

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf USTO-MB



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département du Vivant et de L'Environnement



Polycopié pédagogique

Ecosystèmes Microbiens Impact – Santé – Environnement

Conférences (cours)

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Niveau : Master 2

Semestre : S3

Volume horaire hebdomadaire : 01h30

Préparé par :

Dr. Benmouna Zahia

Maitre de conférences B

Année Universitaire 2023/2024

Contenu de la matière selon le canevas de mise en conformité :

Intitulé de l'UD : Découverte

Code : UED 1

Intitulé de la matière : Ecosystèmes Microbiens Impact – Santé – Environnement

Crédits : 02

Coefficients : 01

Objectifs de l'enseignement : Présentation des milieux naturels (eaux, sol, air) et leur impact sur l'environnement et la santé humaine. Illustration de la politique environnementale.

Connaissances préalables recommandées : notions générales sur la protection de l'environnement et microbiologie.

Contenu de la matière : Ecosystèmes Microbiens Impact – Santé – Environnement

1- Fonctionnement microbien des écosystèmes eau :

- Présentation générale des milieux aquatiques
- Biodégradation de la matière organique en milieu aquatique : rôle des communautés microbiennes dans l'autoépuration des hydro-systèmes anthropisés.

2- Qualité biologique des sols :

- Ecologie microbienne des sols
- Présentation de la biodiversité microbienne et de son importance stratégique sur les sols cultivables, amélioration de la fixation naturelle de l'azote par la symbiose
- Effet de la pollution sur la biodynamique des sols
- Bioremédiation et phytoremédiation ou traitement biologique des sols et des eaux contaminées par des OGM (plantes et bactéries) spécialisées dans le traitement de certains polluants.

3- Impact environnemental et qualité de l'environnement :

- Éco-toxicologie, impact environnemental et risques
- Contribution des sols et de l'agriculture à la qualité de l'atmosphère
- Impact écologique des inocula microbiens dans l'agro-système
- Dépollution des eaux douces
- Biodégradation des herbicides dans le sol
- Impact des produits polluants sur les micro-organismes

- Réhabilitation par voie biologique des sédiments contaminés après un apport massif d'hydrocarbures

4- Réservoirs microbiens, dissémination et santé publique :

- Qualité de l'eau et peuplements microbiens
- Ecologie des amibes libres pathogènes pour l'homme
- Dissémination aérienne des microorganismes pathogènes
- Ecologie microbienne des aliments, nouveaux pathogènes
- Maladies à prions : risques en santé publique
- Les transferts de gènes chez les bactéries dans les conditions naturelles
- Conséquences écologiques de la résistance aux antibiotiques en agro-alimentaire

Table des matières

| | |
|---|------------|
| Abréviations | i |
| Liste des figures | ii |
| Liste des tableaux | iii |
| | |
| Introduction générale | 1 |
| | |
| Chapitre 1 : Fonctionnement microbien des écosystèmes eau | |
| 1.1 Présentation générale des milieux aquatiques | 3 |
| 1.1.1 Les milieux marins | 3 |
| 1.1.2 Les milieux d'eaux douces | 4 |
| 1.1.2.1 Les lacs | 4 |
| 1.1.2.2 Les rivières et les fleuves | 6 |
| 1.1.2.3 Les eaux souterraines (nappes phréatiques) | 7 |
| 1.2 Les milieux aquatiques et les micro-organismes | 8 |
| 1.3 Les gaz et les microorganismes aquatiques | 10 |
| 1.4 Pollution des écosystèmes aquatiques | 11 |
| 1.5 Fonctionnement microbien des écosystèmes aquatiques | 12 |
| 1.5.1 Les nutriments dans les milieux aquatiques | 14 |
| 1.5.2 Les cycles des nutriments dans les milieux aquatiques | 14 |
| 1.5.3 La boucle microbienne | 15 |
| 1.5.3.1 Explications | 16 |
| 1.5.3.2 Le Rôle | 17 |
| 1.5.3.3 Le fonctionnement | 17 |
| 1.5.4 Communautés microbiennes | 17 |
| 1.6 Effets du changement climatique sur les boucles microbiennes | 18 |
| 1.7 Biodégradation de la matière organique en milieu aquatique | 19 |
| 1.7.1 Généralité sur la matière organique dans un milieu aquatique | 19 |
| 1.7.2 Origine de la matière organique | 19 |
| 1.7.3 Classification de la matière organique | 20 |
| 1.7.3.1 Matière organique naturelle | 20 |
| 1.7.3.2 Matière organique anthropique | 20 |
| 1.7.4 Composition de la matière organique | 21 |
| 1.7.4.1 Carbone organique | 21 |
| 1.7.4.2 L'azote organique | 22 |
| 1.7.4.3 Le phosphore organique | 22 |
| 1.8 Rôle des communautés microbiennes dans l'autoépuration des hydro-systèmes anthropisés | 22 |
| 1.8.1 Définition | 22 |
| 1.8.2 Mécanisme de l'autoépuration | 23 |
| 1.8.3 Mécanisme de la nutrition bactérienne | 24 |
| 1.9 Eutrophisation | 26 |

Chapitre 2 : Qualité biologique des sols

| | |
|---|----|
| 2.1 Introduction | 28 |
| 2.2 Le sol et ses composants | 28 |
| 2.2.1 L'eau et l'air | 29 |
| 2.2.2 La diffusion des gaz | 29 |
| 2.2.3 Ecologie microbienne des sols | 30 |
| 2.3 Présentation de la biodiversité microbienne et de son importance | 31 |
| 2.3.1 Les bactéries | 32 |
| 2.3.2 Les champignons | 33 |
| 2.3.3 Importance de la biodiversité microbienne dans l'amélioration de la fixation naturelle de l'azote par la symbiose | 33 |
| 2.4 Effet de la pollution sur la biodynamique des sols | 34 |
| 2.4.1 La pollution par les pesticides | 35 |
| 2.4.2 La pollution par les métaux lourds | 36 |
| 2.4.3 La pollution par les radionucléides | 36 |
| 2.5 Bioremédiation et phytoremédiation | 36 |
| 2.5.1 Bioremédiation en utilisant des bactéries | 38 |
| 2.5.2 Phytoremédiation | 39 |
| 2.5.3 Réduire la toxicité des polluants | 39 |
| 2.5.4 Exemples d'OGM utilisés en bioremédiation et phytoremédiation | 40 |

Chapitre 3 : Impact environnemental et qualité de l'environnement

| | |
|--|----|
| 3.1 Introduction | 41 |
| 3.2 Éco-toxicologie, impact environnemental et risques | 41 |
| 3.2.1 Les principaux impacts environnementaux | 42 |
| 3.2.2 Les principaux risques environnementaux | 42 |
| 3.3 Contribution des sols et de l'agriculture à la qualité de l'atmosphère | 43 |
| 3.4 Les sols et l'agriculture comme sources de carbone et de polluants | 45 |
| 3.5 Mesures pour réduire les émissions agricoles de polluants atmosphériques | 45 |
| 3.6 Impact écologique des inocula microbiens dans l'agro-système | 45 |
| 3.7 Dépollution des eaux douces | 47 |
| 3.7.1 Définition de la pollution | 47 |
| 3.7.2 Les sources de la pollution de l'eau | 48 |
| 3.8 La dépollution | 48 |
| 3.8.1 Phytorestauration : un mécanisme de dépollution de l'eau | 49 |
| 3.8.2 Dépollution des eaux usées contaminées par des métaux lourds | 50 |
| 3.8.3 Biodégradation des herbicides dans le sol | 51 |
| 3.8.3.1 Définition des herbicides | 51 |
| 3.8.3.2 Classification des herbicides | 51 |
| 3.8.3.3 Les facteurs influençant la biodégradation des herbicides | 52 |
| 3.9 Impact des produits polluants sur les micro-organismes | 53 |
| 3.9.1 Adaptation à la biodégradation des pesticides | 54 |
| 3.10 Réhabilitation par voie biologique des sédiments contaminés après un apport | |

| | |
|---|----|
| massif d'hydrocarbures | 55 |
| 3.10.1 Le devenir des hydrocarbures | 55 |
| 3.10.2 Procédure de réhabilitation | 56 |
| 3.10.3 Avantages et limites de la biodégradation | 57 |
| Chapitre 4 : Réservoirs microbiens, dissémination et santé publique | |
| 4.1 Introduction | 58 |
| 4.2 Qualité de l'eau et peuplements microbiens | 59 |
| 4.2.1 L'eau potable et normes | 60 |
| 4.3 Ecologie des amibes libres pathogènes pour l'homme | 61 |
| 4.3.1 Association Amibes avec d'autres microorganismes | 62 |
| 4.3.2 Ecologie de <i>Naegleria fowleri</i> | 63 |
| 4.3.3 Le pouvoir pathogène de <i>Naegleria fowleri</i> | 63 |
| 4.4 Dissémination aérienne des microorganismes pathogènes | 65 |
| 4.4.1 La flore microbienne de l'air | 65 |
| 4.4.2 Le transport aérien des particules micro-organismes | 65 |
| 4.4.3 Les sources de la contamination | 66 |
| 4.5 Ecologie microbienne des aliments, nouveaux pathogènes | 67 |
| 4.5.1 Types d'intoxications alimentaires bactériennes et leurs mécanismes associés | 67 |
| 4.5.1.1 Les maladies infectieuses d'origine alimentaire | 68 |
| 4.5.1.2 Les intoxications | 69 |
| 4.5.2 Les réservoirs de contamination des aliments | 70 |
| 4.6 Maladies à prions : risques en santé publique | 72 |
| 4.6.1 Définitions | 72 |
| 4.6.2 Santé publique | 73 |
| 4.7 Les transferts de gènes chez les bactéries dans les conditions naturelles | 74 |
| 4.7.1 Conséquences écologiques de la résistance aux antibiotiques dans l'agroalimentaire | 75 |
| 4.7.2 Conséquences écologiques de la résistance aux antibiotiques dans l'environnement | 76 |
| 4.7.3 Exemple de conséquence d'utilisation de la céphalosporine de 3 ^{ième} génération | 78 |
| Références | 80 |

Abréviations

ATNC : agent transmissible non conventionnel
BFA : bactéries fixatrices d'azote
BGN : bacilles à gram négatif
BLSE : β -lactamases à spectre étendu
C3G : céphalosporines de troisième génération
COD : carbone organique dissous
COP : carbone organique particulaire
COV : composés organiques volatils
CRI : circuits de refroidissement industriels
ESB : encéphalopathie spongiforme bovine
ESST : encéphalopathies spongiformes subaiguës transmissibles
ETM : éléments trace métallique
FBA : fixation biologique de l'azote
MO : matière organique
MOD : matière organique dissoute
MOP : matière organique particulaire
NOD : azote organique dissous
OGM : organismes génétiquement modifiés
POD : phosphore organique dissous
PRIONS : proteinaceous infectious particles
SDP : substances dérivées du pétrole
SE : *Staphylococcus* Enterotoxin
SEI : *Staphylococcus* Enterotoxin-like

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1. Présentation générale des milieux aquatiques. | 3 |
| Figure 2. Les lacs oligotrophes (a) et eutrophes (b). | 5 |
| Figure 3. Sources de matières organiques pour les lacs et les rivières. | 7 |
| Figure 4. Système de traitement domestique par fosse septique. | 8 |
| Figure 5. Le rôle vital des microorganismes dans les écosystèmes. | 13 |
| Figure 6. Le cycle de la matière organique. | 15 |
| Figure 7. La boucle microbienne. | 15 |
| Figure 8. Le fonctionnement de la boucle microbienne. | 16 |
| Figure 9. Origine et devenir de la matière organique anthropique. | 21 |
| Figure 10. Représentation du mécanisme d'autoépuration. | 23 |
| Figure 11. Schéma de principe de la nutrition bactérienne. | 24 |
| Figure 12. La nitrification et la dénitrification par les microorganismes. | 25 |
| Figure 13. Représentation de la lithosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère. | 28 |
| Figure 14. Proportion des principaux composants du sol en volume. | 29 |
| Figure 15. Formation d'un nodule de racine dans une légumineuse infectée par <i>Rhizobium</i> . | 34 |
| Figure 16. Les microorganismes utilisés dans la bioremédiation. | 37 |
| Figure 17. Illustration des liens entre les polluants atmosphériques et les impacts sur la santé humaine, sur les écosystèmes et le climat. | 44 |
| Figure 18. Des filtres plantés de Roseaux « Phragmifiltre ». | 49 |
| Figure 19. Classification des herbicides. | 52 |
| Figure 20. Représentation schématique du cycle de <i>Naegleria fowleri</i> . | 63 |
| Figure 21. Cycle biologique complet de <i>Naegleria fowleri</i> . | 64 |
| Figure 22. Les différents types d'infections bactériennes alimentaires. | 69 |
| Figure 23. Mécanismes inter et intracellulaires impliqués dans les transferts horizontaux de gènes. | 74 |
| Figure 24. Diffusion de la résistance bactérienne dans l'environnement. | 77 |
| Figure 25. Conséquence d'une surutilisation de la céphalosporine de 3 ^{ième} génération. | 78 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1. Classification selon le critère de taille des virus et microorganismes planctoniques. | 10 |
| Tableau 2. Groupes communs de microorganismes présents dans le sol. | 32 |
| Tableau 3. Mécanismes de fixation des métaux par les bactéries. | 50 |
| Tableau 4. Normes OMS et algériennes des paramètres physico-chimique pour l'eau potable. | 60 |
| Tableau 5. Normes OMS des paramètres bactériologiques pour l'eau potable. | 61 |
| Tableau 6. Antibiotiques utilisés dans le secteur agro-alimentaire. | 76 |

Introduction générale

L'étude des microorganismes de l'environnement, leur rôle dans le fonctionnement des écosystèmes, leur impact en santé humaine et leur potentiel de valorisation biotechnologique est plus que jamais d'actualité. Les avancées technologiques récentes offrent aujourd'hui la possibilité d'aborder l'étude de ces microorganismes de manière très fine et ouvre le champ à de nouvelles investigations et à des applications industrielles. La valorisation des microorganismes dans l'industrie, les écotechnologies, l'évaluation du risque sanitaire dans l'environnement en général et dans les milieux aquatiques en particulier, le diagnostic environnemental, l'analyse de l'anthropisation des milieux ...

Les micro-organismes détiennent une place importante dans tous les écosystèmes sur terre. Ils y occupent des fonctions primordiales telles que la dégradation et la minéralisation de la matière organique, évitant l'accumulation de molécules récalcitrantes difficiles à décomposer comme la cellulose. Ils participent ainsi activement en tant que principaux acteurs des grands cycles biogéochimiques tels celui du carbone, de l'azote, du phosphore, du soufre... Ils occupent naturellement une place importante dans le secteur de l'agriculture où leurs actions conditionnent la fertilité et le bon fonctionnement des sols, améliorent la croissance des plantes cultivées et permettent de contrôler certains ravageurs. On les retrouve également chez les animaux et l'Homme, au travers de la peau et du tube digestif où ils vont jouer un rôle important de barrière ou de « défense naturelle » contre d'éventuels congénères dangereux mais aussi participer à la digestion de certains aliments que nous serions bien incapables d'assimiler sans eux.

Ils sont également responsables de bon nombre de maladies infectieuses bénignes et graves, touchant aussi bien l'homme directement, ou indirectement via les animaux domestiques et d'élevage.

Outre leur importance indéniable au sein des différents écosystèmes, les micro-organismes sont également utilisés pour leurs propriétés à des fins industrielles ou environnementales. Ainsi, les micro-organismes sont impliqués dans l'industrie agro-alimentaire et notamment dans la fabrication des produits issus de la fermentation tels que le vin, la bière, le fromage et le cacao. On les emploie aussi indirectement dans les secteurs de la pharmacie et du cosmétique, où les molécules qu'ils produisent sont utilisées dans les procédés de fabrication de médicaments ou autres formulations. Certains micro-organismes sont même utilisés directement en tant que médicaments connus sous le nom de probiotiques. Du point de vue environnemental, les micro-organismes sont utilisés dans un procédé que l'on nomme bio-

remédiation, qui consiste à bénéficier de leurs capacités afin de résoudre des problèmes de pollutions sur des sites contaminés. Ils peuvent ainsi participer à la transformation et à la dégradation de produits dangereux et rémanents tels que les pesticides et les hydrocarbures, qui peuvent contaminer les sols et les cours d'eau.

