

## I. Généralités

### I.1. Importance de l'eau

L'eau est de toutes les matières la plus importante pour l'existence de l'homme. Elle est indispensable pour la survie et pour développement de la société moderne. Parmi les principaux modes d'utilisation de l'eau on peut citer :

- alimentation en eau potable,
- alimentation en eau industrielle,
- alimentation en eau pour l'agriculture,
- l'exploitation de centrales hydro-électriques.

A l'heure actuelle, la disponibilité en eau de bonne qualité est indispensable pour le bien être de l'homme. Hélas, sur la terre, nous ne trouvons pas l'eau qui réponde aux exigences qualitatives exigées pour l'eau potable, c'est-à-dire que l'eau doit être :

- claire, inodore, de saveur agréable.
- aussi pauvre en germes microbiens que possible et en matières en suspension.
- ne pas renfermer de substances chimiques pouvant provoquer des maladies.
- ne pas avoir des propriétés agressives vis-à-vis des canalisations

### I.2. Cycle de l'eau dans la nature

L'eau circule sans arrêt sur la Terre. Elle s'évapore des océans et y revient sous forme de pluie. Le soleil fait s'évaporer l'eau des rivières, des lacs, des mers, des océans en de fines gouttelettes. En se regroupant, elles forment des nuages qui, poussés par le vent, rencontrent des masses d'air froid et donnent naissance à la pluie. L'eau de pluie s'infiltré dans le sol et rejoint les nappes phréatiques, les sources, les rivières, les fleuves, pour recommencer sans fin le même voyage.

Dans la nature, l'eau suit toujours le même parcours en formant une sorte de boucle. C'est ce que l'on appelle le cycle naturel de l'eau.

Ce parcours se compose de 4 étapes principales : évaporation, condensation, précipitations, et ruissellement.

#### I.2. 1. L'évaporation et la transpiration des végétaux :

Les rayons du soleil réchauffent l'eau des rivières, des fleuves, des lacs, des mers et des océans et la fait passer de l'état liquide à l'état de vapeur d'eau (gazeux) : c'est l'évaporation.

Les plantes et les autres espèces végétales puisent l'eau dans le sol et la rejettent sous la forme de vapeur d'eau. Environ 10% des précipitations tombant sur la Terre proviennent de la transpiration des végétaux, le reste est en conséquence dû à l'évaporation. La transpiration des plantes et l'évaporation due à l'humidité dans le sol libèrent de la vapeur d'eau qui s'élève dans l'atmosphère sous la forme de nuages.

L'action du vent déplace les nuages au-dessus des terres. Cela va donner lieu aux étapes suivantes :

### I.2. 2. La condensation :

Au contact de l'atmosphère, la vapeur d'eau se refroidit et se transforme en petites gouttelettes qui sont à l'origine de la formation des nuages – cette étape se nomme la condensation – qui, sous l'action des vents, vont se diriger vers l'intérieur des terres.

### I.2. 3. Les précipitations :

Transportés par la circulation atmosphérique, les nuages se déplacent et l'effet de la gravité aidant, l'eau retombe sur le sol sous forme de pluie, de neige ou de grêle (état liquide ou solide), qu'on appelle généralement « précipitations ».

### I.2. 4. Le ruissellement ou l'infiltration :

L'eau qui n'est pas absorbée par le sol, ruisselle le long des pentes jusqu'à se déverser dans les rivières, les fleuves et les lacs. Elle sera ensuite transportée jusqu'aux mers et océans, ce sont les « cours d'eau de drainage ». L'eau de pluie s'écoule lorsqu'elle rencontre un sol imperméable et pénètre dans les sols perméables. En s'infiltrant dans un sol perméable, l'eau peut parfois remplir une poche souterraine (grotte) et former un véritable réservoir d'eau. L'eau contenue dans ce réservoir (nappe d'eau ou nappe phréatique) trouve parfois un chemin naturel vers l'extérieur

