



## **Polycopié pédagogique**

# **Systemes de traitement et de décontamination des eaux souterraines et des sols**

Cours destiné aux étudiants de :

**Master 1 : Ecologie fondamentale et appliquée**

**Nom : DALI**

**Prénom : NAOUEL**

**Grade : Maitre de conférences classe A**

**Année 2022**

## *Avant-propos*

Le présent document réalisé dans l'objectif d'être un support de cours pour les étudiants en Master 1 Ecologie et Environnement spécialité Ecologie fondamentale et appliquée. Les lecteurs nécessitent des prérequis sur l'hydrogéologie et de la pédologie

Ce polycopié est structuré en quatre chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous avons détaillé les sources potentielles de contamination des eaux souterraine et les moyens de leurs identifications ;
- Le deuxième chapitre décrit les sources potentielles de contamination des sols ;
- Le troisième chapitre décrit les différentes techniques de dépollution des eaux souterraines :
- Le quatrième chapitre décrit les techniques les plus courantes pour dépollution des sols contaminés.

## **TABLE DES MATIERES**

### **Introduction**

#### **CHAPITRE I. IDENTIFICATION DES SOURCES POTENTIELLES DE CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES**

1.1	Les eaux souterraines.....	3
1.2	Pollution des eaux souterraines.....	16
1.3	Contamination naturelle des eaux souterraines .....	16
1.4	Salinisation naturelle des eaux souterraines.....	17
1.5	Contamination anthropique des eaux souterraines.....	19
1.6	Principaux types de pollutions en fonction du temps et du lieu de propagation.....	20
1.7	Principaux types de polluants des eaux souterraines .....	21
1.8	Principaux origines des pollutions .....	23
1.9	Autoépuration.....	26
1.10	Impacte de la pollution des eaux de surface sur la qualité des eaux souterraines.....	28
1.11	Pollution saline des aquifères côtiers .....	29
1.12	Les mesures nécessaires pour l'examen de la qualité des eaux souterraines .....	34

#### **CHAPITRE II. IDENTIFICATION DES SOURCES POTENTIELLES DE CONTAMINATION DES SOLS**

2.1	Introduction.....	39
2.2	La notion de pollution du sol.....	39
2.3	Les facteurs qui conditionnement la pollution du sol.....	39
2.4	Pollution ponctuelle et pollution diffuse des sols.....	40
2.5	Origines de la pollution des sols .....	42
2.6	Nature des polluants des sols .....	44

#### **CHAPITRE III. SYSTEME DE DEPOLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES**

3.1	Introduction.....	50
3.2	Notion de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution .....	50
3.3	Principe et méthode de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères .....	50
3.4	Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères .....	53
3.5	Quelques Méthodes des systèmes paramétriques les plus utilisées .....	57
3.6	Périmètres de protection des captages.....	62
3.7	Surveillance des eaux souterraines .....	64

#### **CHAPITRE IV. DEPOLLUTION DES SOLS CONTAMINÉS**

4.1	Objectif de la dépollution des sols .....	87
4.2	Technique de dépollution des sols selon le lieu de traitement .....	88
4.3	Technique de dépollution des sols en fonction de la nature des procédés employés.....	88

## *Introduction*

Dans les conditions naturelles, l'eau souterraine est souvent potable et ne nécessite quasiment pas de traitement avant la distribution et l'utilisation. La bonne qualité de l'eau est le résultat du pouvoir auto-épurateur de la zone non saturée qui surmonte la nappe d'eau souterraine qui filtre les bactéries et protègent les eaux souterraines des contaminants en surface.

Mais l'entrée massive de polluants générés par l'activité humaine (agriculture moderne, l'industrie et le manque d'installations d'assainissement peut dépasser la capacité de la zone non saturée à filtrer les contaminants et protéger les eaux souterraines.

Une fois la nappe souterraine est polluée, la décontamination est une tâche très coûteuse et de longue durée, mais qui s'annonce nécessaire et parfois urgente

Dans ce document nous avons essayé de faire un récapitulatif des différentes sources de contamination des eaux souterraines et des sols ainsi que les différentes méthodes et techniques utilisées par leurs décontaminations.

**CHAPITRE I. IDENTIFICATION DES  
SOURCES POTENTIELLES DE  
CONTAMINATION DES EAUX  
SOUTERRAINE**

## *1.1 Les eaux souterraines*

### *1.1.1. Rappel de quelques notions sur les eaux souterraines*

#### *a) Aquifère*

Un aquifère est une formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau et constituée de roches perméables et capable de la restituer naturellement et/ou par exploitation. On distingue :

- Aquifère à nappe libre : aquifère surmonté de terrains perméables et disposant d'une surface piézométrique libre et d'une zone non saturée.
- Aquifère artésien : aquifère dont la surface piézométrique est située au-dessus de la surface du sol.
- Aquifère captif : aquifère intercalé entre deux formations quasi imperméables.
- Aquifère semi-captif : aquifère surmontée d'une couche semi-perméable relativement mince et/ou surmontant une telle couche à travers laquelle l'eau peut pénétrer dans la formation aquifère ou en sortir.

On distingue trois grandes familles d'aquifères :

- Les aquifères de roches sédimentaires sont composés de calcaires, sables, grès, craie. Ils caractérisent les dépôts en couches dans les grands bassins actuels : bassins parisien, aquitain... ou ceux morcelés, voire déformés dans les chaînes de montagne (Alpes, Pyrénées...);
- Les aquifères alluviaux sont constitués de matériaux déposés par les cours d'eau dans leurs vallées : sables et graviers, intercalés dans des limons fins. Vulnérables, ces nappes en relation avec les eaux de surface servent souvent de relais aux grandes nappes libres qui s'écoulent naturellement vers les points bas que sont les vallées ;
- Les aquifères de roches cristallines (granite, gneiss,...) et volcaniques (laves, cendres) stockent l'eau dans les fissures et les zones altérées (arènes). Ils abritent de petites nappes et sont fréquents en Bretagne, dans les Alpes, le Massif central, les Pyrénées.

*b) Zone saturée et zone non saturée (Fig. 1)*

Dans un aquifère on subexiste deux types de zones : saturée et non saturée.

- Dans la zone non saturée de l'aquifère, partie supérieure des terrains dans lesquels les interstices contiennent aussi de l'air, l'eau n'est présente que sous forme d'humidité. Dans la zone saturée de l'aquifère, l'eau occupe la totalité des vides disponibles (fissures, pores des sédiments ou des roches).

- La zone saturée des aquifères on distingue deux types d'eau :

L'eau liée, liée au solide par des forces électrostatiques et moléculaires, les deux processus étant limités dans l'espace ;

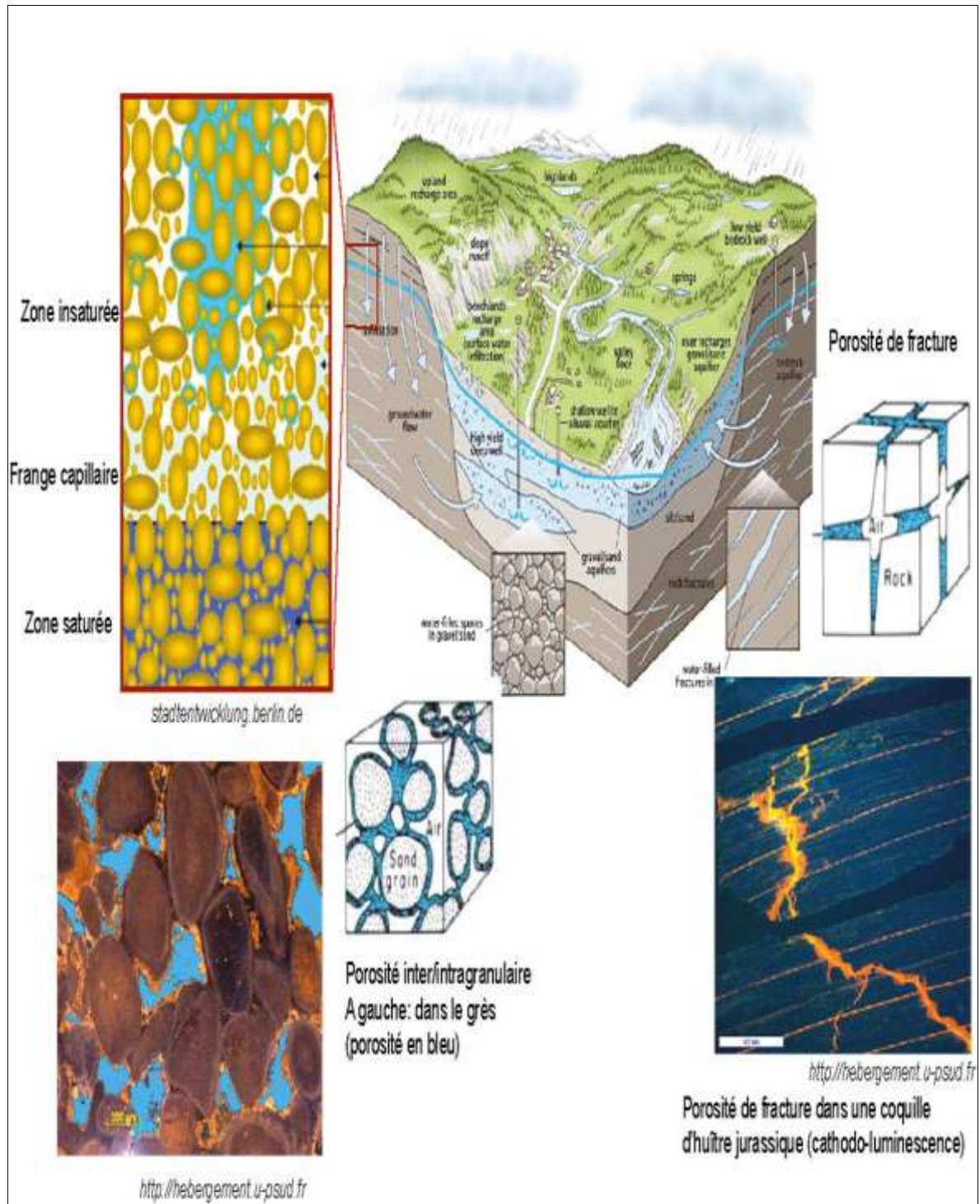
- l'eau libre, susceptible de se déplacer sous l'effet de la gravité et des gradients de pression.

L'eau liée correspond à :

- la couche la plus proche des grains, dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques dizaines de molécules (0,1 micromètre) correspond à une orientation des molécules d'eau à structure dipolaire H-OH, perpendiculairement à la surface des grains. Dans cette zone la viscosité de l'eau peut être doublée ou triplée, sa densité est de l'ordre de 1,5 et sa force par unité de surface est de l'ordre de 10 000 bars.

- la zone de transition entre 0,1 et 0,5 micromètre contient des molécules d'eau qui supportent une attraction non négligeable et sont immobiles.

Au-delà, les forces d'attraction sont encore plus modestes, et on parle d'eau libre.



**Figure 1- Zone non saturée (ZNS).** Elle peut se trouver dans les sols ou la roche mère affleurante. Dans ce cas, la porosité de la zone non saturée est très variable : ici un exemple de porosité intergranulaire dans un grès (en bas à gauche) et un exemple de porosité de fracture (en bas à droite) (Hulin, 2017).

c) *Nappe d'eau souterraine*

Une nappe souterraine est une masse d'eau contenue dans les interstices ou fissures du sous-sol. On distingue deux types de nappes : libres ou phréatiques et captives. Les nappes captives sont piégées sous des formations géologiques imperméables. Le niveau des nappes peut varier en fonction des infiltrations et des prélèvements d'eau.

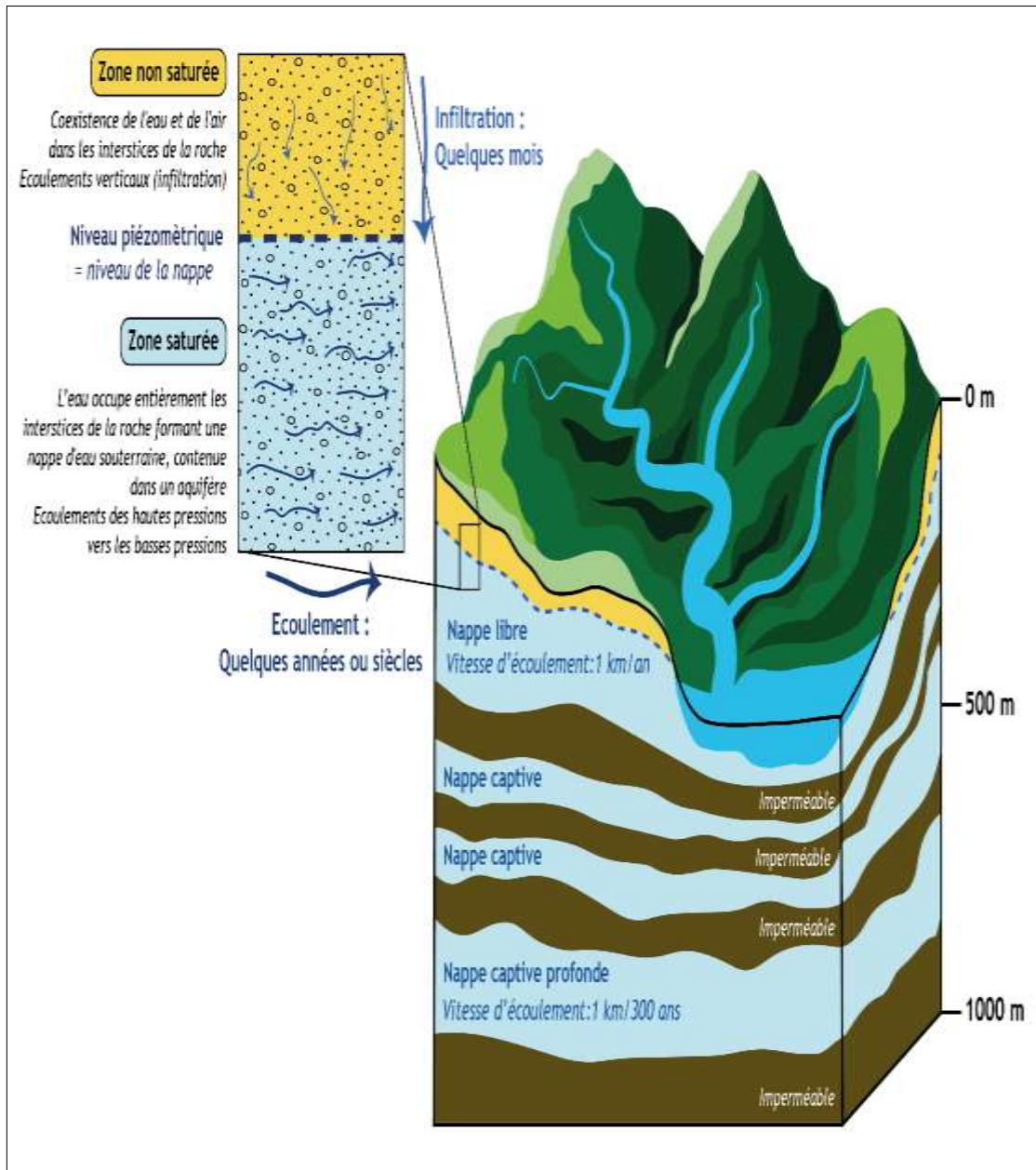
Les nappes d'eau souterraines peuvent être de différents types : les nappes libres et les nappes captives.

- Les nappes libres sont les premières nappes rencontrées dans un sous-sol perméable. Elles comprennent la nappe phréatique peu profonde atteinte par les puits et forages de particuliers.

Du fait de cette perméabilité, ces nappes superficielles sont directement alimentées par les pluies par infiltration. Elles possèdent des capacités de recharge rapides et les eaux y sont « jeunes » (actuelles à subactuelles). En revanche, cette perméabilité implique également que ces nappes soient particulièrement sensibles aux pollutions de surface.

- Les nappes captives

Dans les nappes captives, la pression est supérieure à la pression atmosphérique, la surface piézométrique est donc située au-dessus du toit de la nappe. Dans certains cas, ces nappes captives peuvent être soumises à des phénomènes d'artésianisme (jaillissement naturel de l'eau à la surface ou lors d'un forage en raison de la pression) : on parle alors de nappes artésiennes.



**Figure 2- Schéma représentant des Nappes libres et nappes captives**

(Source : <https://www.institution-adour.fr/nappes-profondes.html>)

- Les nappes fossiles

C'est une nappe qui ne se renouvelle plus, depuis un temps plus ou moins long (jusque plusieurs milliers d'années). Ces nappes sont exploitées dans les milieux désertiques. Dans ce type de cas, elles sont vouées à un épuisement inévitable.

#### **d) Piézométrie des nappes**

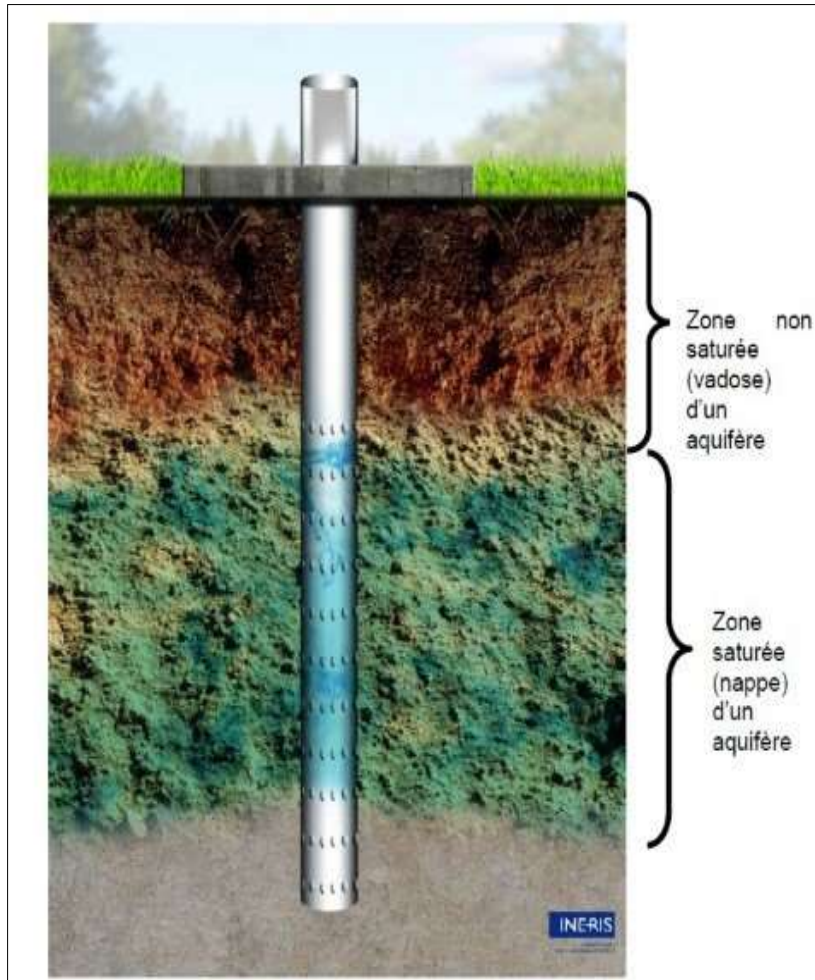
- Un piézomètre est un forage non exploité qui permet la mesure du niveau de l'eau souterraine en un point donné de la nappe.

Il s'agit d'un « dispositif servant à mesurer la hauteur piézométrique en un point donné d'un système aquifère, qui indique la pression en ce point, en permettant l'observation ou l'enregistrement d'un niveau d'eau libre ou d'une pression » C'est un ouvrage qui donne accès à la nappe tout en permettant de contrôler la qualité de l'eau souterraine et de suivre son évolution. Il est donc essentiel à la surveillance et à la gestion d'une pollution. L'attention portée à sa conception ainsi qu'à son entretien conditionne la qualité des mesures et de l'échantillonnage effectués

Le concept de piézomètre a été étendu à l'ensemble des ouvrages artificiels (puits, forages, gravières,...) ou naturels (avens, grottes,...) qui permettent l'accès aux eaux souterraines. Le niveau piézométrique est exprimé soit par rapport au sol en mètre, soit par rapport à l'altitude zéro du niveau de la mer en mètre NGF (Nivellement Général Français).

Le niveau peut être mesuré ponctuellement par une sonde manuelle ou suivi en continu à l'aide d'un enregistreur automatique :

- Capteur de pression
- Système de flotteur



**Figure 3- Représentation schématique d'un piézomètre.**

- Niveau piézométrique

La piézométrie est la mesure de profondeur de la surface de la nappe d'eau souterraine. Elle est exprimée soit par rapport au sol en m, soit par rapport à l'altitude zéro du niveau de la mer en m.

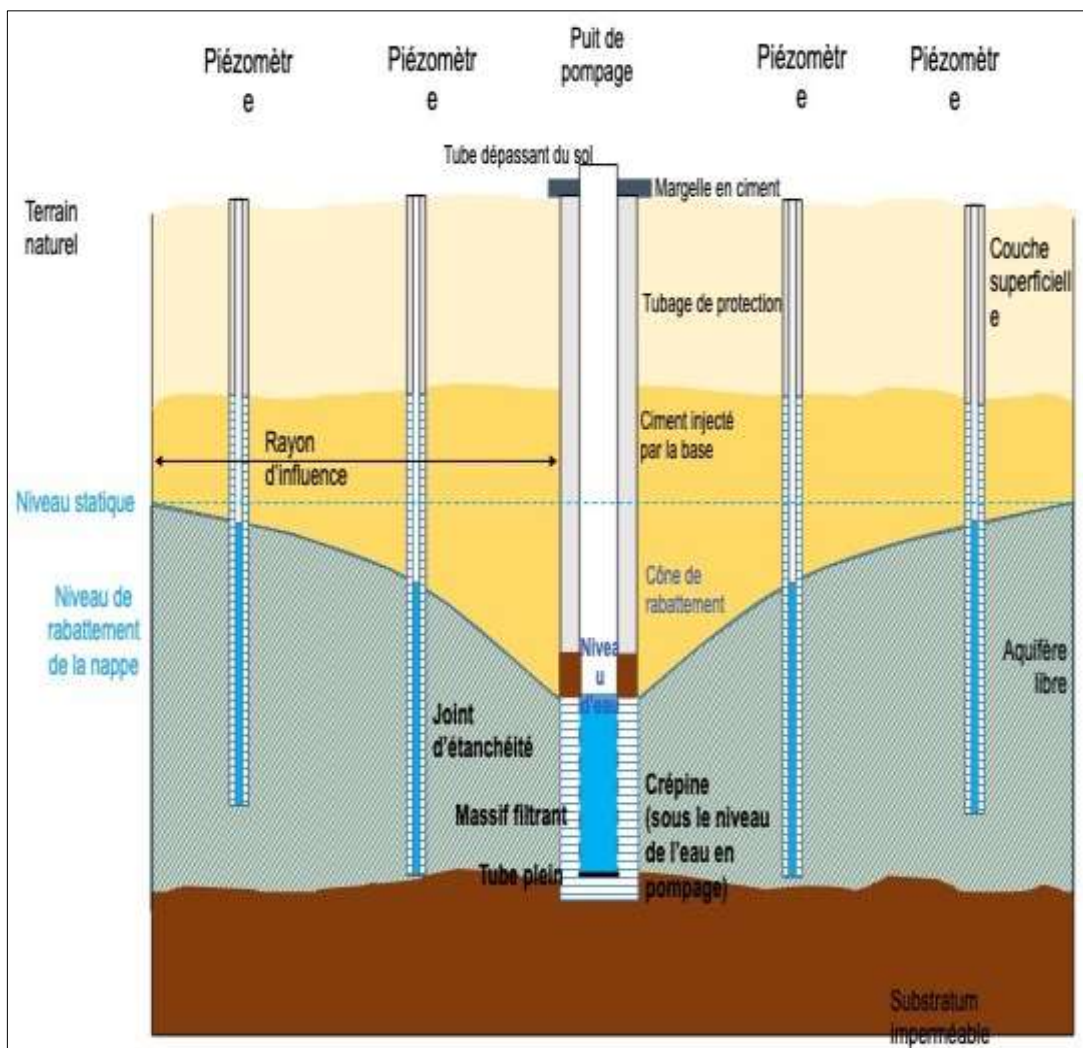
- La surface de la nappe correspond au niveau piézométrique. En cas de pompage de l'eau d'un forage, le niveau de la nappe s'abaisse en formant un cône de rabattement.

L'illustration suivante montre l'exemple d'une nappe située à 5 m de profondeur, et schématise l'influence d'un pompage (**Fig.4**).

L'intérêt du levé piézométrique est comme suit :

- Définir le sens de l'écoulement souterrain

- Estimer le débit d'une nappe
- Evaluer la capacité d'un aquifère (réserves en eau) Evaluer la recharge naturelle (fluctuations de la surface piézométrique), régime d'alimentation de l'aquifère, apprécier les caractéristiques d'une nappe sur un territoire (propriétés hydrodynamiques, limites de l'aquifère, études géotechniques avant réalisation d'un ouvrage...)
- Surveiller une nappe exploitée (durabilité de l'exploitation)
- Etudier les relations de la nappe avec la surface (recharge, décharge)



**Figure 4- Mesure du niveau piézométrique à l'aide d'un ensemble de piézomètres.**

(Source : <https://www.solscope.fr/l-eau-dans-le-sol-pour-detecter-un-niveau-d-eau,b39-758.htm>)

- La carte piézométrique

Les cartes piézométriques sont une retranscription cartographique de la surface des nappes d'eau souterraine. Elles peuvent être lues comme des cartes topographiques, les courbes de niveau (ou isopièzes) correspondant aux altitudes de la nappe.

La lecture d'une carte piézométrique permet donc de connaître le niveau de la nappe, avec un niveau d'incertitude variable selon la densité de points de mesure utilisés pour l'établissement de la carte. Elle permet également de déterminer les sens d'écoulement de la nappe.

Etablir la carte piézométrique d'une nappe nécessite un long travail pour les hydrogéologues :

- ✓ sélection des points d'eau (forages) représentatifs de la nappe étudiée ;
- ✓ campagne de terrain pour effectuer les mesures du niveau de la nappe dans un intervalle de temps réduit (quelques jours à quelques semaines) ;
- ✓ contrôle des résultats, interprétation et tracé des courbes piézométriques.

