

**EPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE 20 AOUT 1955-SKIKDA**



**Faculté des Sciences  
Département des Sciences de la Nature et de la Vie**

**Cours : Qualité des eaux souterraines et de surfaces**

**Polycopié destiné aux étudiants de 2ème année Master  
Écologie des milieux naturels**

**Elaboré par : Dr. HADJOUJJA Nawel  
Maitre de Conférences « B »**

**Chef de département**

**Président du CSD**

**2022-2023**

## **Intitulé du Master : écologie des milieux naturels**

**Semestre : 3**

**Intitulé de l'UEM:**

**Intitulé de la matière 2: Qualité des eaux souterraines et de surface**

**Crédits : 4**

**Coefficients : 2**

**Objectifs de l'enseignement** (*Décrire ce que l'étudiant est censé avoir acquis comme compétences après le succès à cette matière – maximum 3 lignes*).

L'objectif est de connaître comment analyser et interpréter la qualité d'une ressource en eau superficielle et souterraine

**Connaissances préalables recommandées** (*descriptif succinct des connaissances requises pour pouvoir suivre cet enseignement – Maximum 2 lignes*).

Des connaissances de base en chimie

**Contenu de la matière** (*indiquer obligatoirement le contenu détaillé du programme en présentiel et du travail personnel*)

- Qualité des eaux superficielles
- Qualité des eaux souterraines
- Assurances qualité et contrôle de la qualité
- Impact environnemental

**Mode d'évaluation :** *Contrôle continu, examen, etc... (La pondération est laissée à l'appréciation de l'équipe de formation)*

Références sera faite aux textes des L.M.D. portant organisation sur les dites modalités. L'importance à accorder à chaque parcours est indéniablement liée à la spécialité et à l'importance des valeurs horaires dispensées.

**Autre :** Contrôle continu et Examen semestriel

# Sommaire

## Introduction

<b>CHAPITRE I. Qualité des eaux superficielles</b> .....	4
1.1 Les eaux de surfaces .....	4
Ce terme englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents. ....	4
• - Les eaux courantes : .....	5
• - Les eaux non courantes .....	5
1.1.1 Propriétés.....	5
1.2 Origine.....	5
1.3 Le rôle des eaux de surface dans le cycle de l'eau .....	6
1.3.1 Schéma du cycle de l'eau .....	6
1.3.2 L'hydrologie est impliquée dans le cycle de l'eau .....	7
1.3.3 Définitions des processus du cycle de l'eau .....	8
1.3.4 Le déplacement des particules dans les cours d'eau.....	10
1.4 Fonctionnement et utilité.....	10
1.5 Des caractéristiques variables suivant le climat, les saisons et l'environnement géologique ...	10
1.6 Caractéristiques générales .....	11
1.7 Potabilité des eaux de surface.....	12
1.7.1 Matières en suspension ou en substances dissoutes (TDS) .....	13
1.7.2 Débits saisonniers.....	13
1.8 Classifications et types d'eaux de surface.....	13
1.8.1 Types d'eaux de surface.....	13
1.8.2 Classifications d'eaux de surface .....	13
<b>CHAPITRE II. Qualité des eaux souterraines</b> .....	15
2.1 Une nappe d'eau souterraine .....	16
2.2 Une rivière souterraine .....	17
2.3 Origine.....	18
2.4 Caractéristiques générales .....	19
2.5 Potabilité : .....	19
2.6 Déplacement des eaux souterraines .....	19
2.7 Différences entre eaux souterraine et eau de surfaces .....	20
2.8 Qu'est – ce qu'une nappe ?.....	21
2.8.1 Type des nappes .....	21
2.8.1.1 Nappe libre .....	21
2.8.1.2 Nappe captive.....	21
2.8.1.3 Nappe semi captive .....	22
2.9 Qu'est-ce qu'un aquifère .....	23

2.9.1	Les différents modèles d'aquifères .....	26
2.9.1.1	Les aquifères a nappe libre .....	26
2.9.1.2	Les aquifères a nappe captive .....	26
2.9.1.3	Les aquifères a nappe semi captive .....	26
	Remarque :.....	26
2.9.2	Les différents types d'aquifères.....	26
2.9.2.1	Les aquifères poreux .....	26
2.9.2.2	Les aquifères fissurés .....	27
2.9.2.3	Les aquifères k arstiques .....	28
2.10	Ecoulement d'eau souterraine .....	28
2.11	La vitesse de recharge de l'aquifère de l'eau (Age d'eau) .....	28
	elle .....	28
2.12	Bassins versants.....	30
2.13	Les puits artésiens.....	31
2.14	Aquitard.....	33
2.15	Zone non saturée vs Zone saturée.....	34
2.15.1	Une zone saturée.....	34
2.15.2	Une zone non saturée.....	34
	le rôle des connexions souterraines en hydrologie .....	34
2.16	L'indice de captage efficace en hydrologie souterraine.....	35
2.17	Le débit durable.....	36
2.18	Perméabilité et Porosité.....	36
2.19	contexte hydrostratigraphique .....	38
2.20	Contextes hydrogéologiques .....	38
2.20.1	Séquences hydrostratigraphiques .....	38
2.20.2	Conditions de confinement.....	39
	<b>CHAPITRE III. Assurances qualité et contrôle de la qualité</b> .....	42
3.1	Matières présentes dans l'eau .....	42
3.1.1	Matières insolubles .....	43
3.1.1.1	Matières minérales solides .....	43
3.1.1.2	Matières organiques .....	43
3.1.1.3	Matières colloïdales en suspension .....	43
3.1.1.4	Matières vivantes .....	43
3.1.2	Matières gazeuses.....	44
3.1.3	Matières solubles :.....	44

* Matières minérales solides (voire 3.1.111.).....	44
* Matières organiques (voire 3.1.11.2.).....	44
3.2 Qualités des eaux de surface et souterraines .....	47
3.2.1 Qualité physico-chimique.....	47
3.2.1.1 Les paramètres physiques .....	48
3.2.1.1.1 Température .....	48
3.2.1.1.2 Turbidité .....	48
3.2.1.1.3 pH potentiel Hydrogène .....	49
3.2.1.1.4 La conductivité électrique .....	49
3.2.1.1.5 Couleur .....	50
3.2.1.1.6 Odeur .....	50
3.2.1.2 Les paramètres chimiques .....	50
3.2.1.2.1 Ions majeurs .....	50
3.2.1.2.2 Les éléments en trace .....	53
3.2.1.2.2.1 Le Fer .....	53
3.2.1.2.2.2 Nitrite .....	53
3.2.1.2.2.3 Manganèse .....	53
3.2.1.2.2.4 Arsenic .....	54
3.2.1.2.2.5 Zinc .....	54
3.2.1.2.2.6 Argent .....	54
3.2.1.2.2.7 Aluminium .....	54
3.2.1.2.2.8 Sulfure d'hydrogène .....	54
3.2.1.2.2.9 Le cuivre .....	54
3.2.1.2.2.10 Le fluor .....	54
3.2.1.2.3 Dureté .....	54
3.2.1.2.4 Oxygène dissous .....	55
3.2.1.2.5 Oxygène .....	55
3.2.1.2.6 DBO, DCO .....	55
3.2.1.3 Représentation graphique des résultats d'analyses .....	55
3.2.1.3.1 Le diagramme de Piper .....	55
3.2.1.3.2 Le diagramme de Scholler -Berkaloff .....	57
3.2.1.3.3 Le diagramme de STIFF .....	58
3.2.2 Qualité microbiologique des eaux souterraines.....	59
3.2.3 Les normes de la qualité des eaux .....	59
3.2.4 Substances chimiques dont la présence dans l'eau de boisson.....	60

3.2.5	Substance et paramètre de l'eau de boisson .....	61
3.2.6	Substances inorganiques.....	61
3.2.7	Eau destinée à l'irrigation.....	62
3.2.7.1	Conductivité .....	62
3.2.7.2	SAR .....	63
<b>CHAPITRE IV. Impact environnemental.....</b>		<b>66</b>
4.1	Géochimie de l'eau souterraine .....	66
4.1.1	Types d'eau souterraine.....	66
4.2	Qualité de l'eau de surface .....	67
4.2.1	Types d'eau de surface .....	68
4.3	L'interaction eau souterraine et eau de surface : .....	69
4.4	Nappe alluviale dans les vallées fluviales. ....	69
4.5	Comment la nappe souterraine peut interagir avec des rivières et ruisseaux ?.....	70
4.6	Recharge et décharge, alimentations et pertes dans un système hydrogéologique.....	72
4.6.1	Recharge par les précipitations.....	72
4.6.2	Relations entre eaux souterraines et eaux superficielles.....	73
4.6.3	Cours d'eau drainants et infiltrants.....	73
4.7	Comment l'eau souterraine peut-elle interagir avec les lacs ? .....	74
4.8	Comment les eaux souterraines peuvent-elles interagir avec les zones humides et autres écosystèmes liés aux nappes ?.....	76
4.9	Interactions eau souterraine - eau de surface, impacts anthropiques.....	78
4.10	Les eaux souterraines /de surfaces et l'environnement.....	78
4.10.1	Contamination des eaux souterraines .....	79
4.10.1.1	Urbanisation .....	80
4.10.1.2	Activité Industrielle .....	81
4.10.1.3	Exploitation minière .....	81
4.10.1.4	Exploitation agricole .....	82
4.10.1.4.1	Nutriments .....	83
4.10.1.4.2	Les pesticides .....	83
4.10.1.5	Les micro -organismes .....	83
4.11	Écosystèmes tributaires des eaux souterraines : .....	83
4.11.1	Activités constituant des menaces pour les écosystèmes tributaires des eaux souterraines	84
4.11.2	Les aspects environnementaux de la gestion des eaux souterraines.....	85
4.12	Vulnérabilité des eaux souterraines.....	87
4.12.1	Vulnérabilité à la pollution.....	87

4.12.1.1 Facteurs dont dépend la vulnérabilité des nappes .....	87
4.12.1.2 Meilleure protection .....	87
4.12.1.3 Origines principales de la pollution .....	87
4.12.1.4 Types de polluants .....	89
4.12.1.5 Epuration .....	89
4.12.1.5.1 Étapes du devenir des polluants .....	89
<b>Références Bibliographiques</b> .....	<b>91</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> :Cycle de l'eau.....	7
<b>Figure 2</b> :Cycle hydrologique.....	7
<b>Figure 3</b> :Nappe d'eau souterraine.....	18
<b>Figure 4</b> : Rivière souterraine.....	19
<b>Figure 5</b> : Type des nappes.....	23
<b>Figure 6</b> : Circulation des eaux souterraine.....	24
<b>Figure 7</b> : Un aquifère.....	25
<b>Figure 8</b> : Aquifère.....	25
<b>Figure9</b> : Type d'aquifère.....	26
<b>Figure10</b> : Aquifères en roche meuble.....	28
<b>Figure11</b> : Aquifère fissuré.....	28
<b>Figure 12</b> : Aquifère karstiques.....	29
<b>Figure 13</b> :Age d'eau et vitesse de recharge de l'aquifère.....	30
<b>Figure 14</b> :Bassins versants.....	31
<b>Figure 15</b> :Les différents puits .....	32
<b>Figure1 6</b> Aquitard.....	33
<b>Figure 17</b> : Sable (entre les grains).....	34
<b>Figure 18</b> :Roc (dans les fractures).....	34
<b>Figure 19</b> :Infiltration et âge de l'eau souterraine.....	34
<b>Figure20</b> : La recharge.....	35
<b>Figure21</b> : Zonalité d'un aquifère .....	36
<b>Figure 22</b> :Exemples pour des roches sédimentaires.....	38
<b>Figure 23</b> : Exemple de contexte hydrostratigraphique.....	39
<b>Figure 24</b> :Colonne stratigraphique.....	40
<b>Figure 25</b> : Confinement des aquifères.....	41
<b>Figure 26</b> :Confinement des aquifères(Cas particuliers ).....	42
<b>Figure 27</b> : Cycle de l'azote.....	52
<b>Figure 28</b> : Diagramme de Piper.....	56
<b>Figure 29</b> : Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF.....	57
<b>Figure 30</b> : Diagramme de STIFF.....	58
<b>Figure 31</b> : Diagramme de River Side.....	63

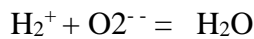
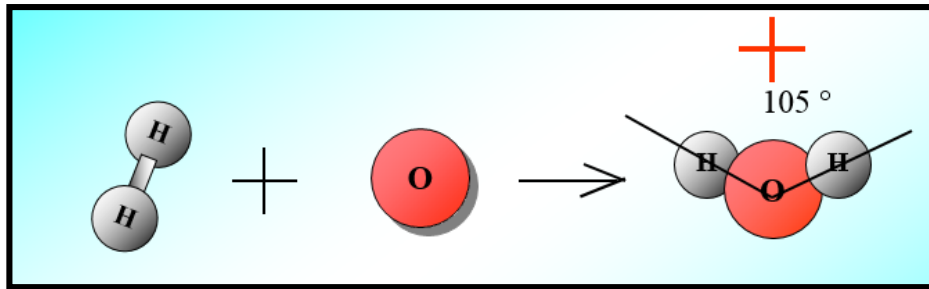
<b>Figure 32</b> : Evolution géochimique des eaux souterraines.....	67
<b>Figure 33</b> : L'eau souterraine dans les dépôts alluviaux de rivière.....	70
<b>Figure 34</b> : La rivière reçoit de l'eau de la nappe phréatique.....	71
<b>Figure 35</b> : Les rivières .....	71
<b>Figure 36</b> : Unerivière séparée de la nappe d'eau souterraine .....	72
<b>Figure 37</b> : Positions relatives du niveau de l'eau souterraine et du niveau de la rivière pour les cours d'eau drainants et les cours d'eau infiltrant.....	74
<b>Figure 38</b> : Interaction des lacs avec les nappes d'eau souterraine .....	75
<b>Figure 39</b> : Des exemples d'écosystèmes liés aux nappes et des régimes d'écoulement souterrain associé.....	77
<b>Figure 40</b> : Interactions eau de surface - eau souterraine.....	78
<b>Figure 41</b> : Évolution chimique des eaux souterraines.....	80
<b>Figure 42</b> : Des exemples d'écosystèmes tributaires des eaux souterraines .....	85
<b>Figure 43</b> : Origines de la pollution.....	88
<b>Figure 44</b> :Quelques scenarios de contamination des nappes.....	89
<b>Figure 45</b> :Étapes du devenir des polluants.....	90
<b>Figure 46</b> :Devenir de la pollution dans la zone non saturée.....	90
<b>Figure 47</b> :Devenir de la pollution dans la zone saturée.....	90

## Liste de tableau

<b>Tableau 1</b> : Répartition des réserves en eau de la planète.....	12
<b>Tableau 2</b> : Exemple des sels de calcium.....	45
<b>Tableau 3</b> : Exemple des sels de magnésium.....	45
<b>Tableau 4</b> : Exemple des sels de sodium.....	45
<b>Tableau 5</b> : Exemple des sels de fer.....	46
<b>Tableau 6</b> : Exemple Acides et bases.....	47
<b>Tableau 7</b> : Paramètres permettant de juger de la qualité d'une eau.....	47
<b>Tableau 8</b> : Quelques indications sur la relation existant entre la minéralisation et la conductivité.....	50
<b>Tableau 9</b> : Substances chimiques dont la présence dans l'eau de boisson revêt une importance sanitaire.....	60
<b>Tableau 10</b> : Paramètres physiques (organoleptiques).....	61
<b>Tableau 11</b> : Substances inorganiques.....	61
<b>Tableau 12</b> : Conductivité et eau d'irrigation.....	62
<b>Tableau 13</b> : Indice croisé SAR/Conductivité.....	64

## Introduction

L'eau est un composé chimique qui résulte de la combinaison de deux atomes d'hydrogène, et d'un atome d'oxygène pour former le bien connu « H<sub>2</sub>O ».



Les deux atomes d'hydrogène sont situés sous un angle de 105°.

Cela forme une molécule dissymétrique chargée positivement du côté de l'hydrogène, et négativement du côté de l'oxygène

C'est cette composition moléculaire de l'eau qui est à l'origine de ses propriétés spécifiques dont les principales sont :

Ses états physiques :

Solide, liquide, vapeur qui sont obtenus avec de faibles écarts de température.

Sa stabilité thermique :

L'énergie de formation de la molécule d'eau est très élevée (58 000 cal/mole) et sa température de décomposition se situe au-delà de 1 200 °C.

Sa capacité thermique :

Qui en fait le fluide idéal de chauffage et de refroidissement car à chaque variation de température l'eau cède ou absorbe de l'énergie thermique en quantité supérieure à la plupart des autres éléments. Son pouvoir solvant qui correspond à sa faculté de dissoudre la quasi-totalité des corps qu'elle rencontre (roche, fer...). On confère souvent à l'eau la dénomination de « solvant universel ».

En effet, peu d'éléments résistent à ce pouvoir et cette qualité est également un inconvénient majeur car, de ce fait, l'eau naturelle ne se présente que très rarement sous la forme H<sub>2</sub>O correspondant à l'eau pure.

Ainsi, les trois quarts de la surface terrestre sont recouverts par de l'eau, mais finalement, comme nous allons le voir, peu d'eau est vraiment pure.

## Répartition de l'eau



Océans et mers	97 %	$1,3 \cdot 10^9 \text{ km}^3$
Glaciers et calottes glaciaires	2,1 %	$29,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$
Eau douce et liquide	0,8 %	$8,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$

### Répartition de l'eau

#### Répartition de l'eau douce et liquide

Cours d'eau	$1\,250 \text{ km}^3$
Eau de surface	$65\,000 \text{ km}^3$
Eau souterraine en faible profondeur	$4\,000\,000 \text{ km}^3$
Eau souterraine en profondeur > 800m	$4\,000\,000 \text{ km}^3$
Eau atmosphérique	$12\,700 \text{ km}^3$

Les glaciers représentent la plus grande réserve en eau douce de la planète (tableau N°01).

Avec environ 23% des stocks, les eaux souterraines couvrent la quasi-totalité des volumes restants. Les rivières et les lacs ne représentent que 0,3% des stocks. Contrairement aux glaciers, les nappes constituent une réserve relativement disponible pour l'homme. Elles sont en outre souvent mieux protégées que les eaux de surface (rivières et lacs) et forment à ce titre une ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable (voir tableau 1).

Il y a une différence entre les eaux superficielles et les eaux souterraines, les eaux souterraines peuvent se présenter sous forme de vapeur d'eau ou de glace selon qu'elles jaillissent dans les sources ou dans les glaciers dans l'atmosphère.

En revanche, les eaux superficielles rassemblent toutes les eaux présentes sous forme liquide à la surface de la Terre.

L'ensemble des eaux souterraines et des eaux de surface forment l'hydrosphère terrestre.

Ce cours qui s'adresse aux étudiants de 2ème année Master écologie des milieux naturels s'articule en quatre chapitres :

- Qualité des eaux superficielles
- Qualité des eaux souterraines
- Assurances qualité et contrôle de la qualité
- Impact environnemental

## 1 CHAPITRE I. Qualité des eaux superficielles

### 1.1 Les eaux de surfaces

Ce terme englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents.

Une eau de surface précède qu'une eau, telle qu'issue d'un ruissellement, reste à la surface du sol et peut être stockée en étangs ou autres ouvrages de retenue. Elle résume la collecte de l'eau souterraine ou de l'eau atmosphérique. Par définition, les eaux de surface sont tirées des lacs, rivières, chutes d'eau et de la mer. Ces eaux superficielles jouent le plus grand rôle dans la formation de l'hydrosphère sur Terre.

L'eau de surface est de l'eau qui s'accumule sur le sol ou dans un cours d'eau, dans le lit d'une rivière, d'un lac, d'une zone humide, d'une mer ou d'un océan. Son degré de pollution est mesuré par la qualité de l'eau recueillie.

Les eaux superficielles qualifient toutes les eaux naturellement ouvertes sur l'atmosphère, y compris les fleuves, les rivières, les lacs, les réservoirs, les ruisseaux, les lacs de barrage, les mers, les estuaires, etc. Le terme s'applique également aux sources, aux puits et autres collecteurs d'eau qui subissent directement l'influence des eaux superficielles.

L'eau superficielle est toute l'eau sous forme liquide à la surface d'une planète. Elle contraste avec les eaux souterraines qui jaillissent dans les sources, l'eau et la vapeur d'eau sur les pôles et dans les glaciers sous forme de glace dans l'atmosphère. Ensemble, toutes ces formes d'eau forment l'hydrosphère terrestre.

se trouvant à la surface de la terre telle que les lacs, les rivières, les étangs ou les sources, elles tiennent une place essentielle, elle s'assure 80% de la source en eau potable et abrite une importante richesse faunistique et floristique, la faible longueur des cours d'eau a pour conséquence de limiter le pouvoir auto-épurateur des rivières et accentuer la pollution, pour qu'un écosystème aquatique puisse se développer de façon équilibrée il faut qu'il réponde à la fois à des critères écologiques de manière à ce que les espèces animales et végétales qui occupent naturellement ces milieux puissent y vivre. Les eaux de surface peuvent être réparties en deux (2) ensembles :

- - **Les eaux courantes** : se déplacent par écoulement sur le sol.
- - **Les eaux non courantes**: les lacs, les mers, des océans.

Parmi les eaux de surface, on peut citer :

- Les fleuves, les rivières, les lacs, les ruisseaux, les cours d'eau,
  - Les eaux de ruissellement (eaux de pluies),
  - Les réservoirs,
  - Les lacs de barrage,
  - Les mers et les océans,
  - Les eaux côtières,
- Les zones humides ou eaux de transitions, c'est-à-dire toutes les masses d'eau situées à proximité des embouchures de rivières ou de fleuves (estuaires, vasières, marais côtiers, lagunes, mares, bordures de lacs...).

### 1.1.1 Propriétés

Les eaux de surface sont celles qui se trouvent à la surface de la planète. Ceci est produit par le ruissellement généré par les précipitations ou l'affleurement des eaux souterraines. Ils peuvent survenir de manière rapide, comme dans le cas de ruisseaux, rivières et fleuves, ou plus lentement s'il s'agit de lacs, de plans d'eau, de réservoirs, de lagunes, de zones humides, d'estuaires, d'océans et de mers.

- Aux fins de la réglementation, une eau de surface est généralement définie comme toute eau ouverte à l'atmosphère et sujette au ruissellement. Une fois produite, l'eau de surface suit le chemin qui offre le moins de résistance. Une série de ruisseaux, ruisseaux et fleuves et rivières amènent l'eau des zones en pente vers un cours d'eau important.

Une zone de drainage est souvent appelée un bassin de drainage ou un bassin versant.

### 1.2 Origine

Elles ont pour origine, soit des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit les eaux de ruissellement. Ces eaux se rassemblent en cours d'eau, caractérisés par une vitesse de circulation appréciable. Elles peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (lacs) ou

artificielles (retenues de barrages) où peut apparaître une grande hétérogénéité de la qualité selon la profondeur.

### **1.3 Le rôle des eaux de surface dans le cycle de l'eau**

Les eaux superficielles peuvent être des eaux naturelles ou artificielles et des cours d'eau. Toutes participent (ou subissent) le cycle de l'eau. Les grandes eaux affectent la température et la météorologie localement. Plus la zone est large, plus le vent peut augmenter, mais des bandes plus étroites, comme des montagnes, peuvent constituer une barrière entre les fronts météorologiques.

Qu'elles soient naturelles ou artificielles, les eaux de surface participent activement au cycle de l'eau. Les grandes masses d'eau jouent un rôle sur la température et le climat local. Par exemple, plus la masse d'eau est importante (mer, océan) et plus le vent peut être fort. A l'inverse, les eaux superficielles de montagne, étant plus étroites, peuvent servir de barrière entre les fronts météorologiques.

Les eaux de surface contribuent à la vie de la faune et de la flore environnante, puis finissent par s'évaporer ou rejoindre par ruissellement les eaux souterraines favorisant ainsi la recharge des nappes phréatiques.

Le cycle de l'eau biogéochimique, ou cycle hydrologique, concerne les actions de l'eau H<sub>2</sub>O au-dessus et en dessous de la surface de la Terre, toutes les interactions en mouvement continu de la masse d'eau, tant en aérien, terrestre que souterrain ou sous-marin. C'est en raison de la présence sur toute la surface du globe que la Terre est appelée "planète bleue", lorsqu'elle est vue à partir de l'espace. La terre a une quantité limitée d'eau, tout le temps recyclée, et étudiée en hydrologie.

#### **1.3.1 Schéma du cycle de l'eau**

Le cycle de l'eau regroupe plusieurs phénomènes physiques comme les précipitations, l'écoulement, le ruissellement, l'infiltration, la fonte des glaces, l'évapotranspiration avec l'évaporation et la transpiration, la condensation et les mouvements des masses d'eaux, tant en surface qu'en souterrain ou sous-marin. Le "cycle eau" est étudié en hydrologie et en hydrogéologie. Le cycle hydrologique est dynamique, mais en moyenne, 65 % des précipitations s'évaporent, 24 % ruissellent et 11 % s'infiltrent.



Figure 1 : Cycle de l'eau

### 1.3.2 L'hydrologie est impliquée dans le cycle de l'eau

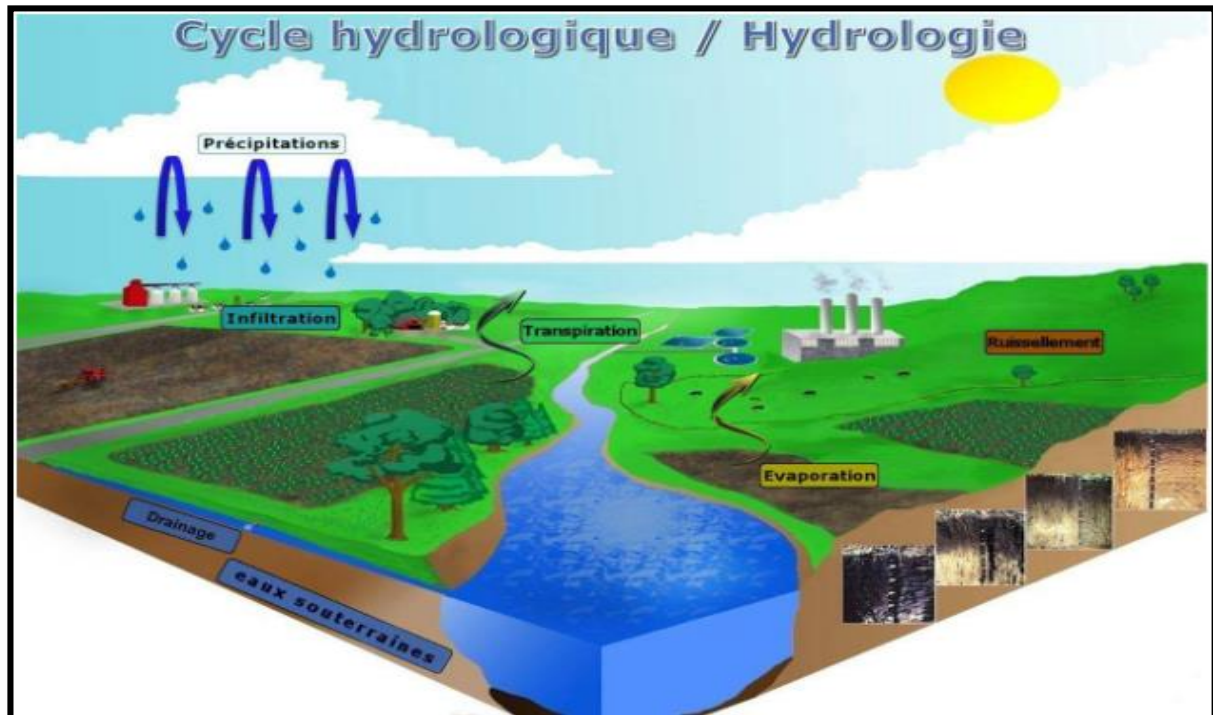


Figure 2 : Cycle hydrologique.

Le cycle de l'eau implique des échanges énergétique, énergie principalement amenée par le soleil, ce qui conduit à des changements de température des masses d'eau : fonte des glaciers ou leur formation... Par exemple, lorsque de l'eau est évaporée, il faut de l'énergie de son environnement ce qui conduit à un refroidissement du-dit environnement. Quand de l'eau se condense, cela libère de l'énergie et réchauffe l'environnement. Ces échanges de chaleur influencent le climat.

La phase d'évaporation du cycle eau purifie l'eau qui régénère alors le terrain avec de l'eau douce. Le débit de l'eau liquide et la fonte des glaces transporte des minéraux à travers le monde. Le cycle hydrologique est également impliqué dans le remodelage les caractéristiques géologiques de la Terre, à travers des processus incluant l'érosion et la sédimentation. Le cycle de l'eau est également essentiel pour le maintien de la plupart la vie et les écosystèmes de la planète, quasiment aucune vie n'est possible sur Terre sans l'eau.

### 1.3.3 Définitions des processus du cycle de l'eau

- Par précipitation : la vapeur d'eau est condensée puis tombe à la surface de la Terre. La plupart des précipitations sont produites par la pluie, mais également avec la neige, la grêle, le brouillard (goutte à goutte), le grésil et la neige fondue. Environ 505 000 km<sup>3</sup> d'eau tombe sous forme de précipitations chaque année, dont 398 000 km<sup>3</sup> au-dessus des océans. La pluie continentale sur terre contient 107 000 km<sup>3</sup> d'eau par an et un enneigement de seulement 1000 km<sup>3</sup>. 78 % des précipitations mondiales sont concentrées sur l'océan Mondial.
- Par interception de la canopées : la précipitation qui est interceptée par le feuillage des plantes, s'évapore éventuellement dans l'atmosphère plutôt que de tomber au sol.
- Par fonte des neiges : le ruissellement produit par la fonte des neiges.
- Par les eaux de ruissellement : la variété des moyens par lesquels l'eau se déplace à travers le sol. Cela inclut à la fois les eaux de ruissellement et les eaux canalisées, mais seulement pour les eaux continentales. Comme elle coule, l'eau peut infiltrer le sol, s'évaporer dans l'air, être stockée dans les lacs ou autres réservoirs hydrologiques, ou être extraite pour des utilisations humaines agricoles ou autres.
- Par infiltration : l'écoulement de l'eau à partir de la surface du sol dans le sol, généralement au travers de trous (fissures des sols et roches). Une fois infiltrée, l'eau devient l'humidité du sol ou des eaux souterraines.
- Par percolation : l'eau migre de la surface du sol dans le sol à travers les substrats mous.