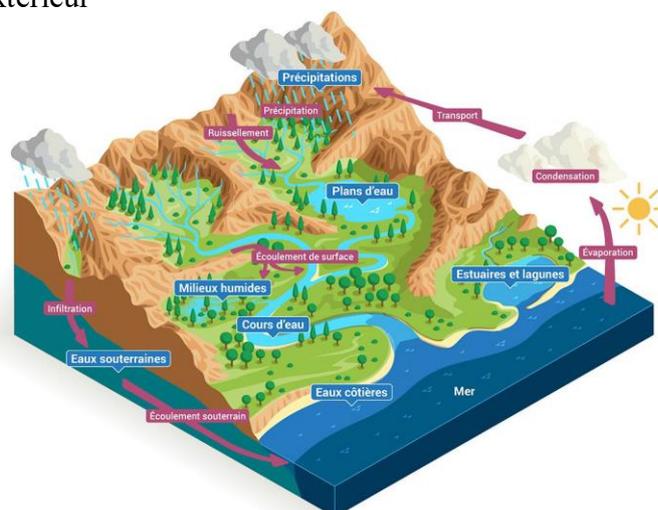


Figure I.1: Cycle de l'eau.

### I.3. L'eau dans le monde

#### I.3.1 Eaux naturelles

##### I.3.1.1. Eaux souterraines

De point de vue hydrogéologique les couches aquifères se divisent en :

- Nappes phréatiques ou alluviales : Peu profondes et alimentées directement par les précipitations pluvieuses ou les écoulements d'eau en dessus,
- Nappes captives : Plus profondes que les premières et séparées de la surface par une couche imperméable, l'alimentation de ces nappes est assurée par l'infiltration sur leurs bordures.

La nature du terrain sous lequel se trouvent ces eaux est un déterminant de leurs compositions chimiques, cependant elles sont appelées aussi les eaux propres car ils répondent 'en général' aux normes de potabilité. Pourtant, ces eaux sont moins sensibles aux pollutions accidentelles, elles perdent totalement leur pureté originale dans le cas de contamination par des polluants.

Quand une eau souterraine contient une concentration en certains minéraux dépassant les normes de potabilité, mais elle représente des propriétés thérapeutiques on la distribue en bouteilles avec parfois un traitement bien définit, ces eaux sont dites eaux minérales.

##### I.3.1.2. Eaux de surface

Ce type des eaux englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants. Ces eaux sont le siège, dans la plupart des cas, d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets rejetés dedans et de l'importante surface de contact avec le milieu extérieur. C'est à cause de ça que ces eaux sont rarement potables sans aucun traitement.

##### I.3.1.3. Eaux des mers et océans

Les mers et les océans constituent des énormes réservoirs d'eau, elles représentent près de 97.4% du volume d'eau existant actuellement sur notre planète, le reste est la part des eaux continentales (eaux souterraines et superficielles). Les eaux de mers sont caractérisées par une grande salinité, elles sont dénommées aussi « eaux saumâtres », ce qui rend leur utilisation difficile, notamment leur coût très élevé pour leur traitement.

**Tableau I.1 : Salinité des principales eaux de mer**

| <b>Mer ou Océan</b> | <b>Concentration (mg/l)</b> |
|---------------------|-----------------------------|
| Mer rouge           | 43000                       |
| Golfe arabique      | 43000                       |
| Mer méditerranée    | 39400                       |
| Océan atlantique    | 36000                       |
| Océan indien        | 33800                       |
| Océan pacifique     | 33000                       |
| Mer adriatique      | 25000                       |
| Mer noire           | 13000                       |
| Mer baltique        | 7000                        |

### **I.3.2. Eaux de consommation**

Ce sont les eaux destinées à la consommation domestique, elles ont connues une énorme croissance suite au développement démographique et à l'amélioration des conditions de vie des populations. La consommation domestique en eau varie de quelques litres par jour dans les pays sans adduction publique et à faible confort ménager jusqu'à plusieurs centaines de litres dans les pays très développés. Même si ce n'est qu'une petite quantité qui va être bu, jamais ces eaux ne sont distribuées qu'après traitement, trois facteurs déterminent le choix d'un traitement:

- La quantité : La source doit couvrir la demande, en toute circonstance.
- La qualité : La qualité de l'eau brute dont on dispose doit être compatible avec la législation en vigueur.
- L'économie : Le coût d'investissement et de fonctionnement du procédé de traitement relatif à chacune des ressources disponibles est déterminant lors de la prise d'une décision.

