

# Chapitre I : Microbiologie de l'eau

L'eau est un élément vital pour toute forme de vie sur terre, et la microbiologie de l'eau étudie les micro-organismes présents dans les systèmes aquatiques (bactéries, virus, champignons et protozoaires) qui peuplent les eaux douces et salées, des rivières et des lacs aux océans et aux eaux souterraines. Ceux-ci jouent un rôle crucial dans les écosystèmes aquatiques en tant que producteurs primaires, décomposeurs et recycleurs de nutriments. Leur activité métabolique influence la qualité de l'eau, la disponibilité des nutriments et la santé des écosystèmes aquatiques dans leur ensemble.

Cependant, certains microorganismes peuvent être à l'origine de maladies transmises par voie hydrique, telles que le choléra, la typhoïde et les gastro-entérites.

## I. Les eaux naturelles

### I.1. Classification

Elles comprennent les eaux marines et celles douces :

- **Les eaux marines**

Les eaux marines présentent une salinité élevée. Elles sont riches en minéraux et en gaz dissous. Les microorganismes se retrouvent soit en suspension, soit fixés aux surfaces sous-marines, ou encore attachés aux sédiments. Cette diversité comprend des microorganismes extrémophiles tels que les barophiles, les halophiles et les psychrophiles.

- **Les eaux douces**

Dans les eaux douces, on observe la présence d'algues, qui coexistent souvent avec de la matière organique et des minéraux dissous. Les variations saisonnières, telles que les changements de température, de luminosité et de disponibilité des nutriments, peuvent influencer de manière significative la croissance et la distribution des algues dans ces habitats aquatiques.

## I.2. Autoépuration des eaux naturelles

L'auto-épuration de l'eau englobe une coopération complexe entre des facteurs physiques et biochimiques tels que : la sédimentation, l'oxydation, un échange de substances volatiles entre l'atmosphère et l'eau, et la libération de produits gazeux du métabolisme dans l'atmosphère. Cependant, le rôle critique est joué par les facteurs biologiques. Un large éventail de micro-organismes et d'organismes supérieurs participent aux processus d'auto-épuration.

Les bactéries et les champignons sont les plus cruciaux car ils sont capables de minéraliser divers composants minéraux. Les protéines, les sucres simples et complexes, les graisses, la cellulose, la lignine, la cire et d'autres subissent une dégradation pendant le processus d'auto-épuration. En résultat de la minéralisation, des composés sont créés ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ...). Avec la progression de l'auto-épuration, les populations de micro-organismes qui agissent dans l'environnement changent.

**Autoépuration de l'eau** = dégradation de la matière organique (décomposition par les microorganismes) + élimination des formes minérales de l'azote (nitrification et dénitrification) + élimination des microorganismes (amensalisme, prédation, autolyse...).

Les microorganismes épurateurs les plus rencontrés sont *Pseudomonas*, *Acinetobacter* et *Flavobacterium*, *Aeromonas* et les *Entérobactériaceae*. *Clostridium* et *Desulfovibrio* interviennent aussi dans l'épuration.

- Les algues, par photosynthèse, assure l'oxygénation du milieu.
- En aérobiose, la fermentation ou l'oxydation des matières organiques par les microorganismes aboutissent à la formation de matières minérales.
- En absence d'oxygène, la fermentation dégage du méthane et souvent des sulfures nuisibles pour l'écosystème.