- Par écoulement souterrain : l'écoulement des eaux souterraines, dans la zone non saturée et des aquifères. L'eau souterraine peut revenir à la surface (par exemple, comme un ressort ou en étant pompée) ou éventuellement infiltrer les océans. L'eau retourne à la surface de la terre à une altitude inférieure à celle où elle s'est infiltrés, sous la force de gravité ou de gravité induite par pression (pression hydrostatique). Les eaux souterraines ont tendance à se déplacer lentement, et se reconstituent lentement, de sorte que l'eau souterraine peut rester dans les aquifères des milliers d'années.
- Par évaporation : la transformation de l'eau de la phase liquide à une phase gazeuse lors de son déplacement par rapport au sol ou les masses d'eau dans l'atmosphère sus-jacente. La source d'énergie pour l'évaporation est essentiellement le rayonnement solaire. L'évaporation inclut implicitement la transpiration de plantes, mais tous les processus d'évapotranspiration sont spécifiquement désignés comme l'évapotranspiration. L'évapotranspiration annuelle totale représente environ 505 000 km<sup>3</sup> d'eau, dont 434 000 km<sup>3</sup> qui s'évaporent des océans. 86 % de l'évaporation mondiale se produit à partir de l'océan mondial.
- Par sublimation : le changement d'état directement de l'eau solide (neige ou glace) à la vapeur d'eau.
- Par déposition : ceci fait référence à l'évolution de la vapeur d'eau directement à la glace.
- Par advection : le mouvement de l'eau, à l'état solide, liquide ou vapeur (sous ses divers états) vers l'atmosphère. Sans advection, les eaux qui se sont évaporées des océans ne pourrait pas précipiter sur la terre.
- Par condensation : la transformation de la vapeur d'eau en gouttelettes d'eau liquide dans l'air, créant les nuages et le brouillard.
- Par transpiration : la libération de vapeur d'eau des plantes terrestres et du sol dans l'air. La transpiration est le processus par lequel les plantes perdent de l'eau au niveau de leurs feuilles, au cours de la photosynthèse. La vapeur d'eau est un gaz qui ne peut être vu. La transpiration est ainsi une faible partie de l'évaporation.
- Par filtration : l'eau circule verticalement à travers le sol et les roches sous l'influence de la pesanteur.
- Par tectonique, la tectonique des plaques : l'eau pénètre dans le manteau par subduction de la croûte océanique. L'eau remonte à la surface par l'intermédiaire des volcans.

### 1.3.4 Le déplacement des particules dans les cours d'eau

une fois la surface du sol, l'eau provenant des précipitations ou l'eau de fonte peut soit ruisseler à la surface du sol et gagner des étendus d'eau (lac, cour d'eau) soit s'infiltrer dans le sol et être absorbé par les végétaux ou survivre à alimenté les réserves d'eau souterraines, elle peut aussi s'évaporer de la surface du sol ou des étendues d'eau, ou bien être libéré par la transpiration des végétaux et être relâché dans l'atmosphère, le cumul de l'évaporation et de la transpiration et on appelle évapotranspiration, le cycle est complet quand l'eau présente sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère, retombe dans le sol sous forme de précipitation. L'eau souterraine et l'eau qui s'infiltrer dans le sol est traverser les matériaux qui constitue le sous sol, l'eau court dans une source ou dans cours d'eau, elle est alors évacuer vers la surface et fait désormais partie des eaux de surface.

### 1.4 Fonctionnement et utilité

La masse d'eau terrestre provient principalement de la glace, l'eau douce continentale, l'eau salée et l'eau atmosphérique, mais ces eaux sont variables en fonction d'un large éventail de variables climatiques. L'eau se déplace d'un réservoir à un autre, comme de la rivière à l'océan, ou de l'océan à l'atmosphère, par divers processus physiques. Ce faisant, l'eau passe par différentes phases : liquide, solide (glace) et gaz (vapeur). Lorsque l'eau retombe sur terre sous forme de précipitations, elle peut retomber dans les océans, les lacs ou les rivières ou elle peut se retrouver sur la terre. Quand elle finit sur la terre, elle va détremper les sols et, éventuellement, faire partie de la nappe phréatique.

Le "cycle eau" est étudié en hydrologie et en hydrogéologie. Le cycle hydrologique est dynamique, mais en moyenne, 65 % des précipitations s'évaporent, 24 % ruissellent et 11 % s'infiltrent.

### 1.5 Des caractéristiques variables suivant le climat, les saisons et l'environnement géologique

Les eaux de surface contiennent souvent beaucoup de matières naturelles en suspension ainsi que des substances dissoutes qui varient selon la pluviométrie et la qualité géologique des reliefs qui l'entourent.

En effet, la composition minérale des eaux de surface varie :

- Suivant le terrain sur lequel elles évoluent,
- La pluviométrie,
- Les rejets polluants provenant des activités humaines

La plupart des eaux de surface sont naturellement riches en oxygène et pauvres en dioxyde de carbone.

Les matières en suspension et en solution peuvent contenir des effluents polluants qui empêchent l'utilisation des eaux de surface à l'état brut à des fins domestiques ou industrielles. C'est ainsi qu'elles doivent subir des traitements de potabilisation avant d'être utilisée pour toute activité humaine (agricole, industrielle, domestique). Si leur qualité est véritablement trop dégradée, elles sont écartées de toute utilisation.

### **1.6 Caractéristiques générales**

La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains rencontrés durant leur parcours. Au cours de son cheminement, l'eau dissout les différents éléments constitutifs des terrains. En revanche, sa teneur en gaz dissous (oxygène, azote, gaz carbonique) dépend des échanges à l'interface eau- atmosphère et de l'activité métabolique des organismes aquatiques au sein de l'eau. Le tableau 1 donne les éléments caractéristiques des eaux de surface par rapport aux eaux souterraines. Il faut noter :

- la présence de gaz dissous, en particulier l'oxygène ;
- une concentration importante en matières en suspension, tout au moins pour les eaux courantes. Ces matières en suspension sont très diverses, allant des particules colloïdales aux éléments figurés entraînés par les rivières en cas d'augmentation importante du débit. Dans le cas des eaux de barrage, le temps de séjour provoque une décantation naturelle des éléments les plus grossiers : la turbidité résiduelle est alors faible et colloïdale ;
- la présence de matières organiques d'origine naturelle provenant du métabolisme, puis de la décomposition post mortem des organismes végétaux ou animaux vivant à la surface du bassin versant ou dans la rivière ;
- la présence de plancton : les eaux de surface sont parfois le siège d'un développement important de phytoplancton (algues...) et de zooplancton, surtout dans les cas d'eutrophisation (voir pollution et eutrophisation). Certains de ces organismes peuvent sécréter des produits sapides et odorants ou des toxines ;
- des variations journalières (différence de température, d'ensoleillement) ou saisonnières : variations climatiques (température, précipitations, fonte des neiges), de végétation (chute des feuilles). Elles peuvent être aléatoires : pluies soudaines, orages, pollutions accidentelles.

**Tableau 1** : Répartition des réserves en eau de la planète

	Stock (km3)	% du total	% du totale eau douce
Océans	1 350 000 000	97,41	-
Glaciers	27 500 000	1,984	76,632
Eaux souterraines	8 200 000	0,592	22,8503
Mers intérieures	105 000	0,00758	-
Lacs d'eau douce	100 000	0,00722	0,2787
Sols	70 000	0,00505	0,195
Air	13 000	0,00094	0,0362
Rivières	1 700	0,00012	0,0047
Biosphère	1 100	0,00008	0,0031

Dans les retenues d'eau de surface, la qualité de l'eau varie de la surface jusqu'au fond de la retenue (température, pH, O<sub>2</sub>, Fe, Mn, oxydabilité, plancton). Le profil de ces paramètres varie lui-même en fonction des périodes de stratification ou de circulation des couches d'eau suivant les saisons.

### 1.7 Potabilité des eaux de surface

Les eaux de surface sont rarement potables sans aucun traitement et sont toujours plus ou moins polluées par divers rejets :

- d'origine urbaine : les rejets provenant de la collecte des ERU, même après leur traitement en station d'épuration ;
- d'origine industrielle : polluants et micropolluants organiques (hydrocarbures, solvants, produits de synthèse, phénols) ou inorganiques (métaux lourds, ammoniacque, produits toxiques),
- d'origine agricole : engrais et produits pesticides (herbicides, insecticides, fongicides), entraînés par les eaux de pluie et le ruissellement ; dans les zones d'élevage intensif, rejets riches en composés de l'azote et du phosphore ainsi qu'en pollution organique,
- pollution bactériologique d'origines humaine et animale.

### 1.7.1 Matières en suspension ou en substances dissoutes (TDS)

Les eaux superficielles sont souvent riches en matières en suspension ou en substances dissoutes (TDS). Étant donné que les charges en suspension et en solution peuvent contenir des polluants, les eaux superficielles ne peuvent en principe être utilisées à des fins industrielles qu'après un traitement en tant qu'eau potable ou eau industrielle.

### 1.7.2 Débits saisonniers

La qualité de l'eau est fortement influencée par la pointe du bassin dans laquelle elle est détournée pour son utilisation. La qualité des ruisseaux, des rivières et des ruisseaux varie en fonction des débits saisonniers et peut changer considérablement en raison des précipitations et des déversements accidentels. Les lacs, les réservoirs, les réservoirs et les lagunes contiennent en général moins de sédiments que les rivières, mais sont soumis à des impacts plus importants du point de vue de l'activité microbiologique. Des masses d'eau, telles que des lacs et des réservoirs, vieillissent pendant une période relativement longue en raison de processus naturels. Ce processus de vieillissement est influencé par l'activité microbiologique qui est directement liée aux niveaux de nutriments dans le corps de l'eau et peut être accélérée par l'activité humaine.

Les utilisations des eaux de surface non salines sont reconstituées par les précipitations et par le recrutement dans les eaux souterraines. Il est perdu par évaporation, infiltration dans le sol où il devient une eau souterraine, utilisé par les plantes pour la transpiration, extrait par l'homme pour l'agriculture, la vie humaine, l'industrie, etc. ou rejeté dans la mer où il devient salin.

## 1.8 Classifications et types d'eaux de surface

### 1.8.1 Types d'eaux de surface

Trois types principaux d'eaux de surface peuvent être distingués :

- les eaux lotiques : sont les masses d'eau qui vont toujours dans le même sens que les rivières, les sources, les ruisseaux et autres cours d'eau. Si les débits d'eau sont puissants avec un courant fort, les eaux sont rhéophiles (rapides).
- les eaux lenticques : appartiennent aux eaux intérieurs calmes ou stagnantes, des eaux continentales, tels que lacs, lagunes, étangs, zones humides et marécages.
- les eaux artificielles : qui définit les masses d'eau de surface qui n'ont pas été modifiées par des actions anthropiques.

### 1.8.2 Classifications d'eaux de surface

Les eaux de surface peuvent être classées comme artificielles (masse d'eau de surface créée par l'activité humaine) ou hautement modifiées (masse d'eau de surface qui, à la suite de modifications physiques produites par l'activité humaine, a subi une modification substantielle dans sa nature).

Dans ces cas, les eaux superficielles interviennent dans les cas suivants :

- Il y a eu des changements importants dans les caractéristiques hydromorphologiques de la masse d'eau. Cela intervient lors de travaux de construction destinés à la navigation, d'installations portuaires ou de loisirs, d'alimentation en eau potable, de production d'énergie ou d'irrigation, de régulation de l'eau, de protection contre les inondations, de drainage des sols ou d'autres activités économiques.
- Les avantages découlant des caractéristiques artificielles ou modifiées de la masse d'eau ne peuvent pas être raisonnablement obtenus, en raison des possibilités techniques ou des coûts disproportionnés pour les atteindre, dans le respect de la présence environnementale de la région. Il conviendrait d'étudier d'autres solutions de remplacement pour l'utilisation des ressources en eau, qui constituent une option plus respectueuse de l'environnement.

Les eaux utiles sont des eaux de surface ou des eaux souterraines constituant une ressource utilisable. Ce sont des eaux douces.

La catégorisation des masses d'eau de surface a pour but de faciliter la gestion de chacune d'elles. L'une des premières étapes de la caractérisation de chaque bassin hydrographique est la différenciation des masses d'eau de surface en catégories (y compris en tenant compte de la colonne d'eau).

Un critère de classification très important pour les cours d'eau est celui qui établit les conditions d'utilisation de chacune des rivières ou des cours d'eau afin de prévenir la contamination des cours d'eau. Ces réglementations peuvent varier d'un pays à l'autre et sont formellement établies par des réglementations légales.

Pour chacune des classes, des limites maximales sont établies, auxquelles une série de paramètres s'applique.

## 2 CHAPITRE II. Qualité des eaux souterraines

Les eaux souterraines représentent une fraction significative de la masse d'eau présente sur les continents, et sont logées dans des aquifères sous la surface de la Terre. Le volume d'eau souterraine est beaucoup plus important que la masse d'eau retenue dans les lacs ou en circulation. Une eau souterraine occupe la zone de saturation, de l'eau douce située sous la surface de la terre dans les espaces des sols poreux et dans les fractures de formations rocheuses. Une unité de stockage en roches ou un dépôt meuble est appelé un aquifère quand il peut produire une quantité d'eau utilisable.

La profondeur à laquelle les pores du sol ou des fractures et des cavités dans la roche deviennent complètement saturées d'eau est appelée la nappe phréatique. Dans un sens étroit, l'expression ne s'applique qu'à l'eau se trouvant en dessous du niveau hydrostatique. L'eau thermale est une eau souterraine étudiée en phréatobiologie. D'autres eaux naturelles souterraines sont étudiées en hydrologie, hydrochimie et hydrogéologie.

Bien que inférieure aux plus grands glaciers, les masses d'eaux souterraines les plus étendues peuvent atteindre un million de kilomètres carrés ou plus (comme l'aquifère Guarani en Amérique du Sud). L'eau souterraine est une ressource importante qui est fournie à un tiers de la population mondiale mais difficile à gérer en raison de sa sensibilité à la pollution et à la surexploitation. Les eaux souterraines font partie des précipitations qui filtrent à travers le sol pour atteindre le matériau rocheux qui est saturé d'eau. Les eaux souterraines se déplacent lentement vers de faibles niveaux, généralement à des angles raides (en raison de la gravité) et atteignent éventuellement les cours d'eau, les lacs et les océans.

C'est une croyance commune que l'eau souterraine remplit les cavités et circule à travers les galeries. Cependant, ce n'est pas toujours le cas, car il peut être trouvé en occupant les interstices (pores et fissures) du sol, le substrat rocheux ou les sédiments non consolidés, qui le contiennent comme une éponge. La seule exception significative est offerte par les roches solubles, telles que le calcaire et le gypse, susceptibles de subir le processus appelé karstification, dans lequel l'eau creuse des grottes, des gouffres et d'autres voies de circulation, modèle qui convient le mieux aux croyances populaires.

L'eau souterraine rechargée finit par s'écouler de la surface naturellement. La décharge naturelle intervient souvent au printemps par suintements, et les eaux souterraines peuvent former des oasis ou les zones humides. Les eaux souterraines sont souvent retirées des milieux agricoles, urbains et industriels lors de la construction de bâtiments et l'exploitation se fait par extraction via

des puits. L'étude hydrologique de la répartition et le mouvement des eaux souterraines est l'hydrogéologie.

En règle générale, les eaux souterraines sont considérées comme de l'eau liquide s'écoulant à travers les aquifères peu profonds, mais techniquement, elles peuvent aussi inclure l'humidité du sol, le pergélisol (sol gelé), l'eau immobile dans une très faible perméabilité du substrat rocheux, et l'eau géothermique profonde ou la formation du pétrole. L'eau souterraine est supposée fournir la lubrification qui peut éventuellement influencer le mouvement des défauts des sols.

### **2.1 Une nappe d'eau souterraine**

Une nappe d'eau souterraine est une eau contenue dans des interstices, des fissures et des fractures en communication les uns avec les autres. Cette eau souterraine est localisée dans un aquifère, situé au-dessus d'une couche de terrain imperméable. Une nappe d'eau souterraine se caractérise par son niveau supérieur ou son niveau piézométrique.

En fonction de sa position, on distingue les nappes libres ou nappes phréatiques où le niveau piézométrique se situe dans l'aquifère et des eaux captives, situées entre deux couches de terrains imperméables, dont le niveau piézométrique est situé au dessus de l'aquifère.

Illustration schématique d'une nappe d'eau souterraine montrant la gamme de récepteurs à prendre en compte, avec l'approvisionnement en eau potable, écosystème terrestre dépendant des eaux souterraines, cours d'eau dépendant des eaux souterraines. typologie de base de l'approvisionnement en eau pour les écosystèmes terrestres dépendant des eaux souterraines, basée sur le cadre géohydrologique et le degré de variabilité du niveau des eaux souterraines.

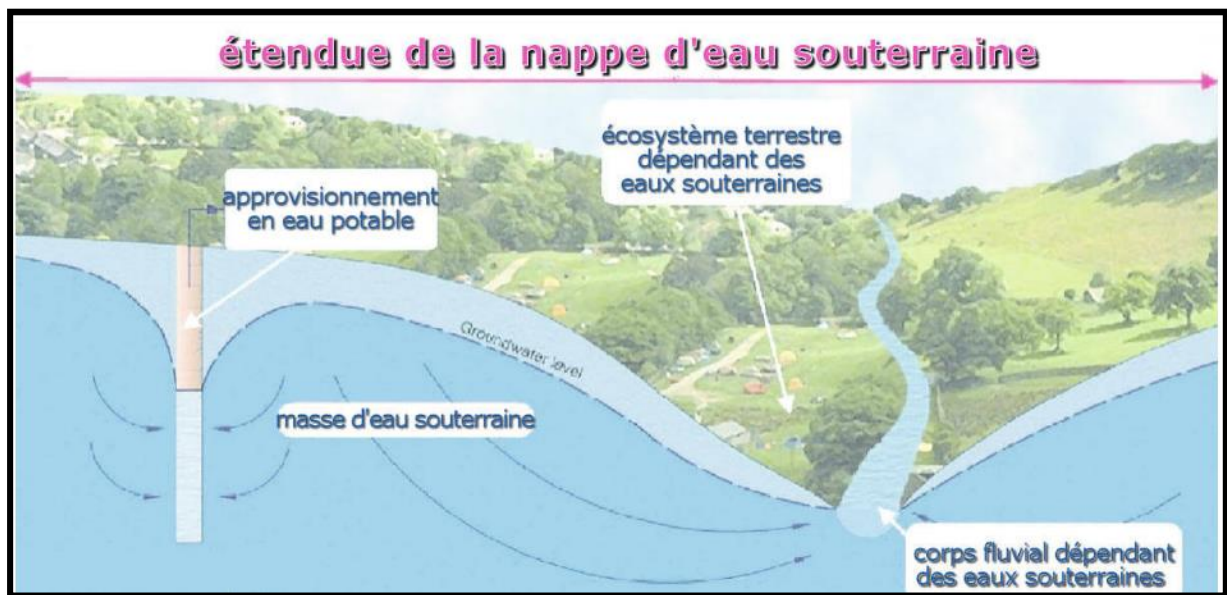


Figure 3 : Nappe d'eau souterraine

## 2.2 Une rivière souterraine

Une rivière souterraine est un cours d'eau à eau souterraine passant à travers une très grande cavité telle qu'une grotte, une caverne ou un ensemble de grandes cavités ou fissures communicantes. Les canaux d'écoulement sont connus et définis. La rivière souterraine est une des formes de cours d'eau souterrain.

Une rivière souterraine est une rivière qui coule sous la surface du sol. Ces cours d'eau peuvent être soit entièrement naturels, soit résulter de l'implantation délibérée de galeries qui canalisent le cours d'eau de la surface au sous-sol, généralement dans le cadre de l'aménagement urbain.

Cette rivière souterraine est formée par les travertins souterrains de calcium de la grotte de Kaklik à Pamukkale en Turquie.



**Figure 4 :** Rivière souterraine

### 2.3 Origine

Les nappes sont contenues dans des terrains réservoirs appelés aquifères.

La porosité et la structure du terrain déterminent le type de nappe et le mode de circulation souterraine.

Une nappe peut être libre (ou phréatique si elle est suffisamment proche de la surface pour être accessible par puits). Elle est alors alimentée directement par l'infiltration des eaux de pluie. Le niveau de cette nappe fluctue en fonction de la quantité d'eau retenue.

Un cas particulier est représenté par les nappes alluviales dans les terrains alluvionnaires sur lesquels circule un cours d'eau. La qualité de ces eaux est alors directement influencée par la qualité de l'eau de la rivière.

Une nappe peut être captive si elle est emprisonnée entre deux couches de terrains imperméables ; les nappes de ce type sont les plus fréquentes et généralement les plus profondes ; il y règne une certaine pression : leur niveau piézométrique se situe généralement entre leur toit imperméable et la surface du sol ; elles sont dites artésiennes quand ce niveau se situe au-dessus de la surface du sol (d'où un jaillissement de l'eau lors d'un forage).

L'eau peut soit imprégner la totalité de la couche géologique considérée : c'est le cas des terrains poreux tels que sables, grès, alluvions, soit s'établir seulement dans des fissures ou fractures de roches compactes : c'est le cas des roches éruptives ou métamorphiques et des terrains calcaires ;

dans ces derniers, les fissures originelles ont été progressivement élargies par dissolution dans l'eau chargée de gaz carbonique qui y circule ; on aboutit à des cavernes importantes, avec parfois formation de réseaux parcourus par de vrais cours d'eau souterrains ; c'est la structure karstique.

#### **2.4 Caractéristiques générales**

La nature géologique du terrain a une influence déterminante sur la composition chimique de l'eau retenue. À tout instant, l'eau est en contact avec le sol dans lequel elle stagne ou circule : il s'établit un équilibre entre la composition du terrain et celle de l'eau. Les eaux circulant dans un sous-sol sablonneux ou granitique sont acides et peu minéralisées. Les eaux circulant dans des sols calcaires sont bicarbonatées calciques et présentent souvent une dureté élevée.

Le tableau 1 donne les caractéristiques des eaux souterraines selon les principaux paramètres analytiques. On notera en particulier une bonne pureté bactériologique, une faible turbidité, une température et une composition chimique constantes, l'absence presque générale d'oxygène provoquant la présence d'éléments réduits indésirables.

Dans le cas des eaux karstiques, on peut cependant relever des variations brutales de qualité, avec apparition de turbidité et de pollutions diverses. Ces variations sont liées à la pluviométrie et aux ruissellements entraînés sans réelle filtration dans le réseau souterrain.

#### **2.5 Potabilité :**

Les eaux souterraines ont, pendant longtemps, été synonymes « d'eaux propres » répondant naturellement aux normes de potabilité. Ces eaux sont en effet moins sensibles aux pollutions accidentelles.

Néanmoins, de nombreuses nappes sont « influencées » par la qualité des eaux de surface, c'est le cas déjà vu des réseaux karstiques, mais aussi des nappes alluviales.

Lorsqu'une nappe souterraine a été polluée, il est très difficile de récupérer sa pureté originelle : les polluants ayant contaminé la nappe sont en effet non seulement présents dans l'eau, mais également adsorbés sur les roches et minéraux du sous-sol.

Les eaux souterraines peuvent aussi contenir des éléments à des concentrations dépassant largement les normes de potabilité. Ceci est dû à la composition du terrain de stockage et, pour certains de ces éléments, au caractère réducteur de l'eau. On peut citer Fe, Mn, NH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S...

Les eaux souterraines doivent être traitées avant distribution toutes les fois que la concentration d'un ou plusieurs de ces éléments dépasse la valeur autorisée par les règlements en vigueur.

#### **2.6 Déplacement des eaux souterraines**

Une fois dans le sol l'eau s'infiltre et se déplace dans les matériaux qui composent les sous-sols, près de la surface du sol on trouve différents types de roches dont le granite, argile, calcaire.

Dans bien des régions le substrat rocheuse est recouvert des dépôts de sédiment (par le vent, l'eau

de neige, dont l'argile, sable, gravier). On appelle formation une couche rocheuse ou sédimentaire qui est constituée de type matériaux géologique (un ou plusieurs) cette formation elle renferme des pores, la porosité s'étend de volume de l'espace poral totale du sol, elle s'exprime en pourcentage, plus grand et la porosité d'une formation plus grand et le volume d'eau que cette formation est amené à retenir

**Exemple :** la porosité de la formation du sable et de gravier elle peut atteindre 25%\_50% tandis que celle de certains substrats rocheux très denses, elle peut être inférieure à 0,1 %. Donc la porosité varie selon la formation, plus grande et la porosité plus grande et la qualité d'eau que la formation peut contenir, la vitesse à laquelle l'eau se déplace à l'intérieur d'une formation dépend de la porosité de cette formation et surtout de la façon dans les pores communiqués entre eux, ainsi l'eau se déplace rapidement dans les formations constituées de matériaux dont les pores sont gros, nombreux, interalliés comme le gravier, les roches fracturées, par contre l'eau se déplace lentement dans l'argile et d'autres formations constituées de matériaux possédant de petites pores qui ne communiquent pas entre eux. Les formations qui laissent l'eau s'écouler facilement et rapidement comme celle qui sont constituées de dépôts de gravier, de sable sont hautement perméables, à l'inverse les formations constituées d'argile et autres roches non fracturées le sont beaucoup moins. Près de la surface du sol,

Les pores sont remplis d'un mélange d'air et d'eau, l'espace poral est alors dit non saturé, plus profondément dans les sols les pores sont remplis d'eau est alors dit saturé.

### 2.7 Différences entre eaux souterraines et eau de surfaces

Contrairement aux eaux de surface confinées à quelques canaux (les cours d'eau) et dépressions (les lacs), l'eau souterraine est omniprésente dans le sous-sol. Elle y remplit les interstices entre les particules du sol ou encore les crevasses et les fissures du roc. La formation de nappes d'eau souterraines ou « nappes phréatiques » résulte de l'accumulation d'eau infiltrée depuis la surface du sol suite, par exemple, à un épisode de pluie(1).

On entend par « eau souterraine » l'eau qui se trouve sous le niveau du sol et qui remplit soit les fractures du socle rocheux, soit les pores présents dans les milieux granulaires tels les sables et les graviers. Contrairement à l'eau de surface, l'eau souterraine n'est pas canalisée comme un ruisseau ou une rivière, mais elle circule en profondeur dans les formations géologiques qui constituent l'espace souterrain. L'eau souterraine est une composante importante du cycle hydrologique ; l'eau provenant des précipitations s'infiltré dans le sol, circule verticalement jusqu'à la zone de saturation (nappe phréatique) et se déplace vers la zone naturelle de résurgence (les cours d'eau) située en aval.

Dans le milieu poreux, on considère deux types d'eau :

- l'eau de gravité, entraînée par la pesanteur, circule dans les pores grossiers et moyens.

Elle représente la fraction mobile dans le sol et contribue aux transferts de matière en solution et en suspension.

- l'eau de rétention immobilisée au cours de l'infiltration par les pores fins et très fins. Il est alors possible de considérer l'eau absorbée par la roche qui est retenue très énergiquement et n'est pas disponible pour les racines, et L'étude de l'écoulement en milieu poreux a fait l'objet de nombreux travaux .

## 2.8 Qu'est – ce qu'une nappe ?

La nappe chemine en sous-sol sur la couche imperméable, en suivant les pentes, parfois pendant des dizaines voire des centaines de kilomètres, avant de ressortir à l'air libre, alimentant une source ou un cours d'eau. Les nappes souterraines fournissent ainsi presque le tiers du débit total de tous les cours d'eau de la planète, soit environ 12 000 kilomètres cubes d'eau par an.

### 2.8.1 Type des nappes

#### 2.8.1.1 *Nappe libre*

Les nappes d'eaux souterraines peuvent être de deux types selon qu'elles circulent sous une couche perméable ou non. Les nappes situées sous un sol perméable sont dites libres. Au-dessus de la nappe en effet, les pores du terrain perméable ne sont que partiellement remplis d'eau, le sol n'est pas saturé, et les eaux de pluie peuvent toujours l'imprégner davantage. Aussi, le niveau de la nappe peut-il monter ou baisser à son aise. De telles nappes peuvent donc contenir des volumes d'eau variables.

#### 2.8.1.2 *Nappe captive*

Sont comprises entre deux couches géologiques imperméables qui confinent l'eau sous pression. Celle-ci peut jaillir dans des forages dits artésiens.

Les nappes captives sont souvent profondes de quelques centaines de mètres voire plus. Elles se renouvellent plus lentement. Leur alimentation provient pour partie de la zone affleurant de l'aquifère (2) et elles bénéficient d'une protection naturelle, représentée par la formation

géologique imperméable sus-jacente. Elles sont de ce fait peu vulnérables aux pollutions de surface.

Une nappe est dite captive si elle est surmontée par une formation peu perméable et si la charge hydraulique de l'eau qu'elle contient est supérieure au toit de la nappe.

### 2.8.1.3 Nappe semi captive

Le toit ou le substratum (ou de les deux) de la nappe sont souvent constitués par une formation hydrogéologique semi-perméable. Celle-ci permet, dans certaines conditions hydrodynamiques favorables (différence de charge) des échanges d'eau (ou de pression) avec la nappe superposée ou sous-jacente appelé drainante. Ce phénomène implique une nappe semi captive.