Il faut signaler que les établissements distributeurs des eaux de consommation sont responsables de la conformité de ces eaux aux normes jusqu'à leurs arrivées au consommateur.

### **I.3.3. Eaux industrielles**

La qualité et la quantité des eaux utilisées dans l'industrie sont très variables, elles dépendent du type de l'entreprise productrice et de sa taille (voir tableau I.1). Une eau qui va entrer dans un cycle de refroidissement d'une chaudière est moins exigeante que l'eau utilisée dans l'industrie électronique.

**Tableau I.2 :** Principales utilisations industrielles de l'eau et sources d'eau possibles

| Utilisation                                   |   | Sources d'eau acceptables<br>(souvent après un traitement adéquat)   |
|---|---|--|
| Eau de fabrications nobles                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Agroalimentaire</li> <li>- Pharmacie</li> <li>- Papiers blancs</li> <li>- Textiles</li> <li>- Teintureries</li> <li>- Chimie</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Eau moyennement minéralisée</li> <li>- Eau potable</li> <li>- Eaux de forage</li> <li>- Eaux de surface peu polluées</li> </ul> |
| Eau déminéralisée                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pharmacie</li> <li>- Chaudières</li> <li>- Préparation des bains divers</li> <li>- Rinçages en galvanoplastie</li> <li>- Eau ultra pure</li> <li>- Dessalement par osmose inverse</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Eaux de forage</li> <li>- Eaux de surface peu polluées</li> </ul>   |
| Eau de refroidissement en circuit semi-ouvert | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Réfrigération atmosphérique</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Eaux de surface pauvres en Cl-</li> <li>- Effluents après traitement tertiaire</li> </ul>                                       |
| Eau de refroidissement en circuit ouvert      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Condenseurs et échangeurs</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Eaux de surface</li> <li>- Eaux de mer</li> <li>- Effluents après traitement</li> </ul>   |
| Eau de lavage de gaz ou produit de transport  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Lavage gaz métallurgique et incinération</li> <li>- Lavage charbon</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Eaux de surface tamisées et prédécantées</li> <li>- Effluents secondaires</li> </ul>  |

### I.3.4. Eaux usées

L'utilisation des eaux engendre un nouveau produit appelé effluent ou eau usée. Les problèmes liés aux eaux usées sont aussi anciens que ces eaux elles même et ils s'aggravent suivant la croissance démographique, l'amélioration de la qualité de vie des populations et le développement des activités industrielles.

Les eaux usées se divisent en deux grandes catégories : les eaux résiduaires urbaines (ERU) et les eaux résiduaires industrielles (ERI).

#### I.3.4.1. Eaux résiduaires urbaines

Les eaux résiduaires urbaines (ERU) regroupent les eaux ménagères, les eaux vannes et les eaux de ruissellement. La composition et les caractéristiques d'une eau résiduaire urbaine sont peu variables par rapport aux eaux usées industrielles.