### ***1.1.2 Importance des eaux souterraines***

Les eaux souterraines représentent 97 % de l'eau douce mondiale et constituent une source importante d'eau potable dans de nombreuses régions du monde. Dans de nombreuses régions du monde, les sources d'eau souterraine constituent l'approvisionnement le plus important pour la production d'eau potable, en particulier dans les zones où les sources d'eau de surface sont limitées ou polluées. Pour de nombreuses communautés, il peut s'agir de la seule option économiquement viable.

Cela est dû en partie au fait que les eaux souterraines sont généralement de qualité plus stable et de meilleure qualité microbienne que les eaux de surface.

Les eaux souterraines ne nécessitent souvent que peu ou pas de traitement pour être potables, alors que les eaux de surface doivent généralement être traitées, souvent de manière extensive

Les eaux souterraines présentent généralement une bonne qualité à certaines exceptions près (zones côtières, contact avec des roches salifères).

La filtration des eaux à travers les terrains poreux leur confère une saveur et une fraîcheur appréciables et offre une certaine garantie du point de vue bactériologique.

Le débit des nappes souterraines présente une grande régularité par rapport à celui

des rivières. Les réserves d'eau souterraine peuvent être importantes même si l'alimentation actuelle est faible ou nulle.

Les nappes souterraines ont en général une grande extension horizontale ce qui les différencie du caractère linéaire des rivières. Elles se présentent comme un système naturel et original d'adduction qui facilite des prélèvements très dispersés. Il faut toutefois bien se garder de confondre le débit de production d'un puits ou d'un forage qui dépend des paramètres hydrauliques locaux de la roche réservoir avec le débit global de la nappe qui est fonction de son alimentation naturelle.

### **1.1.3 Les eaux souterraines dans le cycle de l'eau sur Terre**

Les précipitations qui tombent sur les continents ( $113\,000\text{ km}^3/\text{an}$ ) vont alimenter les différents éléments du cycle hydrologique continental : stockage superficiel, ruissellements et écoulements en rivières. Lorsque les propriétés des terrains (porosité, perméabilité) sont favorables, l'eau pénètre à l'intérieur du sol par infiltration. Sous la surface du sol, les pores des formations géologiques renferment initialement à la fois de l'air et de l'eau : c'est la zone non saturée qui renferme la réserve en eau du sol (l'eau « verte ») et dont l'humidité excédentaire est véhiculée vers le bas par drainage gravitaire pour aller s'accumuler dans les formations géologiques perméables plus profondes et constituer les réserves d'eau des nappes souterraines. Ensemble, ces quantités d'eau accumulées et la roche saturée forment un aquifère. L'ensemble des réserves d'eau douce du globe représente 3 % du volume d'eau sur Terre, dont l'essentiel est contenu dans les océans. Les eaux souterraines douces représentent 33 % des réserves, soit 15 millions de  $\text{km}^3$ . En moyenne de 1 500 ans, leur temps de séjour peut aller de l'année au million d'années (on parle alors d'eau « fossile »).

Le flux total des eaux douces souterraines du globe est de l'ordre de  $10\,000\text{ km}^3/\text{an}$ , soit près de 10 % du volume des précipitations annuelles continentales, contre  $26\,000\text{ km}^3/\text{an}$  pour les eaux superficielles. Ces ordres de grandeur sont confirmés par des modèles hydrologiques globaux de la planète dans lesquels la recharge des eaux souterraines est évaluée à  $13\,000\text{ km}^3/\text{an}$  (au lieu de  $10\,000\text{ km}^3/\text{an}$ ), soit 35 % des ressources en eau renouvelables.

### **1.1.4 Qualité des eaux souterraines**

Les eaux souterraines ne sont pas chimiquement pures : elles contiennent toujours une certaine quantité de sels dissous qui leur confèrent une certaine saveur nécessaire et acceptable jusqu'à un seuil de potabilité variable suivant les goûts et les normes établis par les responsables de la santé publique. En entendant par "eau pure", comme cela se fait couramment, une eau naturellement dépourvue d'impuretés, une eau non polluée, on risque d'introduire une confusion car des eaux naturelles peuvent être impropres, par leur composition chimique, à la consommation, bien que "pures" dans ce sens. Plutôt que d'"eau pure".

### 1.1.5 Normes de qualité des eaux souterraines

L'évaluation de la qualité des eaux dépend de l'usage auquel on la destine : alimentation urbaine, industrie, irrigation.

#### a) *Normes physiques et chimiques*

Les lignes directrices de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable mises à jour en 2006 sont la référence en ce qui concerne la sécurité en matière d'eau potable et qui sont récapitulées dans le **tableau**

En outre, les eaux adoucies ou déminéralisées livrées à la consommation humaine doivent satisfaire à une valeur minimale de dureté et d'alcalinité. Les eaux minérales ne sont contrôlées que du point de vue microbiologique puisque les paramètres physico-chimiques sont très variables et souvent en dehors des valeurs maximales admises pour les eaux dites potables.

Pour les eaux destinées à l'irrigation il n'existe pas de norme. Les seules références disponibles sont les recommandations émanant du ministère de l'agriculture du Canada et qui sont représentées sur le tableau ci-dessous et qui peuvent être prise à titre indicatif.

#### b) *Normes microbienne de l'eau*

En ce qui concerne la qualité microbienne de l'eau, la vérification sera vraisemblablement fondée sur une analyse des micro-organismes indicateurs de contamination fécale, l'organisme type étant *Escherichia coli* ou des bactéries

coliformes thermotolérantes. La surveillance d'agents pathogènes spécifiques ne peut être incluse que dans un nombre très limité de situations pour vérifier le lien entre une flambée et l'eau ou l'efficacité d'un PGSSE. La présence d'*Escherichia coli* apporte la preuve incontestable d'une contamination fécale récente et ce micro-organisme doit être totalement absent de l'eau de boisson. Dans certaines situations, des indicateurs supplémentaires, tels que des bactériophages ou des spores bactériennes, peuvent être utilisés.

**Tableau 1- Normes de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable.**

Elément/ substance	Symbole/ formule	Concentration normalement trouvée dans l'eau de surface	Lignes directrices fixées par l'OMS
Aluminium	Al		0,2 mg/l
Ammonium	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	< 0,2 mg/l (peut aller jusqu'à 0,3mg/l dans une eau anaérobie)	Pas de contraintes
Antimoine	Sb	< 4 µg/l	0,02 mg/l
Arsenic	As		0,01 mg/l
Amiante			Pas de valeur guide
Baryum	Ba		0,7 mg/l
Béryllium	Be	< 1 µg/l	Pas de valeur guide
Bore	B	< 1 mg/l	0,5mg/l
Cadmium	Cd	< 1 µg/l	0,003 mg/l
Chlore	Cl		Pas de valeur mais on peut noter un goût à partir de 250 mg/l
Chrome	Cr <sup>+3</sup> , Cr <sup>+6</sup>	< 2 µg/l	chrome total : 0,05 mg/l
Couleur			Pas de valeur guide
Cuivre	Cu <sup>2+</sup>		2 mg/l
Cyanure	CN <sup>-</sup>		0,07 mg/l
oxygène dissous	O <sub>2</sub>		Pas de valeur guide
Fluorure	F <sup>-</sup>	< 1,5 mg/l (up to 10)	1,5 mg/l
Dureté	mg/l CaCO <sub>3</sub>		200 ppm
Sulfure d'hydrogène	H <sub>2</sub> S		0,05 à 1 mg/L
Fer	Fe	0,5 - 50 mg/l	Pas de valeur guide

<https://www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-oms-eau-potable.htm>

**Tableau 2- recommandations du ministère de l'agriculture du Canada pour la qualité des eaux d'irrigation.**

<b>RECOMMANDATIONS CANADIENNES POUR LA QUALITÉ DE L'EAU D'IRRIGATION</b>	
<b>Paramètre</b>	<b>Recommandation (microgrammes par litre)<sup>1</sup></b>
<b>Principaux Ions</b>	
Bicarbonate <sup>3</sup>	-----
Chlorure	100,000 à 700,000
Sodium	115,000 à 460,000
Solides dissous totaux (salinité)	500,000-3,500,000 (Certaines récoltes sont sensibles aux niveaux élevés)
<b>Ions mineurs et Métaux lourds</b>	
Aluminium	5.000
Arsenic	100
Beryllium	100
Bore	500-6000
Chrome	100
Cobalt	50
Cuivre	200 (récoltes sensibles) 1000(Récoltes tolérantes)
Fluorure	1000
Fer	5000
Plomb <sup>5</sup>	200
Lithium	2500
Manganese	200
Mercure <sup>3</sup>	--
Molybdène	10 à 50
Nickel	200
Selenium	20 à 50
Zinc	1.0 (pH du sol <6,5) 5.0 (pH du sol >6,5)
<b>Antiparasitaires</b>	
Aldicarbe ( <i>Témik</i> )	54,9
Atrazine	10
Bromoxynil	0,33
Chlorotalanil ( <i>Bravo</i> )	5,8
Linuron ( <i>Lorox</i> )	0,071
<b>Paramètres biologiques</b>	
Pathogènes des plantes <sup>3</sup>	--
Pathogènes des humains et animaux	100 coliformes fécaux par 100 mL; 1000 coliformes totaux par 100 mL
<sup>1</sup> Irrigation continue sauf si indication différente. <sup>3</sup> Pas de recommandation actuellement. <sup>4</sup> Recommandation exprimée comme concentration totale. <sup>5</sup> Recommandation temporaire.	

### ***1.1.6 Usages de l'eau souterraine***

L'utilisation de l'eau souterraine présente une large gamme d'applications, y compris l'alimentation des villages, villes et zones urbaines en eau potable ;

l'alimentation des établissements institutionnels, des exploitations agricoles pour de multiples usages ; l'utilisation industrielle à petite échelle. Dans le monde, de nombreuses bourgades, villes villages et collectivités locales éloignées, dépendent des eaux souterraines qui constituent leur principale source d'adduction d'eau. L'eau souterraine est souvent la seule source disponible pour les localités éloignées des sources d'eau de surface ou bien au niveau des pays où le réseau hydrographique est pauvre en raison du climat.

### *1.2 Pollution des eaux souterraines*

Au fur et à mesure que les ans s'écoulent, la population s'accroissant en s'accéléralant, augmente de plus en plus ses besoins unitaires en eau, pour elle-même et pour toutes ses activités, agriculture, industrie, etc. Elle distrait de l'hydrosphère des quantités de plus en plus croissantes d'eau dont une grande partie, ce qui est pire, a pour fonction d'entraîner les déchets de ses productions. Ainsi l'humanité détourne de son cycle l'eau et l'y retourne polluée, perdue.

La pollution des eaux superficielles est très perceptible, attire de suite l'attention sur les dangers et les mesures à prendre pour la combattre.

Par contre la pollution des eaux souterraines est moins apparente, de telle sorte que la tendance générale est de la négliger. Mais elle n'en est pas moins dangereuse, car elle atteint les ressources les plus précieuses par leur qualité et la nature de leurs réserves. Cependant lorsque l'on considère la qualité des eaux souterraines et leur dégradation, il faut faire la différence entre la contamination naturelle et anthropique.

### *1.3 Contamination naturelle des eaux souterraines*

Les eaux souterraines se minéralisent à des degrés divers en raison des interactions sol/roche-eau, ce qui conduit à la dissolution de certains minéraux et éléments chimiques. Neuf principaux constituants chimiques (Na, Ca, Mg, K, HCO<sub>3</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Si) représentent 99% de la teneur en soluté de l'eau souterraine naturelle. Le degré de dissolution dépend de la longueur de la trajectoire, du temps de séjour, la solubilité des minéraux du sol / roche et la quantité d'eau (douce) de dilution par la recharge. Les réactions de l'eau de pluie dans le profil de sol / roche au cours de l'infiltration fournissent aux eaux souterraines sa composition en

minéraux essentiels. L'eau souterraine dans les zones de recharge des régions humides est susceptible d'avoir une minéralisation globale faible, par rapport aux régions arides ou semi-arides où la combinaison de la concentration par évaporation et le mouvement plus lent de l'eau souterraine, peut produire des concentrations beaucoup plus élevées. Sous certaines conditions et dans certains géo-environnements, des éléments naturellement présents, mais dangereux entrent en solution à des concentrations excessives :

- L'arsenic (As) est un élément de trace qui donne actuellement beaucoup de préoccupations dans les eaux souterraines, car étant à la fois toxique et cancérigène, à de faibles concentrations
- Le fluor (F) est un élément qui est parfois absent, mais à des concentrations excessives, il peut être un problème, surtout dans les climats arides et dans les roches volcaniques et granitiques
- Le manganèse (Mn) et le fer (Fe) sous forme soluble sont très répandus, là où les conditions anaérobies des eaux souterraines se posent. Lorsque l'eau est extraite, le manganèse et le fer s'oxydent, donnant lieu à un goût et / ou à une couleur inacceptable des eaux souterraines. Alors que Fe n'est pas un danger pour la santé, la consommation d'eau à des concentrations élevées de manganèse, pourrait avoir des effets neurologiques sur les êtres humains. L'OMS a fixé la limite supérieure de la concentration de Mn dans les eaux souterraines à 0,4 mg/l On peut rencontrer diverses autres éléments de trace (y compris notamment Ni, U et Al) dans les conditions naturelles dans les nappes d'eau souterraine ; ils sont cités par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) comme potentiellement dangereux dans l'eau potable.

#### *1.4 Salinisation naturelle des eaux souterraines*

Les eaux souterraines peuvent être de mauvaise qualité naturelle indépendamment de toute pollution. La qualité médiocre de ces eaux ne peut être que mise en évidence et expliquée. Elle est rarement modifiable dans le sens d'une amélioration. L'usage de telles eaux, qui heureusement ne sont pas les plus répandues en général, est forcément limité.

Il s'agit en fait d'eaux naturellement salées dans des conditions géologiques et climatiques particulières. On conviendra de donner le nom d'eau saumâtre aux eaux

en teneur en sels dissous comprises entre celles des eaux douces et celles de l'eau de mer soit entre 0,5 et 30 g/l ; on emploie aussi l'expression eau salée pour les teneurs les plus voisines de celles de l'eau de mer.

Toutes les roches ou sols contiennent en des proportions naturellement très diverses, des minéraux ou des substances plus ou moins solubles, lessivables. La concentration des eaux en sels dissous est, en dernière analyse, fonction surtout des conditions d'écoulement, c'est-à-dire de facteurs climatiques, morphologiques et hydrogéologiques.

Tout ce qui défavorise et ralentit le drainage naturel, en surface ou dans le sous-sol (et a fortiori dans les deux à la fois) est un facteur de concentration des eaux : les faibles pentes et les basses altitudes, les déficits d'écoulements élevés dus principalement à l'évapotranspiration, les faibles perméabilités.

Ces facteurs naturels peuvent eux-mêmes être modifiés par l'intervention humaine, consciente ou non, qui peut agir dans le sens d'une péjoration favorisant le développement et l'extension des eaux saumâtres (on rejoint alors l'une des causes de la pollution des eaux) ou au contraire dans le sens d'une amélioration (dessalement in situ).

Les facteurs géographiques sont l'une des principales causes de l'existence de nappes d'eau saumâtre.

La proximité de la mer est naturellement un facteur primordial, mais il intervient différemment selon qu'il se combine à des facteurs morphologiques ou à des facteurs géologiques.

Les facteurs géologiques, d'une manière plus générale, agissent entant que tels essentiellement par la lithologie, mais selon deux aspects : la teneur en sels solubles et la perméabilité des roches. Certaines roches, dites "évaporites" sont particulièrement riches en sels solubles, et parfois, en sont entièrement constituées (sel gemme, gypse). Elles sont surtout un facteur de salure des eaux de ruissellement par leurs affleurements, qui lorsqu'ils sont assez étendus peuvent rendre saumâtres les eaux de certaines rivières en période d'étiage : mais cela n'est sensible que pour des bassins versants assez petits.

La faible perméabilité des roches salifères ou gypsifères rend généralement les couches qui en sont constituées dépourvues de nappes exploitables. Mais dans certains cas, le contact entre ces couches et des couches plus aquifères peut contaminer des nappes à débit utilisable.

En général, c'est au Trias qu'appartiennent la plupart des couches génératrices de salures d'eaux de surface ou souterraine, par la fréquence des niveaux d'anhydrite et de sel gemme qu'elles renferment..

### *1.5 Contamination anthropique des eaux souterraines*

On entend par pollution toute péjoration de la qualité d'une eau résultant de l'activité humaine.

La pollution anthropique des eaux souterraines peut être biologiques, chimiques et les pollutions radioactives, chacun de ces groupes requiert un traitement particulier.

Les origines peuvent être ainsi classées :

- Habitats humains : pollution essentiellement biologique (excréments, fosses d'aisance, puits perdus, décharge des villes, puits, conduites d'eau d'égout, eaux résiduaires, bassins de purification etc.
- Fermes : pollution essentiellement biologique (habitats, animaux, fumier, fosse à purin, puits etc.)
- Cultures : pollution biologique, par épandage de fumier, de gadoues (Engrais constitué de matières fécales), par irrigation d'eau d'égouts ; pollution chimique, par épandage d'engrais minéraux, chlorures et sulfate et nitrate de potassium, sels ammoniacaux, nitrate, phosphates etc.; par irrigation amenant une augmentation de la salure par évapotranspiration, salure qui se transmet aux nappes par infiltration ; par traitements antiparasitaires, pesticides etc.
- Eaux de rivières, canaux de navigation, canaux d'adduction, lacs, barrages, recharges artificielles.
- Industrie : Les pollutions chimiques et biologiques vont souvent de pair mais on peut mettre à part les usines atomiques.
- Industries des produits pétroliers - forages, raffineries, réservoirs, réservoirs souterrains, postes de pompes à essence etc; déchets des
- Mines, par exemple de sels de sodium ou de potassium arrivant à saler dangereusement les nappes superficielles, terrils (colline artificielle construite par

accumulation de résidu minier), exhaure etc. industries métalliques ; industries chimiques ; papeterie ; sucrerie ; distillerie ; laiterie ; teinturerie ; lavage, de laine etc. ; usines atomiques à déchets liquides et déchets solides etc.

## ***1.6 Principaux types des pollutions en fonction du temps et du lieu de propagation***

### ***1.6.1 Pollution temporaire et pollution chronique***

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

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

### ***1.6.2 Pollution ponctuelle et pollution diffuse***

Le polluant émis sur une faible surface n'affectera qu'un secteur limité de la nappe, qui pourra s'étendre par diffusion. Seuls les captages à proximité de la zone polluée et en aval seront affectés. Selon la densité et la solubilité du polluant, la zone polluée sera circonscrite ou diffuse, à la surface ou à l'intérieur de la nappe.

Les sources ponctuelles de pollution des eaux souterraines peuvent être :

- Systèmes septiques sur place
- Fuites de réservoirs ou de pipelines contenant des produits pétroliers
- Pertes ou déversements de produits chimiques industriels aux installations de fabrication
- Puits d'injection souterrains (déchets industriels)
- Décharges municipales
- Déchets d'élevage du bétail
- Fuites de réseau d'égouts
- Produits chimiques utilisés dans les installations de préservation du bois
- Résidus de zones minières

- Cendres volantes des centrales thermiques alimentées au charbon
- Zones d'élimination des boues dans les raffineries de pétrole
- Épandage des boues résiduelles
- Cimetières
- Zones de stockage de sel pour les routes
- Puits pour l'élimination des déchets liquides
- Ruissellement du sel et d'autres produits chimiques sur les routes et autoroutes
- Déversements liés aux accidents routiers ou ferroviaires
- Goudron de houille dans les anciens lieux de gazéification
- Production d'asphalte et terrains de nettoyage de l'équipement

Sources non ponctuelles (diffuses) peuvent être :

- Engrais sur les terres agricoles
- Pesticides sur les terres agricoles et les forêts
- Contaminants dans les retombées sous forme de précipitations, de neige et de dépôts atmosphériques secs

### ***1.6.3 Pollution linéaire***

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

### ***1.7 Principaux types de polluants des eaux souterraines***

L'origine des polluants est multiple : domestique, urbaine, industrielle et agricole. Tout en distinguant les polluants miscibles des non-miscibles, on les classe en polluants physiques, chimiques et biologiques.

- polluants physiques : température, gaz, suspension, radioactivité
- polluants chimiques : substances sous forme minérale ou organique, ils peuvent être : dissous (sels, hydrocarbure) mélangés (alcools) émulsés (graisse sur détergents) en phase séparée (produits pétroliers)
- polluants biologiques : germes, virus ou amibes

### ***1.7.1 Polluants chimique***

#### *a) Composés azotés*

L'eau d'une nappe ne contient naturellement pas de composés azotés : ceux-ci, provenant de la décomposition de la matière vivante par les micro-organismes ; sont minéralisés en azote gazeux ou restent en faible quantité dans le sol. C'est l'augmentation artificielle de la quantité d'azote combiné disponible dans le sol qui crée un déséquilibre entre l'apport et la consommation et produit un excès d'azote qui est finalement entraîné vers la nappe. Cet azote se trouve sous forme de nitrates et d'ammonium

#### *c) Métaux*

La pollution par composés métalliques est généralement d'origine industrielle mais elle peut également provenir de la lixiviation des déchets solides ménagers. Des métaux ne produisent que des inconvénients d'aspect ou de goût (Fer, zinc, manganèse...); l'eau doit être traitée pour être potable, ou utilisée en l'état pour d'autres usages. Les métaux lourds, comme le Mercure, le Cadmium, le Plomb, le Chrome, sont toxiques et rendent l'eau inutilisable pour l'usage domestique et l'agriculture.

#### *d) Autres corps*

De nombreux corps minéraux, toxiques ou non, produits par l'industrie et utilisés par l'agriculture peuvent être des polluants ponctuels des nappes : chlorures, sulfates, cyanures, sels d'arsenic... En Alsace, l'exploitation de la potasse a produit la pollution par les chlorures et les sulfates de l'eau des nappes. Les activités d'une usine chimique à Chauny (Aisne) depuis 1820 jusqu'à 1985 a laissé un sol pollué à forte teneur de chrome, cadmium, cuivre, plomb et arsenic interdisant tout exploitation de la nappe sous-jacente.

### ***1.7.2 Polluants biologique***

Par ailleurs, les contaminants organiques sont potentiellement innombrables : détergents, produits phytosanitaires, solvants, hydrocarbures. Liés aux activités humaines de tous ordres, ils créent des problèmes différents selon leur solubilité,

leur rémanence et leur devenir dans les eaux, les sols et la chaîne alimentaire. Hormis des accidents (sub)aigus ponctuels ou des phénomènes cumulatifs, les molécules organiques causent de plus en plus d'inquiétude du fait de leur présence ubiquitaire, polyvalente et insidieuse, se manifestant par des effets écologiques avérés et des effets sanitaires réels ou potentiels à long terme (cancers, altérations endocriniennes).

La pollution microbienne et parasitaire des eaux est importante. L'essentiel est manifestement d'origine fécale, due aux déjections humaines et animales, au travers des eaux usées plus ou moins bien maîtrisées aux plans technique et sanitaire. De toute façon, les traitements primaires et secondaires des eaux usées n'affectent qu'en partie leur charge microbienne et les boues de traitement sont très contaminées, sauf après traitement approprié. Les facteurs microbiens de pollution des eaux sont des bactéries entéropathogènes (salmonelles, shigelles, E. coli, vibrions cholériques), des virus (entérovirus de type poliovirus, coxsackie et echovirus, virus de l'hépatite A, corona- et rotavirus, virus de Norwalk et assimilés) responsables, selon les cas, de gastro-entérites, hépatites ou syndromes neuro-méningés; ces virus sont, en général, plus persistants dans le milieu et plus résistants aux traitements de désinfection que les bactéries. Des parasites sont aussi en cause : ils sont fort nombreux, dans les pays tropicaux, à impliquer un stade hydrique important dans leur cycle de développement, tel Entamoeba coli. Dans les pays développés, des parasites unicellulaires, tels Giardia lamblia et Cryptosporidium parvum, sont de redoutables agents pathogènes, notamment pour des sujets immunodéprimés ; leurs kystes sont aussi particulièrement résistants dans le milieu et face aux désinfectants.

## ***1.8 Principaux origines des pollutions***

### **1.8.1 Agricole**

Les pesticides, les engrais, les herbicides et les déchets animaliers sont des sources agricoles de contamination des eaux souterraines. Les sources agricoles de contamination sont nombreuses et variées : débordement des engrais et des pesticides pendant la manipulation, écoulement du chargement et lavage des pulvérisateurs de pesticide ou de tout autre équipement d'application, utilisation de

produit chimique... Une région agricole qui manque de drainage est considérée par beaucoup de fermiers comme étant terre perdue du point de vue du revenu. Ainsi, ils peuvent installer des tuiles de drain ou des puits de drainage pour rendre la terre plus productive. Les puits de drainage servent alors de conduit direct aux eaux souterraines pour les déchets agricoles. Le stockage de produits chimiques agricoles près de conduits d'eaux souterraines, telles que les puits, les trous d'évier, est susceptible de s'accumuler et de provoquer une contamination. La contamination peut également se produire quand des produits chimiques sont stockés dans des secteurs découverts, non protégés du vent et de la pluie.

### **1.8.2 Industriel**

Les industries de fabrication et de secteur tertiaire ont des demandes élevées en eau pour les procédés de refroidissement, de traitement ou de nettoyage. La pollution des eaux souterraines se produit quand l'eau utilisée est retournée au cycle hydrologique.