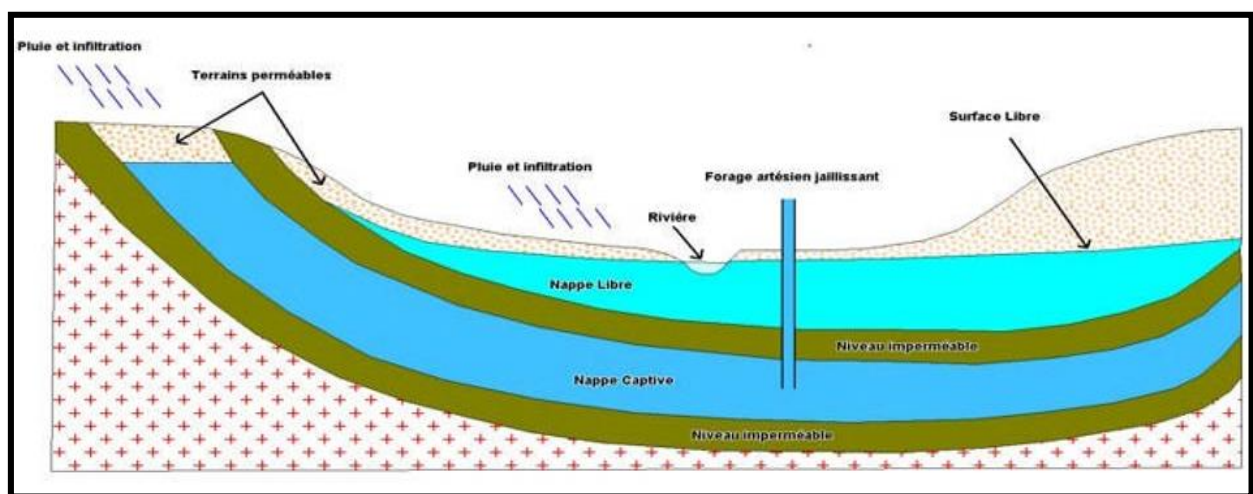


Figure 5: Type des nappes

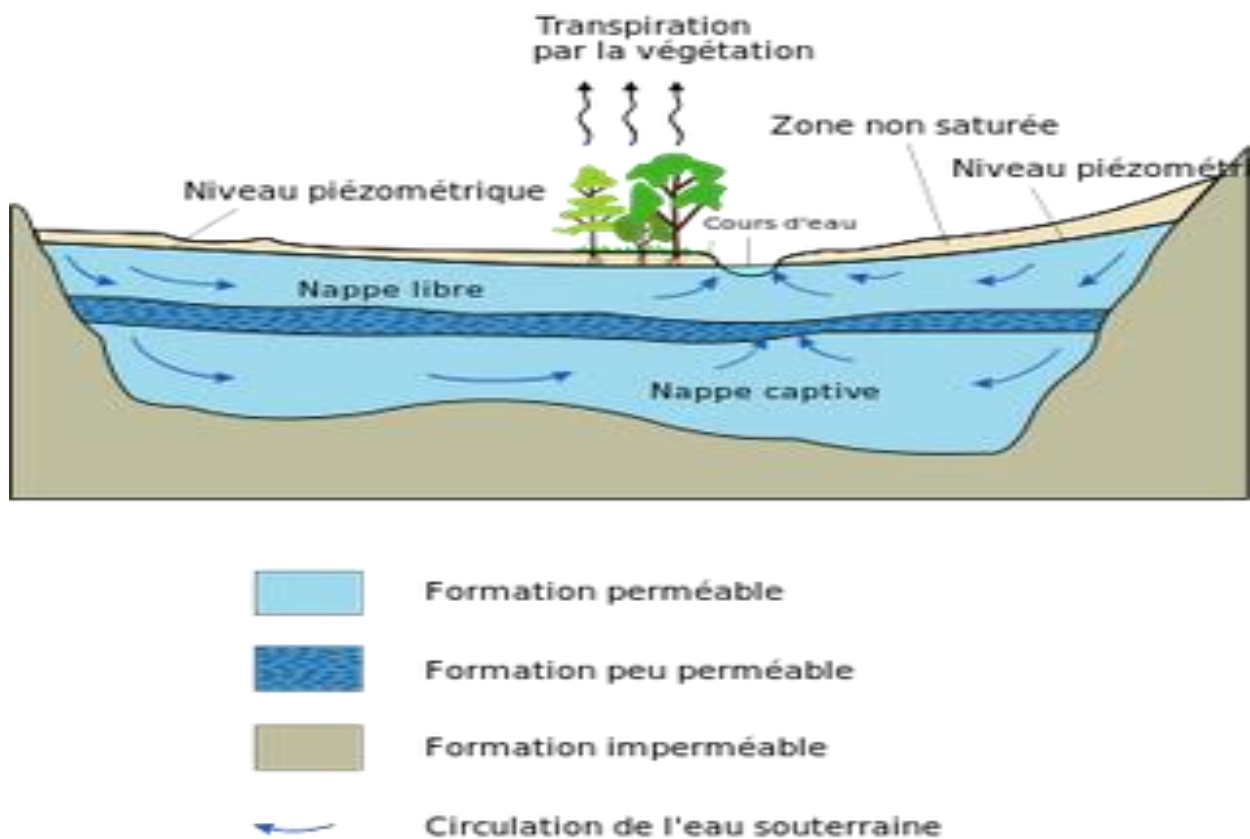


Figure 6: Circulation des eaux souterraine

## 2.9 Qu'est-ce qu'un aquifère

Un aquifère est un corps (couche, massif) de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantité d'eau appréciable. Un aquifère peut comporter une zone non saturée. L'aquifère est homogène quand il a une perméabilité d'interstices (sables, graviers) ; la vitesse de percolation y est lente. Il est hétérogène avec une perméabilité de fissures (granite, calcaire karstique) ; la vitesse de percolation est plus rapide.

Ils sont des couches de roches qui sont trouvés sous le sol et sont composés de roches perméables, du gravier, du sable ou d'argile d'où l'eau peut être extraite.

Les différents types de roches et du sol peuvent garder les montants différent d'eau, cependant les régions poreux (ou les espaces). Quand les espaces sont assez grandes pour contenir des quantités utilisables d'eau, il est appelé une aquifère. Grands particules comme sable ou gravier grossier peuvent garder plus d'eau que sable ou argile fin, parce que les espaces entre les particules de gravier sont plus grandes que les espaces entre les particules du sable fin. Alors, on peut dire que gravier a plus de porosité, ou habilité de garder d'eau, qu'argile.

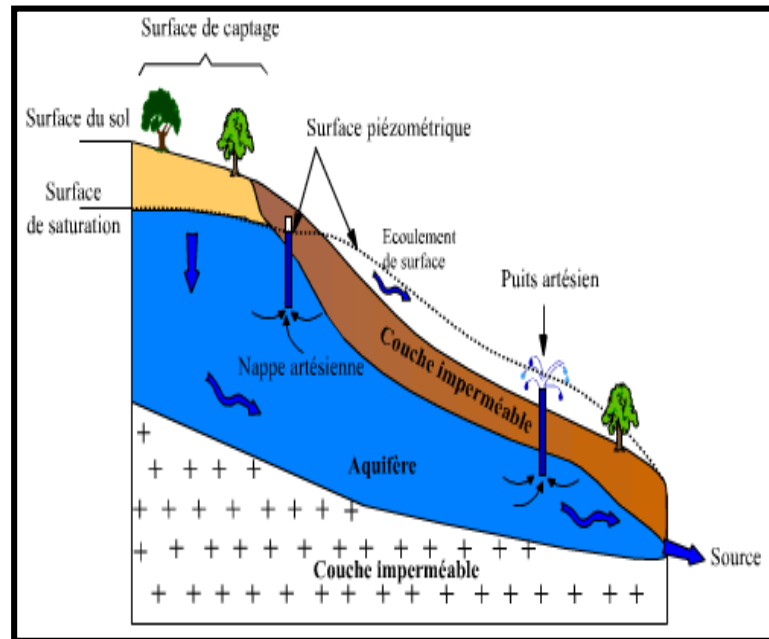


Figure 7 : Un aquifère

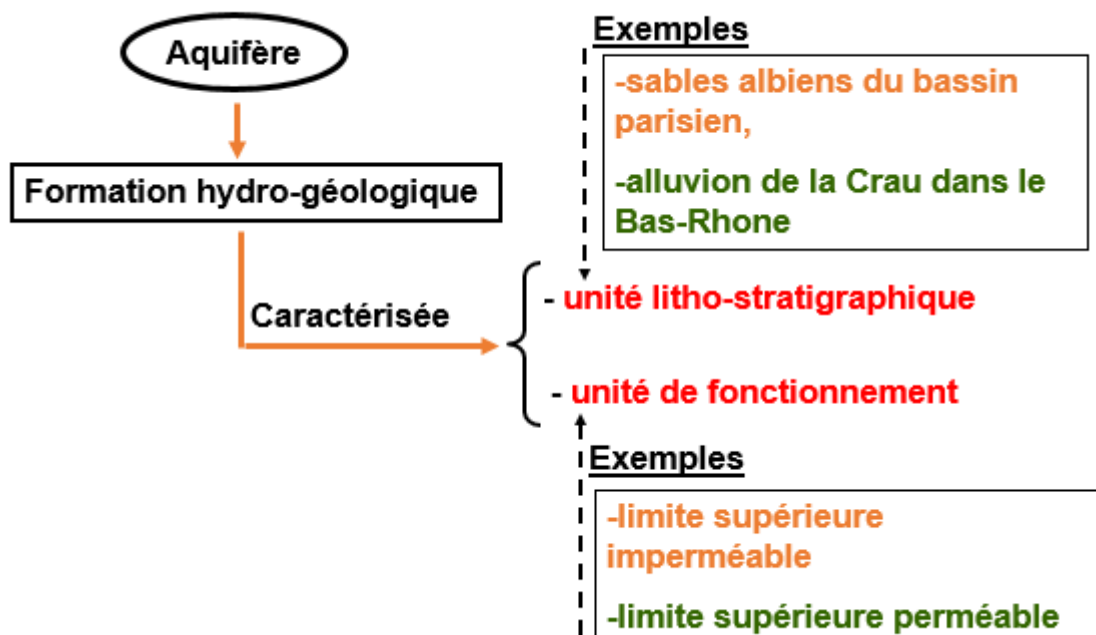
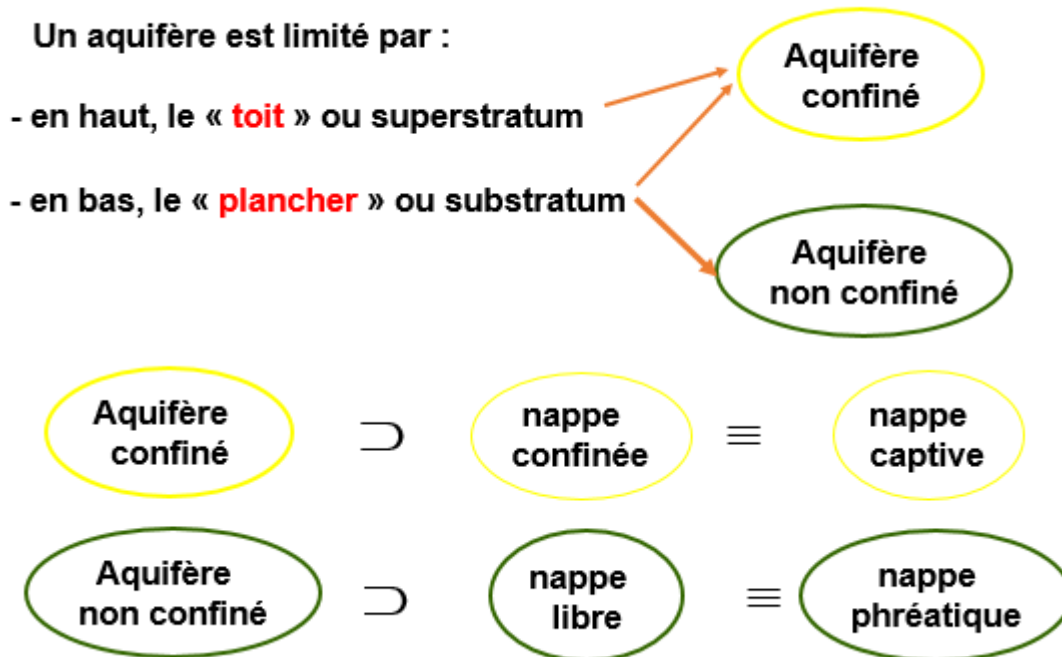


Figure 8: Aquifère



**Figure 9 :** Type d'aquifère

Il y en a deux types de aquifères : des aquifères confinés et des aquifères libres. Toutes les aquifères se trouvent sur une couche imperméable d'argile ou de soubassement. Une aquifère confiné a aussi une couche d'argile ou de soubassement en dessus d'elle-même, une aquifère libre n'a pas cette couche. Certaines roches sont suffisamment poreuses ou fissurées pour contenir de l'eau. Ces aquifères sont généralement composés de deux zones :

- une zone non saturée comprenant le sol et la partie supérieure de la roche aquifère. Dans cette zone, l'eau ne remplit pas l'intégralité des pores de la roche ;

- une zone saturée dans laquelle les interstices de la roche sont complètement saturés d'eau. Cette eau contenue dans la roche prend le nom de nappe. Contrairement aux idées reçues, les eaux souterraines sont donc contenues dans les interstices (souvent microscopiques) de la roche et ne forment pas de vastes lacs ou rivières souterraines (excepté dans les aquifères karstiques).

La qualité d'une eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques mais également par son usage. Ainsi, une eau impropre à la consommation peut être adaptée à l'irrigation ou à la pisciculture. Dans les pays en voie de développement à climat aride, le rôle des eaux souterraines est d'autant plus important qu'elles constituent souvent la seule source d'approvisionnement en eau potable et sont donc vitales pour le développement de ces pays.

Naturellement filtrée par le sol, l'eau souterraine est le plus souvent de bonne qualité et exempte de micro-organismes pathogènes. Celle-ci demeure cependant une ressource fragile et plusieurs sources de contamination peuvent en affecter la qualité et la rendre impropre à toute fin. L'épandage et le stockage de sels de déglacage (sels de voirie), les fuites de réservoirs d'essence, les débordements d'installations septiques et l'usage d'engrais et de pesticides sont quelques exemples de sources de contamination susceptibles d'affecter les eaux.

Les scientifiques évaluent la qualité de l'eau souterraine en mesurant les quantités des divers constituants contenus dans l'eau. Ces quantités sont souvent exprimées en milligrammes par litre (mg/l). La question de la qualité de l'eau au sein des programmes humanitaires se pose essentiellement en termes de consommation humaine et d'irrigation.

### **2.9.1 Les différents modèles d'aquifères**

Les aquifères sont limités à leur partie supérieure par un toit et à leur partie inférieure par un substratum. En fonction de la perméabilité de ces formations, on détermine plusieurs modèles d'aquifères :

#### **2.9.1.1 Les aquifères à nappe libre**

La base de l'aquifère (substratum) est imperméable, la limite supérieure qui est le toit (le mur) est très proche de la surface du sol ou même à fleur (débordé à la surface), **Exemple** : les sources et qui sont le plus facilement accessibles (pente ...)

#### **2.9.1.2 Les aquifères à nappe captive**

Les eaux souterraines sont emprisonnées entre 2 formations imperméables et fixent le substratum et le toit.

#### **2.9.1.3 Les aquifères à nappe semi captive**

Soit le toit de l'aquifère est constitué par une formation semi perméable dans le cas de 2 aquifères superposés, la formation qui les sépare est semi perméable pour permettre les changements d'eau.

**Remarque** : Les aquifères à nappe captive et semi captive sont souvent situés plus profondément dans le sol. Plus un aquifère à nappe captive et semi captive est profond et plus la couche de matériaux qui le recouvre est épaisse. Plus cet aquifère et son eau sont protégés de contaminations.

### **2.9.2 Les différents types d'aquifères**

On distingue trois types d'aquifères

#### **2.9.2.1 Les aquifères poreux**

L'eau est contenue dans les pores ouverts de la roche et peut y circuler librement (sables, craie, graviers, grès, scories volcaniques, etc.). La perméabilité est matricielle.

L'eau est contenue dans les pores ouverts de la roche et peut y circuler librement (sables, craie, graviers, grès, scories volcaniques, etc.). La perméabilité est matricielle.

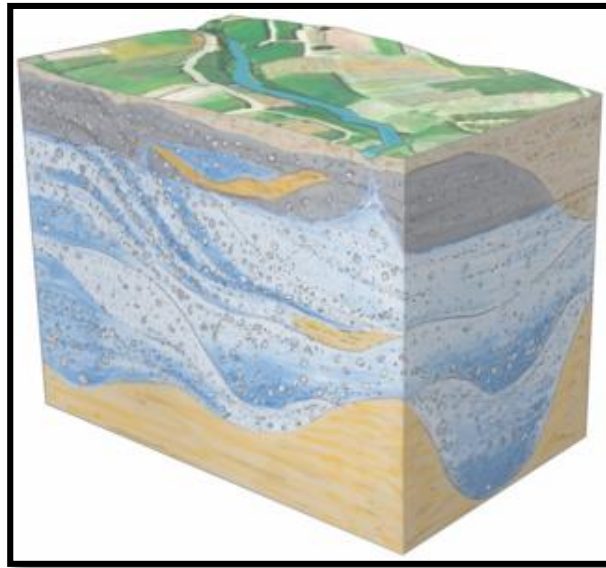


Figure 10 : Aquifères en roche meuble

### 2.9.2.2 Les aquifères fissurés

L'eau est contenue et circule dans les failles, fissures ou diaclases de la roche (calcaires, granites, coulées volcaniques, etc.). La perméabilité est fissurale.

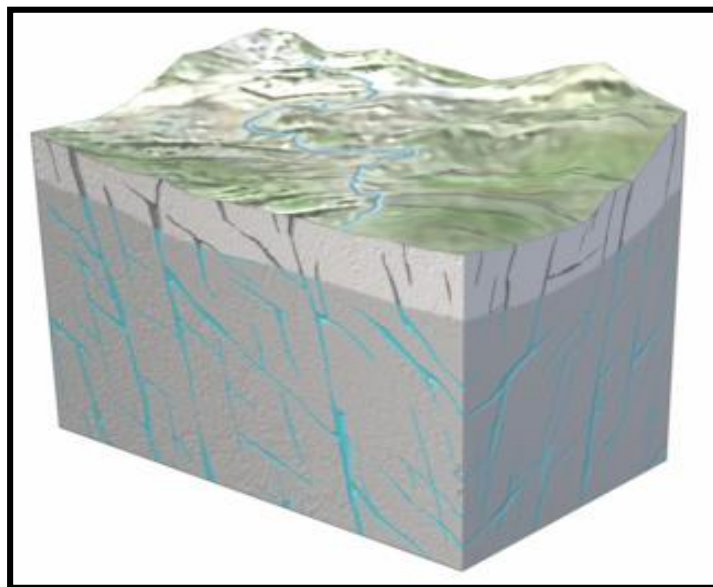


Figure 11: Aquifère fissuré

### 2.9.2.3 Les aquifères karstiques

Sont des systèmes complexes particuliers associant une zone superficielle plus ou moins fissurée et insaturée (en eau) servant de zone d'infiltration, et une zone inférieure fissurée, présentant également des conduits, grottes etc. Cette zone est saturée en dessous d'un certain niveau et l'eau circule avec de grandes vitesses comparativement aux systèmes poreux.

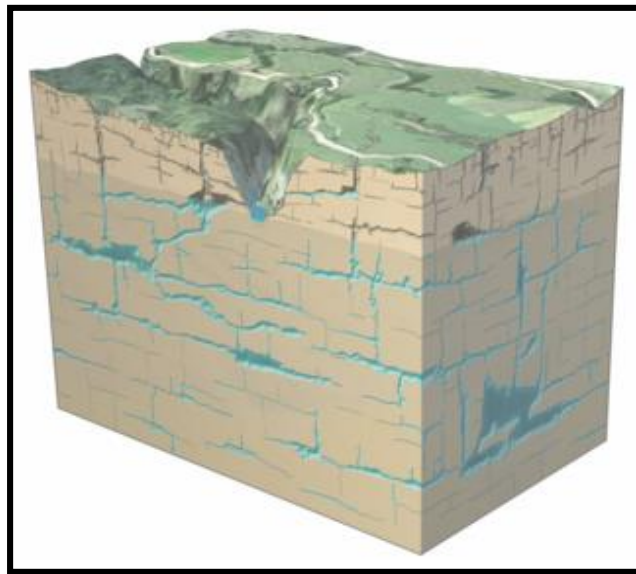


Figure 12 : Aquifère karstiques

### 2.10 Ecoulement d'eau souterraine

L'eau s'infiltrate dans le sol et alimente les aquifères, plus facilement dans les zones où on l'entrouvre les aquifères a la nappe libre et des dépôts perméable a la sur face du sol, une fois dans l'aquifère, l'eau se déplace plus ou moins rapidement selon la perméabilité, la porosité, et d'autre caractéristique des matériaux qui composé l'aquifère. L'eau souterraine peut progresser de quelque centimètres a quelque mètre par jour dans les aquifères de sable de gravier et de dizaines de mètre par jour d'avantage dans les aquifères constituer de roche très fracturé. Dans certains aquifères il s'arrive que l'eau ne progresse même pas de quelque millimètre par jour(le cas de l'argile). En générale l'eau souterraine elle se déplace vers des zones d'évacuation horizontal, ces dernier étant : des sources, des cours d'eau, les lacs .....

### 2.11 La vitesse de recharge de l'aquifère de l'eau (Age d'eau)

elle représente le temps que l'eau a mis pour se déplacer de la surface du sol a un point précis du sous-sol, les scientifiques ont recours a plusieurs méthode pour déterminer dans le quel sens et a quelle vitesse l'eau voyage ainsi que son âge dans le cas des puits jeu profond situer dans des aquifères a nappe libre et constitue de matériaux perméables l'Age de l'eau peut s'exprimer en terme de ce même au moins seulement, par comparaison l'âge de l'eau peut s'exprimer en année

voir en certaine d'année dans le cas des puits construit dans des aquifères bien à déterminer a nappe captive.

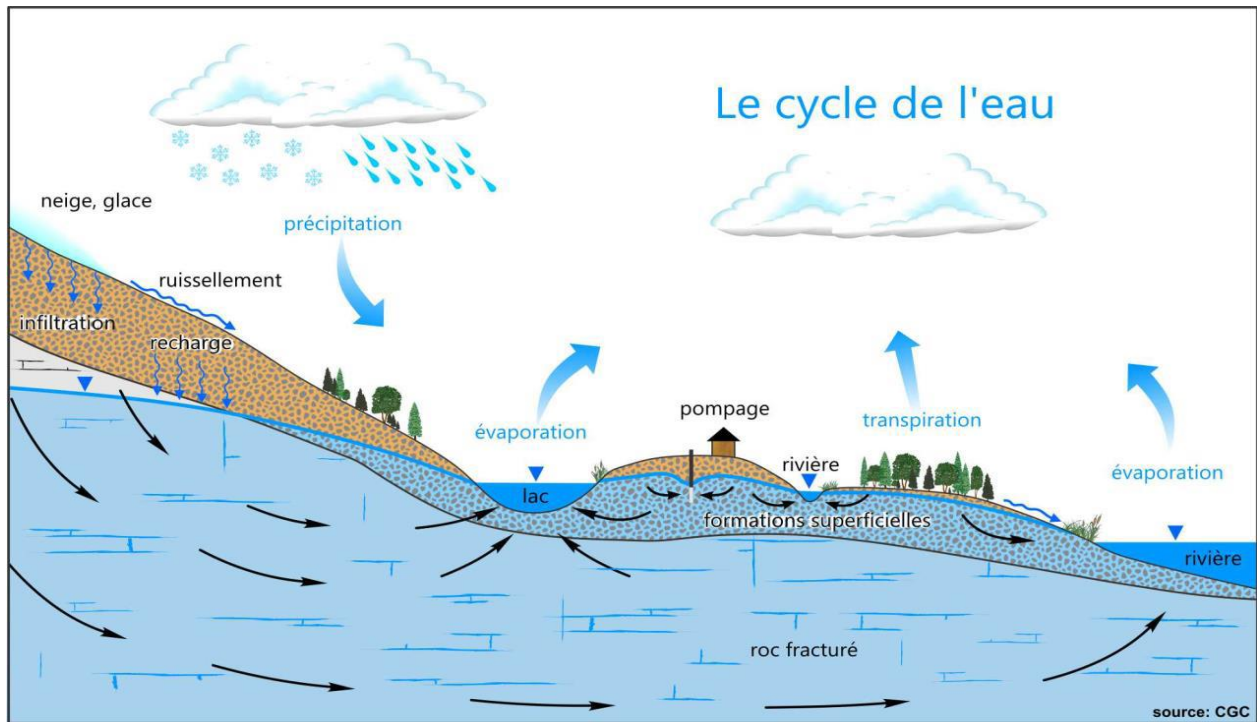


Figure 13: Age d'eau et vitesse de recharge de l'aquifère.

- Océans: **97,5%** de l'eau (eau salée) Eau douce: **2,5%** glaciers: 68,9% eau de surface (lacs, réservoirs, rivières): 0,3% eau souterraine: **30,8%**

## 2.12 Bassins versants

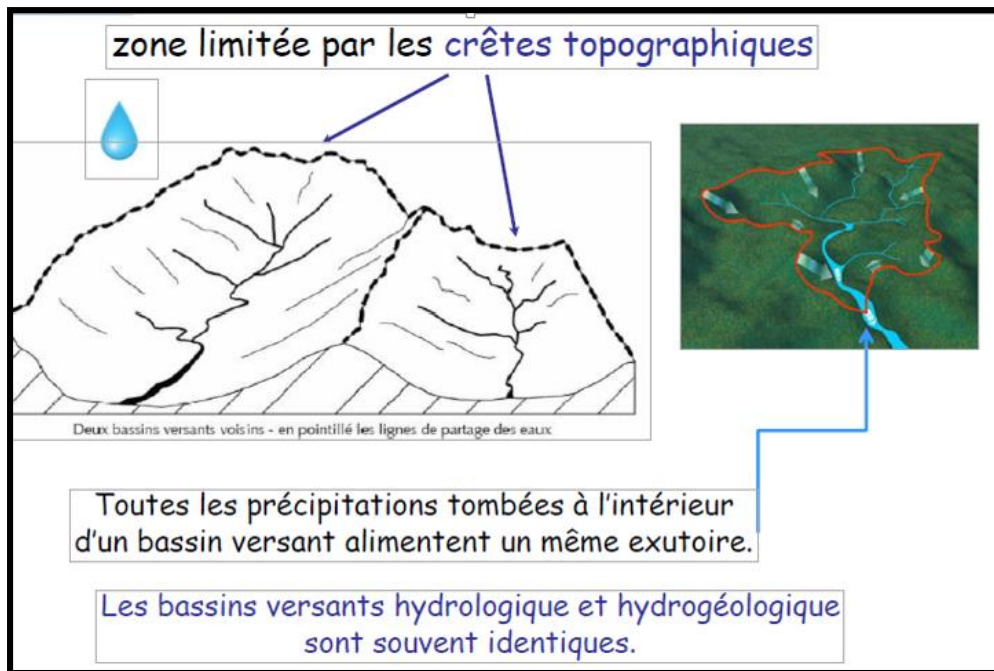


Figure 14 : Bassins versants



Puits au roc



Puits de surface

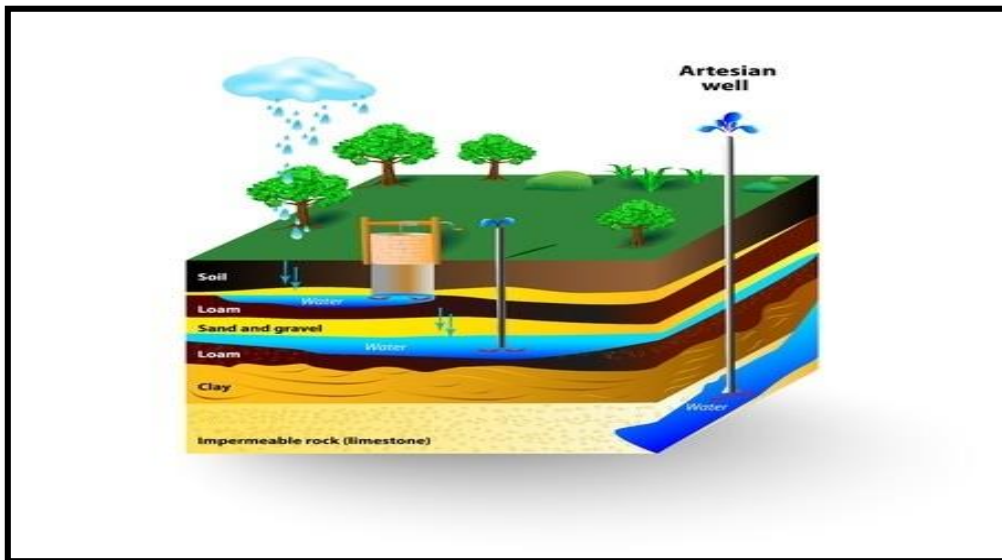


Figure 15 : Les différents puits

### 2.13 Les puits artésiens

Sont des puits qui font des prises d'eau de source, intercalés entre deux couches imperméables de roches, et qui fournissent une eau de surface sans aucun ou très peu de pompage. Le puits artésien est donc un profond puitsforé où l'eau est forcée à la surface par la pression hydrostatique. Cette eau provient de la nappe à faible profondeur. (Par définition les eaux de surface, également appelées eaux superficielles sont constituées, par opposition aux eaux souterraines, de l'ensemble des masses d'eau courantes ou stagnantes, douces, saumâtres ou salées qui sont en contact direct avec l'atmosphère.)



Puits artésiens



Sources

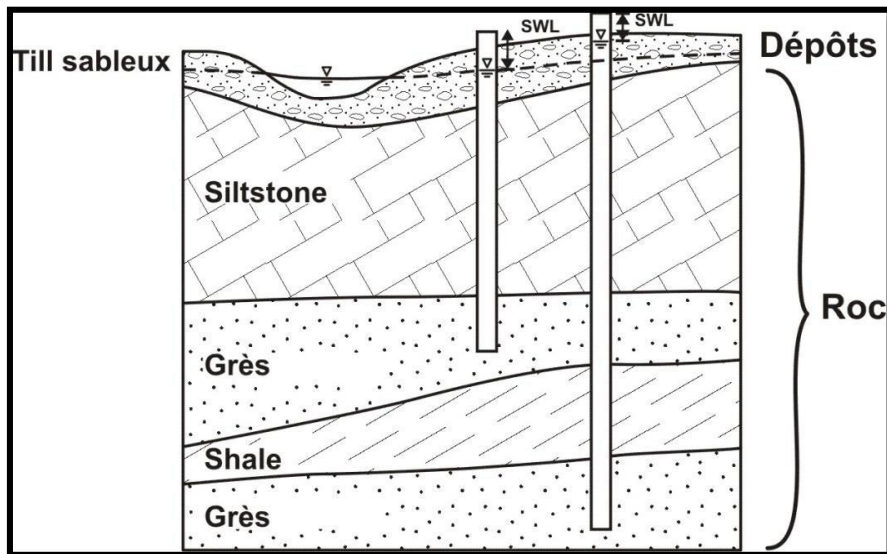


Figure 16 :Aquitard

## 2.14 Aquitard

Formation géologique, constituée par exemple d'argile ou de roc non fracturé à grains fins, qui est pratiquement imperméable. Couche protectrice. L'eau souterraine circule entre les particules ou dans les fractures.