Le présent manuscrit est destiné aux étudiants de 2^{ème} année master de spécialité microbiologie appliquée, il est constitué de quatre chapitres. Le premier chapitre développe la description du plus important écosystème microbien qui est celui de l'environnement marin ainsi que son fonctionnement et le rôle de leurs microorganismes dans la biodégradation de la matière organique et dans l'auto-épuration des eaux souterraines. Le deuxième chapitre concerne l'écosystème microbien terrestre, et le rôle de leurs microorganismes dans la fertilisation et la dépollution du sol. Le troisième chapitre décrit l'impact environnemental et la qualité de l'environnement. Le terme éco-toxicologie et les effets des polluants sur l'environnement sont aussi discutés dans ce chapitre. Enfin, le dernier chapitre englobe les réservoirs microbiens, la dissémination et la santé publique, dans lequel des écosystèmes microbiens jouant le rôle de réservoirs de bactéries pathogènes ont été développés.

1.1 Présentation générale des milieux aquatiques

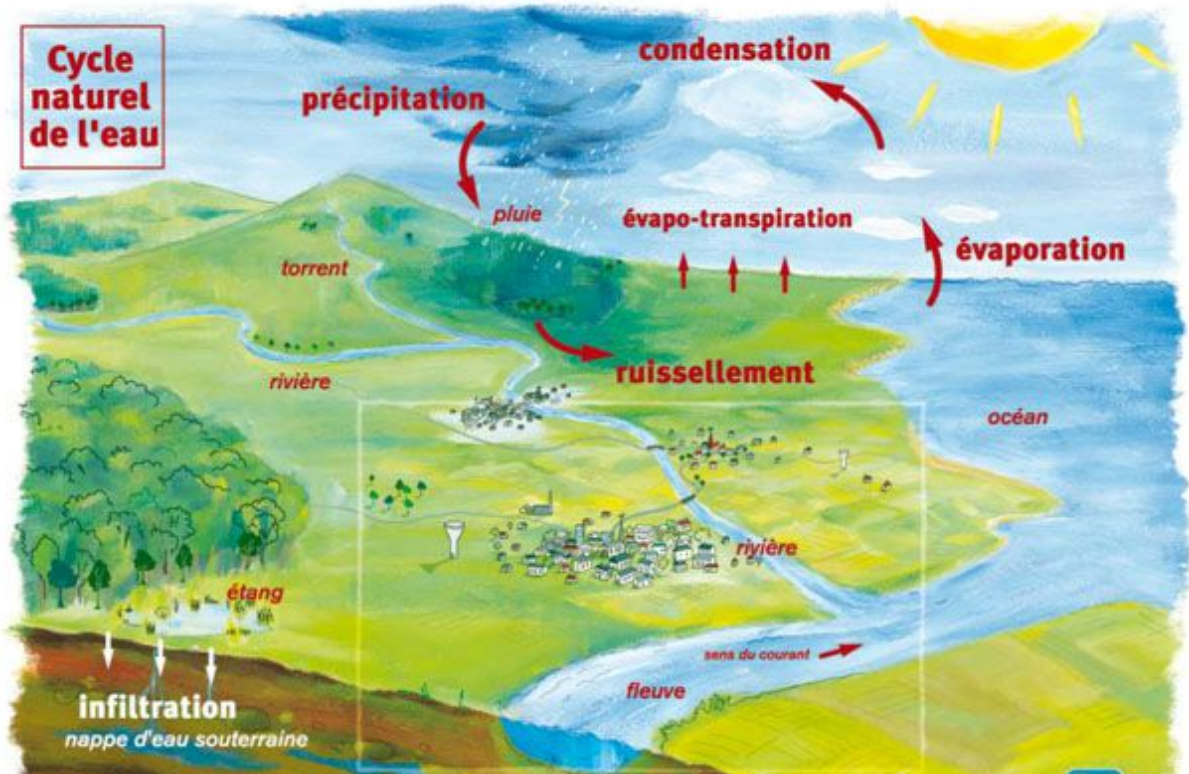


Figure 1. Présentation générale des milieux aquatiques.

1.1.1 Les milieux marins

Les mers et les océans représentent 97% de la totalité des eaux terrestres. Le phytoplancton microscopique et les bactéries associées créent un réseau alimentaire complexe qui peut s'étendre sur de grandes distances et à des profondeurs extrêmes.

L'environnement marin semble tellement vaste qu'il ne peut être affecté par la pollution; néanmoins dans les zones côtières, les activités humaines perturbent de plus en plus fortement les processus microbiens et détériorent la qualité de l'eau.

La grande partie est en haute mer, à une profondeur supérieure à 1000 mètres, l'océan atteint, à sa grande profondeur, un peu plus de 11000 mètres. La pression dans le milieu marin augmente d'environ 1 atmosphère tous les 10 mètres et elle atteint des valeurs proches de 1000 atmosphères aux plus grandes profondeurs.

Certaines bactéries sont barotolérantes et se multiplient entre 0 et 400 atmosphères, d'autres bactéries sont barophiles et préfèrent de plus hautes pressions. Les barophiles modérées ont un

optimum de croissance à 400 atmosphères, alors que les barophiles extrêmes ne se multiplient qu'aux pressions élevées.

1.1.2 Les milieux d'eaux douces

Les eaux douces représentent une petite partie des eaux terrestres et sont extrêmement importantes comme sources d'eau potable. La contamination des eaux de surfaces et souterraines par des déchets domestiques et industriels est à l'origine de problèmes environnementaux en de nombreux endroits.

La plupart des eaux douces qui ne sont pas immobilisées dans les calottes glaciaires, les glaciers ou les eaux souterraines se trouvent dans les lacs et les fleuves. Ceux-ci offrent des milieux microbiens qui diffèrent à bien des égards des systèmes océaniques plus grands. Par exemple, dans les lacs, le mélange et l'échange des eaux peuvent être limités. Il se crée ainsi des gradients verticaux sur des distances beaucoup plus courtes. L'écoulement de l'eau dans les lits des fleuves y produit des changements dans l'espace et/ou dans le temps.

1.1.2.1 Les lacs

Ils varient sur le plan nutritif. Certains lacs sont oligotrophes ou pauvres en éléments nutritifs, d'autres sont eutrophes ou riches en substances nutritifs (**figure 2**). Les lacs oligotrophes restent aérobies pendant toute l'année et les changements de température saisonniers ne provoquent pas de stratification distincte. Au contraire, les lacs eutrophes ont habituellement des sédiments chargés de matières organiques (MO). Dans les lacs ayant une stratification thermique, l'épilimnion (couche supérieure chaude) est aérobie, alors que l'hypolimnion (couche inférieure plus froide et plus profonde) est souvent anaérobie. Ces deux couches sont séparées par une zone de décroissance brutale de température appelée thermocline qui limite fortement le mélange des eaux.

Dans certaines conditions climatiques, l'eau surface aérobie et l'eau profonde anaérobie se permutent en raison de différences de température et de gravité spécifique. Après formation du mélange, les bactéries et les algues mobiles migrent dans la colonne d'eau pour retrouver l'environnement approprié.

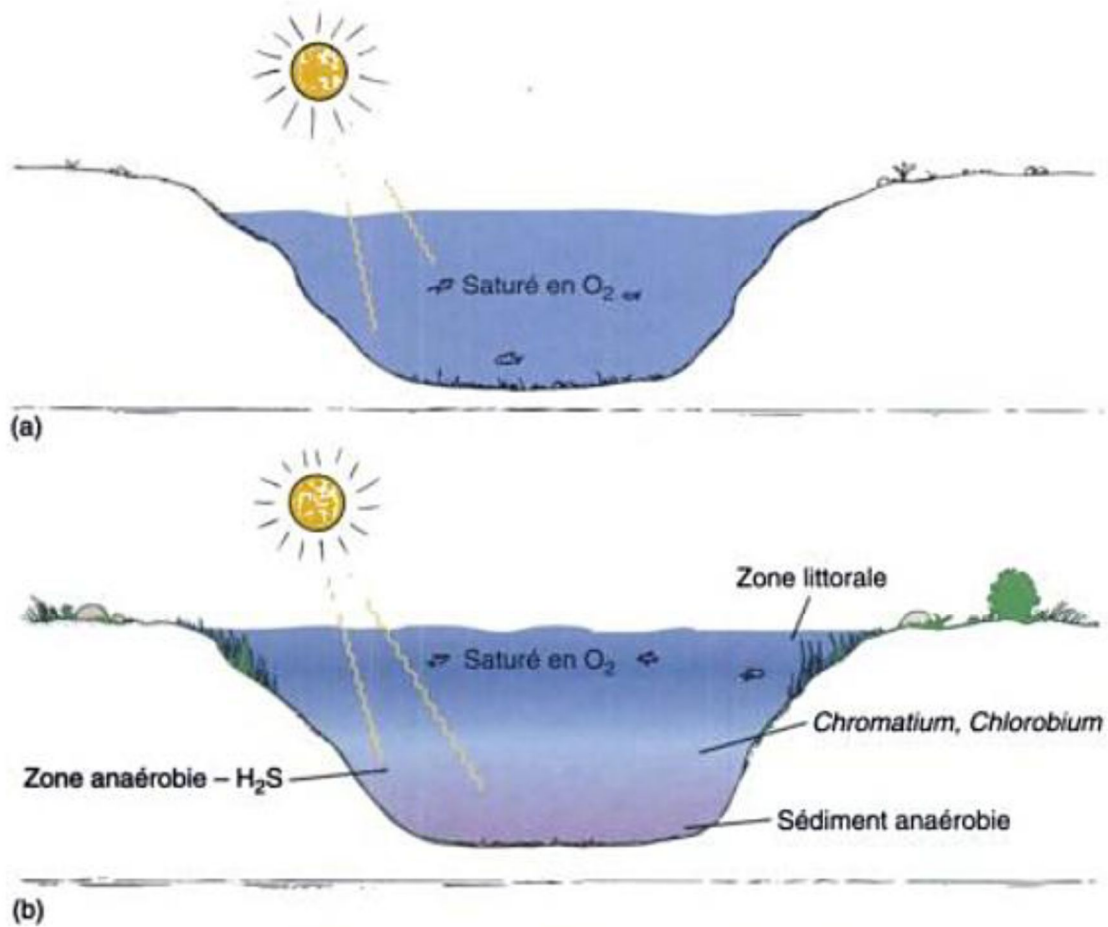


Figure 2. Les lacs oligotrophes (a) et eutrophes (b).

Les lacs peuvent avoir différentes concentrations en éléments nutritifs, allant des systèmes pauvres jusqu'aux systèmes très riches. Ce schéma compare (a) un lac oligotrophe saturé en oxygène et doté d'une population microbienne réduite avec (b) un lac eutrophe. Le lac eutrophe possède une couche sédimentaire et peut avoir un hypolimnion anaérobie. Des microorganismes photosynthétiques sulfureux se multiplient dans cette région anaérobie.

- **Les microorganismes des lacs**

L'eutrophisation des lacs stimule la croissance des plantes, des algues et des bactéries. Comme l'azote et le phosphore limitent fréquemment la croissance microbienne dans les habitats d'eaux douces, l'addition de composés azotés et phosphorés a un impact particulièrement important sur ces systèmes.

Les cyanobactéries jouent un rôle principal dans l'accumulation d'éléments nutritifs, en cas d'apport de phosphore dans une eau douce oligotrophe, même en l'absence d'azote supplémentaire. Plusieurs genres, notamment *Anabaena*, *Nostoc* et *Clindrospermum* fixent l'azote supplémentaire. Le genre *Oscillatoria*, qui utilise le sulfure d'hydrogène comme

donneur d'électrons pour la photosynthèse, peut fixer l'azote dans des conditions anaérobies. Même en présence d'azote et de phosphore, les cyanobactéries concurrencent les algues. Les cyanobactéries se développent plus efficacement dans des conditions élevées de pH (8,5 à 9,5) et de température (30 à 35 °C). Les algues eucaryotes, en comparaison, préfèrent généralement un pH neutre et ont des températures optimales plus faibles. En métabolisant plus rapidement le CO₂, les cyanobactéries augmentent également le pH, rendant l'environnement moins adapté aux algues eucaryotes.

Les cyanobactéries ont des avantages compétitifs supplémentaires. Beaucoup produisent des hydroxamates qui fixent le fer et rendent cet oligoélément important moins disponible pour les algues eucaryotes. Souvent, les cyanobactéries résistent aussi à la prédation parce qu'elles produisent des toxines. De plus, certaines synthétisent des composés odorants affectant la qualité de l'eau de consommation.

Les cyanobactéries et les algues forment parfois des gigantesques fleurs d'eau sur les lacs fortement eutrophisés. Ce problème peut subsister pendant de nombreuses années, jusqu'à l'élimination de l'excès d'éléments nutritifs par le flux normal de l'eau à travers le lac, ou par précipitation des substances nutritives dans les sédiments. La gestion des lacs peut améliorer la situation, en retirant ou en fixant les sédiments lacustres ou encore en ajoutant des agents coagulants pour accélérer la sédimentation.

1.1.2.2 Les rivières et les fleuves

Elles présentent une situation différente de celle des lacs, du fait qu'il y a un mouvement d'eau horizontal suffisant pour minimiser la stratification verticale et qu'en outre, la majeure partie de la biomasse microbienne fonctionnelle y est fixée sur des surfaces. Il n'y a que dans les fleuves les plus grands qu'une portion relativement plus importante de la biomasse microbienne est en suspension dans l'eau. Selon la taille du cours d'eau, la source des substances nutritives varie. Elles peuvent provenir d'une production interne due aux microorganismes photosynthétiques, mais les éléments nutritifs peuvent également être externes comme, par exemple, les sédiments dus aux ruissellements des rives ou aux feuilles et autres MO tombant directement dans l'eau. Les microorganismes chimioorganotrophes métabolisent la MO disponible et fournissent une énergie de base à l'écosystème. Dans la plupart des conditions, les quantités de MO ajoutées aux rivières n'excèdent pas la capacité oxydative du système, ce qui permet de conserver le charme et la productivité des cours d'eau (**figure 3**).

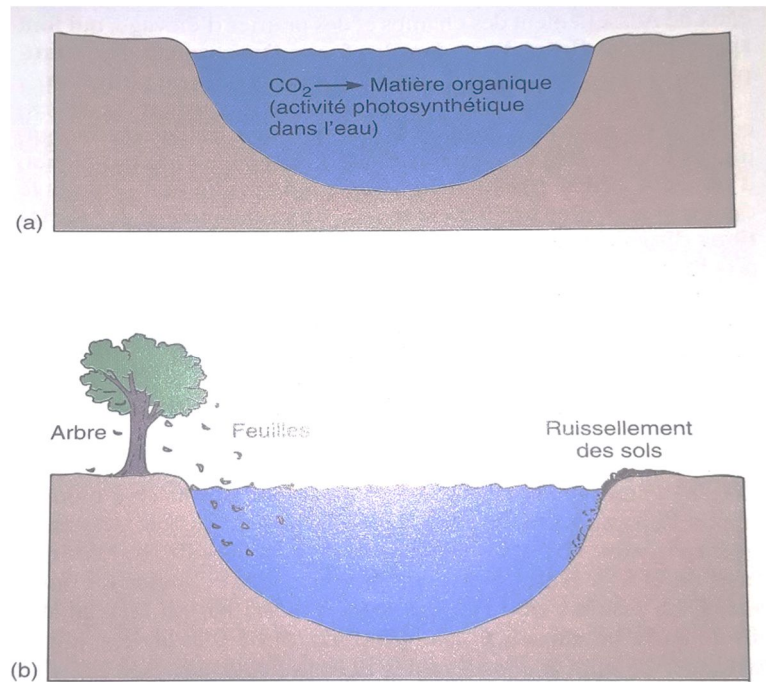


Figure 3. Sources de matières organiques pour les lacs et les rivières.

La MO utilisée par les microorganismes dans les lacs et les rivières peut être synthétisée dans l'eau ou y ajoutée. (a) source de MO internes au cours d'eau principalement par la photosynthèse (b) source de MO externes.

1.1.2.3 Les eaux souterraines (nappes phréatiques)

L'eau contenue dans les lits de gravier et les roches fracturées sous la surface du sol est une ressource d'eau amplement utilisée mais souvent sous-estimée. Elle fournit l'eau potable dans les régions rurales et suburbaines dépourvues de système de distribution d'eau.

