

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 20 Août 1955 – Skikda

Faculté des Sciences

Département des Sciences de la Nature et de la Vie

POLYCOPIÉ DU MODULE :
MICROBIOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT



Destiné aux étudiants de Master1
Protection de l'environnement

Réalisé par Dr. D. GUEDDAH/ Année universitaire 2021-2022.

Référentiel du cours

Intitulé du Master : Protection des Ecosystèmes

Semestre : 02

Intitulé de l'UE : Fondamentale

Intitulé de la matière : Microbiologie de l'Environnement

Crédits : 06

Coefficients : 03

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Les eaux

- 1- Microbiologie des eaux
- 2- Microbiologie des eaux douces continentales
- 3- Microbiologie des milieux marins

Chapitre 2 : Les sols

- 1- Microbiologie des sols
- 2- Microbiologie des sols par les microorganismes
- 3- Phénomène de biodégradation des sols par les microorganismes

Table des matières

Chapitre 1 : Les eaux

- **Introduction** p. 3
- **1.1. Structure et fonctionnement des écosystèmes aquatiques** p. 4
 - 1.1.1. Eaux superficielles p. 4
 - 1.1.2. Eaux souterraines p. 4
 - 1.1.3. Eaux douces p. 5
 - 1.1.4. Eaux marines p. 5
- **1.2. Microbiotes aquatiques** p. 6
- **1.3. Matière organique aquatique** p. 7
- **2. Microorganismes des écosystèmes aquatiques** p. 8
 - 2.1. Importance de l'écologie microbienne p. 8
 - 2.2. Classification par source d'énergie p. 9
 - 2.3. Classification par habitat p. 10
 - 2.4. Classification par taille p. 11
 - 2.5. Classification taxonomique p. 12
- **3. Les eaux d'alimentation** p. 13
 - 3.1. Propriétés p. 13
 - 3.2. Eaux souterraines p. 14
 - 3.3. Eaux de surface p. 15
 - 3.4. Normes p. 16
 - 3.5. Traitement et potabilisation p. 17
 - 3.6. Méthodes d'analyse microbiologique p. 18
 - 3.7. Paramètres microbiologiques p. 19
- **4. Les eaux usées** p. 20
 - 4.1. Classes d'eaux résiduaires industrielles p. 21
 - 4.2. Épuration des eaux usées p. 22
 - 4.3. Traitement des boues p. 23
- **5. Épuration naturelle** p. 24
- **6. Eaux usées et microorganismes** p. 26

- **7. Eutrophisation** p. 28
 - **8. Traitement des eaux usées** p. 30
 - **9. Les eaux marines** p. 31
 - 9.1. Enjeux associés p. 31
 - 9.2. Risques sanitaires liés aux coquillages p. 32
 - 9.3. Sources de contamination p. 33
 - 9.4. Devenir des microorganismes p. 34
-

Chapitre 2 : Les sols

- **Introduction** p. 35
- **1. Microorganismes des sols** p. 37
 - 1.1. Bactéries..... p. 37
 - 1.2. Champignons..... p. 38
 - 1.3. Protozoaires p. 38
 - 1.4. Microalgues p. 38
 - 1.5. Cyanobactéries p.38
- **2. Importance des micro-organismes et des plantes dans la formation de sols**p.39
- **3. Associations des micro-organismes du sol avec les végétaux**p.39
 - 3.1. Micro-organismes de la phyllosphèrep.40
 - 3.2. Micro-organismes de la rhizosphère et du rhizoplanp.40
- **4. Phénomène de biodégradation des sols par les microorganismes** p. 41
 - 2.1. Décomposition de la matière organique p. 39
 - 2.2. Fixation de l'azote et cycles biogéochimiques p. 40
 - 2.3. Impact sur la fertilité et la qualité des sols p. 41
- **5. Les microorganismes et les cycles biogéochimiques**..... p. 42
 - 5.1. Cycle du carbonep.43
 - 5.2. Cycle de l'azotep.45
 - 5.3. Cycle du soufrep.47

Chapitre 1 : Les eaux.

Introduction

L'écosystème aquatique représente l'équilibre entre le milieu naturel qui est l'eau, sous ses deux formes (eau douce, eau marine), et l'ensemble des espèces microbiennes, animales et végétales qui y vivent (Tab.1).

Grâce à leur diversité spécifique et fonctionnelle résultant d'une histoire évolutive longue de 3,5 milliards d'années, les microorganismes ont colonisé l'ensemble des écosystèmes aquatiques, même les plus extrêmes. Ils interviennent dans tous les processus fondamentaux qui vont de la dégradation de la matière organique à la régulation de la composition de l'atmosphère terrestre (équilibres O₂-CO₂, CH₄...). Ces interactions des micro-organismes avec leur environnement contribuent au fonctionnement des écosystèmes. Mais pour comprendre ces interactions, il faudrait que tous les micro-organismes observés sous microscope soient cultivables (Prescott *et al.*, 2002). Actuellement, on considère que les bactéries cultivables à partir d'un échantillon environnemental ne représentent qu'un pour cent de la diversité totale (Mardigan et Martinko, 2007).

Tableau 1 – Classification des éléments rencontrés dans l'eau	
État ou forme des éléments dans l'eau	Nature des éléments
Matières en suspension	Sables, argiles, boues diverses. Roches en débris, matières organiques, minérales et végétales. Débris divers insolubles.
Matières en émulsion	Matières organiques colloïdales. Huiles minérales, goudrons, suies, pétrole, argiles colloïdales.
Matières organiques solubilisées	Tourbes, déchets végétaux, matières azotées. Produits de synthèse organique solubles, etc.
Sels minéraux	Carbonates, bicarbonates, sulfates, chlorures, nitrates, etc. } calcium, magnésium, de sodium, potassium, ammonium etc.
Gaz	Oxygène, azote, gaz carbonique, ammoniac, parmi les principaux.
Organismes vivants d'origine végétale, animale, bactérienne et virale	Plancton, algues, champignons, vers, larves d'insectes, autres larves, bactéries, amibes, virus, etc.

1. Microbiologie des eaux :

1.1. Structure et fonctionnement des écosystèmes aquatiques :

Le soleil fournit énergie et lumière aux écosystèmes. On distingue trois grands groupes d'acteurs dans ces écosystèmes qui participent à la chaîne alimentaire (Fig. 1).

La chaîne alimentaire

Dans un écosystème, la plupart des organismes s'alimentent à plus d'une source (par exemple, un poisson peut se nourrir d'insectes et de plantes) et appartient à plus d'une chaîne alimentaire.

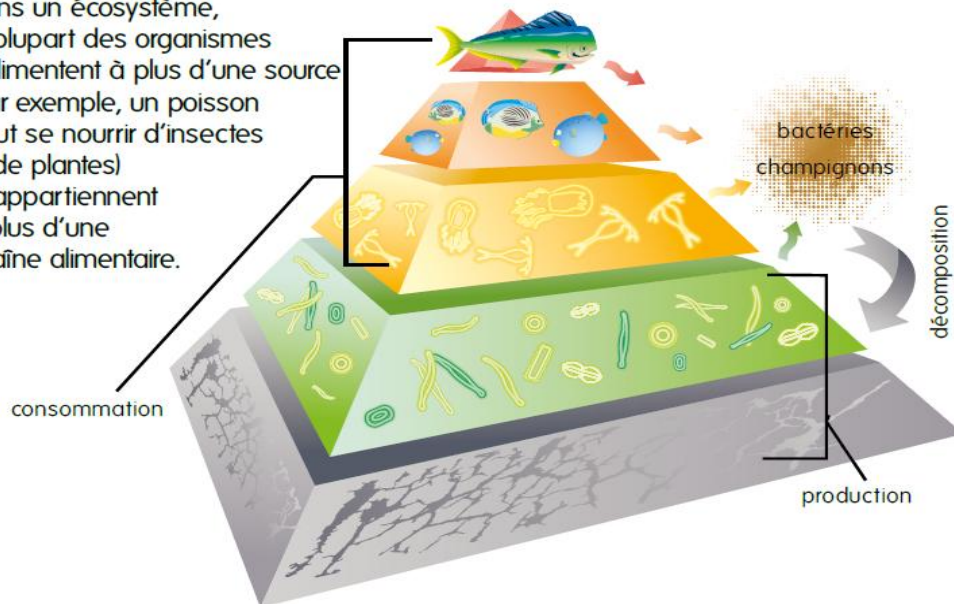


Figure 1 : La structure générale de la chaîne alimentaire.

Des sources à la mer on peut observer différents types d'écosystèmes aquatiques selon un parcours qualifié d'amont en aval (Fig. 2).

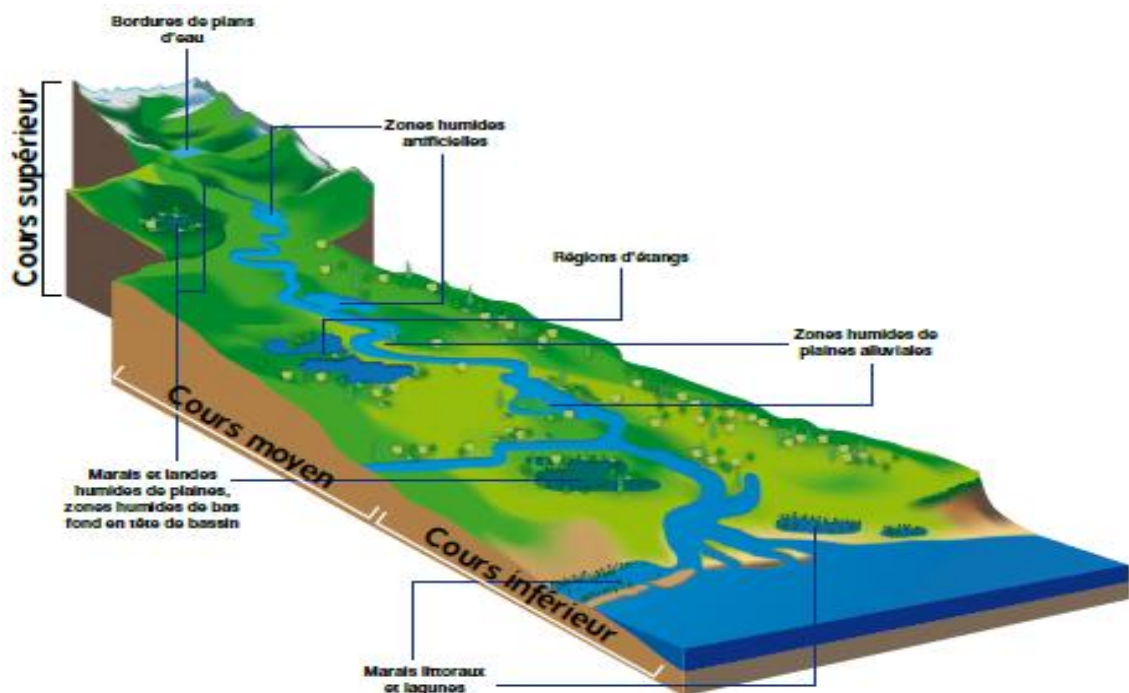


Figure 2 : Les différents types d'écosystèmes aquatiques.

Ce qui caractérise les eaux superficielles :

- les variations saisonnières (climatiques) et, à degré moindre, journalières des paramètres physiques: température, turbidité et coloration ;
- le développement plus ou moins important de phytoplancton (algues), de zooplancton et, dans certaines conditions, d'une vie aquatique intense ;
- la présence fréquente de matières organiques d'origine naturelle provenant de la décomposition des organismes végétaux ou animaux après leur mort ;

Ce qui caractérise les eaux souterraines :

- turbidité,
- une température et une composition chimique sensiblement constantes,
- l'absence d'oxygène dissous,
- elles peuvent être d'une très grande pureté bactériologique ; c'est le cas lorsque l'eau s'infiltré dans des terrains à très fine granulométrie et à grand pouvoir filtrant.

1.1.1. Eaux douces :

Lacs, cours d'eau et nappes phréatiques, représentent pour l'homme les premières eaux d'accès facile, vu les obstacles qu'il rencontre pour accéder aux plus grandes parties de l'eau bloquées dans les glaciers ou enfouies dans le sol.

L'eau douce est plus sensible aux variations des conditions du milieu que l'eau marine, elle est en général riche en matières minérales et organiques drainées par les pluies à partir du sol.

1.1.2. Eaux marines :

Les eaux marines sont caractérisées par leurs taux de sel qui varient entre 30 et 40g/l, elles sont constituées principalement d'ions chlorures et d'ions sodium. Dans ces eaux, la matière organique est inégalement répartie : très concentrée dans les zones côtières et aux embouchures des cours d'eaux, et beaucoup moins importantes dans les différentes zones internes des mers et océans à cause du pouvoir diluant de ces eaux, ce qui permet une distribution très variée des microorganismes en fonction des nutriments et de la pression marine.

1.2. Microbiotes aquatiques :

Les microbiotes sont l'ensemble des microorganismes rencontrés dans un milieu donné, ceux des milieux aquatiques, très variés, sont formés de bactéries, champignons, algues, protozoaires et virus, ils participent massivement et activement au métabolisme de la matière organique aquatique.

Les microbiotes aquatiques font partie du plancton lorsqu'ils sont en suspension, et forment le benthos lorsqu'ils adhèrent aux différentes surfaces vivantes ou inertes.

Les algues sont les organismes phototrophes majeurs des milieux aquatiques ; les bactéries sont également dominantes dans ces milieux et sont directement liées à la matière organique, les espèces à GRAM - sont les plus répandues telles que : *Pseudomonas*, *Achromobacters*, *Vibrio*...

Les bactéries GRAM+ sont présentes principalement dans l'eau douce et sont issues du lessivage des sols, les plus rencontrées sont : *Clostridium* et *Bacillus*. Les bactéries d'origines digestives peuvent également survivre dans les eaux usées et les eaux marines.

1.3.Matière organique aquatique :

L'activité photosynthétique des algues, principalement, génère la matière organique des différents milieux marins jusqu'à la limite de pénétration de la lumière qui est supérieure ou égale à 250m de profondeur, à ce niveau la matière organique produite est appelée novo et sert en grande partie à la nutrition des organismes situés à l'échelon supérieur de la chaîne alimentaire, le reste sédimente vers les fonds des eaux où n'arrive qu'une quantité minime de la matière organique. Seule une petite fraction de matière organique (inférieure à 10%) est assimilée par les microorganismes, cette matière organique peut être dosée en mesurant le carbone organique total (COT), cette matière organique peut également provenir des débris de végétaux et animaux en décomposition drainés, en particulier, par les eaux de pluie à partir du sol.

2. Microorganismes des écosystèmes aquatiques :

Les microorganismes, et particulièrement les bactéries et les archéobactéries, vivent dans des habitats extrêmement variés. On les trouve autant dans les eaux limpides des ruisseaux, dans le désert de glace qu'est l'antarctique que dans les sources thermales les plus chaudes, à plus de 1 km dans la croûte terrestre, à des milliers de m d'altitude (atmosphère raréfiée), dans les profondeurs océaniques à une obscurité totale et une pression considérable. Et même dans les eaux salines presque saturées de la mer morte (Tortora *et al.*, 2003 et 2010).

2.1. Importance de l'écologie microbienne :

- Les microorganismes jouent un rôle important dans les grands cycles biogéochimiques, ils sont très petits mais très abondants
- Il y a des interactions entre microorganismes: consortium, assemblages, communautés. (compétition, symbiose, prédation)
- Et des interactions des microorganismes avec plantes et animaux (ex: rhizosphère, flore intestinale, microbes qui "sautent" entre espèces...)

Le but de l'écologie microbienne est de savoir:

- Quels types de microbes sont dans quels environnements
- Combien sont-ils?
- Que font-ils et quelles sont leurs fonctions?
- Comment survivent-ils?
- Qu'est ce qui contrôle leur activité et leur abondance?
- Quel rôle jouent-ils dans les cycles biogéochimiques
- Comment les microbes changent ou transforment chimiquement et physiquement l'environnement

2.2.Classification des microorganismes basée sur leur source d'énergie :

2.2.1. Carbone organique et inorganique

a. Autotrophes: carbone inorganique

– Lithotrophes (chimioautotrophes)

Ils obtiennent leur énergie et leur carbone de sources inorganiques (CO₂) ou de l'oxydation de composés inorganiques (Fe(II)) EX: *Acidithiobacillus*

– Phototrophes (oxygéniques et anoxygéniques)

Ils utilisent l'énergie solaire

- Cyanobactéries (eau)
- Bactéries vertes ou pourpres (H_2, H_2S, S)

b. Hétérotrophes: ils obtiennent leur énergie de substrats organiques simples

– **Organotrophes:** utilisent une gamme de composés organiques dans le processus de décomposition (anaérobie et aérobie), hydrates de carbone, acides organiques, etc.

c. Mixotrophes : ont la capacité de passer de l'autotrophie à l'hétérotrophie dépendant des conditions environnementale

2.3. Classification des microorganismes basée sur leur habitat :

- **présence ou absence d'oxygène :** aérobie et anaérobie
 - **suspendus dans l'eau = plancton** (Ex: phytoplancton, bacterioplancton)
 - **communautés attachées sur une surface ou biofilms:** periphyton, épiphyton, épilithon, épipélon, endolithon
 - **environnements extrêmes:** thermophiles (haute T) psychrophiles (basse T), barophiles (haute pression), halophiles (haute salinité), acidophiles et alkalophiles
- Ex: *Acidithiobacillus ferrooxidans* ($pH < 2$)
- Ex: *Thermus aquaticus* ($T > 80\ C$)

2.4. Classification des microorganismes basée sur leur taille :

- **femtoplankton** ($< 0.2\ \mu m$) = "colloïdes", virus
- **picoplankton** ($0.2 - 2\ \mu m$) = bactéries, cyanobactéries, prochlorophytes, eucaryotes
- **nanoplankton** ($2.0 - 20\ \mu m$) = "algues", cyanobactéries, protozoaires, fungi, "marine snow"
- **microplankton** ($20 - 200\ \mu m$) = "algues" surtout formes coloniales, protozoaires (ciliés), rotifères
- **macroplankton** ($200 - 2000\ \mu m$) = pas considérés comme des microbes, grandes algues coloniales, ciliés, rotifères, crustacés)

2.5. Classification taxonomique :

- **virus :** acellulaires
- **bactéries :** procaryotes
- **mycètes :** eucaryotes

- algues : "
- protozoaires: "

Les microorganismes se retrouvent dans 4 règnes :

Classification des bactéries selon Bergey*:

- Vol. 1. Bactéries Gram-négatives d'importance médicale et commerciale
- Vol. 2. Bactéries Gram positives d'importance médicale et commerciale
- Vol. 3. Autres bactéries Gram-négatives (phototrophiques, glissantes, avec bourgeonnement et embranchement, cyanobactéries, lithotrophes, archéobactéries)
- Vol. 4. Actinomycètes filamenteuses et bactéries Apparentées

*** le manuel est considéré comme l'autorité principale en taxinomie bactérienne**

2.5.1. Virus :

- petits (18 nm-400 nm) parasites intracellulaires,
- généralement spécifique à l'espèce de bactéries infectée (bactériophages, cyanophages), plantes (affectant récoltes comme tabac, pomme de terre, tomate...), animaux (chez l'homme, gastroentérite, rage, hépatite, fièvre jaune, sida, etc...)
- Abondants dans l'air, l'eau, les sols
- Dans l'eau, aussi abondants que les bactéries ($\sim 10^6$ /ml)

➤ Ecologie des virus dans l'environnement :

Les phages ont un impact important sur les populations de bactéries (contrôle des populations) et le transfert d'information génétique entre ces populations.