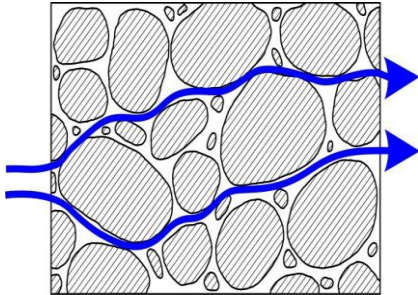


Figure 17: Sable (entre les grains)

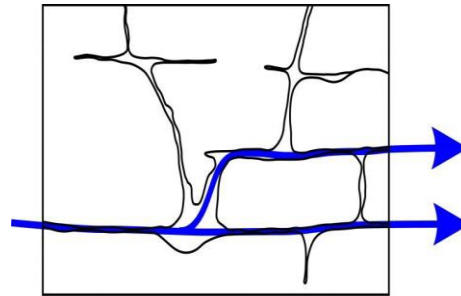


Figure 18 :Roc (dans les fractures)

L'eau souterraine circule lentement, contrairement à l'eau de surface. L'eau infiltrée peut prendre quelques années pour parvenir à un cours d'eau, des décennies, voire plusieurs millénaires.

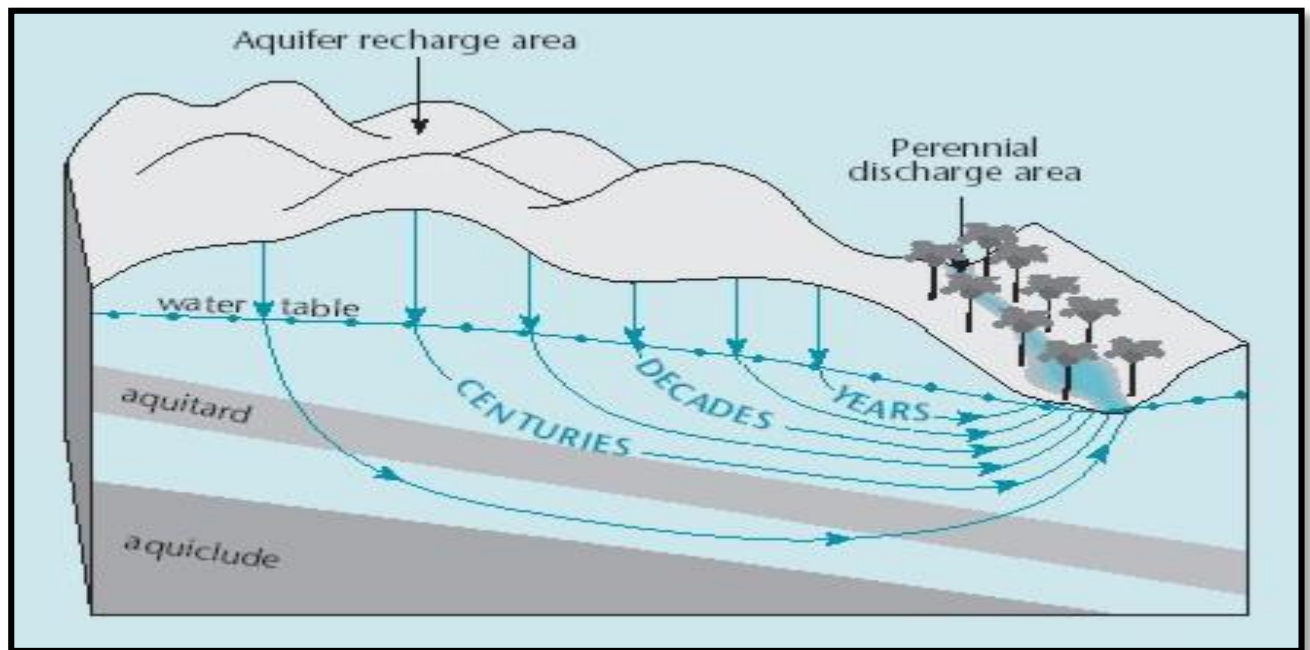


Figure 19 : Infiltration et âge de l'eau souterraine

L'eau des précipitations peut emprunter différents chemins :

- ruissellement vers les cours d'eau
- évapotranspiration (transpiration par les plantes et évaporation)
- infiltration et recharge vers l'aquifère

La recharge correspond à la quantité d'eau qui s'infiltré et qui atteint l'aquifère.

La recharge est un paramètre important à connaître pour la gestion de la ressource. Toutefois, elle est difficile à estimer Utilisation de plusieurs méthodes

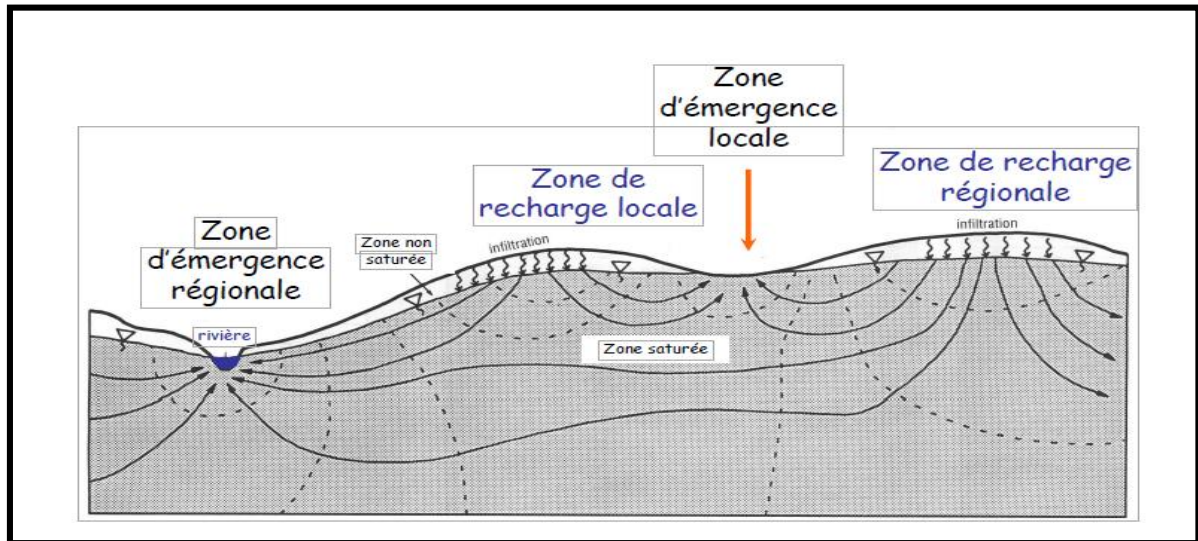


Figure 20 : La recharge

### 2.15 Zone non saturée vs Zone saturée

Une coupe depuis la surface du sol jusqu'à la nappe phréatique montre la zonalité suivante :

#### 2.15.1 Une zone saturée

Contenant de l'eau de rétention et de l'eau gravitaire ; la partie supérieure est imprégnée d'eau remontant par capillarité. Les piézomètres indiquent la position du sommet de l'eau gravitaire alors que le sommet de la nappe libre se situe au niveau de l'eau capillaire.

#### 2.15.2 Une zone non saturée

Contenant de l'air, de l'eau de rétention et de l'eau gravitaire en transit ; la base de cette zone est imprégnée d'eau provenant de la remontée capillaire à partir de la zone saturée.

le rôle des connexions souterraines en hydrologie

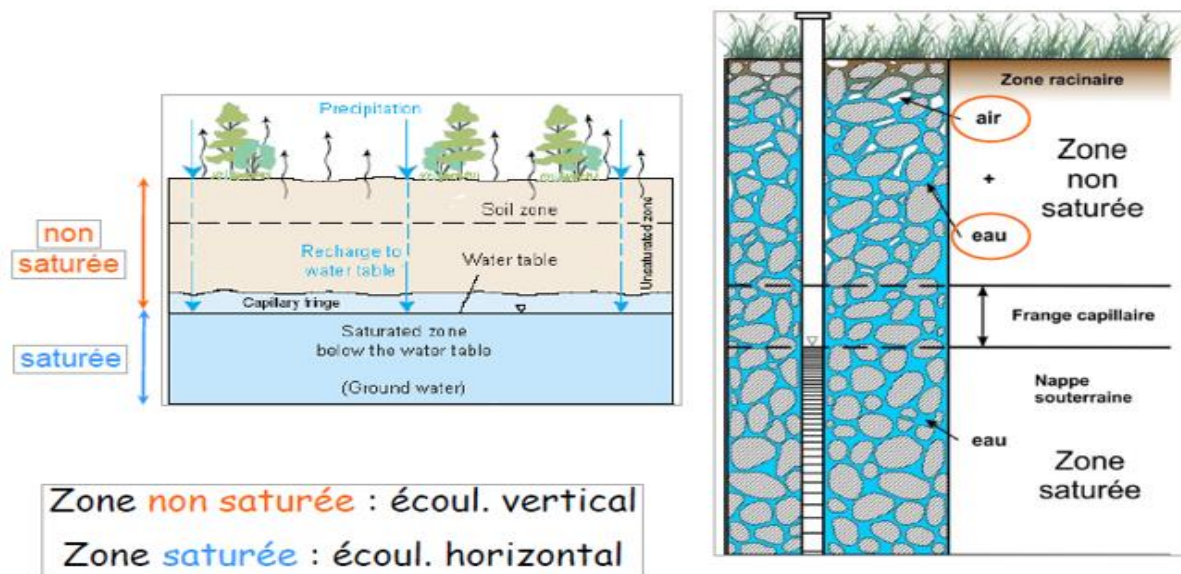


Figure 21 : Zonalité d'un aquifère

### 2.16 L'indice de captage efficace en hydrologie souterraine

Les zones de captage topographiquement esquissées sont une unité spatiale basée sur les formes de la surface de la terre. Ils montrent comment les activités humaines et le changement climatique influencent les quantités d'eau disponibles. La connaissance de ces unités est fondamentale pour une gestion durable de l'eau. Un indice de captage efficace a été défini.

Cependant, en raison des connexions souterraines, certains bassins versants accumulent de l'eau provenant de zones situées au-delà de leurs limites topographiques, tandis que d'autres sont effectivement beaucoup plus petits que leur topographie de surface ne le suggère.

Actuellement, la plupart des stratégies de modélisation hydrologique ne prennent pas en compte ces connexions aux eaux souterraines, mais supposent que les bassins versants sont indépendants de leur environnement. Pour cette raison, le Dr Yan Liu et le professeur assistant Dr Andreas Hartmann de la Chaire de modélisation hydrologique et des ressources en eau de l'Université de Fribourg, avec une équipe de chercheurs de l'Université de Bristol en Angleterre et de l'Université de Princeton aux États-Unis, ont introduit l'indice de captage efficace (ICE).

En utilisant cette nouvelle métrique, ils ont pu déterminer comment les zones de chalandise topographiques et réelles diffèrent lors de l'analyse d'un ensemble de données globales. L'équipe a récemment publié les résultats dans la revue "Lettres de recherche environnementale".

À l'aide de l'indice de captage efficace, l'équipe dirigée par Liu et Hartmann a pu démontrer que l'hypothèse d'un bilan hydrique fermé, c'est-à-dire que le niveau d'une rivière ne change que par les précipitations et l'évaporation de sa zone topographique, par exemple, ne s'applique pas à un nombre considérable de bassins versants dans le monde.

Un bassin sur trois étudié a une zone de captage effective qui est même supérieure à deux fois ou inférieure à la moitié de sa zone topographique. Les scientifiques ont reconnu que ces zones influencent ou sont influencées en dehors de leurs limites topographiques par des activités de gestion de l'eau telles que le pompage des eaux souterraines et, par exemple, la déforestation ou le reboisement.

Avec leur analyse, les chercheurs montrent que l'indice de captage efficace qu'ils ont redéfinie convient pour étudier comment la sécheresse peut se propager à travers les frontières topographiques en raison de l'échange d'eau. Il peut également être utilisé dans l'analyse des effets des changements climatiques et d'utilisation des terres sur les échanges d'eau transfrontaliers. "C'est ainsi que nous avons vu où nous devons étudier plus avant les réseaux souterrains à travers les frontières topographiques afin de soutenir la gestion durable de l'eau", déclare Hartmann.

### 2.17 Le débit durable

Le débit durable représente un équilibre entre les quantités d'eau exploitées et celles fournies par la recharge.

Par contre, la recharge en elle-même n'est pas suffisante pour déterminer le débit durable. Celui-ci devait être évalué en tenant compte de considérations écologiques. Ainsi, le % de la demande (ou de l'utilisation) en eau doit représenter une fraction de la recharge.

### 2.18 Perméabilité et Porosité

**-Perméabilité** : définit l'habileté du milieu à transmettre un fluide

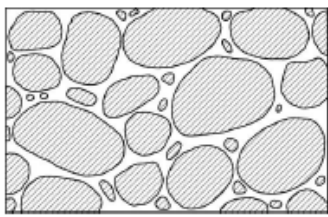
On utilise la conductivité hydraulique (K) ou la transmissivité (T) pour la quantifier, à partir d'essais hydrauliques

T et K sont très variables  $10^{-12} < K < 10^{-1}$  m/s

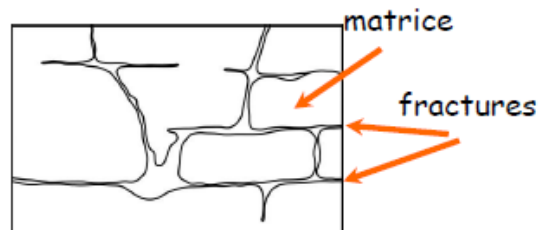
Ex : argile

Ex : sable et gravier

**-Porosité** : portion d'un sol ou d'une roche qui n'est pas occupée par la matière solide (volume des vides/volume total)



Sable: 25 à 30%



Roc: 1 à 2%

Paramètres importants pour calculer la vitesse de déplacement et estimer la quantité d'eau dont on dispose

Exemples pour des roches sédimentaires :

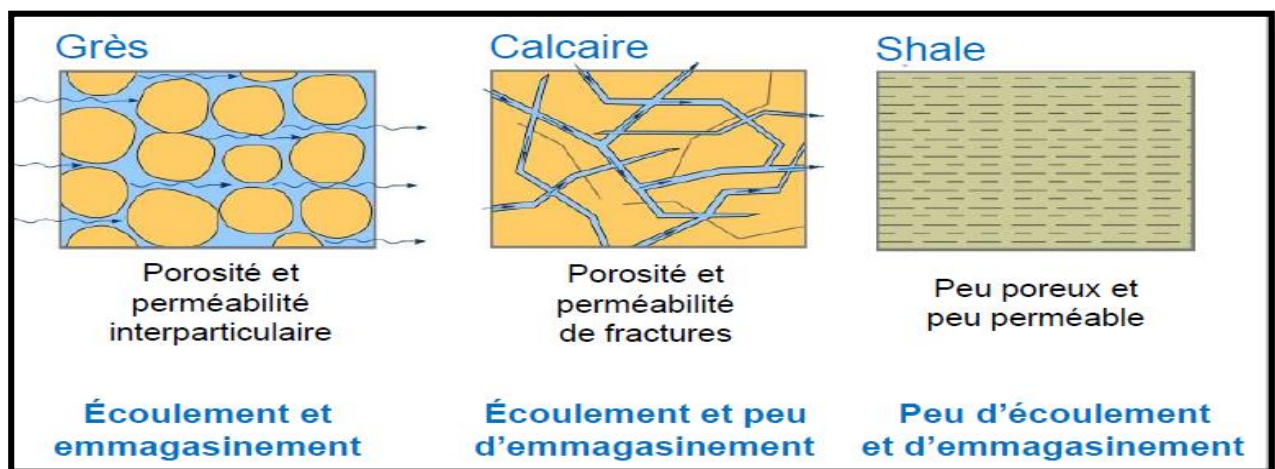


Figure 22 : Exemples pour des roches sédimentaires

### 2.19 contexte hydrostratigraphique

À partir des forages. La représentation des séquences hydro stratigraphiques est faite sur une coupe en deux dimensions ou sur une colonne stratigraphique. La superposition des différentes unités géologiques (dépôts meubles et roc) y est représentée afin d'en apprécier leur continuité, leur étendue et leur épaisseur. Par exemple, un contexte hydrostratigraphique pourrait être une zone définie par une couche de silts ou d'argile en surface, reposant sur des sédiments fluvioglaciaires en contact avec l'aquifère de roc fracturé. Un autre contexte pourrait être défini par un dépôt de sables deltaïques en surface, reposant sur une unité de till en contact avec le roc (Figure 23). Ces séquences déterminent les conditions de confinement des aquifères.

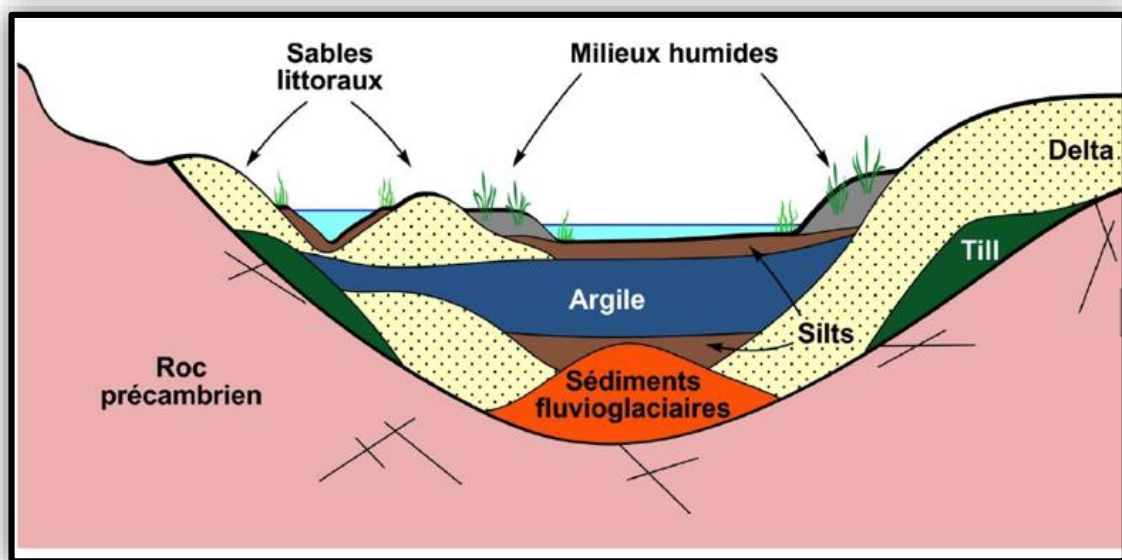


Figure 23 : Exemple de contexte hydrostratigraphique

### 2.20 Contextes hydrogéologiques

#### 2.20.1 Séquences hydrostratigraphiques

Un contexte hydrogéologique représente un arrangement des unités de dépôts meubles et de roches (ou séquence hydrostratigraphique), en considérant leur perméabilité respective. La superposition des unités géologiques est aussi désignée par le terme stratigraphie. Ils permettent de visualiser comment sont organisés les unités géologiques en profondeur et d'identifier quelle séquence de dépôts meubles peut être rencontrée dans un secteur donné. Ces contextes exercent une influence sur l'écoulement et la qualité de l'eau souterraine. Ils sont établis dans le but de servir d'indicateurs régionaux des conditions hydrogéologiques présentes sur un territoire. L'agencement stratigraphique des unités géologiques en profondeur est connu à partir des forages. La représentation des séquences hydrostratigraphiques est faite sur une coupe en deux dimensions ou sur une colonne stratigraphique. La superposition des différentes unités géologiques (dépôts

meubles et roc) y est représentée afin d'en apprécier leur continuité, leur étendue et leur épaisseur. Par exemple, un contexte hydrostratigraphique pourrait être une zone définie par une couche de silts ou d'argile en surface, reposant sur des sédiments fluvioglaciaires en contact avec l'aquifère de roc fracturé. Un autre contexte pourrait être défini par un dépôt de sables deltaïques en surface, reposant sur une unité de till en contact avec le roc (Figure 23). Ces séquences déterminent les conditions de confinement des aquifères.

La colonne stratigraphique illustre la séquence complète de sédimentation des dépôts meubles que l'on retrouve dans une région. Elle montre donc les sédiments les plus récents en surface et les plus anciens en contact avec le socle rocheux. Elle permet aussi de retracer l'histoire et les processus de mise en place des dépôts meubles. La Figure 22 présente un exemple de la colonne stratigraphique simplifiée utilisée pour le projet PACES – Abitibi-Témiscamingue (Partie 1)

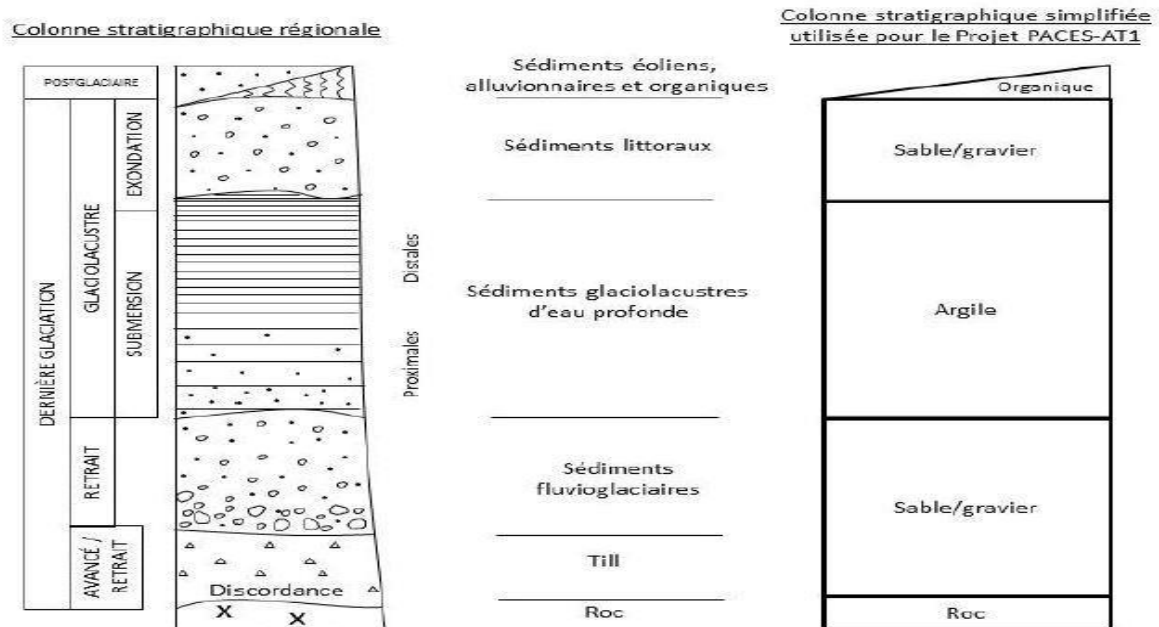


Figure 24 :Colonne stratigraphique

### 2.20.2 Conditions de confinement

Le confinement d'un aquifère dépend de son recouvrement par une couche de matériaux peu perméables (aquitard) qui isole l'eau souterraine contenue dans l'aquifère. La nature et l'épaisseur des dépôts meubles constituant l'aquitard déterminent le niveau de confinement des aquifères (Figure 23). Le confinement influence les divers processus dynamiques et chimiques de l'eau souterraine, en limitant ou en favorisant la recharge de l'aquifère, ou encore en assurant sa protection par rapport à une contamination provenant directement de la surface.

#### Aquifère non confiné

Les aquifères non confinés (contenant une nappe phréatique libre ou « **nappe libre** ») sont en contact direct avec l'atmosphère et ne sont donc pas limités au-dessus par un aquitard. La position

du **toit de la nappe** est libre de fluctuer. C'est le type d'aquifère utilisé par les puits de surface. Il peut être directement rechargé par l'infiltration en surface et est généralement plus vulnérable à la contamination.

### Aquifère confiné

Les aquifères confinés (contenant une nappe phréatique captive ou « **nappe captive** ») sont « emprisonnés » sous un aquitard. Une nappe captive est donc légèrement sous pression et le niveau piézométrique de la nappe correspond au niveau où l'eau retrouve son équilibre avec la pression atmosphérique. La nappe est faiblement alimentée par l'infiltration verticale depuis la surface. Elle reçoit généralement son alimentation latéralement, en provenance de l'amont, là où la couche confinante n'est plus présente, c.à.d. où la nappe est libre. Une nappe captive se trouve mieux protégée qu'une nappe libre des contaminations provenant directement de la surface.

### Aquifère semi-confiné

Les **aquifères semi-confinés** (contenant une **nappe semi-captive**) sont des cas intermédiaires dans lesquels les couches confinantes de l'aquifère (aquitard) ne sont pas totalement imperméables ou sont de faible épaisseur. Dans ce cas, il peut y avoir une circulation verticale d'eau limitée entre les couches géologiques.

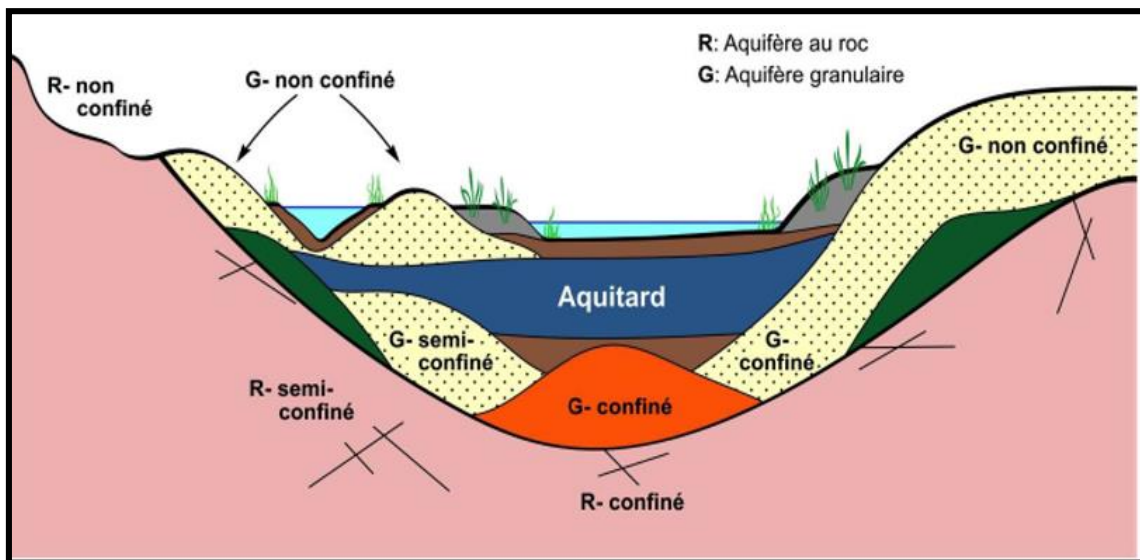


Figure 25 : Confinement des aquifères

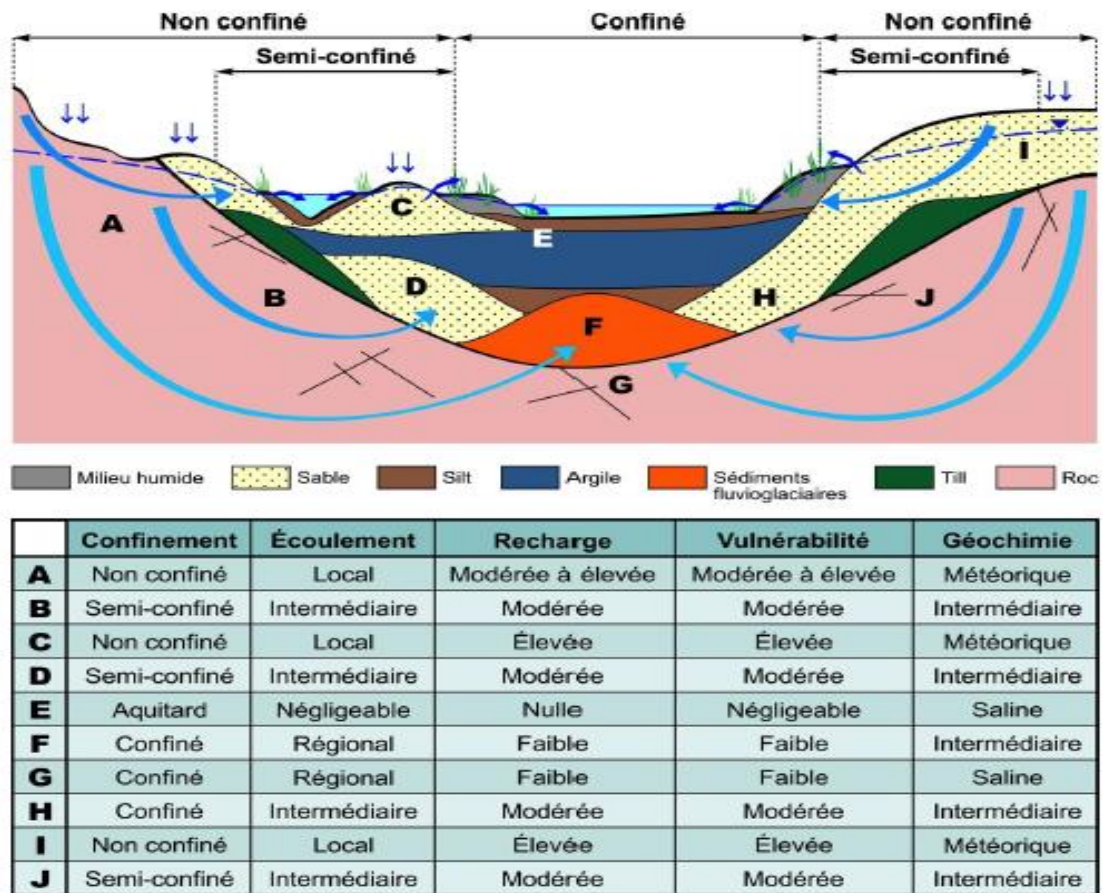


Figure 26 : Confinement des aquifères (Cas particuliers)

### Cas particuliers

On observe aussi des cas particuliers tels que les **nappes perchées**, suspendues au-dessus du niveau de la nappe phréatique et retenues par une couche de matériaux imperméables. Il existe aussi des cas où le confinement est discontinu, c'est-à-dire où les couches confinantes sont

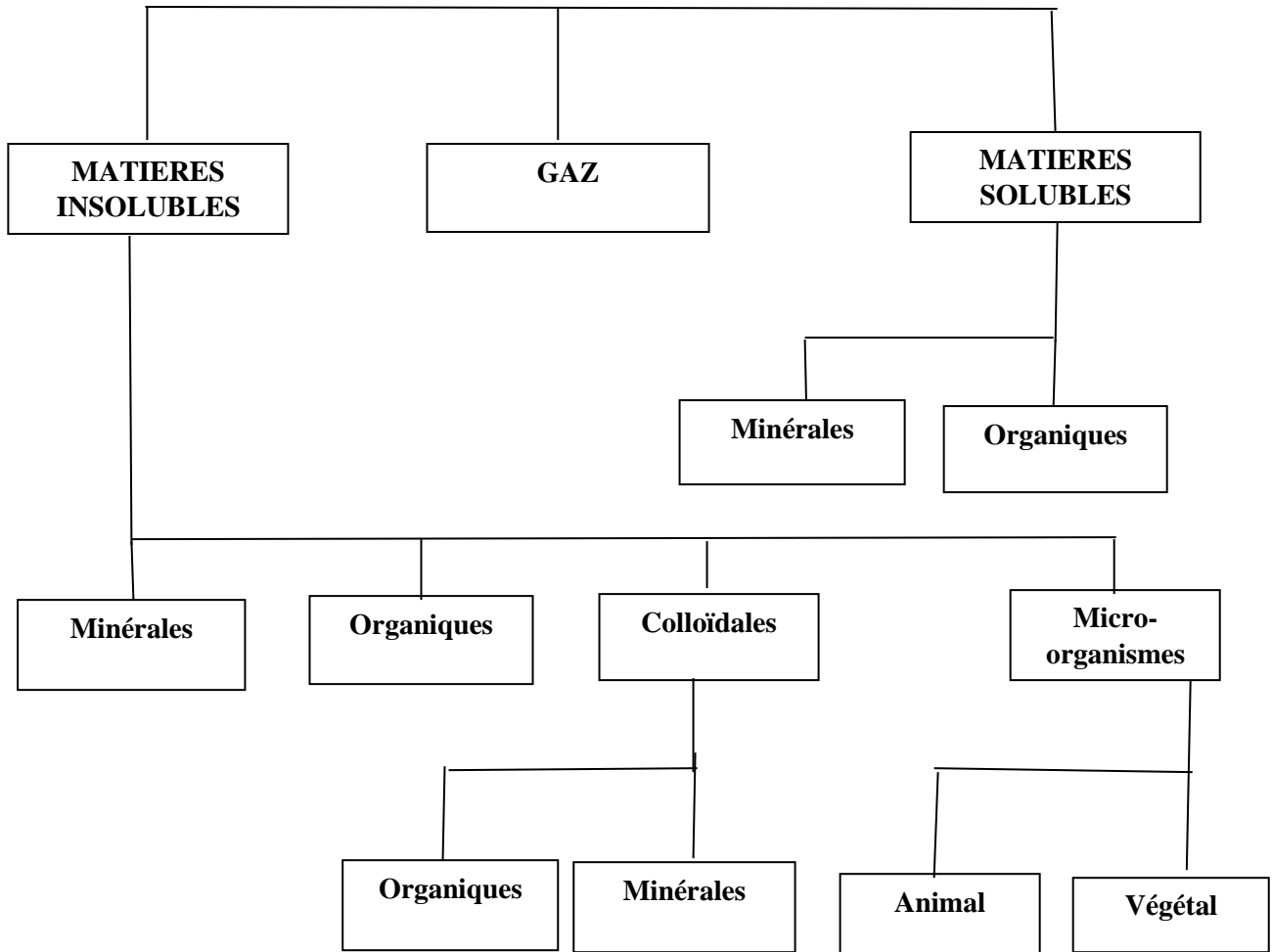
« trouées » et laisse infiltrer localement l'eau jusqu'à l'aquifère sous-jacent.

