmium : Cd
- l'arsenic : As
- le nickel : Ni
- le mercure : Hg

I.4.2.Composés organiques

I.4.2.1.Composés organiques volatiles - COV

Les COV regroupent une multitude de substances et ne correspondent pas à une définition très rigoureuse. Les hydrocarbures appartiennent aux COV et on fait souvent l'amalgame à tort. Ceci est sans doute dû au fait que l'on exprime souvent les COV en hydrocarbures totaux (notés HC), en équivalent méthane ou propane, ou par rapport à un autre hydrocarbure de référence. Il est fréquent de distinguer séparément le méthane (CH_4) qui est un COV particulier, naturellement présent dans l'air, des autres COV pour lesquels on emploie alors la notation COVNM.

I.4.2.2.Produits Organiques Persistants (POP)

Il existe douze composés organiques toxiques à basse concentration. Ce sont des résidus industriels souvent toxiques, mutagènes et cancérigènes, qui interfèrent avec notre système hormonal et sexuel. La liste la plus communément admise est la suivante : Trichloroéthylène (TRI), Trichloroéthane (TCE), Tetrachloroéthylène (PER), Dioxines et furanes (Diox), Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), Polychlorobiphényles (PCB) et Hexachlorobenzène (HCB). Ils sont semi-volatiles et circulent plus ou moins bien dans l'air, en fonction de la température de celui-ci : dans les endroits froids, leur volatilité est réduite et ils se concentrent donc dans les régions tempérées et polaires. Ils sont lipophiles (faible solubilité dans l'eau mais forte dans les graisses), avec attirance forte pour les tissus adipeux où ils se concentrent généralement (forte bioaccumulation). Ils ont également une durée de vie très longue (persistance dans le milieu).

I.4.2.3.Sources de COV

Les sources de COV sont très nombreuses, les émissions sont dues à certains procédés industriels impliquant la mise en œuvre de solvants (chimie de base et chimie fine, parachimie, dégraissage des métaux, application de peinture, imprimerie, colles et

adhésifs, caoutchouc, etc...), ou n'impliquant pas de solvants (raffinage du pétrole, utilisation de CFC, production de boissons alcoolisées, de pain, etc.).

I.4.2.4.Sources potentielles de rejets des HAP

Les HAP sont naturellement présents dans le pétrole brut et ils le demeurent dans les produits raffinés. Mais ils sont également rejetés par des sources naturelles : les feux de forêt, qui libèrent près de 2 000 tonnes de HAP par an, sont sans doute la plus grande source naturelle de HAP. Cependant, ces rejets étant généralement très éloignés dans le temps et dans l'espace, ils n'entraînent pas de risque d'exposition continue. Le dépôt atmosphérique provenant de sources à l'extérieur des pays constitue une autre voie d'entrée significative.

I.4.3.Métaux lourds

Les métaux lourds désignent en général les métaux dont le poids atomique est supérieur à celui du fer. Ces métaux sont parfois également désignés par le terme de métaux traces ou d'éléments traces métalliques. On considère en général les métaux lourds suivants : Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Sélénium (Se), Zinc (Zn). Chaque métal possède des caractéristiques et un impact propre. Néanmoins, on distingue en particulier :

- **Mercure** : le mercure est le seul métal liquide à température ambiante. Il se combine très aisément avec d'autres composés et a une volatilité importante. Pour le mercure métallique (inorganique), on le retrouve sous forme gazeuse, liquide ou ionique. Mais le mercure peut également se combiner avec du gaz carbonique et on parle alors de mercure organique.
- **Plomb** : Une source importante des émissions de plomb dans l'atmosphère a été le transport

car le plomb a été pendant longtemps additionné à l'essence du fait de son pouvoir antidétonant.

- **Cadmium** : il provient surtout de l'incinération des déchets, ainsi que de procédés industriels (métallurgie..). Il a des effets sur le système respiratoire et gastro-intestinaux.

Ces 3 métaux se distinguent des autres métaux souvent considérés comme des oligo-éléments pouvant être utiles. Les premiers sont tous très toxiques (effets sur le système nerveux) et ont une durée de vie très grande et une conductivité électrique élevée. Les métaux ne posent pas seulement un problème pour la pollution de l'air, mais aussi pour celle de l'eau et des sols.

I.5.Effets des différentes substances

Les impacts de la pollution conditionnent la plupart du temps le choix des substances retenues dans un inventaire. L'échelle géographique pertinente pour analyser les phénomènes de pollution de l'air va du très local (par exemple odeurs, effets des particules, du benzène, ... sur la santé) à l'échelle mondiale (par exemple effet de serre, couche d'ozone), en passant par des phénomènes régionaux ou continentaux (pluies acides ou pollution photochimique). On classe souvent les effets en fonction de l'échelle qui les concerne.

I.5.1.Effet de serre et changement climatique

L'effet de serre est un phénomène avant tout naturel de piégeage par l'atmosphère du rayonnement de chaleur émis par la terre sous l'effet des rayons solaires. Il permet une température sur Terre bien supérieure à celle qui régnerait en son absence (+ 33°C environ). Le groupe de gaz responsables de ce phénomène est présent dans l'atmosphère à l'état de traces ; il s'agit, pour l'essentiel, de la vapeur d'eau, du gaz carbonique (CO₂), du méthane (CH₄) et du protoxyde d'azote (N₂O). C'est parce que les teneurs atmosphériques de ces gaz sont naturellement très faibles que les émissions

dues aux activités humaines sont en mesure de les modifier sensiblement, entraînant, a priori, un renforcement de l'effet de serre, et par suite, des modifications possibles du climat.

Les principales substances émises considérées pour leur impact sur l'effet de serre sont donc : CO_2 , CH_4 , N_2O , HFC (dont spéciation selon 8 composés), PFC (dont spéciation selon 5 composés), SF_6 .

I.6.Destruction de la couche d'ozone

La Couche d'ozone localisée dans la stratosphère filtre à l'extérieur les rayonnements dans la partie ultra-violette (UV) du spectre qui est préjudiciable aux cellules. Sans ozone, la vie sur Terre ne serait pas ce qu'elle est aujourd'hui. La découverte d'un trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique et son association avec les CFCs synthétiques a amené le monde à agir pour protéger la couche d'ozone (protocole de Montréal en 1979).

La destruction de la couche d'ozone se produit quand l'équilibre naturel entre la production et la destruction de l'ozone stratosphérique est incliné en faveur de la destruction. Bien que les phénomènes naturels puissent causer la perte provisoire de l'ozone, le chlore et le brome libérés des composés synthétiques tels que les CFCs sont maintenant considérés comme cause principale de cet amincissement. Les émissions de CFCs représentent environ 80% de l'amincissement total de l'ozone stratosphérique.

I.7.Acidification, eutrophisation et photochimie

I.7.1.L'eutrophisation

L'eutrophisation est due à un apport excessif en nutriments et en matières organiques biodégradables issus de l'activité humaine. Elle s'observe surtout dans les milieux aquatiques dont les eaux sont peu renouvelées. Stimulées par un apport substantiel en certains nutriments dont principalement le phosphore et l'azote, le phytoplancton et certaines plantes aquatiques croissent et se multiplient de manière excessive, ce qui

conduit, lorsqu'elles se décomposent, à une augmentation de la charge naturelle de l'écosystème en matières organiques biodégradable. Les bactéries, qui dégradent cette matière organique, prolifèrent à leur tour, en appauvrissant de plus en plus l'oxygène de l'eau.