Dans l'eau, la grande majorité des virus ne sont pas des pathogènes pour l'homme, mais certains virus sont transmis par le biais de l'eau et peuvent poser des problèmes avec l'eau potable (Ex: hépatite A) parce qu'ils ne sont pas détruits par le chlore.

2.5.2. Bactéries :

a. Bactéries hétérotrophes

Dans l'eau: abondance totale ($10^4 - 10^6$ /ml) l'énumération directe est possible par épifluorescence (DAPI, Acridine Orange, FITC).

- cellules individuelles
- sur des particules ou "neige marine", matières fécales,
- interface air - eau
- surfaces externes et internes des animaux et plantes

Dans les sédiments et sols terrestres : (énumération directe $1-60 \times 10^9$ cells/g poids sec).

b. Bactéries photosynthétiques anoxygéniques :

- bactéries **pourpres** et **vertes**: bactéries photosynthétiques.
- utilise le H₂S (parfois H₂) comme source d'électrons.
- précipitation de soufre élémentaire a l'intérieur ou a l'extérieur de la cellule.

c. Bactéries photosynthétiques oxygéniques

- **Cyanobactéries** (petites picocyanobactéries des océans et des lacs jusqu'à 10⁵ cells/ml, espèces plus grandes des lacs et estuaires eutrophes, formes coloniales macroscopiques, certaines espèces sont capables de fixer N₂ atmosphérique.
- **Prochlorophytes** (petit picoplancton, découverts début 90, très abondants et répandus en mer).

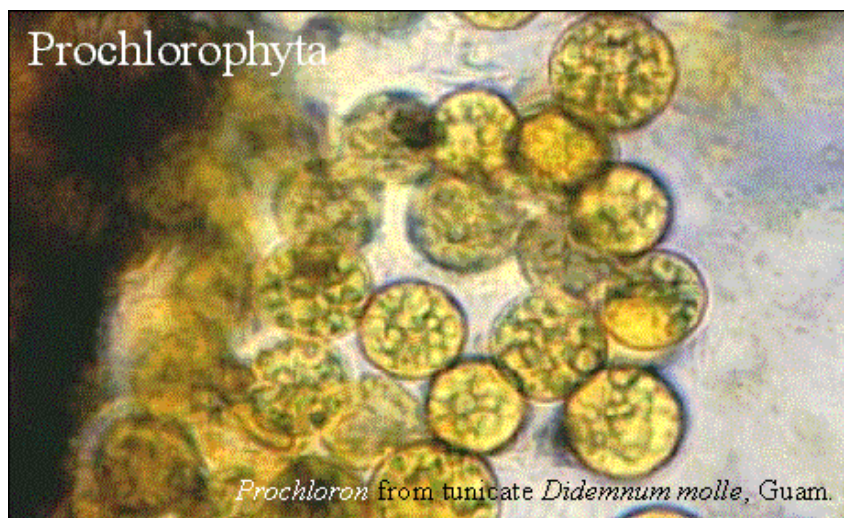


Figure 3 : Observation microscopique des prochlorophytes (Alchetron, Free social encyclopedia).

➤ Ecologie bactérienne :

- abondance totale liée à l'apport de la matière organique (corrélations avec MO, biomasse des algues ou phosphore total, etc.).
- abondance totale sur une échelle de temps ou d'espace courte peut être limitée par le brouillage des protozoaires.
- Taille dépend de la présence de nutriments: petites cellules dans les milieux oligotrophes; plus grosses cellules en culture.

2.5.3. Algues :

- Dans l'eau, l'abondance est de 10³-10⁴ cellules/ml.

- Vivent en suspension comme **plancton** ou attachées aux surfaces (roches, bois, plantes supérieures, tortues...) comme **périphyton**, ou en symbiose avec des protozoaires ou des invertébrés.
- Diversité énorme; beaucoup n'ont pas été identifiées ou mises en culture.

a. Diatomées :

Des milliers d'espèces caractérisées par une paroi cellulaire, qui se préserve bien dans les sédiments et qui peut être utilisée pour reconstruire les conditions environnementales du passé). Quelques espèces sont toxiques.



Figure 4 : Observation microscopique de *Pinullaria sp.*

b. Algues vertes :

Regroupent beaucoup d'espèces et représentent la source préférée de nourriture des invertébrés, abondantes dans les cours d'eau enrichis, attachées aux roches. Aucune espèce n'est toxique mais certaines sont impliquées dans les problèmes de qualité d'eau potable (mauvais goût, odeur).

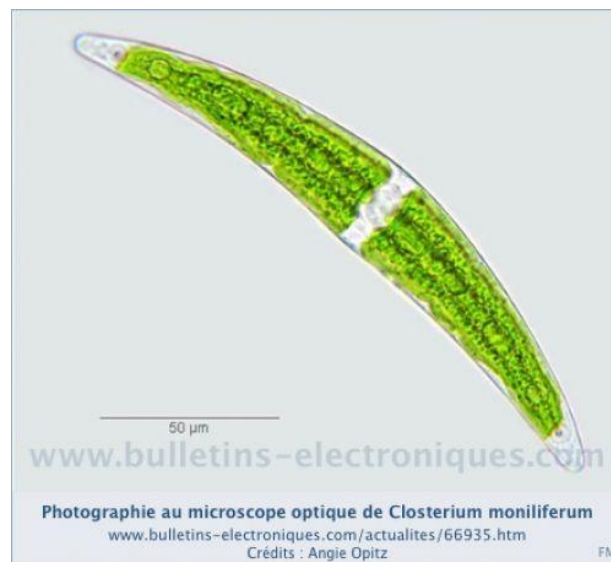


Figure 5 : Observation microscopique de *Closterium oniliferum*.

c. Chrysophytes :

Algues jaunes et brunes typiques des lacs oligotrophes ou colorés. Quelques espèces toxiques marines (“marées brunes”), en eau douce responsable des problèmes d’odeur et de goût de l’eau potable. Beaucoup d’espèces mixotrophiques, et phagotrophiques.

d. Cryptophytes :

Cellules avec flagelles, pigments accessoires similaires aux algues rouges et cyanobactéries, abondantes dans les lacs et les cours d’eau.

e. Dinoflagellés :

Cellules avec flagelles parfois couvertes de plaques organiques, plusieurs espèces sont toxiques, elles provoquent des marées rouges en zone côtière sur tous les continents (paralytic shell-fish poisoning).



Gambierdiscus australes



Lingulodinium polyedrum



Protoceratium reticulatum

(Toxin Producing dinoflagellate Species)

Figure 6 : Observation microscopique de dinoflagellés toxiques.

Les blooms de micro-algues n'ont cessé de croître au cours de ces dernières décennies dans les régions tempérées et tropicales. Leurs manifestations peuvent être nocives pour la faune marine ainsi que pour la santé humaine. Les espèces responsables appartiennent aux *Chlorophycées*, *Chrysophycées*, *Cryptophycées*, *Dinophycées*, *Euglénophycées*, *Prymnesiophycées* et *Prasinophycées* (E.R. Cox, 1980 in Frehi *et al*, 2007).

2.5.4. Protozoaires :

- Répandus dans l'eau ($10 - 10^4$ /ml) et les sols
- affinité taxonomique avec les divisions d'algues (chrysophytes, cryptophytes sont recalciifiées dans le règne Protista)
- bactivores, algivores
- forme la chaîne alimentaire microbienne ou "boucle" microbienne
- quelques pathogènes importants de l'homme transmis par l'eau: *Giardia*, *Cryptosporidium*. Certains sont résistants au chlore

2.5.5. Mycètes :

Importants, particulièrement dans les milieux terrestres

- en compétition avec les bactéries pour la MO
- deutéromycètes, ascomycètes, basidiomycètes (quelques espèces avec la capacité unique de dégrader la lignine)
- moisissures/pourritures blanches, brunes, bleues du bois
- pathogènes des plantes
- Moisissures: problème majeur de la qualité de l'air, la nourriture, la santé publique en générale.

3. Les eaux d'alimentation :

Limpidité, absence de goût, absence de couleur et d'odeurs sont les qualités requises pour toute eau destinée à l'alimentation de l'homme.

3.1.Propriétés :

Selon leur origine, souterraine ou de surface, les eaux d'alimentation possèdent des propriétés différentes.

L'eau se charge des éléments présents dans les milieux qu'elle traverse, notamment de:

- sel minéraux;
- calcium, magnésium;
- potassium, bicarbonates, sulfates, chlorures;
- petites parties d'argile (terre molle et grasse);
- bactéries;
- matières organiques;

3.2.Eaux souterraines :

Représentées par les nappes d'eau formées par gravitation des eaux de pluie jusqu'aux couches terrestres imperméables où elles s'accumulent. Le fait de traverser plusieurs couches terrestres permet à cette eau d'arriver aux nappes qu'elles forment appauvries en microorganismes et polluants industriels et domestiques, ce qui permet souvent leur

distribution sans traitement préalable (Fig.7), contrairement aux nappes moins profondes, qui sont plus exposées aux contaminants industriels et agricoles tels que les pesticides, les engrais... facilement drainés par les eaux de pluies entre autres. De ce fait les eaux souterraines peuvent contenir des particules filamenteuses, en plus du mauvais goût ou d'une mauvaise odeur.

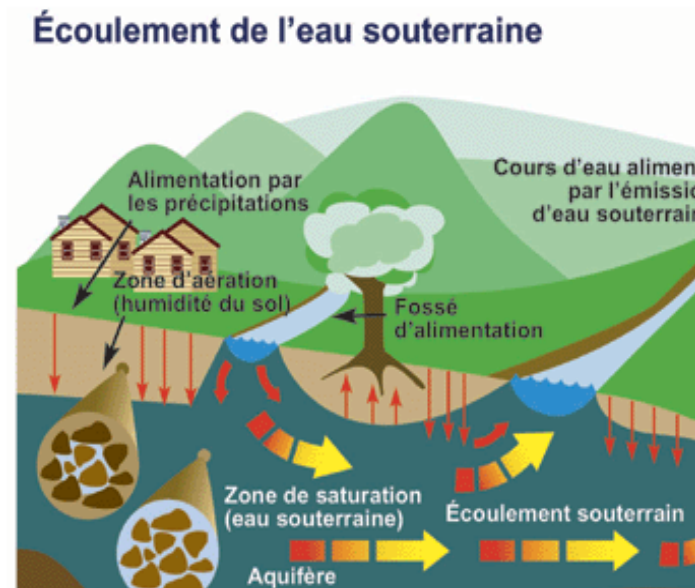


Figure 7 : Schéma représentatif de l'écoulement des eaux souterraines.

3.3.Eaux de surfaces :

Ce sont les eaux les plus exposées aux pollutions liées à l'activité humaine: domestique, industrielle et agricole. Pour ces raisons elles sont de très mauvaise qualité et leur utilisation nécessite des traitements préalables. Leur richesse en gaz dissous et éléments nutritifs permet le développement des souches autotrophes, hétérotrophes et lithotrophes ; et selon le traitement qu'ils subissent, ces eaux sont classées en plusieurs catégories.

3.4.Norme :

Chaque eau d'alimentation est traitée selon son origine, la recherche de microorganismes pathogènes et de polluants chimiques est réalisée de façon directe, mais la majorité de ces composés n'est pas recherchée, car seuls les polluants chimiques à effets négatifs sur la santé sont contrôlés avec un seuil d'acceptation appelé concentrations maximales acceptables (CMA).

Une eau n'est considérée comme potable que, si elle répond aux normes réglementaires qui garantissent une très bonne qualité microbiologique et physico-chimique.

Le bon état des eaux de surface peut être évalué par l'état écologique (Eau, faune, flore et habitat) et l'état chimique (métaux, pesticides...) (Fig. 8).

Pour les eaux souterraines L'état est évalué au regard de l'état chimique et de l'état quantitatif (les prélèvements ne dépassent pas la capacité de renouvellement de la ressource disponible) de l'aquifère.

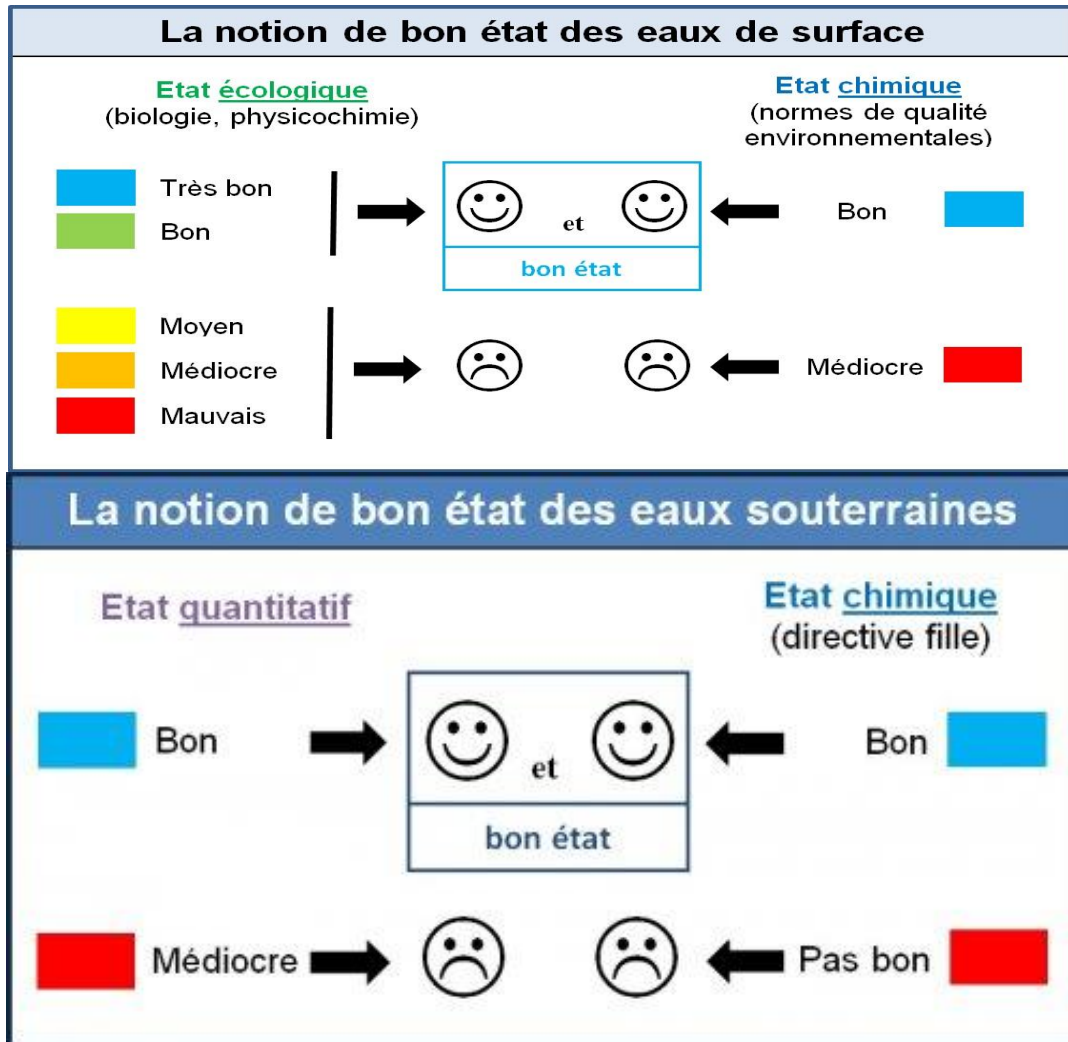


Figure 8 : Schéma représentatif de la notion du bon état des eaux.

3.5.Traitement et potabilisation :

Le traitement des eaux dépend de leur qualité initiale et permet d'éliminer leur turbidité, les microorganismes et les polluants chimiques. Ce traitement se fait en quatre étapes consécutives : Stockage-sédimentation ; coagulation ; filtration et désinfection (Fig.9).

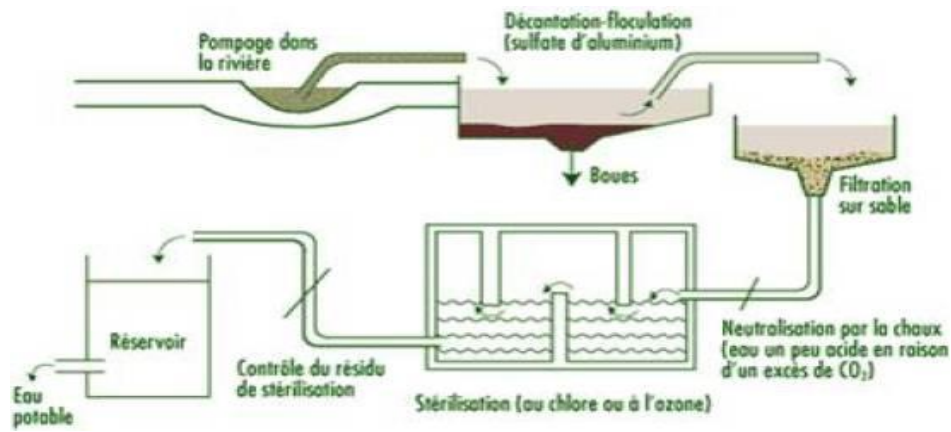


Figure 9 : Schéma générale du traitement de potabilisation.

3.5.1. Stockage

Consiste à stocker l'eau dans des réservoirs, pour permettre la sédimentation des particules nutritives et leur métabolisme par différents microorganismes. Par exemple les barrages jouent ce rôle de stockage.

3.5.2. Coagulation

Après stockage, l'eau est acheminée vers des bassins où des agents floculants tels que le sulfite d'alumine sont rajoutés, afin de former des flocs qui sédimentent en entraînant avec eux la matière organique et les particules en suspension, par leur sédimentation ils précipitent les microorganismes jusqu'à plus de 95%.



