

Chapitre I : Microbiologie de l'eau

Introduction

L'eau représente un facteur fondamental de la vie sur terre et constitue un vecteur d'échanges biologiques et écologiques complexes. La microbiologie de l'eau s'intéresse à l'ensemble des micro-organismes peuplant les milieux aquatiques – qu'ils soient d'eau douce ou marins – tels que les bactéries, virus, protozoaires, champignons et microalgues. Ces organismes remplissent des fonctions écologiques majeures : production primaire, décomposition de la matière organique, et recyclage des nutriments. Leur métabolisme influe directement sur la qualité physico-chimique des eaux et la stabilité des écosystèmes. Cependant, certains peuvent représenter un risque sanitaire, en étant à l'origine de maladies hydriques telles que le choléra, la fièvre typhoïde ou les infections gastro-intestinales. L'étude de cette discipline est donc essentielle pour la surveillance de la qualité de l'eau, la protection de la santé publique et la préservation des ressources aquatiques.

1. Eaux naturelles

Les eaux naturelles sont les eaux présentes dans l'environnement sans avoir été soumises à un traitement anthropique préalable. Elles proviennent de sources variées et jouent un rôle fondamental dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. Ces eaux peuvent contenir naturellement des micro-organismes, des matières organiques et minérales, ainsi que des éléments chimiques dissous ou en suspension. Les microorganismes y présents peuvent être une microflore naturelle utile (dans le cycle des nutriments) ou pathogène (en cas de contamination). Leur surveillance microbiologique est donc essentielle pour évaluer leur potabilité ou leur impact environnemental.

Les eaux naturelles sont classées selon **leur origine** en quatre grandes catégories principales : les eaux de surface, les eaux souterraines, les eaux de précipitation et les eaux marines.

1.1. Les eaux de surface regroupent toutes les eaux libres présentes à la surface des continents, telles que les rivières, les fleuves, les lacs, les barrages et les marécages. Elles sont directement exposées aux apports anthropiques (rejets industriels, agricoles, domestiques) et aux conditions climatiques. En raison de leur ouverture, elles présentent une grande diversité biologique et microbienne, ainsi qu'un risque élevé de pollution.

- 1.2. Les eaux souterraines** proviennent de l'infiltration des eaux de pluie à travers les sols. Elles se stockent dans les nappes phréatiques ou les aquifères profonds. Bien que généralement protégées des contaminations de surface, elles peuvent être enrichies en sels minéraux (comme le calcium, le magnésium ou le fer). Ces eaux présentent souvent une faible charge microbienne, sauf en cas de fissures géologiques ou de contaminations ponctuelles.
- 1.3. Les eaux de précipitation** incluent la pluie, la neige, la grêle et la rosée. Issues des phénomènes atmosphériques, elles sont naturellement peu minéralisées. Cependant, lors de leur chute, elles peuvent capter des polluants atmosphériques (poussières, métaux lourds, gaz, microorganismes aéroportés), surtout dans les zones urbaines ou industrielles.
- 1.4. Les eaux marines**, qui couvrent plus de 70 % de la surface terrestre, comprennent les mers et les océans. Elles se caractérisent par une salinité élevée, généralement autour de 35 g/L. Leur composition chimique et biologique est spécifique, abritant une faune et une flore microbienne adaptée, notamment des bactéries halophiles, des virus marins et des algues microscopiques. Les zones côtières peuvent être particulièrement sensibles à la pollution due aux activités humaines.

2. L'autoépuration des eaux naturelles

L'autoépuration désigne l'ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques naturels par lesquels un milieu aquatique (comme une rivière ou un lac) parvient à dégrader, transformer ou éliminer les polluants contenus dans les eaux usées, sans intervention humaine directe. Ce phénomène permet de réduire progressivement la charge polluante et de restaurer la qualité de l'eau, à condition que les capacités du milieu ne soient pas dépassées.