I.7.2.Pluies acides

"Les pluies acides" est un terme utilisé pour décrire toute forme de précipitation acide (pluies, neige, grêles, brouillard). Le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote sont les principales causes des pluies acides. Ces polluants s'oxydent dans l'air pour former de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ou des sels. On les retrouve dans les nuages et les précipitations parfois à des milliers de kilomètres de leur point d'émission, (pollution transfrontière à longue distance). Ceci concourt à des dépôts acides et à l'acidification accrue des pluies par rapport à celles résultant de la seule présence de gaz carbonique dans l'air (qui fait que le pH "naturel" d'une pluie est toujours acide, de l'ordre de 5,6).

I.7.2.1.Effets sur les écosystèmes

Des recherches en laboratoires ont montré que les causes du dépérissement forestier sont très complexes : sols de mauvaise qualité, sécheresses anormales, présence de polluants dans l'atmosphère principalement la pollution acide et l'ozone. Mais à proximité de certains sites générateurs de pollution (site industriel, grosses infrastructures routières), on observe également des baisses de rendements des terres agricoles. En outre, on peut parfois observer localement une contamination des sols où s'accumulent des métaux, comme le plomb en bordure de route.

L'acidification des lacs et des cours d'eau entraîne une destruction parfois irréversible de la vie aquatique. Outre le problème d'eutrophisation, la baisse du pH provoque la mise en solution de métaux contenus naturellement dans le sol, comme l'aluminium, toxique à l'état dissous pour presque la totalité des organismes vivants.

Les métaux lourds contaminent également à la fois les sols et les réserves d'eau douces. Leur accumulation dans les sols et les eaux laissent craindre une contamination

de la chaîne alimentaire. Ce type de pollution s'observe au niveau local (proximité de certains sites), mais aussi à l'échelle régionale et continentale, notamment pour certains métaux comme le mercure.

I.7.2.2.Effets sur la santé

Les limites de concentration dans l'air ambiant de certains polluants (SO_2 , Poussières, NO_2 , Pb, O_3) imposées par des directives Européennes tiennent compte des effets sur la santé de certaines substances. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) édicte les règles qu'il faudrait respecter pour les divers polluants. Certains effets sont associés à des **seuils**, c'est à dire qu'on peut déterminer une valeur de concentration dans l'air en dessous de laquelle la substance n'est pas dangereuse. Pour certaines substances, il n'existe pas de seuil au sens médical du terme, mais il existe des seuils réglementaires (niveau de pollution acceptable, mais non dénué de conséquences).

Les effets sur la santé ayant été le plus étudiés sont les **effets à court terme** liés à des concentrations élevées. Des études sont également menées pour évaluer les conséquences à long terme d'une exposition à un niveau de pollution plus faible. Ci-dessous, les effets des polluants les plus courants sont présentés :

- Particules : plus les particules sont fines plus elles pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire et plus leur temps de séjour y est important. Elles ont une double action liée aux particules proprement dites et aux polluants qu'elles transportent (métaux, hydrocarbures, dioxyde de soufre, etc.). Elles irritent le système respiratoire humain et peuvent contribuer au déclenchement de maladies respiratoires aiguës.
- **SO_2** : le SO_2 entraîne une inflammation des bronches avec un spasme qui provoque une altération de la fonction respiratoire.
- **NO-NO_2** : NO_2 est toxique (40 fois plus que CO, 4 fois plus que NO) NO_2 pénètre profondément dans les poumons. Les pics de concentrations sont plus nocifs qu'une

même dose sur une longue période. NO est un gaz irritant pour les bronches, il réduit le pouvoir oxygénateur du sang.

– **COV** : certains composés organiques tels que les aromatiques, les oléfines provoquent des irritations des yeux. Les aldéhydes sont de puissants irritants des muqueuses. Certains COV tels que le benzène, sont cancérigènes.

– **CO** : CO se fixe sur l'hémoglobine du sang. Le phénomène est irréversible. On connaît les accidents mortels liés à l'inhalation de CO lors du fonctionnement défectueux de chauffe-eau.

– **Ozone** : L'ozone est un oxydant puissant. C'est un irritant des yeux, de la gorge et des

bronches. Ses effets sont majorés par l'exercice physique.

– **POP** : Les conséquences de la présence de POPs qui ont pu être observées sur les animaux sont les suivantes : stérilité plus fréquente et baisse de l'effectif des populations, dysfonctionnements hormonaux, mutations sexuelles, déficiences du système immunitaire, anomalies de comportement, tumeurs et cancers, graves malformations congénitales. L'homme connaît également de graves problèmes : cancers et tumeurs, troubles du système nerveux, déficiences du système immunitaire, augmentation de cas de stérilité et modification de comportements sexuels, diminution de la production de lait chez les mères, augmentation des maladies type diabète, etc.

1.8. Différents types d'émetteurs

1.8.1. Les types d'émetteurs

Parmi tous les émetteurs potentiels de polluants, on a tendance à distinguer différentes catégories d'émetteurs :

1.8.2. Sources non-anthropiques (naturelles)

Il s'agit des sources induisant des rejets de substances polluantes mais qui ne sont pas liées à l'activité humaine. Parmi ces sources, on peut également distinguer les sources biogéniques (liées à la présence d'organismes vivants) des autres sources. L'éruption volcanique (dégagement très important de produits soufrés) est un exemple de source naturelle, de même que la production d'embruns marins (particules). Pour les sources biogéniques, il n'est pas toujours évident de classer le type de sources (cas de l'élevage d'animaux).

1.8.3. Sources anthropiques

Ces sources sont le fait de l'activité humaine. Cependant, la frontière entre les sources anthropiques et naturelles n'est pas toujours bien délimitée. Parmi les sources anthropiques, on oppose souvent les **sources fixes**, émises par des installations ne se déplaçant pas, des **sources mobiles** liées aux transports. Une autre notion est également importante pour la caractérisation des sources et de leur distribution géographique : c'est la notion de **source ponctuelle**, qui caractérise plutôt les grands sites industriels (points sources).

Chapitre II. Pollution des eaux

II. 1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de faire le point sur les différents facteurs influant sur le comportement des polluants dans les sous sols (ZNS), et notamment ceux qui contrôlent le transfert des polluants vers les ressources en eau souterraine. En effet, au-delà des modèles de transfert hydrogéologiques, différentes propriétés du sol, des milieux traversés et des polluants eux mêmes, jouent un rôle critique sur la prévision du transfert des polluants.

Ce chapitre traite des principaux facteurs influençant le comportement des contaminants. Les caractéristiques physico-chimiques susceptibles d'influer sur le comportement des contaminants sont définies. Différentes familles de substances présentant des caractéristiques analogues sont décrites, et l'on en déduit des comportements types par famille. Ainsi que Les facteurs et processus qui influencent l'évolution de la pollution : facteurs liés à la nature du sol et du sous-sol (milieux traversés), caractéristiques hydrauliques et physicochimiques du milieu, processus au niveau du terme source, au niveau de l'interface source-vecteur (solide-eau), au niveau du vecteur de transport, affectant le transport proprement dit ou affectant la chimie de l'eau lors du transport.

II.2. Pollution des eaux

II.2.1. Généralité

La pollution comme étant toute modification défavorable des propriétés physiques, chimiques ou biologiques, ou tout rejet de substances liquides, gazeuses ou solides dans l'eau de façon à créer une nuisance ou à rendre cette eau dangereuse d'utilisée.