3.5.3. Filtration

Cette étape est dite rapide lorsqu'elle est réalisée sur sable de gros calibre et lente lorsqu'elle est réalisée sur sable fin, elle permet de retenir les particules qui n'ont pas décantées lors de l'étape précédente. Si à cette étape l'eau n'est pas débarrassée des polluants responsables des goûts et d'odeurs indésirables, une autre filtration sur charbon actif devient nécessaire.

3.5.4. Désinfection

Elle représente la dernière étape du traitement, elle consiste à rajouter un agent désinfectant tel que le chlore (chloration) à une eau largement débarrassée de sa charge polluante, l'action de cet agent va dépendre de sa nature, du temps de contact avec l'eau et de la température.

➤ Ozonation(O₃)

L'ozonation est un autre procédé de désinfection, plus cher que la chloration, mais beaucoup plus efficace, n'empêche que l'instabilité de l'O₃ peut être à l'origine d'une recontamination des eaux traitées.

➤ Chloration

Le chlore représente 80% des agents désinfectants, la maîtrise de son utilisation a permis de contrôler les maladies à transmission hydrique.

Mode d'action :

Le chlore peut être utilisé sous forme gazeuse Cl₂ ou sous forme liquide NaOCl (hypochlorite de Sodium), quelque soit sa forme il réagit dans l'eau pour donner l'acide hypochloreux (HOCl). Il interagit avec la matière organique du milieu et d'autres composés minéraux pour donner des composés organochlorés et des chloramines.

En fonction de sa composition, l'eau a une demande en chlore nécessaire pour neutraliser sa matière organique, ce n'est qu'une fois cette situation atteinte, que le chlore rajouté, donc en excès, servira à la destruction des microorganismes. L'apport progressif de chlore en quatre phases, permet de définir le protocole de chloration qui est basé sur un point appelé point critique (break point) (Fig. 10).

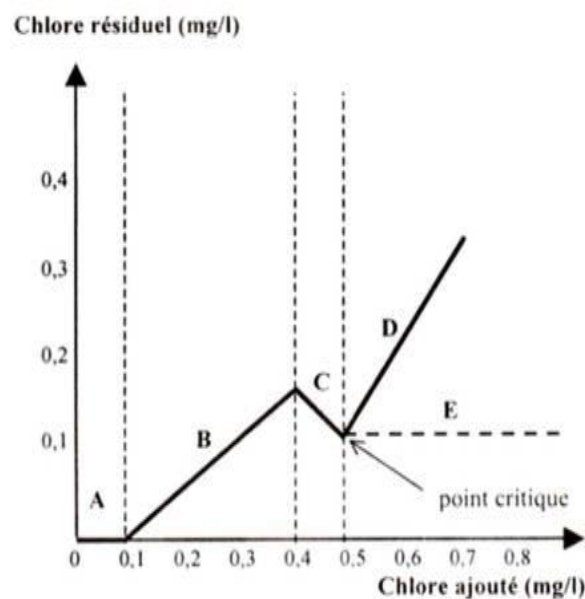


Figure 10 : Variations du chlore résiduel au cours d'une chloration.

La phase A : L'introduction à faible dose du Chlore lui permet de se combiner à la matière organique non azotée et aux composés minéraux réduits.

La phase B : Le supplément de chlore rajouté, permet sa combinaison avec l'ammoniaque et ses dérivés et le reste de la matière organique azotée, ce, jusqu'à saturation où il y a formation de chloramines et de composés organochlorés.

La phase C : La désintégration des chloramines et l'oxydation des composés organochlorés entraîne la chute du chlore résiduel.

La phase D : à ce niveau le **point dit Critique**, le chlore ajouté au milieu reste sous forme libre avec une activité chimique de désinfection maximale.

Efficacité (Fig. 11)

Les différentes formes chimiques du chlore varient avec le pH du milieu et ont toutes une action désinfectante mais d'efficacité variable. Pour que la chloration soit efficace, il faut que le chlore résiduel ait une concentration comprise entre 0,2 et 2mg/l afin de permettre une désinfection satisfaisante qui dépend également d'une application correcte du protocole technique :

- Temps de contact de 10min ;
- Chlore résiduel de 0,2mg/l ;
- pH entre 7 et 8 ;
- Température entre 10°C et 15°C.

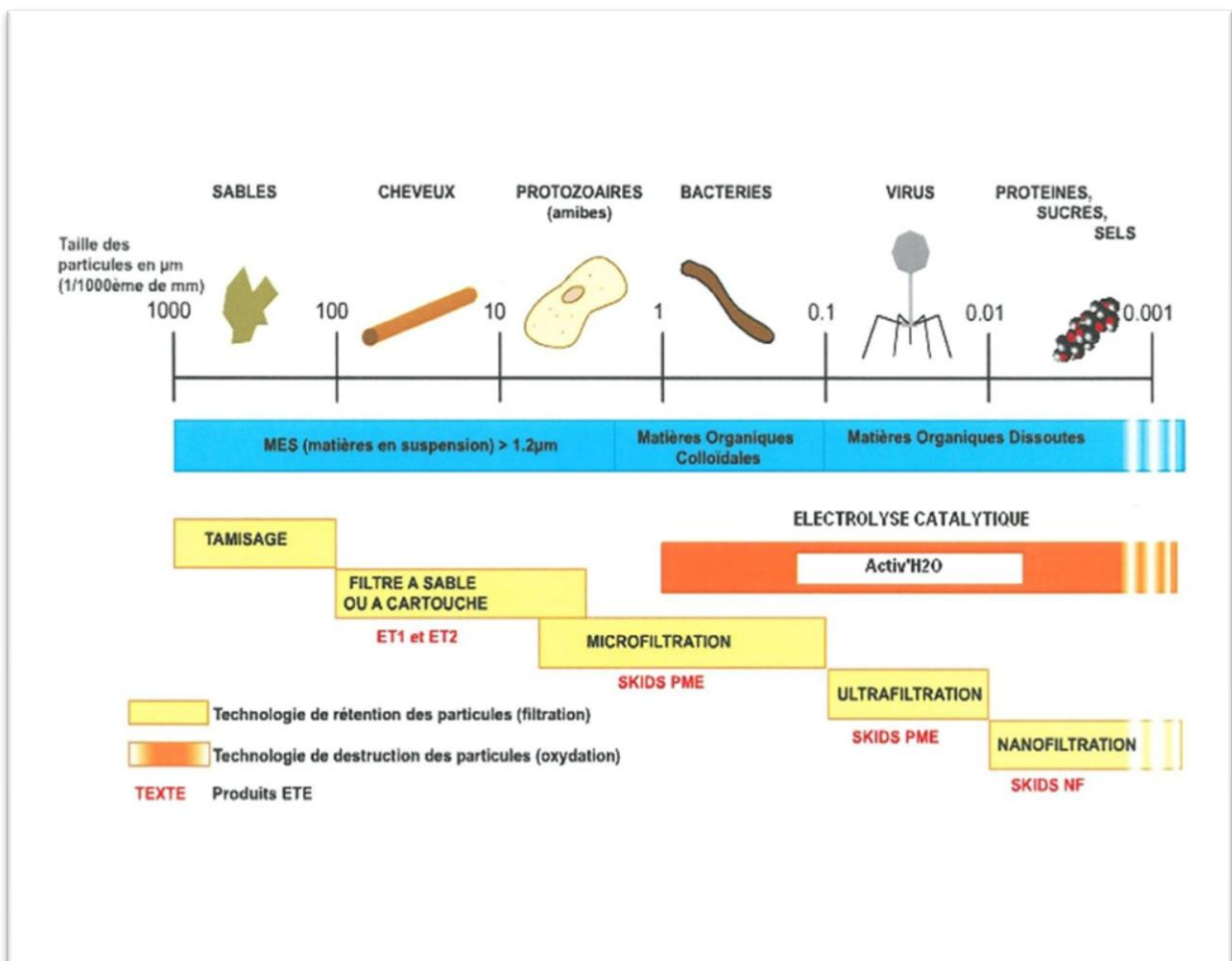
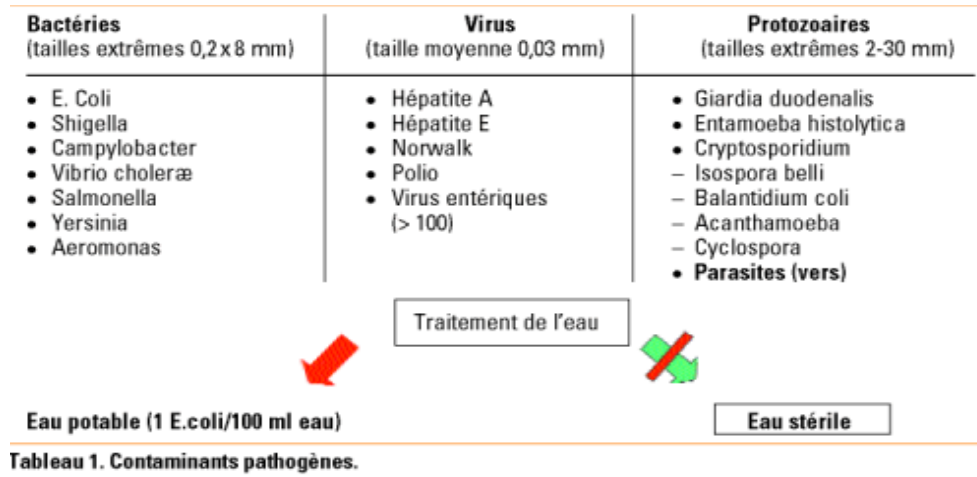


Figure 11 : Schématisation des différents éléments et agents pathogènes éliminés par le traitement de potabilisation.

3.6.Méthodes d'analyse microbiologique des eaux d'alimentation:

La consommation d'une eau suspecte expose à un risque de maladie. Le risque majeur étant la survenue de maladies à transmission hydrique (MTH) suite à une contamination fécale humaine ou animale (Tab.1).

Les méthodes d'analyse microbiologique (et physico-chimique) des eaux destinées à la consommation humaine s'appuient en général sur des normes (AFNOR) et sur les recommandations de l'OMS.



Les eaux destinées à la consommation humaine font l'objet de trois types d'analyses bactériologiques (Tab.2 et Tab.3):

Tableau 2 : Les analyses bactériologiques des eaux destinées à la consommation humaine.

Ressource	Distribution	Production
Réduite (B1)	Sommaire (B2)	Complète (B3)
Coliformes thermotolérants	Coliformes thermotolérants	Coliformes thermotolérants
Streptocoques fécaux	Streptocoques fécaux	Streptocoques fécaux
Autres	Dénombrement des bactéries aérobies revivifiables à 22°C et à 37°C	Dénombrement des bactéries aérobies revivifiables à 22°C et à 37°C
/	/	Spores de bactéries anaérobies sulfuro-réductrices

Tableau 3 : Interprétation générale des analyses bactériologiques.

Recherche bactériologique	Signification, intérêt de leur recherche	Eaux concernées
À 44°C: Coliformes thermotolérants ou fécaux <i>Escherichia coli</i>	Témoins de contaminations, de bonne spécificité Germe tests de contaminations fécales récentes	Eaux d'alimentation: ressource, production et distribution
À 37°C: Streptocoques fécaux (D)	2 nd Germe tests de contaminations fécales après les CF de spécificité moy (car existence de non fécaux)	Eaux d'alimentation: ressource, production et distribution
À 22°C et à 37°C: - Bactéries aérobies revivifiables	Nbr de germes peu significatif en lui-même - Etude de nappes souterraines (suivi) - Contrôle hygiène production (station eau potable) et distribution (château d'eau)	Eaux d'alimentation: ressource, production et distribution Eaux rendues potables: livrées conditionnées
À 37°C: - Bactéries anaérobies sulfito-réductrices dont Clostridium sulfito-réducteurs	Clostridium sulfito-réducteurs: Témoins de contaminations fécales anciennes (ou intermittentes au niveau distribution)	Eaux d'alimentation: production

3.7. Paramètres microbiologiques recherchés (Ressource, production et distribution) :

3.7.1. Eau de la ressource: Eau superficielle captée:

Le tableau 4 ci-dessous résume les types de traitements appliqués en fonction des germes trouvés.

Tableau 4 : Adaptation des traitements en fonction de la contamination microbienne.

Paramètres microbiologiques	A1	A2	A3
Coliformes totaux 37°C (100ml)	50	5000	50000
Coliformes thermotolérants (100ml)	20	2000	20000
Streptocoques fécaux (100ml)	20	1000	10000
Salmonelles	ABS/5000ml	ABS/1000ml	

A1: Traitement physique simple et désinfection

A2: Traitement normal physique, chimique et désinfection

A3: Traitement physique, chimique poussé, affinage et désinfection

3.7.2. Eau de production et de distribution :

L'eau ne doit pas contenir:	
D'organismes pathogènes:	
Salmonelles	0/5L
Staphylocoques pathogènes	0/100ml
Bactériophages fécaux	0/50ml
Entérovirus	0/10L
De <u>Coliformes</u> dans 95% des échantillons prélevés	0/100ml
De <u>Coliformes thermotolérants</u>	0/100ml
De <u>Streptocoques fécaux</u>	0/100ml
De Spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices	≤ 1 spore par 20 ml

4. Les eaux usées :

Toutes les activités humaines, qu'elles soient domestiques, industrielles, artisanales, agricoles... produisent des eaux usées. Eaux initialement potable souillées par les activités anthropiques. Lorsqu'elles sont d'origine domestique elles sont formées en grande partie d'excréments humains, par contre leur composition chimique varie selon l'activité industrielle. On distingue les eaux urbaines résiduaires :

➤ **Ménagères usées**

Des eaux produites par le métabolisme humain et les activités ménagères (Fig. 12)

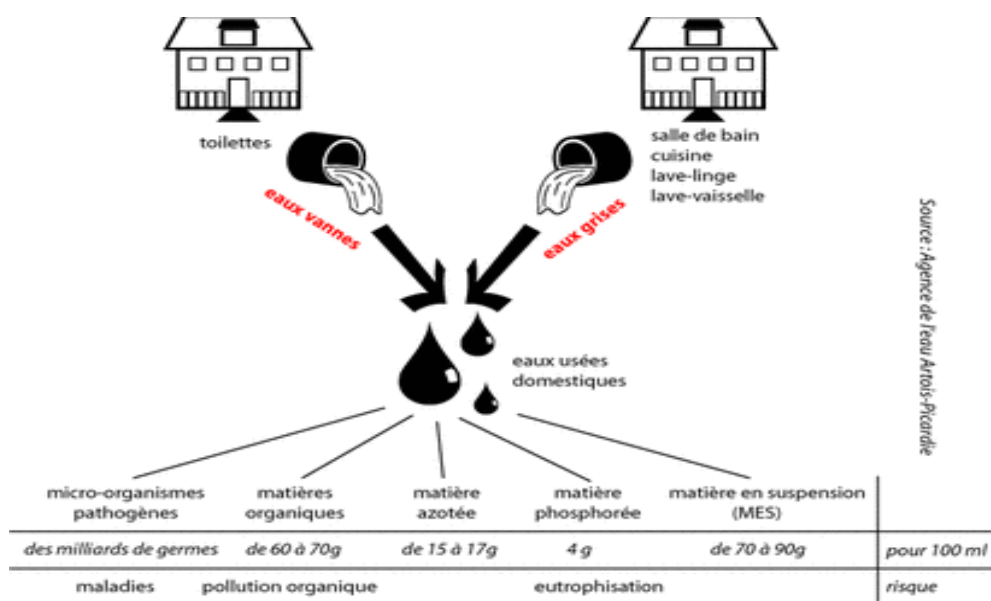


Figure 12 : Provenance, composition et risques des eaux usées domestiques.

➤ **Industrielles usées**

Des eaux provenant des locaux utilisés à des fins commerciales ou industrielles.

➤ **Eaux de ruissellement**

Ces eaux usées sont susceptibles de contenir toute sorte de polluants ce qui nécessite leur traitement dans des stations d'épuration pour les débarrasser de toutes les charges polluantes avant de les déverser dans les cours d'eau.

4.1. Classes d'eaux résiduaires industrielles :

Type/Classe	Caractéristiques	Exemple	Traitements
Organique	DCO élevée	Industrie agroalimentaire	Biologiques
	DBO ₅ élevée		
Inorganique	MES élevées	Industrie sidérurgique	Physico-chimiques
	DBO ₅ faible	Traitement de surface	
	Toxiques		
Mixte	MES élevées	Papeteries	Biologiques adaptés
	DBO ₅ moyenne à élevée	Industries chimiques et pétrochimiques	

4.1.1. Impact d'une eau résiduaire sur le milieu récepteur :

➤ **Pollution biologique :**

Due aux microorganismes et à la matière organique.

Microorganismes : Principalement des bactéries, protozoaires et champignons, contenus dans la matière fécale contaminante, qui renferme une grande population de microorganismes pathogènes viables qui peuvent être transportés par les eaux.

Les microorganismes véhiculés par les eaux usées sont susceptibles de porter atteinte à la salubrité de certains usages ou activités sensibles à la contamination microbiologique installés dans le milieu récepteur en aval du rejet. Il s'agit essentiellement de :

- Conchyliculture
- Baignade
- Prise d'eau d'alimentation
- Pompage pour irrigation
- Pisciculture

Matière organique : Les rejets urbains, la digestion animale et les végétaux en décomposition drainés par les eaux sont très riches en matière organique polluante dont les

principaux composés sont les lipides, les protides, les glucides, les détergents etc...et leurs produits de décomposition.

➤ Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅)

La biodégradation de la matière organique par les microorganismes nécessite une certaine quantité d'oxygène dissous, cette quantité est appelée **Demande Biochimique en Oxygène**, elle est mesurée en milligrammes d'oxygène consommé par litre d'eau et résulte (dans un volume défini) de la différence entre la teneur résiduelle de l'oxygène à 5 jours et sa teneur avant incubation, et représente donc, l'oxygène utilisé par le microorganisme pour dégrader la matière organique. Un rejet épuré doit avoir une DBO₅ réduite à 20-40mg/l.