L'élimination des microorganismes et de la MO se déroule pendant le passage souterrain de l'eau, par adsorption et par piégeage sur le sable fin, sur les argiles et sur la MO. Les microorganismes associés à ces MO (comprenant des prédateurs comme les protozoaires) peuvent utiliser l'agent pathogène capturé comme nourriture. Il en résulte une eau purifiée dont la charge microbienne est réduite (**figure 4**).

Les systèmes d'épuration domestiques combinent ces processus d'adsorption et de prédation biologique.

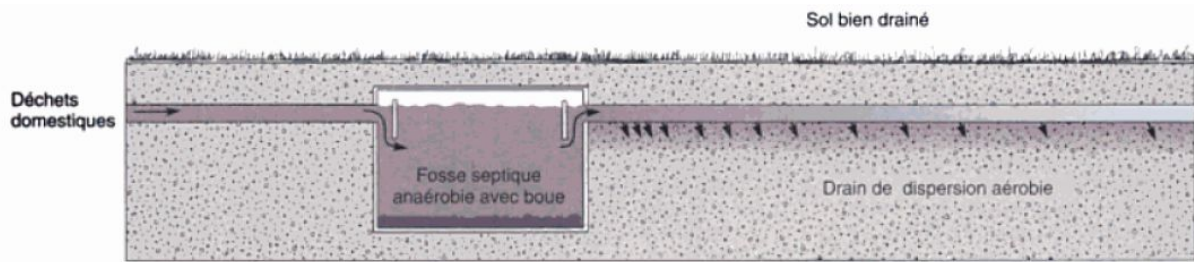


Figure 4. Système de traitement domestique par fosse septique.

Ce système combine une unité anaérobie de liquéfaction des déchets (la fosse septique) avec un drain de dispersion aérobie. L'oxydation biologique des déchets liquéfiés se déroule dans le drain de dispersion sauf si le sol est inondé.

Les fosses septiques conventionnelles comportent une étape de liquéfaction anaérobie qui se déroule dans la fosse septique elle-même. Cette étape est suivie par une adsorption de MO et un piégeage des microorganismes dans le milieu aérobie du terrain de dispersion où une oxydation biologique se produit.

Dans certains cas, la fosse septique ne fonctionne pas correctement pour plusieurs raisons.

- Si le temps de rétention des déchets dans la fosse septique est trop court. Il diminue lorsque le flux est trop rapide ou que l'accumulation de la boue est excessive dans la fosse. Des solides non digérés vont vers le drain de dispersion et le colmatent progressivement. Si le drain est inondé, il devient anaérobie, il n'y a plus d'oxydation biologique, ni traitement efficace.
- S'il n'y a pas de sol convenable et si la décharge de la fosse septique s'écoule trop rapidement vers les couches plus profondes, il peut aussi y avoir des problèmes. Les roches fracturées et les gros graviers ont une faible efficacité d'adsorption ou de filtration, ce qui entraînera une contamination de l'eau de puits par des pathogènes et la transmission de maladie. De plus, le phosphore des déchets ne sera pas retenu efficacement et polluera la nappe phréatique. Cela provoque souvent une eutrophisation des étangs, des lacs et des rivières lorsque les eaux souterraines entrent dans ces milieux aquatiques sensibles. Les eaux souterraines peuvent être contaminées par des polluants exogènes, par l'épandage des boues d'épuration, le déversement illégal du contenu des fosses septiques, l'élimination inappropriée de déchets toxiques et le ruissellement des terrains agricoles contribuent à la contamination des nappes par des substances chimiques et des microorganismes.
- Enfin, le nombre des polluants atteignant le milieu souterrain affectera la qualité des nappes phréatiques et plusieurs recherches visent à traiter sur place les nappes phréatiques, c'est ce qu'on appelle traitement *in situ*.

1.2 Les milieux aquatiques et les micro-organismes

Un facteur important dans les milieux aquatiques est le mouvement des matériaux, qu'ils soient gazeux, solides ou dissous. Les changements de concentration de ces éléments font partie du monde aquatique des microorganismes.

Le mélange et le mouvement des éléments nutritifs, de l'oxygène et des déchets qui se produisent dans les milieux d'eaux douces et marins, sont les facteurs dominants contrôlant la communauté microbienne. La MO de la surface peut, par exemple, couler à de grandes profondeurs dans les lacs ou les océans créant des zones riches en éléments nutritifs où il y a décomposition. Les gaz et les déchets solubles produits par les MO dans ces zones marines profondes peuvent se déplacer vers des eaux moins profondes et stimuler l'activité d'autres groupes microbiens. Des processus similaires se produisent à plus petite échelle dans les lacs riches en éléments nutritifs, dans les biofilms et dans les tapis microbiens où il se forme des gradients sur une échelle de quelques micromètres.

Les milieux aquatiques présentent des superficies et des volumes très divers. On les trouve dans des endroits aussi différents que le corps humain, les boissons, et dans les lieux les plus évidents: les fleuves, les lacs et les océans. En font aussi partie, les zones saturées en eau, de matières que nous considérons habituellement comme des sols. Ces milieux peuvent aller de l'alcalinité à l'acidité extrême. Les températures auxquelles les microorganismes se développent dans les milieux aquatiques, s'échelonnent de -5 à -15°C vers le bas, jusqu'à 113°C au moins dans les régions géothermiques. Certains microorganismes les plus mystérieux ont été mis au jour lors d'études de milieux à température élevée, comme la découverte de *Thermus aquaticus*, source de la Taq polymérase. Des microorganismes hyperthermophiles, dont *Pyrolobus fumarii*, ont aussi été isolés à partir des fontaines hydrothermales des profondeurs marines.

Un des buts des microbiologistes est d'isoler et de cultiver des microorganismes marins particuliers, spécialement à la recherche de nouveaux producteurs d'antibiotiques. On dispose aujourd'hui de nouvelles techniques pour récolter des microorganismes sans changement de température ou de pression.

L'importance quantitative et fonctionnelle des microorganismes dans les réseaux trophiques est considérée sérieusement cette dernière décennie. Depuis 1926, des chercheurs se sont référés aux microorganismes comme une composante importante du fonctionnement général des océans, faisant référence, aux protozoaires et à leurs rôles dans les flux de matière et d'énergie et dans les cycles biogéochimiques. Auparavant, ils considéraient la structure du réseau trophique comme étant constituée de trois niveaux: la production de MO par le phytoplancton, sa consommation (broutage) par le zooplancton (métazoaire) et la prédation de celui-ci par les poissons.

Cette vision simplifiée du réseau trophique aquatique résultait de méthodes d'échantillonnage, de conservation et surtout d'observation, étaient adaptées aux organismes

planctoniques mais n'étaient pas appropriées pour les microorganismes. Rappelant que les organismes planctoniques sont subdivisés en plusieurs classes de taille (**tableau 1**): femto (0.02 - 0.2 μm), pico (0.2 - 2 μm), nano (2 - 20 μm), micro (20 - 200 μm), méso (0.2 - 20 mm), macro (2 - 20 cm) et méga (20 - 200 cm).

Tableau 1. Classification selon le critère de taille des virus et microorganismes planctoniques.

| Catégories | Classes de taille | Virus et Microorganismes |
|---------------|------------------------|---|
| Femtoplankton | 0,02-0,2 μm | Virus (la plupart), archaea et bactéries de petite taille |
| Picoplankton | 0,2-2 μm | Virus de grande taille, archées et bactéries (la plupart), cyanobactéries, eucaryotes de petite taille auto- et hétérotrophes |
| Nanoplankton | 2-20 μm | Flagellés hétérotrophes, autotrophes et mixotrophes, ciliés de petite taille, amibes nues de petite taille, zoospores et filaments de fungi |
| Microplankton | 20-200 μm | Ciliés (la plupart), amibes (la plupart), autres Sarcodines (Foraminifères, héliozoaires), dinoflagellés, eucaryotes unicellulaires pigmentés (Desmidiées, Diatomées, etc.) |
| Mesoplankton | 0,2-20 mm | Cyanobactéries filamenteuses |

Par la suite, des travaux ont montré le rôle majeur du pico- et nanoplankton dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques et ont abouti au développement d'une nouvelle conception de l'écologie microbienne aquatique, dont un des champs d'étude est le réseau trophique microbien.

La structure du réseau microbien dépend, d'une part, du type de milieux, et, d'autre part, des forçages environnementaux qui s'exercent sur ces milieux.

1.3 Les gaz et les microorganismes aquatiques

Les milieux aquatiques sont des milieux à faible diffusion d'oxygène. Non seulement l'oxygène diffuse lentement dans les eaux mais sa solubilité est encore diminuée par les hautes températures et les basses pressions. A cause de cette faible solubilité et la diffusion, l'oxygène peut être consommé plus vite qu'il est fourni par les microorganismes aérobies. Ce qui engendre des zones hypoxiques ou anoxiques. Ces zones permettent la croissance des microorganismes anaérobies.

Le second gaz important dans l'eau, le CO₂, joue de nombreux rôles déterminants dans les processus chimiques et biologiques. L'équilibre anhydride carbonique-bicarbonate-carbonate peut contrôler le pH dans les eaux faiblement tamponnées, ou bien il est contrôlé par le pH des eaux fortement tamponnées.

Il y a encore d'autres gaz importants, comme l'azote qui est utilisé par les fixateurs d'azotes, l'hydrogène, qui est à la fois un déchet et un substrat vital, et le méthane. Ces gaz ont des solubilités différentes dans l'eau, le méthane étant le moins soluble. Il constitue un exemple de déchet microbien idéal: produit dans des conditions d'anaérobiose, il quitte l'environnement du microorganisme en diffusant à travers les couches d'eau pour rejoindre l'atmosphère. Ceci résout le problème de l'accumulation d'un déchet toxique engendrant ainsi la formation de grandes quantités de produits métaboliques microbiens, comme les acides organiques et les ions d'ammonium.

1.4 Pollution des écosystèmes aquatiques

L'augmentation des populations humaines et le développement urbain le long des zones côtières dans le monde entier, mettent à l'épreuve la capacité apparemment inépuisable des océans d'absorber et de transformer les polluants. Les eaux côtières peu mélangées avec les eaux océaniques montrent des signes d'enrichissement en éléments nutritifs et de pollution microbienne.

La contamination des mollusques et des crustacés par les eaux de ruissellement des régions côtières urbanisées, en est un exemple. Auparavant, les mollusques et les crustacés sont récoltés immédiatement après d'importantes pluies, actuellement, les pêcheurs doivent attendre au moins une semaine pour éliminer les microorganismes polluants.

Un autre problème relatif aux eaux océaniques et au mélange des eaux dans les régions côtières est l'apparition des marées rouges. Elles ont des répercussions économiques importantes lorsqu'on ne peut récolter ni consommer les mollusques et les crustacés.

La capacité qu'ont les cours d'eau et les rivières de transformer cette MO ajoutée est cependant limitée. En présence d'un excès de MO, l'eau devient anaérobie. C'est particulièrement le cas dans les régions urbaines et agricoles irriguées par des cours d'eau. Le rejet de déchets et d'autres produits urbains, inadéquatement traités, en un site spécifique le long d'une rivière ou d'un cours d'eau constitue une source ponctuelle de pollution. Ces ajouts de MO d'une source ponctuelle engendrent des modifications nettes et prévisibles de la communauté microbienne et de l'oxygène disponible, ils entraînent un affaissement de la courbe de l'oxygène dissous. Les eaux de ruissellement des champs et des prairies d'élevage,

qui font apparaître des fleurs d'eau dans les écosystèmes aquatiques eutrophisés, sont des exemples de sources généralisées de pollution.

Lorsque la quantité de MO ajoutée n'est pas excessive, les algues se développent en utilisant les dérivés inorganiques libérés de la MO. Ceci conduit à la production d'oxygène pendant la journée, alors que la respiration se déroule durant la nuit, plus bas dans la rivière en suscitant ainsi des variations diurnes en oxygène. Finalement, la quantité d'oxygène approche la saturation, complétant le processus d'autoépuration.

Ajoutés aux stress dus à l'ajout de nutriments, l'élimination du silicium des fleuves par la construction de barrages et le piégeage des sédiments entraînent des perturbations écologiques graves. Par exemple, la construction du barrage des « portes de fer » sur le Danube (à 1000 km de la Mer Noire) a fait chuter la concentration en silicium au 1/60 de sa valeur. Ceci inhibe la croissance des diatomées parce que le rapport silicium/nitrate s'en trouve modifié (le silicium est nécessaire pour la formation de la frustule des diatomées). A cause de ce changement dans leurs ressources, les diatomées de la Mer Noire n'arrivent plus à croître et à fixer les nutriments. Le résultat en a été une augmentation des teneurs en nitrate et un développement massif des algues toxiques. Le délicat équilibre des fleuves peut donc être altéré de façon inattendue par les barrages, conduisant à des effets sur les processus microbiologiques aquatiques et sur les écosystèmes entiers.

1.5 Fonctionnement microbien des écosystèmes aquatiques

Les microorganismes contribuent au fonctionnement des écosystèmes en général, en interagissant entre eux et avec d'autres organismes, en influençant le recyclage des nutriments dans leurs micro-environnements et niches spécifiques.

Les écosystèmes sont des unités biologiques autorégulées répondent aux changements environnementaux en modifiant leur structure et leur fonction.

Dans les écosystèmes, les microorganismes peuvent jouer deux rôles complémentaires : (1) la synthèse de nouvelle MO à partir de CO₂ et d'autres composés inorganiques, au cours de la production primaire et (2) la décomposition de cette MO accumulée.

Les microorganismes jouent des rôles vitaux dans les écosystèmes, en tant que producteurs primaires, décomposeurs et consommateurs primaires (**figure 5**).

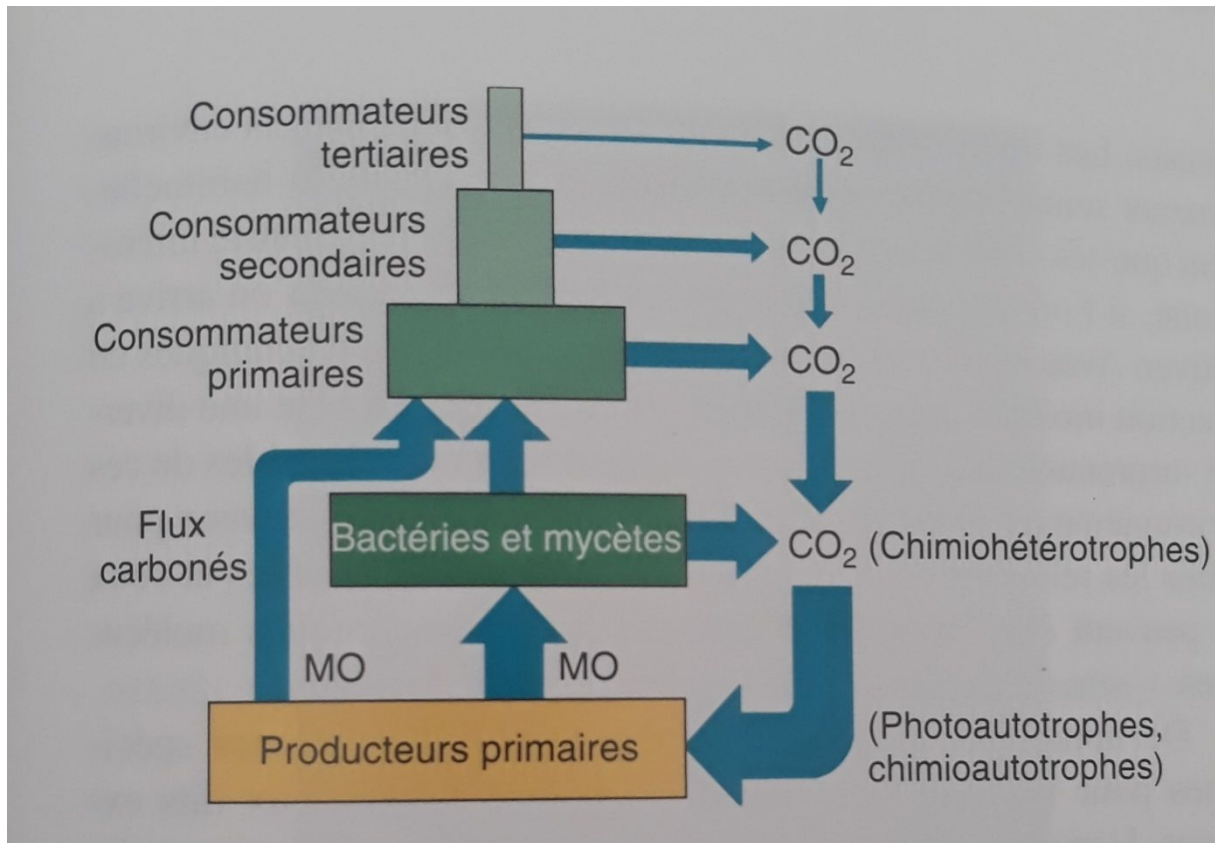


Figure 5. Le rôle vital des Microorganismes dans les écosystèmes. MO : matière organique.