L'activité économique moderne exige le transport et le stockage de la matière employée dans la fabrication, le traitement, et la construction. De cette manière, une partie de ce matériel peut être perdue par débordement, par fuite, ou par mauvaise manipulation. L'élimination des pertes, associée aux activités ci-dessus, est une autre source de contamination des eaux souterraines. Certaines entreprises, habituellement sans accès aux réseaux d'égouts, se servent dans les eaux souterraines peu profondes. Elles emploient des fosses ou des puisards secs, ou envoient l'eau usagée dans les réservoirs septiques. Tout ceci peut mener à la contamination des sources souterraines d'eau potable. Les fosses et les puisards secs provoquent l'infiltration des déchets directement dans le sol. Les systèmes septiques ne peuvent pas traiter les pertes industrielles. Les pratiques en matière de disposition d'eau usagée de certains types d'entreprises, telles que des stations-service d'automobile, fabricants de composant électrique ou de machine, processeurs de photo, sont particulièrement concernés parce que les déchets qu'ils génèrent sont susceptibles de contenir des produits chimiques toxiques. Les autres sources industrielles de contamination incluent : le nettoyage des réservoirs ou la pulvérisation d'équipement sur la terre, l'évacuation de déchets dans les systèmes

septiques ou les puits secs, et le stockage de matériaux dangereux dans des secteurs découverts ou dans les secteurs qui n'ont pas des garnitures avec des drains ou des bassins de captation. D'autre part, les souterrains et les réservoirs de stockage contenant des produits pétroliers, des acides, des dissolvants ou des produits chimiques peuvent avoir des fuites dus à la corrosion, à des défauts, à des problèmes dans les installations,... L'exploitation du carburant et des minerais non-combustibles peut créer une contamination des eaux souterraines. Les problèmes proviennent du processus d'extraction lui-même, de l'élimination des déchets, et du traitement des minerais et des déchets qu'il crée.

### **1.8.3 Domestique**

Dans le cas d'un assainissement, collectif ou individuel, défectueux, des substances indésirables contenues dans les eaux vannes et les eaux ménagères peuvent être transférées à la nappe (matières organiques, détergents, solvants, antibiotiques, micro-organismes...) Le cas se produit avec les puits perdus, l'assainissement individuel avec infiltration dans le sol mal conçue ou mal dimensionnée, les stations d'épuration urbaines surchargées... Les ordures ménagères accumulées dans des décharges sauvages ou non mises à la norme (centre d'enfouissement technique) libèrent également des lixiviats riches en polluants.

### **1.8.4 Urbaine et routière**

Les risques de pollution apparaissent à la construction des réseaux routiers puis à leur exploitation (salage en hiver, hydrocarbures, métaux lourds libérés par les véhicules, substances dangereuses échappées par accident...) En ville, on trouve, en plus des polluants de la voirie, la contamination possible des nappes par les eaux usées (raccordement incomplet ou défectueux, mauvais état des réseaux, surcharge ou mauvais fonctionnement des Stations d'épuration, en particulier absence de traitement tertiaire) par les fuites de cuves de carburants (essence, fioule).

L'imperméabilisation des surfaces (routes, rues, parkings, toits) produit une forte quantité d'eau de ruissellement chargée en produits polluants divers (hydrocarbures, déjections d'animaux...) Ces eaux pluviales polluées ne doivent en aucun cas être transférées à la nappe.

## 1.9 Autoépuration

L'autoépuration est un phénomène extrêmement complexe mais très efficace qui mène à la banalisation des polluants toxiques, par des mécanismes et des interactions physiques, chimiques et biologiques. Ces mécanismes ont lieu lors de l'interaction des polluants avec les gaz, l'eau, les sols, les roches, la flore et la faune.

### 1.9.1 Rôle du sol

Les sols constituent un puissant moyen d'épuration et de recyclage des eaux. Le complexe argilo-humique confère des propriétés d'adsorption et d'échange : le sol constitue un système accumulateur de substances très diverses. L'adsorption moléculaire et la rétention des micro-polluants organiques dans les sols sont plus ou moins forte et plus ou moins réversible. La nature de la molécule détermine son pouvoir de rétention, par son poids moléculaire, par sa charge, par la conformation de la molécule et son affinité à établir des liaisons covalentes, par sa solubilité dans l'eau. La capacité d'adsorption ionique et la rétention des cations (Ca, Mg, K, Na) du sol varient essentiellement en fonction de son épaisseur, de sa teneur en argile et en matières organiques. Les anions tels que  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  ne sont pas retenus et migrent par convection ou par diffusion alors que certaines molécules sont fortement retenues dans le sol, comme par exemple les phosphates.

La microfaune et la microflore du sol lui confère une importante capacité d'épuration biologique. Un gramme de sol renferme environ  $10^8$  à  $10^9$  bactéries essentiellement non pathogènes. L'azote organique protéinique et l'azote minéral sont métabolisés avec alternance de phases aérobies de minéralisation et de phases anaérobies de dénitrification. Les différentes voies de catabolisme des micro-polluants organiques, via des enzymes, aboutissent à la production de déchets (dégradation totale de la matière organique), que sont le dioxyde de carbone et le méthane, ou à des métabolites secondaires (dégradation partielle) parfois plus toxiques que la molécule d'origine.

En revanche, les solvants chlorés, l'acétone et le benzène sont très peu retenus par les sols et peuvent atteindre rapidement les nappes avec une grande persistance en entraînant avec eux d'autres molécules polluantes adsorbées.

Le sol peut être un réservoir pour les germes pathogènes introduits accidentellement. Les bactéries circulent relativement peu dans les sols et sont retenues dans les premiers centimètres, à la différence des virus qui sont facilement entraînés et peuvent contaminer la nappe sous-jacente.

### ***1.9.2 Rôle du couvert végétal***

Le couvert végétal agricole ou forestier agit par ses prélèvements cycliques dans la couche occupée par les racines : stockage dans la biomasse puis restitution au sol par dégradation. Les changements d'occupation des sols peuvent rompre cet équilibre : libération importante d'azote liée à la déforestation et la mise en culture, pollution azotée par les jachères travaillées, dégradation accélérée de la matière organique par le retournement des prairies.

### ***1.9.3 Rôle protecteur des berges des cours d'eau***

Les dépôts vaseux situés au fond des cours d'eau et latéralement à proximité de la berge, riches en bactéries, sont le siège du processus de biodégradation des hydrocarbures, par exemple, et de l'accumulation des métaux lourds (Zn, Pb, Cd, As, Mn) qui se fixent sur les particules argileuses des alluvions.

### ***1.9.4 Autoépuration biologique des eaux souterraines***

Les organismes vivants et non toxiques (Bactéries et Invertébrés) présents dans les eaux souterraines peuvent jouer un rôle essentiel dans les processus d'autoépuration des polluants des eaux souterraines.

Les Invertébrés sont capables de métaboliser et de transformer certains polluants (hydrocarbures, métaux lourds) en des composés à toxicité moindre. La bioaccumulation de polluants, c'est-à-dire l'assimilation et la concentration de substances toxiques par l'organisme, permet de stocker temporairement dans les tissus vivants des polluants et de contribuer à la restauration des milieux. La biotransformation, processus important chez les animaux qui ingèrent de grande quantité de sédiments, réduit également la concentration en éléments toxiques dans la chaîne trophique considérée.

Les bactéries sont les acteurs fondamentaux de la dégradation directe ou indirecte et de l'immobilisation des polluants minéraux ou organiques, ainsi que de la remobilisation des molécules toxiques ou indésirables. Les transformations biotiques sont moins importantes dans les eaux souterraines que dans le sol en raison de la plus faible activité biologique et sont réalisées par des bactéries libres et par des bactéries fixées sur un substratum (sédiments, fraction argileuse, silt). Cependant, les bactéries libres, susceptibles d'être entraînées avec l'écoulement des eaux souterraines et par conséquent avec le flux de polluant, ont un rôle important dans la transformation de ces substances indésirables. Généralement, plus une molécule organique est substituée plus elle est résistante à la biodégradation. Le remplacement du carbone par d'autres atomes, comme les branchements multiples sur un même atome de carbone, augmente la résistance à la biotransformation des produits organiques. Des polluants organiques toxiques comme les HAP et les PCB sont peu biodégradés. L'activité biologique de bactéries dénitrifiantes se déclenche lors du passage du régime libre au régime captif d'une nappe, c'est-à-dire lorsque l'eau s'appauvrit en oxygène dissous. La teneur en nitrates de l'eau diminue sensiblement

### *1.10 Impacte de la pollution des eaux de surface sur la qualité des eaux souterraines*

Selon le contexte naturel, l'eau souterraine migre à travers des pores, des fissures ou des fractures du sol. Sont illustrés ci-dessous ces trois types de milieux : le milieu poreux, le milieu fissuré et le milieu karstique.

L'eau s'infiltré depuis la surface du sol et une partie finit par atteindre la zone saturée de l'aquifère (nappe superficielle) ; c'est le mécanisme de recharge de la nappe. En fonction du contexte, cette eau pourra par la suite migrer horizontalement ou verticalement (en présence de fractures, de conduits et cavités karstiques, le temps de transfert est très rapide). De la même manière, une pollution provenant de la surface du sol, d'une canalisation ou d'une cuve enterrée, parvient jusqu'à la nappe superficielle sous forme pure (huileuse par exemple), sous forme dissoute voire sous forme particulaire (certains polluants pouvant être retenus sur les particules du fait du mécanisme de sorption ou d'échange cationique).

### *1.11 Pollution saline des aquifères côtiers*

Les aquifères côtiers constituent des ressources en eau importantes dans les zones littorales où l'on observe des fortes densités démographiques et une intense activité agricole. Ce sont des zones où la demande en eau est de plus en plus croissante. Cela est favorisé par la faible profondeur des nappes d'eau souterraine dans ces zones côtières. Cependant, l'exploitation de ces nappes pose des problèmes complexes car elle associe la notion des réserves des eaux souterraines à celle de leur qualité

Les nappes en bordure du littoral sont particulièrement sensibles au risque de pollution saline. Ce phénomène est aussi appelé « biseau salé » ou « invasion marine ».

Il se produit lorsque le niveau de la nappe descend trop bas, les écoulements d'eau s'inversent (de la mer à la terre, et non de la terre à la mer). Ceci entraîne l'eau salée à l'intérieur des nappes d'eau douce, la pollution est alors très souvent irréversible.

Cette baisse du niveau de la nappe phréatique souvent due à un forage excessif, parfois sur une courte période de l'année durant la saison touristique (qui nécessite plus d'eau pour la consommation et les activités comme la piscine ou le golf). L'eau de mer vient alors combler le « trou » que l'eau douce – surconsommée – a laissé.

Par ailleurs, l'invasion des eaux douces par les eaux salées aura pour effet une dégradation des sols et une salinisation par suite des irrigations avec ces eaux.

Il n'existe pas de solution miracle pour stopper l'intrusion saline, cependant il existe des solutions permettant de la limiter et la repousser vers la mer. Dans cette partie, nous allons en présenter La recharge artificielle des nappes qui est une pratique émergente qui vise à augmenter les volumes d'eau en favorisant par des moyens artificiels son infiltration jusqu'à l'aquifère ; elle fait partie, avec l'utilisation de l'eau de pluie, des eaux usées retraitées et du dessalement de l'eau de mer, des ressources alternatives en eau les plus souvent citées participant à une gestion économe de l'eau.

#### **1.11.1 Les aquifères littoraux**

Les aquifères littoraux prennent place au sein de formations géologiques variées : bassins sédimentaire, alluvions, socle fissuré, formations volcaniques et formations carbonatées karstifiées.

Ils sont le lieu de rencontre de deux types d'eaux souterraines :

- des eaux douces provenant de l'infiltration des précipitations et des eaux de ruissellement au niveau de la surface continentale ;
- des eaux salées qui imprègnent les terrains au voisinage des côtes ou pénètrent les cours d'eau au niveau des estuaires, pouvant ainsi donner lieu à la salinisation des eaux souterraines en relation hydraulique avec les eaux de surface (océan, rivières).

Les aquifères littoraux sont donc en contact avec l'eau salée d'origine marine, qui envahit plus ou moins les formations géologiques côtières, l'eau douce d'une densité moindre que l'eau salée «flottant» sur l'eau salée (**Fig.5**).

L'intrusion d'eau salée prend la forme d'un biseau Plongeant vers l'intérieur des terres, appelé communément «biseau salé», et constitue une interface entre l'eau salée et l'eau douce. Cette interface va évoluer au cours du temps en fonction de la recharge par les précipitations, de l'exploitation de l'aquifère et du niveau marin.

### **1.11.2 Biseau Sallé**

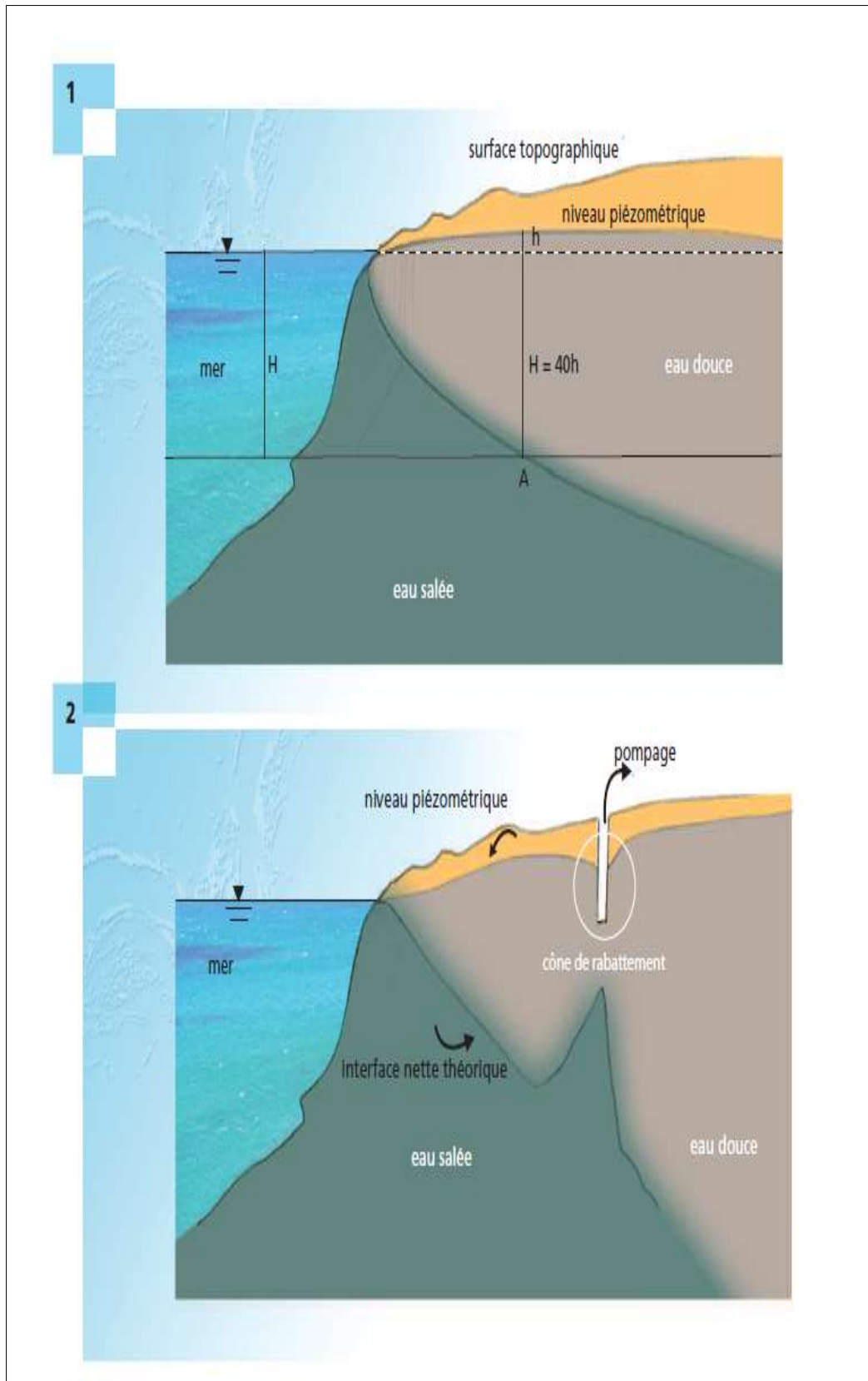
Une contamination est fréquente dans les régions côtières. Il s'agit de la contamination des puits par l'eau salée. En bord de mer, dans les régions de plaines surtout, les eaux salées, plus denses que les eaux douces potables, s'infiltreront sous ces dernières jusqu'à une certaine distance à l'intérieur du continent. L'eau douce "flotte" en quelque sorte sur l'eau salée.

Le pompage de l'eau douce entraîne la création normale d'un cône de dépression à la surface de la nappe phréatique ; en réaction à ce cône de dépression, il se forme un cône inverse sous la lentille pour rééquilibrer les masses de densités différentes.

Un sur pompage entraînera un abaissement du niveau phréatique et, en réaction, une remontée de la surface des eaux marines phréatique. Un puits qui pendant un certain temps a pompé de l'eau douce peut subitement se mettre à pomper de l'eau salée, comme l'indique le schéma qui suit.

Une montée du niveau marin s'accompagnera d'une montée de la nappe phréatique marine sous la plaine littorale, entraînant le pompage d'eau salée dans les puits. C'est là une situation qui risque de se produire avec la montée prévue du niveau des mers reliée au réchauffement climatique en cours et qui peut s'avérer particulièrement désastreuse dans les zones deltaïques à forte densité de population.

- « Sensibilité faible » : cette classe regroupe les entités de nature imperméable. Ces formations non aquifères sont en général des couches argileuses pouvant constituer une barrière de protection pour un aquifère sous-jacente ou situé en amont hydraulique vers l'intérieur des terres.
- « Sensibilité faible à moyenne » : les entités de nature semi-perméable comprises dans cette classe sont en général des sédiments plus ou moins argileux, avec une circulation d'eau restreinte mais pouvant comporter localement des aquifères plus perméables. C'est notamment le cas pour des structures multicouches présentes dans des zones de deltas ou de bassins sédimentaires



**Figure 5- Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant l'influence d'un pompage sur l'intrusion saline (Fissant et Al.2005)**

Des formations de socle, avec des perméabilités faibles ainsi que des aquifères compartimentés, mais localement semi-perméables font également partie de cette classe. Ces aquifères sont en général sensibles à des intrusions salines par biseau salé, qui peuvent être multiples et superposées en fonction de la configuration de la géométrie du multicouche.

- « Sensibilité moyenne » : les entités caractérisées par une perméabilité moyenne à élever, peuvent correspondre à des aquifères sédimentaires (craies non karstifiées mais fissurées ; aquifères poreux avec une forte perméabilité), ou à des aquifères de socle (horizon d'altérites et horizon fissuré) au niveau de la zone de contact avec présence de sources côtières.
- « Sensibilité variable – karstique » : les aquifères karstiques de cette classe sont caractérisés par une forte hétérogénéité de la distribution des vides et des fissures ; des vides de type conduit peuvent trouver place au niveau du littoral et s'organiser dans l'espace. Du fait des variations du niveau moyen des mers par rapport au continent au cours des temps géologiques, des conduits peuvent être présents à plusieurs dizaines de mètres sous le niveau marin actuel. Ces conduits donnent lieu à des émergences – sources pouvant fonctionner comme source et comme point d'engouffrement, en fonction des variations de la charge hydraulique au sein de l'aquifère (fonction de la recharge et de l'exploitation). Un aquifère karstique côtier constitue un aquifère d'une sensibilité variable d'autant plus s'il y a des sources sous-marines étagées, mais il peut aussi être dans la classe « forte - avérée ». Une sensibilité forte peut être attribuée à des zones particulières, zones de cavités et de sources. L'exploitation de forages ou de puits en zones karstiques induit des phénomènes imprévisibles en terme d'intrusion saline, certains pompages étant sans effet alors que d'autres provoqueront des intrusions conséquentes. Il faut donc étudier ces zones de manière spécifique.
- « Sensibilité forte-avérée » : cette classe comprend les secteurs caractérisés par la prédominance d'alluvions perméables et l'existence de nappes d'accompagnement de rivière. Ces secteurs sont confrontés à l'intrusion combinée du biseau salé et du rentrant salé dans les cours d'eau pouvant donner lieu à de petits biseaux salés le long des cours d'eau dans les aquifères de part et d'autre. De plus cette classe comprend les aquifères pour lesquels les intrusions salines sont

existantes et où il y a un risque important d'aggravation liée aux conditions d'exploitation selon les informations des études régionales.

### ***1.12 Les mesures nécessaires pour l'examen de la qualité des eaux souterraines***

Il y a deux sortes de mesures à entreprendre : les mesures hydrauliques qui conditionnent la pénétration des polluants jusqu'aux nappes et l'entraînement de ceux-ci par ces nappes, et les mesures biologiques, chimiques et physiques concernant les polluants eux-mêmes. Il n'est pas question ici de donner le détail de toutes ces mesures, mais seulement le cadre. Les mesures sont en effet essentiellement techniques. Comme elles sont assez diverses, il faudra faire un choix.

#### ***1.12.1 Mesures hydrauliques***

Dans le cadre des mesures hydrauliques, il sera nécessaire d'examiner les points suivants :

##### **- Modes d'entrée**

La grandeur d'intensité et le temps de pénétration du polluant dépendent en premier lieu du mode d'entrée dans les terrains. L'entrée peut se faire :

- a) Par la surface du sol. Mais il faut y considérer divers cas, essentiels pour calculer la grandeur et l'intensité de la pollution.
- b) Par des puits ou des forages. C'est en somme une entrée ponctuelle de la pollution. Si l'entrée de la pollution est massive, la concentration du polluant dans la nappe pourra être importante, mais elle sera relativement circonscrite.
- c) Par entrée latérale dans la nappe : c'est le cas d'entrée d'eau douce polluée de rivière, d'eau salée de la mer, etc.

##### **- Cheminement de la pollution jusqu'à la nappe**

Les mesures concernant ce cheminement de la pollution depuis la zone d'entrée jusqu'à la surface de la nappe sont de première importance, car elles permettent de calculer le temps que met la pollution pour aller de la zone d'entrée à la surface de la nappe. Ensuite elles permettent d'établir les bases nécessaires à l'estimation de la

rétenion du polluant et au besoin de la diminution de la pollution et de sa transformation.

a) Dans le cas de cheminement à partir de la surface du sol, un grand nombre de mesures sont à faire concernant :

- La constitution de la surface du sol.
- La constitution verticale des terrains jusqu'à la nappe c'est à dire :
  - La lithologie (les sables fins sont filtrants, les argiles forment écrans etc.).
  - La porosité et la perméabilité de chaque couche.
  - Le pouvoir de rétention de chaque couche vis à vis du polluant.
  - La possibilité de colmatage.
  - Le temps d'accès de la pollution jusqu'à la nappe.

b) Dans le cas de cheminement vertical à partir de puits, ce qui est semblable pour les canaux, il y a lieu de considérer et évaluer ou mesurer :

- La nature du puits ou du canal.
- La profondeur de l'entrée sous la surface du sol, par exemple dans le cas d'un forage la situation de la crépine, dans le cas d'un puits la situation du fond ou des parois filtrantes.
- La hauteur de la zone d'entrée, par exemple pour un forage la hauteur de la crépine.
- La constitution du terrain de la zone d'entrée ce qui doit permettre d'estimer le début de la pollution à l'entrée du terrain. On examinera notamment : la porosité, la perméabilité, le pouvoir de rétention, et le colmatage.
- La constitution du terrain jusqu'à la nappe on examinera les mêmes éléments que précédemment.
- Le temps d'accès de la pollution jusqu'à la nappe.

c) Dans le cas de cheminement latéral l'étude de la constitution de l'entrée est aussi nécessaire. Elle comprend les mesures concernant :

- La hauteur de la zone d'entrée. Le débit entrant sera d'autant plus grand que cette hauteur est importante, toutes autres choses égales.
- La porosité, la perméabilité.
- La présence ou l'absence d'un écran plus ou moins perméable ou imperméable.
- La possibilité du colmatage.

## - **Débit du polluant et de la pollution**

Connaissant les modes d'entrée, les caractères et propriétés des terrains à travers lesquels se transmet la pollution, il est nécessaire de procéder aux mesures relatives au débit du polluant lui-même d'abord débit entrant dans la nappe et ensuite débit et concentration dans la nappe elle-même.

a) Débit du polluant :

- Dans le cas de cheminement vertical à partir de la surface, il est nécessaire de connaître par m<sup>2</sup> le débit du transporteur et le débit du polluant à travers la surface et la reprise par évapotranspiration du transporteur.
- Dans le cas d'entrée par puits les débits par puits du transporteur et le débit du polluant par unité.
- S'il s'agit de la pollution par canal, ces mêmes débits par unité de longueur.
- Il est aussi nécessaire de connaître la charge du transporteur sur la zone d'infiltration.

▪ Puis la rétention du polluant au cours du trajet.

b) Pollution de la nappe : ce n'est qu'à l'aide de ces premiers éléments que l'on pourra évaluer la pollution de la nappe, car on pourra calculer :

- Le débit du transporteur et du polluant arrivant jusqu'à toute la surface de la nappe, par intégration des données précédentes.
- Connaissant le débit de la nappe qu'il faudra établir, on pourra avoir . . .
- La concentration de la pollution dans cette nappe.

## - ***Cheminement de la pollution dans la nappe***

a) Si la nappe ne possède aucun mouvement ou qu'une vitesse très faible, la pollution stagnera dans la nappe et son intensité ne fera que croître.

b) Si, au contraire, la nappe se déplace, la pollution elle-même se déplacera et un équilibre dynamique de la pollution s'établira. Mais en se déplaçant la pollution intéressera des zones plus ou moins étendues, contaminant des surfaces plus ou moins grandes. Il y aura donc lieu d'établir :

- La direction de l'écoulement.
- La largeur de la zone polluée.
- La longueur de celle-ci.

- Le déplacement du front de pollution c'est à dire sa vitesse, sa largeur.
- L'amortissement de la pollution au cours de son déplacement.

### ***1.12.2 Les mesures biologiques, chimiques et physiques***

Les mesures biologiques, chimiques et physiques à prendre sont extrêmement nombreuses nous allons exposer l'ensemble de la question.

- L'étude de la pollution des zones de contamination à la nappe

C'est le premier objet. Cela comporte les mesures et évaluations concernant :

- La connaissance de la composition chimique et biologique du polluant.
- Sa rétention dans la zone d'entrée.
- Sa modification par la surface du sol par exemple.
- L'étude des améliorations à apporter à la destruction de celle-ci à la surface du sol et dans le sol.
- L'étude du colmatage, et du décolmatage.
- Les modifications dans la zone d'infiltration, c'est à dire entre la zone d'entrée et la nappe.
- L'étude des facteurs de ces modifications.