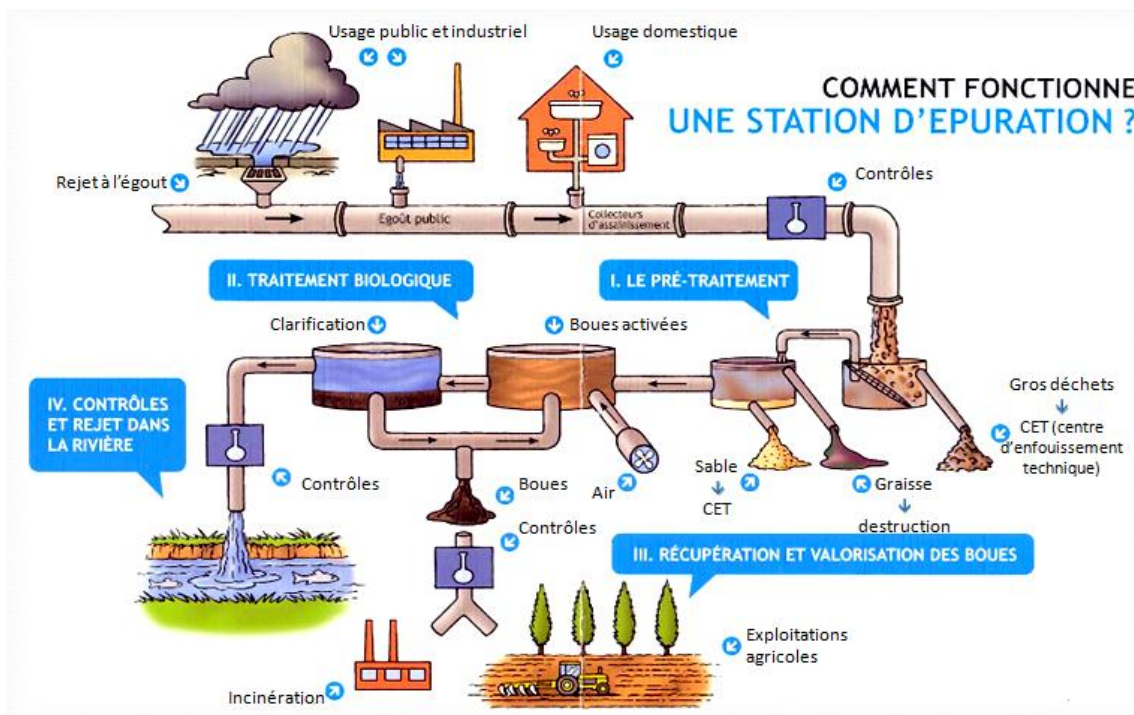
➤ Demande Chimique en Oxygène (DCO)

Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation de la matière minérale et organique par des processus purement chimiques et des processus biochimiques. Un rejet épuré doit avoir une DCO de 90-120mg/l.

La mesure de la DBO₅ et la DCO donne d'importantes informations sur la matière polluante et sa biodégradation. Ces tests sont généralement complétés par des tests de toxicité.

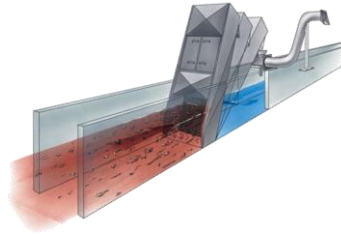
4.2.Epuration des eaux usées :

Ci-dessous un schéma global du fonctionnement d'une station d'épuration.



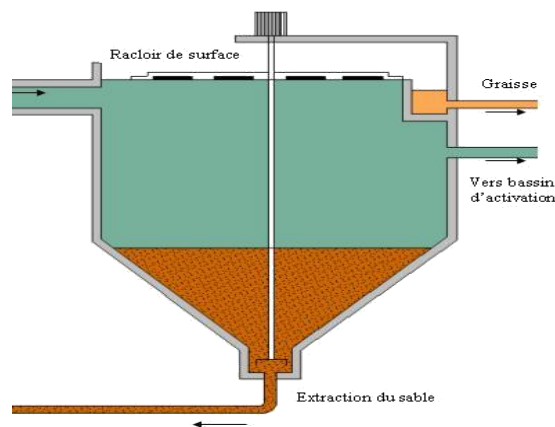
4.2.1. Dégrilleur :

Les **eaux usées** arrivent à la station par un réseau de canalisations. A l'entrée du traitement, les eaux traversent un **dégrilleur** qui retient les solides d'une taille supérieure à la maille de la grille. Les **déchets** sont ensuite égouttés et compactés.



4.2.2. Désableur-dégraisseur :

Sous l'effet d'un apport d'air, les matières légères (**graisses, huiles**), remontent à la surface du bassin. Elles sont assemblées à l'aide d'un racleur et évacuées. Les **sables** se déposent sur le fond où ils sont aspirés et évacués.

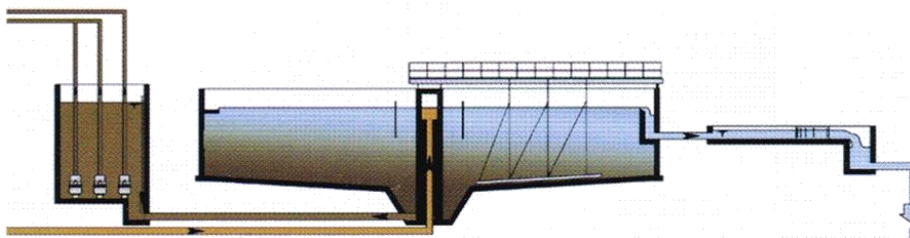


4.2.3. Bassin d'aération

Le traitement biologique permet de recréer des conditions naturelles en « fabriquant » des boues activées à partir de micro organismes. On brasse l'eau tout en ajoutant de l'oxygène par injection d'air (fines bulles) dans le bassin. Les micro-organismes naturellement présents dans les eaux usées se développent en se nourrissant des pollutions dissoutes (carbone, azote et phosphore).

4.2.4. Clarificateur :

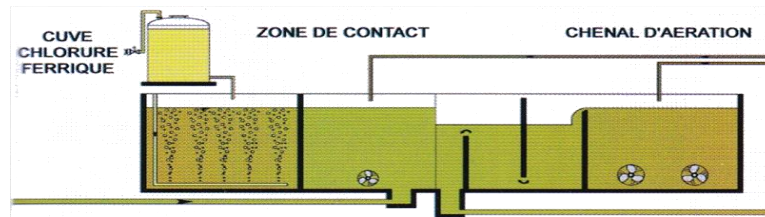
Les **eaux claires** se trouvant à la surface du bassin, sont récupérées par un système de déversoir et orientées vers un canal de rejet. Les **boues**, plus denses que l'eau se déposent au fond du bassin. Puis elles sont évacuées vers un puits à boues.



4.3. Le traitement des boues :

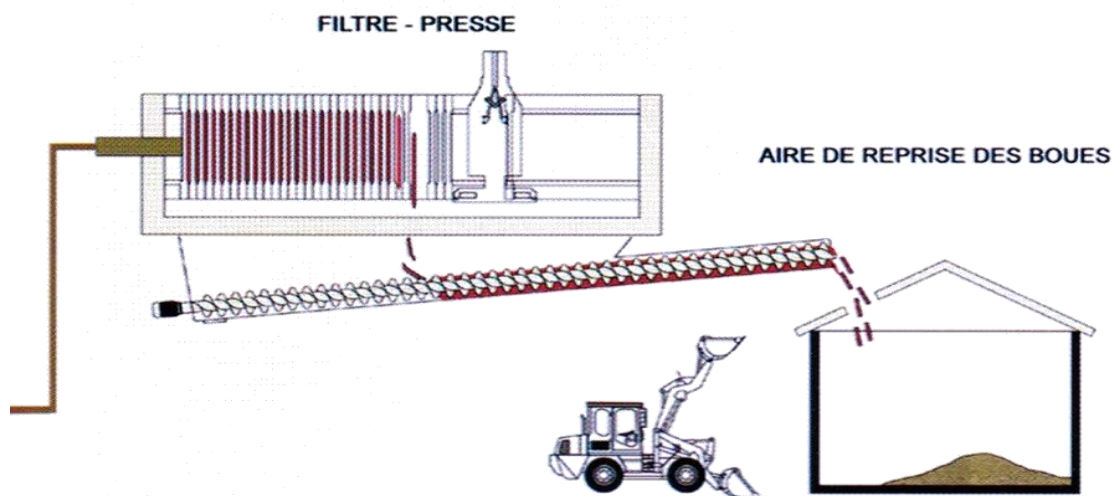
4.3.1. Le conditionnement des boues :

La première étape de l'épaississement consiste à ajouter un réactif aux boues. Ce traitement permet la formation d'agglomérats appelés « floccs », qui facilitent la séparation des matières sèches et de l'eau. Ceci se fait en deux étapes : égouttage des boues au travers d'une grille métallique puis ajout de chlorure ferrique et de chaux.



4.3.2. Le traitement des boues par filtre presse :

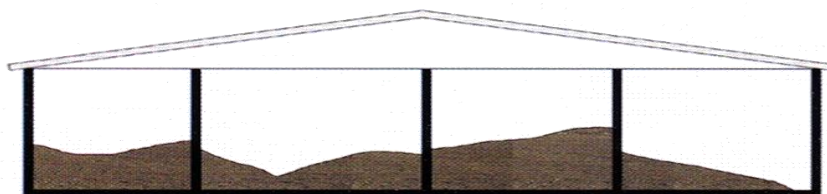
La technologie du filtre presse consiste à appliquer une forte pression sur les boues afin de libérer l'eau au travers de toiles tendues sur des plateaux verticaux.



La boue ainsi concentrée, est conservée entre les plateaux sous forme de « gâteaux » de boues séchée composée, désormais, de 70% d'eau et de 30% de matières sèches. Ces gâteaux de boue sont ensuite dégagés ; c'est le débâtissage.

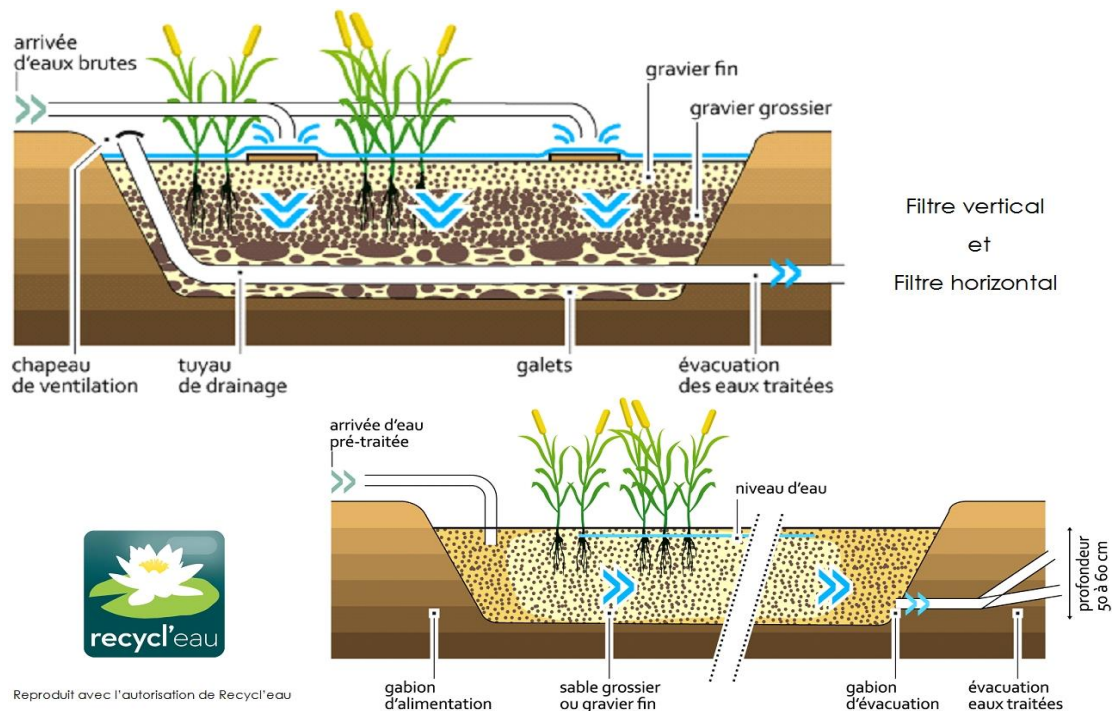
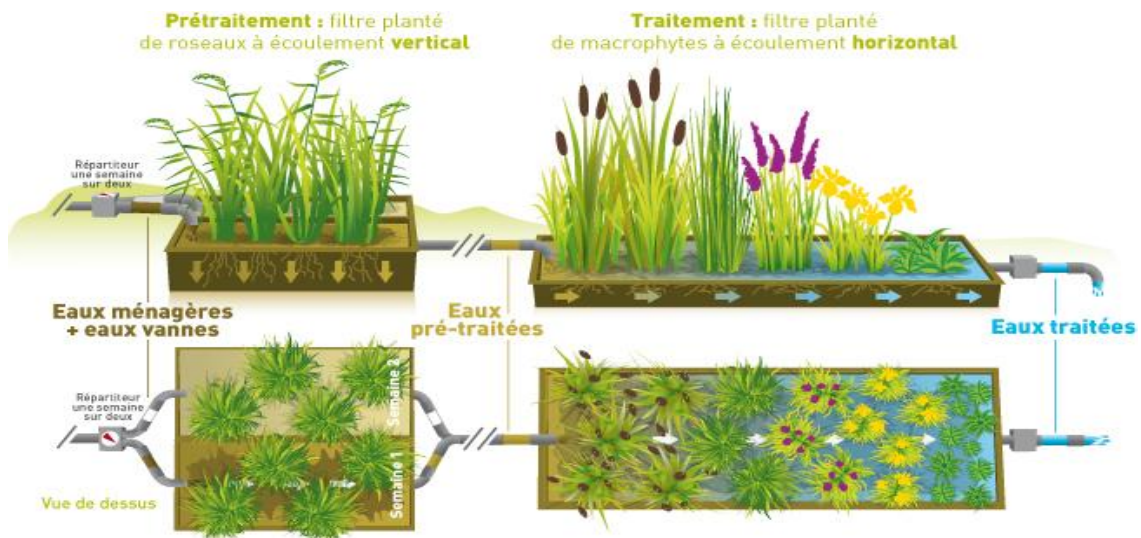
4.3.3. Le stockage des boues

Les boues sont entièrement valorisées en agriculture. L'aire de stockage, d'une autonomie de 10 mois, permet de conserver les boues pendant la période où l'épandage n'est pas possible.

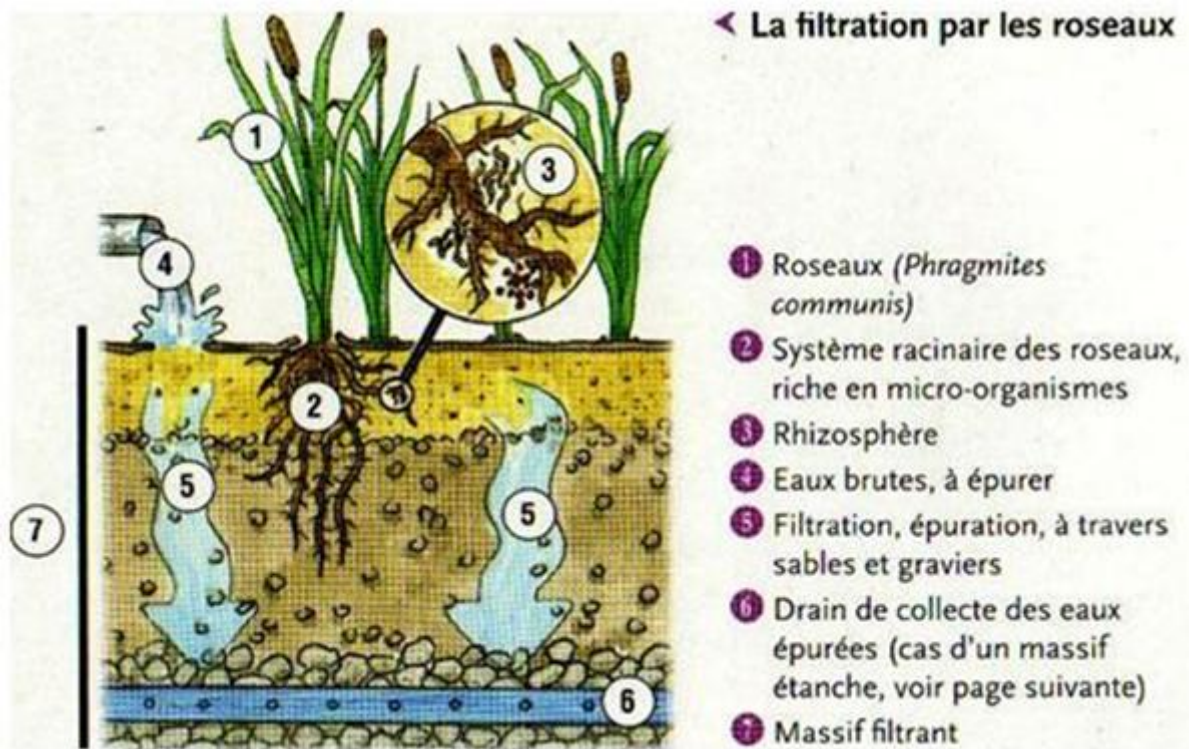


5. Epuration naturelle :

Cette filière d'épuration s'appuie sur le pouvoir épurateur des végétaux aquatiques : algues, hydrophytes (plantes d'eau libre) et héliophytes (plantes du bord des eaux). Les eaux usées séjournent simplement dans une série de bassins à ciel ouvert peuplés de ces végétaux. Le roseau (ou phragmite) et autres plantes vigoureuses ont été largement utilisés à cet effet sous le nom de « macrophytes ». Ces dernières consomment les composés polluants dissous dans l'eau – azote et phosphore –, qui constituent pour eux des éléments nutritifs. Par ailleurs elles servent de supports à de nombreux organismes microscopiques – algues et bactéries – qui font le gros du travail. Certains systèmes se bornent à mettre en œuvre l'épuration par « microphytes » ou algues unicellulaires. Quant aux hydrophytes, elles absorbent les nutriments en excès à travers les parois cellulaires de leurs tiges et feuilles très ramifiées et produisent de l'oxygène nécessaire à la décomposition des matières organiques et à l'oxydation de l'azote ammoniacal préjudiciable au milieu aquatique. Leur rôle se cantonne plutôt au bassin de finition, souvent négligé.



Reproduit avec l'autorisation de Recycl'eau



6. Eaux usées et microorganismes :

6.1. Risques sanitaires de l'utilisation des eaux usées :

Les eaux usées représentent un important véhicule d'agents biologiques (parasites, bactéries et virus) et chimiques (métaux lourds surtout) issus de l'activité humaine et/ou industrielle. Dans les zones d'épandage, le rejet de ces eaux usées est intense. Les agents pathogènes peuvent être transmis à l'Homme lors du contact direct avec les eaux usées, ou indirectement par la consommation de cultures irriguées avec ces eaux usées, ou encore par des produits d'origine animale.

6.1.1. Danger microbiologique:

Le danger microbiologique est dû aux agents pathogènes véhiculés par les eaux usées (parasites, bactéries et virus).

