

IV. 1. 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.

IV.1. 1. Facteurs liés à la nature du sol et du sous sol

IV. 1. 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 IV.1)

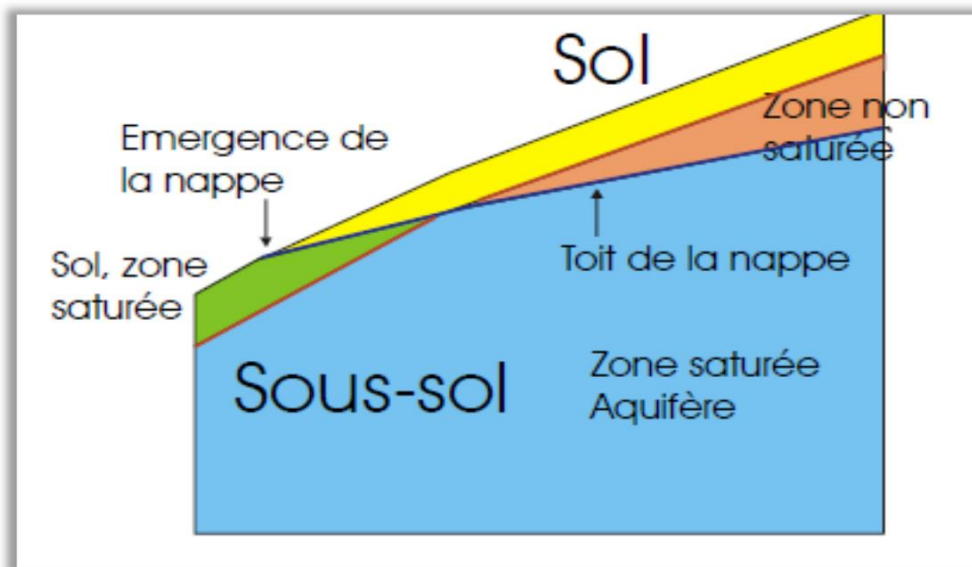


Figure IV.1. Relations entre sol, sous-sol, zone non saturée et zone saturée

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. 1. 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.

IV. 1. 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.

IV. 1. 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.

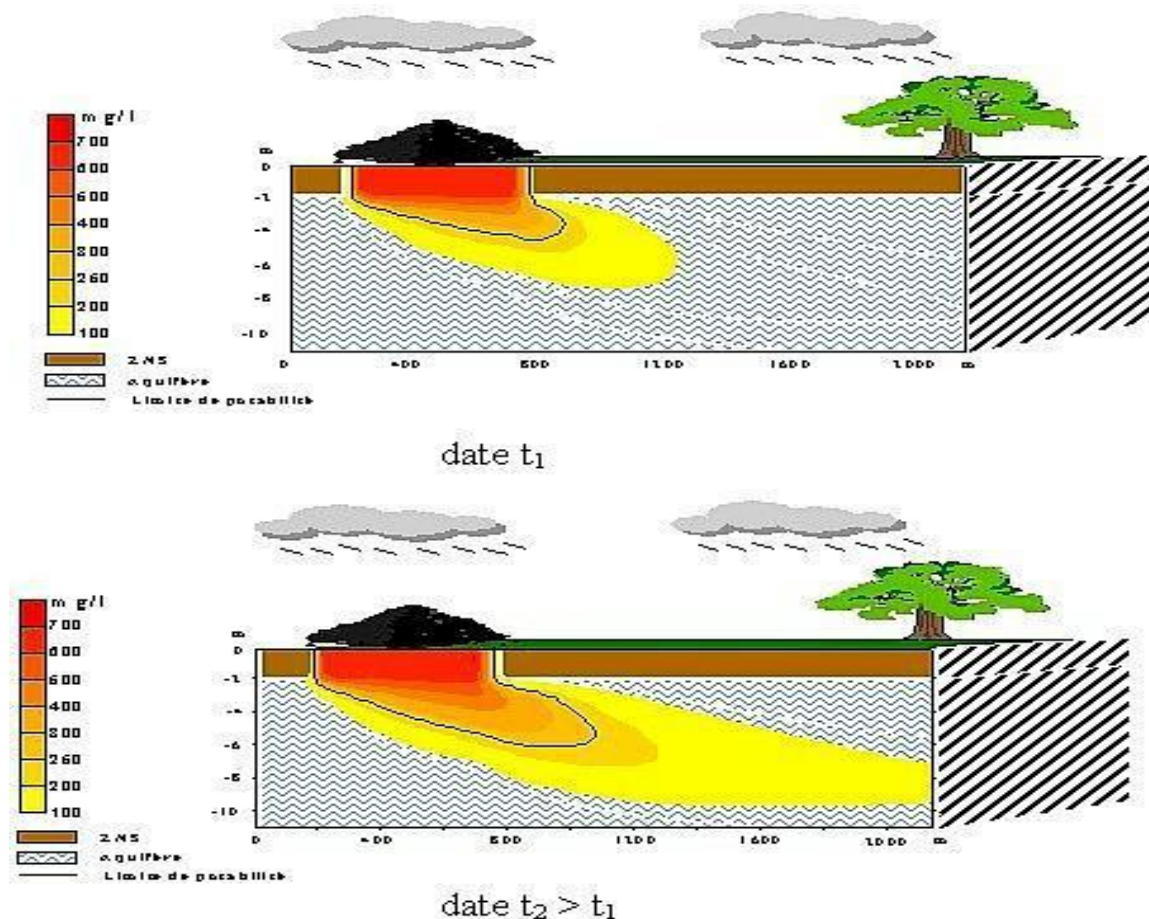


Figure IV.2. Evolution d'un panache de pollution à l'aval d'une décharge.