## **CHAPITRE II. IDENTIFICATION DES SOURCES POTENTIELLES DE CONTAMINATION DES SOLS**

## **2.1 Introduction**

La pollution des sols est une problématique d'actualité. Avec son impact direct sur l'environnement et par conséquent, sur la santé des hommes, des animaux et des végétaux, la pollution des sols est un véritable problème qui mobilise autant les pouvoirs politiques que les citoyens.

Depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le développement du secteur industriel ne s'est plus soucié du relargage d'éléments toxiques dans le sol. En effet, le sol a longtemps été considéré comme une ressource renouvelable, voire inépuisable à l'échelle des générations humaines, capable de recevoir sans conséquence les émissions de nos activités. On sait désormais que le sol se caractérise par un équilibre délicat et qu'il est fragile. Aujourd'hui, cet héritage est menacé par le lourd héritage du passé et l'élargissement du champ du développement industriel.

## **2.2 La notion de pollution du sol**

On entend par "pollution du sol" la présence dans le sol d'un produit chimique ou d'une substance non chimique ou d'une substance hors de son lieu d'implantation et/ou présente à une concentration supérieure à la normale, qui a des effets néfastes sur tout organisme non ciblé. Sur tout organisme non ciblé. La pollution du sol ne peut souvent pas être directement évaluée ou perceptible, ce qui en fait un danger non dissimulé.

Un sol est jugé dégradé lorsqu'il a perdu une partie de ses fonctions, comme celle de nourrir les plantes ou les animaux, celle de filtrer les eaux ou encore celle d'abriter une importante biodiversité. Des dégradations légères aux plus graves, ce phénomène atteint environ 20 millions de km<sup>2</sup> soit près de 60 % des sols cultivables. Des sols non cultivés sont déjà dégradés par l'érosion hydrique ou éolienne, la salinisation ou la déforestation.

## **2.3 Les facteurs qui conditionnent la pollution du sol**

La contamination des sols due à l'activité agricole, aux épandages de boues d'épuration et aux déchets d'origine industrielle devient aujourd'hui un problème préoccupant. Cela se traduit par des impacts négatifs sur les activités dépendant directement ou indirectement de la terre, mais aussi sur la santé humaine et les écosystèmes.

La pollution des sols est un élément perturbateur pour de nombreux écosystèmes. Ses effets sont de plusieurs ordres, à savoir différés ou immédiats, mais aussi indirects ou directs.

Le degré de gravité de la pollution des sols est variable. Il dépend de plusieurs facteurs, comme :

- la nature du sol, qui peut impacter, selon les cas, sur la diffusion des métaux ;
- les risques de transmission d'éléments pathogènes suite au transport de terre ;
- le niveau de dégradabilité de chaque élément perturbateur/polluant ;
- la capacité même du polluant à impacter de quelque façon que ce soit le fonctionnement de la biosphère ou d'un écosystème.

#### ***2.4 Pollution ponctuelle et pollution diffuse des sols***

En fonction du mode d'arrivée des polluants au sol et de l'étendue des pollutions, ces produits organiques peuvent être impliqués dans deux types de pollution :

##### ***2.4.1 Pollution ponctuelle***

La pollution du sol peut être causée par un événement spécifique ou une série d'événements dans une zone particulière dans laquelle des contaminants sont libérés dans le sol. Une zone particulière, au cours de laquelle des contaminants sont libérés dans le sol, et la source et l'identité de la pollution sont facilement identifiables. Ce type de pollution est connu comme une pollution ponctuelle. Les activités anthropiques représentent les principales sources de la pollution ponctuelle. Par exemple, les anciens sites industriels, l'élimination non conforme des déchets et des eaux usées, les décharges non contrôlées, l'application excessive de produits agrochimiques, les déversements de toutes sortes, etc.

L'application excessive de produits agrochimiques, les déversements de tous types, et bien d'autres encore.

Les activités telles que l'exploitation minière et la fonte, qui sont menées selon des normes environnementales médiocres, sont également des sources de contamination par les métaux lourds dans de nombreuses régions du monde.

D'autres exemples de pollution ponctuelle sont les hydrocarbures aromatiques et les métaux toxiques, qui sont liés aux produits pétroliers.

#### **2.4.2 La pollution diffuse**

La pollution diffuse est une pollution qui s'étend sur de très vastes zones, s'accumule dans le sol et n'a pas de source unique ou facilement identifiable.

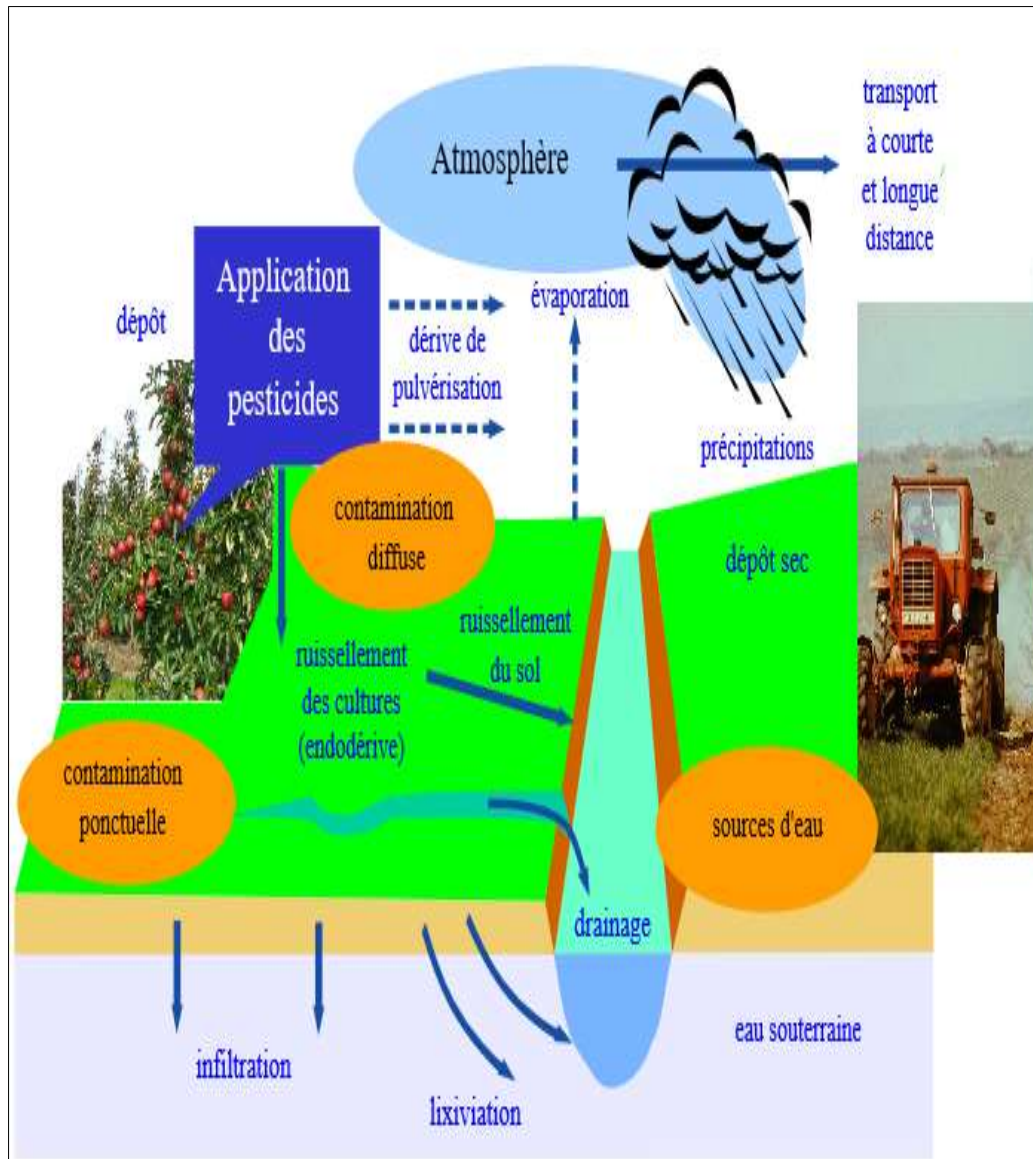
La pollution diffuse se produit lorsque l'émission, la transformation et la dilution des contaminants dans d'autres milieux ont eu lieu avant leur transfert vers le sol.

La pollution diffuse implique le transport de polluants via les systèmes air-sol-eau. Des analyses complexes impliquant ces trois compartiments sont donc nécessaires pour évaluer correctement ce type de pollution. Pour cette raison, la pollution diffuse est difficile à analyser, et il peut être difficile de la suivre et de délimiter son étendue spatiale. De nombreux contaminants à l'origine de la pollution locale peuvent être impliqués dans la pollution diffuse, car leur devenir dans l'environnement n'est pas bien compris.

Les exemples de pollution diffuse sont nombreux, et peuvent inclure des sources provenant de :

- L'énergie nucléaire et des activités d'armement ;
- l'élimination incontrôlée des déchets et les effluents contaminés rejetés dans et à proximité des bassins versants ;
- l'épandage de boues d'épuration ;
- l'utilisation agricole de pesticides et d'engrais qui ajoutent également des métaux lourds
- des polluants organiques persistants, des nutriments en excès et des produits agrochimiques qui sont transportés en aval par le ruissellement de surface,
- les inondations, le transport et les dépôts atmosphériques et/ou l'érosion des sols (Fig.6).

La pollution diffuse a un impact important sur l'environnement et la santé humaine, bien que sa gravité et son étendue soient généralement inconnues.



**Figure 6- Mode d'arrivée des polluants au sol : Pollution ponctuelle et pollution diffuse.**

### 2.5 Origines de la pollution des sols

La dégradation des sols dans le monde est principalement due aux activités humaines : agriculture intensive, irrigation, déforestation, surpâturage, pollutions industrielles.

Lorsque l'origine d'une pollution des sols est déterminée, cela peut donner lieu à la création d'un fonds spécifique permettant de traiter le problème. Une contribution peut être demandée à la tranche de population reconnue comme responsable de cette pollution.

La pollution du sol peut être d'origine industrielle, suite à la présence d'une industrie polluante ne prenant pas toutes les précautions nécessaires pour éviter les fuites, avec l'utilisation massive d'engrais ou d'insecticides qui s'infiltreront dans les sols.

Les métaux qui dégradent les sols, sont d'origines naturelles ou sont issus de l'activité humaine, tout comme les pesticides employés dans l'agriculture. Cependant, toutes les zones ne sont pas égales devant les pollutions, certaines sont particulièrement sensibles. Une contamination du sol a souvent pour origine une diffusion lente de produits stockés dans des conditions non réglementaires. Un site pollué peut apparaître ou être découvert en cas d'accident d'exploitation. Géométriquement, on peut distinguer les cas suivants :

- épandage direct de contaminants sur le sol,
- dépôt de contaminants, de solides contaminés ou de déchets sur le sol, exposés à la pluie ou au ruissellement Les eaux entraînent les contaminants par lessivage et s'infiltreront dans le sol, directement.
- enfouissement superficiel de contaminants, de solides contaminés ou de déchets, exposés aux eaux d'infiltration et/ou aux nappes superficielles Les eaux entraînent les contaminants par lessivage et les diffusent dans le sol,
- rejet d'un contaminant vers le milieu aérien (vapeur, poussière), suivi de son dépôt sur les sols environnant la source de contamination Exemples :  
retombées de vapeurs organiques autour d'un site chimique, poussières métallifères autour d'une aciérie  
rejet d'un contaminant vers le milieu aquatique (égout, collecteur, réseau hydrographique de surface) suivi d'infiltration des eaux contaminées dans le sol.

Dans tous ces cas, le sol retiendra de façon plus ou moins stable tout ou partie des contaminants.

Un sol pollué représente trois types de risques environnementaux :

- mise en contact direct des polluants avec l'occupant du sol (ex. : jeux d'enfants sur un site pollué) ;
- lessivage des polluants par les eaux d'infiltration et transfert des polluants vers les eaux souterraines et superficielles (pollution possible des ressources en eau) ;
- réintroduction des polluants dans la chaîne alimentaire par les végétaux et les organismes vivants du sol.

## **2.6 Nature des polluants des sols**

### **2.6.1 Métaux lourds**

Le terme "métaux lourds" désigne le groupe de métaux et de métalloïdes de masse atomique relativement élevée ( $>4,5 \text{ g/cm}^3$ ), tels que Pb, Cd, Cu, Hg, Sn et Zn, qui peuvent provoquer des problèmes de toxicité. D'autres non-métaux sont souvent considérés comme des métaux lourds sont l'As, l'antimoine (Sb) et le sélénium (Se). Ces éléments sont naturellement présents à de faibles concentrations dans les sols. Beaucoup d'entre eux sont essentiels pour les plantes, les animaux et l'homme, mais à des concentrations élevées, ils peuvent causer une phytotoxicité et nuire à l'environnement et à la santé humaine en raison de leur nature non biodégradable qui fait qu'ils s'accumulent facilement dans les tissus et les organismes vivants.

Il est important de rappeler 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.

La plupart des sources de métaux lourds dans les sols sont aussi liées à l'activité humaine comme :

- Le 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 (utilisation de combustibles fossiles, essence au plomb, poussières des industries métallurgiques, incinération des ordures ménagères...).

### **2.6.2 Hydrocarbures**

Les hydrocarbures regroupent différents produits pétroliers (pétrole brut, pétrole raffiné, kérosène, essences, fuel, lubrifiants, huiles à moteurs).

Cette famille inclut :

- les alcanes (hydrocarbures aliphatiques) constitués de chaînes linéaires ou ramifiées comprenant au minimum cinq atomes de carbone, caractérisés par un point d'ébullition compris dans l'intervalle 35 °C -490 °C ;
- les hydrocarbures aromatiques monocycliques {benzène, toluène, xylènes, ou polycycliques (Benzo(a)pyréne).

Les hydrocarbures ou huiles minérales présents dans les sols proviennent généralement d'une pollution pétrolière (production, raffinage, transport et utilisation des hydrocarbures) ou issue de la pétrochimie, d'usines à gaz, de l'industrie chimique de base, la fabrication de caoutchouc, ou les industries mécaniques.

### **2.6.3 Les pesticides**

Les « pesticides » ou substances phytosanitaires ou agropharmaceutiques constituent une famille très hétérogène de substances utilisées contre les parasites animaux ou végétaux des cultures. Les pesticides sont dispersés dans l'environnement en présence d'agents de formulation. Traditionnellement, on distingue trois grandes classes de pesticides :

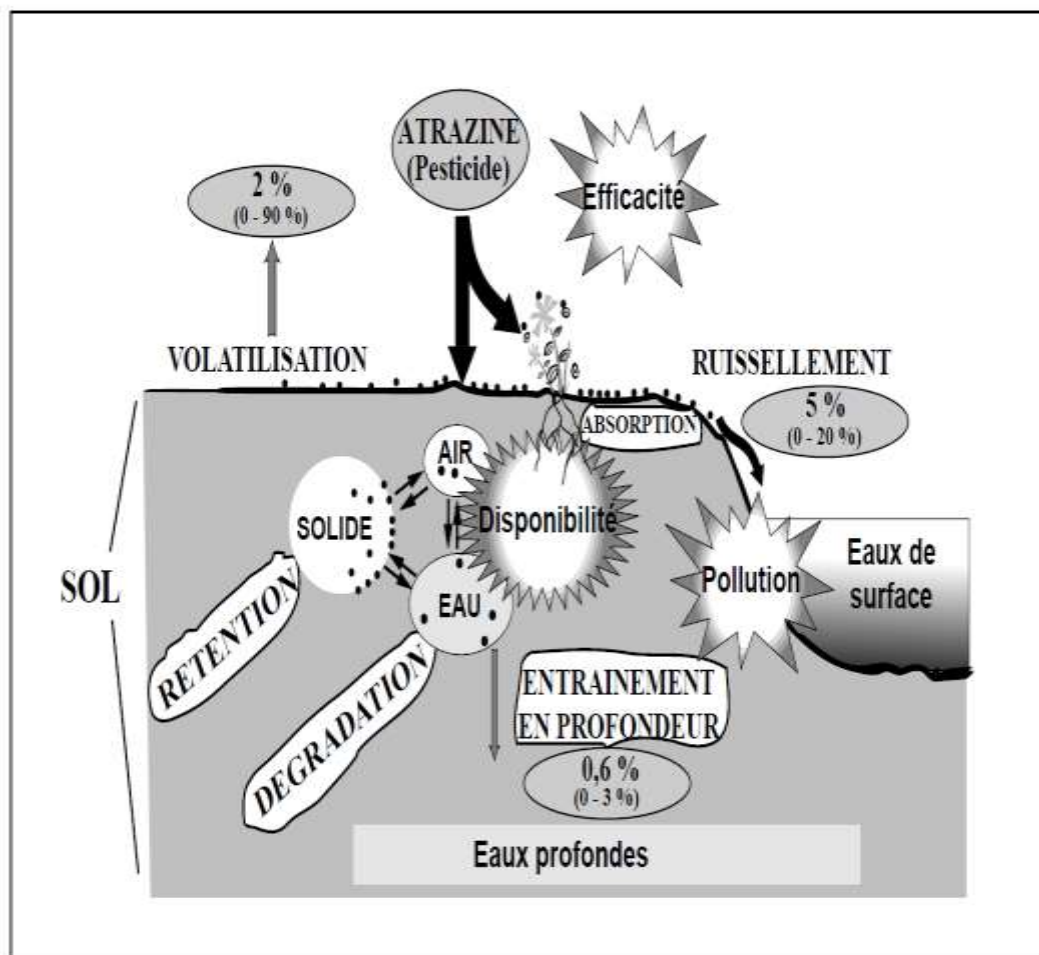
- les insecticides comprenant le groupe des organophosphorés, carbamates, pyréthroïdes ;
- les insecticides organochlorés et les fongicides comprenant les groupes des azoles, des dithiocarbamates,...

Le comportement des pesticides va être plus particulièrement contrôlé par les phénomènes de rétention sur les constituants du sol (matières organiques, argiles) et de dégradation. Plus la rétention du pesticide est importante, plus sa mobilité est faible et moins les risques de contamination des eaux souterraines (profondes), par exemple, seront élevés. Cependant, dans ce cas, il est susceptible d'être transféré

vers les eaux de surface par transport particulaire lors d'épisodes de ruissellement ou d'érosion (Fig.7).

Les herbicides représentent la classe économiquement et quantitativement la plus importante. De plus, les herbicides sont davantage persistants dans les sols que les insecticides et les fongicides et génèrent des produits de dégradation stables qui peuvent également présenter une activité biocide.

- les herbicides, comprenant les groupes des amides, acides aryloxyalkanoïque, diphenyl-éther, urées, sulfonilurées, triazines, carbamates ;



**Figure 7- Processus impliqués dans le devenir des pesticides dans les sols conditionnant leur disponibilité et par conséquent leur efficacité phytosanitaire ou la manifestation de leur caractère polluant (Barriuso et al., 1996).**

#### 2.6.4 *Polluants organiques*

Les polluants organiques des sols proviennent principalement de trois ensembles d'activités : industrielles (production d'énergie, métallurgie, industries chimiques,...), urbaines (transports, gestion et traitement des déchets), et agricoles (utilisation de produits phytosanitaires). Ils peuvent être regroupés dans les 4 familles suivantes :

- Les polychlorobiphényles (PCB), sont utilisés dans les encres d'imprimerie et les peintures. En raison de leur stabilité thermique élevée, ils ont été largement utilisés comme isolants dans les transformateurs électriques de fluides. Ils sont présents dans la plupart des boues d'épuration à des concentrations moyennes comprises entre 0,4 et 10 mg.

- Les hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP peuvent être d'origine naturelle présente dans des combustibles fossiles à des concentrations importantes, Ils se forment à des températures entre 500 et 700 °C mais ils sont principalement issus de procédés de pyrolyse. On les retrouve dans le sol de certains anciens sites industriels. Cela peut être le cas sur le site de l'ancienne usine à gaz. Ils sont formés par la fusion de plusieurs noyaux benzéniques. Ces composés peuvent être d'origine naturelle et sont présents dans des combustibles fossiles à des concentrations. Les HAP constituent une pollution de fond de la plupart des boues de station d'épuration, dont la concentration moyenne se situe entre 15 et 50 mg.

- Les polychlorodibenzo-dioxines (PCDD) et polychlorodibenzo-furanes (PCDF) produits par des phénomènes thermiques principalement à partir de produits organiques chlorés, par exemple, lors de l'incinération de déchets ou de résidus organiques et de la combustion d'essences plombées utilisant des dégrasants chlorés. Des PCDD et PCDF sont aussi formés au cours du blanchissement du papier par chloration ou de la synthèse de composés organiques avec des impuretés à base de chlorophénols. D'autres sources d'émission sont les fonderies et les installations sidérurgiques.

- Les composés organiques volatils (COV) qui sont des composés contenant du carbone et présentant une pression de vapeur supérieure à 0,13 kPa. Ils sont présents dans des combustibles et dans des fumées, mais les principales sources de pollution

sont liées à des activités industrielles (dégraissage de pièces métalliques dans la métallurgie....)

COV sont susceptibles d'avoir des effets sur la santé humaine : des effets aigus liés à une exposition à une forte dose sur une courte période, mais aussi des effets chroniques liés à des expositions à de faibles doses sur le long terme, tels que des effets cancérigènes ou toxiques pour la reproduction et le développement de l'homme. Leur présence dans l'atmosphère peut également entraîner des réactions chimiques, qui peuvent aboutir à la formation ou l'accumulation dans l'environnement d'autres composés nocifs, tels que l'ozone.

**CHAPITRE III. SYSTEME DE  
DEPOLLUTION DES EAUX  
SOUTERRAINES**

### **3.1 *Introduction***

Les problèmes liés à la pollution des eaux souterraines constituent actuellement une source d'inquiétude qui requiert intérêt universel. Cette pollution, générée par les activités anthropiques, peut, en atteignant des niveaux critiques, présenter un danger grave pour la sante publique. Pour la sauvegarde de ces ressources, il est nécessaire de prévoir des moyens de protection. Face aux difficultés liées aux techniques de dépollution et au cout de celles-ci, la protection impose en premier lieu des mesures préventives. Celles-ci passent par la cartographie des zones de l'aquifère susceptibles d'être atteintes par des polluants que l'on qualifiera de vulnérables

### **3.2 *Notion de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution***

La notion de vulnérabilité des eaux souterraines a été initialement introduite par MARGAT dans les années soixante. Vu la complexité des mécanismes régissant le transfert d'un polluant, la multitude et la variabilité des facteurs mis en cause, diverses approches ont été proposées. Certains auteurs ont défini la vulnérabilité comme étant une propriété intrinsèque des aquifères. D'autres estiment qu'elle est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et à la nature des sols.

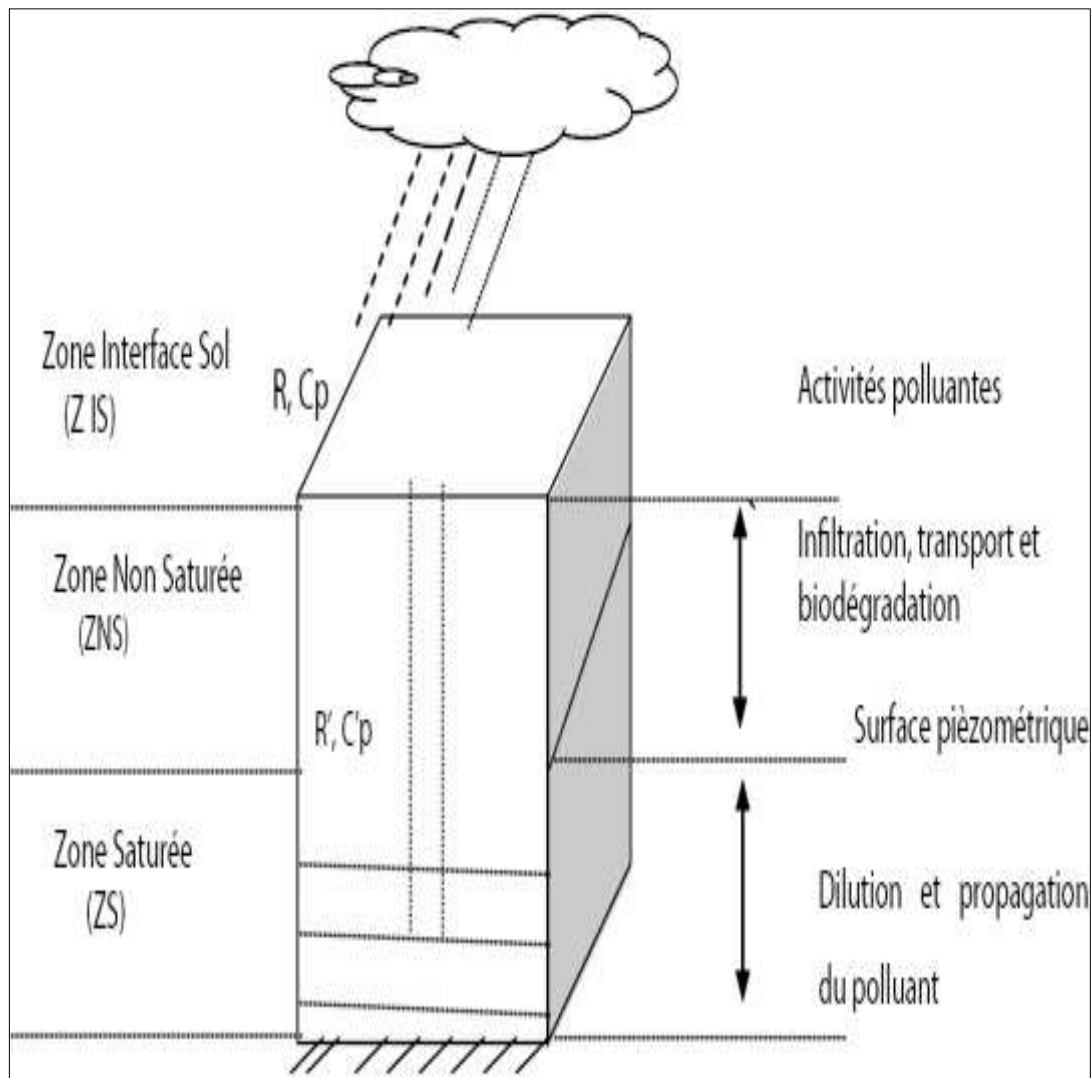
### **3.3 *Principe et méthode de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères***

#### **3.3.1 *Indice de vulnérabilité et cartographie***

La vulnérabilité des eaux souterraines est définie en partant d'une évaluation qualitative des mécanismes de transfert d'un polluant qui repose sur une conceptualisation multicouche du milieu traverse. Ce milieu est subdivise en

couches horizontales dans lesquelles des processus physiques, chimiques et biologiques ont lieu simultanément. La migration d'une substance polluante emprunte naturellement les zones suivantes (**Fig.8**) :

- la Zone de l'Interface Sol (ZIS), qui constitue le domaine des activités polluantes ;
- la Zone Non Saturée (ZNS), qui est le domaine du transfert vertical ;
- la Zone Saturée (ZS), qui est le lieu de la propagation et de la dilution de la pollution.