La pollution de l'eau est due essentiellement aux activités humaines ainsi qu'aux phénomènes naturels. Elle a des effets multiples qui touchent aussi bien la santé

publique que les organismes aquatiques, ainsi que la flore et la faune terrestre. L'ensemble des éléments perturbateurs parviennent au milieu naturel de deux façons différentes : par rejets bien localisés (villes et industries) à l'extrémité d'un réseau d'égout ou par des rejets diffus (lessivage des sols agricoles, des aires d'infiltration dans les élevages, décharges, ...). L'introduction dans le sous-sol provoque une pollution des eaux souterraines qui est caractérisée par une propagation lente et durable (une nappe est contaminée pour plusieurs dizaines d'années) et une grande difficulté de résorption ou de traitement.

II.2.2. Type de pollution (classification selon la répartition géographique)

On a deux types de pollution selon la répartition géographique : pollution diffuse et ponctuelle.

II.2.2.1. Pollution ponctuelle

Une pollution ponctuelle est une pollution provenant d'un site facile à localiser, et peut être par exemple le point de rejet d'un effluent ou une zone contaminée. C'est une source fixe et généralement d'émission polluantes importantes.

II.2.2.2. Pollution diffuse

Sont des pollutions dues non pas à des rejets ponctuels et identifiables, mais à des rejets issus de toute la surface d'un territoire et transmis à l'environnement de façon indirecte. Les sources diffuses se caractérisent par des apports de substances émises par des sources mobiles, des sources couvrant de larges étendues ou un grand nombre de sources de pollution d'émission faible.

Les pollutions par des sources ponctuelles sont souvent plus faciles à traiter (en installant par exemple un filtre au niveau du tuyau par lequel les produits polluants sont rejetés dans le milieu naturel), alors que les émissions polluantes provenant de sources diffuses sont difficiles à recenser, à mesurer et donc à contrôler.

II.2.3. Source de pollution

C'est une classification selon l'origine de la pollution

II.2.3.1. Pollution naturelle

Cependant, et grâce notamment aux développements technologiques et analytiques qui ont permis des mesures de plus en plus fines pour de nombreux éléments polluants, il a été montré que certains polluants dans les eaux et les sols peuvent également avoir une origine naturelle. On retrouve le plus souvent ces polluants dits géogéniques dans des zones où ils sont naturellement concentrés. Cette accumulation naturelle résulte de processus géologiques. Par exemple, le contact de l'eau avec les gisements minéraux peut, par érosion ou dissolution, engendrer des concentrations inhabituelles en métaux lourds (exp : arsenic...). Des irrptions volcaniques, des épanchements sous-marins d'hydrocarbures... peuvent aussi être à l'origine de pollutions.

II.2.3.2. Pollution atmosphérique

En ce qui concerne l'eau de pluie, bien que longtemps considérée comme propre, l'eau d'origine pluviale est en fait relativement polluée. L'origine de cette pollution peut provenir des gaz ou solides en suspension rejetés dans l'atmosphère par les véhicules, les usines ou les centrales thermiques. Ces polluants (oxyde de carbone, dioxyde de soufre, poussière...) sont envoyés vers le sol à la moindre averse.

Lorsqu'elle ruisselle, l'eau de pluie a un second effet nocif: elle transporte les hydrocarbures, les papiers, les plastiques et les débris végétaux accumulés sur la terre et les toitures. De plus, cette pollution est déversée sur de courtes périodes et peut atteindre des valeurs très élevées ce qui provoque un effet de choc sur le milieu biologique.

II.2.3.3. Pollution urbaine

Ce sont les eaux des habitations et des commerces qui entraînent la pollution urbaine de l'eau. Les polluants urbains sont représentés par les rejets domestiques, les eaux de lavage collectif et de tous les produits dont se débarrassent les habitants d'une agglomération notamment des rejets industriels rejetés par les entreprises en quantités variables selon l'importance de l'agglomération et son activité.

Les eaux résiduaires urbaines peuvent être considérées comme la plus importante industrie en termes de masse de matériaux bruts à traiter ; Dans la communauté européenne il est produit quotidiennement un volume proche à 40 millions de m³ d'eaux usées.

Le « tout -à- l'égout » est une expression significative ; elle exprime cette diversité. On trouve les excréments, les restes d'aliments, les déversements d'abattoirs, les déversements hospitaliers, les lessives, les détergents, les insecticides, les hydrocarbures, les déchets de la petite industrie et divers produits toxiques.

II.2.3.4. Pollution industrielle

Le développement accéléré des techniques industrielles modernes a engendré une pollution très importante. En effet, celle-ci est devenue plus massive, plus variée et plus insidieuse. Devant l'extrême diversité de ces rejets, une investigation propre à chaque type d'industrie est nécessaire : il est donc primordial d'être parfaitement informé sur les procédés de fabrication et le circuit des réactifs et des produits. Il est évident que les effluents déversés sans traitement approprié entraînent des changements indésirables dans le milieu récepteur et des pollutions très néfastes.

II.2.3.5. Pollution agricole

Ce type de pollution s'intensifie depuis que l'agriculture est entrée dans un stade d'industrialisation. Les pollutions d'origine agricole englobent à la fois celles qui ont trait aux cultures (pesticides et engrais) et à l'élevage (lisiers et purins). Néanmoins, le problème de la pollution agricole est un peu différent, dans la mesure où cette source de pollution n'arrive qu'indirectement à la station. C'est le cas en particulier des engrais et pesticides qui passent d'abord à travers les milieux naturels (nappes phréatiques, rivières...). C'est aussi le cas des déchets solides issus des industries agro-alimentaires et des concentrations des élevages qui entraînent un excédent de déjections animales (lisiers de porc, fientes des volailles...) par rapport à la capacité d'absorption des terres agricoles ; celles-ci, sous l'effet du ruissellement de l'eau et de l'infiltration dans le sous-sol, enrichissent les cours d'eau et les nappes souterraines en dérivés azotés et constituent aussi une source de pollution bactériologique.

II.2.4. Principaux polluants des eaux

II.2.4.1. Pollution selon le type de polluant

Il existe plusieurs manières de classer la pollution. Selon le type de polluant, on peut classer la pollution en trois catégories : pollution physique, pollution chimique et pollution biologique.

II.2.4.1.1. Pollution physique

On parle de ce type de pollution quand le milieu pollué est modifié dans sa structure physique par divers facteurs. Elle regroupe la pollution mécanique, il s'agit d'une pollution qui se traduit par la présence des particules de taille et de matière très variées dans l'eau; qui lui confèrent un caractère trouble. On distingue aussi les matières décantées (plus lourds que l'eau elle-même), les matières flottables (plus légères que l'eau elle-même) et les matières non séparables (de même densité que l'eau).

La pollution physique désigne autre type de pollution, telle que la pollution thermique due à la température élevée qui cause une diminution de la teneur en oxygène dissous ainsi qu'une réduction de la solubilité des gaz.

II.2.4.1.2. Pollution chimique

La pollution chimique des eaux résulte de la libération de certaines substances minérales toxiques dans les cours d'eaux, par exemple: les nitrates, les phosphates, l'ammoniac et autre sels, ainsi que des ions métalliques. Ces substances exercent un effet toxique sur les matières organiques et les rendent plus dangereuses. Ainsi résulte de la pollution radioactive où la radioactivité des eaux naturelles est peut être d'origine naturelle ou artificielle (énergie nucléaire).