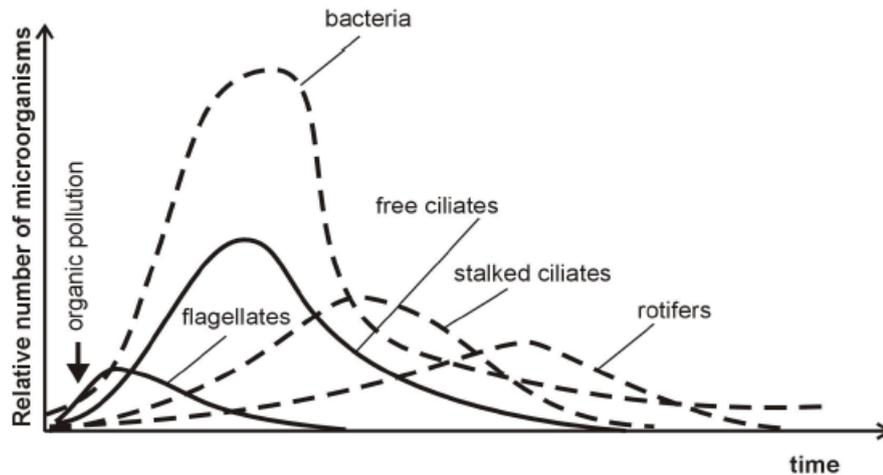


Fig 1. Succession des organismes pendant le processus d'auto-épuraton

Enfin, la minéralisation totale de l'azote et du soufre est réalisée grâce aux chimiolithotrophes. L'azote sous ses formes : nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) est éliminé par : **Nitrification** : Lors de la nitrification, l'ammonium est transformé en nitrite puis nitrate en conditions aérobies, sous l'effet des microorganismes : *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*.

**Dénitrification** : La dénitrification a lieu en condition anaérobie.

La dégradation de l'ammonium directement en  $\text{N}_2$  peut être réalisée par les bactéries Anammox.

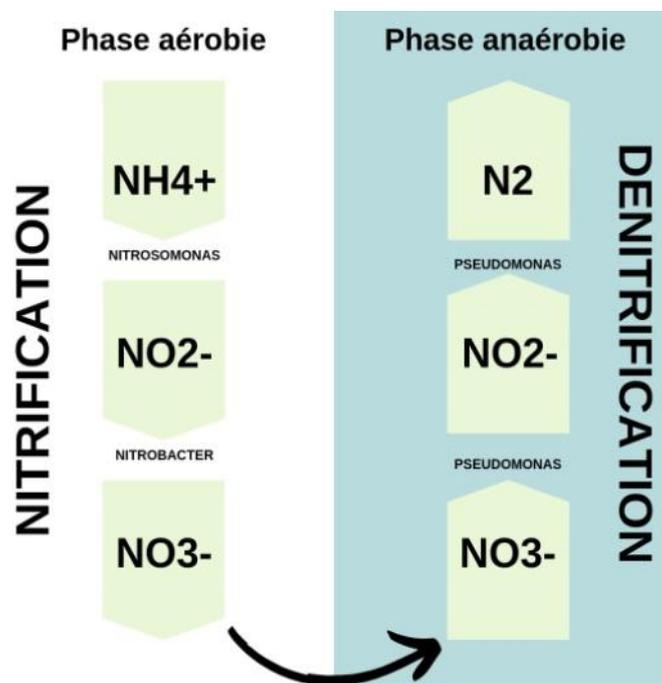


Fig 2. Nitrification et dénitrification au biais des microorganismes

## II. Eaux usées

### II.1. Pollution de l'eau

On appelle pollution de l'eau toute modification chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet nocif les êtres vivants. Dans les eaux usées, on trouve généralement entre  $10^8$  et  $10^{11}$  bactéries par millilitre, comprenant de nombreux coliformes, ainsi que d'autres bactéries aéro-anaérobies telles que *Aeromonas*.

Il existe des paramètres permettant d'estimer cette pollution dont :

**MES : Matière en suspension** : c'est la quantité des matières dissoutes contenues dans l'eau et exprimés en mg/L.

**DBO5 : Demande Biologique en Oxygène en 5 jours**: c'est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les M.O organiques biodégradables (protéines, acides gras, éthanol...) présentes dans l'eau par les bactéries, elle est mesurée pendant 5 jours à 20°C.

**DCO : Demande Chimique en Oxygène**: quantité de dioxygène consommée par les oxydants chimiques forts pour oxyder les substances organiques (biodégradables et non biodégradables) et minérales de l'eau.

**La qualité microbiologique de l'eau** est un paramètre crucial pour garantir sa potabilité. Les micro-organismes d'origine fécale, provenant du tractus digestif humain et animal, sont particulièrement préoccupants. Pour évaluer cette contamination fécale, on se base sur des micro-organismes indicateurs spécifiques dits « indicateurs de contamination fécale » ICF.