Les producteurs primaires, y compris les microorganismes, fixent le CO₂ en utilisant la lumière ou de l'énergie chimique. Ce sont principalement les bactéries chimio-hétérotrophes et les mycètes qui assurent la décomposition de la MO, rendant les composés minéraux utilisables pour les producteurs primaires. Ciliés et flagellés, importants consommateurs primaires microbiens, se nourrissent de bactéries et de mycètes et recyclent ainsi les nutriments dans la boucle microbienne.

Les cyanobactéries et les algues jouent un rôle de producteurs primaires dans les milieux marins et d'eaux douces. Dans ces différents habitats, la principale source d'énergie qui permet la production primaire est la lumière.

En interagissant dans les écosystèmes, les microorganismes remplissent de nombreuses fonctions:

1. Contribuer à la formation de la MO via les processus photosynthétiques et chimiosynthétiques.
2. Décomposer la MO, souvent avec libération de composés inorganiques (CO₂, NH₄⁺, CH₄, H₂), via les processus de minéralisation.

3. Servir de source alimentaire riche pour les autres microorganismes chimiohétérotrophes y compris les protozoaires et les animaux.
4. Modifier les substrats et nutriments utilisés dans les interactions et les processus de développements symbiotiques, ce qui contribue au recyclage biogéochimique.
5. Modifier des quantités de MO en formes solubles et gazeuses. Ceci se produit, soit directement, par des processus métaboliques, soit indirectement, par une modification de l'environnement.
6. Produire des substances inhibitrices réduisant l'activité microbienne ou limitant la survie et le développement des végétaux et des animaux.
7. Contribuer à la vie des plantes et des animaux par des interactions symbiotiques positives et négatives.

1.5.1 Les nutriments dans les milieux aquatiques

Les concentrations en nutriments dans les milieux aquatiques peuvent varier de l'extrêmement faible aux niveaux approchant ceux des milieux de culture de laboratoire. Ceci crée des gradients exploités par les μo . on trouve de hautes teneurs en nutriments dans les milieux pollués et dans les stations d'épuration des eaux usées. La vitesse de renouvellement des nutriments varie, en effet dans les milieux marins, le temps de renouvellement peut s'échelonner sur des centaines d'années, au contraire dans les zones marécageuses et les estuaires, les vitesses de renouvellement peuvent être rapides. Ainsi, on trouve une communauté microbienne variée et complexe de μo .

1.5.2 Les cycles des nutriments dans les milieux aquatiques

La principale source de MO dans les eaux de surface éclairées est l'activité de la photosynthèse, essentiellement due aux phytoplanctons, exemple *Synechococcus*, une cyanobactérie pico-planctonique (qui peut atteindre 10^4 à 10^5 cellules/ml à la surface des océans). En croissant, les phytoplanctons fixent le dioxyde de carbone pour former la MO et tirent de l'eau environnante l'azote et le phosphore dont ils ont besoin (**figure 6**).

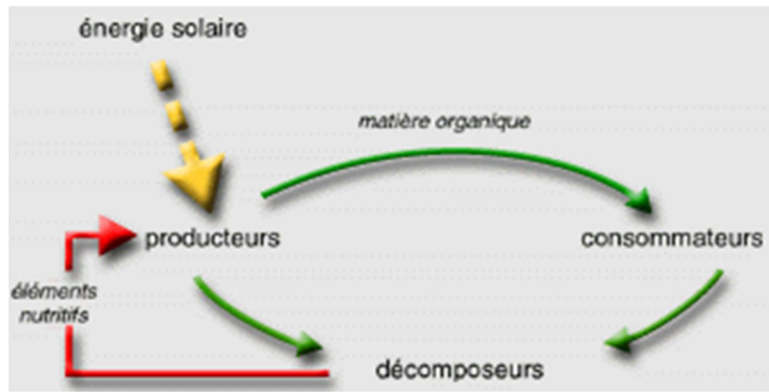


Figure 6. Le cycle de la matière organique.

Lorsque le phytoplancton s'est développé, une grande part de la MO est recyclée en dioxyde de carbone et en sels minéraux. La MO fixée par ces microorganismes entre dans la boucle microbienne.

1.5.3 La boucle microbienne

La boucle microbienne est l'action des communautés bactériennes planctoniques du milieu marin sur la MO. La boucle est un cycle qui permet à des communautés microbiennes de transformer la MO particulaire en matière dissoute, produisant de la MO dissoute et de la matière inorganique (**figure 7**).

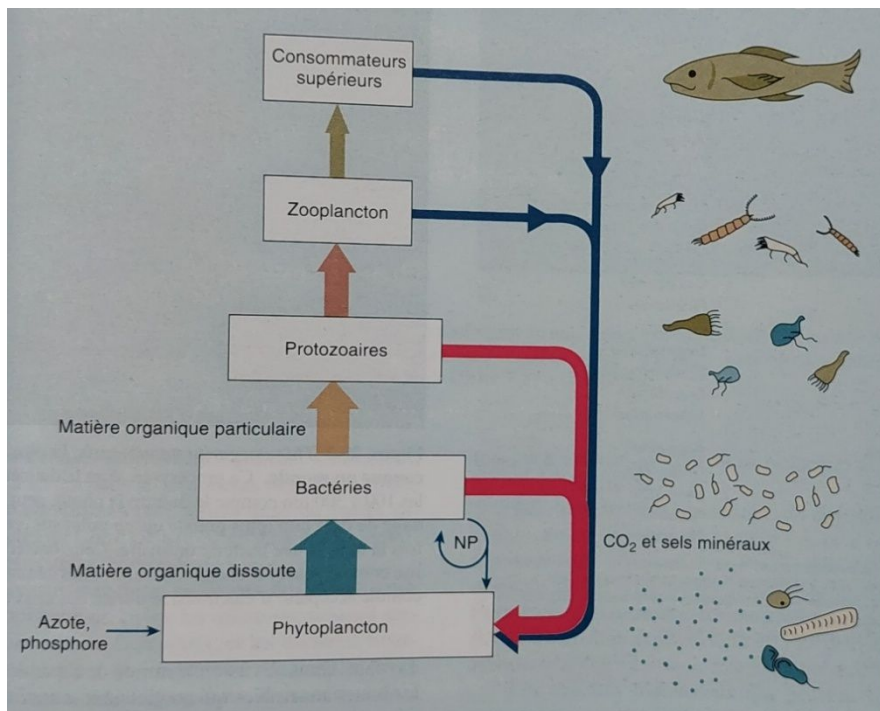


Figure 7. La boucle microbienne.

Une représentation simplifiée de la boucle microbienne, telle qu'elle se déroule dans les eaux. Figure en rouge. Dans cette boucle, une grande partie de la MO synthétisée par le phytoplancton au cours de la photosynthèse est libérée sous forme de MO dissoute. Celle-ci est utilisée par les bactéries, qui constituent alors une partie du pool de MO particulaire. Une certaine quantité de ces bactéries sert de nourriture aux protozoaires. Suite à la digestion par les protozoaires, une partie des nutriments contenus dans les bactéries et les protozoaires eux-mêmes est minéralisée et réintègre la boucle via le phytoplancton.

1.5.3.1 Explications

La boucle microbienne décrit un cycle de matière dans la chaîne alimentaire dans le plancton marin, produisant des composés de carbone organique dissous par des bactéries et le long de la chaîne alimentaire classique pour le phytoplancton, le zooplancton et le necton (**figure 8**).

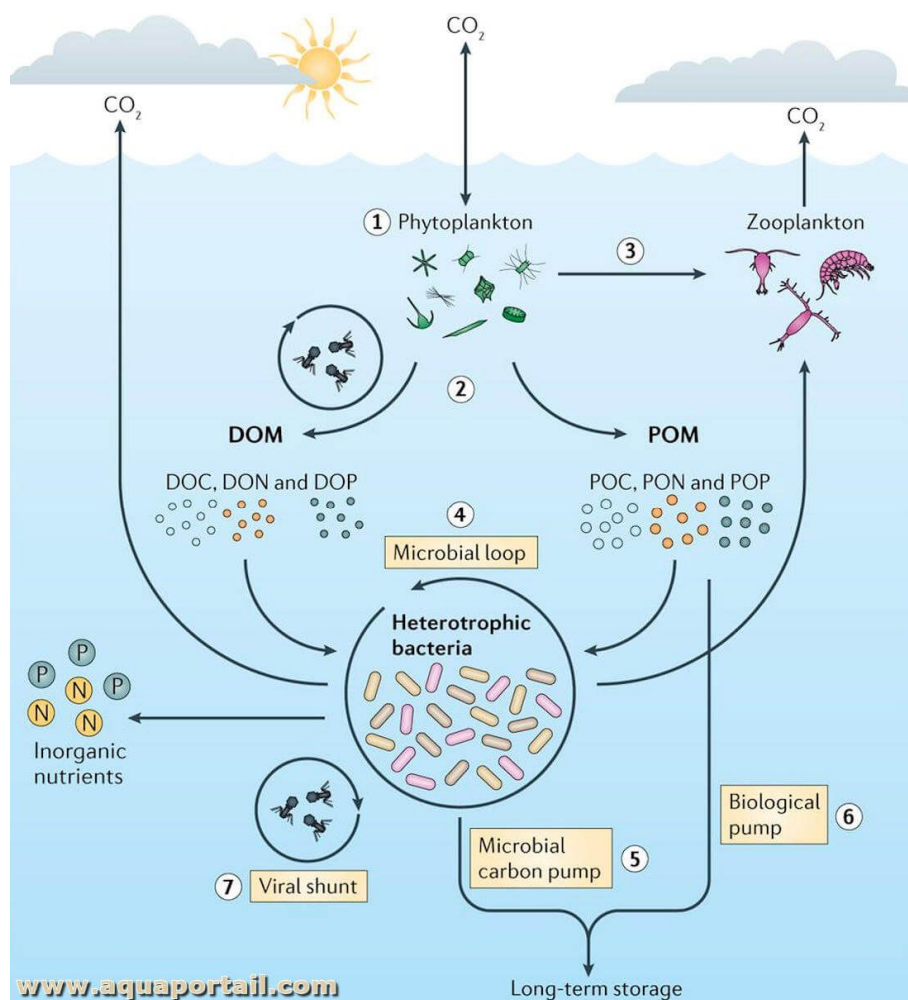


Figure 8. Le fonctionnement de la boucle microbienne. DOM: matière organique dissoute, POM: matière organique particulaire, DOC: carbone organique dissous, DON: azote organique dissous, DOP: phosphate organique dissous, POC: carbone organique particulaire, PON: azote organique particulaire, POP: phosphate organique particulaire.

L'expression boucle microbienne a été développée pour décrire l'importance des bactéries dans les cycles des matériaux (matière en suspension par exemple) des écosystèmes marins. Ainsi, les protistes bactériens appartiennent à la même classe de taille que le phytoplancton et représentent donc probablement une part importante du régime alimentaire des crustacés planctoniques.

1.5.3.2 Le Rôle

Les composés organiques du carbone dissous proviennent généralement de la décomposition microbienne de particules organiques et de débris, ou sont spécifiquement spécifiés comme déchets de cellules végétales et animales. Des molécules organiques particulièrement petites peuvent également s'échapper accidentellement des cellules.

Les bactéries hétérotrophes décomposent les particules organiques et décomposent les macromolécules telles que les polysaccharides, les graisses et les protéines en monomères simples afin de les respirer pour la production d'énergie ou pour en produire sa propre substance cellulaire. Cela rend le carbone lié organiquement et l'énergie qui y est stockée utilisables pour le reste de l'écosystème.

1.5.3.3 Le fonctionnement

Avant la découverte de la boucle microbienne, le réseau trophique marin était considéré comme un lien entre les chaînes alimentaires linéaires: dans lesquelles le carbone et l'énergie étaient fixés par les producteurs primaires (phytoplanctons), cette production primaire étant utilisée par les herbivores, qui à leur tour sont utilisés par les prédateurs.

Tous ces organismes sont finalement décomposés par des bactéries hétérotrophes, qui libèrent les éléments qu'ils contiennent sous forme de composés inorganiques. Les bactéries hétérotrophes présentes dans l'eau n'étaient pas considérées comme des consommateurs importants de MO.

1.5.4 Communautés microbiennes

Les communautés bactériennes sont variées, mais toutes participent à la décomposition de matière solide en matière dissoute, produisant au passage des composés inorganiques qui enrichissent l'eau de mer.

L'efficacité de la boucle microbienne est déterminée par la densité de population de bactéries marines. La densité bactérienne, à son tour, est contrôlée en mangeant par des protozoaires et diverses classes de flagellés bactériens. En outre, les infections des bactéries par des virus

provoquent également la destruction des cellules bactériennes, qui à leur tour libèrent des composés organiques dans l'eau. L'effet combiné des protozoaires et des virus compense la majeure partie de la croissance de la population bactérienne, supprimant ainsi les proliférations bactériennes.

1.6 Effets du changement climatique sur les boucles microbiennes

Au cours du 19^{ème} siècle, de nombreux changements climatiques ont été introduits en raison de facteurs environnementaux, tous provoqués par l'activité anthropique, qui affecte les cycles biogéochimiques qui ont lieu dans l'environnement. Certains de ces facteurs sont la température, la concentration de CO₂ et l'humidité du sol.

Dans le cas de la température, par exemple, elle a augmenté au cours du siècle dernier pour atteindre une valeur supérieure à 0,5 °C. De telle sorte que, en plus de la température ambiante, la température du sol a également augmenté, ce qui a accéléré les voies des cycles du carbone dans les communautés microbiennes, car elles entrent dans le processus de la décomposition ou de la minéralisation des éléments nutritifs.

D'autre part, l'humidité du sol a également été affectée par tous ces processus, et sachant qu'elle régule le flux de CO₂, produit par la respiration des organismes du sol, la concentration de ce compost dans le sol sera également affectée. Dans le cas des colonies microbiennes, il est possible qu'une saturation de CO₂ existe; elle sera seulement produite dans des conditions anaérobies, ce qui diminuera le niveau d'activité microbienne, comme la réduction de la vitesse de décomposition.

De plus, cette condition réduira la production de nouveau CO₂. Par conséquent, il est possible d'arriver à la conclusion que ce ne sont pas tous les organismes qui vont réagir de la même manière à ces changements qui sont produits sur terre et mer.

Les effets qui peuvent produire ces changements dans les communautés microbiennes sont multiples. Les microorganismes mettent en évidence les effets produits sur le cycle du carbone et le cycle de l'azote, d'où proviennent certains des gaz les plus importants dans la composition de l'atmosphère, comme le CO₂, le CH₄ ou le N₂O.

Il faut se rappeler que les communautés microbiennes sont très complexes et spécifiques en raison de leur structure et les fonctions qu'ils fournissent, pour lesquelles le changement climatique peut insérer plusieurs façons.

1.7 Biodégradation de la matière organique en milieu aquatique

1.7.1 Généralité sur la matière organique dans un milieu aquatique

Dans les milieux aquatiques, la MO est un ensemble des composés hydrocarbonés d'origine naturelle (macromolécules provenant de la dégradation de débris animaux et végétaux) et des composés anthropiques (micropolluants organiques ont des origines très variées).

Cette matière joue un rôle important dans la circulation des éléments chimiques en général. Plus particulièrement, la MO se retrouve dans les rivières sous deux formes: la forme dissoute «MOD» et la forme particulaire « MOP ».

Généralement dans les milieux aquatiques, on estime à environ 89% la part de MOD en solution dans l'eau, à 9% celle de la MOP (matière organique associée aux particules et détritiques), à 2% celle du phytoplancton et à moins d'1% celle du zooplancton et des bactéries, en masse de carbone organique.