**Figure 8-** Schéma de la contamination des eaux souterraines (Amharref, et al.2007).

L'indice de vulnérabilité dépend, en plus de la nature des couches traversées, des caractéristiques physico-chimiques du polluant. Cependant, nous pouvons élaborer des cartes de vulnérabilité intrinsèques en considérant les caractéristiques des polluants comme équivalentes à celles de l'eau qui représente l'élément le plus mobile et le plus persistant qui puisse exister, il a été défini en tenant compte de trois paramètres caractérisant le transfert d'un polluant depuis la surface sol jusqu'à la nappe.

$$I_v = \alpha \frac{1}{T} + \beta \frac{C'_p}{C_p} + \gamma \frac{R'}{R}$$

Où

- T est le temps de transit des eaux dans la zone non saturée qui dépend de la vitesse de filtration et par suite de la nature des couches traversées. Le facteur 1/T est supposé sans unité, car la valeur 1 représente l'unité de temps 1 jour qui pourra être modifiée en heures, en mois ou même en années, selon les cas étudiés ;
- $C'_p/C_p$  est le rapport de la concentration  $C'_p$  de l'eau en polluant à l'arrivée au niveau de la nappe par rapport à la concentration initiale  $C_p$  de l'eau polluante. Il nous renseigne sur le taux de réduction de la pollution et dépend des caractéristiques du milieu traversé, en particulier du pouvoir épurateur (Md) et de la nature du polluant ;
- $R'/R$  est le degré de recharge, rapport de la recharge efficace  $R'$  par rapport à la recharge potentielle  $R$ . Il représente le degré d'alimentation de l'aquifère. La recharge potentielle  $R$  correspond notamment aux précipitations, dans le cas de la recharge diffuse, aux eaux d'irrigation en zones agricoles et aux débits des cours d'eau dans les zones des échanges préférentiels entre les eaux de surface et les eaux souterraines ;
- $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont des coefficients pondérateurs positifs. Ils reflètent l'importance de l'effet de chacun des facteurs sur l'indice de vulnérabilité. Le choix de ces coefficients a été fait suite à des tests de sensibilité. La vulnérabilité est d'autant plus forte que l'indice  $I_v$  est plus élevé.

L'acquisition des données nécessaires à l'évaluation des paramètres T et  $C_p/C_p$ . La nature lithologique et l'épaisseur des sous-couches, constituant la zone non saturée, couplées avec les données des vitesses de filtration ( $V_i$ ) et des indices d'épuration ( $I_i$ ) (**Tab.3**), caractérisant chaque type de matériau, permettent d'évaluer le temps de transit T à travers la zone non saturée et son degré d'épuration ( $C_p/C_p$ ) ;

### **3.4 Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères**

Les types de méthodes de vulnérabilité sont classés en fonction des procédures :

- Les méthodes contextuelles ou cartographiques qui évaluent la vulnérabilité des eaux souterraines par les contextes hydrogéologiques présents, ceux-ci étant pris comme représentatifs des conditions de vulnérabilité (ex : la méthode développée par le département des ressources naturelles du Minnesota).
- Les méthodes analytiques et de modélisation numérique qui permettent de simuler le transport et l'écoulement de fluides vers et dans l'eau souterraine à l'aide d'équations mathématiques (ex. EVARISK, SEEPW).
- Les méthodes des systèmes paramétriques ou à indice utilisent également les caractéristiques du milieu comme paramètres, mais à chacun d'eux est assigné une valeur numérique. L'introduction d'un système de cotation numérique pour chaque classe de paramètre permet d'évaluer les variations de la vulnérabilité (ex .DRASTIC, GOD).

**Tableau 3- I indice d'épuration et vitesse de filtration des différents matériaux (Rehse, 1977).**

<b>Granulométrie</b>	<b>Matériaux</b>	<b>Indice d'épuration</b>	<b>Vitesse de filtration (m/j)</b>
	Humus, 5-10 % humus, 5-10 % argile	0,8	0,86
<b>Roches ayant des propriétés d'adsorption</b>	Argile, limon argileux, sable très argileux, argile limoneuse,	0,5	003-0,025
	Silt argileux à silt, limon fin	0,4	0,16
	Silt, sable silteux, sable peu silteux et peu argileux, sable limoneux	0,22-0,33	0,54-4,32
	Sable fin à moyen	0,17	8,23-10
<b>Roches sableuses</b>	Sable moyen à grossier	0,1	19,2
	Sable grossier	0,07	27

<b>Gravier</b>	Gravier silteux, riche en sable et en argile	0,13	0,72
	Gravier peu silteux, beaucoup de sable	0,08	144
	Gravier fin à moyen riche en sable	0,04	201
	Gravier moyen à grossier, peu de sable	0,03	480
	Galets	0,02	4
			320

### 3.4.1 Méthodes analytiques et de modélisation numérique

Les modèles de simulations, basés sur des processus analytiques, sont, dans la plupart des cas, développés pour l'estimation de la vulnérabilité spécifique à un polluant de source diffuse. En effet, le type de pollution et le polluant interviennent sur le rôle que jouent les facteurs dans l'estimation de la vulnérabilité. Une des applications fréquentes de ces modèles est la vulnérabilité aux pesticides qui a été évaluée par des modèles de complexité variés allant des modèles fonctionnels simples aux modèles plus compliqués où le flux et les équations de transport sont appliqués parfois de manière stochastique.

#### - La méthode EVARISK

La méthode EVARISK est à l'origine basée sur l'estimation de la vulnérabilité à un type de polluant, elle peut être utilisée avec les valeurs de polluant mises à 0. Ce qui correspond à l'hypothèse faite pour un grand nombre de méthodes signifiant que l'estimation de la vulnérabilité est basé sur l'écoulement et le transport de l'eau. Les paramètres pris en compte sont spécifiques, le tout est de savoir si l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque avec une telle méthode est cohérente avec celle faite par des méthodes développées à des fins d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque.

La méthode EVARISK sert à quantifier (en concentrations ou en charges) le lessivage de contaminants à travers la couche pédologique et cela en utilisant les informations relatives au premier mètre de sol (**Fig. 9**). Toutefois, cette méthode

ponctuelle est utilisable pour déterminer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution

La méthode EVARISK est une des seules méthodes à tenir compte des phénomènes d'adsorption et de désorption et d'hydrolyse.

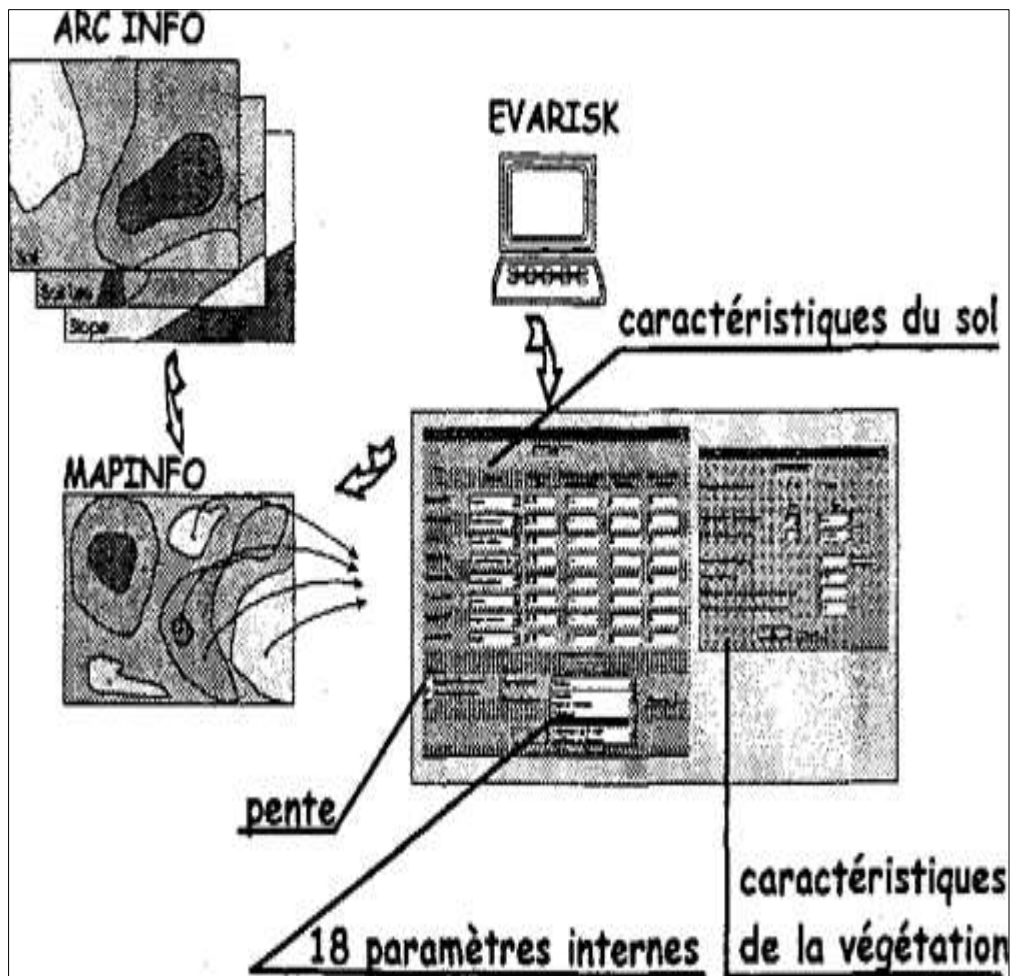


Figure 9- La méthode EVARISK, paramètres et cotation (Murat, 2000).

### 3.4.2 Méthodes des systèmes paramétriques

Ces méthodes sont en fait une extension des méthodes de classification par caractéristiques hydrogéologiques. Elles sont souvent basées sur l'évaluation des facteurs hydrogéologiques. Les résultats de leur application peuvent être présentés sous forme de cartes ou de listes. L'objectif est de réduire les données techniques en une information compréhensible par tous. Deux points sont à souligner quant aux caractéristiques de ce type de méthode :

- un poids attribué à chaque facteur permet de donner une importance relative à chacun des paramètres,
- un continuum dans la quantification de la sensibilité de l'aquifère facilite la différenciation de protection des sous zones dans la zone d'étude selon leur vulnérabilité relative.

Différentes étapes sont nécessaires à la mise en place de ces méthodes :

- a. Déterminer la disponibilité des informations pour quantifier les facteurs de la méthode ;
- b. Déterminer une cote spécifique à chacun des secteurs de la zone d'étude et ce pour chaque facteur du modèle ;
- c. Attribuer un et différents index à chaque facteur. L'indice et le poids de chaque facteur sont combinés, pour un secteur donné, pour donner une cote relative en fonction de l'importance de ce dernier.
- d. Combiner les cotes de chaque paramètre pour produire un indice de sensibilité et ce pour tous les secteurs de la zone d'étude.

Afin de combiner les résultats de chaque facteur, l'addition ou la multiplication sont appropriées. L'approche multiplicative est souvent utilisée pour faire ressortir l'importance de chaque facteur.

### **3.5 Quelques Méthodes des systèmes paramétriques les plus utilisées**

b) **La méthode DRASTIC** : elle est principalement utilisée pour la cartographie à petite échelle, elle a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller *et al.* en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines. L'acronyme anglophone DRASTIC correspond aux sept paramètres physiques et hydrogéologiques considérés dans le calcul des indices de vulnérabilité :

➤ ***D : Depth to groundwater (Profondeur de la nappe)***

Pour les aquifères en conditions de nappe libre, la profondeur de la nappe s'obtient en soustrayant l'élévation de la nappe, telle que mesurée dans les puits, de l'élévation du sol.

Dans le cas des aquifères en conditions de nappe captive, c'est la profondeur du toit de l'aquifère, limité par l'aquitard qui lui est juxtaposé, qu'il faut prendre en compte. En d'autres termes, cette profondeur correspond à la base de l'aquitard. Ce sont donc les informations sur la géométrie de l'aquifère qui sont utilisées. Pour le cas d'un aquifère de roc fracturé en conditions de nappe captive, c'est la profondeur de la base de l'aquitard immédiatement au-dessus qu'il faut considérer. Cet aquitard pourrait ne pas être en contact direct avec le socle rocheux et juxtaposer un aquifère granulaire connecté à l'aquifère de roc fracturé.

Pour les aquifères en conditions de nappe semi-captive, comme l'infiltration verticale est tout de même significative à l'intérieur de la couche semi-perméable juxtaposant les aquifères, il est préférable de les considérer en conditions de nappe libre pour la détermination de la cote.

➤ ***R : Recharge (Recharge)***

L'estimation de la recharge régionale, ou à l'échelle de l'aquifère, est souvent suffisante aux fins du calcul des indices DRASTIC. Une seule valeur peut donc être généralement employée pour toutes les aires de protection. Cependant, si les conditions de confinement varient à l'intérieur des aires de protection, ce qui a pour effet de faire varier grandement le taux d'infiltration efficace dans le sous-sol, il faudra considérer plusieurs valeurs de recharge.

➤ ***A : Aquifère media (Nature du milieu aquifère)***

La cote type peut être employée si peu de connaissances sont disponibles sur les propriétés hydrauliques du milieu.

Sinon, un choix dans l'intervalle de la cote doit être fait. Pour les aquifères de roc, c'est généralement le niveau de fracturation qui doit être pris en compte. Pour les aquifères granulaires, c'est plutôt la granulométrie et l'homogénéité des sédiments. Par exemple, la cote pour un aquifère de sable et gravier peut varier entre 4 et 9. Pour un aquifère de sable deltaïque hétérogène qui contiendrait des lits de sédiments plus fins, une cote de 4 pourrait être choisie. À l'inverse, pour un esker composé de gravier bien trié, une cote de 9 serait préférable.

➤ ***S : Soil media (Type de sol)***

Une carte de sol est nécessaire, en l'absence d'autres informations, des observations in situ pourraient être faites.

➤ ***T : topographie (Pente du terrain)***

La pente du terrain s'établit à partir d'une carte topographique, d'un modèle numérique d'élévation ;

➤ ***I : Impact of the vadose zone (Nature de la zone vadose)***

Les mêmes conseils à propos des cotes types du paramètre sur la nature du milieu aquifère s'appliquent, ainsi que les mêmes mises en garde concernant l'hétérogénéité du milieu.

➤ ***C : Conductivity (Conductivité hydraulique de l'aquifère)***

Les mêmes mises en garde que pour le paramètre sur la nature du milieu aquifère concernant l'hétérogénéité du milieu s'appliquent.

Une valeur numérique comprise entre 1 et 5 reflète le degré d'influence de chacun de ces paramètres ou leur poids dans le calcul des indices. Ainsi, la profondeur de la nappe et la nature de la zone vadose exercent le plus d'influence, suivies de la recharge. À l'inverse, la topographie est le paramètre ayant le moins d'impact, suivie du type de sol. Enfin, la nature du milieu aquifère et sa conductivité ont pour leur part un poids modéré.

Une cote variant de 1 à 10, définie en fonction d'intervalles de valeurs, est associée à chacun des paramètres.

Détermination des cotes qui suit. Plus la cote est élevée, plus la vulnérabilité est élevée. Le calcul de l'indice DRASTIC correspond ainsi à la somme des cotes attribuées aux différents paramètres multipliées par leur poids. Les valeurs de l'indice peuvent varier entre 23 et 226. Comme pour les cotes, plus l'indice est élevé, plus la vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine est élevée. Elles sont compilées dans le Tableau des cotes des paramètres pour le calcul des indices DRASTIC de la section.

**Tableau 4-Les paramètres DRASTIC et leur poids respectif (Aller et al, 1987).**

<b>F</b>	<b>Paramètres</b>	<b>Poids</b>
<b>1</b>	D :Depth to water/(Profondeur de l'eau)	5
<b>2</b>	R : Net recharge / (Recharge efficace)	4
<b>3</b>	A :Aquifer media/(Milieu aquifère)	3
<b>4</b>	S :Soil media/(Type de sol)	2
<b>5</b>	T :Topography/(Pente de terrain)	1
<b>6</b>	I : Impact of the vadose zone/ (Impact de la zone vadose)	5
<b>7</b>	C :Hydraulic Conductivity/(Perméabilité)	3

c) **La méthode EPIK** : C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques. Elle est basée sur quatre critères :

- Epikarst ;
- Protective Cover (couverture protectrice : sol) ;
- Infiltration Conditions (conditions d'infiltration) ;
- Karst network development (développement du réseau karstique).

d) **RISKE** : Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique. RISKE est une abréviation qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte : Roche aquifère, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst.

e) **DISCO** : La méthode "DISCO" (discontinuités - couverture protectrice) a pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu. Trois paramètres sont nécessaires et suffisants pour évaluer le transport d'un polluant d'un point quel que soit du bassin d'alimentation jusqu'à son arrivée au captage : le paramètre "discontinuités" ; le paramètre "couverture protectrice" ; le paramètre "ruissellement" englobe les phénomènes d'écoulement de l'eau en surface avant son infiltration (ruissellement de pente, cours d'eau permanents ou temporaires).

f) **GOD** : Ce système présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur l'identification de trois critères :

- Type de nappe (**G**roundwater occurrence) ;
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (**O**verall aquifer class) ;
- Profondeur de la nappe (**D**epth to groundwater table).

g) **SINTACS** : La méthode SINTACS est dérivée de la méthode DRASTIC. Elle a été développée en Italie, au début des années 1990, de manière à s'adapter à la cartographie à plus grande échelle compte tenu de la grande diversité hydrogéologique de l'Italie. Les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité qui ont été retenus dans cette approche sont les mêmes que ceux de la méthode DRASTIC, soit en italien :

- S : Soggiacenza (profondeur de la nappe) ;
- I : Infiltrazione (infiltration) ;
- N : Azione del Non Saturo (fonction de la zone non saturée) ;

- T : Tipologia della Copertura (sol) ;
- A : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero (caractéristique hydrogéologiques de l'aquifère) ;
- C : Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique) ;
- S : Acclività della Superficie Topographica (pente moyenne de la surface topographique).

### **3.6 Périmètres de protection des captages**

Le captage qui alimente une agglomération en eau potable doit être protégé contre les risques de pollution. La préservation de la ressource en eau potable est obligatoire à l'intérieur de périmètres de protection qui sont délimités lors de la procédure de déclaration d'utilité publique.

#### **3.6.1 Définition**

Un périmètre de protection des captages, constitue la limite de l'espace réservé réglementairement autour d'un captage utilisé pour l'alimentation en eau potable, après avis d'un hydrogéologue agréé. Ce périmètre vise à prévenir les risques de pollutions ponctuelles ou diffuses sur un point de prélèvement d'eau pour la consommation humaine.

Ils sont utiles pour supprimer ou réduire les sources ponctuelles de pollution existantes et surtout pour empêcher l'installation de nouvelles sources de contamination.

#### **3.6.2 Mise en place des Périmètres de protections**

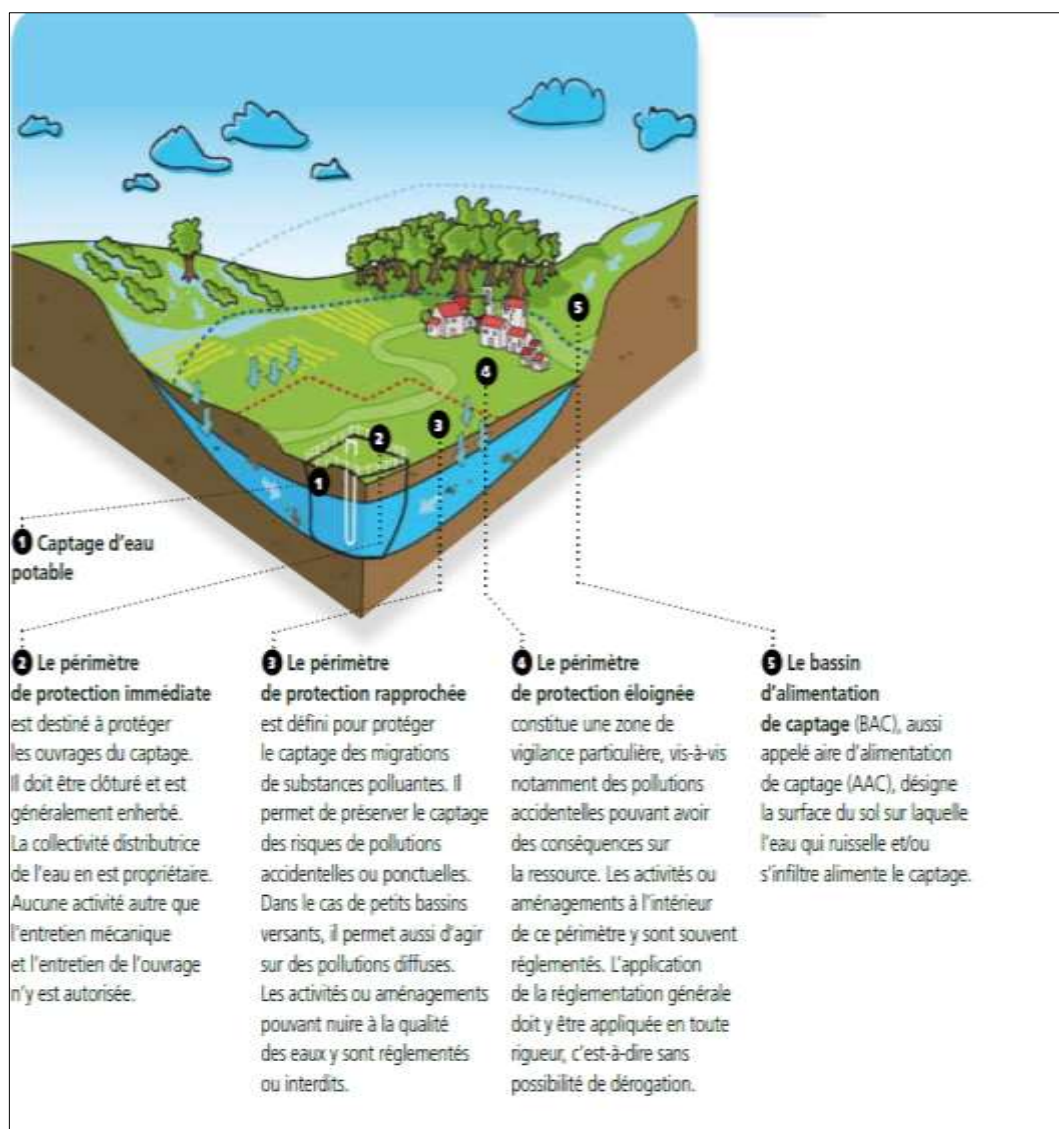
Les périmètres de protection correspondent à un zonage établi autour des points de prélèvement d'eau destinée à la consommation humaine en vue d'assurer la préservation de sa qualité. Ils sont définis après une étude hydrogéologique, Ils prennent la forme de 3 zones dans lesquelles des contraintes plus ou moins fortes sont instituées pour éviter la dégradation de la ressource. Trois types de périmètres de protections doivent se mettre en place (**Fig. 10**) :

- Le périmètre de protection immédiate : Il correspond à l'environnement proche du point d'eau. Il a pour objet d'empêcher la dégradation des ouvrages et d'éviter les déversements de substances polluantes à proximité immédiate du captage. Il doit être obligatoirement acquis par la collectivité et clôturé. Toute

activité y est interdite, autre que celles nécessaires à l'exploitation et à l'entretien de l'ouvrage.

➤ Le périmètre de protection rapprochée : Il a pour but de protéger le captage vis-à-vis des migrations souterraines de substances polluantes. Il délimite autour ou en amont de l'ouvrage un secteur de quelques hectares en général. A l'intérieur de ce périmètre, toutes les activités susceptibles de nuire à la qualité des eaux sont interdites ou soumises à des prescriptions particulières (constructions, rejets, dépôts, épandages, ...). L'acquisition, facultative, par la collectivité, des terrains concernés, peut s'avérer utile si la collectivité souhaite s'assurer le contrôle total de la protection.

➤ Le périmètre de protection éloignée : Il correspond à la zone d'alimentation du point d'eau, voire à l'ensemble du bassin versant. Facultatif, il peut se justifier quand certaines activités sont à l'origine de pollutions importantes et lorsque des prescriptions particulières peuvent réduire significativement les risques sur le captage. A l'intérieur de cette zone sont également réalisées des actions de communication et de sensibilisation.



**Figure 10- Périmètre de protection d'un captage (Toussaint, 2011).**

### 3.7 Surveillance des eaux souterraines

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

qu'elle soit d'origine atmosphérique ou superficielle, ponctuelle ou extensive. Le maintien de la qualité des eaux souterraines, nécessite de les surveiller.

Plus le constat d'une dégradation du milieu eau souterraine est tardif, plus il est difficile et coûteux d'étudier et de gérer une éventuelle pollution. Or, la surveillance préventive et l'exploitation régulière des données acquises permettent de constater précocement une dégradation, d'optimiser le suivi et de le rationaliser. Pour mener à bien cette mission de prévention et de gestion d'une pollution, le suivi doit être correctement dimensionné, réalisé et doit pouvoir évoluer au cours du temps.