➤ Parasites dans les eaux usées (Tab. 5):

a. Protozoaires

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries. Les protozoaires pathogènes sont des organismes parasites. Certains protozoaires adoptent au cours de leur cycle de vie une forme de résistance, appelée kyste. Cette forme peut résister généralement aux procédés de traitements des eaux usées.

b. Les helminthes

Les helminthes sont des vers multicellulaires. Tout comme les protozoaires, ce sont majoritairement des organismes parasites. Les œufs d'helminthes sont très résistants et peuvent notamment survivre plusieurs semaines voire plusieurs mois sur les sols ou les plantes

cultivées. La concentration en œufs d'helminthes dans les eaux usées est de l'ordre de 10 à 10³ œufs/l.

Tableau 5 : Différents parasites des eaux usées.

Organisme	Symptômes, maladie	Nombre pour un litre	Voies de contamination principales
Protozoaires	Dysenterie amibienne	4	Ingestion
<i>Entamoeba histolytica</i>	Diarrhée, malabsorption	125 à 100 000	Ingestion
<i>Giardia lamblia</i>	Diarrhée bénigne, ulcère du colon	28-52	Ingestion
<i>Balantidium Coli</i>	Diarrhée	0,3 à 122	Ingestion
<i>Cryptosporidium</i>	Toxoplasmose : ganglions, faible fièvre		Inhalation / Ingestion
<i>Toxoplasma gondii</i>	Diarrhée, légère fièvre, perte de poids		Ingestion
<i>Cyclospora</i>	Diarrhée		Ingestion
<i>Microsporidium</i>			
Helminthes	Ascariadiase : diarrhée, troubles nerveux	5 à 111	Ingestion
<i>Ascaris</i>	Anémie	6 à 188	Ingestion / Cutanée
<i>Ancylostoma</i>	Anémie		Cutanée
<i>Necator</i>	Diarrhée, douleurs musculaires		Ingestion de viande mal cuite
<i>Tænia</i>	Diarrhée, douleur abdominale	10 à 41	Ingestion
<i>Trichuris</i>	Fièvre, douleur abdominale		Ingestion
<i>Toxocora</i>	Diarrhée, douleur abdominale, nausée		Cutanée
<i>Strongyloïdes</i>	Nervosité, troubles digestifs, anorexie		Ingestion
<i>Hymenolepis</i>			

➤ **Bactéries dans les eaux usées (Tab.6):**

Les bactéries sont des organismes unicellulaires simples et sans noyau. La quantité moyenne de bactéries dans les fèces est d'environ 10¹² bactéries/g. La majorité de ces bactéries ne sont pas pathogènes. Cependant, chez un hôte infecté, le nombre de bactéries pathogènes peut être très important. Les bactéries entériques sont adaptées aux conditions de vie dans l'intestin, c'est-à-dire une grande quantité de matière carbonée et de nutriments, et une température relativement élevée (37°C). Leur temps de survie dans le milieu extérieur, où les conditions sont totalement différentes, est donc limité. Par ailleurs, les bactéries pathogènes vont se trouver en compétition avec les bactéries indigènes, ce qui limitera leur développement.

Les bactéries pathogènes d'origine hydrique sont responsables de la mort de 3 à 10 millions de personnes par an dans le monde. La voie de contamination majoritaire est l'ingestion, comme le montre le tableau 6.

Tableau 6 : Les bactéries dans les eaux usées.

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Nombre pour un litre d'eau usée	Voies de contamination principales
Typhoïde, paratyphoïde, <i>Salmonella</i> , Salmonellose		23 à 80 000	Ingestion
<i>Shigella</i>	Dysenterie bacillaire	10 à 10 000	Ingestion
<i>E. coli</i>	Gastro-entérite		Ingestion
<i>Yersinia</i>	Gastro-entérite		Ingestion
<i>Campylobacter</i>	Gastro-entérite	37 000	Ingestion
<i>Vibrio</i>	Choléra	100 à 100 000	Ingestion
<i>Leptospira</i>	Leptospirose cutanée		inhalation/ingestion
<i>Legionella</i>	Légionellose		Inhalation
<i>Mycobacterium</i>	Tuberculose		Inhalation

➤ Virus dans les eaux usées (Tab.7):

Ce sont des organismes infectieux de très petite taille (10 à 350 nm) qui se reproduisent en infectant un organisme hôte. Les virus ne sont pas naturellement présents dans l'intestin, contrairement aux bactéries. Ils sont présents soit intentionnellement (après une vaccination contre la poliomyélite, par exemple), soit chez un individu infecté accidentellement. L'infection se produit par l'ingestion dans la majorité des cas, sauf pour *Coronavirus* où elle peut aussi avoir lieu par inhalation.

6.1.2. Effets toxiques généraux :

Les polluants des milieux aquatiques peuvent exercer une toxicité directe ou indirecte sur le milieu dans lequel ils se trouvent, cette toxicité peut être de trois formes :

- Toxicité aiguë :

Provoque la mort immédiate des organismes dans la zone du rejet.

- Toxicité chronique :

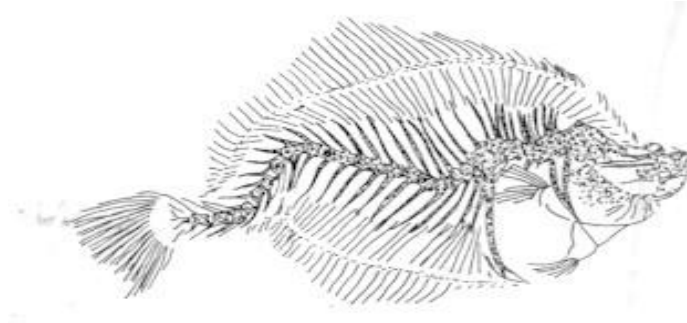
Troubles physiologiques causés par les toxiques qui entrent en contact avec l'espèce animale ou végétale.

Tableau 7 : Les virus des eaux usées.

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Nombre pour un litre d'eau usée	Voies de contamination principales
Virus de l'hépatite A	Hépatite A		Ingestion
Virus de l'hépatite E	Hépatite E		Ingestion
Rotavirus	Vomissement, diarrhée	400 à 85 000	Ingestion
Virus de Norwalk	Vomissement, diarrhée		Ingestion
Adénovirus	Maladie respiratoire, conjonctivite, vomissement, diarrhée		Ingestion
Astrovirus	Vomissement, diarrhée		Ingestion
Caliciviru	Vomissement, diarrhée		Ingestion
Coronavirus	Vomissement, diarrhée		Ingestion/inhalation
Réovirus	Affection respiratoire bénigne et diarrhée		Ingestion
Entérovirus :	Poliovirus Paralysie, méningite, fièvre	182 à 492 000	Ingestion
Coxsackie A	Méningite, fièvre, pharyngite, maladie respiratoire		Ingestion
Coxsackie B	Myocardite, anomalie congénitale du coeur (si contamination pendant la grossesse), éruption cutanée, fièvre, méningite		Ingestion
Echovirus	Méningite, encéphalite, maladie respiratoire, rash, diarrhée, fièvre		Ingestion
Entérovirus 68-71	Méningite, encéphalite, maladie respiratoire, conjonctivite hémorragique aiguë, fièvre		Ingestion

- **Effets sublétaux**

⇒ Déformations squelettiques des poissons pêchés dans le sud de la Mer du Nord : cas du turbot (action des hydrocarbures et métaux lourds)



Source : <http://www.isima.fr/ecosim/Welcome.html>

7. Eutrophisation :

C'est l'accumulation de la matière organique et minérale dans les milieux aquatiques peu renouvelables tels que les lacs, les étangs, ...qui aboutit à un déséquilibre irréversible de l'écosystème.

La prolifération des algues eutrophes suite à l'accumulation d'ions nitrates, phosphates et la matière organique nutritive, aboutit à leur accumulation provoquant d'une part, une putréfaction du milieu, et d'autre part une diminution d'oxygène dans le milieu suite à leur métabolisme par les microorganismes aérobies, ce qui laissera place aux microorganismes anaérobies fortement nuisibles par leurs production de méthane et d'autres molécules toxiques.

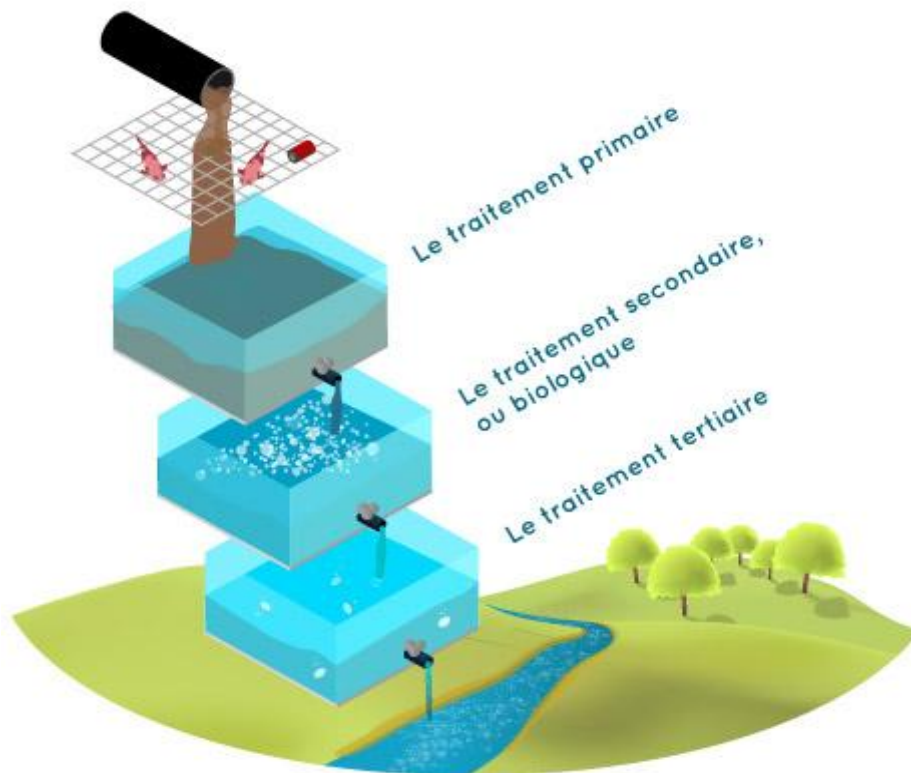
Remarque :

Les eaux usées véhiculent très bien les maladies à transmission hydrique, les bactéries responsables de ces maladies sont souvent d'origine entérique telles que : *E.coli*, *Salmonella*, *Shigella*, ... , pour les virus on peut citer tous les virus responsables des différentes hépatites...

8. Traitement des eaux usées :

Les eaux usées sont normalement traitées avant leur rejet dans l'environnement, et leur non traitement a des conséquences néfastes sur la santé de l'homme et de l'animal.

Le traitement des eaux usées, qui dépend de la nature de ces dernières et des caractéristiques des milieux récepteurs, a pour objectif d'éliminer la charge polluante en particulier les microorganismes pathogènes. Les eaux usées traitées sont alors déversées dans les cours d'eau, la mer... peuvent également être potabilisées ; ce traitement se fait en trois phases consécutives et complémentaires.



8.1.Epuration primaire

Le tamisage des eaux usées et leur décantation dans des bassins permet dans un premier temps de les débarrasser des débris flottants, des grosses particules insolubles, des huiles et graisses (par écrémage), cette élimination peut être accélérée par ajout d'agents chimiques coagulants (réduit la DBO de 20 à 30%).

8.2.Epuration secondaire

L'étape la plus importante du traitement, réalisée par des processus biologiques, basés sur l'action des microorganismes aérobies sur la matière organique : lagunages, lits bactériens, boues activées...Processus qui réduit de façon considérable les microorganismes pathogènes et la DBO de 90 à 95%.

Dans cette étape, quelque soit le traitement appliqué une boue de retenue (masse organique et microbienne en excès) est générée, ce qui impose un deuxième traitement par une digestion anaérobie.

8.3.Epuration tertiaire

Dernière étape du traitement, consiste à éliminer les composés azotés, phosphatés et la matière organique persistante par des processus physique et biologiques.

A la fin du traitement et avant leur élimination dans les milieux récepteurs, les eaux désinfectées subissent une chloration.

9. Les eaux Marines

Les contaminations microbiologiques d'origine fécale sont principalement liées aux activités anthropiques : assainissement, élevage, eaux pluviales urbaines... Ces contaminations entraînent des risques sanitaires pour les activités littorales comme la conchyliculture ou la baignade.

9.1. Les enjeux associés à la contamination bactériologique :

La qualité microbiologique des eaux côtières est déterminante pour la vie économique, sociale et touristique des régions littorales. En effet, la baignade, la conchyliculture et la pêche à pied constituent trois usages très pratiqués, nécessitant une bonne qualité microbiologique de l'eau.

9.2. Les risques sanitaires liés à la consommation des coquillages :

La qualité sanitaire des coquillages est directement dépendante de la qualité des eaux dans lesquelles ils sont élevés. En particulier, les micro-organismes présents dans l'eau peuvent être concentrés par les coquillages et constituer un risque sanitaire pour le consommateur. Les coquillages peuvent ainsi être à l'origine de Toxi-Infections Alimentaires Collectives (TIAC). La majorité de ces TIAC sont d'origine bactérienne ou virale, mais les phycotoxines, ou certains parasites pathogènes pour l'homme peuvent être incriminés.

9.2.1. Les virus :

Parmi les virus incriminés, les plus fréquents sont les Norovirus et l'Hépatite A. Les Norovirus sont reconnus comme le principal agent des épidémies transmises par la consommation de coquillages et sont à l'origine de 43% des épidémies mondiales (AFSSA, 2008). La majorité des épidémies dues à ces virus surviennent en hiver de façon concomitante aux épidémies de gastro-entérite virales hivernales.

Le virus de l'Hépatite A représente 25 % des épidémies mondiales associées à la consommation de coquillages (AFSSA, 2008). Ce virus est à l'origine d'épidémies massives.

9.2.2. Les bactéries :

Parmi les bactéries, les salmonelles et les vibrions sont les agents pathogènes le plus souvent incriminés au niveau mondial. Les vibrions isolées lors des épidémies liées à la consommation de coquillages sont principalement *Vibrio parahaemolyticus*, *Vibrio cholerae* O1, *Vibrio vulnificus* et *Vibrio hollisae*.

Salmonella a également été identifiée dans les TIAC liées à la consommation de coquillage. D'autres bactéries comme *Shigella*, *Campylobacter jejuni* ou *Listeria monocytogenes* ont occasionnellement donné lieu à des épidémies liées à la consommation de coquillages.

9.2.3. La contamination microbiologique des coquillages :

La grande majorité des micro-organismes pathogènes incriminés dans les TIAC est d'origine fécale. Leur présence dans les eaux littorales est liée aux activités anthropiques (rejets d'eaux usées, élevage, industries, eaux pluviales). Ces germes sont transférés jusqu'au littoral soit par des rejets directs, soit par les apports des bassins versants. L'usage des sols et les aménagements liés aux activités humaines influent également sur les phénomènes de transfert des germes jusqu'au réseau hydrographique.

9.3. Les sources de contamination des eaux littorales :

La contamination bactériologique d'origine fécale est habituellement évaluée grâce à des Germes Témoins de Contamination Fécale (GTCF). Actuellement l'indicateur réglementaire principal pour les différents usages (conchyliculture, baignade) est *Escherichia coli* (*E.coli*).

La concentration de cette bactérie indicatrice est réputée être représentative du risque de présence de micro-organismes pathogènes. Toutefois, la cinétique de survie dans le milieu marin d'*E.coli* n'est pas comparable à celles des virus pathogènes. Cet indicateur a donc une efficacité limitée pour évaluer les risques sanitaires d'origine virale.



9.3.1. Sources de contamination humaines :

La densité de population permanente des communes du littoral est souvent supérieure à la moyenne du territoire, elle peut y devenir supérieure en période estivale, ce qui représente une pression de contamination microbiologique importante. Les principales sources potentielles d'apport de micro-organismes d'origine fécale sont liées à l'assainissement : rejets du réseau d'assainissement, rejets des zones non raccordées ou en assainissement autonome.

➤ Stations d'épuration

Environ 80% de la population est raccordée aux stations d'épuration. Toutefois, selon les procédés d'épuration utilisés, l'efficacité du traitement varie.

Pour les bactéries, l'abattement est de:

- 10² à 10³ germes dans le cas des boues activées
- et de 10⁴ à 10⁶ dans le cas d'un lagunage.

Pour les virus, cet abattement est moins important. Il est de:

- **10 à 10²** pour un traitement par **boues activées**,
- et de **10² à 10⁴** dans le cas d'un **lagunage**.

On peut donc retrouver dans les effluents traités des concentrations de bactéries d'origine fécale allant jusqu'à 10²/100 ml dans le cas d'un lagunage ou 3.10⁶/100ml dans le cas d'un traitement par boues activées. L'efficacité de ces traitements peut être améliorée par l'utilisation d'un traitement tertiaire de désinfection (chloration, ultraviolets, lagunage de finition...).

➤ Réseaux de collecte des eaux usées

Le réseau de collecte des eaux usées peut également jouer un rôle important. Il existe deux types de réseau de collecte des eaux usées, les réseaux séparatifs destinés à collecter uniquement les eaux usées, et les réseaux unitaires qui collectent en plus les eaux pluviales.

Les réseaux unitaires peuvent être soumis à des saturations en cas de pluviométrie importante. L'efficacité du traitement peut être altérée par les fortes variations de charge hydraulique. En cas de saturation du réseau par les eaux pluviales, des rejets d'eaux usées non traitées peuvent survenir directement dans le milieu.

Les réseaux séparatifs sont, à priori, moins sujets à des déversements d'eaux usées dans le milieu. Cependant, ils peuvent être sujets à des défaillances techniques (rupture de canalisation, dysfonctionnement d'un poste de relèvement...). La vétusté du réseau est également un facteur important, les canalisations vieillissantes peuvent par exemple induire des fuites d'eau usée ou des ruptures de canalisation.

➤ Assainissement autonome

Au sein des communes littorales, et plus en amont sur les zones rurales de bassins versants, la part de l'habitat dispersé peut être importante. Dans ces zones, la proportion d'habitations non-raccordées au réseau d'assainissement est potentiellement élevée. Les systèmes individuels d'assainissement sont estimés moins efficaces. L'abattement des concentrations en bactéries après passage en fosse sceptique est compris entre 10 et 10². La grande majorité des installations d'assainissement autonome rejettent leurs effluents par infiltration dans le sol.

➤ Eaux pluviales d'origine urbaine

Les eaux pluviales contribuent à drainer la pollution microbiologique vers le réseau hydrographique. Les sols imperméabilisés, comme ceux des zones urbaines, empêchent l'infiltration et favorisent le ruissellement. Les surfaces contaminées et lessivées par la pluie peuvent engendrer une concentration de 10⁴ *E.coli*/100 ml dans les eaux pluviales collectées en milieu urbain.