La MO est constituée essentiellement d'hydrogène de carbone, d'azote, de phosphore et de divers métaux. Ces éléments sont à la base de tous les réseaux trophiques aquatiques. Les sources de la MO, la température et le pH sont des facteurs qui contrôlent la composition et la concentration de la MO. Ces facteurs jouent divers rôles sur le contrôle de la dissolution et des processus de dégradation et de production photo chimique et biologique.

1.7.2 Origine de la matière organique

La MO présente dans les milieux aquatiques a deux origines: MO allochtone et autochtone.

- La matière organique allochtone

C'est-à-dire pédogénique: s'identifie surtout aux produits naturels, feuillage, herbes et poussières apportées par le vent, la pluie, la neige et les ruisseaux, aussi aux effluents industriels, agricoles et domestiques.

- La matière organique autochtone

C'est-à-dire aquagénique: est produite par la faune et la flore aquatique et s'identifie principalement aux produits de la photosynthèse des organismes aquatiques et aux cadavres d'organismes aquatiques.

Généralement, le rapport carbone-azote permet de différencier les substances allochtones des substances autochtones.

Un rapport carbone/azote (C/N) d'environ 50:1 est typique pour les substances allochtones tandis qu'un rapport de 12:1 est plus représentatif des substances autochtones.

1.7.3 Classification de la matière organique

1.7.3.1 Matière organique naturelle

La MO naturellement présente dans les écosystèmes aquatiques, est formée par un mélange complexe de produits végétaux et animaux à des stades de composition variés.

Elle comprend également des produits de synthèse, par voies chimiques ou biochimiques, élaborés à partir de ces éléments. Elle comprend enfin des microorganismes (bactéries, virus, etc.) et leurs décompositions.

1.7.3.2 Matière organique anthropique

Ce sont les micropolluants organiques présents dans l'environnement aquatique ont des origines très variées. Leur devenir dans un milieu aquatique ainsi que leur impact potentiel sur les différents écosystèmes sont très dépendants de leurs interactions avec le milieu environnant. Dans les eaux les micropolluants sont habituellement présents en très faibles concentrations, soit à l'état de traces et d'ultra traces.

Il existe des centaines de milliers de contaminants organiques et leur présence dans l'environnement est initialement conditionnée par leur origine.

Les différentes familles de ces micropolluants organiques couramment recherchées dans l'eau sont: les hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP, les polychlorobiphényles PCB, les chlorophénols, les phthalates, les dioxines, les pesticides etc....

Les régions fortement urbanisées montrent en plus des contaminations reliées à des phénomènes de combustion de façon générale (trafic routier, chauffage, incinérateurs...) et les zones industrialisées peuvent être fréquemment contaminées en produits et sous- produits de synthèse (solvants, détergents...).

Les concentrations d'un milieu dépendent donc fortement des habitudes agricoles, urbaines et industrielles de la région.

Il existe également des sources de pollution d'origine naturelle comme les volcans ou les incendies. Les mers et les océans sont le réceptacle final des contaminations organiques terrestres et peuvent également être le réceptacle initial d'hydrocarbures (naufages de pétroliers, transport maritime et navigation de plaisance), de pesticides « peintures anti-salissures des bateaux » ou encore de déchets directement rejetés (eaux usées de bateaux par exemple).

Le compartiment atmosphérique est quant à lui, le vecteur d'un bon nombre de ces composés et participe également à leur dissémination sur toute la surface de la planète, même aux endroits les plus éloignés des sources (**figure 9**).

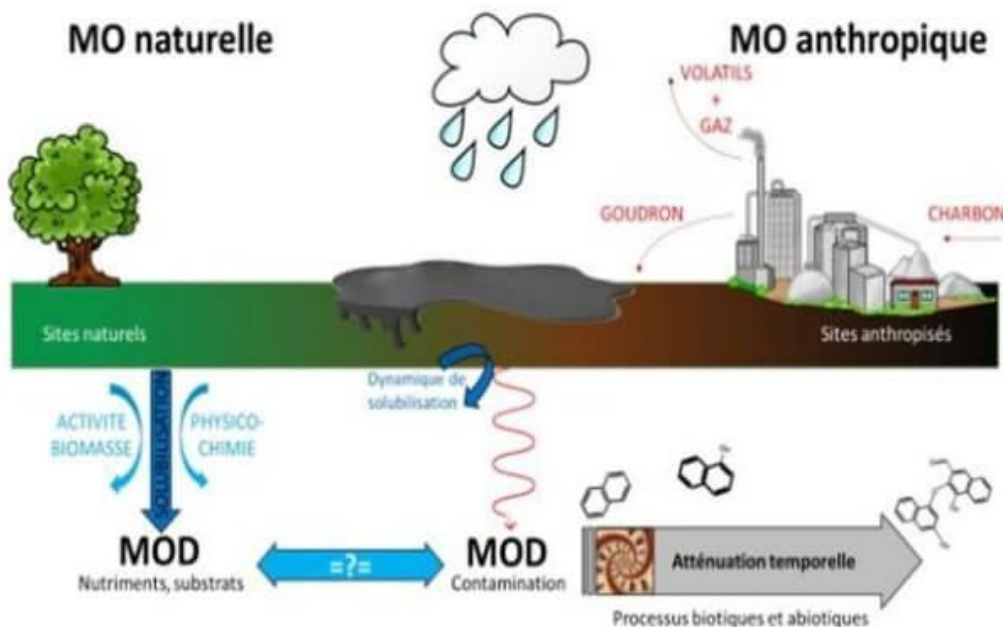


Figure 9. Origine et devenir de la matière organique anthropique.

1.7.4 Composition de la matière organique

Dans un milieu aquatique, la MO se compose essentiellement de carbone, d'oxygène et d'hydrogène. Le carbone organique dissous ($COD < 0,45 \mu M$) est plus abondant que le carbone organique particulaire ($COP > 0,45 \mu M$).

1.7.4.1 Carbone organique

Dans les grands écosystèmes aquatiques, COD représente plus de 60% des apports de carbone. Les concentrations de carbone sont très peu influencées par les apports anthropiques dans les bassins versants. Le COD sert d'indicateur pour la caractérisation de MOD en milieu aquatique.

Les quantités de COD dans les rivières sont dépendantes de la taille des écosystèmes de la nature des bassins versants et sont influencées par des variations saisonnières, lors de crues ou lors d'efflorescences algales.

1.7.4.2 L'azote organique

En plus du carbone, de l'oxygène et de l'hydrogène qui lui donnent l'essentielle de sa masse, la MO se compose également d'azote (N), un élément essentiel à la production de matière vivante. L'azote organique dissout (NOD) est fortement influencé par les apports anthropiques de MO (fertilisation, rejets agricoles). L'azote organique dissout peut être un facteur, avec l'azote total, contribuant au problème d'eutrophisation.

1.7.4.3 Le phosphore organique

Le phosphore (P) est le troisième élément présent dans la MO. Dans les milieux d'eau douce, le phosphore est très souvent le macronutriment qui limite la production primaire.

Le phosphore organique dissout (POD) provient, en grande majorité, de la dégradation des organismes biologiques et de la croûte terrestre. Les rejets anthropiques qui contiennent le phosphore ont contribué largement à la dégradation des écosystèmes et des milieux aquatiques.

1.8 Rôle des communautés microbiennes dans l'autoépuration des hydro-systèmes anthropisés

1.8.1 Définition

L'auto-épuration est le processus biologique par lequel l'eau présente dans la nature (dans les rivières, zones humides, lacs...) se nettoie elle-même lorsque la quantité de matières polluantes qui y est rejetée n'est pas trop importante. Cette épuration naturelle est l'œuvre des organismes vivant dans le milieu aquatique : bactéries, protozoaires, algues, qui permettent à l'eau de retrouver sa qualité première.

Son importance dépend des micro-organismes présents (bactéries), des possibilités d'oxygénation, de l'atmosphère et de la lumière.

Les bactéries restent cependant les micro-organismes les plus impliquées dans ce processus (environ 95% des micro-organismes présents dans une boue activée).

Les microorganismes utilisent et minéralisent les substances organiques apportées au cours de la pollution. Après leur transformation, ces derniers s'élimineront dans l'atmosphère (**figure 10**).

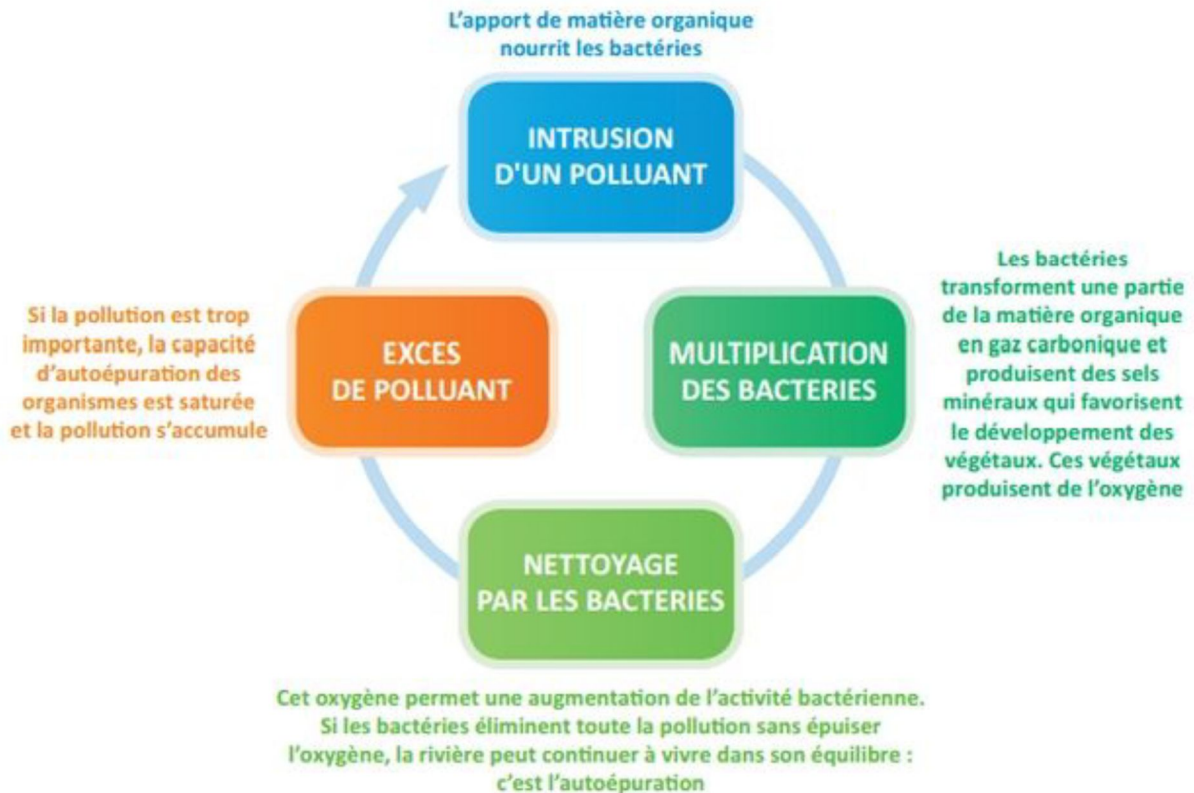


Figure 10. Représentation du mécanisme d'autoépuration.

1.8.2 Mécanisme de l'autoépuration

Le principe consiste dans la fermentation ou l'oxydation des MO par des microorganismes, en milieu généralement aérobie, pour aboutir à des matières minérales. Ce qui réclame une eau riche en oxygène dissous. Si le milieu n'est pas propice, l'autoépuration ne peut s'effectuer qu'en anaérobiose. Dans ce cas, la fermentation solubilise tous les constituants solides et dégage du méthane et souvent des sulfures, qui empoisonnent le milieu.

Les matières en suspension se déposent progressivement et les matières dissoutes se trouvent plus ou moins diluées. Une activité biologique, combinée avec des actions chimiques entrent alors en jeu et tend à transformer les matières oxydables ou putrescibles en matières oxydées stables.

- Les actions bactériennes et les réactions d'oxydoréduction consomment l'oxygène dissous dans l'eau. Si l'eau reste suffisamment aérée durant ces transformations, la putréfaction est évitée, sinon elle se développe et les MO présentes dans l'eau subissent une fermentation aérobie ou anaérobie selon que le milieu contient ou non une quantité suffisante d'oxygène dissous.

Cet oxygène est réalimenté grâce aux échanges avec l'atmosphère. L'oxygène de l'atmosphère se dissout d'autant plus que le déficit de saturation de l'eau en oxygène est plus grand, que la température est plus basse et que la turbulence des eaux est plus grande.

1.8.3 Mécanisme de la nutrition bactérienne

Une phase de transport permet d'amener les polluants (solubles et insolubles) du sein du liquide à la surface de la bactérie. Le substrat soluble diffuse facilement à travers la membrane, alors que les matières insolubles (particules, colloïdes et grosses molécules) sont après leur adsorption à la surface de la bactérie, hydrolysées par des exo-enzymes avant d'être à leurs tours facilement assimilables (**figure 11**).

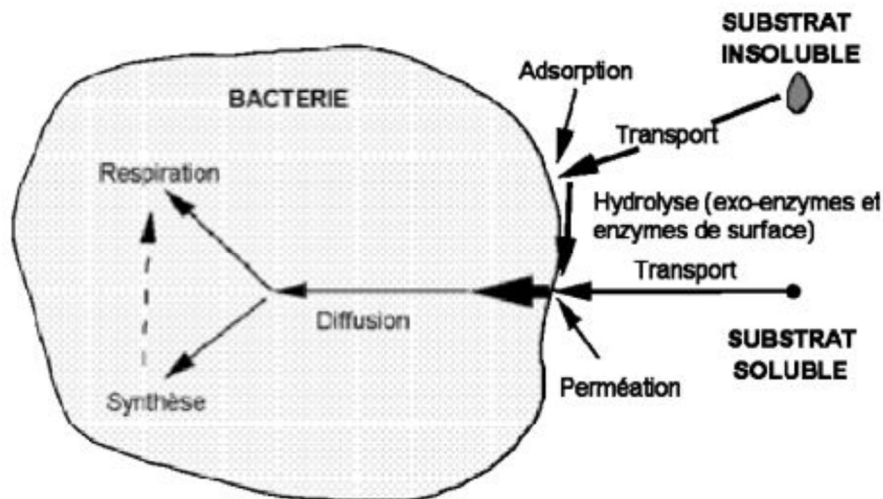


Figure 11. Schéma de principe de la nutrition bactérienne.

C'est au sein de la cellule que s'effectue la métabolisation des polluants:

L'assimilation (ou anabolisme) qui est l'utilisation des matières polluantes pour la synthèse de nouvelles cellules. La respiration (ou catabolisme) qui permet la combustion des substrats afin de libérer l'énergie nécessaire aux micro-organismes pour assurer leurs fonctions vitales, la respiration endogène au cours de laquelle les micro-organismes utilisent leur propre matière en guise de substrat.

Exemple

Après un rejet d'eaux usées dans une rivière, ces organismes se développent en utilisant les matières biodégradables et en consommant de l'oxygène. Au fur et à mesure, vers l'aval, il y aura de moins en moins de matières biodégradables dans le courant de la rivière et donc de moins en moins de consommation d'oxygène par les décomposeurs.

Il arrivera finalement un endroit où l'oxygène reviendra à une valeur semblable à celle qu'il avait avant le rejet de pollution.

Élimination de carbone

Le processus de dégradation de la matière carbonée est plus rapide en aérobiose et la bactérie est plus active que les organismes plus évolués.

Le carbone organique se retrouve sous forme de CO₂ et de biomasse.

Élimination de la pollution azotée

L'élimination de la pollution azotée est assurée biologiquement par la nitrification/dénitrification (**figure 12**).