### *Surveillance des eaux souterraines en Algérie*

L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et les Agences des Bassins Hydrographiques (ABH) sont responsables de la surveillance de la qualité et de la quantité d'eau souterraine au niveau national et de la collecte, le traitement et la mise à jour des informations sur les ressources en eau.

L'ANRH maintient un réseau piézométrique national de surveillance des eaux souterraines. Ce réseau piézométrique est constitué de 500 points d'observation. Les campagnes et les analyses de mesures piézométriques se déroulent en deux campagnes annuelles (de hautes eaux et de basses eaux). Les données sont publiées dans des tableaux et des cartes et stockées dans différentes bases de données mesurées et observées : 110 000 fichiers de points d'eau (pour forages, puits et sources) sont inventoriés et archivés.

L'ANRH gère également un réseau national de surveillance de la qualité des eaux souterraines avec 550 points de surveillance. Ceux-ci sont échantillonnés une fois chaque 3 mois pour l'analyse physico-chimique, y compris la conductivité et les éléments azotés, et deux fois par an pour les métaux lourds. Les échantillons d'eau sont envoyés pour des analyses physico-chimiques, bactériologiques et hydro-biologiques dans un laboratoire central ou six laboratoires régionaux, qui ont une capacité annuelle de 40,000 échantillons d'eau (et 5000 échantillons de sol). Les données analysées sont stockées dans une base de données nationale de la qualité de l'eau, "SIQUEAU", qui contient des informations provenant de tous les réseaux d'observation et de mesure de l'eau.

### ***3.7.1 Rappels sur le contexte naturel et les sources de pollution***

Cette section permet de donner des informations sur le milieu de transfert qui est l'eau au travers des éléments suivants :

- La géologie via un extrait de la carte géologique ;
- L'hydrogéologie avec le ou les aquifère(s) concerné(s) et leur typologie associée (milieu poreux, fracturé, karstique) ;
- Le type de nappe (libre, captive, semi-captive) ;
- Le réseau hydrographique existant et, si disponibles, des éléments quant aux relations avec les eaux souterraines ;
- Les données climatiques, notamment la pluviométrie.
- L'hydrogéochimie (notamment pH, redox ou Eh, déterminants pour appréhender la mobilité des polluants, en particulier dans le cas des ETM -métaux et métalloïdes).

### ***3.7.2 Identification des substances à rechercher***

Il est important de connaître la nature, le volume et la localisation des produits présents par le passé ou actuellement. Il ne faut pas oublier de considérer les substances éventuellement apparues au fil du temps (métabolites de biodégradation par exemple). Ces données sont nécessaires pour définir les substances et paramètres à considérer. La nature des substances va conditionner leur comportement au sein de l'aquifère (dans le sol et l'eau souterraine). Le comportement est à prendre en compte dans le dimensionnement des forages comme indiqué par la suite (en particulier pour le choix de la profondeur et de la position de la crépine).

### ***3.7.3 Mise à jour du contexte du site***

Sont reportées ici toutes les informations pouvant avoir une incidence sur la pertinence du suivi actuel et/ou permettant l'interprétation des données de surveillance :

Ajout d'une famille de substances dans les procédés, stockage de déchets sur site ;

Travaux d'extension, d'aménagements ou autres réalisés sur site ;

- La situation de la ou des source(s) de pollution (selon le cas : potentielle, présumée, avérée) ;
- Vieillessement d'un confinement éventuel, sa durée de vie attendue et l'évolution de la source en relation avec cette durée de vie,
- Accidents/incidents s'étant produit sur site ou au niveau de sites industriel voisins ;
- Enjeux ou captage industriel qui ne sont plus à considérer ou inversement, etc.

#### ***3.7.4 Mise en place de la surveillance***

Sont reportées ici les informations relatives à la définition du réseau, des ouvrages et à l'évolution du suivi voire du site :

- Etude spécifique à introduire si elle existe, avec notamment la justification des choix vis-à-vis de la localisation des points de suivi, de la fréquence des campagnes, des substances et paramètres suivis ;
- Informations quant à la réalisation des forages à l'aide du rapport de sondage, et notamment de la profondeur et de l'équipement (position des crépines) des forages ;
- Information quant au choix du protocole d'échantillonnage ;
- Information sur l'évolution de la surveillance (ouvrages dégradés).

#### ***3.7.5 Choix des points d'accès à l'eau souterraine***

Le nombre et la localisation des piézomètres sont des choix reposant principalement sur les informations disponibles sur le contexte naturel et les enjeux. Selon le cas, le tableau qui suit indique le nombre de piézomètres à considérer sur site et hors site, afin de définir l'extension du panache en cas de pollution (**Tab.5**).

### ***3.8 Gestion de la pollution des eaux souterraines***

Comme on l'a dit plus tôt, la prévention de la pollution est de loin préférable que d'essayer d'y remédier après coup. Les options clés de gestion pour prévenir la pollution des nappes d'eau souterraine sont :

- L'isolement : garder les déchets et les aquifères productifs éloignés. Cela doit avoir généralement lieu au cours de la phase de planification de tout développement, en particulier là où il ya un niveau élevé de déchets générés.



Les études d'impact environnemental sont conçues spécifiquement pour s'assurer que cette séparation se produise en temps opportun.

- Le confinement : Lorsque des déchets sont générés à proximité de sources d'approvisionnement en eau souterraine ou en eau de surface, alors le confinement des déchets dans des bassins imperméables est une option de gestion. Les décharges de déchets solides doivent être conçues de telle sorte qu'il y ait une base imperméable, qui peut être une forme de polyéthylène à haute densité en doublure ou une couche d'argile compactée.

- La gestion des déchets : le tri des déchets en différentes composantes donne des résultats et permet la réutilisation / recyclage de certains déchets (plastique, métal, verre, papier et carton) et le compostage des déchets organiques. Cela réduit la charge globale de déchets et permet la séparation des déchets toxiques qui peuvent être traités ou confinés dans des installations, de haut niveau, pour déchets. Le tri et l'isolement des déchets est souvent commercialement viable.

**Tableau 5- Nombre minimal de forages implantés pour la surveillance de la nappe d'eau souterraine pour différents contextes ; vert en amont**

hydraulique, rouge en aval et boussole donnant sens d'écoulement) (Guérin, 2017).

Contexte	Nombre minimal de piézomètres	Illustration
Pollution non détectée Une seule direction, sens d'écoulement	3	
Pollution non détectée Variation direction, sens d'écoulement	5	
Pollution détectée Une seule direction, sens d'écoulement	6-8	
Pollution détectée Variation direction, sens d'écoulement	10-12	
Autres cas : milieu fracturé, phase plongeante (DNAPL), nappes superposées, etc.	> 12	

■ La décontamination : finalement, il y a la restauration des aquifères pollués.

Comme on l'a dit plus haut, cela est techniquement complexe, de longue durée et coûteux. Des méthodes telles que pomper, traiter et réinjecter l'eau traitée ; rinçage de l'aquifère à l'eau douce, etc ont été utilisées avec un succès limité. Les polluants insolubles, appelés LNAPL et DNAPL (liquides en phase non-aqueuse denses et légers) sont particulièrement difficiles à traiter.

### 3.9 Moyens de traitement des nappes polluées

Les procédés de décontamination des nappes polluées font appel à des voies physiques, chimiques et biologiques.

- Les voies physiques comprennent l'écémage du polluant surnageant, la filtration par membrane.
- Les voies chimiques font appel aux réactions d'oxydation ou de réduction.
- Les voies biologiques utilisent l'action des microorganismes du sol dont l'activité est stimulée par adjonction de nutriments et de dioxygène.

Ces différentes voies sont généralement associées.

Les traitements de décontamination peuvent être réalisés :

- *in situ* : le polluant est traité sur place, dans la zone non-saturée et la zone saturée
- *ex situ* : l'eau est pompée, traitée en surface puis réinjectée dans l'aquifère.

### 3.9.1 Les voies physiques

- Une Barrière Perméable Réactive (BPR) (**Fig.11**) est constituée d'une zone perméable verticale de matériaux réactifs (accepteurs ou donneurs d'électron, adsorbants, lit bactérien,...) située sur le passage d'un panache d'eau souterraine polluée. Par écoulement advectif naturel au travers de la barrière, les polluants présents dans les eaux souterraines sont dégradés en éléments non nocifs (organiques) ou adsorbés/complexés (organiques, métaux et métalloïdes) par le réactif.

Le principe de base d'une barrière réactive repose sur une tranchée dont la longueur permet d'intercepter l'ensemble du panache de pollution et dont la largeur donne lieu à un temps de contact suffisamment long entre le réactif et le polluant pour assurer la dégradation ou la sorption de ce dernier. La barrière doit, de préférence, être orientée perpendiculairement au sens d'écoulement de la nappe phréatique.

Les deux grands types de configuration sont :

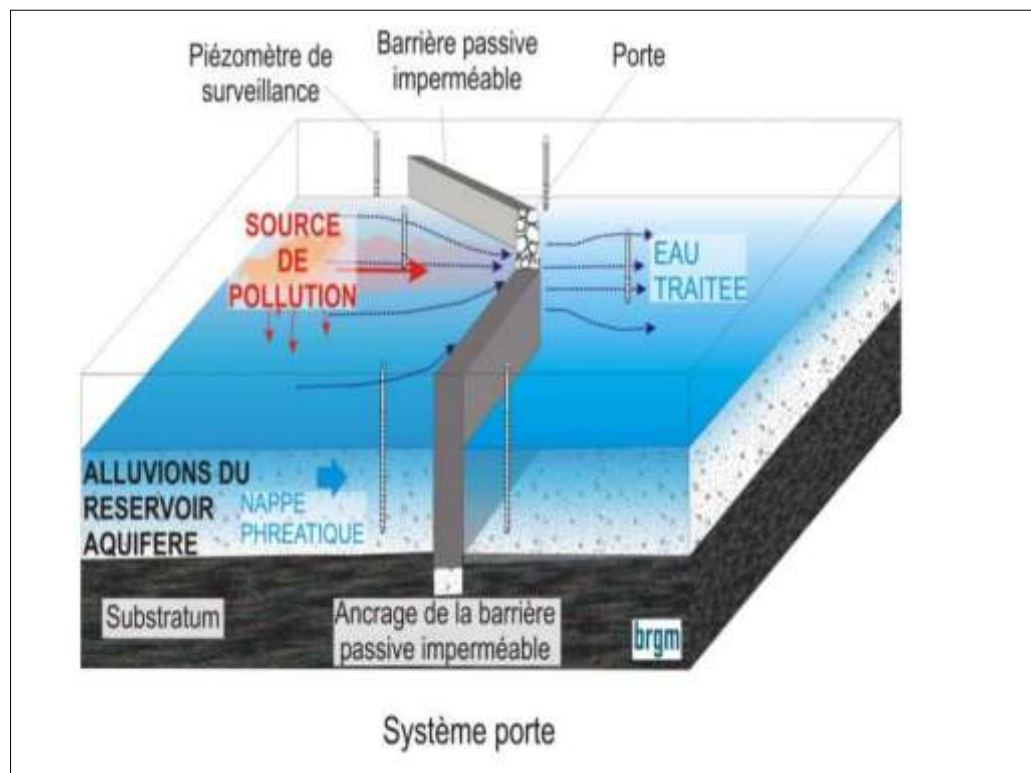
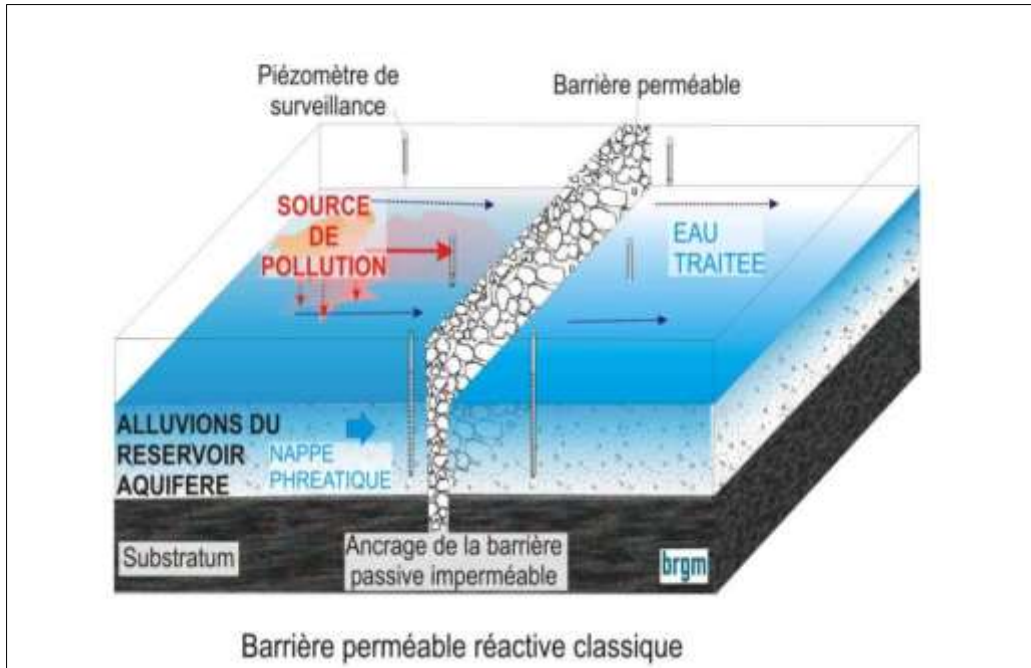
- le système mur continu (tranchée continue, Continuous Wall, CW ou Continuous Reactive Wall, CRW),
- le système Funnel & Gate noté F&G (littéralement, Entonnoir & Porte)

Dans le cas d'un système « mur continu », la barrière est réactive et perméable sur la totalité de sa longueur. Cette configuration minimise les perturbations hydrauliques.

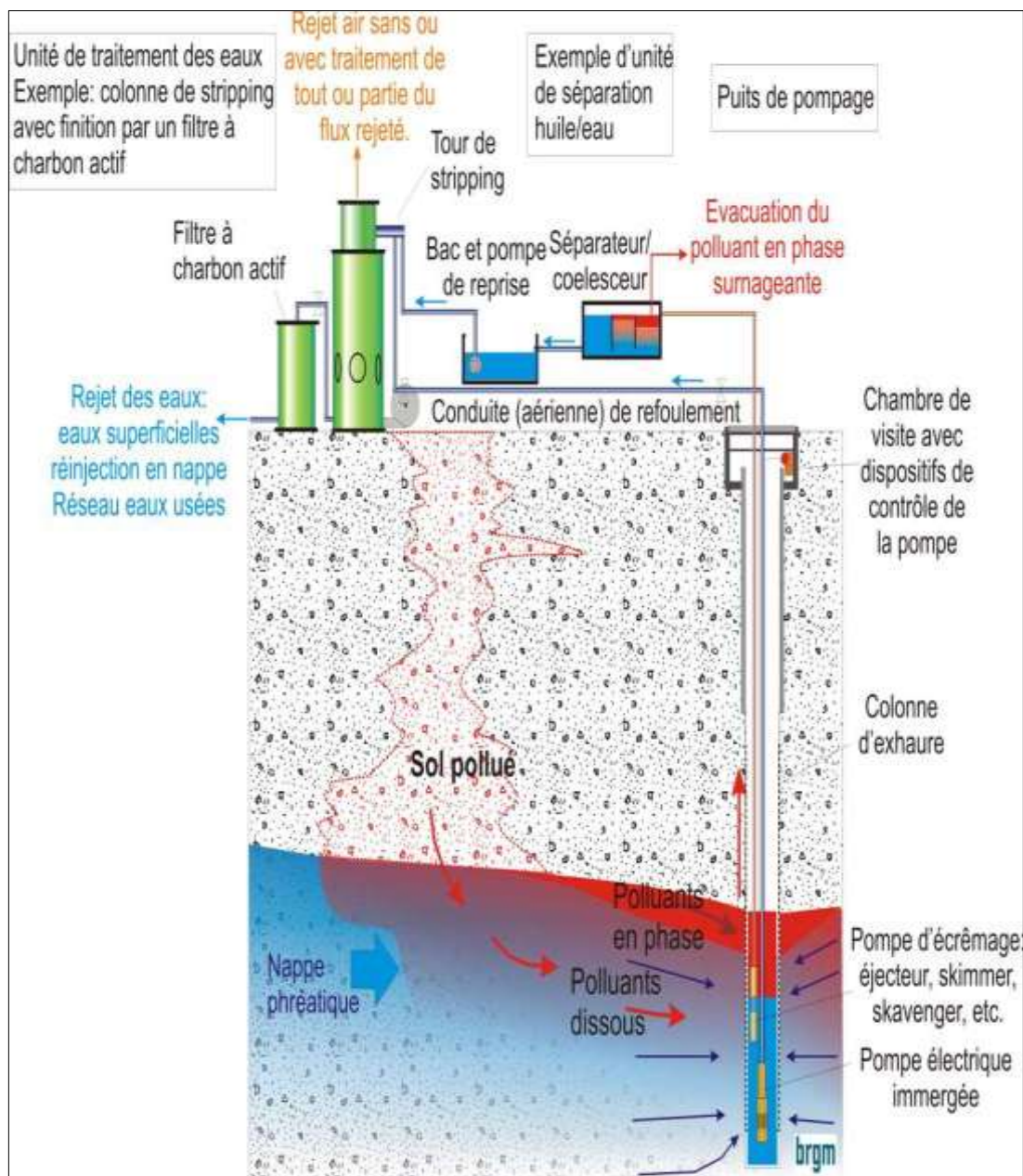
Au contraire, dans le cas d'une configuration en « entonnoir - porte », le panache est canalisé à l'aide d'écrans étanches vers une ou plusieurs portes qui constituent la zone réactive. Cette seconde configuration provoque la convergence de l'écoulement. L'extension limitée de la zone réactive de la barrière offre la possibilité de mieux contrôler ses performances en termes d'abattement de pollution.

Ces deux configurations couvrent la très grande majorité des applications industrielles.

- **Pompage-écrémage** : Le pompage des eaux souterraines crée un cône descendant ; le surnageant (produit pur de densité inférieure à 1) suit un gradient hydraulique, migrant par gravité vers le point bas où il s'accumule. Cette accumulation permet une récupération plus rapide du surnageant. Le surnageant est ensuite pompé à l'aide d'un écrémeur d'huile vers une unité de stockage de surface (réservoir) avant d'être évacué (incinération, récupération d'hydrocarbures, etc.) (**Fig. 12**). Les écrémeurs sont situés au niveau du surnageant et permettent de récupérer spécifiquement les hydrocarbures en évitant au maximum la récupération des eaux souterraines.



**Figure 11- Schéma de principe de barrière perméable réactive classique et de type classique et entonnoir-porte (ADEM, 2009)**



**Figure 12- Schéma de la technique in situ de pompage-écrémage**

### 3.9.2 Les voies chimiques

h) L'oxydation chimique *in situ* consiste à injecter un oxydant dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation. L'oxydation des contaminants est produite directement par la molécule de  $O_3$  ou indirectement par les radicaux hydroxyles ( $OH\bullet$ ). L'oxydation indirecte des contaminants se produit lorsque l'ozone est injecté dans un aquifère contaminé et se décompose en dioxyde ( $O_2$ ) et en radicaux hydroxyles ( $OH\bullet$ ). Ces radicaux hydroxyles sont plus réactifs que l'ozone et peu spécifiques, ce qui leur permet d'oxyder un grand nombre de

composés chimiques. Le traitement à l'ozone est efficace sur des substances organiques toxiques ou difficilement biodégradables et peut également être utilisé sur des substances inorganiques. L'ozone réagit également avec la matière organique produisant du dioxyde de carbone et de l'eau. La réaction d'oxydation chimique par l'ozone est très rapide et le temps de traitement varie de quelques semaines à quelques mois.

L'oxydation chimique *in situ* peut être appliquée dans les zones non saturée et saturée sur un large spectre de polluants organiques (COV, COHV, SCOV, SCOHV, pesticides..) même à des concentrations très importantes.

Elle s'applique de préférence sur des sols homogènes et relativement perméables. A priori, une perméabilité supérieure à  $10^{-5}$  m/s est souhaitable pour une mise en contact de la solution oxydante avec la zone source.

i) La réduction chimique *in situ* consiste à injecter un réducteur dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation. Ce réducteur est utilisé dans le but :

- soit de détruire totalement ou partiellement des polluants organiques (destruction aboutissant à la minéralisation totale des polluants ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables),
- soit de réduire les polluants inorganiques afin de les stabiliser ou de les rendre moins toxiques

### **3.9.3 Les voies biologiques**

Sparging/biosparging et la biostimulation (procédés aérobies) : Ces techniques consistent à injecter de l'oxygène et des nutriments afin de placer les microorganismes dans les conditions idoines pour dégrader les polluants (constitués notamment de composés monoaromatiques) et les solvants polaires. L'injection est réalisée *in situ*, sous forme de puits d'injection ou parfois de drains horizontaux (4). En outre, l'atténuation naturelle surveillée est de plus en plus utilisée comme procédé de finition de chantiers de dépollution.

### **3.10 Protection de la nappe d'eau douce contre l'intrusion saline**

Il n'existe pas de solution miracle pour stopper l'intrusion saline, cependant il existe des solutions permettant de la limiter et la repousser vers la mer. Dans cette partie, nous allons en présenter quelques-unes.

#### **3.10.1 Arrêts des pompages**

Évidemment, la première des choses si l'on souhaite limiter l'intrusion saline, c'est de stopper ou de ralentir les pompages de la nappe. En effet, si l'on stoppe les pompages il y aura plus d'eau douce dans la nappe et aucune dépression ne sera créée dans la nappe ce qui aura pour effet direct de repousser le front salé par rapport à la situation actuelle.

Il faudrait donc que les habitants de l'île arrêtent de puiser de l'eau de la nappe et utilisent d'abord l'eau des citernes individuelles. Or, pour le moment il se trouve que les villageois de Mar Lodj font l'exact contraire, c'est à dire qu'ils commencent à utiliser l'eau des citernes seulement lorsque l'eau du puits est devenue trop salée. Idéalement, la nappe d'eau douce ne devrait servir qu'en cas d'épuisement des réserves (citernes individuelles, bassin de rétention d'eau) dont ils disposent.

#### **3.10.2 Recharge artificielle de la nappe**

La recharge artificielle de nappe est de plus en plus utilisée pour stocker l'eau souterraine à court et à long terme. Elle peut être utilisée dans plusieurs cas, par exemple lorsque le stockage d'eau dans la nappe présente des avantages sur le stockage d'eau de surface ou pour le recyclage des eaux usées. Dans notre cas, la recharge artificielle serait utilisée pour repousser le front salé. En effet, en augmentant la quantité d'eau dans la nappe ou les infiltrations on va modifier l'équilibre entre l'eau douce et l'eau salée et donc la position du front salé. Deux méthodes de recharge sont envisageables.

### **3.11 Techniques de réalimentation artificielle des aquifères**

La réalimentation artificielle d'un aquifère (RAA) consiste à introduire dans un réservoir souterrain une quantité d'eau plus importante que celle qui y parviendrait selon un fonctionnement naturel. Le plus souvent, la ou les actions anthropiques mises en oeuvre ont pour objectif de conduire une gestion active de l'aquifère.

Cependant, des formes non intentionnelles de RAA se produisent, notamment dans le cas de fuites à partir des réseaux de distribution de l'eau ou dans des zones d'irrigation.

la RAA permet de réintégrer dans un cycle de l'eau mobilisable pour l'alimentation en eau potable des eaux usées en les infiltrant ou en les injectant dans un aquifère après traitement. Ceci favorise en effet l'acceptation par les populations d'un usage des eaux usées traitées.

Il existe de nombreuses méthodes de réalimentation d'un aquifère. Elles peuvent être rangées dans deux catégories : celles qui recourent à une injection directe en aquifère et celles qui mettent en oeuvre une infiltration vers un aquifère à nappe libre (sans couverture imperméable) et de faible profondeur.

Les principales techniques de recharge artificielle sont :

- Les bassins d'infiltration
- Les méthodes d'injection directe
- La recharge artificielle indirecte

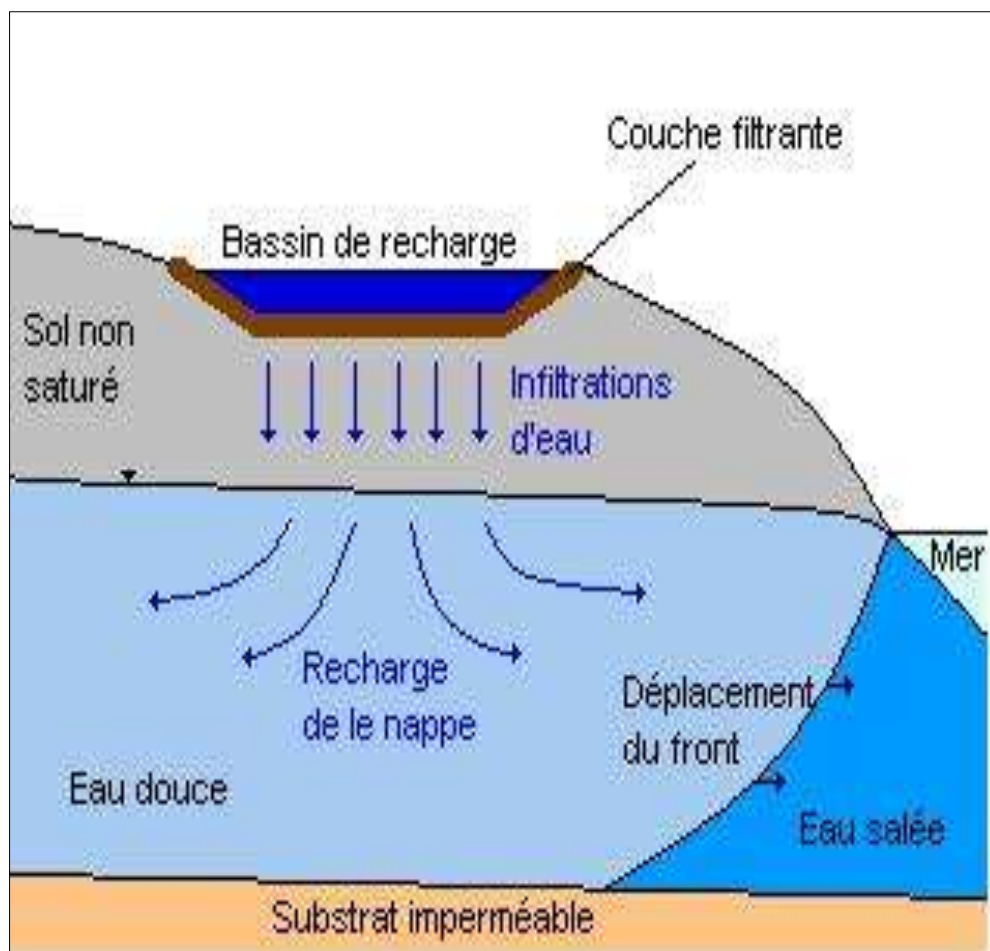
### **3.11.1 Bassin d'infiltration (Fig.13)**

On peut aussi participer à la recharge de la nappe par injection superficielle. Cela signifie que la recharge artificielle des nappes est réalisée à partir d'eau de surface dans des bassins, des tranchées, des fossés et d'autres dispositifs où l'eau s'infiltré dans le sol et s'écoule vers le bas pour recharger les aquifères. Il faut alors aménager des cours d'eau, construire des canaux d'infiltration ou des bassins. Généralement on installe une couche filtrante au fond des bassins pour augmenter la capacité d'infiltration. La capacité d'infiltration varie de 2-5 mm/j sur sable à 0,2-0,4m/j dans bassin à végétation. Ainsi, le bassin à végétation a des débits d'injection plus lents mais a l'avantage de ne pas colmater. De plus, afin d'éviter la prolifération d'algues, on s'efforce de faire circuler l'eau dans les bassins.