Il arrive également que des rejets d'eaux usées contaminent les réseaux pluviaux (branchements sauvages, rejet ponctuels accidentels). La plupart des rejets d'eaux pluviales ne subissent pas de traitement épuratoire, les apports de ces rejets sont donc potentiellement conséquents. Leur contribution à la contamination microbiologique de certains secteurs littoraux est suspectée.

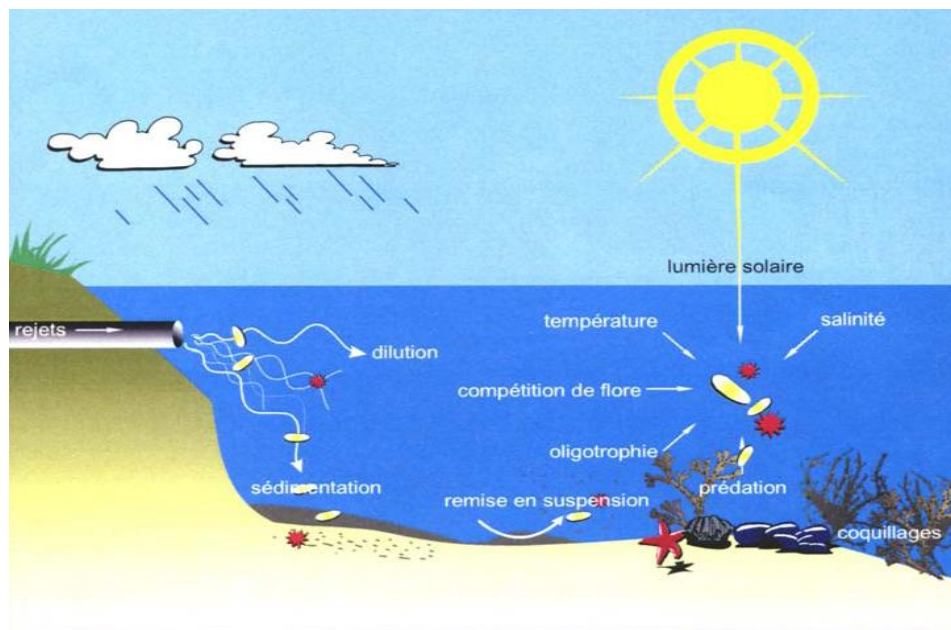
9.3.2. Sources de contamination animales :

Les animaux excrètent des germes d'origine fécale qui peuvent également être pathogènes pour l'homme : *Salmonella spp.*, *Campylobacter spp.*, *Listeria monocytogenes*, ainsi que certains astrovirus et rotavirus. Le risque de portage de ces micro-organismes pathogènes peut être évalué par un suivi zoosanitaire des cheptels, mais la proportion d'animaux porteurs sains peut être importante : 23% pour *Salmonella spp* chez les porcs et 7% chez les bovins.

La contamination animale est principalement liée à l'élevage, cependant la faune sauvage peut également induire une pollution fécale.

9.4. Le devenir des micro-organismes d'origine fécale dans le milieu littoral :

Le devenir des micro-organismes d'origine fécale dans le milieu marin est généralement évalué par le **T90**, soit le temps nécessaire pour que 90 % d'entre eux ne soient plus détectés par les techniques classiques. Ce paramètre permet ainsi de comparer leur décroissance dans des sites très différents. Il va varier, de façon sensible, selon le micro-organisme et les conditions environnementales rencontrées. La lumière solaire est souvent un des facteurs ayant le plus d'impact sur cette décroissance. L'augmentation de la température et de la salinité sont également favorables à la décroissance du T90.



Source : Piquet J.C. et al., 2011

Selon l'estimation du tableau ci-dessous, on remarque que les T90 des bactéries sont plus courts que ceux des virus. Cette différence entraîne des difficultés à évaluer les risques de contamination viraux avec des indicateurs bactériens comme *E.coli*.

Température	Bactéries	Virus
6°C	2-5 jours	10-30 jours
20°C	5-35 heures	10-12 jours

Chapitre 2 : Les Sols.

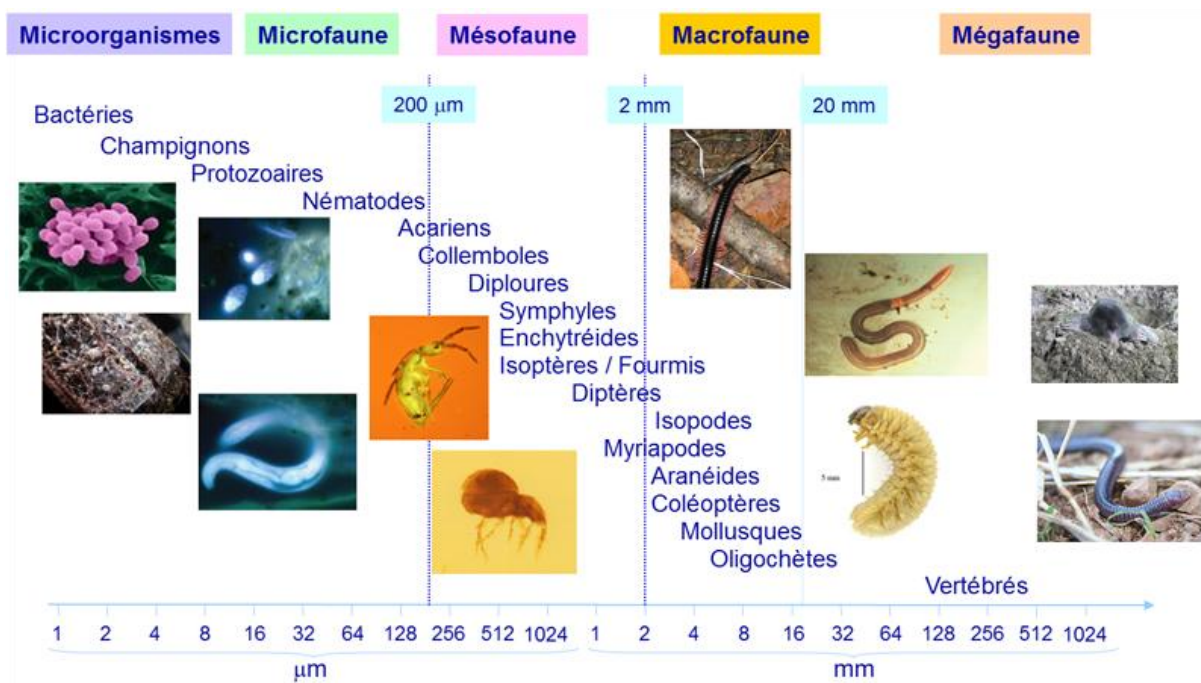
Introduction

Le sol est une matière vivante complexe, plus complexe encore que l'eau ou l'atmosphère qui sont des milieux relativement simples. Le sol est un milieu minoritaire sur notre planète : il n'a que 30 centimètres d'épaisseur en moyenne. C'est le seul milieu qui provienne de la fusion du monde minéral des roches-mères et du monde organique de la surface - les humus.

Sur trente centimètres d'épaisseur, le sol héberge 80% de la biomasse vivante du globe. Et dans ce sol, très mince, il y a beaucoup plus d'êtres vivants que sur le reste de la surface de la terre. Cela ne se voit pas. C'est un monde microbien que l'on a d'autant plus négligé qu'il ne coûte rien.

Les microbiotes sont fondamentaux pour la vie. Sans ces intermédiaires, les plantes ne peuvent pas se nourrir. L'industrie de l'homme, dans son fonctionnement, ne fait que copier le microbe. Le problème, c'est l'énergie phénoménale que cela coûte. Les bactéries des sols fixent l'azote de l'air pour faire des nitrates. Gratuitement ! L'homme, lui, utilise 10 tonnes de pétrole pour fixer une tonne d'azote. Qu'il vend cher. En oubliant de dire que les molécules chimiques ne fabriquent pas un sol. Alors évidemment, l'industrie a eu intérêt à remplacer le modèle traditionnel de l'agriculture. Et les agriculteurs biologiques ou biodynamiques ont des sols beaucoup plus actifs que ceux qui travaillent en conventionnel.

Les organismes vivants dans le sol classés par taille sont :



1. Microorganismes des sols :

La diversité des populations microbiennes indique qu'ils profitent de toutes les niches trouvées dans leur environnement. Différentes quantités d'oxygène, de lumière, ou de nutriments peuvent exister au sein de quelques millimètres dans le sol (Tortora *et al.*, 2010). L'activité microbienne est plus grande dans les couches superficielles du sol riches en matières organiques, en particulier dans et autour de la rhizosphère. Le nombre et l'activité des micro-organismes du sol dépendent dans une large mesure des quantités de nutriments présents. Les nutriments limitant dans les sols sont souvent les nutriments minéraux tels que le phosphore et l'azote (Mardigan *et al.*, 2012).

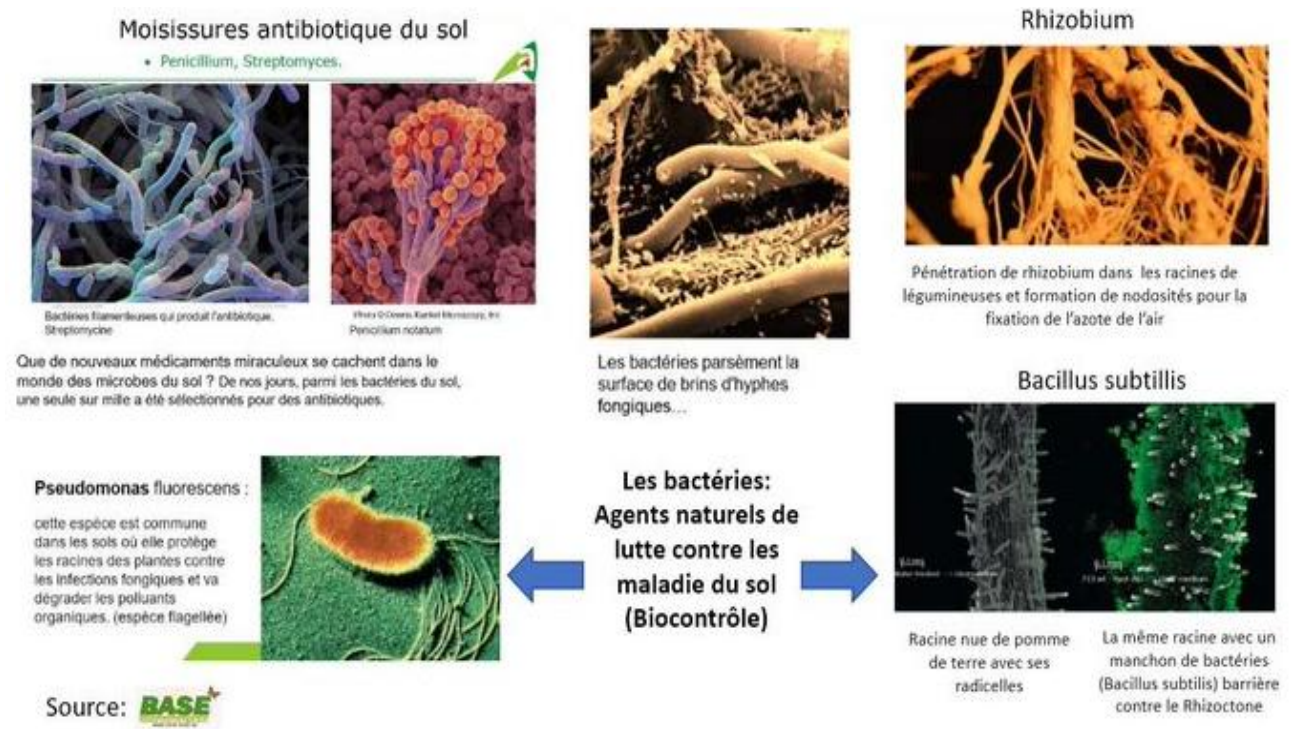


Figure 13 : Les microorganismes bénéfiques des sols.

1.1. Les bactéries :

Les bactéries utilisent différentes stratégies fonctionnelles pour profiter de cette matrice physique complexe. La plupart des bactéries du sol sont situées sur les surfaces des particules du sol et nécessitent de l'eau et des éléments nutritifs qui doivent être situés dans leur voisinage immédiat. Les bactéries se trouvent le plus souvent sur les surfaces intérieures des pores plus petits du sol (2 à 6 µm de diamètre). Là, elles sont probablement moins susceptibles d'être consommées par les protozoaires, contrairement à celles qui se trouvent exposées sur la surface extérieure d'un grain de sable ou une particule de matière organique. Les bactéries du sol peuvent être regroupés selon leurs groupements fonctionnels les plus importants en :

- **Les bactéries ammonifiantes :** décomposent les substances organiques azotées en ammoniac ou en ions ammonium.
- **Les bactéries nitrifiantes :** oxydation de l'ammoniac en nitrate

- **Bactéries fixatrices d'azote** : Captent l'azote atmosphérique (N₂) et le transforment en composés utilisables par les plantes (ammoniac). Ce sont notamment les bactéries symbiotiques localisées dans la rhizosphère des plantes cultivées (rhizobium chez les légumineuses).
- **Bactéries cellulolytiques** : Elles dégradent la cellulose. C'est le groupe le plus important dans la dynamique de la matière organique, car elles décomposent la cellulose, molécule structurelle la plus répandue chez les végétaux.
- **Bactéries pectinolytiques** : dégradent la pectine et ses dérivés. Les bactéries les plus abondantes sont du genre *Arthrobacter*.

1.2. Les champignons :

Les champignons filamenteux terrestres établissent des ponts dans les zones entre les particules du sol ou des agrégats, et sont ainsi exposés à des niveaux élevés d'oxygène. Ces champignons ont tendance à former des structures imperméables à l'oxygène, comme les sclérotés et des cordes hyphales. Ceci est particulièrement important pour le fonctionnement des basidiomycètes, qui forment des structures étanches à l'oxygène. Dans ces structures, les champignons filamenteux déplacent les éléments nutritifs et l'eau sur de grandes distances, y compris à travers les espaces aériens. Ces polymérisations oxydatives ne se produisent habituellement pas chez les champignons aquatiques.

1.3. Les protozoaires :

Les protozoaires font partie des micro-organismes qu'on retrouve dans le sol. Ces organismes unicellulaires, qui se nourrissent de bactéries, font partie du régime alimentaire des populations de vers de terre bénéfiques en agriculture.

Les protozoaires participent à la libération de l'azote pour la plante, les mécanismes de cette activité biologique ont lieu dans la rhizosphère, la partie proche des racines. Les protozoaires ont un ratio C/N de 30:1 tandis que les bactéries ont un ratio plus faible, de l'ordre de 5:1. Un protozoaire va consommer l'équivalent de 6 bactéries afin de répondre à ses besoins nutritifs en carbone. Alors que les besoins nutritifs en azote des protozoaires sont moindres par rapport aux bactéries, la consommation de 6 bactéries entraîne la libération de 5 unités d'azote. L'action des protozoaires libère l'azote qui compose le corps des bactéries; la minéralisation de l'azote augmente de 5 à 20% grâce à l'action des protozoaires. L'augmentation du nombre de protozoaires dans la rhizosphère a un double effet :

- L'augmentation de la population de vers de terre;
- Un meilleur recyclage de l'azote du sol.

Les insecticides ont un impact négatif sur les populations de protozoaires dans le sol. Les herbicides et les fongicides semblent avoir un impact moins important.

1.4. Les micro-algues :

Les algues unicellulaires ne se développent pas que dans l'eau. Dans les écosystèmes terrestres, elles constituent une source de carbone organique plus importante qu'imaginée jusqu'à présent, favorisant la biodiversité de ces milieux. Cette découverte jette une nouvelle lumière sur le cycle des nutriments dans le sol et sur les risques liés à l'emploi d'herbicides.

1.5. Les cyanobactéries :

Les cyanobactéries, en raison de leur caractère photosynthétique, ont une signification différente des autres microorganismes du sol. Alors que les bactéries et champignons sont

principalement des agents de décomposition et de minéralisation, les cyanobactéries sont, avec les micro-algues algues des producteurs primaires. Dans les sols fertiles, leur contribution, qui est très faible par rapport à celle des Phanérogames (plantes), passe souvent inaperçue. Par contre dans certains sols dégradés ou peu fertiles elles peuvent constituer un producteur primaire significatif et les formes fixatrices d'azote peuvent améliorer significativement la fertilité de certains de ces sols. Par les mucilages qu'elles produisent et par l'action mécanique des filaments, elles ont un rôle important dans l'amélioration de la structure de certains sols exondés dont elles augmentent l'agrégation. Elles les protègent également contre l'érosion en formant des croûtes à la surface du sol.

Dans les sols, les bactéries forment généralement le groupe le plus important numériquement. Toutefois, les comptages de microorganismes ne reflètent que très imparfaitement l'image de la microflore des sols et il est plus réaliste d'exprimer les données en terme de biomasse.

Dans les sols exondés, les champignons constituent fréquemment le composant majeur de la biomasse microbienne. Dans les sols submergés, suivant la productivité de l'eau de submersion, ce sont généralement les algues et/ou les cyanobactéries qui dominent la biomasse microbienne (Tab. 8).

Tableau 8 : Ordre de grandeur des densités et biomasses de microorganismes dans les sols.

Organismes	Numérations	Biomasse
Bactéries	Numération sur milieu liquide ou solide: $10^5 - 10^8 \text{ g}^{-1} \text{ sol sec}$ Comptage direct : $10^8 - 10^{10} \text{ g}^{-1} \text{ sol sec}$	100 à 4000 kg poids frais ha^{-1}
Actinomycètes	$10^5 - 10^8 \text{ g}^{-1} \text{ sol sec}$	
Champignons	$10^4 - 10^6 \text{ g}^{-1} \text{ sol sec}$	10 à 1000 m d'hyphes $\text{g}^{-1} \text{ sol}$ 50 à 5000 kg poids frais ha^{-1}
Algues et cyanobactéries	sols exondés: $10^2 - 10^4 \text{ g}^{-1} \text{ sol sec}$ sols submergés: $10^3 - 10^8 \text{ g}^{-1} \text{ sol sec}$	sols exondés: 0 à 500 kg poids frais ha^{-1} sols submergés: 0 à 30 000 kg poids frais ha^{-1}
Protozoaires	$10^3 - 10^5 \text{ g}^{-1} \text{ sol sec}$?