L'autoépuration repose sur l'action conjointe de plusieurs mécanismes :

Les processus physiques, tels que la sédimentation et la flottation, permettent la séparation des matières en suspension. Les particules lourdes se déposent au fond, formant des sédiments, tandis que les plus légères peuvent remonter à la surface. **Les processus chimiques**, notamment les réactions d'oxydation, de précipitation ou d'adsorption, modifient la forme ou la solubilité des polluants. Par exemple, les métaux lourds peuvent précipiter et se fixer sur des particules minérales. **Les processus biologiques**, dominés par l'activité des micro-organismes (bactéries, champignons, protozoaires, algues), jouent un rôle central. Les bactéries aérobies dégradent la matière organique dissoute en présence d'oxygène, tandis que les bactéries anaérobies interviennent dans des zones pauvres en oxygène pour transformer les composés azotés et soufrés. Cependant, l'efficacité de l'autoépuration est limitée : si la charge polluante est trop

élevée ou si les conditions environnementales sont défavorables, le système peut être dépassé, entraînant une dégradation durable du milieu.

3. Micro-organismes impliqués dans l'autoépuration

Les microorganismes jouent un rôle central dans le processus de l'autoépuration, notamment par la dégradation de la matière organique, la transformation des nutriments et la régulation de l'équilibre biologique. Ces micro-organismes épurateurs se développent sous forme de biofilms fixés sur des substrats (rochers, sédiments, végétaux aquatiques...) ou bien en suspension libre dans la colonne d'eau. On distingue trois grandes catégories fonctionnelles de micro-organismes, selon leur rôle métabolique dans l'épuration :

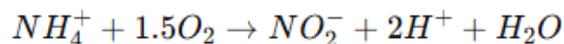
3.1. Décomposeurs aérobies

Il s'agit essentiellement de bactéries **hétérotrophes aérobies**, capables de dégrader la matière organique biodégradable en présence d'oxygène dissous. Une partie du carbone organique et des éléments nutritifs (azote, phosphore) est assimilée par les bactéries et utilisée pour la biosynthèse cellulaire, entraînant une augmentation de la biomasse microbienne. Exemples de genres : *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Flavobacterium*.

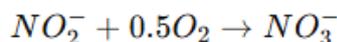
3.2. Les bactéries nitrifiantes

Ces bactéries assurent l'**oxydation de l'azote ammoniacal (NH₄⁺) en nitrates (NO₃⁻)** par un processus en deux étapes :

- **Nitrosation** : *Nitrosomonas* transforme NH₄⁺ → NO₂⁻



- **Nitratation** : *Nitrobacter* transforme NO₂⁻ → NO₃⁻



Ce processus est strictement aérobie et est lent et sensible aux paramètres du milieu (température, pH, oxygène dissous)

3.3. Les bactéries dénitrifiantes

La dénitrification se produit en milieu **pauvre en oxygène** ; Ces bactéries assurent la **réduction des nitrates (NO₃⁻) en azote gazeux (N₂)**, participant à la désazotation du système aquatique. Exemples : *Paracoccus denitrificans*, *Pseudomonas stutzeri*

3.4. Algues et cyanobactéries

Les algues et cyanobactéries jouent un rôle essentiel dans les écosystèmes aquatiques en tant que producteurs primaires. Grâce au processus de photosynthèse, elles transforment le dioxyde de carbone (CO₂) et l'eau en oxygène (O₂) et en biomasse organique sous l'effet de la lumière solaire, selon l'équation générale : L'oxygène ainsi produit est libéré dans l'eau, ce qui augmente la concentration en oxygène dissous, un facteur indispensable à l'activité des bactéries aérobies impliquées dans l'autoépuration. Cependant, leur développement est conditionné par la disponibilité de la lumière et des nutriments. La pénétration lumineuse dépend de la turbidité de l'eau et de la profondeur, tandis que les nutriments essentiels tels que l'azote (N) et le phosphore (P) influencent leur croissance.

3.5. Protozoaires

Les protozoaires jouent un rôle régulateur dans les communautés microbiennes aquatiques. Ils consomment principalement des bactéries en excès, contribuant ainsi à l'équilibre biologique du système. Cette prédation limite la surpopulation bactérienne, prévient la compétition excessive pour les ressources, et favorise une diversité microbienne fonctionnelle.

Parmi les protozoaires les plus courants dans les eaux douces figurent les **ciliés** (ex. : *Paramecium*), les **flagellés** et les **amibes**. En plus de leur fonction trophique, ils participent indirectement à la **clarification de l'eau**, en ingérant des particules organiques en suspension.