Les polluants chimiques sont classés à l'heure actuelle en cinq catégories: Les substances chimiques dites indésirables, les pesticides, les produits apparentés, les détergents et les colorants et autre éléments toxiques.

II.2.4.1.3. Pollution biologique

Un grand nombre de micro-organismes peut proliférer dans l'eau qui sert l'habitat naturel ou comme une simple moyenne de transport pour ces microorganismes. L'importance de la pollution de l'eau dépend également des conditions d'hygiène, des populations, mais aussi des caractéristiques écologiques et épidémiologiques. Les principaux organismes pathogènes qui se multiplient dans l'eau sont : les bactéries, les virus, les parasites et les champignons, on parle ainsi de la pollution bactérienne, viral ou parasitaire.

II.2.4.2. Principaux polluants

II.2.4.2.1. Matières en suspensions

Elles désignent toutes les matières minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau. Les MES confèrent à l'eau un aspect trouble au fur et à mesure que les sédiments se déposent au fond ; elles diminuent la luminosité dans l'eau, donc freinent la photosynthèse. Les espèces végétales se développent plus difficilement, l'oxygène qu'elles produisent diminue dans le milieu, et les espèces animales en souffrent. Elles peuvent rendre les eaux très opaques et provoquer aussi une eutrophisation.

II.2.4.2.2. Sels minéraux

Présents naturellement dans l'eau en faible quantité, 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.

II.2.4.2.3. Matières organiques

Ce sont tous les déchets carbonés tels que la cellulose produite par les papeteries, le sucre et le lactosérum des industries agroalimentaires ainsi que les hydrocarbures. A l'inverse de MES, ces matières constituent une nourriture de choix

pour les micro-organismes de l'eau et provoquent leur prolifération. Les micro-organismes se mettent alors à vider le milieu de son oxygène, ce qui s'avère fatal pour la vie aquatique. Lorsque le milieu se retrouve totalement vidé de son oxygène, les micro-organismes vont le chercher dans les sulfates dissous (SO_4^{-2}), qu'elles réduisent en sulfure, qui se dégage sous forme de sulfure d'hydrogène en engendrant une odeur d'œufs pourris. Cette odeur nauséabonde est caractéristique d'une eau très polluée.

II.2.4.2.4. Métaux lourds (ETM)

Les éléments possédant une masse volumique supérieure ou égale à 5 g.cm^{-3} . Les métaux lourds constituent des polluants qui ne se dégradent pas dans l'environnement. Ils s'accumulent dans les organismes vivants et peuvent contaminer l'ensemble d'une chaîne alimentaire. Certains métaux lourds sont particulièrement toxiques comme le cadmium (Cd), le mercure (Hg), le plomb (Pb), le nickel (Ni), le chrome (Cr), et à un degré moindre le cuivre (Cu) et le zinc (Zn). Le fer (Fe) et l'aluminium (Al) le sont moins.

II.2.4.2.5 .Pesticides

Les pesticides constituent un problème majeur pour l'environnement. On inclut dans les pesticides toutes les substances avec lesquelles on combat les animaux et végétaux nuisibles à l'Homme et aux êtres vivants supérieurs. Sur le plan chimique, on distingue plusieurs groupes de pesticides qui sont caractérisés par des persistances différentes. Les plus persistants sont les hydrocarbures chlorés comme le DDT (**D**ichloro **D**iphényl **T**richloroéthane) qui s'accumule dans les tissus graisseux.

II.2.4.2.6. Matières fertilisante

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. Et ainsi la pollution biologique l'un des principaux polluants des eaux.

II.3. Conséquences de la pollution

- Les matières organiques solubles abaissent la teneur en Oxygène dans les cours d'eau, ce qui conduit à la réduction et à la mort de la faune aquatique.
- Les matières en suspension, s'accumulent au fond des cours d'eau, lacs et étangs et causent l'augmentation de la turbidité.
- Les acides sont toxiques à la vie aquatique et détériorent les réseaux d'égaux.
- Les huiles et les graisses flottants conduisent au colmatage des conduites et donnent un aspect esthétique indésirable.
- Les matières toxiques et métaux lourds sont toxiques à la vie aquatique.
- Le phosphore et l'azote conduit à l'eutrophisation des cours d'eau.
- Les coliformes fécaux et pathogènes participent à la contamination bactériologique des cours d'eau.

II. 4. Principaux facteurs influençant le comportement des contaminants

II. 4. 1. Caractéristiques physicochimiques des contaminants

Les contaminants sont des substances chimiques organiques (hydrocarbures, solvants, phytosanitaires...) ou inorganiques (métaux lourds, nitrates, ...), à l'exclusion des contaminants biologique. Les tableaux 1 et 2 récapitulent les principales familles de produits considérées comme polluants.

II. 4. 2. Caractéristiques gérant le comportement des contaminants

II. 4. 2. 1. Solubilité dans l'eau ou hydrosolubilité

La solubilité définit la concentration d'une substance se dissolvant dans l'eau lorsque l'eau et la substance sont en équilibre. Cette propriété indique la tendance à la mobilisation de la substance par lessivage lors d'épisodes pluvieux ou par ruissellement ou inondation. On notera qu'une solubilité faible peut être significative en termes de risque lorsqu'elle affecte un composé qui est toxique à faible dose.

La solubilité forte 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.

II. 4. 2. 2. Densité

La densité d'un liquide affecte généralement peu son infiltration dans la tranche de sol située au dessus de la nappe. Par contre, elle contrôle fortement son comportement dans la zone saturée. Si le liquide est immiscible, le contaminant s'accumulera de préférence en surface de la nappe si sa densité est inférieure à 1, et au plancher de celle-ci si elle est supérieure à 1. En principe, on ne tient pas compte de la densité pour un polluant soluble dans l'eau ($d = 1$). Toutefois, il faut tenir compte de la densité des saumures (NaCl , CaCl_2), éventuellement chargées en polluants organiques et/ou métaux lourds, car leur densité est supérieure à l'eau et l'ensemble aura tendance à migrer vers le fond de la nappe.

II. 4. 2. 3. Stabilité

La dégradation d'un polluant est souvent représentée, en première approximation, par une réaction cinétique de premier ordre. La vitesse de dégradation est caractérisée par un temps de demi-vie. Ce temps représente le temps durant lequel une fraction représentant 50 % de la quantité initiale de substance est dégradée. Plus

ce temps est important, plus le composé montre des potentialités de persistance dans l'environnement.

II. 4. 3. Comportement des polluants par famille

II. 4. 3. 1. Métaux et métalloïdes lourds

L'expression « métal lourd » désigne pour les chimistes des métaux de densité supérieure à 5 g/cm^3 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.

a) 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 la 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...)

b) Principales propriétés physico-chimiques

La solubilité des métaux lourds dépend de l'élément concerné, du chimisme de la phase aqueuse (pH, potentiel rédox, concentration en ligands) et des phases solides environnantes, qui interagissent avec la composition de cette phase. Le climat chimique contrôle la spéciation de l'élément, c'est-à-dire sa répartition entre différents états de valence. La spéciation est un paramètre essentiel de la solubilité.