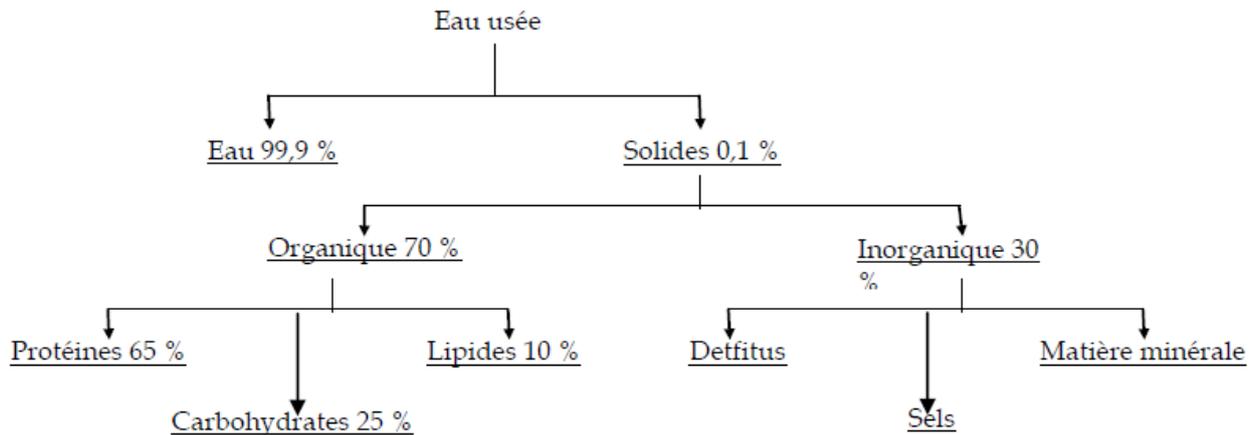


Figure I.2: composition d'une eau usée domestique

#### I.3.4.2. Eaux résiduaires industrielles (ERI)

Les caractéristiques des eaux usées industrielles subissent des grandes variations, elles dépendent à une multitude de paramètres type de l'industrie, production, nettoyage,..., les différentes étapes du procédé industriel, l'état des appareils,... Par ailleurs, il existe des caractéristiques communes entre les effluents de la même industrie.

En terme de volume et type de polluants, les effluents industriels présentent le plus souvent une charge importante et un risque de dysfonctionnement structurel et fonctionnel des réseaux d'assainissement et des dispositifs de traitement des eaux usées. Ces risques sont d'autant plus grands que les industries sont localisées en amont du réseau d'assainissement.

Les principaux polluants transitant dans les eaux usées d'origine industrielle sont :

- Les métaux toxiques,
- Les toxines organiques,
- Les matières colorées,
- Les huiles et graisses,
- Les sels,
- La pollution organique.

## II. Composition et structure de l'eau

L'eau est un liquide transparent, incolore, inodore et sans saveur, contient souvent des substances dissoutes qui lui apportent couleur, goût et saveur. La formule chimique de la molécule d'eau est  $H_2O$ . Le volume d'hydrogène étant le double de celui d'oxygène : la molécule est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. Dans la molécule  $H_2O$ , chaque atome d'hydrogène est lié à l'atome d'oxygène par une liaison covalente, c'est-à-dire qu'une paire d'électrons est mise en commun, ce qui confère une très grande stabilité à la molécule.

### II.1. Composition

L'eau est corps composé constitué des éléments oxygène et hydrogène. Ces deux éléments existent chacun sous trois formes isotopiques :  $^1_1H$  (Hydrogène),  $^2_1H$  (deutérium),  $^3_1H$  (tritium), d'une part et  $^{16}_8O$ ,  $^{17}_8O$ ,  $^{18}_8O$  d'autre part. Les proportions relatives des isotopes  $^3_1H$ ,  $^{17}_8O$ ,  $^{18}_8O$  sont très faibles. L'eau est donc un mélange de trois molécules,  $H_2O$ ,  $D_2O$  et  $HDO$ .  $H_2O$  constituant la fraction la plus importante du mélange (>99,99%), la proportion d'eau lourde  $D_2O$  est de l'ordre de 1/5500.

#### II.1.1. Structure de la molécule d'eau

La composition chimique et la masse molaire de l'eau ne peuvent pas expliquer ses propriétés spécifiques. Les Caractéristiques géométriques sont :

- la molécule H-O-H est coudée, en v inversé
- angle de valence de  $105^\circ$
- distance internucléaire H-O = 0,958

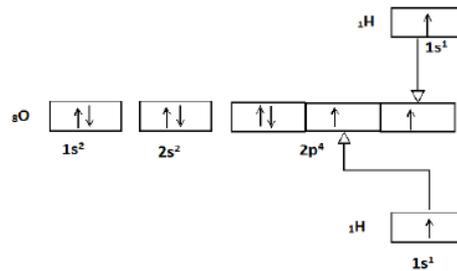
La différence d'électronégativité entre l'oxygène et l'hydrogène confère à la molécule d'eau un moment dipolaire  $\mu = 1,86$  D (gaz) et  $\mu = 2,01$  et 3 D (liquide).