On parle d'**aquifère double** lorsque deux formations aquifères se superposent, séparées ou non par un aquitard.

### 3 CHAPITRE III. Assurances qualité et contrôle de la qualité

#### 3.1 Matières présentes dans l'eau

##### Matières présente dans l'eau



### **3.1.1 Matières insolubles**

Il s'agit de l'ensemble des matières solides que l'eau rencontre au cours de son cheminement et qu'elle transporte sans dissolution jusqu'au point de soutirage.

Cette pollution va de la plus fine à la plus grossière et peut être classée ainsi :

- Matières solides
- Matières organiques
- Matières colloïdales en suspension
- Matières vivantes

#### **3.1.1.1 Matières minérales solides**

Ces matières sont constituées de substances généralement visibles à l'œil nu et définissant la turbidité de l'eau.

Leurs origines et dimensions sont très variables (débris de roche, sable, boue, argile, matières végétales, « rouilles »...) et elles se rencontrent aussi bien dans les eaux de forage que sur les eaux de distribution publique. Dans ce dernier cas leur présence résulte généralement de travaux d'extension ou de réparation ou de vibrations transmises aux réseaux anciens.

L'élimination de ces matières se fera soit par décantation soit par filtration.

#### **3.1.1.2 Matières organiques**

Ces matières proviennent de la décomposition des végétaux et de la pollution due aux rejets industriels.

Il s'agit de matières azotées, de produits de synthèse et de tourbes.

Ces matières sont à l'origine de la coloration et du mauvais goût de l'eau.

Elles sont généralement inexistantes dans les eaux de distribution publique, celles-ci ayant subi un traitement d'épuration.

#### **3.1.1.3 Matières colloïdales en suspension**

Ces matières sont constituées d'huiles minérales, de suies, d'argile colloïdale... elles se présentent en émulsion sous une forme qui n'est ni dissoute, ni solide.

Invisibles à l'œil nu, ces matières comportent en surface des charges électriques qui ont un effet de répulsion les unes sur les autres et qui les maintient de ce fait en suspension.

Leur élimination nécessite au préalable une neutralisation de leur charge électrique et leur regroupement en particules plus grosses (floculation).

#### **3.1.1.4 Matières vivantes**

Il s'agit d'organismes vivants du règne végétal et animal tels que champignons, algues, bactéries...

Ces matières n'existent que très rarement dans les eaux de distribution publique mais sont souvent présentes dans les eaux de puits.

### **3.1.2 Matières gazeuses**

Les principaux gaz rencontrés dans l'eau sont :

- l'azote                       $N_2$
- l'oxygène                   $O_2$
- le gaz carbonique       $CO_2$

Ils sont présents dans l'eau sous deux formes :

- libre en tant que gaz dans l'eau
- dissoute

Dans ce dernier cas, leur solubilité va être fonction de la température et de la pression du milieu.

La solubilité augmente avec la pression et diminue avec la température.

### **3.1.3 Matières solubles :**

\* Matières minérales solides (voire 3.1.11.1.)

\* Matières organiques (voire 3.1.11.2.)

Tableau 2 : Exemple des sels de calcium

Sel	Cation	Anion
Carbonate de calcium Ca CO <sub>3</sub>	Calcium Ca <sup>++</sup>	Carbonate CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Bicarbonate de calcium Ca (HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		Bicarbonate HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Sulfate de calcium Ca SO <sub>4</sub>		Sulfate SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Chlorure de calcium Ca Cl <sub>2</sub>		Chlorure Cl <sup>-</sup>
Chaux Ca O		Oxyde O <sup>-</sup>

Tableau 3 : Exemple des sels de magnésium

Sel	Cation	Anion
Carbonate de magnésium Mg CO <sub>3</sub>	magnésium Mg <sup>++</sup>	Carbonate CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Bicarbonate de magnésium Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		Bicarbonate HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Sulfate de magnésium Mg SO <sub>4</sub>		Sulfate SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Chlorure de magnésium Mg Cl <sub>2</sub>		Chlorure Cl <sup>-</sup>
Magnésie Mg O		Oxyde O <sup>-</sup>

**Tableau 4** : Exemple des sels de sodium

Sel	Cation	Anion
Carbonate de sodium $\text{Na}_2 \text{CO}_3$	sodium $\text{Na}^+$	Carbonate $\text{CO}_3^{2-}$
Bicarbonate de sodium $\text{Na HCO}_3$		Bicarbonate $\text{HCO}_3^-$
Sulfate de sodium $\text{Na}_2 \text{SO}_4$		Sulfate $\text{SO}_4^{2-}$
Chlorure de sodium $\text{Na Cl}$		Chlorure $\text{Cl}^-$

**Tableau 5** : Exemple des sels de fer

Sel	Cation	Anion
Chlorure ferrique $\text{Fe Cl}_3$	Fer ferrique $\text{Fe}^{+++}$	Chlorure $\text{Cl}^-$
Hydroxyde ferreux $\text{Fe (OH)}_2$	Fer ferrique $\text{Fe}^{++}$	Hydroxyde $\text{OH}^-$
Hydroxyde ferrique $\text{Fe (OH)}_3$	Fer ferrique $\text{Fe}^{+++}$	Hydroxyde $\text{OH}^-$

C'est la nature et la concentration des différents éléments entrant dans la composition de l'eau qui sont à l'origine des problèmes classiques rencontrés tels que l'entartrage et la corrosion.

La nature des substances définira le comportement réactionnel de l'eau et la connaissance quantitative des ions déterminera les possibilités réactionnelles.

Il est donc nécessaire d'établir des regroupements d'éléments sous forme de titres en vue de permettre une interprétation pratique des analyses d'eau.

**Tableau 6 :** Exemple Acides et bases

Base	Cation	Anion
Soude Na OH	Sodium Na <sup>+</sup>	Hydroxyde OH <sup>-</sup>
Potasse K OH	Potassium K <sup>+</sup>	

- Une base contient un anion OH<sup>-</sup> et un métal.

### 3.2 Qualités des eaux de surface et souterraines

La qualité de l'eau dépend de facteurs naturels déterminants (sol, sous-sol, etc.) et d'activités humaines (agricole, industrielle et domestique) produisant des rejets qui se retrouvent directement ou indirectement dans les milieux aquatiques.

**Tableau 7:** Paramètres permettant de juger de la qualité d'une eau.

Catégories	Paramètres
Paramètres organoleptiques	Couleur, odeur
Paramètres physico-chimiques	Température, pH, conductivité à 20°C, éléments majeurs (chlorures, sulfates, bicarbonates, carbonates, sodium, calcium, magnésium, potassium), O <sub>2</sub> dissous, DBO <sub>5</sub> , DCO, oxydabilité.
Substances indésirables	Nitrates, NTK, ammonium, baryum, phosphates, phosphore total, fer total, cuivre, zinc, manganèse, fluorures, hydrocarbures, phénols, détergents anioniques.
Substances toxiques	Arsenic, cadmium, cyanures, chrome total, mercure, nickel, sélénium, pesticides par substance, pesticides totaux, H.P.A. totaux.
Paramètres bactériologiques	Coliformes fécaux, coliformes totaux, streptocoques fécaux
Paramètres biologiques	Chlorophylle a

#### 3.2.1 Qualité physico-chimique

L'attention est attirée sur le fait qu'une évaluation ponctuelle des eaux peut ne pas refléter la qualité globale d'une nappe souterraines ou d'une masse d'eau .

Les analyses physico-chimiques d'eau souterraine font référence à toutes les actions de détermination d'une valeur sur un échantillon, qu'ils s'agissent d'analyses, de mesures, d'observations, etc... Faites en laboratoire ou sur le site de la station de mesure

Les informations relatives aux résultats d'analyse sont fournies par l'organisme chargé de l'analyse,

et communiquées sous la responsabilité de l'organisme producteur de données qui confirme ou non le résultat au regard de la connaissance et du contrôle du processus de Production de la donnée et qui s'engage ou pas sur la vraisemblance et la représentativité de la donnée par rapport au milieu où a été réalisé le prélèvement. Il est possible de comprendre le changement de qualité dû à l'interaction roche-eau ou à tout type d'influence anthropique. Les eaux souterraines sont souvent constituées de sept éléments chimiques majeurs  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$  et  $\text{SO}_4^{-2}$

### 3.2.1.1 Les paramètres physiques

#### 3.2.1.1.1 Température

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usages. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau.

La température doit être mesurée in situ. Les appareils de mesure de la conductivité ou du pH possèdent généralement un thermomètre intégré.

C'est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision.

En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et les mélanges éventuels, etc. En outre, cette mesure est très utile pour les études limnologiques. Et d'une façon générale, la température des eaux est influencée par l'origine dont elles proviennent. Elle est aussi un facteur important dans la production biologique, Ceci vient du fait qu'elle affecte les propriétés physiques et chimiques de celle-ci ; en particulier sa densité, sa viscosité, la solubilité de ses gaz (notamment celle de l'oxygène) et la vitesse des réactions chimiques et biochimiques.

#### 3.2.1.1.2 Turbidité

Certains paramètres physico-chimiques relatifs à la filtration, notamment la turbidité et le pH, sont parfois mesurés lors des études de détection des oocystes dans des échantillons environnementaux. La turbidité joue un rôle important dans la filtration et correspond généralement à la quantité de matières en suspension (MES) dans l'eau composée de limon, d'argile, de particules organiques et inorganiques, ainsi que du plancton et autres microorganismes (4).

L'appréciation du niveau quantitatif élevé de ces matières mesure le degré de turbidité. Il est également indiqué que les matières en suspension de dimensions inférieures à ces tailles sont celles qui jouent un rôle important dans le transfert des métaux. Elle permet de préciser les informations visuelles de la couleur de l'eau. La turbidité est causée par les particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques.....). Les désagréments causés par la turbidité auprès des usages est relative : certaines populations habituées à consommer une

eau très colorée n'apprécie pas les qualités d'une eau très claire. Cependant, une turbidité forte peut permettre à des micro-organismes de se fixer sur les particules en suspension : la qualité bactériologique d'une eau turbide est donc suspecte. La turbidité joue un rôle important dans la filtration et correspond généralement à la quantité de matières en suspension (MES) dans l'eau composée de limon, d'argile, de particules organiques et inorganiques, ainsi que du plancton et autres microorganismes.

#### **3.2.1.1.3 pH potentiel Hydrogène**

Le pH appelé encore potentiel Hydrogène mesure la concentration des ions  $H_3O^+$  dans une solution aqueuse. Le pH permet ainsi de connaître l'acidité de l'eau. Il a été rapporté que le pH (Kuhn et al, 2002) et la turbidité sont parmi les facteurs qui peuvent affecter la sensibilité de l'IMS, dont le facteur le plus important est la concentration en anhydride carbonique lié à la minéralisation et dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique du substrat et du bassin versant traversé. Il ressort que le pH n'a qu'un effet direct sur la survie et le transport des microorganismes pathogènes.

L'effet du pH du sol sur le transport des microorganismes pathogènes se manifeste principalement au niveau du processus d'adsorption.

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions  $H^+$  de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14.7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibre physico-chimique, et dépend de facteurs multiples, Les valeurs du potentiel Hydrogène se situent entre 6 et 8,5 dans les eaux naturelles.

#### **3.2.1.1.4 La conductivité électrique**

La conductivité représente l'un des moyens de valider les analyses physicochimiques de l'eau, en effet des contrastes de conductivité mesurés sur un milieu permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélange ou d'infiltration....

La conductivité est également fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente. Elle sert aussi d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. Et elle constitue une bonne appréciation de la minéralisation de l'eau. Une conductivité élevée une quantité de sels dissous très importante et elle donne une idée de la minéralisation d'une eau et elle est à ce titre un bon marqueur de l'Origine d'une eau.

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau.

Ce paramètre doit impérativement être mesuré sur le terrain. La procédure est facile, et permet d'obtenir une information très utile pour caractériser l'eau ( $X$  à  $25^\circ C$ )

Comme la température, des contrastes de conductivité mesurés sur un milieu permettent de mettre

en évidence des pollutions, des zones de mélanges ou d'infiltration

La conductivité est également un des moyens de valider les analyses physico-chimique de l'eau : la valeur mesurée sur le terrain doit être comparable à celle mesurée au laboratoire.

**Tableau 8:** Quelque indication sur la relation existant entre la minéralisation et la conductivité

Conductivité ( $\mu\text{S} / \text{cm}$ )	Minéralisation
Conductivité < 100	Minéralisation très faible
100 < Conductivité < 200	Minéralisation faible
200 < Conductivité < 300	Minéralisation moyenne
300 < Conductivité < 600	Minéralisation moyenne accentuée
600 < Conductivité < 1000	Minéralisation importante
Conductivité < 1000	Minéralisation élevée

### 3.2.1.1.5 Couleur

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. Les couleurs réelles et apparentes sont approximativement identiques dans l'eau claire et les eaux de faible turbidité.

### 3.2.1.1.6 Odeur

Le test de l'odeur ne constitue pas une mesure mais une appréciation et celle-ci a donc un caractère personnel, cette subjectivité ne peut être compensée que par la rigueur des essais et le nombre des expérimentateurs. Le test de l'olfaction est plus sensible et plus précis que celui de la dégustation. Mais il ne permet pas d'apprécier des variations de moins de 30% des teneurs des substances ayant une odeur. Il présente sur le test de saveur l'avantage de pouvoir être pratiqué sur l'eau brute et d'être moins fatigant pour les opérations.

## 3.2.1.2 Les paramètres chimiques

### 3.2.1.2.1 Ions majeurs

La minéralisation de la plupart des eaux est dominée par 8 ions, appelés couramment les majeurs. On distingue les cations : Calcium, Magnésium, Sodium, et Potassium, et anions : Chlorure, Sulfate, Nitrate, et bicarbonate. Les indications présentées dans ce paragraphe sont utiles pour interpréter les résultats d'analyses courantes .

- Les Cations

❖ **Calcium** : Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Composant majeur de la dureté de l'eau le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature de terrains traversés. Il existe surtout à l'état l'hydrogénocarbonate et en quantité moindre, sous forme de sulfates, chlorures, etc.

❖ **Magnésium** : Le magnésium est un des éléments les plus répandus dans la nature ; il constitue environ 2.1% de l'écorce terrestre.

La plupart de ses sels sont très solubles dans l'eau, même le carbonate peut être dissous jusqu'à 300 mg/l à 20°C. La teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées (calcaires, dolomitiques, du jurassique ou du trias moyen). Les valeurs les plus faibles sont relevées dans la plupart des eaux des massifs anciens.

Le magnésium constitue un élément significatif de la dureté de l'eau ; sa teneur dépasse rarement 15mg/l. Il est présent sous forme de carbonates et d'hydrogénocarbonates.

❖ **Sodium** : Le cation sodium ( $\text{Na}^+$ ) est très abondant sur la terre. On le retrouve dans les roches cristallines et les roches sédimentaires (sable, argile, évaporite). La roche Halite (évaporite  $\text{NaCl}$ ) est le sel de cuisine. Il est très soluble dans l'eau. Le sodium est par contre généralement peu présent dans les roches carbonatées.

Notons que les argiles peuvent être saturées en ions  $\text{Na}^{2+}$ , par le processus d'échange de bases.

❖ **Potassium** : Bien que dans les roches ignées la teneur en potassium soit presque aussi importante que celle du sodium, sa présence à peu près constante dans les eaux naturelles ne dépasse pas habituellement 10 à 15 mg/l.

- Les anions

❖ **Sulfate** : Mise en solution de roches sédimentaires évaporitiques, notamment le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ), mais également de la pyrite ( $\text{FeS}$ ) et plus rarement de roches magmatiques (galène, blende, pyrite). Les origines anthropiques sont la combustion de charbon et de pétrole qui entraîne une production importante de sulfures, et l'utilisation d'engrais chimique et lessive.

D'une façon générale, la présence de sulfate dans les eaux naturelles non polluées invoque la présence de gypse ou de pyrite.

Le soufre est un élément non métallique qui existe à l'état naturel dans les sols et les roches sous forme organique (soufre protéique) et à l'état minéral (sulfure, sulfates et soufre élémentaire). Le soufre se combine à l'oxygène pour donner l'ion sulfate, présent dans certains minéraux : gypse,

baryte...

La transformation réversible des sulfates en sulfures se fait grâce au cycle du soufre.

❖ **Chlorure** : La source principale de chlorure dans les eaux est due à la dissolution de roches sédimentaires qui se sont déposées en milieu marin et qui n'ont pas été complètement lessivées, et à la présence d'évaporites. L'invasion d'eau de mer, ainsi que les phénomènes d'évaporation dans les bassins endoréiques sont également des sources de chlorures possibles. Le rôle des roches cristallines dans la minéralisation en chlorures est faible.

L'apport par les précipitations est d'autant plus important que la distance à la mer est faible. Les apports anthropiques sont mineurs dans les zones d'intervention humanitaire. La teneur en ion chlore des eaux naturelles est essentiellement associée à celle du sodium.

Selon les normes marocaines, la concentration en cet élément ne devrait pas dépasser les 300 mg/l. Les eaux trop riches en chlorures sont laxatives et corrosives.

❖ **Nitrates et composés azotés** : Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) font partie du cycle de l'azote

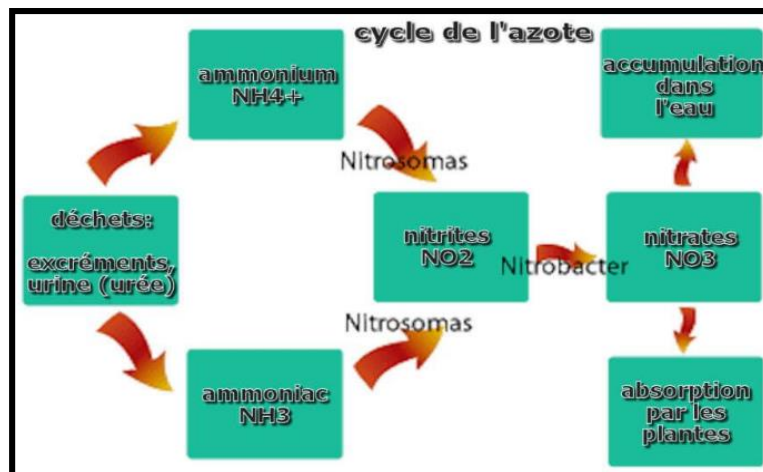


Figure 27: Cycle de l'azote

Le réservoir principal d'azote est l'atmosphère. Au niveau des eaux naturelles, l'azote provient essentiellement des pluies ( $1 < c < 3\text{mg/l}$ ) et du drainage des sols.

La minéralisation de la matière organique présente dans le sol est réalisée par des micro-organismes. L'azote minéral ainsi produit est ensuite transformé par des bactéries aérobies en nitrates (nitrification). Si conditions de milieu le permettent, les nitrates seront utilisés par des bactéries anaérobies comme source d'énergie et transformés en azote gazeux. Notons que les nitrates peuvent également s'adsorber et fixer sur les argiles et humus.

L'apport de nitrates dans le sol, puis dans les eaux, est donc fortement lié à la quantité de matière organique présente et aux conditions de milieu.

Les actions anthropiques sont donc importantes : utilisation d'engrais azotés et de lisier. De même, les rejets de stations d'épurations ou plus simplement de latrines et fosse septiques représentent un apport en matières organiques susceptibles de produire des nitrates.

L'analyse des nitrates dans les eaux permet d'obtenir des informations sur la présence de matières organiques dans le sol. En effet, les nitrates absorbés avec l'eau sont réduits en nitrites dans l'intestin et se fixent sur l'hémoglobine, diminuant ainsi le transfert d'oxygène.

L'échelle de concentration en nitrate des eaux souterraines s'étend sur une large gamme. Une eau souterraine dont le milieu permet la dénitrification peut être exempte de nitrates. Les nitrates sont présents dans l'eau par lessivage des produits azotés dans le sol, par décomposition des matières organiques, des engrais de synthèse ou naturels, elles peuvent également être liées à l'oxydation bactérienne de l'ammoniac.

Et en milieu naturel, sa concentration dépasse rarement 0,45 mg/l. Des valeurs supérieures indiquent des rejets d'eaux usées dans les milieux aquatiques superficielles et souterraines, et surtout une utilisation excessive de fertilisants utilisés en agriculture,

❖ **Alcalinité:** L'alcalinité correspond à l'ensemble des anions d'acides faibles susceptibles d'agir avec  $H^+$ . C'est un paramètre important, car il joue un rôle prépondérant sur l'effet tampon de l'eau souterraine. Il détermine la manière dont le pH va réagir à l'ajout d'acides ou de bases faibles dans l'eau, notamment lors des procédés de traitement.

### 3.2.1.2.2 Les éléments en trace

#### 3.2.1.2.2.1 Le Fer

Très répandu, le fer se classe au 4<sup>ème</sup> rang des éléments de la croûte terrestre. Il est largement utilisé dans la métallurgie et ses utilisations secondaires dans la chimie sont très variées. Les eaux de surface peuvent contenir jusqu'à quelque mg/l de fer ayant pour origine la lixiviation des terrains traversés ou les pollutions industrielles. Le fer peut se rencontrer jusqu'à 10 mg/l dans les eaux de sondage. Les eaux minérales et principalement les eaux thermo-minérales peuvent en contenir plus de 10 mg/l.

#### 3.2.1.2.2.2 Nitrite

Les nitrites proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque, la nitrification n'étant pas conduite à son terme, soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action de nitrifiante. Une eau qui renferme des nitrites est à considérer comme suspecte car lui est souvent associée une détérioration de la qualité microbiologique.

#### 3.2.1.2.2.3 Manganèse

Le manganèse est très répandu dans la nature. Les concentrations dans l'écorce terrestre peuvent varier de 500 à 600 mg/kg. Les minerais les plus connus sont la pyrolusite, la rhodocrosite, la

brunîtes. Certaines eaux souterraines ont des teneurs de l'ordre 1mg/l en particulier lorsqu'il y a support en milieu réducteur, ou sous l'action de certaines bactéries.

#### **3.2.1.2.2.4 Arsenic**

L'arsénié est assez largement réparti dans la biosphère : les roches ignées en contiennent de 1 à 10 mg/kg. Les phosphates naturels 20 mg/kg les charbons 45 mg/kg et les pyrites 5 à 6 g/kg. Il se présente principalement sous forme du sulfure.

#### **3.2.1.2.2.5 Zinc**

Le zinc se trouve dans les roches généralement sous forme de sulfure. Le minérale le plus répandu est le sulfure de zinc qui contient également du fer, du calcium, du manganèse et de l'arsenic. Les teneurs en zinc plus important dans les eaux à PH faible.

#### **3.2.1.2.2.6 Argent**

L'argent est présent dans de nombreux minérales, le plus souvent sous forme de sulfure, c'est un sous produit de l'extraction du cuivre, du plomb et du zinc.

#### **3.2.1.2.2.7 Aluminium**

La question de l'aluminium se pose essentiellement après traitement de l'eau avec un composé d'aluminium (coagulant). Même si aucun risque sanitaire n'a pu être prouvé, on évoque le rôle aggravant de l'aluminium dans la maladie d'Alzheimer.

D'après l'OMS, la présence d'aluminium à des concentrations supérieurs à 0.2 mg/l provoque souvent des plaintes de la part des consommateurs, en raison de la floculation de l'hydroxyde d'aluminium dans les canalisations et d'une concentration de la coloration de l'eau par le fer.

#### **3.2.1.2.2.8 Sulfure d'hydrogène**

L'hydrogène sulfuré est un toxique majeur par inhalation. Dans les eaux, la présence de ce gaz et de sulfures est susceptible de provenir soit d'eau usée, soit de pollutions industrielles.

#### **3.2.1.2.2.9 Le cuivre**

Le cuivre se présente dans la nature sous forme de minérale de cuivre natif. De minerais oxydés ou sulfurés, à l'air, il se recouvre d'une mince couche de carbonate basique.

#### **3.2.1.2.2.10 Le fluor**

Le fluor dans les eaux souterraines est l'apatite présente dans les bassins phosphatés, et la fluorine présente dans les roches magmatiques alcalines et dans des filons. Les zones de thermalisme sont également fréquemment concernées.

C'est essentiellement le temps de contact entre roche et eau souterraine, ainsi que contrôles chimiques qui sont la cause principale des concentrations élevées en iode.

Le fluor est reconnu comme essentiel dans la prévention des caries dentaires. Cependant, une ingestion régulière d'eau dont la concentration en fluor est supérieure à 2mg/l.

#### **3.2.1.2.3 Dureté**

Dureté de l'eau semble venir de ce qu'il était dur de laver avec une telle eau.

Sauf exception très particulière, la dureté à un caractère naturel lié au lessivage des terrains traversés et correspond à la teneur en calcium et en magnésium.

#### **3.2.1.2.4 Oxygène dissous**

L'eau absorbe autant d'oxygène que nécessaire pour que la pression partielle d'oxygène dans liquide et l'air soit en équilibre. La solubilité de l'oxygène dans l'eau est fonction de la pression atmosphérique, de la température et de la minéralisation de l'eau, la saturation en O<sub>2</sub> diminue lorsque la température et l'altitude augmente.

Alors qu'une eau chargée en matières organiques dégradables par des micro-organismes est sous saturée. En effet, la forte présence de matières organiques dans l'eau souterraine permet aux micro-organismes de se développer tout en consommant de l'oxygène.

#### **3.2.1.2.5 Oxygène**

L'oxygène dissous est donc un paramètre utile dans le diagnostic biologique du milieu eau. L'ensemble de ces paramètres permet d'estimer la quantité de matière organique présente dans l'eau souterraine.

#### **3.2.1.2.6 DBO, DCO**

La DBO exprime la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation de la matière organique biodégradable d'une eau par le développement de micro-organismes, dans des conditions données. D'après CHAPMAN et al. (1996), la DBO<sub>5</sub> des eaux naturelles est inférieure à 2mg/l.

La DCO exprime la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder la matière organique, d'une eau à l'aide d'un oxydant : le bichromate de potassium.

La demande biochimique en oxygène est la quantité d'oxygène dissous consommée par les micro-organismes, à l'obscurité à 20 °C pendant 5 jours. Il permet l'évaluation des matières organiques biodégradables.