Cette technique est sujette au colmatage. Il est donc nécessaire de s'assurer de la qualité des eaux à infiltrer et de prévoir les opérations d'entretien nécessaires, d'évaluer leur fréquence et d'estimer leur coût (critère de faisabilité économique

importante). Ils peuvent être utilisés pour l'infiltration d'eau en provenance de cours d'eau ou pour infiltrer des effluents préalablement traités.

Sur certains sites, les bassins d'infiltration ont fonctionné efficacement là où l'installation comprend également un bassin de rétention étendu en tant que stade de prétraitement, pour éliminer les sédiments. Les bassins peuvent échouer là où ils ne peuvent pas être entretenus fréquemment, et leur utilisation est découragée dans certaines régions des États-Unis. (Par exemple, ils ne sont pas recommandés dans l'État américain de Géorgie, où de nombreuses régions ont une forte teneur en argile, à moins que le sol du site particulier ne soit modifié («sol technique») pendant la construction pour améliorer les caractéristiques d'infiltration.).



**Figure 13-Schéma d'une réalimentation de la nappe par bassin d'infiltration.**

L'aquifère à recharger doit être à la surface ou près de la surface. Le fond du bassin doit être perméable. La quantité typique d'eau pénétrant dans le sol est de 30 m/an pour les sols à texture fine (par exemple, les loams sableux), de 100 m/an pour les

sols limoneux et de 300 m/an pour les sables grossiers propres. Une méthode de terrain pour déterminer les taux d'infiltration au fond des réservoirs a été développée et peut être utilisée pour aider à la conception. Idéalement, les taux d'infiltration devraient être supérieurs aux taux d'évaporation.

Les bassins ont généralement une profondeur de 1 à 4 m, suffisamment profonde pour empêcher la croissance excessive d'algues ou de plantes aquatiques, et suffisamment peu profonde pour empêcher le développement de conditions anaérobies au fond. Mais la taille de l'étang doit être décidée en fonction de la zone de captage et du nombre de remplissages possibles par an. Afin de capturer efficacement le ruissellement dans un bassin versant, des techniques de conception similaires aux tranchées de contour pourraient être utilisées pour les bassins d'infiltration.

**Tableau 6- Avantages et désavantages de la recharge des nappes d'eau souterraine par des bassins d'infiltration**

<b>Avantages</b>	<b>désavantages</b>
<p>- Peut réduire la salinité des eaux souterraines</p> <p>Faciliter la recharge dans le sol environnant qui à son tour améliore l'humidité du sol, améliore la productivité agricole et atténue la sécheresse</p> <p>- Peut aider à recharger les puits peu profonds, les forages et les sources</p>	<p>- Ils peuvent s'envaser facilement en raison de la perte de couvert végétal dans le bassin versant ; le désenvasement prend du temps et de l'argent</p> <p>- L'entretien des barrages nécessite des efforts communaux et les institutions communales ne semblent pas assez solides</p> <p>- Taux d'évaporation élevés</p> <p>- Coût de construction élevé- en Inde, coûts estimés entre 5 000 et 10 000 dollars pour des bassins d'un volume de 10 000 à 15 000 m<sup>3</sup>. Ceci est similaire à d'autres étangs sans percolation (voir Captage naturel du sol et Réservoir d'eau libre pour plus de détails).</p>

### **3.11.2 Infiltration dans le lit d'un cours d'eau**

L'objectif est d'accroître le rendement de l'infiltration naturelle en cherchant à gagner sur :

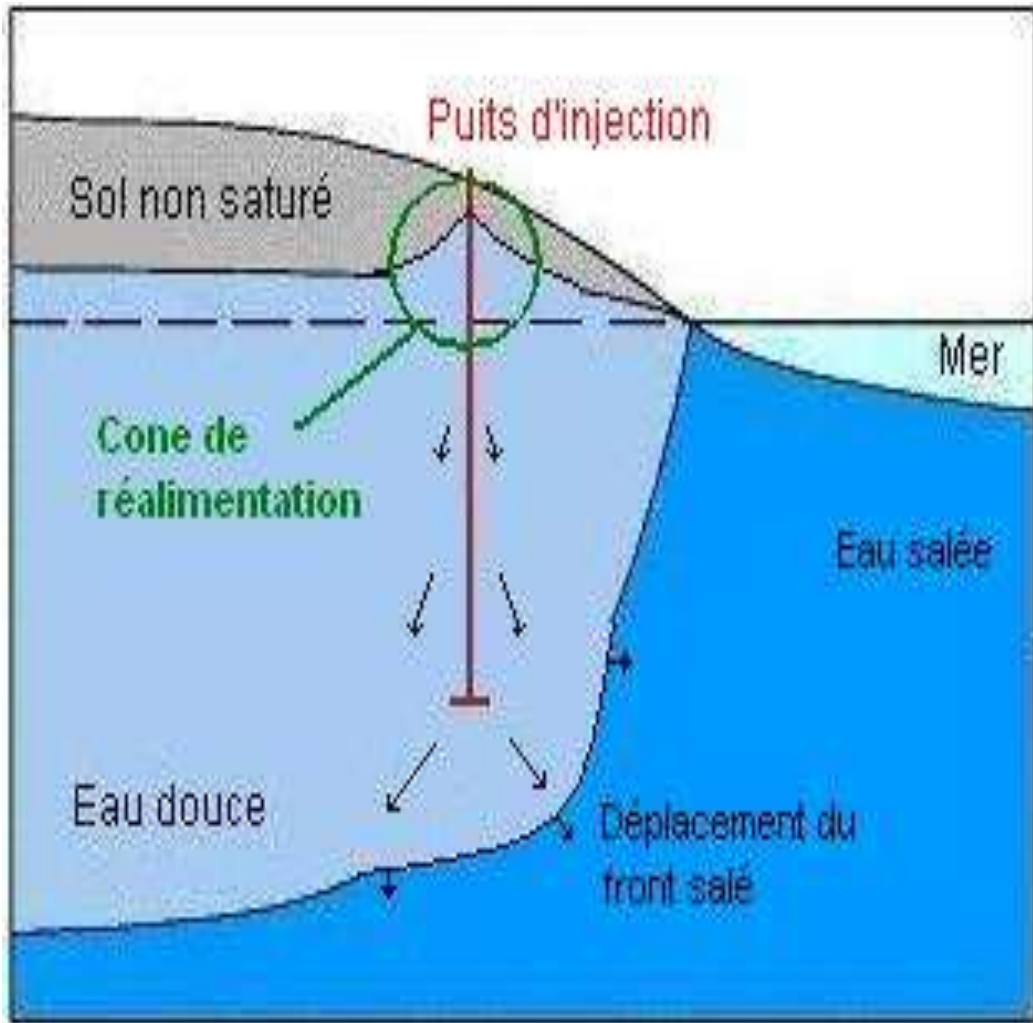
- la surface de la plage d'infiltration ;
- la charge hydraulique ;
- la durée de l'infiltration.

Le gain de surface d'infiltration peut être obtenu par dérivation d'une partie du débit la surface de la plage d'infiltration, d'un lit mineur actif sur un ou plusieurs bras morts.

### **3.11.3 Réalimentation par injection directe dans un aquifère**

La technique réalimentation par injection directe dans un aquifère consiste à utiliser soit :

- a) un même puits pour en faire un usage double, c'est à dire qu'on peut l'utiliser pour l'alimentation et l'extraction en eau. Ceci peut être réalisé dans des aquifères présentant une eau saumâtre, voire polluée, dans la mesure où le temps de résidence de l'eau injectée dans l'aquifère permettra la reprise d'une eau adaptée en qualité à l'usage auquel elle est destinée. Le concept de bulle d'eau douce dans un aquifère salé a été développé.

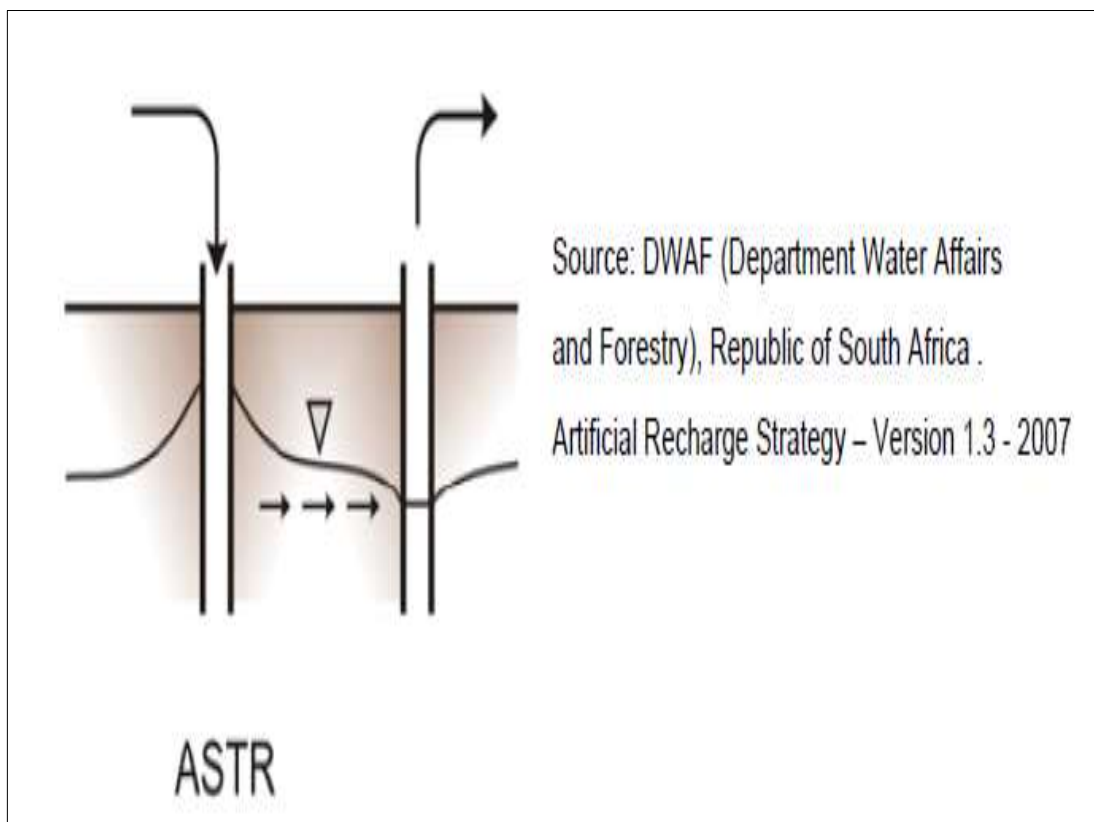


*Figure 14- Schéma d'une réalimentation de la nappe par un puits d'injection.*

Il n'y a pas de forme particulière pour le cône de réalimentation (représenté sur schéma ci-dessus) car sa forme est fortement influencée par l'écoulement de la nappe. Cette solution se révèle moins coûteuse et pourrait être utilisée facilement dans le cas où il existe des puits déjà creusés. En effet, il suffirait de prévoir un dispositif permettant de diriger l'eau du réservoir vers un puits en cas de trop plein (un siphonage avec un tuyau suffirait).

**b)** L'injection et la reprise d'eau par un point de prélèvement différent du point d'injection. Connue en anglais sous le nom d'ASTR : Aquifère Storage, Transfer and Recovery. L'eau injectée circule donc préalablement dans l'aquifère. Elle est le plus souvent utilisée lorsque l'eau souterraine native est de bonne qualité pour une exploitation à des fins d'eau potable.

L'exemple type de mise en œuvre Stockage et reprise différée dans le temps et l'espace a été appliqué en Californie. En 1956, des pompages importants dans un aquifère côtier ont induit un rabattement tel que le biseau salé a avancé de 8 km à l'intérieur des terres. Il a été décidé de créer une barrière hydraulique consistant en 23 forages d'injection. La première eau traitée a été injectée en octobre 1976, ce qui a permis de rétablir l'équilibre dans le bilan quantitatif de l'aquifère et donc de poursuivre l'exploitation pour l'AEP. Environ 100 000 m<sup>3</sup> d'une eau présentant un résidu sec de 500 mg/l sont injectés quotidiennement.



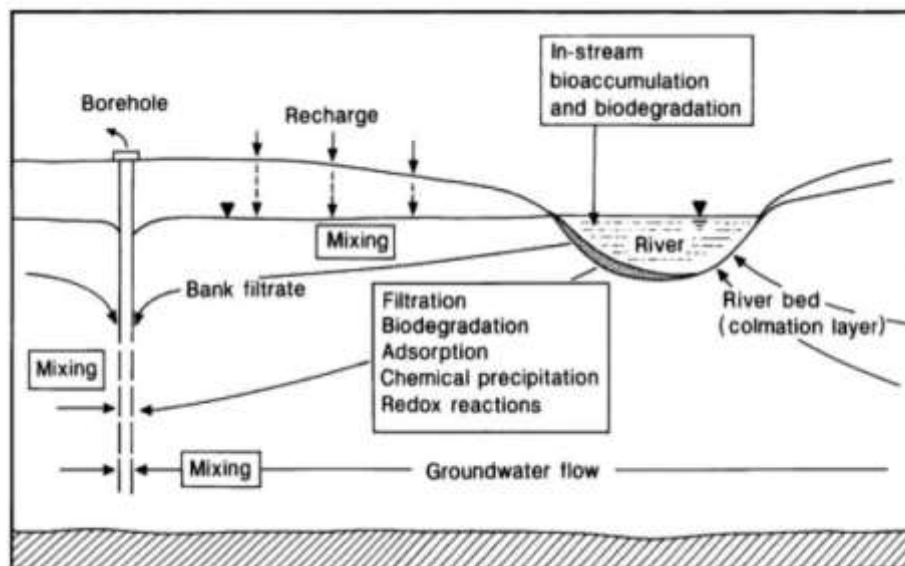
**Figure 15- Stockage et reprise différée dans le temps et l'espace.**

**Tableau 7- Récapitulatif avantages/inconvénients des dispositifs de recharge d'injection directe**

Avantage(s)	Désavantage(s)
Problème de colmatage réversibles et/ou ralenti du fait du cycle pompage injection	Utilisation d'eau de recharge peu dégradées
Mise en place sur un site de taille réduit, facilitant son implantation	Risque de contamination de la nappe (par la nappe sus-jacente ou eaux de surface)
Possibilité d'utiliser des nappes (captives ou semi-captives) profondes et/ou contaminés	Débits d'injection parfois difficile à maintenir
Contrôle du temps de séjour dans la nappe	Présence d'un contraste de salinité entre l'eau de recharge et celle de la nappe
	Temps de stockage limité pour éviter que le mélange des eaux ne soit trop important
	Dans le cas de l'ASTR, pompage et injection dans 2 puits différents donc plus de colmatage

### 3.1.4 Recharge artificielle indirecte

La recharge artificielle indirecte (**Fig.16**), aussi appelée « la réalimentation artificielle induite » consiste à augmenter le transfert d'eau entre un cours d'eau et une nappe alluviale en mettant en place des sites de pompage à proximité des berges de celui-ci. Plus précisément, une ligne de forage parallèle et proche d'un cours d'eau est mise en place. Les pompages dans les forages induisent un rabattement de la nappe dans l'aquifère et donc une modification des écarts de pression existant entre l'eau dans le cours d'eau et la nappe. Ces pompages entraînent donc une infiltration d'eau de surface via les berges, dans la mesure où celles-ci ne sont pas colmatées et où le débit de pompage est suffisant. Ce dispositif a principalement pour but d'utiliser la capacité géoépuratoire des berges pour filtrer et purifier les eaux de recharge. En raison de la teneur élevée en matières en suspension dans les eaux de surface, un processus de colmatage de ces berges peut se mettre rapidement en place. Afin de pallier cette contrainte, il est préférable de maintenir un débit d'infiltration relativement faible et de prévoir un entretien régulier de ces zones.



**Figure 16-** Schéma simplifié d'un dispositif de recharge artificielle indirecte (Ibison et al, 1995).

**Tableau 8- Avantages/inconvénients des dispositifs de recharge d'injection indirecte.**

<b>Avantage(s)</b>	<b>Désavantage(s)</b>
Possibilité d'utilisation des différents types d'eaux de recharge	Colmatage élevé dans la zone d'infiltration de berge en raison du taux élevée de MES dans les eaux infiltrées
Infiltration de volumes d'eau importants	Processus de colmatage quasi-irréversible
Epuration des eaux de recharge lors de leur filtration à travers la zone non saturée de l'aquifère, ce qui implique une réduction des étapes de prétraitement de ces eaux	Taux d'infiltration souvent limité et temporaires
Coût de mise en place relativement faible	
Facilité d'entretien	

### **3.12 Origines des eaux utilisées pour la recharge des eaux souterraine**

Un critère fondamental concernant la faisabilité d'un projet de recharge artificielle est la disponibilité d'e eau de recharge à proximité du site d'injection, nécessaire pour pouvoir assurer un apport régulier et limiter les coûts économiques liés aux transports.

Différents types d'eau peuvent être employés dans le cadre des activités de recharge artificielle des aquifères :

- En raison de leur disponibilité, les eaux de surface issues de cours d'eau sont généralement utilisées si l'objectif de la recharge artificielle est principalement quantitatif. Il est toutefois souvent difficile d'utiliser ce type d'eau en période déficitaire sans courir le risque de dégrader le débit du réseau hydrographique, sauf dans les cas où s'il s'agit de grands fleuves ou de rivières importantes.

- Les eaux de dessalement de l'eau de mer, par comparaison avec les eaux de surfaces, les volumes d'eau de dessalement sont moindres en vue de leurs cout élevé, leur utilisation pour la recharge artificielle reste actuellement très limitée (cas du stockage souterrain pour l'alimentation en eau potable d'Abou Dhabi).
- Les eaux usées traitées sont utilisées au sein de dispositifs de recharge artificielle dans de nombreux pays. Très répandue dans les pays où la ressource en eau fait le plus défaut. Les volumes d'eaux usées traitées sont légèrement plus élevés que ceux des eaux de dessalement mais restent inférieurs à ceux des eaux de surfaces.

# CHAPITRE IV. DEPOLLUTION DES SOLS CONTAMINÉS

## *4.1 Objectif de la dépollution des sols*

Le but de la dépollution des sols est de restituer les sites dans un état aussi proche que possible de l'état antérieur à la pollution. En outre, la ou les techniques de traitement des sols ne doivent pas être plus polluantes que le résultat de la dépollution. C'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de transfert de pollution. La liste des critères auxquels doivent répondre les techniques de dépollution :

- Enlever ou neutraliser les matières incriminées ;
- Peser aussi peu que possible sur les ressources mises en œuvre (eau, air, énergie, capital...);
- Ne pas provoquer d'émissions secondaires (eau et air du processus) contenant des polluants ;
- Obtenir un taux important de recyclage du matériau traité ;
- Minimiser la quantité et le danger potentiel des matières résiduelles ;
- Ne pas produire de nouvelles substances toxiques par l'enlèvement ou le transfert de celles déjà existantes.

#### ***4.2 Technique de dépollution des sols selon le lieu de traitement***

En fonction des caractéristiques et des exigences particulières liées à une situation de réhabilitation, la décontamination pourra être effectuée selon 3 types de procédés :

- Directement dans le sol du site à l'étude, sans excavation (*in-situ*) ;
- sur le site après excavation (*on-situ*) ;
- A l'extérieur du site, dans un centre de traitement autorisé «hors site» ou «off site» ou «ex situ». Il est important de savoir que les sols décontaminés à l'extérieur du site à l'étude doivent être retournés sur le site où ils ont été excavés ou dans un centre d'enfouissement, puisqu'ils ne sont pas considérés comme des sols propres

#### ***4.3 Technique de dépollution des sols en fonction de la nature des procédés employés***

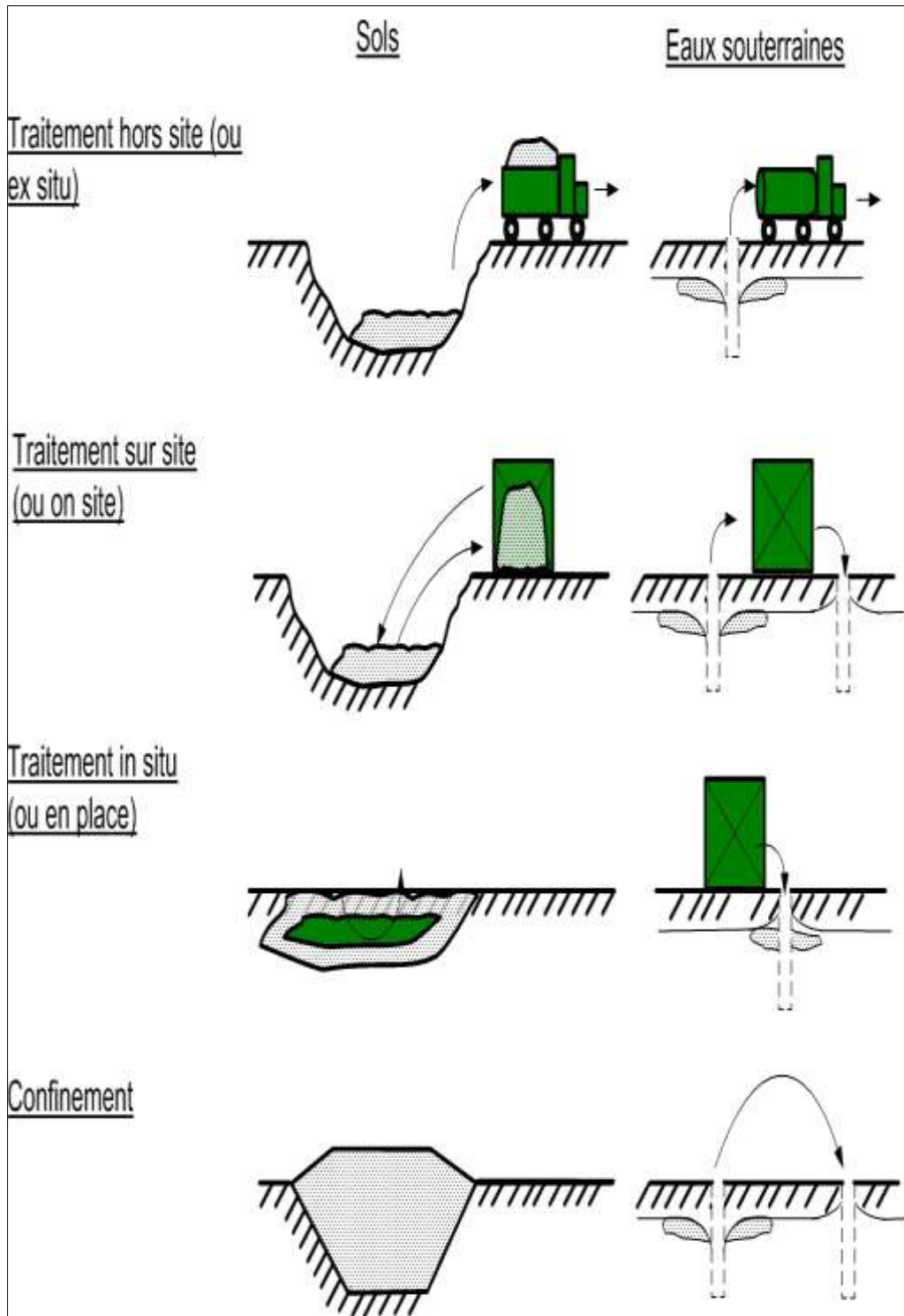
Les différentes techniques de dépollution peuvent être classées en fonction de la nature des procédés employés (**Tab.9**), à savoir :

##### ***4.3.1 Les procédés physiques***

Le principe consiste à utiliser des fluides (eau ou gaz), présents dans le sol ou injectés, comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser. La technique physique la plus répandue actuellement consiste à injecter des fluides dans le sol afin de transférer et concentrer la pollution vers des points de récupération. Cette technique de «lavage des sols» préalablement excavés peut être réalisée à pression normale ou haute pression. L'eau est ensuite dépolluée par passage dans une station d'épuration adaptée au polluant, l'air chargé en vapeurs toxiques est filtré sur charbon actif. Cette méthode s'adresse à la plupart des polluants sur sols grenus. Elle atteint des rendements de 80 % et peut être améliorée si elle est associée à un traitement biologique ou en ajoutant des tensioactifs (**Fig. 17**).