3.6. Champignons aquatiques

Les champignons aquatiques participent à la dégradation des matières organiques complexes. Ils sont capables d'attaquer des composés résistants à la biodégradation bactérienne, tels que la lignine et la cellulose, provenant notamment des débris végétaux immergés (feuilles mortes, bois, etc.). Grâce à la production d'enzymes extracellulaires, ils facilitent la fragmentation de ces matériaux en composés plus simples, utilisables par d'autres micro-organismes. Ces champignons sont généralement plus abondants en milieux peu oxygénés (conditions anaérobies ou microaérobies) ou attachés aux surfaces végétales, formant des biofilms.

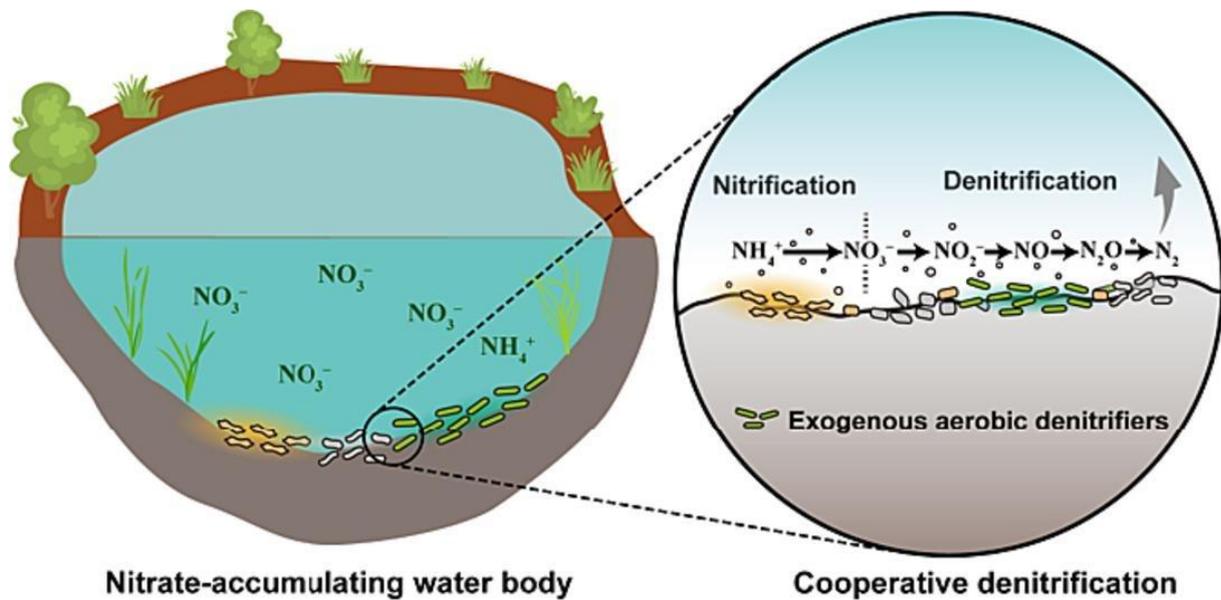


Image par **Huang et al., (2024)** : Cooperative denitrification by exogenous aerobic denitrifiers and indigenous sediment microbiota in nitrate-accumulating waterbodies

4. Pollution de l'eau

La pollution de l'eau désigne toute altération chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau susceptible d'avoir des effets nuisibles sur les organismes vivants, les écosystèmes aquatiques ou la santé humaine. Cette dégradation peut résulter de diverses sources, telles que les rejets domestiques, industriels, agricoles ou hospitaliers. Les polluants peuvent inclure des substances organiques ou inorganiques, des agents pathogènes, des produits pharmaceutiques, des métaux lourds, des pesticides ou encore des perturbateurs endocriniens.

Sur le plan microbiologique, les eaux usées constituent un milieu très riche en micro-organismes. Elles contiennent généralement une charge bactérienne élevée, comprise entre 10^8 et 10^{11} bactéries par millilitre. Cette densité témoigne d'une activité biologique intense et d'une forte charge polluante. Parmi ces micro-organismes, on retrouve une prédominance de bactéries coliformes, notamment les *Escherichia coli*, considérés comme des indicateurs de contamination fécale. Leur présence en grande quantité signale un risque potentiel pour la santé publique, notamment en cas de rejet non traité dans les milieux naturels ou de consommation d'eau contaminée.