### **3.2.1.3 Représentation graphique des résultats d'analyses**

Les résultats d'analyse physico-chimique sont présentés sous formes de diagrammes qui autorisent une interprétation aisée. On distingue plusieurs types de diagrammes

#### **3.2.1.3.1 Le diagramme de Piper**

Il permet de présenter sur un même schéma un grand nombre d'analyse qui peuvent être comparées visuellement de façon simple. Les unités de mesure utilisées dans le diagramme Piper sont % de mg/l.

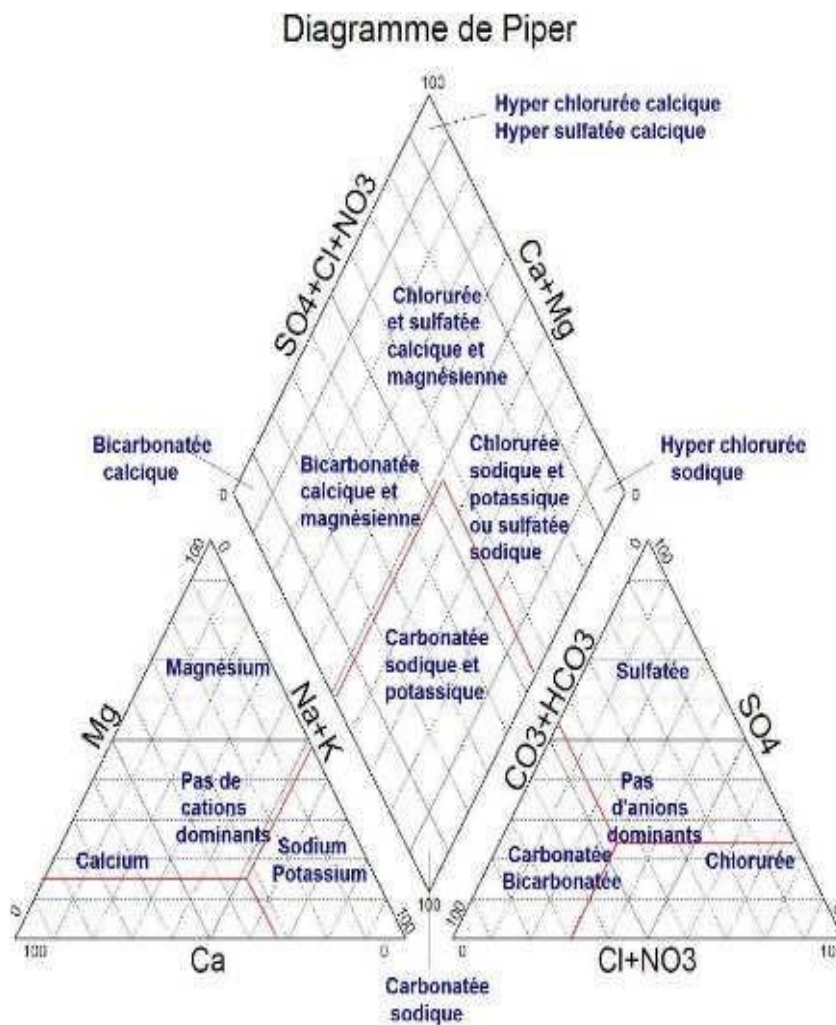


Figure 28 : Diagramme de Piper

### 3.2.1.3.2 Le diagramme de Scholler-Berkaloff

Ne permet pas présenter un nombre important d'analyses, mais autorise une comparaison quantitative des analyses : l'unité utilisée n'est plus un rapport (%) mais le meq/l ou. Les échelles de valeur sont graduées dans les deux unités.

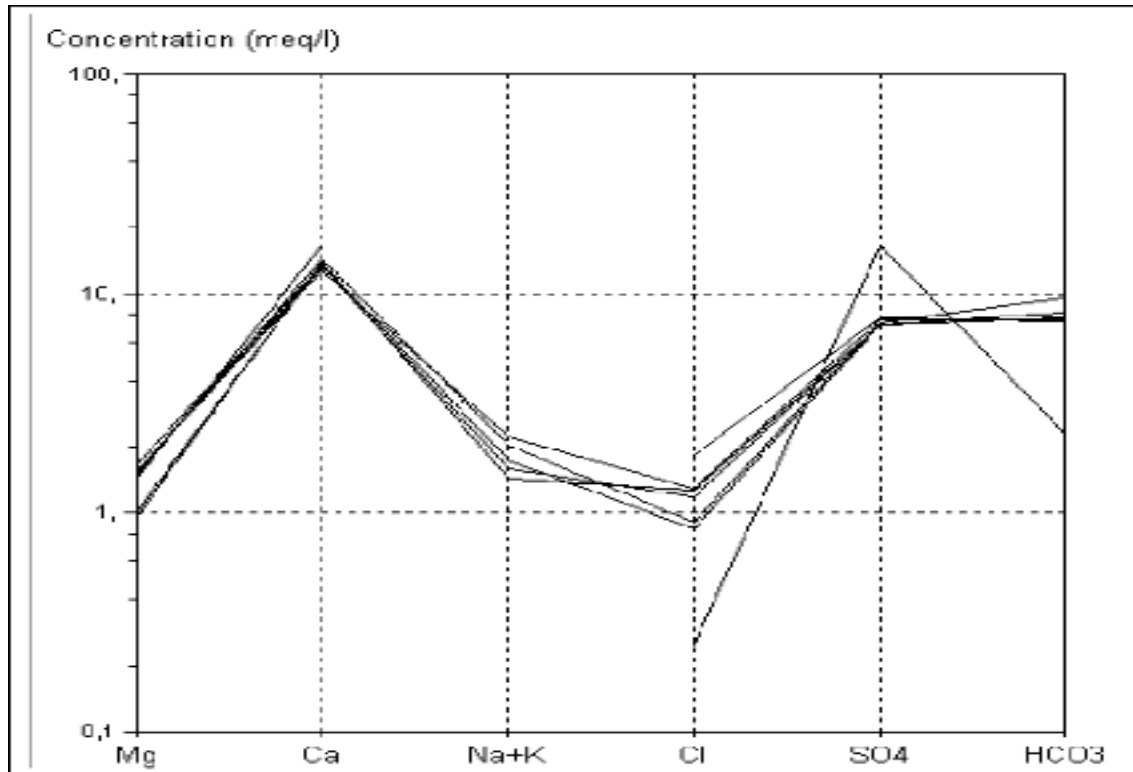


Figure 29: Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF

### 3.2.1.3.3 Le diagramme de STIFF

Très utilisé par les anglo-saxons, est semblable à celui de Scholler-Berkaloff quand à son intérêt.

Les unités sont exprimées en meq/l.

Il est bien entendu possible de présenter les résultats sur des diagrammes plus classiques.

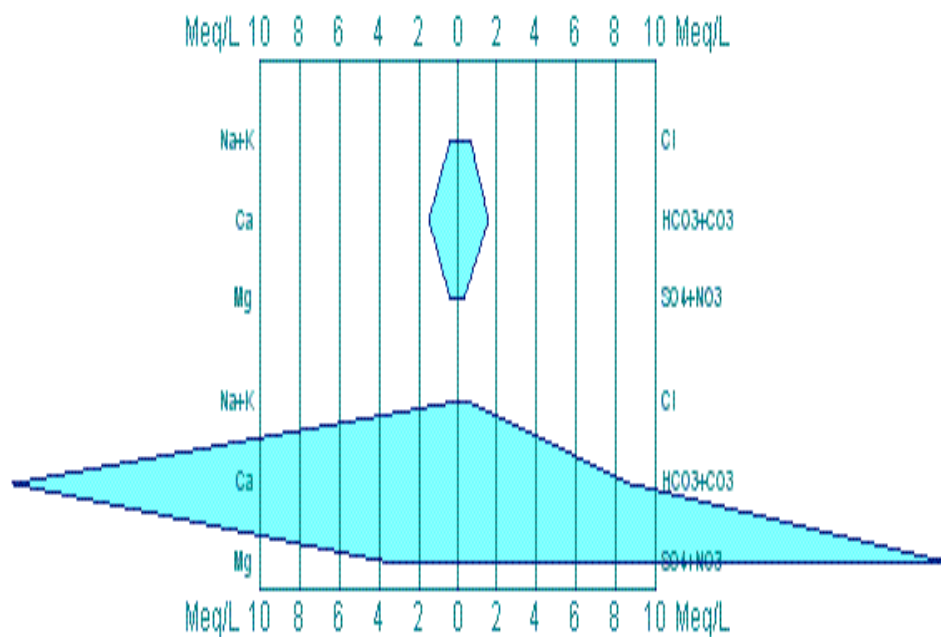


Figure 30 : Diagramme de STIFF

Il y a aussi des analyses statistiques qui peuvent se faire pour renforcer les résultats

Par exemple

L'analyse en composantes principales (ACP), qui est une méthode complémentaire aux approches classiques de la recherche hydrogéochimique, permet une visualisation rapide et montre une corrélation entre différentes variables de qualité de l'eau.

### 3.2.2 Qualité microbiologique des eaux souterraines

L'existence de microbes dans les eaux souterraines peut avoir plusieurs origines. Si certaines souches sont présentes à l'état naturel, d'autres proviennent en revanche de l'infiltration dans le sol de matières organiques provenant de fosses septiques, de décharges, d'épandages agricoles ou des réseaux d'assainissement.

Leur développement est toutefois limité par les conditions anaérobies qui sont généralement rencontrées en milieu souterrain. Il est à signaler que la vulnérabilité des aquifères de type karstique par rapport aux pollutions microbiologiques est plus forte car leur capacité épuratrice est souvent faible voire nulle.

A présent l'eau de la source respecte l'ensemble des exigences de qualité réglementaires et sanitaires elle peut être consommée sans restriction d'usage.

et le dénombrement des bactéries indicatrices de la contamination fécale : coliformes totaux (CT), coliformes fécaux (CF), streptocoques fécaux (SF), et *Clostridium perfringens* (CP) a été réalisé selon les techniques décrites par Rodier(1984).

Les organismes pathogènes qui peuvent être présents dans l'eau souterraine sont très nombreux et très variés. Leur présence est toujours liée à une pollution fécale de l'eau, de plus leur durée de vie dans l'eau est parfois très courte.

### 3.2.3 Les normes de la qualité des eaux

Les normes de qualité présentées dans les tableaux suivants font référence aux notons de substances dont la présence l'eau revêt une importance sanitaire et substance et paramètres pouvant donner lieu à des plaintes des utilisateurs issues de l'OMS. Néanmoins, dans les différents commentaires des directives de l'OMS, un nombre important de précautions et de dispositions sont prises pour monter que :

- 1- les valeurs indiquées doivent être utilisées en tenant compte du contexte local : structures des terrains, niveau de service local.
- 2- les circonstances exceptionnelles n'autorisent pas à respecter ces valeurs : guerre, catastrophe naturelle....

Aussi, il est indispensable de faire preuve de bon sens dans l'utilisation de ces normes.

Les tableaux suivants ont été construits à partir de la nomenclature de l'OMS. Les valeurs guides sont données d'après les Directives de qualité pour l'eau de boisson, 2<sup>ème</sup> édition 1994 OMS, et correspondent aux principaux paramètres retenus dans les normes de qualité d'eau de boisson. Les paramètres difficiles à mesurer et qui ne présentent pas de problème fréquents ne sont pas mentionnés. Il est cependant nécessaire de rester vigilant, notamment en zone urbaine ou

industrialisée. Il est recommandé de contacter des personnes spécialisées en cas de problème spécialisées en cas de problème spécifique, et de se référer aux différents normes qui proposent des valeurs guides d'éléments dangereux pour la santé non mentionnés dans cet ouvrage.

L'eau, élément vital s'il en est, est aussi agent efficace de transport et de dissémination de la pollution et des maladies. C'est pourquoi nous devons prendre garde avec un soin extrême et une vigilance constante de sa qualité et de sa potabilité.

La qualité de l'eau potable ou celui destiné à l'alimentation en eaux potables suscitent des inquiétudes pour la santé humaine dans des pays développés ou en voie de développement ; il devrait être exempté des impuretés et des agents pathogènes comme les bactéries.

**3.2.4 Substances chimiques dont la présence dans l'eau de boisson**

**Tableau 9:** Substance chimiques dont la présence dans l'eau de boisson revêt une importance sanitaire

Paramètres	Valeurs guide OMS (mg/l)	Les directives du conseil des communautés européennes (mg/l)	La réglementation Française (mg/l)	Les normes algériennes
Calcium	Pas de norme	100	100	75
Magnésium	Pas de norme	30	50	Pas de norme
Manganèse	0.5	0.02	0.05	
Nitrites	3	0.1	0.1	Pas de norme
Chlore	250	200	200	
Arsenic	0.01	0.05	0.05	0.05

### 3.2.5 Substance et paramètre de l'eau de boisson

Tableau 10: Paramètres physiques (organoleptiques)

Paramètre	Valeurs guide l'OMS	Les directives du conseil des communautés européennes	La réglementation	Les normes algériennes
Couleur	15 unités 15 mg/l pt	20 unités 20 mg/l pt	15 unités 15 mg/l pt	25 unités 25 mg/l pt
Gout et odeur	Acceptable	2 à 12 c° et 3 à 25 c°	2 à 12 c° et 3 à 25 c°	4 à 25 c°
Turbidité	5 NTU	4 Jackson	2 Jackson	5 NTU
température	Acceptable			

### 3.2.6 Substances inorganiques

Tableau 11: Substances inorganiques

Paramètre	L'OMS	Les directives du conseil des communautés européennes (mg/l)	La réglementation Française (mg/l)	Les normes algériennes
Dureté (Ca <sup>+</sup> Mg <sup>+</sup> )	Pas de norme	60 mg/l	15 degrés français	100 mg/l
Phosphate PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Pas de norme	0.4 mg/l	0.4 mg/l	Pas de norme
Potassium k <sup>+</sup>	Pas de norme	12 mg/l	12 mg/l	Pas de norme
Sulfates SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	250mg/l	250 mg/l	250 mg/l	200 mg/l
Fer(fer)	0.3 mg /l	0.2 mg/l	0.2 mg/l	0.3 mg/l
Oxydabilité	Pas de norme	2 mg/l d'O <sub>2</sub>	5 mg/l	Pas de norme
Oxygène	Pas de norme	75% les eaux	75% les eaux	5 mg/l
Dissous O <sub>2</sub>	norme	souterraines	Souterraines	
PH	<8	6.5 ≤ PH ≤ 9	6.5 ≤ PH ≤ 9	6.5 ≤ PH ≤ 9

Aluminium	0.2 mg/l	0.2 mg/l	0.2 mg/l	Pas de norme
Sulfure (H <sub>2</sub> S)	0.05 mg/l	Pas de norme	Pas de norme	
Chlorure	250 mg/l	200 mg/l	200 mg/l	200 mg/l
Sodium (Na)	200 mg/l	200 mg/l	150 mg/l	Pas de norme

### 3.2.7 Eau destinée à l'irrigation

Les eaux destinées à l'irrigation doivent répondre à certains critères de qualité pour minimiser les risques de salinisation des terrains. Deux méthodes simplifiées permettent d'estimer l'aptitude de l'eau à l'irrigation, en fonction du type de sol.

#### 3.2.7.1 Conductivité

La mesure de la conductivité de l'eau permet de faire une estimation de sa minéralisation, et donc la quantité de sels dissous apportés au sol. Cette mesure est cependant incomplète car elle n'intègre pas le type de minéraux apportés.

Le tableau ci-dessous présente des classe d'aptitude de l'eau à irrigation, modifié d'après US

**Tableau 12 :** Conductivité et eau d'irrigation

Class e	Conductivité μS/cm à 25 °C	Remarque
C1	0 < C < 250	-faible minéralisation de l'eau - utilisation sur la plupart des cultures et dessols.
C2	250 < C < 750	-minéralisation moyenne -utilisation sur sols modérément lessivé et plantes moyennement tolérantes au sels.
C3	750 < C < 2250	-eau salée -utilisation sur sols bien drainée et plantes tolérantes au sels . -contrôle de l'évolution de la salinité obligatoire.
C4	2250 < C < 5000	-minéralisation forte. -utilisation non souhaitable en agriculture.

3.2.7.2 SAR

1. Le diagramme de River Side est construit en croissant le SAR (Sodium Absorptions Ratio) calculé et la conductivité mesuré (figure n°7). Les expérimentaux sont reportés dans le diagramme, et l'indice croisé Cn-Sn est obtenu qui indique l'aptitude des eaux d'irrigation en fonction de cet indice croisé.

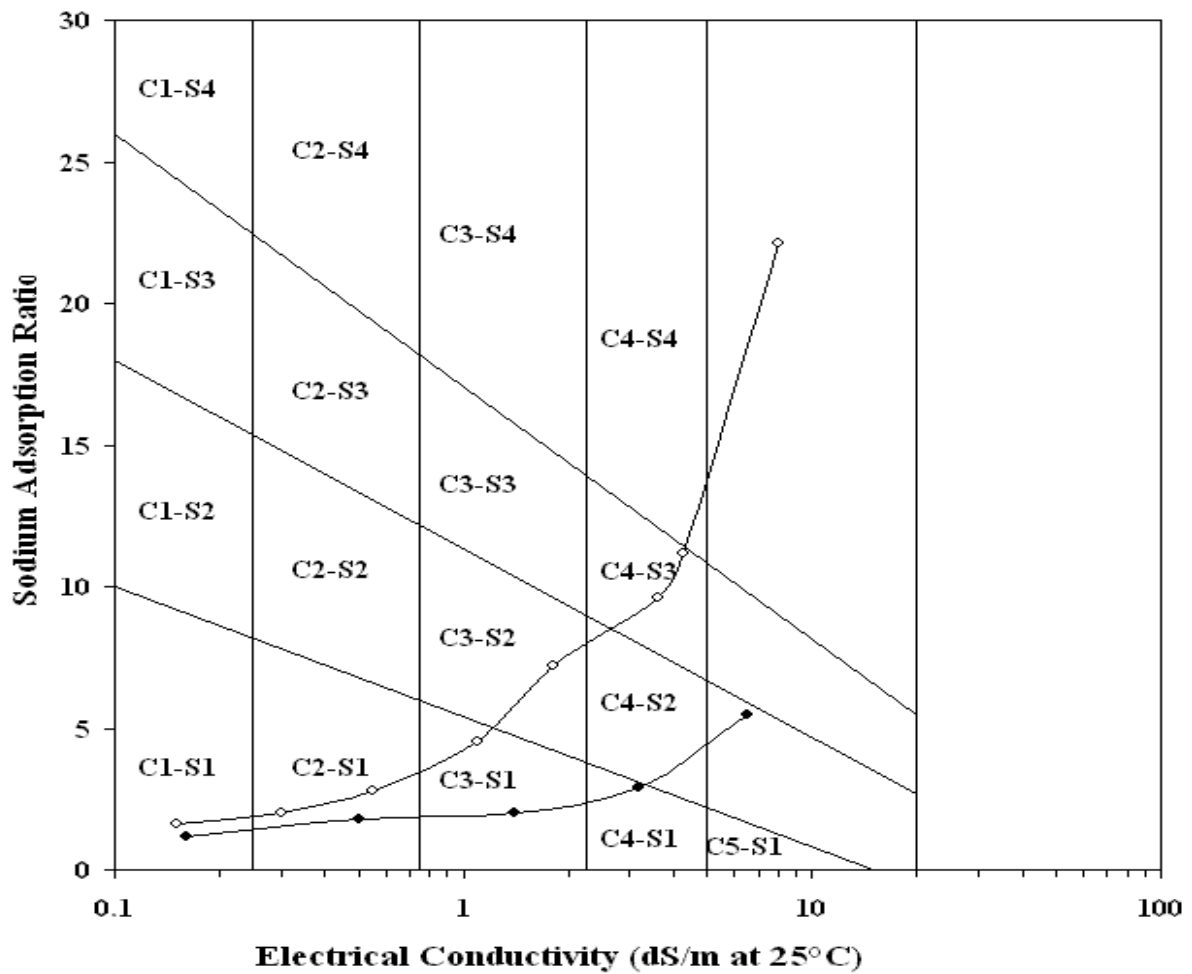


Figure 31: Diagramme de River Side

**Tableau 13:** Indice croisé SAR/Conductivité

Indice croisé SAR/Conductivité	Indication
C1-S1	-eau utilisable pour la plupart des espèces cultivées et des sols.
C1-S2	-eau utilisable pour la plupart des espèces cultivées. -le sol doit être bien drainées et lessivé
C1-S3	-le sol doit être bien préparé, bien drainé et lessivé, ajoute de matières organiques. -la teneur relative en Na peut être améliorée par la jonction de Gypse.
C1-S4	-eau difficilement utilisable dans les sols peu perméables. -le sol doit être bien préparé, très bien drainé et lessivé, ajoute de matières organiques. -la teneur relative en Na peut être améliorée par la jonction de Gypse.
C2-S1	-eau convenant aux plantes qui présentent une légère tolérance eu sel.
C2-S2	-eau convenant aux plantes qui présentent une légère tolérance eu sel. -sol grossier ou organique à bonne perméabilité.
C2-S3	-eau convenant aux plantes qui présentent une certaine tolérance eu sel. -sol grossier et bien préparé (bon drainage, bon lessivage, addition de matières organiques). -la jonction périodique de Gypse peu être bénéfique.
C2-S4	-eau ne convient généralement pas pour l'irrigation.

C3- S1	-eau convenant aux plantes qui présentent une bonne tolérance au sel. -sol bien aménagé (bon drainage). -contrôle périodique de l'évolution de la salinité.
C3- S2	-eau convenant aux plantes qui présentent une bonne tolérance au sel. -sol grossier ou organique à bonne perméabilité, bon drainage. -contrôle périodique de l'évolution de la salinité. -la jonction périodique de Gypse peut être bénéfique.
C3- S3	-espèces tolérantes au sel. -sol très perméable et bien drainé.
C3-	-eau ne convient pas l'irrigation.
C4- S1	-eau ne convient pas à l'irrigation dans des conditions normales. -peut être utilisée si les espèces ont une bonne tolérance à la salinité et le sol particulièrement bien drainé.
C4- S2	-eau ne convient pas à l'irrigation dans des conditions normales. -peut être utilisée si les espèces ont une très bonne tolérance à la salinité et le sol particulièrement bien drainé
C4- S3	-eau ne convient pas l'irrigation.
C4-	-eau ne convient pas l'irrigation.

## 4 CHAPITRE IV. Impact environnemental

### 4.1 Géochimie de l'eau souterraine

Tout au long de son cycle, l'eau est soumise à des processus successifs qui modifient sa composition chimique et affecte ainsi sa qualité. Les processus hydrogéochimiques sont généralement contrôlés ou influencés par différents facteurs tels que la dissolution de certains minéraux présents dans les roches et dans les sols, l'infiltration et l'écoulement de l'eau dans l'aquifère, les interactions entre les minéraux dissous et avec la matière organique, et la salinisation des eaux lorsque l'eau souterraine est en contact prolongé avec des argiles d'origine marine. Plus le temps de résidence de l'eau dans un aquifère est long et plus elle atteint des couches profondes, plus elle sera chargée en minéraux dissous. Selon les processus auxquels elle est soumise, l'eau souterraine acquiert ainsi une signature géochimique particulière en fonction du milieu où elle se trouve et de ceux qu'elle a traversés le long de son parcours. Ces signatures permettent de retracer l'origine des eaux souterraines, l'histoire de leurs interactions et leur âge.

#### 4.1.1 Types d'eau souterraine

Les types d'eau sont indicateurs de l'origine des eaux souterraines (Figure 21). Par exemple, les eaux souterraines de type bicarbonaté-calcique ( $\text{Ca-HCO}_3$ ), liées à la dissolution des carbonates par les eaux météoriques, sont les plus fréquentes au Québec. Elles se situent surtout dans les zones préférentielles de recharge car les aquifères à nappe libre renferment généralement des eaux souterraines moins âgées et moins minéralisées que les aquifères à nappe captive.

À l'inverse, les eaux plus anciennes et profondes sont souvent de type chloruré-sodique ( $\text{Na-Cl}$ ) car leur long temps de résidence leur confère une salinité élevée caractéristique des saumures ou des eaux d'origine marine. Les échantillons d'eau d'origine marine proviennent entre autre des nappes captives situées sous la plaine argileuse des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les chlorures peuvent aussi tirer leur origine des activités anthropiques telles que l'épandage de sels déglaçant, et peuvent donc se retrouver aussi dans les eaux de recharge récentes.

Les eaux de type sulfaté-sodique ( $\text{Na-SO}_4$ ) ont une évolution intermédiaire entre les types bicarbonaté-calcique et chloruré-sodique. Elles résultent des processus d'échanges cationiques entre le calcium et le sodium et de la dissolution de minéraux contenant du soufre communément présents dans la roche, tels la pyrite par exemple. Elles cheminent ensuite pour se mélanger graduellement avec les eaux salines profondes.

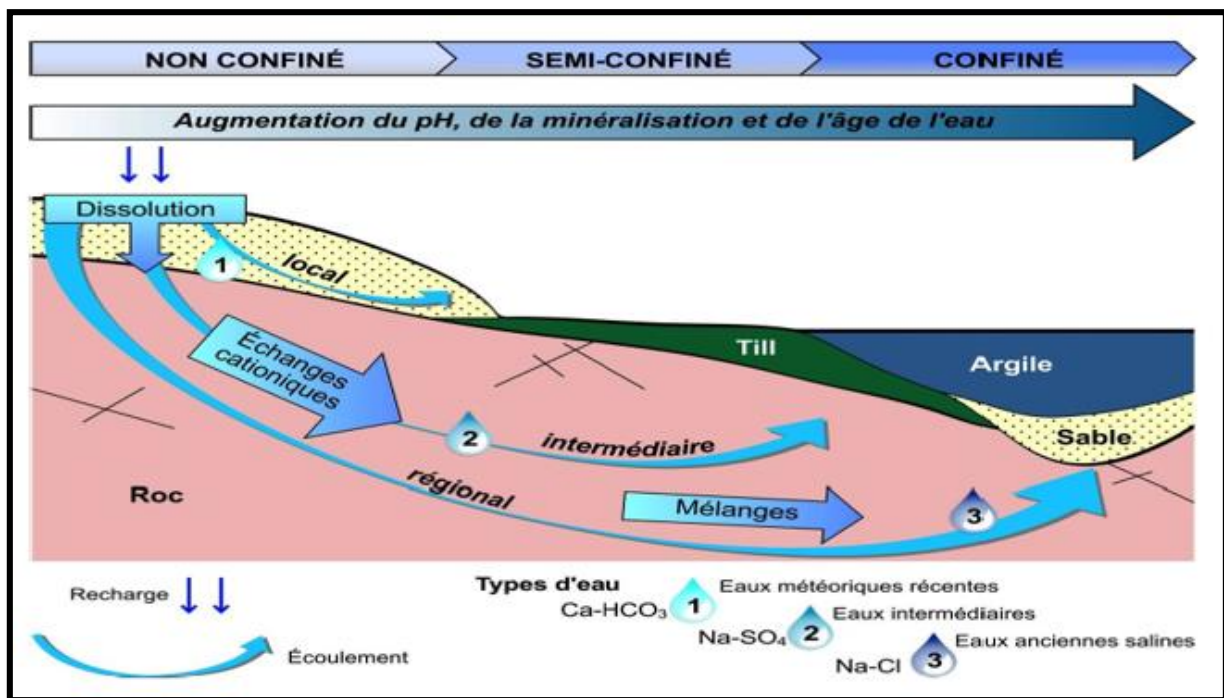


Figure 32 : Evolution géochimique des eaux souterraines

#### 4.2 Qualité de l'eau de surface

Les eaux de surface sont celles qui se trouvent à la surface de la planète. Ceci est produit par le ruissellement généré par les précipitations ou l'affleurement des eaux souterraines. Ils peuvent survenir de manière rapide, comme dans le cas de ruisseaux, rivières et fleuves, ou plus lentement s'il s'agit de lacs, de plans d'eau, de réservoirs, de lagunes, de zones humides, d'estuaires, d'océans et de mers.

Aux fins de la réglementation, une eau de surface est généralement définie comme toute eau ouverte à l'atmosphère et sujette au ruissellement. Une fois produite, l'eau de surface suit le chemin qui offre le moins de résistance. Une série de ruisseaux, ruisseaux et fleuves et rivières amènent l'eau des zones en pente vers un cours d'eau important.

Une zone de drainage est souvent appelée un bassin de drainage ou un bassin versant.

La qualité de l'eau est fortement influencée par la pointe du bassin dans laquelle elle est détournée pour son utilisation. La qualité des ruisseaux, des rivières et des ruisseaux varie en fonction des débits saisonniers et peut changer considérablement en raison des précipitations et des déversements accidentels. Les lacs, les réservoirs, les réservoirs et les lagunes contiennent en général moins de sédiments que les rivières, mais sont soumis à des impacts plus importants du point de vue de l'activité microbologique. Des masses d'eau, telles que des lacs et des réservoirs, vieillissent pendant une période relativement longue en raison de processus naturels.

Ce processus de vieillissement est influencé par l'activité microbologique qui est directement liée aux niveaux de nutriments dans le corps de l'eau et peut être accélérée par l'activité humaine.

Les utilisations des eaux de surface non salines sont reconstituées par les précipitations et par le recrutement dans les eaux souterraines. Il est perdu par évaporation, infiltration dans le sol où il devient une eau souterraine, utilisé par les plantes pour la transpiration, extrait par l'homme pour l'agriculture, la vie humaine, l'industrie, etc. ou rejeté dans la mer où il devient salin.

#### 4.2.1 Types d'eau de surface

Trois types principaux d'eaux de surface peuvent être distingués :

- les **eaux lotiques** : sont les masses d'eau qui vont toujours dans le même sens que les rivières, les sources, les ruisseaux et autres cours d'eau. Si les débits d'eau sont puissants avec un courant fort, les eaux sont rhéophiles (rapides).
- les **eaux lenticques**: appartiennent aux eaux intérieurs calmes ou stagnantes, des eaux continentales, tels que lacs, lagunes, étangs, zones humides et marécages.
- les **eaux artificielles** : qui définit les masses d'eau de surface qui n'ont pas été modifiées par des actions anthropiques.