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 épontes) 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.

I.V. 1. 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.

IV.1. 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. 2. 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.

IV. 2. 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.

IV. 2. 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. 2. 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. 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 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 (Figure IV.02)

IV.2. 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.

IV.3. Caractéristiques physicochimiques du milieu

IV. 3. 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.

IV. 3. 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.

IV. 3. 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).

IV. 3. 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.

IV. 3. 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.

IV.3.2. 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 :

IV.3. 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.

IV.3. 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.

IV.3. 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.

IV.3.2. 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.

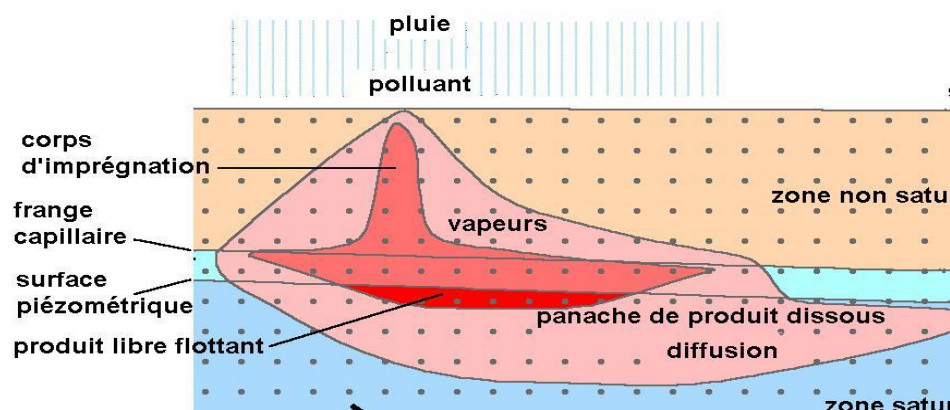


Figure IV.3. Pollution par un produit plus léger que l'eau et qui atteint la nappe.

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.

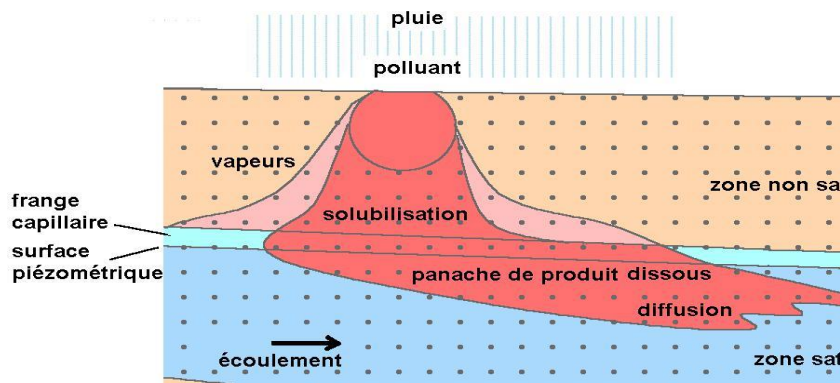
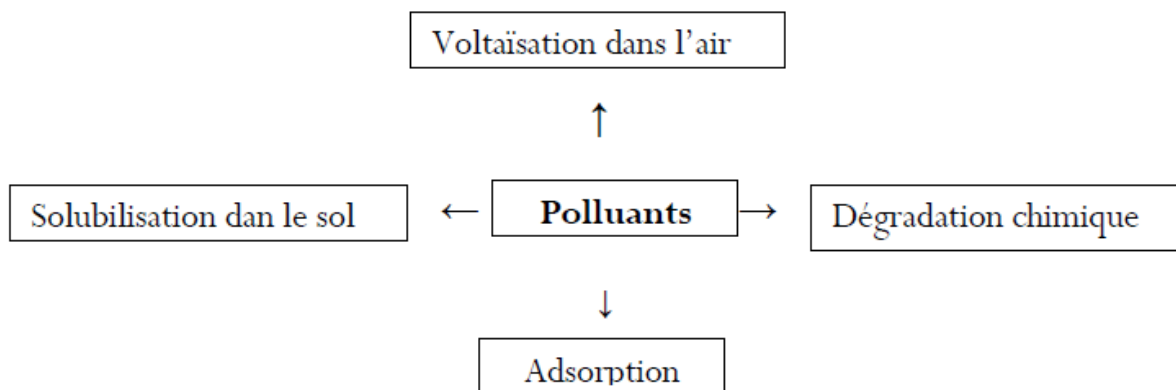


Figure IV.4. Pollution par un produit soluble n'atteignant pas la nappe.

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.

IV.4. 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 composés, 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).

IV.5. Acidification des sols

IV.5. 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.

IV.5. 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



IV.6. Pesticides

Un 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, en différents groupes.

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

À côté des propriétés souhaitées, les pesticides peuvent aussi avoir des propriétés non souhaitées 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 encor 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 |

IV.6. 1. Formules chimiques de quelques pesticides

(DDT)

Methoxy éthyle mercure

Pichloram

Acétate de phényle mercure

IV.6. 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.

IV.6. 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)

Bibliographies :

- 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. Édition 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**, Évolution 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. Éditions BRGM, 2000.
- BRGM**, Gestion et traitement des sites pollués. Diagnostic approfondi et évaluation détaillée des risques. Guide technique, Éditions 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.