D'autres groupes de bactéries aéro-anaérobies sont également présents dans les eaux usées. Par exemple, les espèces du genre *Aeromonas*, fréquemment détectées dans les environnements aquatiques pollués, sont opportunistes et peuvent provoquer des infections chez l'humain et les animaux (infections gastro-intestinales, septicémies, plaies infectées, etc.). Ces bactéries

présentent souvent une résistance élevée aux antibiotiques, ce qui en fait des indicateurs pertinents de la pression anthropique sur les milieux aquatiques et de la dissémination des résistances bactériennes.

5. Paramètres physiques et physico-chimiques

La **température** est un paramètre qui conditionne la vitesse des **réactions chimiques**, le **taux d'oxygénation de l'eau** (la solubilité de l'oxygène diminue lorsque la température augmente) et l'**activité métabolique des micro-organismes**.

Le pH mesure l'acidité ou la basicité d'un milieu. Des variations extrêmes peuvent altérer les équilibres biochimiques, affecter les fonctions enzymatiques des organismes vivants, et provoquer des effets toxiques sur la faune et la flore aquatiques.

La conductivité électrique reflète la concentration en sels dissous,. Une conductivité élevée peut révéler une pollution d'origine minérale, comme celle issue des rejets industriels.

Les composés azotés, tels que l'azote total (NTK), l'azote ammoniacal (NH_4^+), les nitrites (NO_2^-) et les nitrates (NO_3^-), sont des indicateurs de pollution azotée, généralement issus des rejets d'eaux usées domestiques, industriels ou agricoles.

Les phosphates (PO_4^{3-}) proviennent essentiellement des détergents, engrais et effluents ménagers. Leur présence en excès peut conduire à l'eutrophisation.

Les métaux lourds comme le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le mercure (Hg) ou le chrome (Cr) sont hautement toxiques, même à de faibles concentrations.

Les hydrocarbures, pesticides, et solvants organiques sont des polluants organiques persistants, généralement d'origine industrielle ou agricole. Ils peuvent contaminer durablement les nappes phréatiques et les écosystèmes aquatiques.

La turbidité mesure la concentration de MES : matières en suspension (argiles, algues, matières organiques). Une turbidité élevée limite la pénétration de la lumière, ce qui affecte la photosynthèse des algues et des plantes aquatiques et perturbe les chaînes trophiques.

La couleur et l'odeur de l'eau constituent des indicateurs sensoriels précoces de pollution : Une couleur anormale (brunâtre, verdâtre, noire) ou une odeur désagréable (soufre, ammoniacale, putride).

Paramètres microbiologiques

Les **coliformes totaux** et **coliformes fécaux**, en particulier *Escherichia coli*, sont utilisés comme **indicateurs de contamination fécale** d'origine humaine ou animale. Leur détection dans les eaux de surface ou souterraines révèle un **risque sanitaire**, notamment en cas de consommation d'eau non traitée. Les **entérocoques** et *Clostridium perfringens* sont des indicateurs **plus résistants** que les coliformes et permettent de détecter des contaminations anciennes ou chroniques. Leur présence est particulièrement surveillée dans les eaux destinées à la baignade ou à la consommation. Enfin, les **pathogènes spécifiques**, tels que *Salmonella*, *Vibrio cholerae*, *Shigella*, ou les **virus entériques** (comme les norovirus ou les rotavirus), peuvent causer des **épidémies hydriques**. Leur détection nécessite des techniques microbiologiques spécifiques et sensibles, car ils sont souvent présents à de très faibles concentrations.

Paramètres liés à l'oxygène et à la matière organique

La **Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours (DBO₅)** correspond à la quantité d'oxygène requise par les micro-organismes pour **décomposer la matière organique biodégradable** contenue dans un échantillon d'eau. Elle constitue un **indicateur clé de la charge organique**. Des valeurs élevées traduisent une **pollution organique importante**, souvent liée aux effluents domestiques ou agroalimentaires.

La **Demande Chimique en Oxygène (DCO)** quantifie la quantité totale d'oxygène nécessaire à l'**oxydation chimique** (et non biologique) de toute la matière organique, qu'elle soit **biodégradable ou non**. Elle donne une évaluation globale de la **charge organique totale** et est souvent supérieure à la DBO.