Les eaux de surface peuvent être classées comme artificielles (masse d'eau de surface créée par l'activité humaine) ou hautement modifiées (masse d'eau de surface qui, à la suite de modifications physiques produites par l'activité humaine, a subi une modification substantielle dans sa nature). Dans ces cas, les eaux superficielles interviennent dans les cas suivants :

- Il y a eu des changements importants dans les caractéristiques hydromorphologiques de la masse d'eau. Cela intervient lors de travaux de construction destinés à la navigation, d'installations portuaires ou de loisirs, d'alimentation en eau potable, de production d'énergie ou d'irrigation, de régulation de l'eau, de protection contre les inondations, de drainage des sols ou d'autres activités économiques.
- Les avantages découlant des caractéristiques artificielles ou modifiées de la masse d'eau ne peuvent pas être raisonnablement obtenus, en raison des possibilités techniques ou des coûts disproportionnés pour les atteindre, dans le respect de la présence environnementale de la région. Il conviendrait d'étudier d'autres solutions de remplacement pour l'utilisation des ressources en eau, qui constituent une option plus respectueuse de l'environnement.

Les eaux utiles sont des eaux de surface ou des eaux souterraines constituant une ressource utilisable. Ce sont des eaux douces.

### 4.3 L'interaction eau souterraine et eau de surface :

Presque toutes les eaux de surface (rivières, lacs, réservoirs et zones humides) interagissent avec les eaux souterraines. Ces interactions peuvent prendre plusieurs formes, dans certains cas, les eaux de surface acquièrent de l'eau ou / et des solutés provenant de systèmes d'eau souterraine et dans d'autres, elles peuvent être une source de recharge des nappes et peuvent affecter la qualité des eaux souterraines.

En ce qui concerne les ressources en eau et l'environnement, il est important de considérer les eaux souterraines et les eaux de surface comme une ressource unique.

Par conséquent la compréhension de leur interaction est essentielle pour la gestion des ressources en eau dans les bassins versants fluviaux et lacustres, même si il est difficile d'observer ou de mesurer ces échanges.

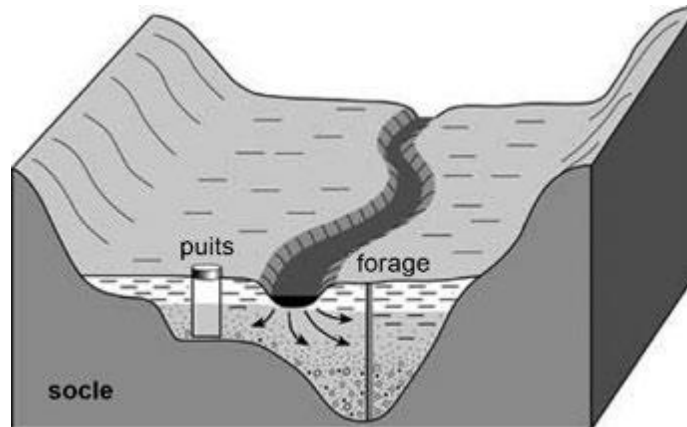
La contribution des nappes à l'écoulement total des eaux de surface varie considérablement parmi les écoulements de surface, mais les hydrologues estiment que la contribution moyenne se situe entre 40 et 50% dans les petits et moyens écoulements. De même, l'apport de l'eau de surface via l'infiltration, à travers les lits de cours d'eau et de lac, vers les nappes est tout aussi important, en particulier dans les climats arides et semi-arides. Certaines interactions des eaux de surface et eaux souterraines sont décrites ci-dessous.

L'interaction des eaux de surface et des eaux souterraines est souvent une préoccupation majeure pour les organismes de bassin, car ils mettent l'accent sur la gestion des eaux de surface; de telles interactions impactent directement sur les ressources en eau de surface qu'ils ont quantifiées et allouées.

### 4.4 Nappe alluviale dans les vallées fluviales.

L'eau souterraine dans l'environnement de vallée fluviale tend à se former dans les dépôts alluviaux associés au chenal fluvial (Figure 3.4), et cette eau souterraine est généralement peu profonde et facilement accessible à proximité de la rivière. Ces aquifères ont généralement une extension latérale limitée et une profondeur faible.

Dans de nombreuses régions d'Afrique (Nord Cameroun, bassin du lac Tchad, Botswana) d'épais sédiments déposés dans le chenal de rivières contiennent des quantités importantes d'eau souterraine. Une perméabilité favorable et des caractéristiques particulières de la porosité des sables alluvionnaires du lit, combinées à la recharge régulière provenant de l'écoulement de surface, font que ces aquifères sont très productifs.



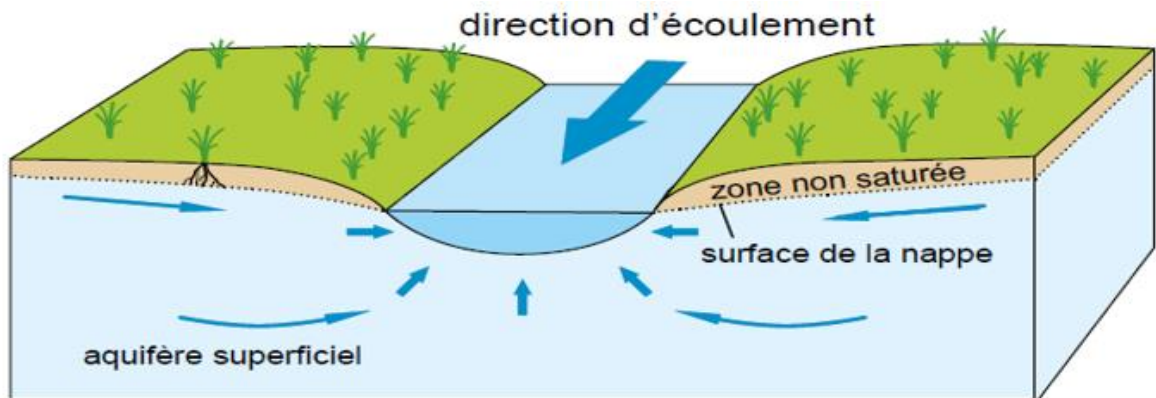
**Figure 33 :** L'eau souterraine dans les dépôts alluviaux de rivière

Lorsque la saison des pluies est terminée, ces «rivières de sable» ou «oueds» sont généralement à sec, mais les sédiments grossiers sous-jacents du chenal de rivière et des plaines inondables, sont en fait d'importantes sources d'eau domestique et d'irrigation pour les communautés locales (figure 31). Dans les grands bassins alluviaux, comme dans la vallée du Nil, les eaux souterraines sont stockées dans des séquences sédimentaires plus vastes et plus épaisses qui forment des aquifères régionaux importants. Ils sont constitués de matériaux non consolidés avec des couches de sable alternant avec du sable argileux ou de l'argile sableuse. En raison de la proximité immédiate entre les aquifères alluviaux et les chenaux fluviaux, il y a une interaction continue et rapide entre les nappes alluviales et l'écoulement de la rivière. Les prélèvements des eaux souterraines de ces systèmes alluviaux aura une incidence sur le débit du fleuve, ce qui a été évoqué comme une préoccupation croissante par de nombreuses autorités de bassin.

#### **4.5 Comment la nappe souterraine peut interagir avec des rivières et ruisseaux ?**

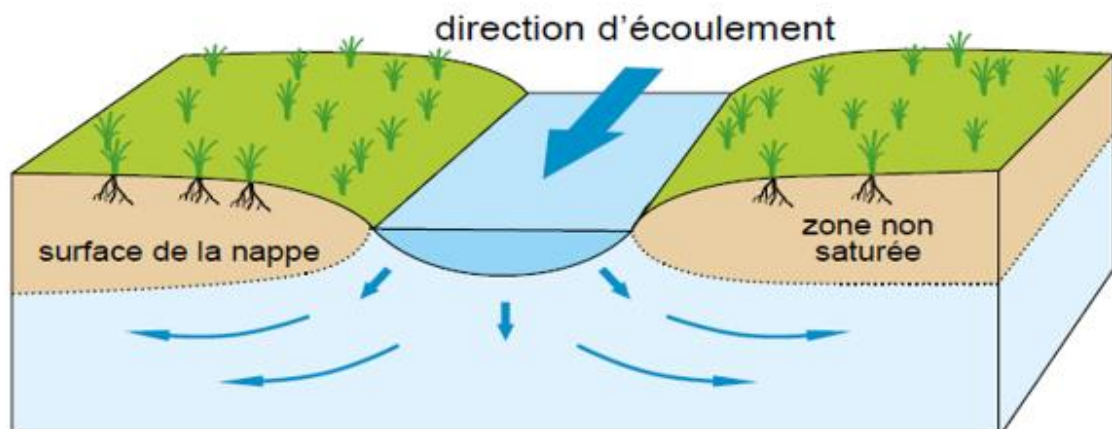
Les interactions entre les rivières et les eaux souterraines ont lieu de trois façons :

- Les rivières acquièrent de l'eau provenant du flux entrant des eaux souterraines à travers le lit de la rivière (Figure 34), ou;
- Les rivières perdent de l'eau au profit de la nappe phréatique par des flux sortants à travers le lit de la rivière (Figure 35), ou;
- Dans certains environnements, les rivières peuvent quelque fois gagner de l'eau provenant de la nappe phréatique, et en d'autres moments, elles pourraient en perdre au profit de la nappe.
- De même, dans certains tronçons fluviaux on peut noter un flux entrant, tandis que sur d'autres tronçons du même système de rivière il peut y avoir perte d'eau.



**Figure 34 :** La rivière reçoit de l'eau de la nappe phréatique

Dans le premier cas, le niveau de la nappe phréatique près de la rivière doit être supérieur à celui de la rivière. En revanche pour le second cas (perte d'eau des rivières), le niveau de la nappe phréatique au voisinage de la rivière doit être inférieur à celui de la rivière.

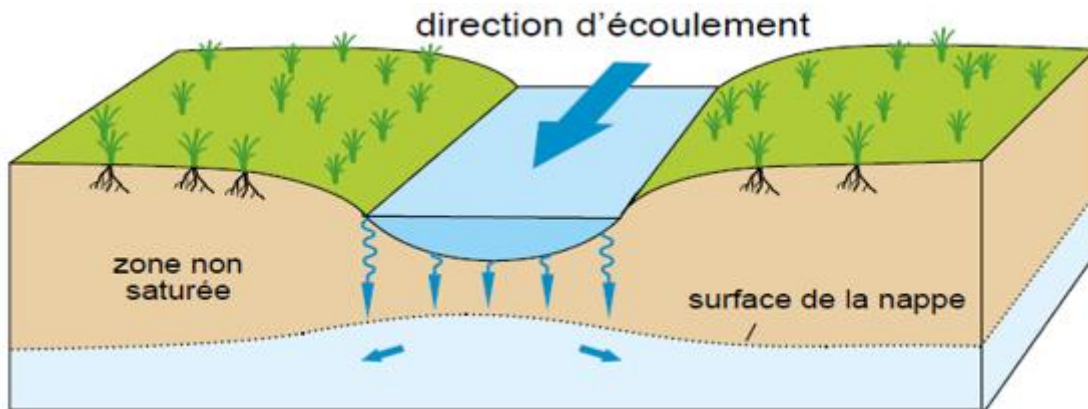


**Figure 35 :** Les rivières perdent de l'eau au profit du système des eaux souterraines

Les ruisseaux qui perdent de l'eau peuvent être reliés à la nappe par une zone saturée continue (Figure 35) ou ils peuvent tout aussi être déconnectés par une zone non saturée (figure 36). Il y a un type d'interaction entre les eaux souterraines et les rivières qui a lieu souvent à un moment ou à un autre, par une augmentation rapide du niveau de la rivière qui fait que l'eau passe du lit de la rivière aux berges. Ce processus, appelé emmagasinement des berges, est habituellement causée par une pluie abondante, ou des lâchers d'eau rapides (par exemple, des barrages hydroélectriques).

Le fait d'exploiter les aquifères peu profonds qui sont directement liés aux eaux de surface peut avoir un effet significatif sur la relation entre ces deux plans d'eau. Les effets de pompage d'un seul forage ou un petit groupe de forages sur le régime hydrologique sont à l'échelle locale.

Cependant, les impacts de nombreux forages pompant l'eau d'un aquifère sur de grandes zones, peuvent être d'envergure régionale.



**Figure 36 :** Une rivière séparée de la nappe d'eau souterraine par une zone non saturée

#### 4.6 Recharge et décharge, alimentations et pertes dans un système hydrogéologique

La recharge et la décharge sont les voies par lesquelles l'eau pénètre ou quitte un système hydrogéologique. La compréhension et la quantification de ces phénomènes sont fondamentales pour comprendre la nature de l'ensemble du système des eaux souterraines et être en mesure de prévoir d'éventuels changements. La recharge provient essentiellement des précipitations et de l'infiltration des masses d'eaux superficielles, telles que ruisseaux, rivières, étangs et lacs. Les principales voies de décharge se trouvent dans le drainage par les masses d'eaux superficielles telles que ruisseaux, rivières, étangs, lacs et océans, dans le pompage des puits et dans l'évapotranspiration.

##### 4.6.1 Recharge par les précipitations

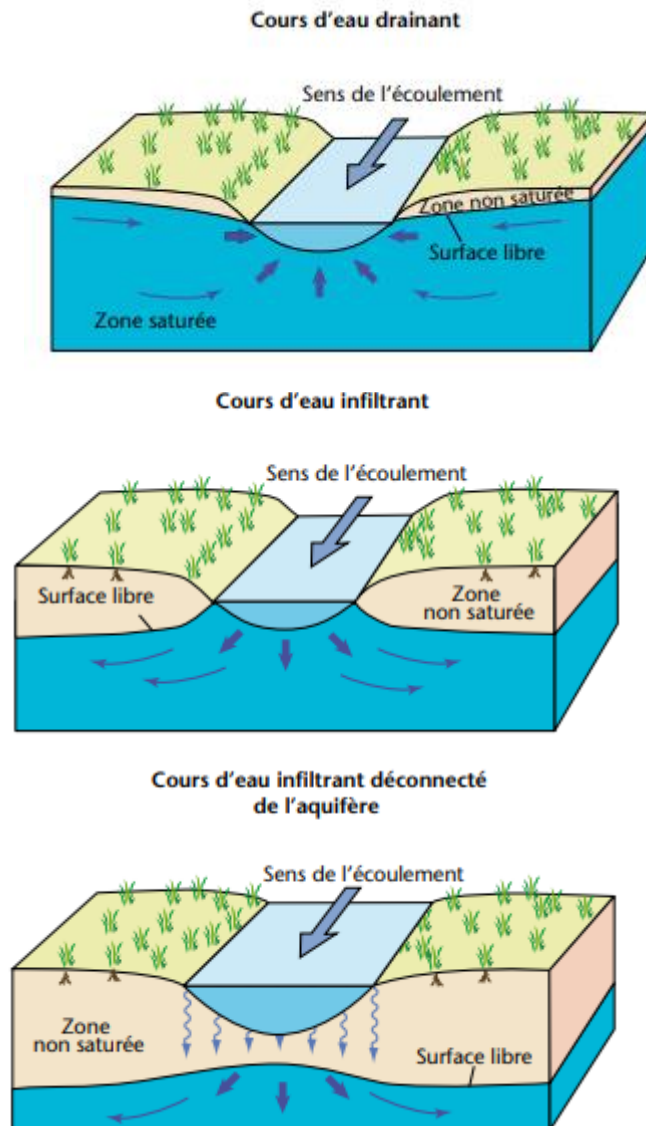
Les précipitations qui percolent à travers le sol peuvent finir par alimenter les systèmes hydrogéologiques. Cela arrive couramment dans les zones d'altitude relativement importante et dépend de la perméabilité des sols. Les événements individuels de recharge peuvent être repérés par une élévation de la surface libre de l'aquifère. Si la porosité du matériau de l'aquifère, généralement comprise entre 5 et 40 %, est connue on peut estimer le volume de recharge par unité de surface de l'aquifère comme le produit de l'élévation du niveau de l'eau par la porosité (exprimée en fraction) et par la surface.

#### 4.6.2 Relations entre eaux souterraines et eaux superficielles

Dans de nombreuses régions, il existe des liaisons directes entre le système hydrogéologique et le réseau hydrographique, de telle sorte que des volumes d'eau parfois importants peuvent passer de l'un à l'autre. Il est important de comprendre cette relation.

#### 4.6.3 Cours d'eau drainants et infiltrants

L'altitude du niveau de l'eau dans un cours d'eau, par rapport à celle d'une masse d'eau superficielle ou d'un aquifère à surface libre voisin, va déterminer la direction de l'écoulement entre ces deux éléments du système hydrologique. Dans le cas où le niveau du cours d'eau est inférieur à celui de la surface libre de l'aquifère sous-jacent, un écoulement aura lieu vers le cours d'eau et celui-ci sera dit drainant (figure I.6.12, en haut). Dans le cas contraire, lorsque le niveau du cours d'eau est supérieur à celui de la surface libre de l'aquifère sous-jacent, un écoulement aura lieu vers l'aquifère et le cours d'eau sera dit infiltrant ou émissif (figure I.6.12, au centre). Dans certains cas, particulièrement dans des environnements arides, il peut ne plus y avoir de liaison hydraulique directe entre l'aquifère et le cours d'eau. Il s'agit là encore d'un cours d'eau infiltrant (**figure37**).



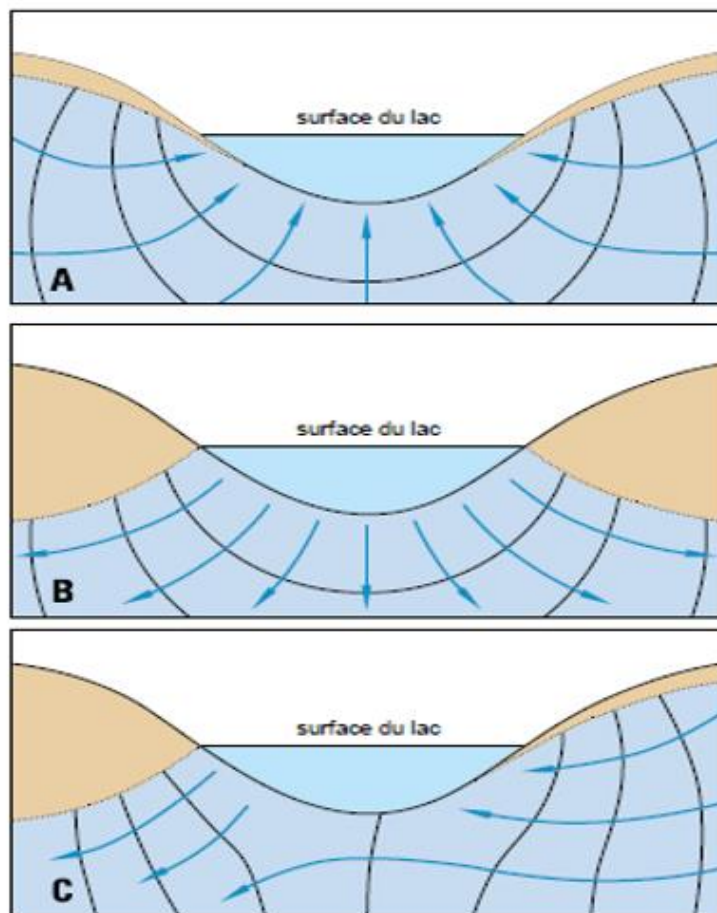
**Figure 37 :** Positions relatives du niveau de l'eau souterraine et du niveau de la rivière pour les cours d'eau drainants et les cours d'eau infiltrant

#### 4.7 Comment l'eau souterraine peut-elle interagir avec les lacs ?

Les lacs interagissent également avec les eaux souterraines, bien que ces interactions de base soient les mêmes que pour les cours d'eau, elles diffèrent de plusieurs façons. Certains lacs reçoivent de l'eau souterraine à travers la totalité de leur lit; d'autres ont une perte d'infiltration au profit de la nappe dans la totalité de leur lit; mais aussi la plupart des lacs pourraient recevoir un apport d'eau souterraine à travers une partie de leur lit et concèderaient une perte d'infiltration dans autres parties du lit (figure 38).

Généralement les niveaux d'eau dans les lacs naturels ne varient pas rapidement comparés aux cours d'eau; donc l'emménagement des berges est relativement moins importante dans les lacs que dans les cours d'eau. En outre l'évaporation a un effet plus significatif sur les plans d'eau des lacs que sur les rivières parce que la surface des lacs est généralement plus grande, mais aussi l'eau du lac n'est pas réapprovisionnée aussi facilement que pour les rivières. Les sédiments lacustres sont souvent épais et ont plus de dépôts organiques. Ces matières organiques peu perméables peuvent affecter beaucoup plus la distribution de l'infiltration dans les lacs

que dans les rivières. Les réservoirs qui sont conçus principalement pour contrôler l'écoulement et la distribution de l'eau de surface sont construits dans des vallées de cours d'eau; ils ont quelques caractéristiques aussi bien pour les rivières que pour les lacs; ils peuvent avoir des niveaux très fluctuants, et un emmagasinement des berges tout aussi important. De plus, comme pour les lacs, les réservoirs peuvent subir une perte d'eau significative, par évaporation.



**Figure 38** : Interaction des lacs avec les nappes d'eau souterraine (apport (A), perte d'eau par infiltration au profit des eaux souterraines(B), ou les deux (C))

#### **4.8 Comment les eaux souterraines peuvent-elles interagir avec les zones humides et autres écosystèmes liés aux nappes ?**

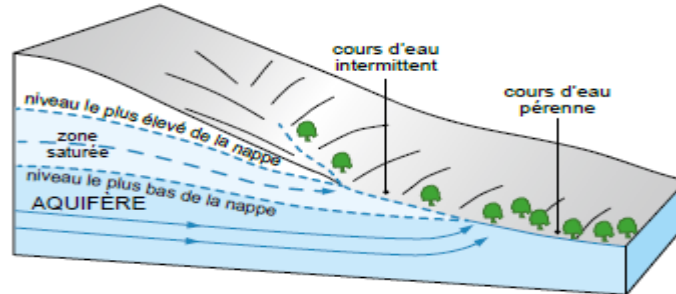
Comme les cours d'eau et lacs, les zones humides peuvent recevoir un apport d'eau souterraine, peuvent aussi recharger les nappes phréatiques, ou les deux (figure 39). Les zones humides qui occupent des dépressions sur le continent ont des interactions, avec les eaux souterraines, semblables à celles des lacs et rivières.

Cependant les zones humides n'occupent pas toujours les points bas et des dépressions ; elles peuvent également se former sur des versants ou même sur une ligne de partage des eaux. Les nappes phréatiques interceptent parfois la surface du sol, provoquant l'émergence d'eau souterraine directement à la surface du sol, ce qui permet le développement de plantes de zones humides.

De nombreuses zones humides existent le long de cours d'eau, particulièrement le long de ceux avec un écoulement lent. Bien que ces zones humides riveraines des cours d'eau reçoivent couramment un apport d'eau souterraine, elles dépendent principalement de ces cours d'eau pour leur besoin en eau. Les zones humides dans les parties proches des cours d'eau ont des interactions hydrologiques particulièrement complexes parce qu'elles sont soumises à des variations de niveau d'eau périodiques.

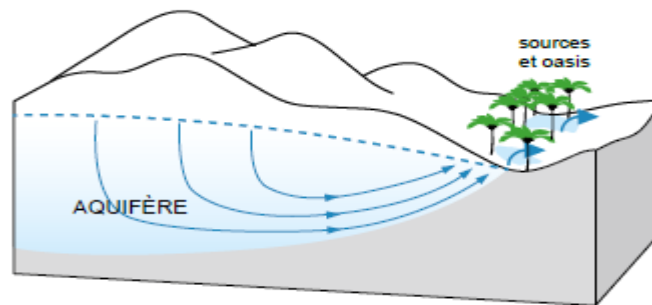
### Ecosystème humide

le long du cours supérieur de la rivière, alimenté par la décharge pérenne et intermittente de la nappe d'eau souterraine



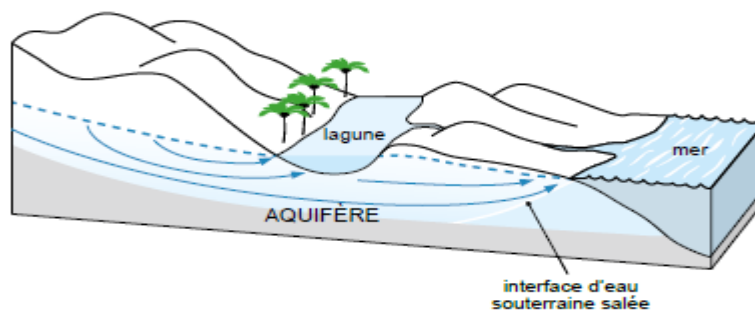
### Ecosystème de zone humide aride

dépendant d'un système d'écoulement des eaux souterraines profondes, parfois avec seulement des eaux souterraines fossiles



### Ecosystème lagunaire côtier

dépendant d'une eau légèrement saumâtre générée par le mélange de l'eau douce souterraine et d'une incursion limitée d'eau de mer



**Figure 39** : Des exemples d'écosystèmes liés aux nappes et des régimes d'écoulement souterrain associé

#### 4.9 Interactions eau souterraine - eau de surface, impacts anthropiques.

En plus des interactions naturelles décrites ci-dessus, il ya aussi beaucoup d'interactions entre l'eau souterraine et l'eau de surface qui sont soit aggravées ou créées par une variété d'activités humaines (figure 40).

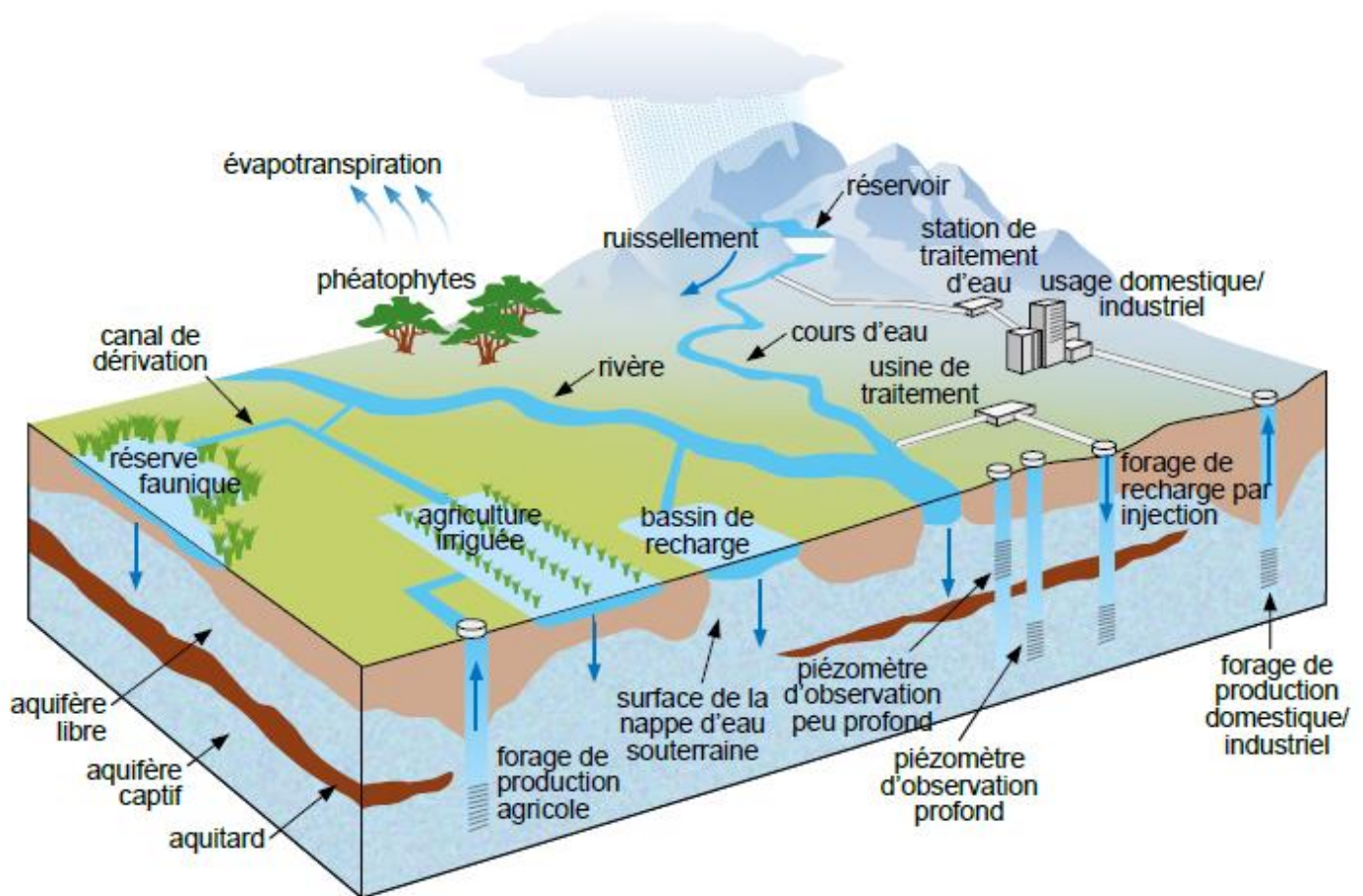


Figure 40 : Interactions eau de surface - eau souterraine.

#### 4.10 Les eaux souterraines /de surfaces et l'environnement

L'eau souterraine est la partie du cycle de l'eau qui se trouve au-dessous de la surface de la Terre. L'exploitation des eaux souterraines pour diverses utilisations humaines, a un impact sur l'environnement. De même les changements dans l'environnement, qu'elle soit d'origine naturelle ou anthropique, ont le potentiel d'affecter la ressource en eau souterraine.

- Il existe deux principales interactions entre l'environnement et les nappes d'eau souterraine : une est fondée sur les flux de l'environnement vers le système des eaux

souterraines et l'autre sur les flux du système des eaux souterraines vers l'environnement.

- L'environnement inter-acte avec les eaux souterraines en impactant la quantité et la qualité de la recharge. Certaines de ces interactions sont tout à fait naturelles et d'autres sont modifiées par les activités humaines. Par exemple, les différentes formes d'occupation des sols et la gestion des déchets humains peuvent entraîner la contamination des eaux souterraines. La recharge des nappes peut augmenter ou diminuer à cause des changements naturels ou humains induits pour l'environnement.