Les principaux ICF comprennent les coliformes totaux, qui sont des entérobactéries présentes dans l'intestin humain et animal ainsi que dans l'environnement. Les coliformes thermotolérants, un sous-groupe des coliformes totaux, fermentent le lactose à une température de 44,5 °C et comprennent des espèces telles qu'*Escherichia coli*, *Citrobacter*, *Enterobacter* et *Klebsiella*.

Les entérocoques fécaux, des bactéries Gram positif anaérobies facultatives, sont également des indicateurs de contamination d'origine organique. Les *Clostridium sulfito-réducteurs*, en particulier *Clostridium perfringens*, sont considérés comme des indicateurs de contamination récente et ancienne en raison de leur résistance aux conditions environnementales.

En outre, les bactéries hétérotrophes aérobies et anaérobies (BHAA) ou la flore totale aérobie mésophile (FTAM) sont utilisées pour mesurer quantitativement les bactéries viables dans l'eau.

## II.2. Phénomènes de pollution de l'eau

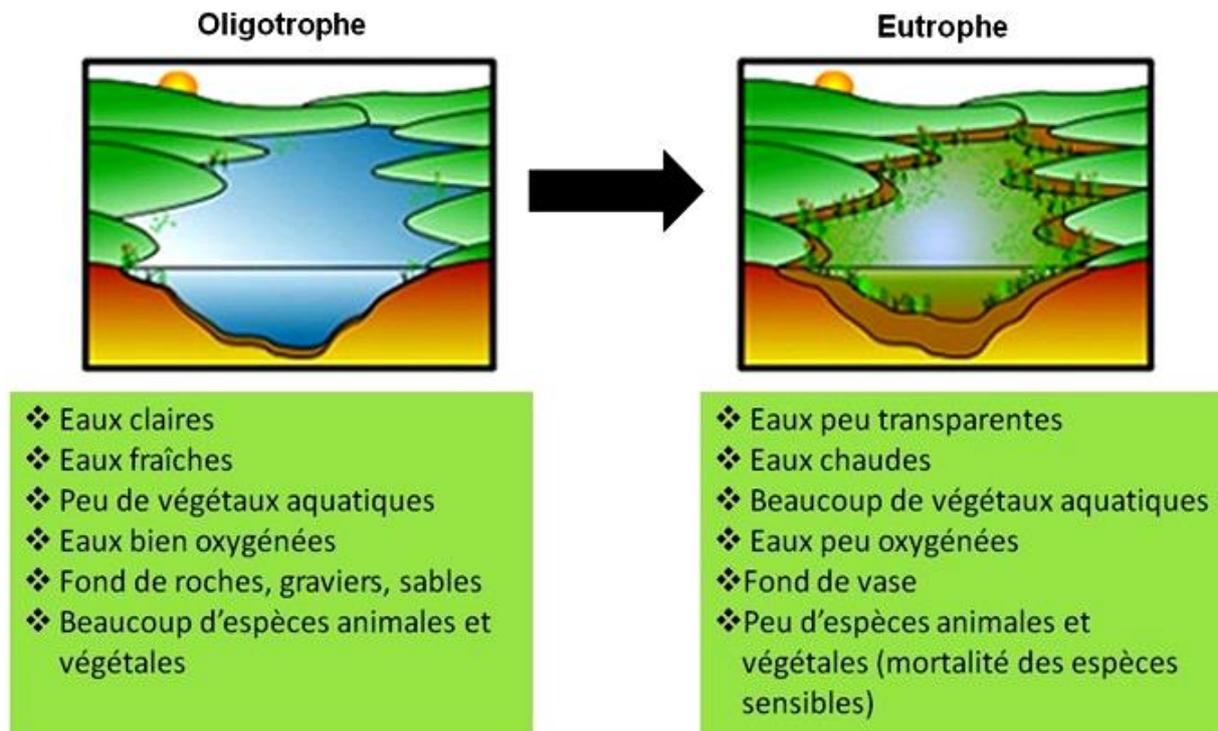
### a. Eutrophisation

C'est un phénomène naturel ou anthropique qui correspond à une augmentation excessive de la quantité de matière organique dans les écosystèmes aquatiques, notamment les lacs, les étangs, les rivières et les estuaires.