- Nitrification

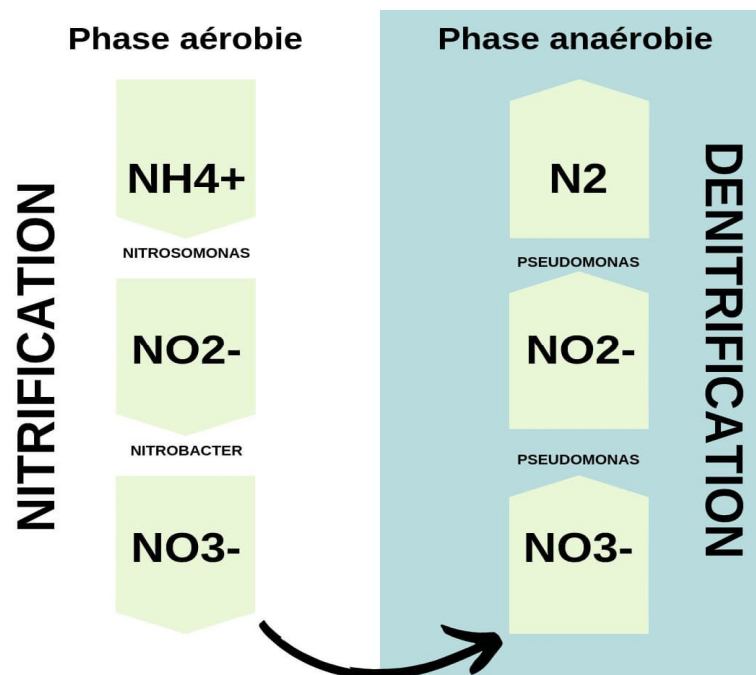


Figure 12. La nitrification et la dénitrification par les microorganismes.

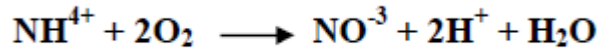
1^{ère} étape: la nitrification, qui est la transformation de l'ammonium en nitrite, est essentiellement liée aux nitrosobactéries (genre *Nitrosomonas*).

2^{ème} étape: la nitrification, au cours de laquelle les nitrites sont oxydés en nitrates, est principalement l'œuvre des nitrobactéries (genre *Nitrobacter*).

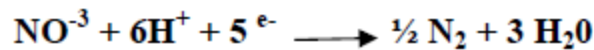
- Dénitrification

Certains micro-organismes, généralement hétérotrophes, sont en fait capables, en période d'anoxie, d'utiliser les ions nitrites et nitrates au lieu de l'oxygène dissous dans leur chaîne respiratoire et donc de réaliser cette transformation de l'azote nitrique.

- La nitrification en phase aérobie:



- La dénitrification en phase anaérobie:



- Le nitrate peut être éliminé par des bactéries du genre *Paracoccus* et par *Escherichia coli*.

Cependant, sur une partie du cours d'eau, les produits non-biodégradables ne sont pas éliminés et l'eau se retrouve enrichie en résidus minéraux ce qui provoque l'explosion de la croissance de végétaux (algues vertes, lentilles d'eau).

C'est ce qu'on appelle l'eutrophisation. Les besoins en oxygène de ces végétaux peuvent asphyxier le milieu aquatique et entraîner la mort des autres êtres vivants de l'écosystème.

1.9 Eutrophisation

Le terme « eutrophisation » est utilisé dans la littérature scientifique pour désigner un processus naturel d'augmentation de la production de MO (un enrichissement en éléments nutritifs) accompagnant l'évolution d'un écosystème aquatique.

Les symptômes les plus notables de l'eutrophisation sont les proliférations végétales, parfois toxiques, la perte de biodiversité et les anoxies qui peuvent engendrer la mort massive d'organismes aquatiques.

Dans les baies de grands systèmes fluviaux et certains lacs, la châtaigne d'eau *Trapanatans* ou les fougères d'eau du genre *Azolla* sp. ont, par exemple, proliféré jusqu'à conduire à des hypoxies et des anoxies du milieu.

Dans les lacs, les cyanobactéries qui prolifèrent le plus communément présentent toutes des espèces capables de produire des toxines. Elles appartiennent aux genres *Microcystis*, *Planktothrix*, *Dolichospermum*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria*, *Lyngbya*, *Nodularia*.

En milieu côtier, la décomposition des macro-algues vertes opportunistes proliférantes, principalement issues du genre *Ulva*, induit des hypoxies et des anoxies du milieu, provoquant des mortalités massives de la faune des fonds marins, une régression des zones de nurseries des poissons et des risques sanitaires par dégagement d'hydrogène sulfuré.

La prolifération excessive de phytoplancton en mer côtière provoque également une hypoxie voire une anoxie des eaux de fond (golfe du Mexique, baie de Chesapeake, mer Baltique, etc.). Enfin, l'eutrophisation marine peut stimuler la production de toxines phytoplanctoniques, comme chez les espèces des genres *Alexandrium*, *Dinophysis* et *Pseudo-nitzschia*.

2.1 Introduction

Les sols sont dynamiques et évoluent au cours du temps. Ce processus peut prendre des décennies et même des siècles; la MO des sols peut être vieille de milliers d'années. A cause de changements dans la croissance des plantes, de la température, des pluies, des perturbations et de l'érosion, un sol qui a mis des centaines d'années à se former peut-être rapidement dégradé, si la communauté microbienne est activée.

Dans la plupart des sols, les principaux producteurs de MO sont les plantes vasculaires, bien que les algues, les cyanobactéries et les bactéries photosynthétiques puissent aussi contribuer à ces processus, particulièrement dans les croûtes microbiennes des déserts.

Le sol sert d'habitat à une variété d'organismes, dont les bactéries, les protozoaires, les insectes, les nématodes, les vers et beaucoup d'autres animaux. Les virus sont aussi présents. Cette communauté biologique complexe contribue à la formation, au maintien, et dans certaines situations, à la dégradation et à la disparition des sols.

2.2 Le sol et ses composants

Le sol est à l'interface entre la lithosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère et sert de support à une partie de la biosphère (**figure 13**).

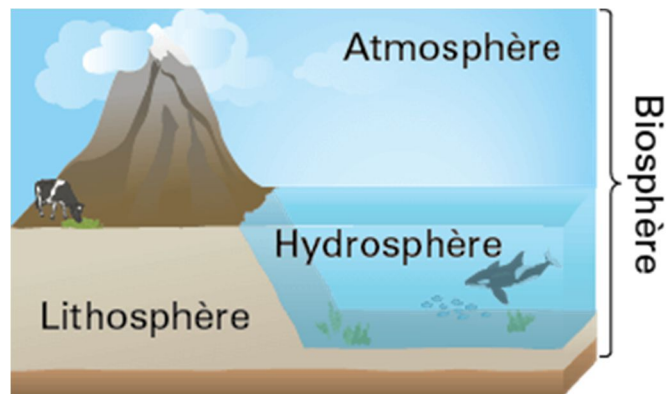


Figure 13. Représentation de la lithosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère.

Il est constitué de cinq composants majeurs: fraction minérale, MO, eau, air et organismes vivants (**figure 14**). Les MO et minérales s'organisent de manière à créer des vides alors occupés par l'air et l'eau (les pores).

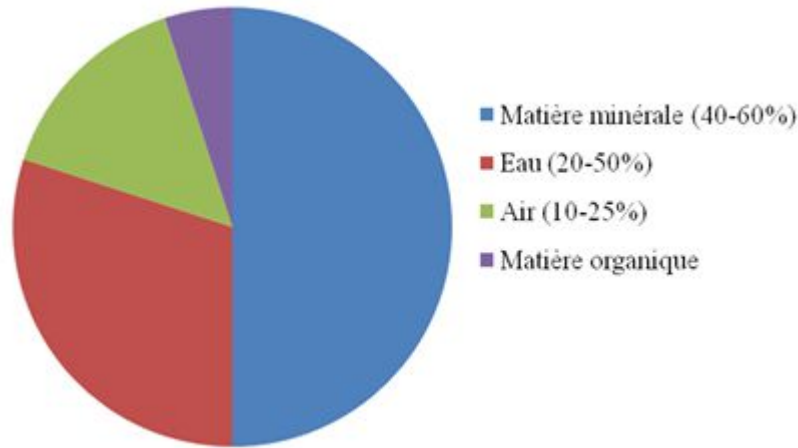


Figure 14. Proportion des principaux composants du sol en volume.

La MO fraîche provient des déchets des organismes, de leurs sécrétions ou des tissus morts. Mais elle provient majoritairement de débris végétaux (cellulose, hemicellulose, lignine, tanins). Des composés lipidiques (acides gras, cires, résines) et azotés (ADN, chitine, muréline, urée, amines, protéines) sont également présents dans le sol. Ces composés proviennent des bactéries, plantes et animaux. Le sol contient également des êtres vivants appartenant à chacun des grands groupes du vivant: bacteria, archeobacteria, et eucarya.

2.2.1 L'eau et l'air

L'eau circule et est retenue dans le sol par le réseau des pores. Ces pores sont occupés par un réseau aqueux discontinu, sauf quand le sol est saturé, portant des substances inorganiques ou organiques dissoutes et comprennent une phase gazeuse.

L'eau du sol est très importante dans l'écologie des micro-organismes du sol car la disponibilité des nutriments et l'intégrité des membranes bactériennes nécessitent que la solution du sol soit largement disponible et circulante.

2.2.2 La diffusion des gaz

La circulation de l'eau dépend de la distribution de l'espace poreux. La diffusion de gaz est faible dans les micropores. Le faible renouvellement de l'atmosphère dans ces microenvironnements combinés avec la consommation biologique de l'oxygène, peuvent conduire à un développement et à la persistance de conditions anaérobies. La survie des bactéries dépend donc de leur capacité pour une respiration alternée, remplaçant l'oxygène par un autre accepteur final d'électrons. Il a été montré par exemple que les zones anaérobies sont

colonisées par des populations bactériennes capables d'utiliser le nitrate comme accepteur final d'électrons.

2.2.3 Ecologie microbienne des sols

Le milieu où se développent les micro-organismes telluriques présente des caractéristiques particulières dont certaines lui sont propres:

1- La plus remarquable consiste certainement dans un cloisonnement du milieu en une multitude de microhabitats où les conditions écologiques peuvent, à un moment donné, être très différentes les unes des autres: il en résulte une micro-hétérogénéité dont les conséquences sont parfois inattendues.

2- Le support organique et minéral que constitue le sol est loin d'être inerte. Les produits de métabolisme microbien peuvent être stabilisés, c'est-à-dire soustraits provisoirement aux processus de biodégradation par adsorption sur les colloïdes minéraux ou organiques. Les divers processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent dans le sol sont d'ailleurs souvent si intimement intriqués qu'il faut faire appel à des artifices expérimentaux pour les dissocier.

3- L'énergie nécessaire au développement des micro-organismes hétérotrophes qui constituent la plus grande partie des micropopulations telluriques, provient presque exclusivement de la photosynthèse végétale. On conçoit, dans ces conditions, toute l'importance que revêt, en microbiologie du sol, l'étude du facteur végétation qui, malheureusement, a souvent été trop négligé dans le passé.

4- On notera enfin que, dans le sol, une microfaune ou une mésofaune parfois très active interviennent à côté de la microflore et que se manifestent alors des interactions complexes dont l'étude est encore à peine ébauchée.

Les sols ont été formés, et continuent à se former, dans une grande variété de milieux. Ceux-ci vont des régions de la toundra arctique, où sont stockés environ 11% du pool mondial de carbone, jusqu'aux vallées sèches antarctiques, où il n'y a aucune plante vasculaire. En outre, les zones plus profondes, où les racines des plantes et leurs produits ne peuvent pas pénétrer, abritent aussi des communautés microbiennes. Les activités microbiennes dans ces milieux peuvent conduire à la formation des minerais comme la dolomite; il peut aussi y avoir de l'activité microbienne dans les profondes réserves continentales de pétrole, dans les pierres, et même dans les affleurements rocheux. Ces micro-organismes dépendent de sources énergétiques provenant des algues, des nutriments apportés par la pluie, et de la poussière.

La plupart des sols sont formés de matériaux géologiques inorganiques, modifiés par la communauté biologique, incluant les microorganismes et les plantes. Une des caractéristiques principales des sols est de n'être pas saturée en eau, ce qui rend possible la pénétration de l'oxygène par les trous et les pores. Les sols peuvent aussi comprendre des régions isolées qui sont saturées en eau, et deviennent des "mini" milieux aquatiques.

Le sol constitue enfin pour l'Homme une réserve de microorganismes dont il devra, à l'avenir, domestiquer un nombre croissant d'espèces en vue de satisfaire ses besoins en molécules simples (telles que les acides: acétique ou citrique) et surtout en molécules complexes (vitamines, hormones, antibiotiques, enzymes, acides aminés essentiels).

L'alimentation d'une population humaine sans cesse croissante, exige donc impérieusement le développement de nos connaissances, non seulement sur l'écologie des végétaux supérieurs, mais aussi sur l'écologie des microorganismes telluriques.

Une caractéristique importante qui définit un sol, le microorganisme se trouve en contact physique étroit avec l'oxygène. Ces microorganismes sont localisés à la surface des particules, dans de minces pellicules d'eau où l'oxygène se trouve à concentration élevée et peut être facilement renouvelé à partir de la phase gazeuse.

Un sol peut être rapidement modifié par la pluie ou l'irrigation, de ce fait il peut devenir pas idéal, pour former un milieu comprenant des poches d'eaux isolées "mini milieux aquatiques". Si le processus d'irrigation continue, il peut former un sol détrempé, plus proche d'un sédiment lacustre.

2.3 Présentation de la biodiversité microbienne et de son importance

On estime que 1 à 10% seulement des organismes observables au microscope peuvent être cultivés au laboratoire. Depuis qu'on dispose des techniques moléculaires, il est possible d'estimer le degré de diversité microbienne d'un échantillon de sol, en extrayant et en analysant les acides nucléiques présents.

Les communautés microbiennes du sol représentent la plus grande diversité que l'on rencontre sur terre. Avec une biomasse microbienne estimée de 1 à 10 tonnes par hectare, elles représentent également une fraction considérable de la biomasse vivante sur terre. La diversité des communautés microbiennes telluriques est complexe et variable à différents niveaux d'organisation biologique.

Dans un sol de surface, la population bactérienne, mesurée au microscope, peuvent approcher les 10^8 à 10^9 cellules par gramme de poids sec de terre. Les mycètes peuvent

développer jusqu'à plusieurs centaines de mètres d'hyphes par grammes de sol. Ces mycéliums fongiques sont des organismes vivants les plus grands et les plus anciens sur la terre.

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. L'activité microbienne est plus grande dans les couches superficielles du sol riches en MO, en particulier dans et autour de la rhizosphère. Le nombre et l'activité des microorganismes 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. Comme une population d'organismes aérobies consomme l'oxygène disponible, les anaérobies sont capables de croître. Si le sol est perturbé par le labour, les vers de terre, ou autre activité, les microorganismes aérobies seront de nouveau en mesure de croître et à répéter cette succession (**tableau 2**).

Tableau 2. Groupes communs de microorganismes présents dans le sol.

| Type de sol (taille des particules µm) | Microorganismes | Exemple | Nombre/g de sol | Biomasse (Kg poids frais/ha sol) |
|--|-----------------|----------------------------|------------------------------------|--|
| Argile <2,0 | Virus | Virus Mosaïque du tabac | 10 ¹⁰ -10 ¹¹ | |
| Limon 2,0-75 | Bactéries | <i>Pseudomonas</i> | 10 ¹⁰ -10 ¹¹ | 300-3000 |
| | Actinomycètes | <i>Streptomyces</i> | 10 ⁸ -10 ⁹ | 300-3000 |
| | Champignons | <i>Mucor</i> | 10 ⁷ -10 ⁸ | 500-5000 |
| | Algues | <i>Chlorella</i> | 10 ⁵ -10 ⁶ | 10-1500 |
| | Protozoaires | <i>Euglena</i> | 10 ³ -10 ⁶ | 5-200 |
| Sable 75-2000 | Nématodes | <i>Pratylenchus</i> | 10 ³ -10 ⁵ | 1-100 |
| Graviers 2000- 150 000 | Vers de terre | <i>Lumbricus</i> | 10 ¹ -10 ² | 10-1000 |

2.3.1. Les bactéries

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 MO.

2.3.2. 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 sclérotes et des cordes hyphales. Ceci est particulièrement important pour le fonctionnement des basidiomycètes, qui forment des structures étanche 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.

2.3.3 Importance de la biodiversité microbienne dans l'amélioration de la fixation naturelle de l'azote par la symbiose

La fixation biologique de l'azote (FBA) est un processus naturel par lequel les bactéries fixatrices d'azote (BFA) convertissent l'azote gazeux de l'atmosphère en ammoniac, qui peut ensuite être utilisé par les plantes. La FBA est la principale source d'azote pour les plantes dans les écosystèmes naturels et est également importante pour l'agriculture.

Les recherches de microbiologie écologique promettent d'être particulièrement positives dans le domaine de la fixation symbiotique de l'azote non seulement chez les légumineuses, mais aussi chez les non-légumineuses, notamment en région tropicale.