Source : <http://biodidac.bio.uottawa.ca/>

2. Importance des micro-organismes et des plantes dans la formation de sols :

Une fois qu'ils sont formés, la plupart des sols sont riches en éléments nutritifs. La matière organique du sol aide à retenir les nutriments, maintient la structure du sol, et garde l'eau (Prescott, 2010). Les nutriments se trouvent dans la matière organique, micro-organismes, les insectes du sol, etc. Les plantes poussent, meurent et à chacune de ces phases, elles fournissent des éléments nutritifs pour les organismes du sol. Dans un sol typique, c'est la matière organique qui contient la plus grande proportion de carbone et d'azote. Cependant, cette ressource nutritive n'est pas immédiatement disponible pour l'installation ou l'utilisation microbienne. Aboutissant ainsi et selon les régions à différents types de sol (Prescott *et al.*, 2002).

3. Associations des micro-organismes du sol avec les végétaux :

Les plantes sont la principale source de matière organique dont la plupart des micro-organismes du sol dépendent ; en outre, elles sont fortement colonisées par des microorganismes, beaucoup d'entre eux ont développé des relations étroites avec les végétaux (commensalisme, mutualisme, pathogènes). Différents types de micro-organismes sont associés

aux feuilles, tiges, fleurs, graines et aux racines. La communauté microbienne influence directement ou indirectement les plantes. Cette communauté inclut des micro-organismes qui se développent à la surface de la plante ou **épiphytes**, et à l'intérieur des cellules végétales ou **endophytes** (Prescott, 2002 et 2010).

Notamment en raison du caractère mortel ou inhibiteur des UV solaires pour de nombreux microbes de la phyllosphère, les habitats microbiens et fongiques sont préférentiellement situés au-dessous du niveau du sol (et surtout dans la mince partie du sol qui gaine les racines et des tiges souterraines) sont considérés comme, respectivement, la rhizosphère et la laimosphère.

3.1. Micro-organismes de la phyllosphère :

La phyllosphère abrite une discrète mais intense vie microbienne dont une partie forme le microbiote de la plante, dont on s'est aperçu qu'elle était plus complexe qu'on ne l'avait imaginé. Le microbiote présent sur les feuilles, tiges et tronc évolue après la chute des feuilles ou la mort de tout ou partie du végétal, pouvant aussi jouer un rôle dans le processus de décomposition et de cyclage de la matière organique. Le microbiote peut dans la phyllosphère former de véritables biofilms que l'on commence à mieux caractériser voire à quantifier.

Les feuilles et les tiges libèrent des composés organiques, et cela peut conduire à un développement massif de micro-organismes, incluant les *Sphingomonas*, qui peuvent survivre à des niveaux élevés de rayonnement UV. Cette bactérie, aussi commune dans les sols et les eaux, peut se produire à 10⁸ cellules par gramme de tissu végétal. Les *Sphingomonas* représentent souvent la majorité des espèces cultivables. Les micro-organismes de la phyllosphère jouent un rôle important dans la protection mais peuvent éventuellement nuire à la plante (Prescott *et al.*, 2010).



Figure 14 : *Sphingomonas Sp* (Yabuuchi *et al.* 1990).

3.2. Micro-organismes de la rhizosphère et du rhizoplan :

Les racines des plantes libèrent une grande variété de substrats dans leur sol environnant, notamment l'éthylène, divers alcools, des sucres aminés, des acides organiques, des vitamines, des nucléotides, des polysaccharides, et des enzymes. Ceci permet de créer des environnements uniques pour les micro-organismes du sol. Ces environnements comprennent :

- la rhizosphère, décrite par Lorenz Hiltner en 1904, qui est représentée par le volume de sol autour de la racine influencé par les substrats rejetées par celle-ci.
- La surface de la racine de la plante, appelée rhizoplan, fournit également un environnement unique pour les micro-organismes, comme des matières gazeuses, solubles, et des particules se déplaçant à partir de la plante vers sol. Lorsque ces substrats sont disponibles le nombre des micro-organismes augmente, mais aussi leur composition et leur fonction

changent dans la rhizosphère et le rhizoplan. Les micro-organismes de la rhizosphère et du rhizoplan, servent à leurs tours de sources de nutriments labiles pour d'autres organismes, créant ainsi une **boucle microbienne du sol** en plus de jouer un rôle essentiel dans la synthèse et la dégradation de la matière organique.

Dans la rhizosphère une large gamme de bactéries peut favoriser la croissance des plantes, en communiquant avec celles-ci au moyen de signaux chimiques complexes. Ces signaux chimiques, incluent des auxines, gibbérellines, glycolipides, et cytokinines, qui sont un intéressant moyen biotechnologique. Parmi les rhizobactéries qui promouvoient la croissance des plantes (PGPR) on retrouve les genres *Pseudomonas* et *Achromobacter*.

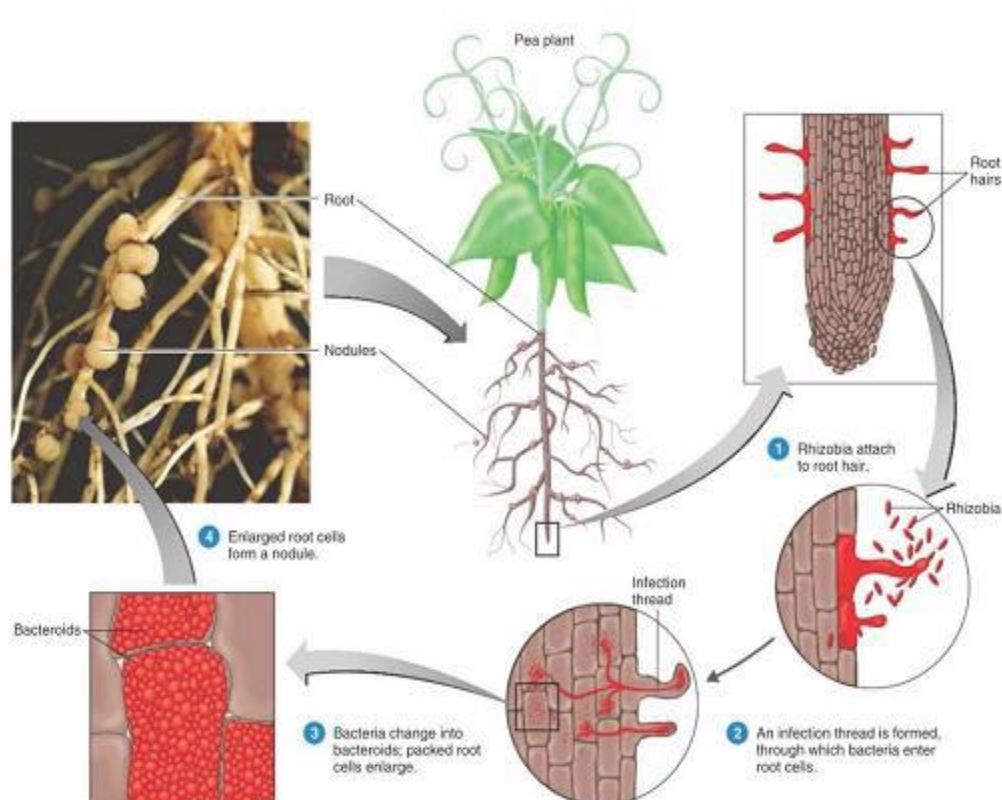


Figure 15 : Formation d'un nodule de racine dans une légumineuse infectée par *Rhizobium* ((Tortora *et al.*, 2010)

Les micro-organismes tels que *Azotobacter*, *Azospirillum* et *Acetobacter* fixant l'azote sont présents sur la surface des racines des plante, le rhizoplan, ainsi que ceux présents dans la rhizosphère contribuent à l'accumulation d'azote par les graminées tropicales. Ces bactéries favorisent la production d'hormones qui augmentent la croissance et le développement des radicelles et donc une plus grande capacité de la plante à absorber les substances nutritives (Prescott *et al.*, 2010).

4. Phénomène de biodégradation des sols par les microorganismes :

La décomposition de la matière organique est le fruit d'une série de réactions chimiques qui aboutit à la transformation des composés organiques complexes en composés minéraux

simples. La minéralisation de la matière organique est un processus fondamental car il aboutit à sa transformation en éléments simples, les seuls qui soient assimilables par les plantes.

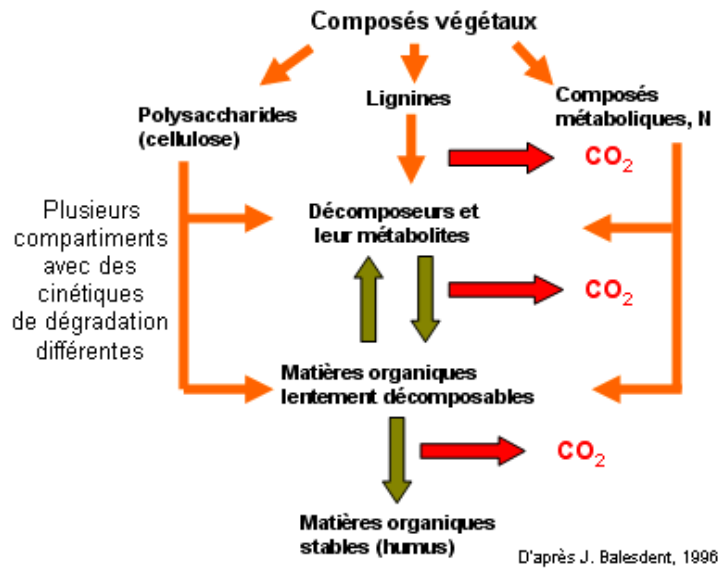


Figure 16: Phénomène de biodégradation des sols.

La vitesse de dégradation dépend de la nature des matières organiques enfouies, mais également de la disponibilité en azote (Fig.17). Les microorganismes ont en effet besoin d'azote pour dégrader le carbone : lorsque les résidus à décomposer présentent un rapport C/N (rapport entre la quantité de carbone total et la quantité d'azote total) faible, les microorganismes ne prélèvent pas d'azote dans le milieu. Par contre, lorsqu'une quantité importante de résidus à C/N élevé est enfouie, ils prélèvent de l'azote dans le sol pour leur propre métabolisme, pouvant, dans certaines conditions, devenir concurrents du peuplement végétal cultivé pour l'azote (« faim d'azote »). Le rapport C/N est également utilisé pour caractériser l'évolution des matières organiques dans le sol. Le carbone est perdu par minéralisation plus rapidement que l'azote de sorte que le rapport C/N diminue au cours du temps et tend vers une valeur caractéristique des humus formés dans différentes conditions. Ainsi, dans les sols cultivés, il tend vers 10 alors qu'il tend vers 40 pour les tourbes.

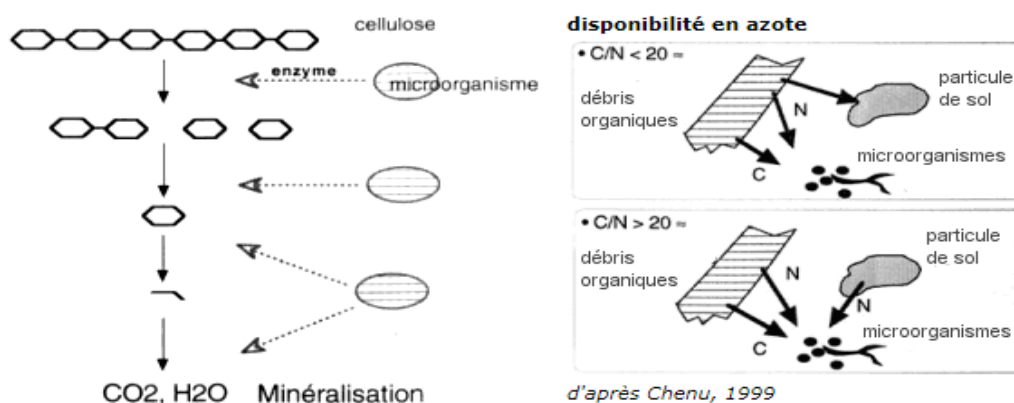


Figure 17 : Dégradation des sols en fonction de la disponibilité de l'azote.

5. Les microorganismes et les cycles biogéochimiques :

Les cycles biogéochimiques sont importants car ils permettent de réactiver les éléments inertes en une forme utilisable par les organismes vivants. Ces cycles biogéochimiques sont

essentiellement liés aux activités microbiennes. En effet, les microorganismes sont responsables de la moitié de la productivité primaire sur terre. Ils jouent des rôles majeurs dans tous les cycles biogéochimiques (cycle du carbone, de l'azote, de l'oxygène, du soufre, du fer,...etc). Les bactéries et *Archaea*, sont en effet les seuls à pouvoir réaliser des transformations comme la fixation de l'azote, la dénitrification et la nitrification. Dans le cycle du soufre, bactéries et *Archaea* assurent la réduction du soufre et des sulfates ainsi que l'oxydation aérobie ou anaérobie du sulfure. Dans le cycle de carbone, elles sont responsables de la décomposition de la matière organique, de la méthanogenèse et de l'oxydation du méthane. Certains microorganismes comme les algues et les cyanobactéries sont des producteurs primaires et d'autres, en premier lieu les protozoaires sont des consommateurs. Au niveau des cycles biogéochimiques, il y a un échange important entre lithosphère, atmosphère et hydrosphère. Ces flux ne sont que la conséquence de processus biochimiques qui se déroulent à l'échelle cellulaire. Les processus microbiens impliqués dans les transformations biogéochimiques sont:

- **Minéralisation** : conversion de la forme organique d'un élément en forme inorganique. On parle de volatilisation quand les produits formés sont des gaz.
- **Immobilisation** : assimilation d'un élément inorganique qui va être convertie en substance organique plus ou moins complexe.
- **Oxydation** : c'est liée essentiellement aux processus énergétiques dans les cellules qu'ils s'agissent de substrats organiques ou inorganiques.
- **Réduction** : c'est le résultat de processus énergétique (accepteurs finaux d'électrons qui se réunissent), la prolifération cellulaire (ce traduit par la consommation, par une chute du potentiel rédox), puis les cellules quand elles prolifèrent, elles libèrent les composés réducteurs, souvent des acides organiques.
- **Fixation** : assimilation et conversion d'un élément gazeux en composé organique.
- **Diagenèse** : formation de dépôts géologiques via les microorganismes : formation de roches sédimentaires, de charbons, de pétroles, de dépôts sulfureux, etc...

5.1.Cycle du carbone :

Les microorganismes jouent un rôle majeur dans le cycle du carbone, élément de base pour les organismes vivants (Fig.18). Quatre réservoirs de carbone sont identifiés: les océans, l'atmosphère, la lithosphère et la biosphère terrestre. La quantité de carbone est contenue dans chaque réservoir, ou masse de carbone, est exprimée en PgC (Penta grammes de carbone; 1 PgC = 10¹⁵ g). Dans les océans, les échanges de carbone vers et à partir de l'atmosphère sont en parfait équilibre. La masse du biotope marin à la surface est à l'origine du processus d'assimilation du carbone (résultant principalement de la fixation du CO₂ par les producteurs primaires), de la respiration et de la décomposition. L'eau profonde contient de grandes quantités de carbone inorganique sous forme de carbonate, de bicarbonate et d'acide carbonique. Elle contient aussi le carbone organique dissous (COD) et le carbone organique particulaire (COP).

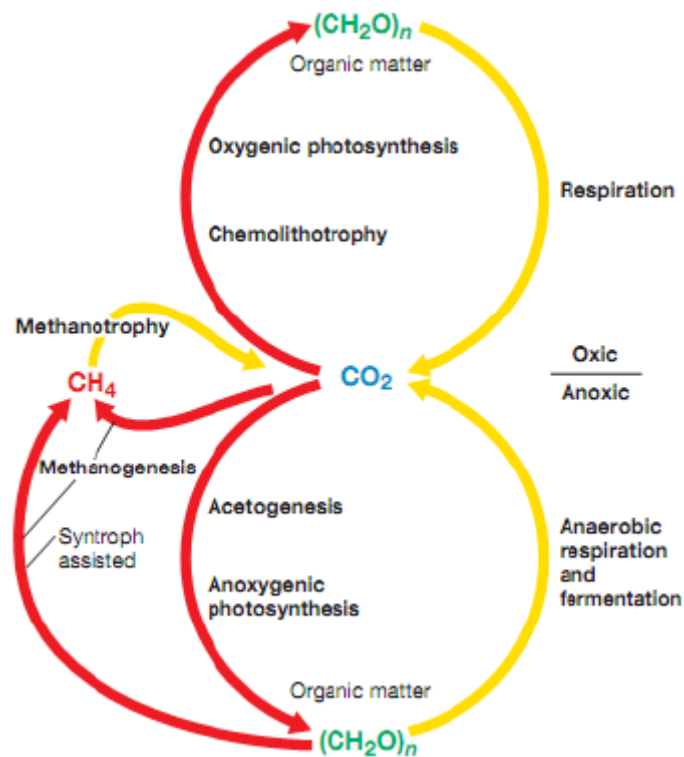


Figure 18 : Cycle du carbone (Mardigan *et al.*, 2012).

5.1.1. La production primaire :

Les producteurs primaires fixent le CO_2 et le convertissent en matière organique. Parmi les producteurs primaires, les organismes photosynthétiques tirent directement leur énergie des radiations solaires. Les bactéries chimiolithotrophes tirent leur énergie de la transformation des substances chimiques énergétiques (composés inorganiques réduits comme le sulfure d'hydrogène, l'ammoniac, l'hydrogène) qui proviennent des activités géochimiques ou d'autres processus biologiques dont certains peuvent dépendre de l'énergie solaire. Les principaux producteurs primaires terrestres sont les végétaux qui constituent la source prédominante de la matière organique.

5.1.2. Décomposition des matières organiques :

Les matières organiques provenant des producteurs primaires se retrouvent dans les organismes vivants et les composés organiques inertes qui en dérivent. Les végétaux, les animaux et un grand nombre de microorganismes réalisent la respiration pour produire du CO_2 et de l'eau. Pour les animaux et microorganismes aérobies, la respiration est le mécanisme par lequel ils obtiennent de l'ATP nécessaire à leur métabolisme. Les bactéries et les champignons sont les agents de recyclage des matières organiques inertes. Ils vivent à l'état saprophyte sur les matières organiques issues des végétaux et des animaux morts et d'autres microorganismes. Ils sont assistés dans ce processus, par des animaux supérieurs (herbivores et carnivores) qui ingèrent des matières organiques particulières et les bactéries qui sont associées à ces aliments ainsi que celles qui résident dans leur tractus digestif. La décomposition organique est un processus analogue à la respiration seulement l'obtention de l'énergie pour la croissance implique la dégradation de composés organiques inertes. Si le composé organique est entièrement dégradé en composés inorganiques comme le CO_2 , l'ammoniac et l'eau, le processus est appelé minéralisation. Les bactéries et les champignons sont parfaitement adaptés

à la dégradation des polymères organiques comme la cellulose, la chitine et la lignine. La cellulose issue des plantes et la chitine issue principalement de crustacés, d'insectes et de quelques champignons sont dégradées par de nombreuses bactéries et champignons de la pourriture blanche. Une grande variété de microorganismes peut dégrader des composés organiques solubles comme les acides organiques, les acides aminés et les sucres. La dégradation de la matière organique est influencée par trois principaux facteurs:

- les nutriments présents dans le milieu,
- les conditions abiotiques (pH, potentiel oxydo-réducteur, O_2 , conditions osmotiques),
- la communauté microbienne.