#### ***4.3.2 Les procédés biologiques***

Les procédés biologiques consistent à utiliser des micro-organismes, le plus souvent des bactéries (mais aussi des champignons et des végétaux), pour favoriser la dégradation totale ou partielle des polluants. Certains bioprocédés permettent aussi de fixer ou de solubiliser certains polluants. Il existe plusieurs méthodes de traitement biologique. Parmi celles-ci, il est possible de compter le bioréacteur, la phytoremédiation, le compostage, le landfarming, le biosparging, l'atténuation naturelle contrôlée, la barrière perméable réactive, ou encore l'électroremédiation. Les techniques les plus utilisées sont la bioventilation/biodégradation et le biopile.



**Figure 17- Famille de techniques de dépollution des sols par lieu de traitement (Colombano, 2010).**

c) ***Biodégradation et bioventilation***

Le principe de biodégradation s'explique par la dégradation des composés à base de carbone par des microorganismes. Il est donc question, en d'autres mots, de cultiver des microorganismes sur les sols contaminés. Le processus de dégradation des contaminants peut s'effectuer en présence ou en l'absence d'oxygène (aérobie, anaérobie) ; se sont de plus en plus utilisées pour le traitement des sols affectés par des hydrocarbures.

« La bioventilation implique un système de ventilation permettant de transporter l'oxygène dans le sous-sol, où les organismes sont stimulés afin de métaboliser les composants de carburant. ». Le phénomène de bioventilation nécessite parfois d'injecter des nutriments dans les sols, d'ajuster le taux d'humidité, d'ajouter des composés libérateurs d'oxygène, ou encore d'ajuster les réactions chimiques par l'ajout d'électrons .La biodégradabilité des principaux polluants organiques est présentée au tableau 5 ci-dessous

**Tableau 9- les techniques de physiques les plus utilisées pour la dépollution des sols**

<b>Techniques</b>	<b>In situ</b>	<b>Ex situ ou on site</b>
<b>Méthodes physiques par évacuation de la pollution</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ventilation de la zone non saturée</li> <li>• Extraction double phase</li> <li>• Barbotage in situ (ou injection et bullage d'air in situ)</li> <li>• Pompage et traitement</li> <li>• Pompage/écrémage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Excavation des sols</li> <li>• Tri granulométrique</li> <li>• Lavage à l'eau</li> </ul>
<b>Méthodes physiques par piégeage de la pollution</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Confinement couverture étanchéification</li> <li>• Confinement vertical</li> <li>• Piège hydraulique ou confinement hydraulique</li> <li>• Solidification/stabilisation in situ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>par Encapsulation on site et élimination en centres de stockage des déchets</li> <li>• Solidification/stabilisation</li> </ul>

**Tableau 10- Biodégradabilité des polluants (tiré de Colombano et al, 2010).**

Type de contaminants	Degré de biodégradabilité
Hydrocarbures pétroliers C6-C15	Très facile
Alcools, phénols, amines	Très facile
Acides, esters, amides	Très facile
Hydrocarbures pétroliers C12-C20	Modérément facile
Ethers, hydrocarbures monochlorés	Modérément facile
Hydrocarbures pétroliers (<C20)	Modérément difficile
Hydrocarbures polychlorés	Modérément difficile
HAP, PCB, pesticides	Très difficile

La durée du traitement varie en fonction de plusieurs facteurs mentionnés précédemment. La quantité de contaminants présents dans les sols, le type de sol, la superficie contaminée ainsi que le type de contaminant en sont de bons exemples. Toutefois, l'utilisation d'une technologie biologique nécessite une durée de temps très flexible puisque la mise en place de cultures biologiques dans un environnement donné peut parfois être complexe. Les microorganismes doivent bénéficier des meilleures conditions pour survivre et ainsi permettre le bon déroulement de la biodégradation. Si le temps presse et que le client veut se débarrasser rapidement de sa problématique, l'utilisation de la biodégradation ou bioventilation n'est peut-être pas la meilleure option.

#### **d) Biotertre (Terme anglais Biopile)**

La technique de traitement des sols par biopile (ou biotertre) consiste à amonceler les sols excavés, à les humidifier, à les amender et à les aérer afin d'accélérer la biodégradation des contaminants. Elle consiste tout d'abord à mélanger des sols excavés avec un amendement (agent structurant) tel des copeaux de bois. Les contaminants dans les sols sont ensuite biodégradés grâce à la mise en place de conditions idéales (température, taux d'humidité, nutriments, oxygène, pH...) (**Fig. 18**).

Le biotertre s'applique à des sols pollués par les produits pétroliers de type gasoils, fuels, kérosène. Les COHV, SCOV, pesticides, certaines coupes pétrolières lourdes (HAP, huiles organiques ...) peuvent aussi, dans certaines conditions, être traités mais avec des rendements épuratoires plus faibles.

#### ***4.3.3 Les procédés thermiques***

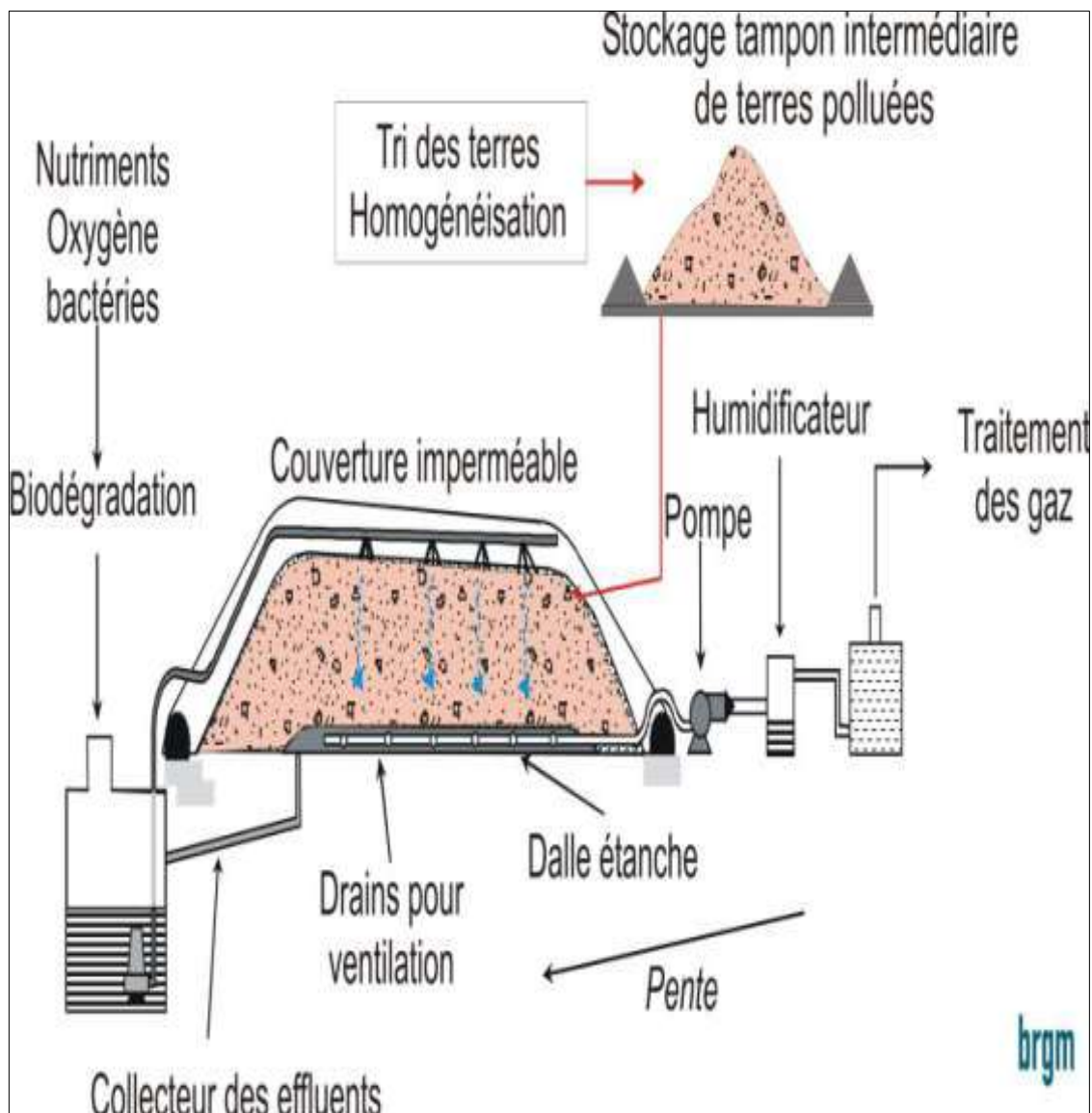
Ces procédures utilisent la chaleur pour détruire le polluant (ex : incinération), l'isoler (ex : désorption thermique, thermolyse, etc.), ou le rendre inerte (ex : vitrification, etc.).

##### ***e) Incinération***

Cette technique est adaptée aux sols contaminés par des composés organiques facilement oxydables et convertibles en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O. Il est nécessaire de procéder à une excavation des sols, un broyage et un tamisage avant le traitement thermique. Il existe deux méthodes de chauffage :

b) Le chauffage direct où le sol est chauffé à 1000°C directement en introduisant de l'oxygène,

Le chauffage indirect où le sol est dans un four étanche et n'est pas en contact avec la source de chaleur. La température avoisine les 800 °C et est suffisante pour extraire les polluants par l'intermédiaire des vapeurs se dégageant. Ces deux méthodes



**Figure 18- Schéma de principe du biotitre (Colombano et al, 2010).**

c) sont très efficaces mais très coûteuses en énergie. Il existe à l'heure actuelle plusieurs types de fours.

**f) Désorption thermique**

La désorption thermique, qui fait présentement concurrence à l'incinération, est de plus en plus utilisée. C'est un procédé visant à extraire les polluants volatils, semi-volatils, ou autres organiques, du sol par application de chaleur. Sous l'effet d'une température pouvant avoisiner les 300°C, les molécules vont se séparer de la matrice minérale et se volatiliser. Un procédé spécifique permettra enfin au polluant

d'être extrait du sol sous la forme gazeuse (vapeur d'hydrocarbures), puis piégé dans des dispositifs créés sur mesure.

La technique de désorption thermique est appliquée par l'injection de chaleur dans les sols (*in-situ*) (**Fig.19**), ou dans un four (*ex-situ*) (**Fig.20**), afin d'en extraire les contaminants volatils et semi-volatils (principe de volatilisation). Ce principe est applicable de façon *ex-situ*, une fois les sols contaminés excavés, et *in-situ*, directement dans la zone de sols contaminés.



**Figure 19- Désorption (*in-situ*) des brûleurs sur les sites contaminés pour effectuer une dépollution des sols (Valgo ,2021).**

#### ***4.3.4 Les procédés chimiques***

Les traitements chimiques mettent en jeu un réactif pour dégrader ou extraire la pollution. Les techniques d'ordre chimique consistent à détruire, fixer ou neutraliser les polluants par l'introduction de composés chimiquement actifs. Toutefois ces techniques s'appliquent difficilement aux matrices solides et nécessitent de bien connaître la nature du réactif et du sol. En effet, leur utilisation non maîtrisée pourrait générer d'autres formes de pollution. A l'heure actuelle, il existe un très grand nombre de procédés chimiques qui permettent d'éliminer la majeure partie des polluants. Cependant les coûts et l'efficacité des traitements sont très différents d'un produit à un autre. Il s'agit par exemple d'oxydation, de réduction, de lavage par solvants ou tensioactifs.

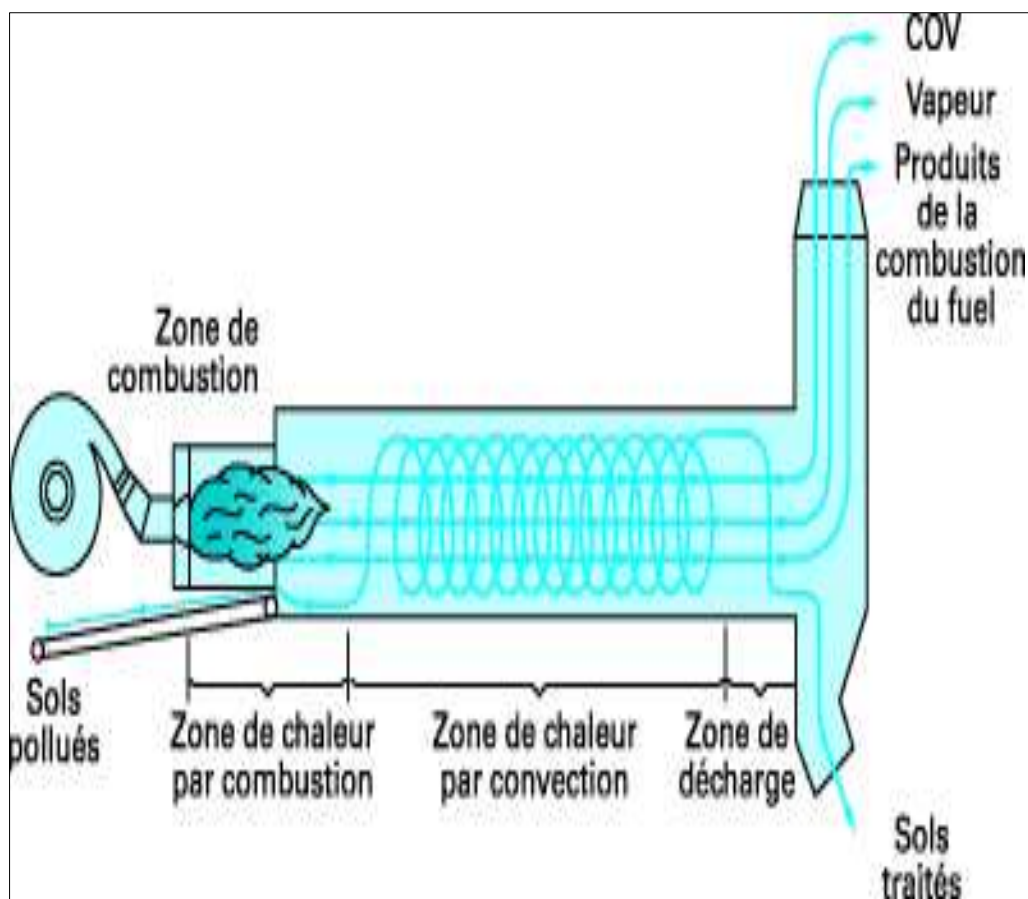


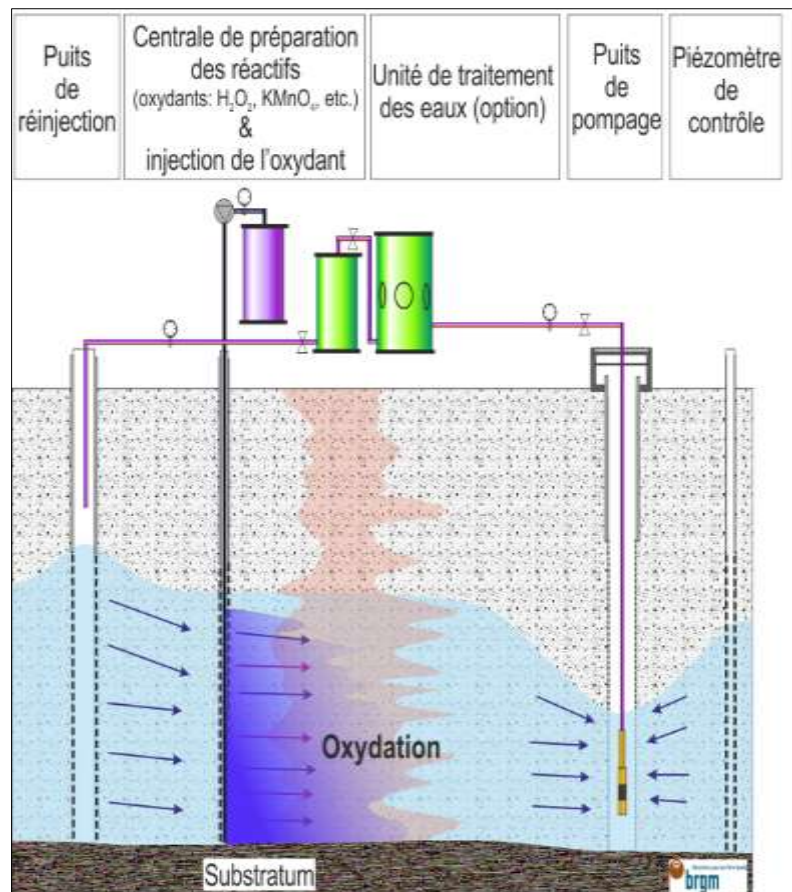
Figure 20- Principe de désorption thermique *ex-situ* (Tiré de Roudier, 2005).

g) *Oxydation chimique in situ*

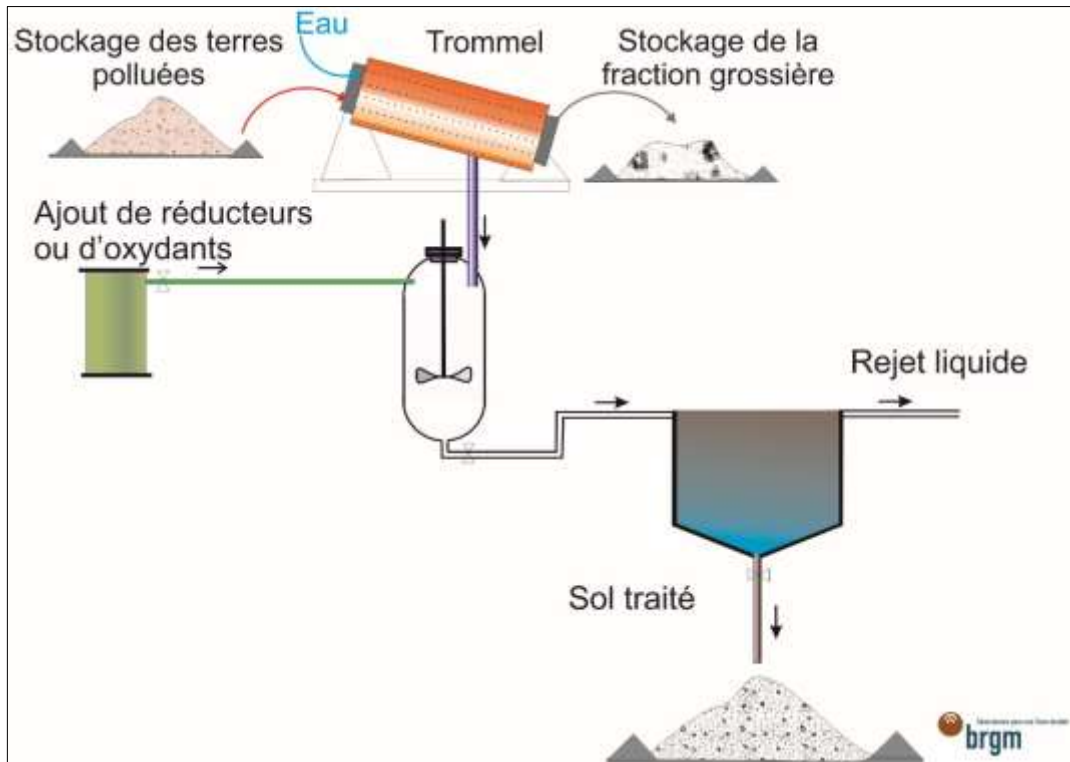
Consiste à injecter un oxydant dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation. Cet oxydant va détruire totalement ou partiellement les polluants. Ce procédé permet donc d'aboutir à la destruction des polluants (aboutissant à la

transformation en eau, gaz carbonique et sels) ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables.

Le type d'oxydant choisi dépend des caractéristiques environnementales (géologie, hydrogéologie, géochimie) ainsi que des caractéristiques de la source de pollution et/ou du panache (type de polluants, distribution). Les oxydants sont principalement utilisés sous forme liquide (permanganate (**Fig.21**), persulfate de sodium, peroxyde d'hydrogène ...), seul l'ozone est utilisé sous forme gazeuse. Les modalités d'injection influencent fortement les résultats de la dépollution, le résultat sera d'autant meilleur que le contact entre le polluant et l'oxydant est étroit.



**Figure 21- Schéma de principe de l'oxydation chimique in situ (injection).**  
(Colombano et al, 2010).



**Figure 22- Schéma de principe de la réduction sur site, hors site (Colombano et al, 2010)**

#### ***h) Réduction chimique in situ***

Consiste à injecter un réducteur dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation. Ce réducteur est utilisé dans le but de :

- soit de détruire totalement ou partiellement des polluants organiques (destruction aboutissant à la minéralisation totale des polluants ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables), soit de réduire les polluants inorganiques afin de les stabiliser ou de les rendre moins toxiques. Il existe quatre modes d'injection principaux :
  - l'injection de réducteurs liquides : procédé dont l'application est proche du lavage in situ et de l'ISCO par injection,
  - l'injection de réducteurs gazeux (essentiellement du H<sub>2</sub>S) : procédé dont l'application est proche du Sparging/Venting,
  - le malaxage in situ profond (deep soil mixing) avec injection de réducteurs sous forme de poudre soluble ou sous forme liquide : procédé dont l'application est proche de la Solidification/stabilisation in situ par malaxage. Ce procédé moins

usité que les autres est plus adapté pour les sols moins perméables et moins homogènes.

- le malaxage in situ de surface avec injection de réducteurs sous forme de poudre soluble ou sous forme liquide : procédé dont l'application est proche du Landfarming (procédé adapté pour les sols de subsurface) (**Fig.22**).

#### ***4.3.5 Les procédés de confinement***

Le confinement est plus une solution qu'une méthode de dépollution. Cette méthode permet le traitement de surfaces importantes et de polluants multiples. La pollution n'est donc pas enlevée ni supprimée. Le confinement ayant pour objectif d'en réduire les effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement. Il peut s'appliquer selon trois méthodologies :

- Le confinement de surface avec mise en place d'une géomembrane;
- Le confinement vertical, derrière des parois étanches en béton, matériaux rétenteurs ou mortiers plastiques ;
- Le confinement horizontal pro

## Références bibliographique

- ADEME. (2009). Traitabilité des sols pollués - Guide méthodologique pour la sélection des techniques et l'évaluation de leurs performances. Guide méthodologique, 123 p.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC : A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. *Washington, DC*, 455.
- Amharref, M., Aassine, S., Bernoussi, A. S. & Haddouchi, B. Y. (2007). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : Application à la plaine du Gharb (Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 20(2), 185–199. <https://doi.org/10.7202/015812ar>
- Barriuso, E., Calvet, R., Schiavon, M., & Soulas, G. (1996). Les pesticides et les polluants organiques des sols. *Etude et gestion des sols*, 3(4), 279-296.
- BRGM (2010). Outil interactif de pré-sélection des techniques de dépollution et des mesures constructives <https://www.selecdepoll.fr/fiche-technique/pompage-ecremage>
- Crivert, G. (2003). La cartographie régionale de vulnérabilité des eaux souterraines, un outil pertinent d'aide à la prise de décision en matière d'aménagement du territoire au Québec.
- Colombano, S., Saada, A., Guerin, V., Bataillard, P., Bellenfant, G., Beranger, S., ... & Girargeau, I. (2010). Quelles techniques pour quels traitements- Analyse coûts bénéfiques (Rapport annuel Juin 2010 : Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 08POLA06 correspondant à la convention BRGM-MEEDDAT 2008 n 0001386). *BRGM édition, Orléan Cdex France, BRGM Centre scientifique et technique Service Environnement et Procédés*, 1-403.
- Dörfliger, N., & Augeard, B. (2013). Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux. Onema
- Fagnan, N. (1998). Cartographie hydrogéologique régionale et vulnérabilité des aquifères de la MRC de Portneuf (Doctoral dissertation, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- FAO. (2000). Assessing soil contamination A reference manual. Rome, Italy

- Frissant, N., René-Corail, C., Bonnier, J., & De La Torre, Y. (2005). *Le phénomène d'intrusion saline à la Réunion: état des connaissances et synthèse des données disponibles*. Rapport BRGM/RP-54330-FR.
- Guérin, V., & Quiot, F. (2017, October). GUIDE sur la surveillance de la qualité des eaux souterraines appliquée aux ICPE et sites pollués. In *Séminaire "Quelles obligations et nouveautés pour le suivi des eaux souterraines dans le cadre des ICPE et des sites pollués?"*.
- Hulin, C. (2017). *Couplage géochimie-géomécanique dans les milieux poreux insaturés: Tension capillaire-Pression de cristallisation* (Doctoral dissertation, Université d'Orléans).
- Ibison, M. A., Sanders, F. A., Glanzman, R. K., Dronfield, D. G., David, R., & Pyne, G. (1995). Manganese in recovered water from an ASR well. In *Proc. 2nd Intl Symp on Artificial Recharge of Ground Water*. ASCE, New York (pp. 539-547).
- Lemièrre, B., Seguin, J. J., Le Guern, C., Guyonnet, D., Baranger, P., Saada, A., ... & Colombano, S. (2001). Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. *BRGM éditions, 300*, 132p.
- Mamy, L., Barriuso, E., & Gabrielle, B. (2011). impacts sur l'environnement des herbicides utilisés dans les cultures génétiquement modifiées. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA, 60(60)*, 15-24.
- Maxe, L., & Johansson, P. O. (1998). Assessing groundwater vulnerability using travel time and specific surface area as indicators. *Hydrogeology Journal, 6(3)*, 441-449
- Mina, A., Saadia, A., Abdes, S. B., & Ben, Y. H. (2007). Cartographie de la vulnérabilité ala pollution des eaux souterraines : Application ala plaine du Gharb (Maroc). *Revue des Sciences de l'eau/Journal of Water Science, 20*, 185-199.
- Murat, V. (2000). Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : application aux aquifères granulaires du piémont laurentien (Doctoral dissertation, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- Roudier, P. (2005). Techniques de réhabilitation des sites et sols pollués. Ed. Techniques Ingénieur.

- Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J., & Chorus, I. (Eds.). (2006). *Protecting groundwater for health: managing the quality of drinking-water sources*. World Health Organization.
- Toussaint, H., Bourgogne, A., Hébert, A., (2011). *Préservation de la ressource en eau : comment passer l'action ?* Guide pratique Agence de l'eau Seine-Normandie.
- Vaessen, V., Brentführer, R. (2015) .les risques liés à l'eau souterraine. Manuel de formation, AGW-Net, BGR, IWMI, Cap Net, RAOB, et IGRAC.