II. 4. 3. 2. Autres contaminants inorganiques

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

a) Origine :

- Les nitrates et nitrites proviennent généralement de l'industrie des engrais ou de leur épandage agricole.
- Les fluorures se rencontrent dans différentes industries chimiques, et dans la métallurgie de l'aluminium.
- Les cyanures se trouvent sur certains sites industriels où ils sont des sous-produits indésirables (cokéfaction, usines à gaz, carbochimie) ; eaux de lavage des hauts fourneaux, pétrochimie (plastiques, pesticides, teintures). Ils se trouvent également là où ils sont utilisés comme réactifs ou comme base de synthèse (traitement de surfaces, galvanoplastie, traitement des minerais d'or et d'argent).

b) Principales propriétés physico-chimiques :

Les nitrates, nitrites et cyanures sont largement solubles dans l'eau dans les conditions physicochimiques 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. 5. Processus qui influencent l'évolution de la pollution

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.

II. 5. 1. Facteurs liés à la nature du sol et du sous-sol

II. 5. 1. 1. Milieux traversés

Selon qu'on aborde la question du point de vue du géologue ou de l'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. (Fig III. 01)

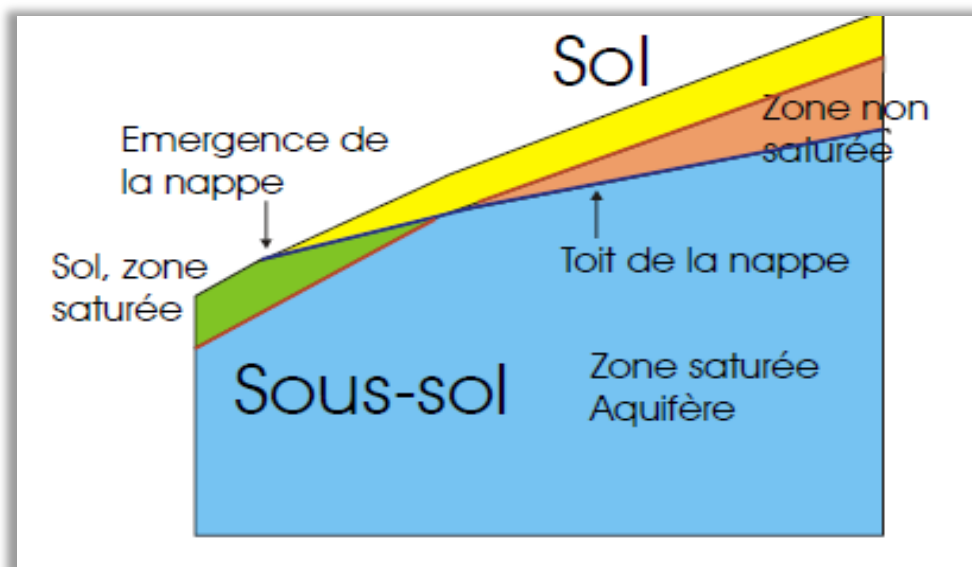


Figure II-01. Relations entre sol, sous-sol, zone non saturée et zone saturée

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.

II. 5. 1. 1. 1. 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.

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

a) Propriétés

Les propriétés du sol influant sur le transfert des contaminants vers les nappes sont la porosité, la texture, la composition chimico-minéralogique, l'acidité, l'état rédox et la teneur en matière organique.

. Porosité du sol n'est pas saturée par l'eau : elle contient de l'air dont l'oxygène est utilisé par les racines et l'activité microbienne. L'objectif de l'irrigation et du drainage des sols est le maintien de l'équilibre eau-air. Un déficit d'oxygène entraîne des réactions anaérobies dégradant certaines substances en sous-produits potentiellement toxiques. Un déficit d'eau, outre ses conséquences sur le dessèchement des plantes, entraîne un déficit d'apports minéraux.

. Texture du sol : peut être décrite qualitativement, en fonction de son aspect (graveleux ou fin), ou quantitativement, à partir des proportions de particules minérales plus ou moins grossières, sans tenir compte de la matière organique présente. Les propriétés agricoles du sol dépendent largement de cette texture :

- un sol grossier et sableux sera peu compact, bien aéré et facile à cultiver ; il sera bien drainé mais retiendra peu l'eau, qui y circulera rapidement.
- un sol fin ou argileux retiendra beaucoup d'eau, deviendra plastique et collant humide, puis compact et dur en séchant. On parle de sol « lourd » même si sa densité est en fait souvent modérée.

. **Composition chimico-minéralogique :** et notamment la richesse relative en minéraux argileux, influe fortement sur l'aptitude du sol à retenir momentanément ou à fixer les polluants apportés par infiltration. Elle contribue aussi à déterminer son climat chimique et la disponibilité de colloïdes.

. **Acidité du sol et son état rédox :** sont les deux paramètres physico-chimiques qui influent le plus sur la spéciation des polluants. Ils influent donc indirectement sur la mobilité de ceux-ci.

Le comportement d'un sol face à une infiltration de polluants sera affecté par ces propriétés. Il sera donc nécessaire de caractériser le sol pour prévoir ou comprendre le comportement des polluants et les conséquences possibles de la pollution.

II. 5. 1. 1. 2. Sous-sol

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

a) Principaux constituants

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 permettent de représenter les couches ou formations rocheuses de faible extension (moins de 250 m). Ceci peut expliquer des anomalies rencontrées lors des sondages de reconnaissance.

b) Propriétés

Les propriétés du sous-sol influant sur le transfert des contaminants vers les nappes sont :

. **La porosité, l'hétérogénéité**, la fracturation et les discontinuités créant des voies de circulation préférentielle. Tous les types de roches ne sont pas susceptibles de recevoir des eaux souterraines et de constituer des aquifères où l'eau soit mobilisable. Cette propriété dépend de la porosité.

. **La perméabilité** de la roche, les sables, calcaires et grès constituent la majorité des aquifères. Les roches peu poreuses ou perméables, telles que les argiles, les marnes et la plupart des roches cristallines, constituent rarement des aquifères.

II. 5. 1. 2. Principaux types des milieux souterrains

Il s'agit 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 étalement progressif du panache de pollution (beaucoup plus prononcé suivant la direction de l'écoulement. Ce schéma très général de contamination des eaux est illustré par la figure ci-dessous.