De nombreux microorganismes intéressants et importants se développent à l'intérieur des plantes. Ces associations sont dépendants des signaux chimiques complexes.

Les légumineuses, plantes de la famille botanique Fabaceae, ont la capacité unique de mettre en place une symbiose avec certaines bactéries présentes naturellement dans le sol, qui convertissent l'azote de l'air (N_2) présent dans leur environnement en une forme intermédiaire, l'azote ammoniacal (NH_3), grâce à une enzyme bactérienne spécifique, la nitrogénase. L'azote ainsi réduit sous forme de NH_3 est ensuite assimilé par la plante, pour constituer ses molécules organiques, notamment les protéines. L'azote fixé par les légumineuses est puisé dans une ressource abondante: le substrat azoté N_2 . Cet azote, disponible dans l'air ambiant est fixé par les plantes grâce à l'énergie issue de la photosynthèse végétale. Cette symbiose naturelle permet à la plante d'utiliser directement l'azote de l'air environnant pour sa croissance. On parle de plantes fixatrices d'azote et de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique.

Un mutualisme plante-bactérie d'une grande importance pour l'homme est celui des légumineuses/bactéries fixatrices d'azote. Les partenaires de la symbiose sont appelés symbiotes. Les bactéries symbiotiques fixatrices d'azote jouent un rôle encore plus important dans la croissance des plantes pour la production agricole, peuvent se développer librement dans le sol ou infecter les plantes portant un nom générique « Rhizobia » et appartiennent à plusieurs genres. Les genres *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, et d'autres infectent les racines de légumineuses telles que: le soja, les haricots, les pois, les arachides, la luzerne, le trèfle... Les *Rhizobium* sont spécialement adaptés pour certaines espèces de légumineuses, sur lequel ils forment des nodules racinaires (**figure 15**). L'azote est ensuite fixé par un procédé symbiotique de la plante et des bactéries. La plante fournit des conditions anaérobies et des nutriments de croissance pour les bactéries. Ces dernières fixent l'azote qui peut être incorporé dans des protéines végétales.

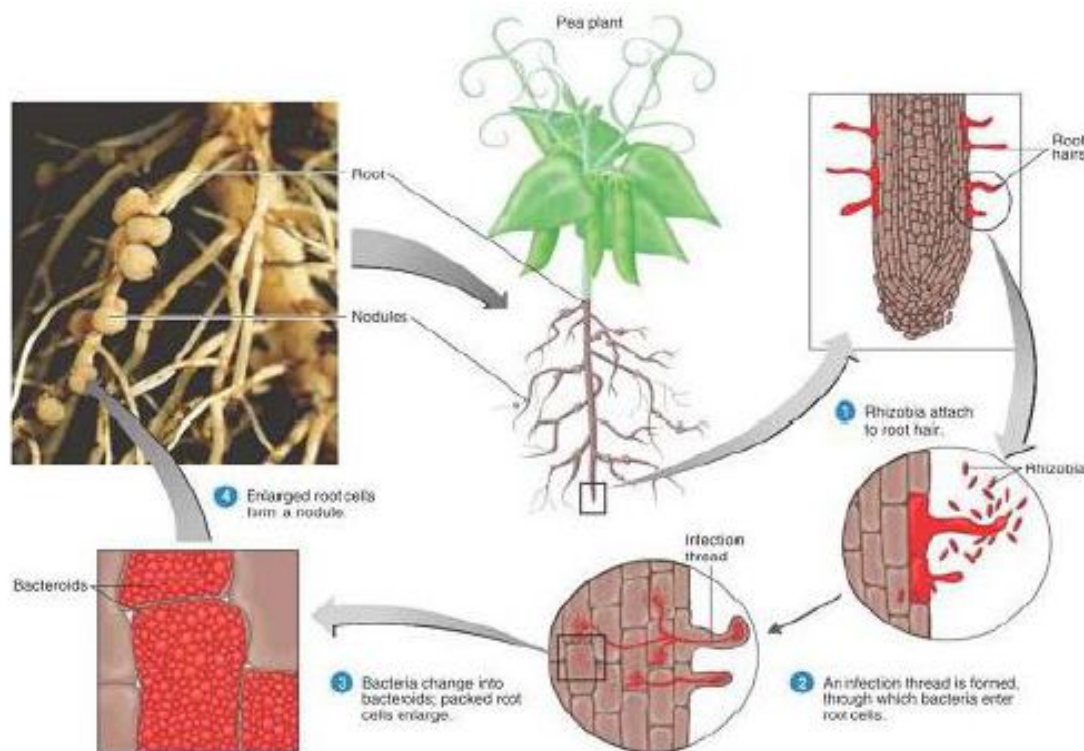


Figure 15. Formation d'un nodule de racine dans une légumineuse infectée par *Rhizobium*.

2.4 Effet de la pollution sur la biodynamique des sols

Les facteurs perturbateurs de l'écosystème peuvent être d'origine naturelle dans le cas de la sécheresse ou des incendies ou d'origine anthropique (pollution).

La biodynamique des sols est un concept qui décrit l'ensemble des interactions entre les organismes vivants du sol, la MO et les minéraux. Ces interactions sont essentielles au bon fonctionnement des sols, qui assurent de nombreuses fonctions vitales pour l'environnement et l'humanité, notamment la production alimentaire, la régulation du cycle de l'eau et la séquestration du carbone.

La pollution des sols altère la biodynamique des sols qui peut être à long terme. Certains polluants peuvent persister dans les sols pendant des décennies, voire des siècles. Elle peut être causée, notamment les activités industrielles, agricoles, urbaines et domestiques. Les polluants peuvent être des substances chimiques, des métaux lourds, des radionucléides ou des organismes pathogènes.

Les effets de la pollution des sols sur la biodynamique sont variés et dépendent de la nature et de la concentration du polluant. En général, la pollution des sols peut entraîner les effets suivants:

- **Diminution de la biodiversité:** les polluants peuvent tuer ou perturber les organismes vivants du sol, ce qui entraîne une diminution de la biodiversité. La biodiversité est essentielle au bon fonctionnement des sols, car elle assure une variété de fonctions, notamment la décomposition de la MO, la fixation de l'azote et la régulation des parasites.
- **Réduction de la MO:** la MO est un élément essentiel à la biodynamique des sols. Elle fournit aux plantes des nutriments et aide à maintenir la structure du sol. Les polluants peuvent dégrader la MO, ce qui entraîne une perte de fertilité et une vulnérabilité accrue du sol à l'érosion.
- **Altération de la capacité d'absorption des nutriments:** les polluants peuvent perturber la capacité des sols à absorber les nutriments, ce qui entraîne des carences nutritives pour les plantes.
- **Diminution de la capacité de filtration:** les sols pollués peuvent libérer des contaminants dans l'eau, ce qui peut avoir un impact négatif sur la qualité de l'eau potable et des écosystèmes aquatiques.

Les effets de la pollution des sols sur la biodynamique sont une menace importante pour l'environnement et l'humanité. Ils peuvent entraîner des pertes de rendements agricoles, une diminution de la qualité des aliments, une pollution de l'eau et une diminution de la biodiversité.

2.4.1 La pollution par les pesticides

Elle peut tuer ou perturber les organismes vivants du sol, notamment les vers de terre, les bactéries et les champignons. Ces organismes sont essentiels à la décomposition de la MO, à la

fixation de l'azote et à la régulation des parasites. La pollution par les pesticides peut donc entraîner une diminution de la fertilité des sols, une augmentation de la vulnérabilité aux maladies et une diminution de la biodiversité.

2.4.2 La pollution par les métaux lourds

Elle peut s'accumuler dans les sols et dans les organismes vivants. Les métaux lourds sont toxiques pour les plantes, les animaux et les humains. La pollution par les métaux lourds peut donc entraîner des problèmes de santé, une diminution des rendements agricoles et une contamination de la chaîne alimentaire.

2.4.3 La pollution par les radionucléides

Elle peut s'accumuler dans les sols et dans les organismes vivants. Les radionucléides sont toxiques et peuvent entraîner des problèmes de santé, notamment le cancer. La pollution par les radionucléides peut donc avoir un impact négatif sur la santé humaine et l'environnement.

Exemple de pollution par des éléments trace métallique (ETM) Les activités anthropiques peuvent mener à l'émission de polluants dans les écosystèmes du sol. Les activités minières et métallurgiques (industries qui purifient ou transforment des métaux) sont les principales sources d'ETM.

Les ETM impactent les microorganismes du sol et leur fonctionnement. Les premières observations des effets des ETM sur les processus microbiens du sol remontent au début des années 1900. Les ETM impacteraient la minéralisation du carbone. Plusieurs études rapportent par exemple que la MO, notamment la litière de feuilles, se décompose plus lentement dans des sols forestiers, proches de fonderies métallurgiques et contaminés en ETM.

Les ETM impactent également les biomasses et la structure de la communauté microbienne du sol. En effet, le plomb, le zinc, le cuivre, l'arsenic et le mercure influencent les microorganismes du sol. Les résultats montrent que les effets de ces ETM sur les microorganismes peuvent varier selon plusieurs facteurs: le type d'ETM, le type de sol, la dose introduite et le type de microorganisme.

La perte de qualité de la terre entraîne une série de conséquences négatives qui vont de leur dévaluation à l'impossibilité de les utiliser pour la construction, la culture ou, tout simplement, pour avoir un écosystème sain.

2.5 Bioremédiation et phytoremédiation

Il est très préoccupant pour l'environnement que la contamination du sol et des corps aquatiques par des composants polluants qui sont cancérigènes et toxiques connus puisse avoir

des effets nocifs sur les humains et d'autres formes de vie. Selon des découvertes récentes, de nombreuses souches de microbes possèdent des gènes capables de dégrader plusieurs formes d'hydrocarbures (par exemple aromatiques, aliphatiques).

La bioremédiation des sols est une stratégie qui vise à restaurer les écosystèmes contaminés à l'aide d'êtres vivants, tels que des bactéries, des plantes, des champignons (**figure 16**). En fonction du type de contamination que l'on veut combattre, on utilisera l'un ou l'autre agent de biorestauration. Son application est large, avec des résultats intéressants dans les sols contaminés par la radioactivité ou, par exemple, par les activités minières.

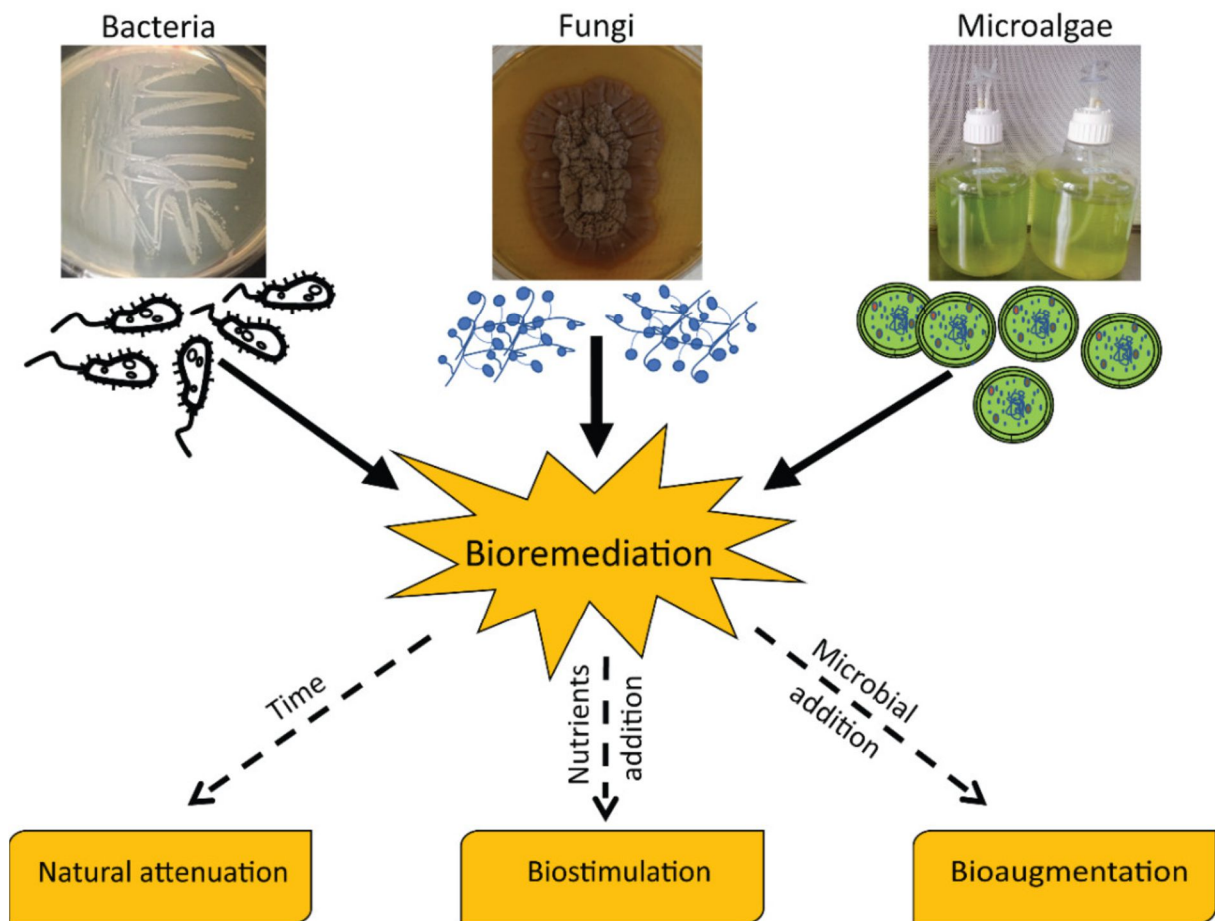


Figure 16. Les microorganismes utilisés dans la bioremédiation.

Parmi les bonnes pratiques, on retrouve le recyclage et le traitement adéquats des déchets, la promotion des énergies renouvelables et le recyclage des déchets au niveau industriel et domestique ainsi que la promotion de l'agriculture biologique. Également, on retrouve aussi le maintien des réseaux d'assainissement en bon état et l'amélioration de l'épuration des eaux usées, ainsi que le traitement des rejets industriels qui sont restitués à la nature.

La solution au problème de la pollution du sol passe donc par:

- Prévention et sensibilisation.
- L'interdiction des pratiques nuisibles.
- Amélioration des processus de recyclage.
- Amélioration des procédés de purification de l'eau.
- Utilisation des énergies renouvelables.
- Rénovation du système d'égouts.

2.5.1 Bioremédiation en utilisant des bactéries

Parmi les objectifs sont la décontamination et la bioremédiation des substances toxiques présentes dans le sol, telles que les substances dérivées du pétrole (SDP), l'utilisation de méthodes biologiques est devenue de plus en plus importante. Ces méthodes sont efficaces, avantageuses en termes économiques et sans danger pour le milieu naturel; Ils ont également une action remarquablement rapide. ZB-01 une préparation microbienne dont l'utilité est confirmée dans la décomposition des SDP.

La préparation provient d'un mélange de bactéries (*Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Burkholderia*, *Corynebacterium*, *Comamonas*, *Moraxella*, *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas*, *Ochrobactrum* et *Oligella*).

- Cette préparation a déjà été utilisée pour initier et stimuler la biodégradation de contaminants organiques dans des sols pollués par des boues de raffinerie et des boues pétrolières, ce qui a conduit à une diminution d'environ quatre à cinq fois les niveaux de contaminants après seulement 4,5 à 6 mois.
- Traiter les eaux usées contenant du pétrole provenant d'usines de transformation des métaux, où il a été observé une augmentation de la décomposition des polluants organiques d'environ 20% en seulement 18 jours.
- Dans le cas d'un fluide de travail des métaux hautement contaminé à base d'huile usée, une dégradation significative des contaminants après 14 jours a été obtenue en utilisant uniquement du ZB-01.
- Utilisation du ZB-01 pour la pollution du sol (3655 mgkg^{-1}) dans la zone d'une station-service d'une usine de l'industrie chimique. Le niveau de contaminants dans le sol était presque deux fois inférieur à 40 jours après l'application de la biopréparation.