C'est un processus lent qui se produit comme suit :

- Rejet de la matière organique
- Apport excessif en nitrates, les phosphates et ammoniums
- Croissance excessive des algues et des végétaux aquatiques
- Diminution de la transparence
- Accumulation de la matière organique
- Décomposition de la matière organique par les bactéries aérobies tout en consommant l'oxygène
- Diminution du niveau d'oxygène dissous en profondeur
- Dominance des bactéries anaérobies nuisibles productrice du méthane et de sulfure d'hydrogène
- L'écosystème devient anoxique ce qui mène à la mort des poissons, invertébrés et végétaux aquatiques : disparition de la biocénose (changement irréversible)

L'eutrophisation peut être causée par des sources naturelles, telles que l'apport de nutriments par les rivières et les cours d'eau, ou par des sources anthropiques, telles que les rejets d'eaux usées, les engrais agricoles et les activités industrielles.



**Fig 3. Phénomène d'eutrophisation**

### **b. Biofilm bactérien**

Les biofilms se composent de communautés bactériennes emprisonnées dans une matrice extracellulaire, fixées à diverses surfaces, qu'elles soient naturelles ou artificielles. Il est constitué d'agrégats de microorganismes, séparés par des espaces libres (pas de bactéries) et traversés par des courants aqueux agissant comme de véritables "canaux". Ces courants assurent la circulation des fluides, permettant à la fois l'apport de nutriments aux bactéries et l'élimination de leurs déchets métaboliques. Sa structure est souvent complexe et hautement variable d'un biofilm à l'autre, en fonction des microorganismes qui le composent et des conditions environnementales.

L'architecture des biofilms bactériens se développe largement grâce à la production de cette matrice extracellulaire par les bactéries qui le composent. Cette matrice regroupe tous les éléments du biofilm en dehors des microorganismes eux-mêmes. Principalement constituée d'eau (jusqu'à 97 %), elle comprend des polymères polysaccharidiques sécrétés par les microorganismes, ainsi que des produits de dégradation et des substances provenant de l'environnement extérieur. Par ailleurs, d'autres composants tels que de l'ADN, de l'ARN et des lipides peuvent également être présents.

### Hétérogénéité des biofilms :

- Le développement tridimensionnel du biofilm crée des gradients physico-chimiques.
- Contrairement aux cultures classiques en milieux liquides agités, le biofilm n'est pas homogène.
- Il présente des zones avec des variations de teneurs en oxygène, nutriments et pH.
- De nombreux microorganismes se répartissent de manière organisée dans le biofilm, permettant la cohabitation de bactéries, champignons, algues et protozoaires.

Les bactéries présentes dans les biofilms démontrent des caractéristiques particulières : La **densité** bactérienne élevée, la production de **matrice** et la croissance sur une surface. Des études nombreuses ont démontré que la formation d'un biofilm conduit à une **expression génique différente par rapport aux bactéries planctoniques**

### Etapes de formation

Le développement d'un biofilm suit un modèle en cinq étapes, déduit à partir d'observations directes par microscopie et d'études génétiques.

La première étape implique le **conditionnement rapide de la surface**, suivi du **déplacement** des bactéries dans le milieu liquide grâce à des forces telles que le **flux**, la **gravité** et/ou les **mouvements flagellaires**.

Lorsque les bactéries s'approchent d'une surface, des forces d'attraction physico-chimiques entrent en jeu, conduisant à une **interaction réversible** avec celle-ci.

Dans un second temps, avec la **division cellulaire**, le nombre de bactéries associées à la surface augmente et **l'adhésion devient irréversible**, accompagnée de la **synthèse de structures à la surface bactérienne**.

Les bactéries forment alors **des amas** à la surface et produisent des **polysaccharides extracellulaires**, marquant la troisième étape.

La quatrième étape est caractérisée par la formation de **microcolonies** composées des bactéries initiales en division et de celles qui se joignent au biofilm en formation.