#### II.1.2. Molécule d'eau

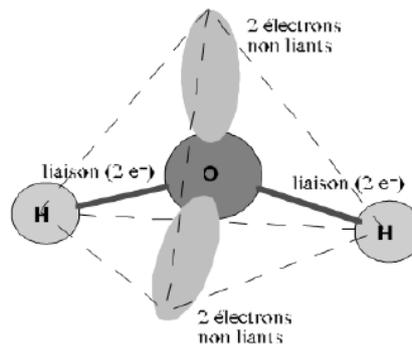
En connaissant la structure de Lewis, on peut prédire la forme des molécules. Pour ceci on regarde combien il y a de liaisons et de doublets autour de l'atome central (théorie d'hybridation  $SP^{n-1}$ ).

Pour la molécule d'eau, l'atome central a deux doublets d'électrons libres qui occupent autant de place qu'une liaison et deux liaisons, cela donne 4 nuages électroniques qui partent vers les sommets d'un tétraèdre (figure). La molécule d'eau est donc angulaire.

Etat d'hybridation de  $H_2O$  :  $n = \Sigma \delta + \text{doublets non liants} = 2 + 2 = 4$



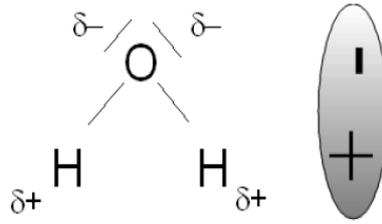
Donc  $H_2O$  est hybridée  $SP_3$



**Figure:** Géométrie de la molécule d'eau

### II.1.3. Nature dipolaire de la molécule d'eau

Une propriété très importante de l'eau est sa nature polaire. D'après les études spectroscopiques et en phase gazeuse, on adopte pour la molécule  $H_2O$ , une géométrie coudée en v inversé et elle forme un angle de  $104,45^\circ$  au niveau de l'atome d'oxygène entre les deux liaisons avec les atomes d'hydrogène. La longueur de la liaison  $O - H$  vaut  $95.84 \text{ pm}$  ( $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$ ).



**Figure:** polarité de la molécule d'eau

Du fait de la géométrie non linéaire de la molécule, les centres de gravité des charges positives et négatives sont distincts et la molécule est polaire. Autrement dit, on peut l'assimiler à un dipôle électrique.

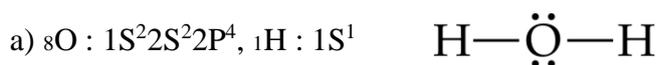
Ainsi, l'eau a un moment dipolaire de 1.83 Debye. Cette polarité fait que les molécules d'eaux s'attirent les unes les autres, le côté positif de l'une attirant le côté négatif d'une autre. Tel lien électrique entre deux molécules s'appelle une liaison hydrogène ou pont hydrogène (liaison par force électrostatique).

**Exercice I.6 :**

- Donner la représentation (structure) de Lewis de la molécule d'eau H<sub>2</sub>O après avoir donné la structure électronique de chaque atome.
- Quelle est la géométrie de la molécule d'eau selon la théorie d'hybridation et selon la théorie de Gillespie (V.S.E.P.R) ?
- D'après l'expérience, le moment dipolaire total de la molécule H<sub>2</sub>O est  $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 1.84 \text{ D}$  (1 D = 0.33 10<sup>-29</sup> C.m)

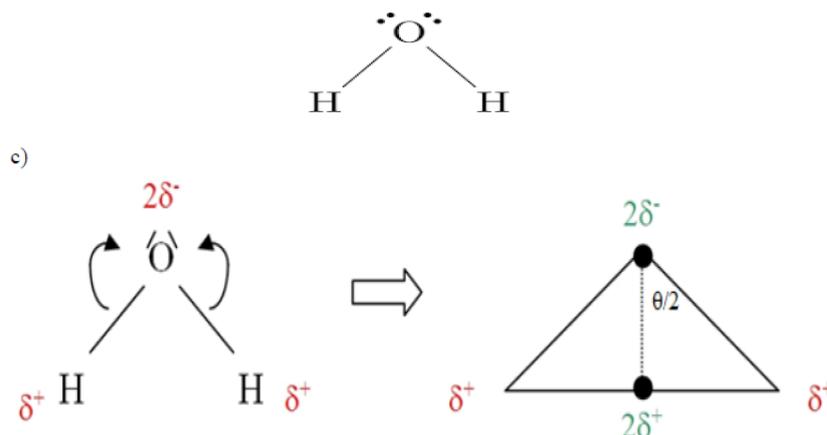
Calculer le moment de la liaison  $\mu_{\text{O-H}}$  et la charge partielle portée par chaque atome.