6. Phénomènes naturels de pollution

6.1. Eutrophisation

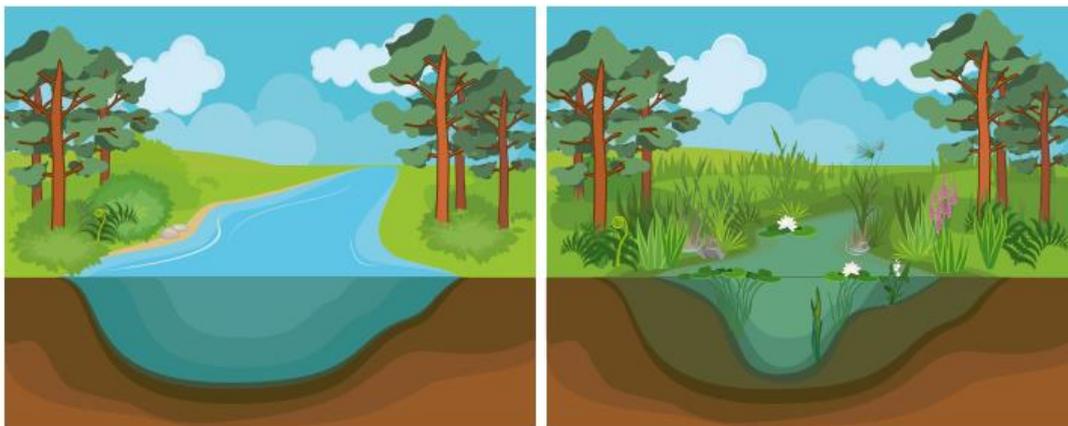
L'eutrophisation est un phénomène d'enrichissement excessif en matière organique et en éléments nutritifs (notamment en azote et en phosphore) dans les écosystèmes aquatiques tels que les lacs, les étangs, les rivières ou les estuaires. Ce processus peut être d'origine naturelle (érosion, apports allochtones) mais est le plus souvent accéléré par les activités humaines, en particulier par les rejets domestiques, agricoles (engrais, lisiers) et industriels.

L'eutrophisation est généralement **progressive**, et suit une série d'étapes caractéristiques :

1. **Apports excessifs en nutriments**, notamment en **nitrate** (NO_3^-), **phosphates** (PO_4^{3-}) et **ammonium** (NH_4^+), issus des effluents urbains ou de l'agriculture.

2. **Croissance accélérée des algues** et des **macrophytes aquatiques**, due à la disponibilité élevée des nutriments — un phénomène appelé **bloom algal**.
3. **Réduction de la transparence de l'eau**, ce qui limite la pénétration de la lumière et affecte la photosynthèse des plantes aquatiques profondes.
4. **Accumulation de biomasse organique**, notamment les débris algaux morts.
5. **Décomposition de la matière organique** par les **bactéries aérobies**, entraînant une **consommation accrue d'oxygène dissous (OD)**, surtout dans les couches profondes.
6. **Apparition de zones hypoxiques voire anoxiques**, où l'oxygène est insuffisant pour maintenir la vie aquatique normale.
7. **Prolifération de bactéries anaérobies**, qui dégradent la matière organique en produisant des gaz toxiques tels que le **méthane (CH₄)** et le **sulfure d'hydrogène (H₂S)**.
8. **Effondrement de la biocénose** : la **mortalité des poissons, des invertébrés aquatiques et des plantes** s'intensifie, entraînant une perte de biodiversité et une **altération durable de l'écosystème**.

L'eutrophisation peut être **réversible à ses débuts**, mais devient **irréversible** lorsque les apports de nutriments persistent et que la biocénose est complètement perturbée.



- Eau claire et fraîche
- Peu de végétation aquatique
- Eau bien oxygénée
- Fond de roches, graviers, sables
- Biodiversité élevée

- Eau turbide et chaude
- Végétation aquatique abondante
- Eau peu oxygénée
- Fond vaseux
- Biodiversité faible

Un lac eutrophie : Image par Lecompte et al. (2021) : Fertilisation Azotée des cultures légumières: spécificité des cultures, des méthodes, et état des pratiques en France

6.2. Formation de biofilm

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.