Le **stade de maturation**, cinquième et dernier, voit le **développement des microcolonies** et la structuration du biofilm en piliers **d'épaisseur variable**, avec les **cellules enrobées dans la matrice extracellulaire**.

Certaines bactéries peuvent se **détacher** du biofilm mature dans la dernière étape, favorisant la **colonisation de nouvelles surfaces**.

### Avantages et conséquences du mode de vie en Biofilm

- Colonisation d'une variété de surface
- Coopération métabolique
- Signalisation au sein du Biofilm: Le mécanisme de Quorum-sensing permet la communication intercellulaire et la régulation de l'expression génétique en réponse à la densité cellulaire, facilitant la formation et la structuration des biofilms.
- Transfert d'information génétique: Les biofilms favorisent les transferts horizontaux d'information génétique, notamment par conjugaison
- Protection contre les agressions environnementales: Les biofilms offrent une meilleure résistance aux agressions extérieures telles que les UV, les variations de pH et d'osmolarité, la prédation et les agents antimicrobiens,

### Infections causées par les biofilms:

- Les biofilms sont responsables d'infections **chroniques**, surtout chez les individus immunodéprimés. Ses microorganismes présentent une résistance très élevée aux antibiotiques, dus à leur environnement et à des mécanismes spécifiques de résistance.

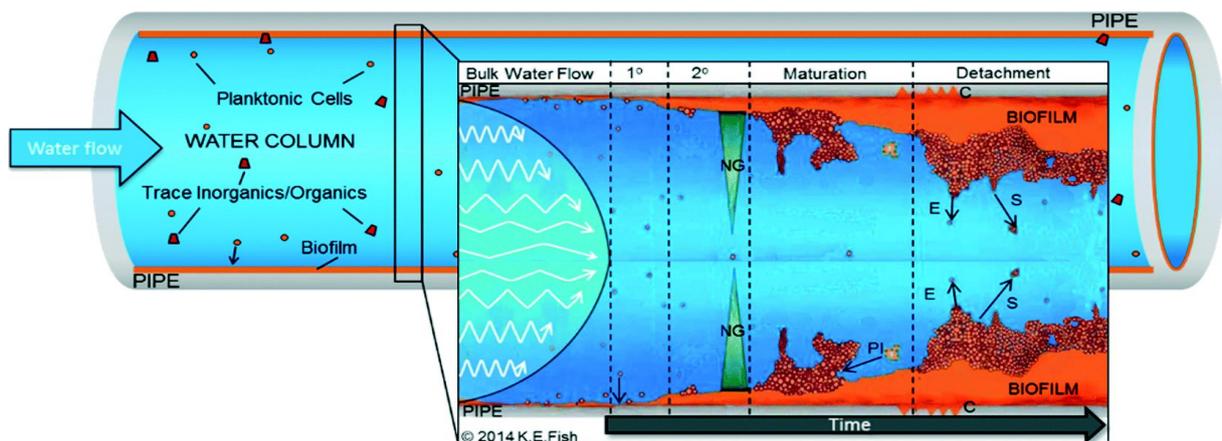


Fig 3. Développement d'un biofilm dans un « système de distribution d'eau potable »

Au fur et à mesure que la distance à la paroi augmente, l'écoulement devient plus laminaire, 1° - adhésion primaire, 2° - adhésion secondaire, NG - gradient de nutriments, se concentre dans le biofilm, PI - interactions entre protozoaires, C - corrosion de la surface de la conduite, E - érosion, S - ensablement.

### II.3. Epuration des eaux usées

Elle consiste en quatre opérations :

**a. Prétraitement physique** : c'est l'élimination des grands déchets par :

- **Dégrillage**: élimination des déchets en faisant passer l'eau à travers des tamis.
- **Dessablage**: extraction des sables qui se déposent au fond des bassins de traitement.
- **Dégraissage-Déshuilage**: Elimination des huiles et des graisses, des bulles d'air sont injectées pour faire remonter les huiles et les graisses à la surface de l'eau, puis, celles-ci sont raclées.