5.1.3. Méthanogenèse et oxydation du méthane :

Les processus anaérobies majeurs du cycle du carbone se traduisent par la fermentation des composés organiques en acides organiques et gaz tels que l'hydrogène et le CO_2 . Dans les sédiments et le tractus digestif des ruminants et des termites, des dégradations complémentaires, assurées par les méthanogénèses, aboutissent à la formation du gaz méthane. Si la plupart des méthanogénèses utilisent le CO_2 et l'hydrogène comme substrat pour la formation du méthane, d'autres utilisent les produits de fermentation comme le méthanol ou l'acide acétique pour cette production. Les bactéries oxydant le méthane et certaines levures dégradent le méthane dans la biosphère, mais une partie du méthane rejoint l'atmosphère et devient un gaz à effet de serre.

5.2. Le cycle de l'azote :

Tous les organismes ont besoin d'azote pour la synthèse de protéines, d'acides nucléiques, et d'autres composés contenant de l'azote. L'azote moléculaire (N_2) représente près de 80 % de l'atmosphère de la terre. Les plantes assimilent et utilisent l'azote fixé et combiné en composés organiques. Les activités spécifiques de micro-organismes jouent un rôle important dans la conversion de l'azote en formes utilisables (Tortora *et al.*, 2010).

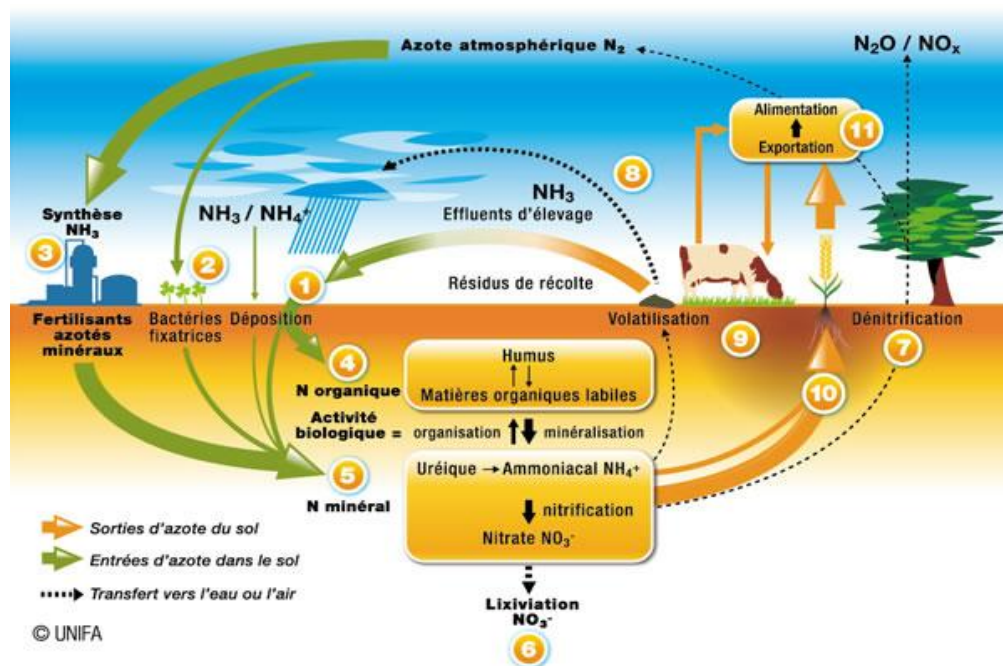


Figure 19 : Schéma du cycle de l'azote.

5% de l'azote présent dans le sol est sous forme minérale, essentiellement de l'ammonium et du nitrate. 95 % de l'azote est sous forme organique, essentiellement des protéines (60%), des acides aminés (5 à 15 %) et des sucres simples (10 à 20 %).

5.2.1. Humification :

La matière organique est fragmentée par des bactéries cellulolytiques, des lombrics, des insectes, des champignons qui jouent un rôle dans la dégradation de la lignine. Ce processus est essentiellement aérobique. Une fragmentation rapide nécessite les conditions favorables suivantes:

- Une température située entre 30 et 40 °C.
- Une aération modérée.
- Un pH situé entre 7 et 5,5.
- Une humidité suffisante.

Si le pH est inférieur à 5,5 alors seuls les champignons assurent l'humification. À ce stade de la décomposition, la matière organique est mise sous forme liquide grâce à des champignons et à des bactéries. De là, un complexe argilo-humique se forme. Les molécules organiques chargées positivement vont venir s'insérer entre les feuillets d'argile chargés négativement. Les complexes argilo-humiques sont stables et forment, ainsi, des agrégats poreux. L'air et l'eau peuvent, par conséquent, aisément y circuler.

5.2.2. Ammonification :

La première étape de l'ammonification est réalisée par des champignons tels que *Aspergillus* et *Penicillium*. Si le milieu est acide, elle est effectuée par des bactéries aérobies telles que *Bacillus* et *Pseudomonas*. S'il est neutre, l'ammonification est faite par des bactéries telles que *Clostridium* qui agissent uniquement si le milieu est riche en protéase.

À ce stade de la décomposition, la matière organique est sous forme de protéines. Après la restriction de ces protéines en acides aminés, elles seront soumises à l'action d'une hydrogénase pour former une molécule intermédiaire, qui en présence d'eau, formera un acide *alpha cétonique* plus une molécule d'ammonium.

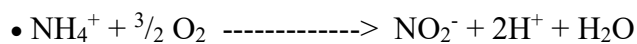
L'ammonium (NH_4^+) ainsi formé sera lentement libéré par le complexe argilo-humique. Cependant, en cas de fortes précipitations, il est lessivé en profondeur du sol vers la nappe phréatique.

Le processus de l'ammonification est favorisé par une température de 30 °C, un pH neutre et un stock de matière organique suffisant.

Les réactions biochimiques intervenant lors de l'ammonification sont réversibles. Si l'ammonium n'est pas consommé, le stock de matière organique n'est pas, non plus, consommé. Si la réaction est rapide, on constate une grande consommation de matière organique soit une grande production d'ammonium.

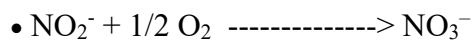
5.2.3. Nitrification :

La nitrification se réalise en deux étapes, la nitritation et la nitratisation. La nitritation permet la transformation de l'ammonium en nitrite, en présence d'oxygène (oxydation). Cette réaction est réalisée par l'intermédiaire de bactéries chimolithotrophes, autotrophes, (aérobie stricte) appartenant à la famille des *Nitrobactéraceae* du genre *Nitrosomonas europaea*. Son équation de principe est la suivante:



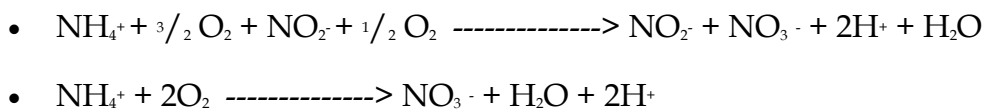
Cette réaction est exothermique à tendance spontanée. Ces bactéries utilisent cette énergie pour leur propre synthèse organique. La condition favorable pour cette réaction est une température située autour de 37°C.

La nitratisation permet la transformation du nitrite en nitrate en présence d'oxygène (oxydation). Cette réaction est réalisée par l'intermédiaire de bactéries chimiolithotrophe, autotrophes (aérobie stricte) appartenant à la famille des nitrobactéraceae du genre *Nitrobacter winogradskyi*. Son équation de principe est la suivante:



Cette réaction est aussi exothermique à tendance spontanée, comme la réaction précédente. La nitrosation et la nitratisation se font dans les mêmes conditions.

Bilan de la nitrification:



On constate que la nitrification libère des ions H^+ et abaisse donc le pH. Cependant une nitrification optimum nécessite un pH de 8,5.

5.3. Le cycle du soufre :

Dans la plupart des sols, le soufre est un élément rare qui provient de la décomposition de la roche-mère contenant des minéraux sulfurés (pyrites par ex.). La principale source pour les organismes vivants est les sulfates, solubles, et seule forme de soufre inorganique disponible. Absorbés par les plantes ils sont transformés en acides aminés sulfurés : cystine, cystéine et méthionine.

Ce soufre est ensuite restitué au sol par les micro-organismes (sulfobactéries) qui réduisent le soufre organique (acides aminés) en hydrogène sulfuré. L'hydrogène sulfuré se dégage dans l'air ou dans l'eau, ou est transformé en produits dont l'oxydation aboutit à des sulfates. Le cycle du soufre présente aussi une phase sédimentaire. Lorsqu'il précipite en milieu anaérobie en présence de fer, le soufre s'accumule sous forme de FeS_2 , qui pourra être réintroduit dans le cycle par l'érosion des sols et le volcanisme.

5.3.1. Oxydation du soufre :

Les formes réduites du soufre inorganique, incluant non seulement le sulfure et le soufre élémentaire, mais aussi le thiosulfate et d'autres ions, peuvent être oxydés par différents groupes de microorganismes. Ce processus est appelé oxydation du soufre. Les bactéries photosynthétiques utilisent le sulfure d'hydrogène (H_2S), produit par les réducteurs de sulfate (SO_4^{2-}) des milieux anaérobies, comme accepteurs d'électron pour la réduction du CO_2 nécessaire à la synthèse des composés organiques. Les bactéries sulfureuses pourpres et vertes appartiennent à ce groupe d'organismes. Elles oxydent le sulfure en soufre élémentaire puis finalement en sulfate. Des bactéries non-photosynthétiques oxydent également des formes réduites de soufre. Certaines sont chimiolithotrophes, elles utilisent les composés sulfurés réduits comme source d'énergie et puisent dans les substances inorganiques le carbone nécessaire à leur croissance. D'autres sont hétérotrophes. Des bactéries filamenteuses

(*Beggiatoa*) ou unicellulaires (*Pseudomonas spp.*) et quelques archéobactéries acidophiles thermophiles (*Acidianus*, *Sulfolobus*) participent à l'oxydation du soufre.

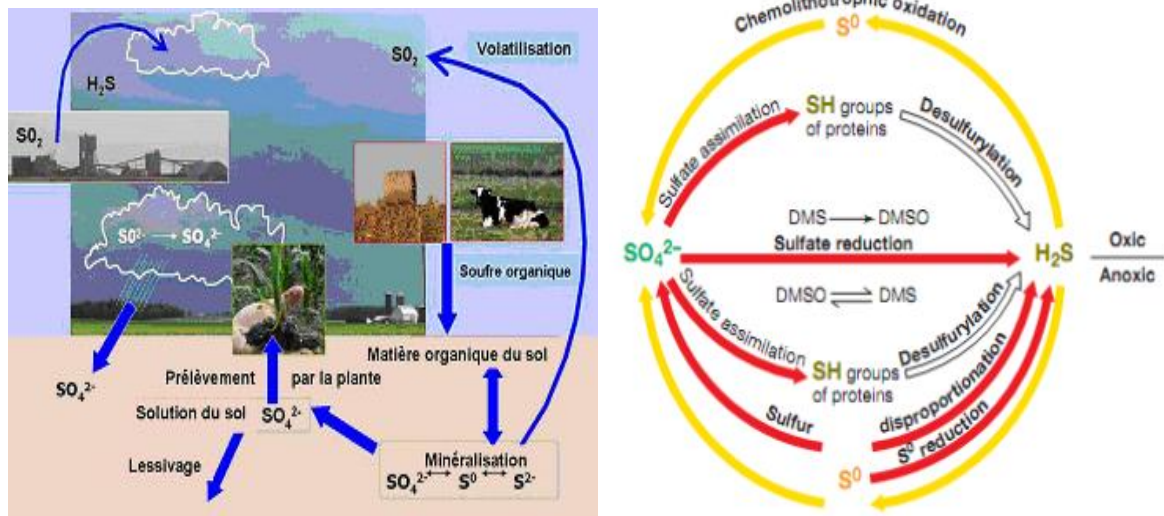


Figure 20 : Schéma du cycle du soufre (Mardigan *et al.*, 2012).

5.3.2. Réduction du soufre :

Le groupe de bactéries réductrices du soufre le mieux connu est celui des bactéries sulfato-réductrices qui utilisent les composés organiques comme source de carbone et les sulfates comme accepteurs d'électrons pour la respiration des sulfates. Certaines d'entre elles utilisent également l'hydrogène gazeux comme source d'énergie et ont une croissance autotrophe par fixation du CO_2 . Le processus de réduction des sulfates est aussi appelé sulfato-réduction dissimulatrice pour le distinguer du processus d'assimilation par réduction des sulfates par lequel les plantes, les algues et beaucoup de bactéries aérobies obtiennent le soufre nécessaire à la synthèse d'acides aminés. Le processus de sulfato-réduction dissimulatrice nécessite de grandes quantités de sulfate et se produit dans les vases anoxiques. Certains *Archaea* thermophiles comme *Pyrodictium spp.* respirent le soufre. Le soufre élémentaire est utilisé par la plupart d'entre elles comme accepteur d'électrons, quelques autres utilisent le sulfate.

5.3.3. Transformation abiotique du soufre :

Lorsque les conditions de pH et d'oxydo-réduction sont favorables, plusieurs transformations essentielles dans le cycle du soufre se produisent également par des réactions chimiques normales en l'absence de microorganismes. Un important exemple d'un tel processus abiotique est l'oxydation du sulfure en soufre élémentaire. Ceci se déroule à pH neutre avec une demi-vie d'environ 10 minutes pour le sulfure à température ambiante.

Bibliographie

Branger, A., Richer, M-M., et Roustel, S. 2007. Quelques Systèmes microbiens. Chapitre 7 *In* : Microbiochimie et alimentation. Editions educagri, pp : 131-134.

Drapeau, A. J. et Jankovic S. 1977. Manuel de microbiologie de l'environnement ISBN 92 4 254058 7 © Organisation mondiale de la Sante, pp : 1-4, 234-240.

Piquet J.C., Fillon A., Thomas G. 2011. Caractérisation de la contamination microbiologique d'origine fécale de l'estuaire de la Seudre en période sèche. IFREMER

Esnault C. 2012 Cours de Microbiologie Générale LV342 Cours 4 Microorganismes agents de maladies chez l'homme UPMC Sorbonne universités.

ER Cox (Ed.), (1980) Phytoflagellés, Elsevier, Hollande du Nord, pp. 1 - 4

Frehi Hocine , Alain Couté, Gérard Mascarell, Catherine Perrette Gallet, Mebarek Ayada et Mohamed Hichem Kara. 2007. Dinoflagellés toxiques et/ou responsables de blooms dans la baie d'Annaba (Algérie) Dinoflagellés nuisibles et à marée rouge dans la baie d'Annaba(Algérie).

Leyrat et Vierling, 2007 G., Vierling E. 2007. Microorganismes des aliments chapitre III : *In* Microbiologie et toxicologie des aliments : hygiène et sécurité alimentaires ; Ed. Doin, pp77-78.

Mardigan, M., Martinko, J. 2007. Chapitre 18 et 19 : Partie trois. Diversité métabolique et écologie microbienne. Chapitre 28 : Partie quatre. *In* : Brock Biologie des micro-organismes. 11ème édition, Pearson éducation paris France. pp : 539-678 et 907-915.

Madigan, M. T., Martinko, J. M., Stahl, D.A. and Clark, D. P. 2012. Unit7: Microbial Ecology; Unit 8: Chapter 27: Microbial interactions with humans. *In* Brock Biology of Microorganisms 13th edition, Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings, 1301 Sansome Street, San Francisco, CA, pp: 643-755; 787-815.

Oraison, F., Souchon, Y. et Van Looy, K. 2011. Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ? Pôle hydroécologie des cours d'eau Onema-Cemagref Lyon, Partenariat 2010 Domaine Qualité des masses d'eau Action 24 : Ingénierie de la restauration physique des habitats pp :2-42.

Prescott, Harley, Klein, Wiley, Sherwood et Woolverton. 2010. Partie VIII. Ecologie et symbiose. *In* : Microbiologie. Traduction de la 7ème édition américaine. Editions DeBoeck Université Bruxelles.pp: 643-739.

Prescott, L. M. Harley and Klein. 2002. VIII Ecology and Symbiosis. *In* Microbiology. Fifth edition. The McGraw–Hill Companies, pp: 596-697.

Prescott, Harley et Klein. 1995. Les microorganismes et l'environnement. Dixième partie. *In* : Microbiologie. Second edition. DeBoeck Wesmael S.A. Bruxelles. pp : 804-845.

RABALAIS, N.N. 2010. Eutrophication of Estuarine and Coastal Ecosystems, CHAPTER 5 *In* Environmental Microbiology, edited by Ralph Mitchell and Ji-Dong Gu, Wiley and Sons Publications, pp:115-136.

SEAGREN, E. A. and AYDILEK, A.H. 2010. Biomediated Geomechanical Processes, CHAPTER 14 *In* Environmental Microbiology, edited by Ralph Mitchell and Ji-Dong Gu, Wiley and Sons Publications, pp:319-348.

Tortora, Funke et Case. 2003. L'éco-microbiologie. Chapitre 27. *In* : Introduction à la Microbiologie. Editions du renouveau pédagogique, Québec Canada. pp : 822-847.

Tortora, Funke and Case. 2010. Part four: Structure and Function of the Digestive System And Normal Microbiota of the Digestive System; Part Five Environmental and Applied Microbiology, Chapter 27: Environmental Microbiology. *In* Microbiology an introduction 10th Edition, Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings, 1301 Sansome Street, San Francisco, CA, pp: 706-707; 766-792.

Walker, R. ET Buckley, M. 2006. Microbes probiotiques : Des bases scientifiques. American Academy of Microbiology . 796 P

WEINERT, N., MEINCKE, R. SCHLOTTER, M., BERG, G. SMALLA, K. 2010. Effects of Genetically Modified Plants on Soil Microorganisms CHAPTER 10 *In* Environmental Microbiology, edited by Ralph Mitchell and Ji-Dong Gu, Wiley and Sons Publications, pp: 235-258.

Werquin, M., Leclerc, H., et Vivier E. 1977. Cours Environnement, Micro-organismes, Champignons, algues. Université de Lille 1.