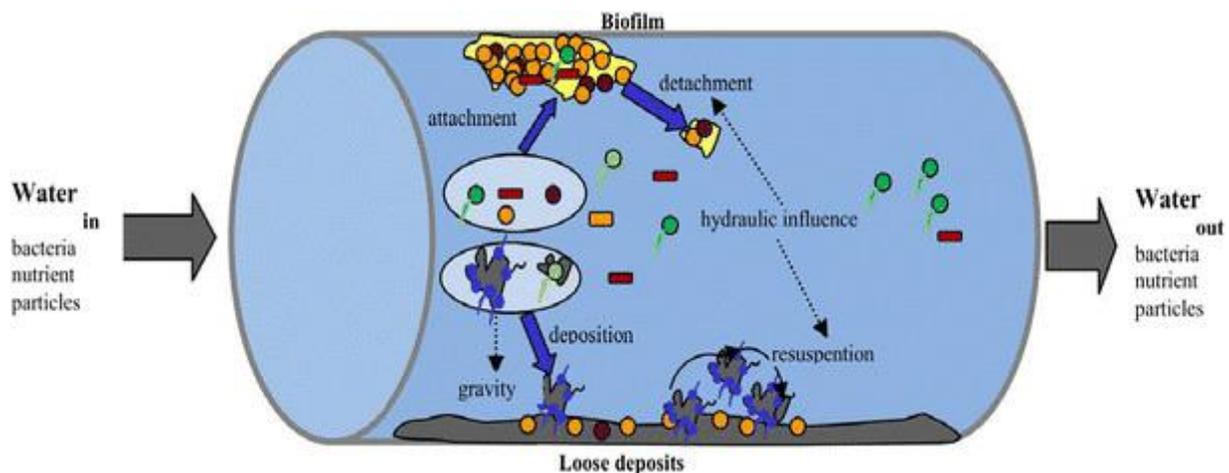
Contrairement aux cultures classiques en milieux liquides agités, le biofilm n'est pas homogène. Il présente des zones avec des variations de teneurs en oxygène, nutriments et pH. De nombreux microorganismes se répartissent de manière organisée dans le biofilm, permettant la cohabitation de bactéries,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



Formation de biofilm (Image par: Liu et al., (2017) : Bacterial community radial-spatial distribution in biofilms along pipe wall in chlorinated drinking water distribution system of East China)

7. Traitement des eaux usées:

Les eaux usées sont des eaux ayant été altérées par l'usage domestique, industriel, agricole ou urbain. Elles contiennent divers polluants physiques, chimiques et biologiques, tels que des matières organiques, des nutriments (azote, phosphore), des micro-organismes, des métaux lourds ou encore des résidus médicamenteux. Avant tout rejet dans le milieu naturel, elles doivent être traitées pour limiter leur impact environnemental et sanitaire.

Le traitement des eaux usées a pour objectif principal de réduire les polluants présents dans les effluents afin de permettre leur rejet dans le milieu naturel sans danger pour les écosystèmes aquatiques ou leur réutilisation dans divers secteurs (irrigation, usage industriel, recharge de

nappes phréatiques). Pour atteindre ces objectifs, les stations d'épuration sont généralement organisées en quatre grandes étapes complémentaires :

7.1. Prétraitement physique

Le **prétraitement** vise à éliminer les déchets grossiers et les matières flottantes susceptibles de perturber les étapes ultérieures ou d'endommager les équipements. Il repose exclusivement sur des procédés physiques de séparation.

- **Dégrillage** : Il constitue la première barrière mécanique, interceptant les objets solides de grande taille (plastiques, papiers, tissus, branches) à l'aide de grilles ou de tamis à mailles de différentes tailles (grossier, moyen, fin).
- **Dessablage** : Ce procédé permet d'éliminer par sédimentation gravitationnelle les particules minérales lourdes (sables, graviers), protégeant ainsi les pompes et canalisations de l'abrasion.
- **Dégraissage/Déshuilage** : Les graisses et huiles, moins denses que l'eau, sont extraites en surface par injection de bulles d'air qui facilitent leur remontée. Elles sont ensuite raclées mécaniquement.

7.2. Traitement primaire : décantation

Il a pour but d'éliminer les **matières en suspension (MES)** et une fraction de la matière organique particulaire. L'eau est dirigée vers de grands bassins de décantation, où les solides sédimentent sous l'effet de la gravité et forment les boues primaires, riches en matière organique. Pour améliorer l'efficacité de cette étape, on peut y ajouter des coagulants (sels métalliques) et de flocculants (polymères) qui agglomèrent les colloïdes et favorisent la clarification.