**Solution I.6 :**



b) Géométrie de H<sub>2</sub>O

- Théorie d'hybridation : SP<sub>3</sub> géométrie tétraédrique
- Théorie de Gillespie : AX<sub>2</sub>E<sub>2</sub> géométrie coudée en V inversé



$$\widehat{H\hat{O}H} = \theta = 104.45^\circ$$

$$d_{O-H} = 95.84 \text{ pm (picamètre)}, 1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$$

$$\mu_{H_2O} = 2 \mu_{H-O} \cos \theta/2$$

$$\mu_{H-O} = \mu_{H_2O} / 2 \cos \theta/2 = 1.5 \text{ D}$$

$$\mu_{H-O} = \delta \cdot d_{O-H} \rightarrow \delta = \mu_{H-O} / d_{O-H} = 1,5 \cdot 0,33 \cdot 10^{-29} / 95,84 \cdot 10^{-12} = 5,16 \cdot 10^{-20} \text{ C}$$

$$e \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \rightarrow \delta = 0,32 e$$

$$\delta_H = +0,32 e$$

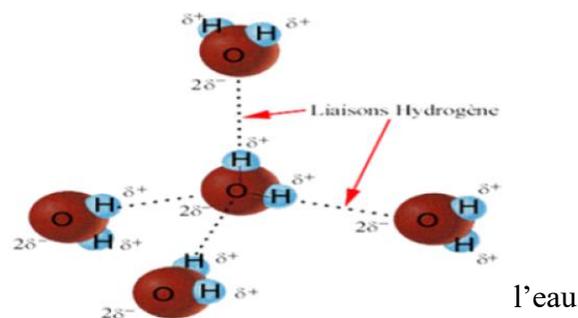
$$\delta_O = -2 \cdot 0,32 e$$

#### II.1.4. Liaison hydrogène ou pont hydrogène

La liaison hydrogène ou pont hydrogène est une liaison chimique de basse intensité (l'énergie d'une liaison hydrogène est d'environ 10 à 40 KJ/mol, alors que l'énergie d'une liaison covalente O – H est d'environ 460 KJ/mol, donc 20 fois plus faible que la liaison covalente) qui relie les molécules par le biais d'atomes d'hydrogènes. Pour que cette liaison s'établisse, il faut être en présence d'un donneur de liaison hydrogène et d'un accepteur.

Lorsqu'une liaison hydrogène s'établit, les deux hétéroatomes se trouvent à une distance d'environ 0.2 nm. Dans une liaison hydrogène, l'atome d'hydrogène reste lié par covalence à son atome d'oxygène et une distance presque double le sépare de l'atome d'oxygène accepteur.

L'eau peut former jusqu'à quatre (4) liaisons hydrogène avec ses voisins (figure I.3). L'atome d'oxygène d'une molécule accepte deux (2) hydrogènes et chaque groupe O – H sert de donneur d'hydrogène.



Les liaisons dans la molécule d'eau s'établissent de telle sorte que l'état liquide de l'eau est l'état le plus compact, tandis que pour tout autre corps pur c'est l'état solide.

La conséquence physique est que la glace flotte et en hiver seule la surface des étendus liquides gèle. La couche de glace joue alors le rôle d'un isolant thermique qui empêche le fond des océans et des rivières de geler.

### **I.2. Etats physiques**

L'eau peut se présenter sous trois états physiques ou phases : Solide (glace), liquide (eau proprement dite) et gaz (vapeur d'eau).

#### **II.2.1. L'état vapeur**

Il est obtenu à partir de 100 °C à la pression atmosphérique ; les molécules sont relativement indépendantes les unes des autres et correspondent au modèle angulaire.