**b. Traitement primaire** : Décantation

L'eau à traiter est décantée dans de grands bassins afin d'éliminer les matières minérales et organiques en suspension qui se déposent au fond du bassin . Il se forme alors des boues dites « boues primaires » qui seront éliminés par la suite.

Une « floculation » peut être appliquée en ajoutant des produits chimiques qui captent les matières en suspension

**c. Traitement secondaire** (Biologique) :

Les M.O contenues dans l'eau sont dégradées par les microorganismes, le plus souvent des bactéries (Bacillus, Pseudomonas...) dans des bassins d'activation biologiques équipés de dispositifs d'aération. Il est réalisé par :boues activées, lits bactériens, lagunage et biofiltres.

**d. Traitement tertiaire** :

Appliqué dans certaines stations d'épuration afin d'obtenir une plus pure, il consiste à éliminer le phosphore et l'azote (nitrification- dénitrification), il implique aussi un traitement bactériologique (ozonation, chloration...).

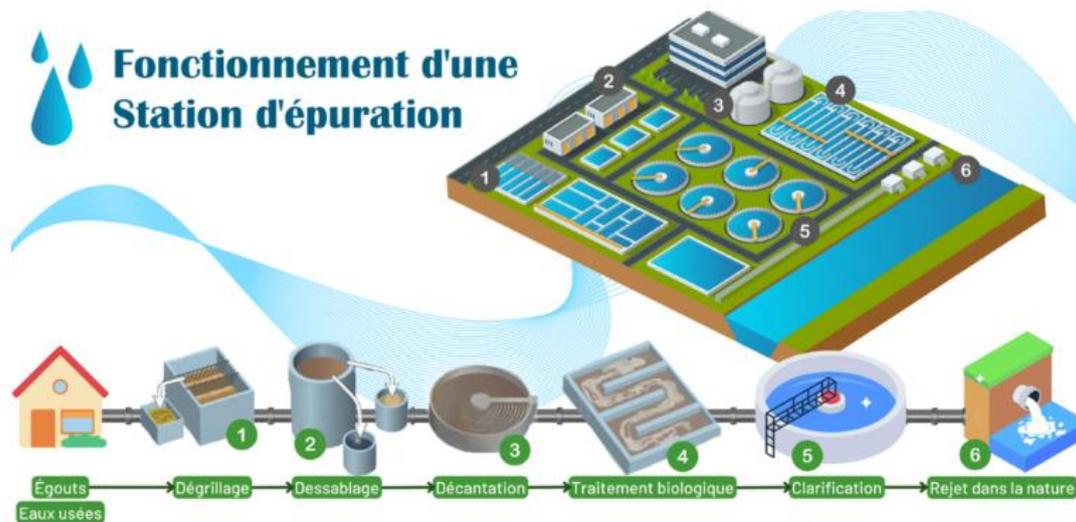


Fig. 4. Schéma d'une station d'épuration des eaux usées (<https://www.oryxeleven.com>)

### III. Eaux brutes et leur potabilité

Les "eaux brutes" font référence à l'eau non traitée qui est prélevée à partir de sources naturelles telles que les rivières, les lacs, les nappes phréatiques ou les eaux souterraines. Ces eaux brutes contiennent généralement diverses impuretés telles que des sédiments, des micro-organismes, des substances chimiques et des contaminants d'origine naturelle ou anthropique.

Avant d'être utilisées à des fins domestiques, industrielles ou agricoles, les eaux brutes doivent souvent être traitées pour enlever les contaminants et les rendre sûres à la consommation ou à d'autres utilisations. Le traitement de l'eau peut comprendre des processus tels que la filtration, la désinfection, la clarification et d'autres méthodes visant à améliorer la qualité de l'eau et à la rendre conforme aux normes réglementaires en matière de santé et de sécurité.

#### *Potabilisation de l'eau*

L'OMS définit des réglementations bien précises pour assurer la qualité chimique et bactériologique de l'eau potable.

L'eau brute subit plusieurs traitements à fin de la qualifier de « Potable»:

1. **Dégrillage** : vise à éliminer les gros déchets par filtration puis par passage à travers des tamis
2. **Coagulation et floculation** :
  - Coagulation : déstabilisation des matières colloïdales en ajoutant des coagulants pour que celles-ci s'agglomèrent.