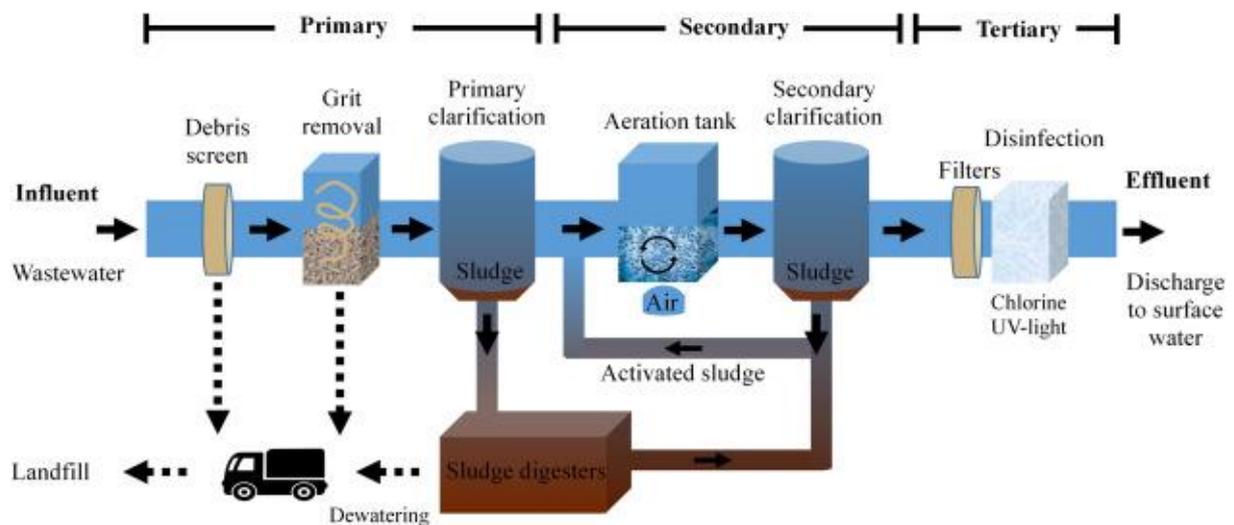
7.3. Traitement secondaire : traitement biologique

Le **traitement secondaire**, ou **épuration biologique**, repose sur l'action des **micro-organismes aérobies** qui dégradent la matière organique dissoute en conditions contrôlées. Il constitue le **cœur du procédé de dépollution**. Des bactéries hétérotrophes, telles que *Pseudomonas*, *Bacillus* et *Flavobacterium*, utilisent la matière organique comme source d'énergie et de carbone, la transformant en CO₂, H₂O et biomasse microbienne.

Principales technologies utilisées :

1. **Boues activées** : système en suspension dans des bassins aérés ; les bactéries forment des **flocs biologiques**.
2. **Lits bactériens (biofiltres)** : biofilms fixés sur des supports solides à travers lesquels circule l'eau.
3. **Lagunage** : bassins naturels peu profonds où bactéries, algues et protozoaires coopèrent.
4. **Réacteurs biologiques modernes** : systèmes à membranes (MBR) ou à cultures fixées (MBBR) offrant une performance élevée dans un espace réduit.

Ce traitement permet d'atteindre une réduction de 90 à 95 % de la DBO₅ et d'éliminer une grande partie des pathogènes microbiens.



Étapes de traitement des eaux usées. image par : Martín-Pozo et al. (2022). Removal of quinolone antibiotics from wastewaters and sewage sludge.

7.4. Traitement tertiaire : affinage ou polissage

Le **traitement tertiaire** constitue une étape de finition avancée, appliquée lorsque les normes de rejet sont strictes ou si l'eau traitée est destinée à une **réutilisation**. Il vise à éliminer les nutriments résiduels, les micropolluants et à assurer une désinfection finale.

- **Élimination de l'azote :**

- Nitrification (en condition aérobie) : transformation de NH_4^+ en NO_2^- puis en NO_3^- par les bactéries nitrifiantes (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*).

- Dénitrification (en condition anaérobie) : réduction des nitrates (NO_3^-) en azote gazeux (N_2) par des bactéries dénitrifiantes telles que *Paracoccus* et *Pseudomonas*.
- **Élimination du phosphore :**
 - Par précipitation chimique, via l'ajout de sels d'aluminium ou de fer.
 - Par assimilation biologique à l'aide de bactéries accumulatrices de phosphore (EBPR).
- **Désinfection :**
 - Ozonation : le gaz O_3 , puissant oxydant, élimine les germes pathogènes et les micropolluants.
 - Chloration : assure une désinfection résiduelle efficace.
 - Rayonnement UV : méthode physique inactivant virus, bactéries et protozoaires, souvent utilisée en complément.