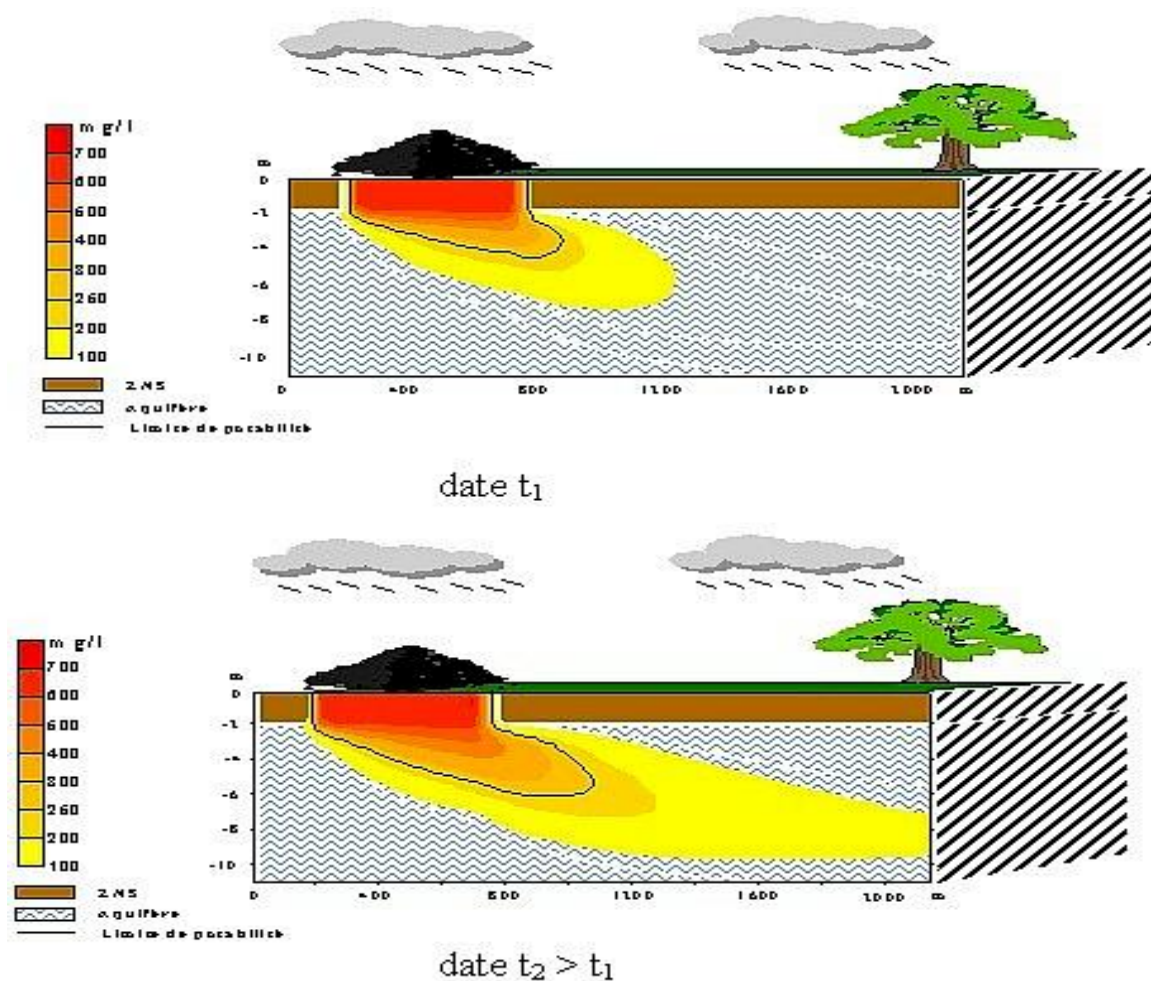


Figure II-02. Evolution d'un panache de pollution à l'aval d'une décharge.

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 perméables (les éponges) qui les rendent moins vulnérables à la pollution.

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 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.

II. 5. 1. 2. 1. Zone non saturée

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 :

1. 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).
2. la teneur en eau. Celle-ci varie continûment au cours du temps sous l'influence des cycles pluviométriques et d'infiltration.

3. 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.

II. 5. 1. 2. 2. Zone 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.

a) Milieux poreux :

Les milieux poreux aquifères se caractérisent par la variabilité de leurs paramètres descriptifs (perméabilité, porosité...). Comme pour la zone non saturée, le problème de la caractérisation à grande échelle des écoulements se pose à l'aide de paramètres moyens représentatifs.

b) Milieux fissurés :

Ces milieux sont constitués par un réseau de fractures non totalement interconnectées et dont l'organisation spatiale (densité, orientation, géométrie) caractérise le réservoir aquifère. Leur étude est rendue difficile en raison du peu d'informations disponibles pour en restituer une image. La fracturation d'un massif rocheux est, en effet, appréhendée à partir de données ponctuelles de surface, de sondages ou de galeries. Une pollution qui se développe dans un tel milieu sera difficile à suivre en termes de cheminement et de concentrations et ce, d'autant plus que le réseau de fractures se double d'une porosité de matrice, susceptible d'être elle-même envahie par le polluant.

c) Milieux karstiques :

Les aquifères karstiques sont des milieux très particuliers où l'eau circule dans des cavités laissées par la dissolution de la roche, variant depuis un ensemble de fractures à peine élargies (et donc hydrauliquement apparentés aux milieux fissurés) jusqu'à ceux caractérisés par un véritable réseau de drainage pouvant aller jusqu'à la rivière souterraine. Pour obtenir une information sur la structure du réseau karstique on utilise des traceurs artificiels, mais la prévision du devenir d'un polluant dans un tel milieu s'avère souvent difficile en raison de l'ignorance de la structure du réseau souterrain et des voies de cheminement.

II. 6. Caractéristiques du milieu traversé

Le transport d'un polluant est indissociable de l'écoulement du fluide qui le véhicule (eau pour une pollution miscible). 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.

II. 6. 1. Loi de darcy

La variable descriptive de l'écoulement est la charge hydraulique, somme d'un terme de pression et d'un terme gravitaire. Pour l'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.

II. 6. 2. Perméabilité

La perméabilité n'est pas une grandeur caractérisant seulement le milieu : elle dépend aussi du fluide considéré, de sa densité et de sa viscosité. Elle est fonction de la

perméabilité intrinsèque, caractéristique du milieu poreux, et à travers la masse volumique et la viscosité, des conditions de température et de minéralisation de l'eau.

II. 6. 2. 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)

II. 6. 2. 2. Écoulement d'une seule phase (pollution miscible)

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.

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 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 suctions 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 (Figure II.02)

II. 6. 2. 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.

II. 7. Caractéristiques physicochimiques du milieu

III. 7. 1. Phénomènes physico-chimiques généraux

Les règles présentées ci-dessus permettent de déterminer les mouvements du fluide. La migration des polluants ne reflète que partiellement ces mouvements. En effet, d'autres mécanismes interviennent, en retardant, réduisant ou augmentant la migration des polluants. Ces mécanismes comprennent notamment :

- les mécanismes chimiques d'interface (réactions d'adsorption) ;
- les mécanismes de précipitation chimique à partir de la phase aqueuse ;
- la spéciation chimique du polluant en phase aqueuse ;
- les réactions bactériennes ;
- le transfert par les colloïdes ;
- la volatilisation.

II. 7. 1. 1. Oxydo-réduction

Une réaction rédox ou d'oxydoréduction est un transfert d'électrons entre un donneur (le réducteur) et un accepteur (l'oxydant). L'état réducteur ou oxydant d'un milieu est mesuré par le potentiel rédox ou potentiel d'oxydo-réduction (Eh), notamment celui d'une eau.

- $Eh > 0$: milieu oxydant ;
- $Eh < 0$: milieu réducteur.

Ce paramètre est étroitement lié à la spéciation, notamment pour Cr et As, ce qui a des conséquences significatives en termes de risque de pollution.

II. 7. 1. 2. Complexations

Un ion ou une molécule potentiellement polluante peuvent ainsi former des complexes avec d'autres substances présentes dans le sol ou l'eau (les ligands). Les complexes ainsi formés peuvent avoir des propriétés très différentes de la substance polluante : par exemple être beaucoup plus stables dans l'eau, et donc être plus mobiles. Dans les solutions qui circulent dans les sols, on rencontre en général de faibles concentrations en acides organiques complexant (carboxyliques, phénoliques, acides aminés).

II. 7. 1. 3. Réactions acide-base

Une réaction acide-base ou de neutralisation est un transfert de protons entre un donneur (l'acide) et un accepteur (la base). Le potentiel hydrogène (pH) est la mesure du caractère acide ou basique d'un milieu (notamment l'eau). Dans les conditions usuelles des eaux de surface :

- $pH > 7$: milieu basique ;
- $pH < 7$: milieu acide.

Ce paramètre est étroitement lié à la solubilité des métaux, ce qui a des conséquences significatives en termes de risque de pollution.