#### **II.2.2. L'état solide**

Il est obtenu en dessous de 0 °C sous la pression atmosphérique ; les molécules sont disposées suivant un tétraèdre avec une molécule d'eau centrale et quatre autres disposées suivant les quatre sommets d'un tétraèdre régulier. Le réseau cristallin qui en résulte est hexagonal. Les molécules sont assemblées par des liaisons hydrogène, chaque atome d'hydrogène d'une molécule d'eau étant lié à l'atome d'oxygène de la molécule voisine.

#### **II.2.3. L'état liquide**

Au cours de la fusion de la glace, les liaisons hydrogène se rompent, le cristal s'effondre et les molécules se rapprochent les unes des autres, la masse volumique augmente jusqu'à une valeur maximale correspondant à une température de 4 °C sous 1 atmosphère. (Masse volumique de l'eau liquide > masse volumique de la glace).

### **II.3. Les eaux naturelles**

Les eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltrations, nappes), des eaux de surface retenues ou écoulement (barrage, lacs, rivières) et des eaux de mer.

#### **II.3.1 Caractéristiques des eaux naturelles**

Les eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltrations, nappes), des eaux de surface retenues ou écoulement (barrage, lacs, rivières) et des eaux de mer.

#### **II.1.1 Les eaux souterraines**

**1- Origine :** On distingue, trois types des nappes des eaux souterraines, à savoir

-**La nappe libre** : elle est alimentée directement par l'infiltration des eaux de ruissellement. Le niveau de cette nappe fluctue en fonction de la quantité d'eau retenue ;

-**La nappe captive** : elle est séparée de la surface du sol par une couche imperméable. Elle est généralement plus profonde.

-**La nappe alluviale** : c'est une nappe située 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.

**2 -Caractéristiques générales** : La nature géologique du terrain a une influence déterminante sur la composition chimique de l'eau retenue. Par exemple, 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. Les eaux souterraines sont souvent d'une grande pureté bactériologique.

**3 -Potabilité** : Les eaux souterraines sont généralement propres et répondant naturellement aux normes de potabilité. Ces eaux sont en effet moins sensibles aux pollutions accidentelles.

### II.1.2 Les eaux de surface

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

**1 -Origine** : Elles viennent, soit des nappes profondes dont l'émergence constitue une source d'eau minérale ou de source soit par l'accumulation des eaux de pluie pour constituer de ruisseau, de rivière, etc. Elles peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (lacs) ou artificielles (retenues, barrages) ;

**2- Caractéristiques générales** : La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par l'eau durant son parcours dans l'ensemble des bassins versants. Ces eaux se chargent en gaz dissous (oxygène, azote, gaz carbonique). Elles sont chargées d'une concentration importante en matières en suspension et matières organiques d'origine naturelle provenant de la décomposition des organismes végétaux ou animaux ;

**3- Potabilité des eaux de surface** : Les eaux de surface sont rarement potables sans aucun traitement. Les eaux de surface sont généralement polluées bactériologiquement. De plus, elles peuvent présenter plusieurs pollutions :

-d'origine urbaine : les eaux d'assainissement ;

-d'origine industrielle : polluants et micropolluants organiques (hydrocarbures, solvants, produits de synthèse, phénols) ou inorganiques (métaux lourds, ammoniac, produits toxiques) ;

-d'origine agricole : engrais et produits pesticides ou herbicides.

**II.1.3 Eaux de mer et eaux saumâtres**

Les eaux des mers sont caractérisées par une salinité importante, qui peut varier selon les origines

Table : Salinité des eaux de quelques océans et mers

| Origine Salinité        | (g/l)   |
|-------------------------|---------|
| Atlantique et Pacifique | 32 à 35 |
| Mer Méditerranée        | 38 à 40 |
| Mer Rouge               | 43 à 45 |
| Mer Morte               | 270     |

**II.1.4. Abondance et répartition de l'eau**

Les océans occupent une superficie à peu près égale à 70 % de la surface du globe et représentent 97 % de la masse totale de l'eau dans la biosphère. L'eau douce ne représente que 3 % de l'eau totale sur la planète. Les trois quarts de cette eau douce se présentent sous forme de glace piégée dans les calottes glaciaires ou les glaciers continentaux. L'eau douce libre est piégée à 98,5 % dans les aquifères souterrains.