8. Potabilisation de l'eau

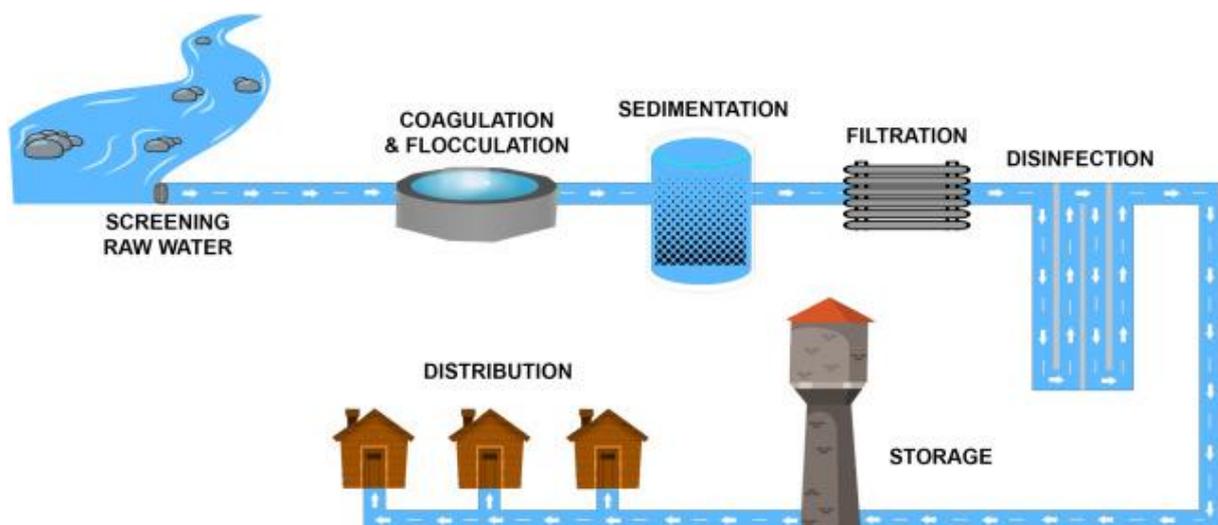
L'eau potable est une eau qui peut être consommée sans risque pour la santé humaine. Elle doit être claire, sans odeur ni saveur désagréable, et répondre à des normes de qualité strictes concernant les paramètres microbiologiques, chimiques et physiques. Elle est exempte de micro-organismes pathogènes, de substances toxiques et de polluants en concentrations nocives.

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 : déstabilisation des matières colloïdales en ajoutant des coagulants pour que celles-ci s'agglomèrent.
3. Floculation: des produits chimiques sont ajoutés pour induire la formation de floc à partir des matières colloïdales agglomérés
4. Décantation : élimination des floes et des matières en suspension par gravité
5. Filtration : Passage de l'eau à travers un lit de sable fin afin d'éliminer les matières en suspension restantes

6. Désinfection : elle se fait par :

- 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: La chloration consiste en l'ajout de composés chlorés (comme l'hypochlorite de sodium – eau de Javel, ou des pastilles de chlore) dans l'eau, généralement au niveau des points stratégiques du réseau de distribution, afin de maintenir une désinfection continue et garantir la qualité microbiologique de l'eau potable. Cependant, cette méthode présente l'inconvénient de laisser un résidu de chlore libre dans l'eau, qui peut altérer son goût et former des sous-produits indésirables
- Ozonation : L'ozonation est un procédé de traitement de l'eau qui consiste à injecter de l'ozone (O_3), un gaz à fort pouvoir oxydant, afin d'éliminer les micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires) et de dégrader divers polluants chimiques, notamment les pesticides et les composés organiques. Ce traitement permet également d'améliorer les caractéristiques organoleptiques de l'eau, en réduisant les goûts, les odeurs et la coloration. Cependant, l'ozone étant un gaz instable, il doit être produit sur site par des générateurs spécifiques. De plus, il ne laisse pas de résidu désinfectant dans l'eau, ce qui implique une absence de rémanence dans le réseau de distribution.



Purification de l'eau : (Mac Mahon, 2022 : Water purity and sustainable water treatment systems for developing countries)