II. 7. 1. 4. Solubilité

On appelle solubilité, la quantité de substance solide, liquide ou gazeuse, capable de se dissoudre complètement (c'est-à-dire sans qu'une seconde phase apparaisse) dans un volume ou une masse donnée de solvant (ici : l'eau).

- . Lorsque cette quantité est atteinte, l'eau est dite saturée en cette substance.
- . La solubilité varie avec la température de l'eau, le pH, et la composition chimique du milieu (autres espèces en solution dans l'eau).
- . Les réactions gouvernant les échanges de matière entre solides et solutions aqueuses sont dites de dissolution-précipitation.

III.7.2. Transfère des eaux polluées

Les sels solubles dans l'eau se déplacent par diffusion des points de fortes concentrations aux zones de moindre concentration. Les trajets, l'intensité du polluant, la vitesse de propagation ont une influence capitale sur les caractères de la pollution. Il y a lieu de considérer :

III.7. 2. 1. Profondeur de l'entrée

La pollution peut entrer par la surface du terrain. La nature de cette surface joue un rôle capital. Le terrain peut avoir une couverture de terre végétale agissant comme purificateur par sa teneur en microorganismes, en colloïdes minéraux et organiques etc. S'il n'y a pas de couverture de terre végétale, la contamination sera d'autant plus facile que l'on passe des terrains à perméabilité d'interstices aux terrains à perméabilité de fissures et de chenaux.

Un facteur important est la distance séparant la source de pollution de la surface de la nappe, car cette distance est à compter dans le cas d'épuration par filtration. Elle s'ajoute à la distance de filtration horizontale de la nappe. Cette distance peut être réduite à zéro, c'est-à-dire que le polluant arrive directement dans la nappe.

II.7. 2. 2. Vitesse de propagation

Car celle-ci entrera en ligne de compte dans le calcul de la décroissance de la pollution à partir du point de contamination. On aura donc à considérer la vitesse de filtration verticale dans la zone d'aération et la vitesse de propagation dans la nappe en tenant compte de la vitesse de diffusion.

II.7. 2. 3. Intensité et la durée de la pollution

Le rapport de débits entre polluant et pollué. L'amortissement du polluant, c'est-à-dire la diminution du polluant à partir du lieu de pollution. Diminution du polluant par rétention dans le terrain, et diminution par destruction, physique, chimique ou biologique.

II.7.2. 4. Temps de transfère des polluants

Le temps de transfert d'un polluant chimique à la nappe varie de quelques jours à plusieurs années. Il dépend principalement de:

- l'épaisseur de la zone non saturée, c'est à dire la profondeur de la surface piézométrique.
- la perméabilité du réservoir (fissuration) ou le pouvoir de filtration
- les caractères du polluant.

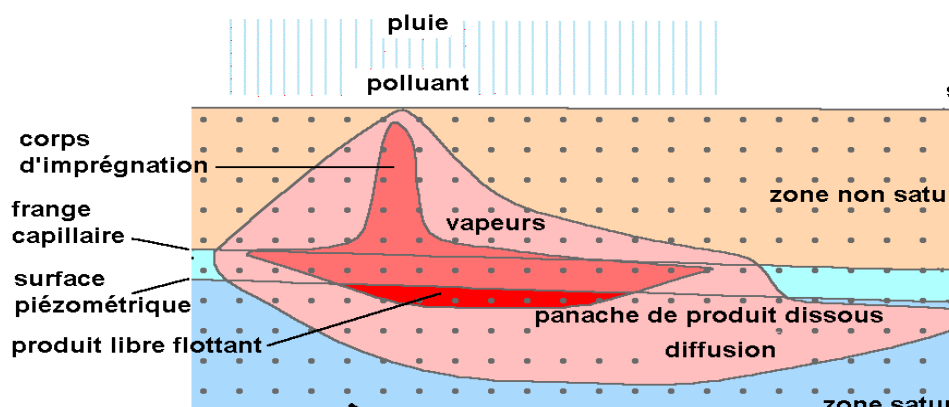


Figure II-03. Pollution par un produit plus léger que l'eau et qui atteint la nappe.

Dans la nappe, l'extension du panache de pollution dépend essentiellement de la direction et de la vitesse d'écoulement de l'eau, mais aussi des caractéristiques du polluant.

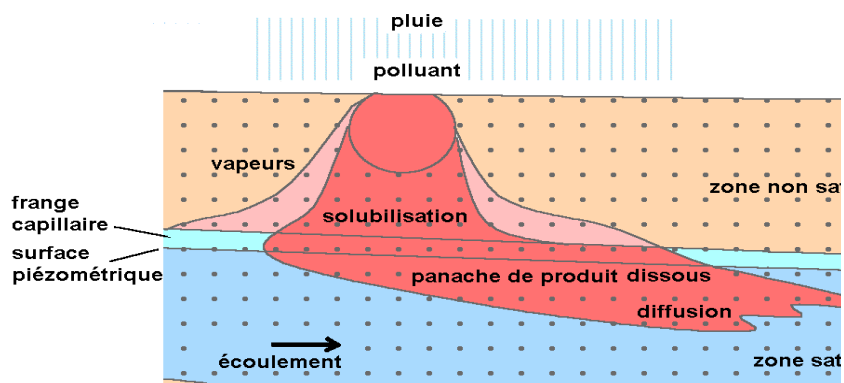


Figure II-04. Pollution par un produit soluble n'atteignant pas la nappe.

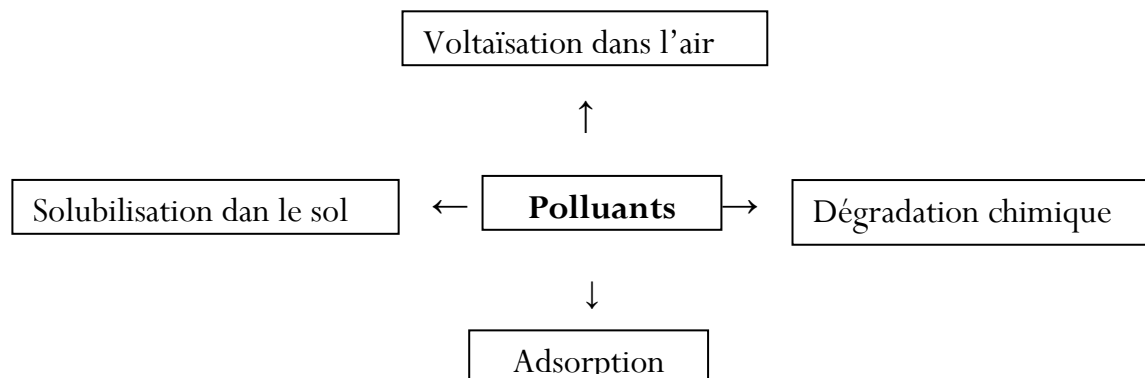
Les polluants insolubles plus légers que l'eau restent à la surface de la nappe où ils s'étalent et pour les polluants insolubles et plus denses que l'eau comme les organochlorés migrent jusqu'à la nappe sans laisser de traces derrière eux.

Chapitre III. La pollution des sols

III.1. Polluants présents dans le sol

Introduction

Beaucoup de substances parviennent dans le sol peuvent être dangereuses pour les micro-organismes (Les plantes, les animaux, et aussi les êtres humains). Une telle pollution peut agir de deux façons. D'une part les substances elle-même peuvent être directement nuisible pour les plantes, les animaux, et les êtres humains, et d'autre part ces composés peuvent être enlevés du sol par lessivage.