- Flocculation: des produits chimiques sont ajoutés pour induire la formation de floc à partir des matières colloïdales agglomérés
3. **Décantation** : élimination des floccs et des matières en suspension par gravité
  4. **Filtration** : Passage de l'eau à travers un lit de sable fin afin d'éliminer les matières en suspension restantes
  5. **Désinfection** : elle se fait par :
    - Ozonation : l'ozone est un gaz est doté d'une action bactéricide et antivirale permettant une désinfection d é l'eau. Il contribue également à la couleur et la saveur de l'eau.
    - Filtration sur charbon actif: utilisé pour la désinfection et contribue également à l'élimination des macromolécules naturelles, des composés responsables de la couleur, de goûts et odeurs, des pesticides, des colorants, des métaux toxiques (cadmium, mercure...) présents à l'état de traces dans les eaux
    - Chloration: Ajout du chlore Ajout de produits chlorés (pastilles de chlore, eau de javel,...) dans les points du réseau de distribution afin de garantir la qualité microbiologique.

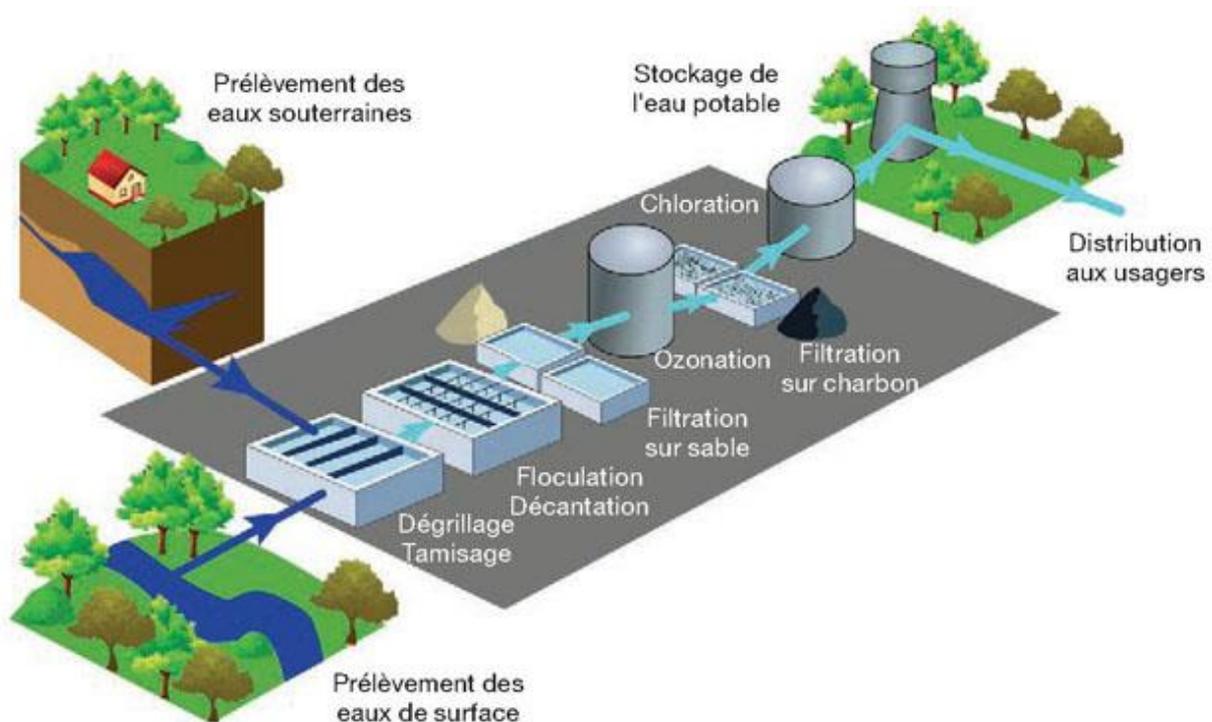


Fig. 5. Schéma d'une station de potabilisation de l'eau