- La décharge des eaux souterraines vers l'environnement se produit pour les écosystèmes tributaires des eaux souterraines (GDE, en anglais). Un écosystème dépendant de l'eau souterraine peut être défini comme un endroit où la surface de la nappe phréatique coupe la surface du sol, donnant lieu à une certaine forme d'environnement de zones humides en général pérennes. Les GDE ont tendance à accueillir un ensemble tout à fait distinct de biote, et sont généralement hautement bio-diversifiés et productifs par rapport à la zone sèche environnante. Les GDE peuvent résulter de conditions particulières des nappes d'eau souterraine, ainsi on a différents types de GDE, avec leurs spécificité individuelle. Les variétés de GDE sont décrites à la section 4 de ce module.

#### 4.10.1 Contamination des eaux souterraines

La contamination est l'introduction de composants biologiques, physiques, et chimiques dans le système environnemental à un rythme tel que l'environnement ne puisse s'en accommoder par dispersion, décomposition, recyclage ou en les stockant sous une forme inoffensive. Dans ce cas, le contaminant occasionne un dégât structurel ou fonctionnel du système environnemental, et peut causer aussi un dommage à la santé humaine. Toute activité de développement (urbanisation, activité industrielle, agricole, et exploitation minière) par l'homme génère des contaminants qui ont un impact à la fois sur les eaux de surface et les eaux souterraines. La contamination des systèmes d'eau de surface a un impact direct sur l'écosystème aquatique. D'autre part, lorsque des contaminants pénètrent dans le système des eaux souterraines, ils «s'atténuent» dans le système pendant une longue période. Selon la nature des polluants et les conditions physico-chimiques des aquifères, soit les contaminants se dégradent en composants inoffensifs, soit ils sont conservés ou transportés vers

des nappes d'eau souterraine qui sont en contact avec les écosystèmes aquatiques, terrestres ou côtiers, comme les lacs, les rivières, les zones humides, les estuaires et l'océan

(Figure 42)

Or, les eaux souterraines sont constamment exposées à des risques de pollution dont le degré et l'intensité dépendent de plusieurs paramètres, qu'ils soient naturels ou anthropiques. Le Yémen est l'un des pays les plus peuplés du monde.

Elle est déjà confrontée à une grave crise de l'eau. En raison principalement d'une forte croissance démographique, d'un développement agricole malavisé et d'un climat vulnérable au changement climatique, cette crise pourrait bientôt atteindre des niveaux catastrophiques.

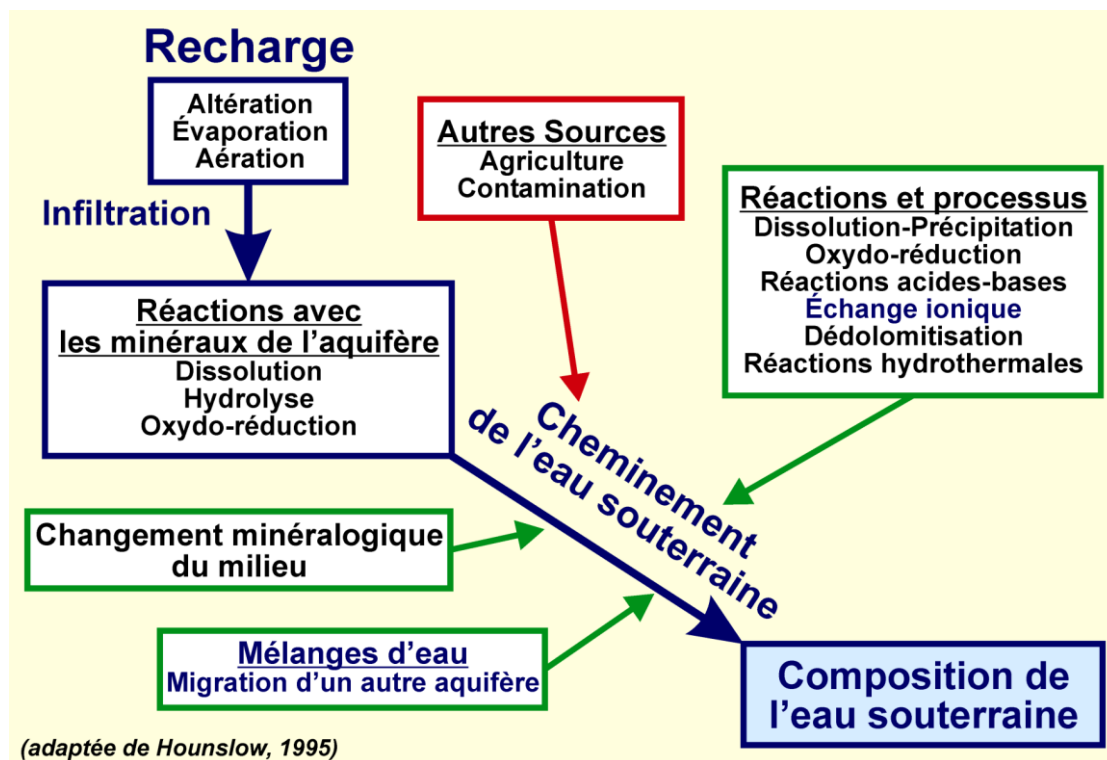


Figure 41 : Évolution chimique des eaux souterraines

#### 4.10.1.1 Urbanisation

L'urbanisation avec de fortes concentrations de population dans des zones localisées augmente considérablement la charge de la pollution, due aux rejets d'eaux usées et d'élimination des déchets solides et donc les risques de pollution des eaux souterraines. Les populations urbaines génèrent d'énormes volumes d'eaux usées et rejettent de grandes quantités de déchets solides et liquides tous les jours contenant des matières plastiques, des produits chimiques, de la graisse et de l'huile, des métaux, verre, papier, déchets organiques, etc. L'absence de réseau d'évacuation des eaux usées, dans la plupart des centres urbains en Afrique, oblige les gens à utiliser des latrines à fosse et/ou rejettent les eaux usées non traitées dans les cours d'eau. Cela

créé alors une énorme pollution diffuse du système des eaux souterraines. Les eaux usées contiennent des sels, des bactéries, du phosphore et de nombreux autres produits chimiques. Le ruissellement des rues et des bâtiments porte également des polluants tels que les bactéries, du pétrole et des produits chimiques qui peuvent entrer dans les eaux souterraines.

L'urbanisation apporte aussi avec elle des déchets, des sites de traitement et d'élimination tels que les sites d'enfouissement de déchets solides et des usines de traitement des eaux usées. Ces sources ponctuelles de pollution sont des sites où il existe potentiellement des concentrations de pollution entrant dans les nappes.

#### **4.10.1.2 Activité Industrielle**

L'élimination incontrôlée des effluents industriels a un impact énorme sur les eaux souterraines, en particulier les déchets chimiques et nucléaires. Les déchets industriels sont produits pendant les processus de fabrication. Les déchets industriels peuvent être toxiques, corrosifs ou réactifs. Quelques exemples peuvent être cités : les huiles, les solvants, les produits chimiques, les déchets radioactifs, de la ferraille et bien d'autres. Si ils sont mal gérés, ces déchets peuvent conduire à des conséquences dangereuses par la pollution des eaux souterraines dont les populations dépendent. Les eaux usées provenant des manufactures ou des procédés chimiques dans les industries, contribue beaucoup à la pollution des eaux souterraines. La plupart des grandes industries ont des installations de traitement, mais de nombreuses petites industries n'en ont pas.

#### **4.10.1.3 Exploitation minière**

La prospection et l'exploitation des ressources minérales et énergétiques en Afrique, impliquent des activités qui potentiellement peuvent affecter de manière significative la quantité et la qualité des ressources en eau souterraine existantes dans ces zones.

La pollution chimique est souvent associée à l'exploitation minière. Le principal polluant dans les zones minières actives et abandonnées est le drainage minier acide qui est riche en métaux lourds. L'oxydation des minéraux sulfurés, tels que la pyrite, produit de l'eau très acide qui dissout alors les métaux lourds et les porte dans le milieu aquatique, y compris les eaux souterraines.

Le dénoyage des ouvrages souterrains est une composante normale de toute exploitation minière. Le dénoyage autour des zones minières abaisse nettement la nappe phréatique, ce qui affecte les écoulements d'eau de surface et l'assèchement des aquifères peu profonds. À l'échelle locale, il peut y avoir des pénuries d'eau pour les communautés en raison de

l'assèchement de surfaces d'eau (ruisseaux, rivières, étangs, marécages, lacs) et les sources. Les impacts de l'exploitation minière peuvent durer de nombreuses décennies. Par conséquent, l'évaluation de l'impact environnemental, la surveillance environnementale, la planification prévisionnelle et les garanties financières doivent être mises en place pour la gestion. Les conditions géochimiques dans le corps du minerai, les stériles et les résidus peuvent changer avec le temps et doivent être suivis. La flexibilité est donc nécessaire pour apporter les changements nécessaires en matière de contrôle de l'eau et le traitement de l'eau après la fermeture des mines.

La gestion active de la mine et la gestion de l'eau peut être nécessaire pendant des années, voire des décennies après la fermeture, selon le type de mine, la taille et la nature de la zone de perturbation, et le type de traitement du minerai utilisé. La fermeture permanente comprend systématiquement tout ou partie de ce qui suit : enlèvement / élimination des produits chimiques; la démolition de la structure ; sup- pression des routes et des fossés inutiles; désintoxication des déchets; endiguement des résidus et stériles; remblayage des puits; et la gestion active de l'eau, y compris en s'assurant que toutes les normes de qualité des eaux en vigueur sont remplies. Dans de nombreux cas, cela se traduit par l'exploitation et l'entretien d'une installation de traitement d'eau afin d'éliminer les produits chimiques toxiques. Sur les sites où le drainage minier acide est un problème, le traitement de l'eau après la fermeture est nécessaire pour plusieurs années, et dans certains cas, de façon permanente.

#### **4.10.1.4 Exploitation agricole**

L'agriculture a des effets directs et indirects sur la qualité des eaux souterraines. Les impacts directs incluent la dissolution et le transport de quantités excessives d'engrais, de pesticides, d'herbicides, des antibiotiques, des hormones et les matériaux associés, et les modifications hydrologiques liés à l'irrigation et le drainage.

Les impacts indirects incluent les changements dans les interactions eau-roche dans les sols et les nappes aquifères causés par une concentration accrue des principaux ions et des métaux. De nombreuses études indiquent que les pratiques agricoles sont conduites à la contamination par les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et par les pesticides des eaux souterraines à des concentrations localisées dans les aquifères peu profonds.

Une agriculture durable est l'un des plus grands défis à atteindre dans les économies en développement rapide en Afrique. Selon la FAO, la durabilité implique que l'agriculture non seulement assure un approvisionnement alimentaire, mais qu'elle ait des effets sur la santé humaine, environnementaux, socio-économiques soient reconnus et pris en compte dans les

plans nationaux de développement. Cependant, ce n'est pas la priorité dans les zones pauvres puisque l'attention se focalise sur l'atteinte de la sécurité alimentaire.

Les contaminants potentiels des eaux souterraines dus à l'activité agricole sont :

#### **4.10.1.4.1 Nutriments**

Le risque lié aux nutriments tels que l'azote et le phosphore, atteignant les eaux souterraines, dépend de la méthode d'application des éléments nutritifs et de leur étendue, le type de plantation et le type de sol. Le phosphore est très peu soluble dans l'eau, et atteint rarement la nappe, sauf dans les sols très perméables. En revanche, l'azote est soluble dans l'eau et rapidement se transforme en nitrate, qui peut contaminer la nappe phréatique, sauf si elle est utilisée par les plantes. Des niveaux élevés de nitrates peuvent conduire à l'eutrophisation des plans d'eau.

#### **4.10.1.4.2 Les pesticides**

sont plus susceptibles de s'infiltrer dans les sols sableux qui contiennent peu de matière organique. L'absorption et la décomposition de pesticides est inefficace dans les sols sableux contenant peu de matière organique, car il ya moins de microbes, et le lessivage peut être rapide à travers les grandes pores du sol. Comme les pesticides sont conçus pour tuer les parasites, son utilisation excessive aura un impact profond sur les personnes qui consomment les eaux souterraines sous-jacentes des zones agricoles.

#### **4.10.1.5 Les micro-organismes**

vivent dans l'appareil intestinal animal et humain et sont déversés dans les excréments et le fumier. Quand ils atteignent les eaux de surface, ils peuvent causer des maladies chez les humains et le bétail. L'eau souterraine est largement protégée contre ce type de contamination en raison des processus physique (filtration), chimiques (adsorption) et biologiques (disparition naturelle).

### **4.11 Écosystèmes tributaires des eaux souterraines :**

Les écosystèmes tributaires des eaux souterraines (GDE) varient; il y'en a qui sont marginaux, d'aucuns dépendent occasionnellement des eaux souterraines, et d'autres le sont entièrement. Les écosystèmes tributaires des eaux souterraines sont des communautés de plantes, d'animaux et d'autres organismes dont l'étendue et les processus liés à leur vie dépendent de l'eau souterraine.

Certains des écosystèmes qui suivent peuvent dépendre des eaux souterraines :

- Environnements fluviaux où la décharge du débit de base entretient un écoulement pérenne.
- Zones humides dans les zones de décharge des eaux souterraines ou de nappe

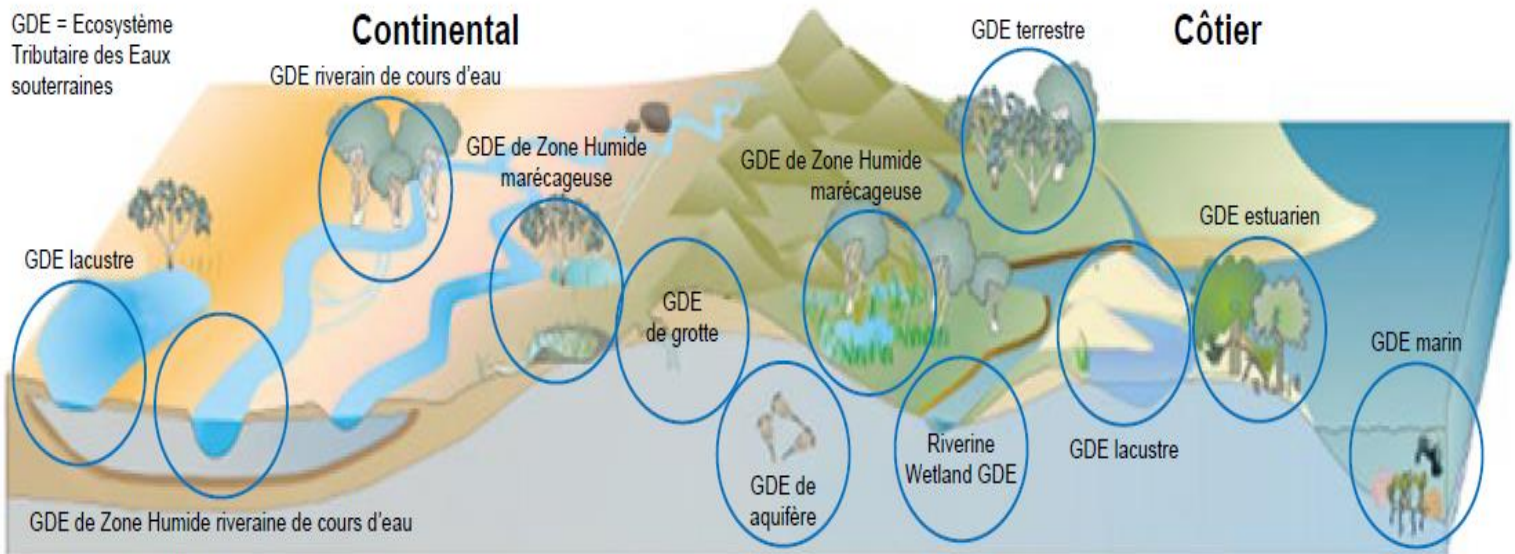
phréatique peu profonde

- Végétation et faune terrestres, dans les zones où la nappe phréatique est peu profonde ou dans les zones riveraines le long de ruisseaux / rivières
- Écosystèmes aquatiques dans les ruisseaux et les lacs alimentés par les eaux souterraines
- Systèmes karstiques
- Sources
- Écosystèmes marins côtiers et d'estuaires

#### **4.11.1 Activités constituant des menaces pour les écosystèmes tributaires des eaux souterraines**

Les principales activités constituant des menaces sont :

- exploitation intensive des ressources en eau souterraine
- changements dans l'occupation des sols - en particulier le changement de la végétation indigène sur les terres agricoles
- le développement et l'expansion agricole
- drainage et substrat minier acide associés à l'exploitation minière
- déviation de rivière et construction de barrage
- aménagements commerciaux, urbains ou de loisirs.



**Figure 42 :** Des exemples d'écosystèmes tributaires des eaux souterraines, où la nappe maintient directement ou indirectement des écosystèmes terrestres et aquatiques.

Certaines des méthodologies de planification et de mise en oeuvre coordonnée, qui sont appropriées pour minimiser les impacts négatifs sur les écosystèmes sont (1) le maintien de schémas naturels de réalimentation et de décharge; (2) minimiser les perturbations du niveau de la nappe qui sont critiques pour les écosystèmes; (3) la protection de la qualité des eaux souterraines en évitant l'ajout de contaminants toxiques; et (4) la réhabilitation des systèmes d'eau souterraine dégradés là où c'est possible.

#### 4.11.2 Les aspects environnementaux de la gestion des eaux souterraines

La gestion des eaux souterraines est une partie importante de la gestion des ressources en eau, afin de soutenir les moyens de subsistance de vastes populations rurales, la croissance rapide de l'urbanisation, de l'irrigation et de l'activité industrielle.

Les trois principales considérations pour la gestion des eaux souterraines, du point de vue environnemental, sont les suivantes :

**(I)** L'exploitation des eaux souterraines doit être durable sur le long terme. Cela signifie que le taux de prélèvement doit être inférieur ou égal au taux de recharge. Si le taux de prélèvement est plus élevé que le taux de recharge, elle se traduira comme une exploitation minière de l'eau souterraine; ce qui devrait être soigneusement pris en considération pour certains cas

spécifiques. Si un tel schéma se produit, les niveaux des eaux souterraines vont continuer à diminuer, ce qui

augmentera progressivement les coûts de pompage, et puis à un certain niveau, il ne serait plus économique de continuer à pomper l'eau souterraine pour de nombreux usages tels que la production agricole.

(II) Les activités humaines qui pourraient nuire à la qualité des eaux souterraines pour une utilisation éventuelle future, doivent être contrôlées. Cela comprend le lessivage des produits chimiques comme les nitrates et les phosphates provenant des activités agricoles extensives et intensives, la contamination par les substances toxiques et autres produits chimiques indésirables provenant des décharges et autres pratiques d'élimination des déchets nuisibles à l'environnement, la contamination bactérienne et virale due à un traitement inadéquat des eaux usées et des pratiques d'élimination des eaux usées, et en plus l'augmentation de la salinité due à des pratiques d'irrigation inefficaces ou inappropriées, et la salinisation due à un pompage excessif dans les zones côtières.

(III) Une mauvaise gestion des eaux souterraines contribue souvent à d'autres impacts environnementaux négatifs tels que la dessiccation des zones humides, la diminution du débit de base, etc. Les évaluations d'impact environnemental peuvent être considérées comme un outil

de planification pour aider les planificateurs à anticiper les impacts potentiels futurs des activités alternatives d'exploitation des eaux souterraines; il s'agit des impacts à la fois bénéfiques et néfastes, en vue de choisir la solution «optimale» qui maximise les effets bénéfiques et atténue les incidences négatives sur l'environnement. Elle peut être utilisée non seulement pour les projets d'exploitation des eaux souterraines, mais aussi pour les plans, programmes et politiques.

#### 4.12 Vulnérabilité des eaux souterraines

##### 4.12.1 Vulnérabilité à la pollution

- **Facteurs de vulnérabilité :**

**Le type de nappe (libre ou captive)**

##### Nappes libres

- diffusion des polluants,
- variation du niveau piézométrique

##### Nappes captives

- **meilleure protection,**

##### 4.12.1.1 Facteurs dont dépend la vulnérabilité des nappes

- 1) le type de nappe (libre ou captive)
- 2) le recouvrement (nappes en milieu fissuré, ...)
- 3) paramètres d'écoulement et conditions d'alimentation

##### 4.12.1.2 Meilleure protection

- Sol et sous-sol épais
- Granulométrie fine
- Vitesse de percolation faible

##### Type :

- Pollution temporaire et pollution chronique
- Pollution ponctuelle et pollution diffuse

##### 4.12.1.3 Origines principales de la pollution

- l'activité humaine (assainissement défectueux, mal dimensionné, construction puis exploitation des routes, ...)
- l'agriculture (élevages et grandes cultures)
- l'industrie (fuites de réservoirs, canalisations, incidents, ...)
- les décharges de déchets (voiries, produits toxiques).

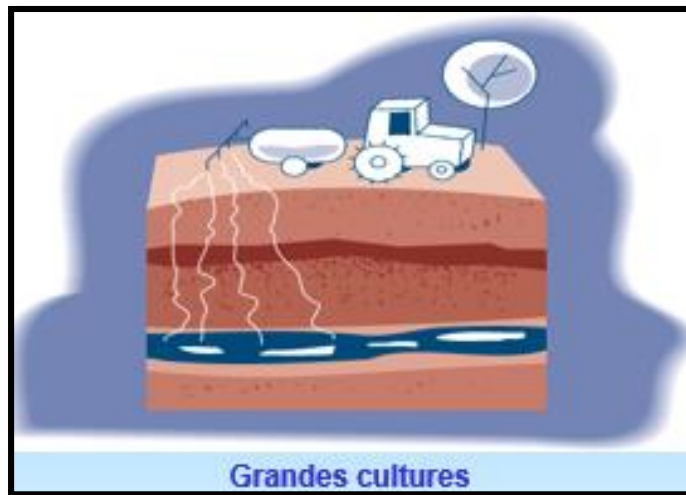
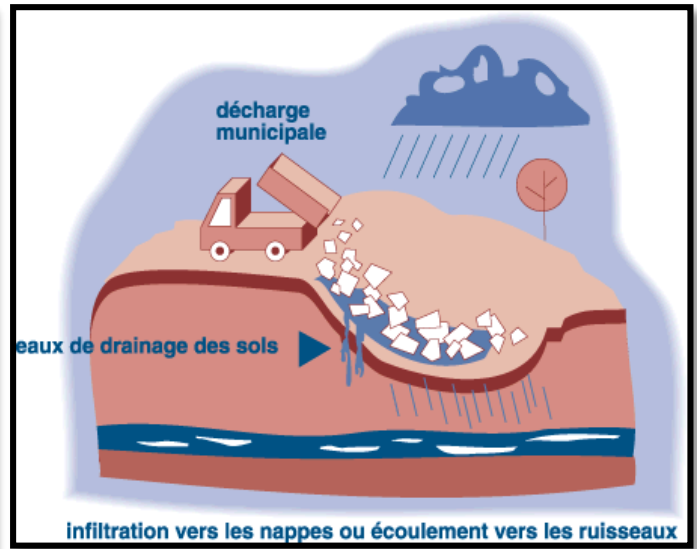


Figure 43 : Origines de la pollution

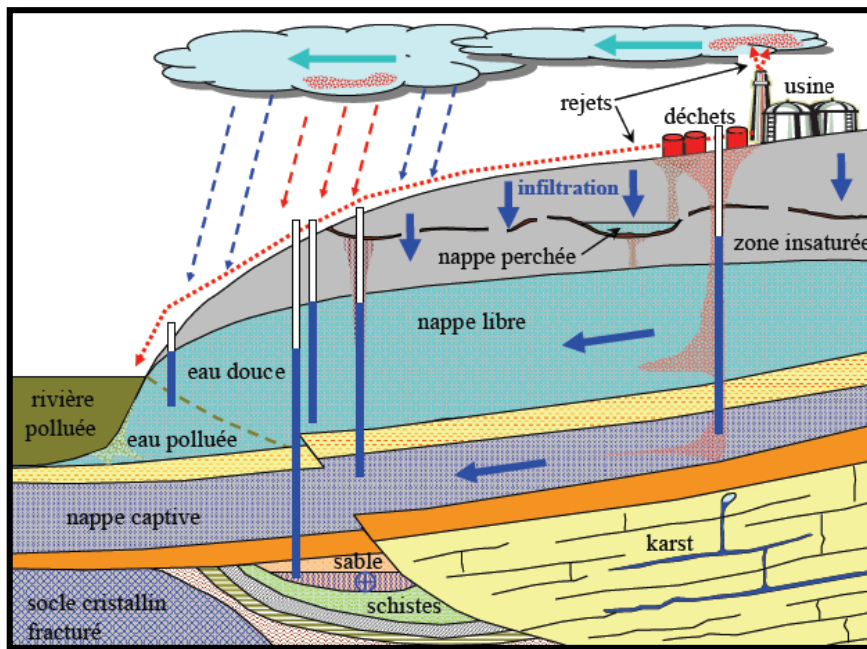


Figure 44: Quelques scenarios de contamination des nappes

#### 4.12.1.4 Types de polluants

##### a. Polluants physiques

Chaleur / Matière en suspension / radioactivité

##### b. Polluants chimiques

Nitrates - phosphates / sulfate et chlorure

##### c. Micropolluants

Métaux lourds, micro-organismes, pesticides et détergents

Hydrocarbures (HAP)

#### 4.12.1.5 Epuration

Étapes du devenir des polluants

- 1 – Introduction du polluant (sol, rivière)
- 2 – Migration et évolution (zone non saturée)
- 3 – Propagation et évolution dans l'aquifère

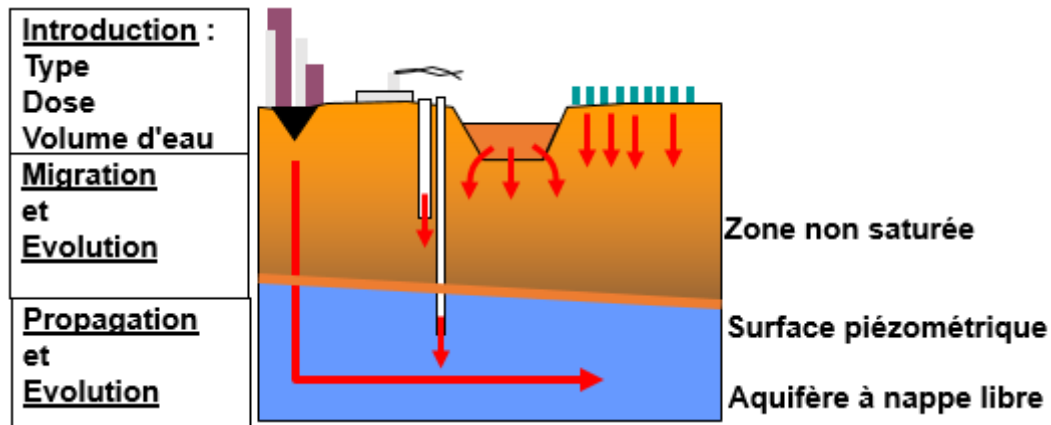


Figure 45 : Étapes du devenir des polluants

- Devenir dans la zone non saturé

1 – Mécanismes physiques :  
miscibilité avec l'eau, densité, dilution

2 – Mécanismes hydrodynamiques :  
Vitesse, temps de séjour

Auto-épuration dans "sol"  
↘ [polluants]

5 – Mécanismes physico-chimiques :  
Adsorption/désorption

3 – Mécanismes hydrochimiques :  
Dissolution, précipitation, ...

4 – Mécanismes hydrobiologiques :  
Biodégradation

Figure 46 : Devenir de la pollution dans la zone non saturée

- Devenir dans la zone saturée

Auto-épuration  
dans l'aquifère  
↘ [polluants]

Peu d'oxygène, peu de matières organiques, peu de micro-organismes

1 – Mécanisme de dilution :  $f(\text{transmissivité de la nappe})$

2 – Mécanismes physico-chimiques : auto-épuration

Figure 47 : Devenir de la pollution dans la zone saturée

### Références bibliographiques

- Alexander M.** Introduction to soil microbiology. Library of Congress Cataloging in Publication Data. USA., (1977) 467 pages.
- Jasrotia A.S , Bhagat B.D ,Kumar A , Kumar R , Spat J ,** Hydro., 41.2 (2014) 377–365 pages.
- Whiting D.R , Uariguata L.G , Weil C , & Shaw J ,** Dia. recherche.clil.pra., 94.3. (2011)311-321 pages.
- Glass N, Glo. Maj Environ.,J.1.1** (2010) 17-30 pages.
- Gleick P. H , chien de chasse.,8.** (2014) 35-58 pages.
- Morell I , Gimhez E, & Esteller M ,** Total. Environ., 177 (1996) 161-171 pages.
- Duchaufour Ph. (1995).** Pédologie, SOI, végétation, environnement. 4e Édition. Masson. Paris. 324 pages.
- Rodier J. et al. (1999).** L'analyse de l'eau, 9e édition. DUNOD (éditeur), Paris, France. (2009).1579 pages.
- Oberlin G. & Hubert P.** Refondation du concept de régime hydrologique, Rapport quadriennal du CNFGG publié avec le concours de l'Académie des Sciences, 269-277 pages.
- Félice-Sotelo M., Andrade J.M., Carlosena A., Tauler, R.,** Analytica Chimica Acta, 583 (2007) 128-137 page .
- Kowaliski T. Zbytniewsky R., Szpeina J., Buszewski B.,** Water Res., 40 (2006) 744-752 page.
- IAHS/AISH ,IAHS Handbook,** IAHS Press, Wallingford (Royaume Uni), (2000) 94 page .
- Guide des pratiques hydrologiques,** Volume I. Hydrologie – De la mesure à l'information hydrologique, Édition (2008 )Mise à jour en (2020) P1.6-23 page .
- Ferlatte M.Tremblay Y. Rouleau A. et Larouche U. F. (2014).**Notions d'hydrogéologie - Les eaux souterraines pour tous. Première Édition. Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES),. 63 page .
- A.E.R.M.C , (2010)** Identification et protection des ressources en eau souterraine majeurs pour l'alimentation en eau potable. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Nappe alluviale du Rhône. Volume 5, 11 page .
- Berrahou A. Clooster M. VAN. Makhoukh M. Sbaa M (2011).** Contribution à l'étude physico-chimique des eaux Superficielles de l'oued 96 Moulouya (Maroc oriental). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 09, Décembre 2011, 149-169 page.
- Ziani D., (2009).** Impact de la pollution agricole et urbaine sur la qualité des eaux souterraine de l'aquifère de Ain Djasser. Mém. Mag. hydraulique .Univ. de Batna.133 page.