Si l'apport d'une substance, notamment difficilement dégradable, est plus important que sa disparition par lessivage, par dégradation, ou par consommation dans les cultures, alors cette substance s'accumule dans le sol.

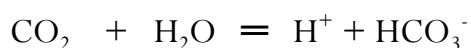
Les pollutions peuvent être importantes, cette pollution du sol peut apparaître de différentes manières. Une grande partie des composées, qui ont des influences sur les sols et sur les organismes qu'ils contiennent, provient directement de l'air (par disposition sèches) ou arrivent avec les précipitations (dépositions humides).

III.2. Acidification des sols

III. 2. 1. Sols et pH

Le pH d'un sol est d'une grande importance, particulièrement pour sa capacité à mettre des substances à la disposition des plantes. Une introduction élevée d'acide dans le sol conduit chez les plantes à une diminution de la croissance.

Dans un sol qui fonctionne normalement, des réactions ont lieu, au cours desquelles il se forme des protons. La respiration des organismes du sol libère de grandes quantités de CO_2 , qui forme des protons avec l'eau du sol, selon la réaction suivante :



En outre, des engrais qui ont des effets acides, comme le sulfate d'ammonium qui diminue le pH des sols, mais ce sont les précipitations (pluie, neige.....) qui leur apportent le plus d'acidité. Pour une pluie propre (pH voisin de 5,6), devient pluie acide quand les gaz acides comme SO_x et NO_x se dissolvent dans les gouttes de pluie.

III. 2. 2. Le sol et son effet tampon

En fonction de sa composition, le sol est capable de fixer les protons, réversiblement ou irréversiblement des différents constituants des sols qui contribuent à cet effet tampon. Quand les acides parviennent sur le sol, ce sont d'abord les carbonates qui réagissent.

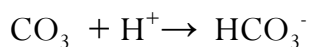


Figure Variation du pH dans l'eau du sol lorsqu'on ajoute des acides.

III. 3. Pesticides

Une pesticide est une substance utilisée pour lutter contre des êtres vivants nuisibles à l'homme de façon directe ou indirecte. Selon les organismes qu'ils combattent, on peut répartir des pesticides, on différents groupes.

Nom	Organismes nuisibles à détruire
Bactéricides	Bactéries
Fongicides	Champignons
Herbicides	Mauvaises herbes
Insecticides	Insectes
Acaricides	Mites
Algicides	Algues

A coté des propriétés souhaité, les pesticides peuvent aussi avoir des propriétés non souhaites comme le montre le tableau suivant :

Propriétés souhaitées	Propriétés non souhaitées
Assurer le rendement des récoltes.	Toxicité pour l'homme.
Assurer la production du lait.	Formation des résidus et distribution globale.
Réduction des pourrissements des aliments.	Pollution des eaux de surface et de la nappe phréatique.
Désinfection de lieu sanitaire.	Changement du gout dans les fruits.

Contamination

Diffuse

Ponctuelle

Les contaminations du sol peuvent être diffuses ou ponctuelle. Dans les contaminations diffuses il ya un ou plusieurs composées dangereux, dont les concentrations varient peu, et dans la plupart des cas, les surfaces concernés sont très étendues.

En général, les contaminations sont diffuses lorsque les polluants sont émis :

- A partir de sources non stationnaires (automobiles).
- A partir de sources très étendues (dépôts de produits en agriculture).
- A partir d'un grand nombre de sources (véhicules, foyers domestiques).

Dans les contaminations ponctuelles du sol, il s'agit de grandes quantités de polluants dans un domaine délimité par des clôtures, des bâtiments, et des cités contaminés.

Sur le plan chimique on distingue plusieurs groupes de pesticides, qui ont des persistances différents. La quantité totale des hydrocarbures chlorés, qui ont la persistance la plus forte et qui sont encore utilisées aujourd'hui, dépasse celle des autres groupes comme le montre le tableau qui suit :

Composées	Hydrocarbures chlorés	urée	carbonates	esters d'acides phosphorés
Temps de persistance	(2-5) ans	(2-18) mois	(2-12) semaines	(2-12) semaines

III. 3. 1. Formules chimiques de quelques pesticides

(DDT)

Methoxy éthyle mercure

Pichloram

Acétate de phényle mercure

III. 3. 2. Conséquences de la pollution des sols par l'agriculture

On peut distinguer, parmi les divers produits chimiques utilisés en agriculture, des substances minérales et des composés organiques de synthèse. Ces derniers sont responsables de la pollution des sols.

III. 3. 3. 1. Le problème des fertilisants

Les engrais chimiques sont dispersés dans les sols afin d'accroître les rendements des végétaux cultivés. Il faut donc restituer aux sols des substances sous forme de :

PO_4^{-3} , NO_3^- , Ca^{++} , Mg^{++} ...ect. Parmi les engrais chimiques les plus utilisés on a les

Nitrates d'ammonium, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $(\text{NH}_4^+)_2\text{SO}_4^{-2}$. Dans les conditions actuelles, des grandes quantités de ces fertilisants sont utilisés chaque année en agriculture. La consommation mondiale d'engrais a été multipliée par 6 entre 1945 et 1965. Comme le montre la courbe suivante :

Pour des raisons de prix de revient, ces substances ne sont pas pur, il existe à l'état de trace de nombreux métaux toxiques et peut mobile dans les sols tel que :

Arsenic (2.2 - 1.2 ppm)

Plomb (7 - 90 ppm)

Cadmium (50 - 170 ppm)

Nickel (7 - 30 ppm)

Chrome (60 - 240 ppm)

Vanadium (20 - 180 ppm)

Cobalt (0 - 9 ppm)

Zinc (50 - 1430 ppm)

Cuivre (4 - 80 ppm)

EIHPARGOILBIB

D. GUYONNE et al. Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes : Application dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau, BRGM, 2001.

A. MAUREL, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Edition Lavoisier Paris. 2001.

M. DJIDEL, Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla (Sahara septentrional, Algérie), thèse de doctorat en hydrogéologie, université de Badji Mokhtar d'Annaba, 2008.

T. DEBIECHE, Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle, Mémoire présenté pour l'obtention de doctorat en Hydrogéologie et Environnement, U. F. R. des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté, 2002.

S. BEN CHEIKH, G. MED BILLAL, La pollution minérale et organique des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla, mémoire de master en génie de l'environnement, université de K M Ouargla, 2011.

ANONYME, Qu'est-ce qu'une eau potable, Observatoire Régional de l'Environnement Poitou-Charentes, 2013, P1.

PELLE, Polluants organiques courants : Caractéristiques physico-chimiques et comportement dans le milieu naturel. Rapport ANTEA A00495, 1994.

D. MYRAND et al., Guide technique, Captage d'eau souterraine pour des résidences isolées, 2008.

BRGM, Conception d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines au droit d'un site de stockage de déchets, ultimes ou non. Guide méthodologique. Documents du BRGM, n° 273, 1997.

BRGM, Gestion des sites (potentiellement) pollués. Évaluation simplifiée des risques et classification des sites. Version 2. Editions BRGM, 2000.

BRGM, Gestion et traitement des sites pollués. Diagnostic approfondi et évaluation détaillée des risques. Guide technique, Editions BRGM. 2000.

P. DOMENICO, Robbins G, A new method of contaminant plume analysis. Ground Water, vol. 23, n° 4, p. 476-485, 1985.

D. GUYONNE et al. Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes : Application dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau, BRGM, 2001.