2.5.2 Phytoremédiation

Le concept d'utilisation de plantes pour nettoyer un environnement contaminé est un concept ancien. Les plantes étaient recommandées pour le traitement des eaux usées il y a environ 300 ans. À la fin du XIXe siècle, *Thlaspi caerulescens* et *Viola calaminaria* ont été les premières espèces végétales à accumuler des niveaux élevés de métaux dans leurs feuilles. Plus tard, il a été rapporté que les plantes du genre *Astragalus* étaient capables d'accumuler jusqu'à 0,6% de sélénium dans la biomasse des pousses sèches. Malgré des rapports ultérieurs affirmant l'identification d'hyperaccumulateurs de Co, Cu et Mn, l'existence de plantes hyperaccumulatrices de métaux autres que Cd, Ni, Se et Zn a été remise en question et nécessite une confirmation supplémentaire.

Le premier essai sur le terrain sur la phytoextraction du Zn et du Cd a été mené en 1991. Au cours de la dernière décennie, des recherches approfondies ont été menées pour étudier la biologie de la phytoextraction des métaux. Malgré des succès significatifs, notre compréhension des mécanismes végétaux qui permettent l'extraction des métaux est encore émergente. De plus, les aspects appliqués pertinents, tels que l'effet des pratiques agronomiques sur l'élimination des métaux par les plantes, sont largement inconnus. Il est concevable que la maturation de la phytoextraction en une technologie commerciale dépende en fin de compte de l'élucidation des mécanismes végétaux et de l'application de pratiques agronomiques adéquates. La présence naturelle d'espèces végétales capables d'accumuler des niveaux de métaux extraordinairement élevés rend l'étude de ce processus particulièrement intéressante.

Certaines plantes peuvent absorber ou réduire la toxicité de différents polluants organiques ou de métaux et radioéléments, présents dans les sols. Elles les accumulent, transforment, dégradent, concentrent, stabilisent ou volatilisent...

Les OGM (organismes génétiquement modifiés) peuvent être utilisés dans la bioremédiation et la phytoremédiation pour améliorer l'efficacité de ces techniques. Les OGM peuvent être conçus pour augmenter la capacité des organismes à dégrader ou transformer les polluants.

2.5.3 Réduire la toxicité des polluants

Améliorer la résistance des organismes aux conditions environnementales difficiles. Les OGM peuvent être utilisés pour traiter une variété de polluants, notamment les hydrocarbures, les métaux lourds, les pesticides et les solvants.

2.5.4. Exemples d'OGM utilisés en bioremédiation et phytoremédiation

- Plantes OGM

Plantes capables de dégrader les hydrocarbures: des plantes OGM ont été développées pour exprimer des enzymes qui décomposent les hydrocarbures. Ces plantes peuvent être utilisées pour traiter les sols et les eaux contaminés par des hydrocarbures, tels que les pétroles bruts et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Plantes capables de fixer les métaux lourds: des plantes OGM ont été développées pour accumuler les métaux lourds dans leurs tissus. Ces plantes peuvent être utilisées pour traiter les sols et les eaux contaminés par des métaux lourds, tels que le mercure, le cadmium et le plomb.

- Bactéries OGM

Bactéries capables de dégrader les hydrocarbures: des bactéries OGM ont été développées pour exprimer des enzymes qui décomposent les hydrocarbures. Ces bactéries peuvent être utilisées pour traiter les sols et les eaux contaminés par des hydrocarbures.

Bactéries capables de fixer les métaux lourds: des bactéries OGM ont été développées pour accumuler les métaux lourds dans leurs cellules. Ces bactéries peuvent être utilisées pour traiter les sols et les eaux contaminés par des métaux lourds.

3.1 Introduction

Dès 1990, l'OMS (1999) a perçu l'importance des déterminants environnementaux de la santé, ce qui l'a amené à élargir sa définition de la santé de 1946: « la santé environnementale comprend les aspects de la santé humaine, y compris la qualité de la vie, qui sont déterminés par les facteurs physiques, chimiques, biologiques, sociaux, psychosociaux et esthétiques de notre environnement. Elle concerne également la politique et les pratiques de gestion, de résorption, de contrôle et de prévention des facteurs environnementaux susceptibles d'affecter la santé des générations actuelles et futures ».

Partant du constat de l'impact de la qualité des écosystèmes sur la santé humaine, le concept d'exposome a émergé. Celui-ci est défini comme la totalité des expositions à des facteurs environnementaux que subit un organisme humain, depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie en passant par le stade du développement *in utero*. La notion de « One health » insiste en outre sur la bidirectionnalité des relations et appelle à développer des approches intégrées pour garantir une santé environnementale globale (humaine, végétale, animale et écosystémique).

L'évaluation et les impacts de la pollution sur l'environnement sont des préoccupations cruciales en raison de leurs effets néfastes sur les écosystèmes, la biodiversité, la qualité de l'air, de l'eau et du sol, ainsi que sur la santé humaine.

3.2 Écotoxicologie, impact environnemental et risques

Le terme écotoxicologie est un condensé des mots « écologie » et « toxicologie ». Le but de l'écotoxicologie est d'étudier les effets des substances chimiques (toxicologie) sur les espèces vivantes mis à part l'Homme (écologie).

L'écotoxicologie est une discipline scientifique qui étudie les effets des substances chimiques, physiques ou biologiques sur les organismes vivants et les écosystèmes. Elle permet de comprendre les mécanismes par lesquels les substances toxiques perturbent les organismes et les écosystèmes, et d'évaluer les risques qu'elles représentent pour l'environnement.

Les progrès scientifiques dans ce domaine permettent de mieux comprendre les mécanismes par lesquels les substances toxiques perturbent les organismes et les écosystèmes, et de développer des mesures de prévention et de protection plus efficaces.

L'impact environnemental est l'ensemble des modifications qualitatives, quantitatives et fonctionnelles de l'environnement (négatives ou positives) engendrées par une activité humaine. Il peut être causé par une multitude de facteurs, notamment la pollution, la destruction des habitats, l'exploitation des ressources naturelles, le changement climatique, etc.

Les risques environnementaux sont les conséquences potentielles d'un impact environnemental négatif. Ils peuvent affecter la santé humaine, la biodiversité, les ressources naturelles, etc.

3.2.1 Les principaux impacts environnementaux

- Pollution de l'air, de l'eau et des sols: les activités humaines rejettent dans l'environnement une multitude de substances toxiques, qui peuvent avoir un impact négatif sur la santé humaine, la biodiversité et les ressources naturelles.
- Dégradation des habitats: la destruction des forêts, des zones humides et des autres habitats naturels perturbe les cycles biologiques et réduit la biodiversité.
- Exploitation des ressources naturelles: l'extraction minière, l'agriculture et l'industrie consomment des ressources naturelles et peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement.
- Changement climatique: le réchauffement de la planète est causé par les émissions de gaz à effet de serre, qui perturbent le climat et ont un impact négatif sur les écosystèmes.

3.2.2 Les principaux risques environnementaux

- Risques sanitaires: les substances toxiques peuvent affecter la santé humaine, notamment en provoquant des cancers, des malformations congénitales et des troubles du développement.
- Risques écologiques: les substances toxiques peuvent perturber les organismes et les écosystèmes, notamment en entraînant la mort des espèces, la modification des populations et la destruction des habitats.
- Risques économiques: les impacts environnementaux peuvent avoir un impact négatif sur l'économie, notamment en réduisant la productivité agricole, en augmentant les coûts de santé et en dévalorisant les biens immobiliers.

L'écotoxicologie joue un rôle important dans la gestion des risques environnementaux. Elle permet d'identifier les substances toxiques, d'évaluer leur impact sur l'environnement et de développer des mesures de prévention et de protection.

Les principales applications de l'écotoxicologie en matière de gestion des risques environnementaux sont les suivantes:

- Évaluation des risques: l'écotoxicologie permet d'évaluer les risques potentiels d'un impact environnemental négatif.
- Développement de mesures de prévention: l'écotoxicologie permet de développer des mesures de prévention pour réduire les risques environnementaux.

- Prise de décision: l'écotoxicologie fournit des informations scientifiques qui peuvent être utilisées pour prendre des décisions en matière de gestion des risques environnementaux.

3.3 Contribution des sols et de l'agriculture à la qualité de l'atmosphère

Les aérosols présents dans l'atmosphère - particules - ont une origine anthropique ou naturelle, et présentent une grande variabilité de taille et de nature chimique. Ces particules peuvent provoquer/aggraver des maladies respiratoires et cardio-vasculaires, affectent le bilan radiatif terrestre et le climat. Leur origine peut être variée: certaines particules sont émises directement dans l'atmosphère (les aérosols primaires), d'autres vont se former au cours d'une chaîne chimique complexe (les aérosols secondaires).

Les sols et l'agriculture jouent un rôle significatif dans la qualité de l'atmosphère, tant en termes de contributions positives que négatives (**figure 17**).

1. Contributions positives à la qualité de l'atmosphère:

- Absorption du dioxyde de carbone (CO_2): les sols, en particulier les sols forestiers et les prairies, agissent comme des puits de carbone. Ils absorbent le CO_2 atmosphérique grâce à la photosynthèse des plantes et au stockage de la MO dans le sol, contribuant ainsi à la réduction de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère et à la lutte contre le changement climatique.
- Émission d'oxygène (O_2): les plantes cultivées dans l'agriculture produisent de l'oxygène lors de la photosynthèse, ce qui est essentiel pour le maintien de la qualité de l'air.

2. Contributions négatives à la qualité de l'atmosphère:

- Émissions de gaz à effet de serre: l'agriculture est une source importante d'émissions de gaz à effet de serre, notamment le méthane (CH_4) provenant des ruminants (comme les vaches) et l'oxyde nitreux (N_2O) provenant de l'utilisation d'engrais. Ces gaz contribuent au réchauffement climatique et à la dégradation de la qualité de l'air.
- Émissions d'ammoniac (NH_3): l'utilisation d'engrais azotés et l'élevage intensif peuvent entraîner des émissions d'ammoniac dans l'atmosphère. L'ammoniac peut réagir avec d'autres polluants atmosphériques pour former des particules fines (aérosols), ce qui peut avoir des effets néfastes sur la qualité de l'air.
- Pollution de l'air par les particules fines: les activités agricoles, telles que la tilling (labour) des champs et le brassage des sols, peuvent augmenter la quantité de particules fines en suspension dans l'air, ce qui peut avoir des conséquences sur la santé humaine en causant des problèmes respiratoires.

- Utilisation de pesticides: l'utilisation de pesticides en agriculture peut entraîner la libération de composés chimiques dans l'atmosphère, ce qui peut avoir des répercussions sur la qualité de l'air. Certains de ces produits chimiques peuvent être transportés par le vent sur de longues distances.
- Les composés organiques volatils (COV), qui sont émis par les plantes, les animaux et les activités agricoles, peuvent contribuer à la formation de l'ozone et d'autres polluants atmosphériques.

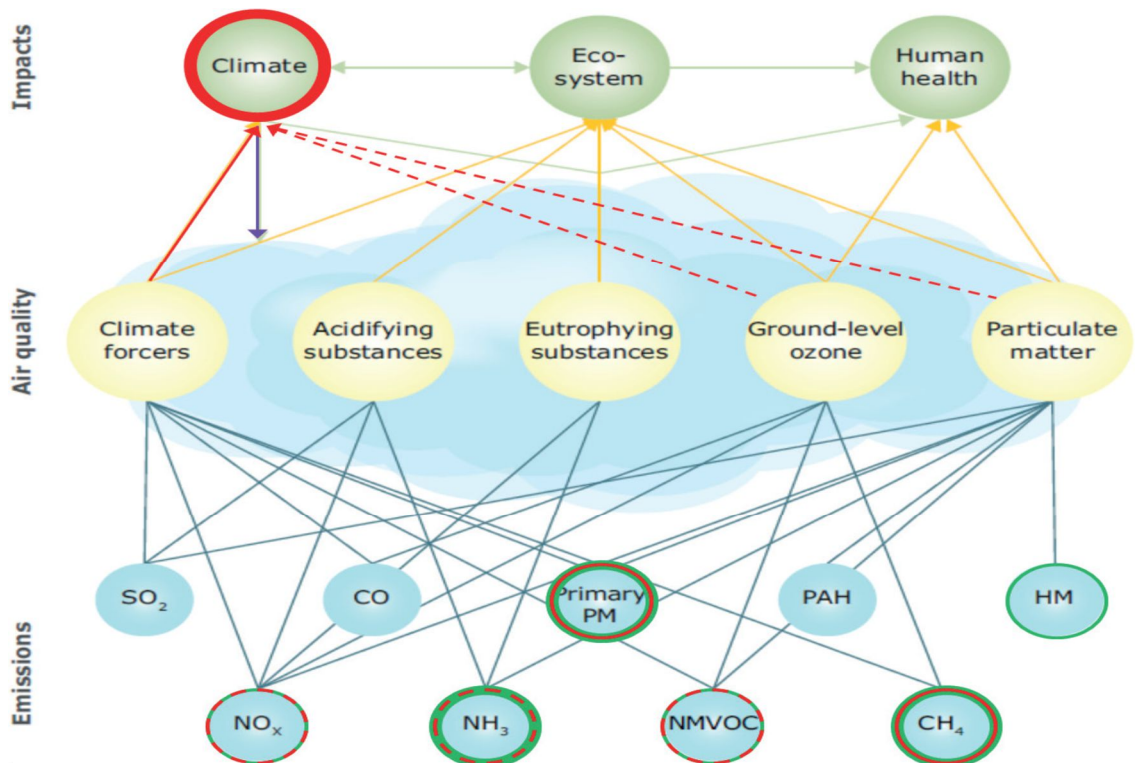


Figure 17. Illustration des liens entre les polluants atmosphériques et les impacts sur la santé humaine, sur les écosystèmes et le climat. Les composés cerclés de vert sont ceux qui concernent l'agriculture, l'épaisseur du trait étant fonction de l'importance des émissions agricoles pour ce composé. Les cercles rouges indiquent que les composés ont également un pouvoir d'effet de serre direct (cercle continu) ou indirect (cercle en tirets).

SO₂ : dioxyde de soufre,

CO : monoxyde de carbone (utilisation de combustibles fossiles, respiration du sol et des cultures),

NO_x : (conséquence de la fertilisation azotée),

CH₄ : Méthane (fermentation entérique des ruminants, fermentation anaérobie),

PM : Particules primaires (travail du sol, combustion),

NH₃ : Ammoniac,

COV : Composés organiques volatils,

COVNM : Composés organiques volatils non méthaniques,

PAH : Particules secondaires engendrées par les COV,

HM : Élément trace métallique.

3.4 Les sols et l'agriculture comme sources de carbone et de polluants

Les sols et l'agriculture peuvent également contribuer à la qualité de l'atmosphère en tant que sources de carbone.

- Les sols peuvent absorber le carbone de l'atmosphère, ce qui contribue à lutter contre le changement climatique.
- Les plantes peuvent absorber les polluants atmosphériques, tels que l'ozone, le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote.
- Les sols peuvent filtrer les polluants atmosphériques, tels que les particules fines et les métaux lourds.

3.5 Mesures pour réduire les émissions agricoles de polluants atmosphériques

Il existe un certain nombre de mesures qui peuvent être prises pour réduire les émissions agricoles de polluants atmosphériques, ainsi à améliorer la qualité de l'air et à protéger la santé humaine et l'environnement:

- Améliorer la gestion des engrais azotés
- Réduire l'utilisation des pesticides
- Améliorer l'efficacité énergétique des machines agricoles
- Mettre en place des pratiques agricoles favorables au climat

3.6 Impact écologique des inocula microbiens dans l'agro-système

Les inocula microbiens sont des mélanges de microbes, tels que des bactéries, des champignons et des levures, qui sont appliqués sur les plantes ou le sol pour améliorer la croissance et la santé des plantes.

L'agrosystème est un écosystème agricole artificiel modifié ou créé et géré par l'Homme afin de satisfaire des besoins alimentaires, industriels ou énergétiques. On parle d'élevage dans le cadre d'une production animale, de culture pour une production végétale.

Voici quelques exemples spécifiques de l'impact écologique des inocula microbiens:

- Une étude a montré qu'un inoculum bactérien a permis de réduire la quantité d'engrais azoté nécessaire pour les cultures de soja de 20 à 40%.
- Une autre étude a montré qu'un inoculum fongique a permis de réduire la quantité de pesticides nécessaire pour les cultures de pommes de terre de 50 à 75%.
- Une troisième étude a montré qu'un inoculum bactérien a permis d'améliorer la qualité du sol et de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans un système de culture du riz.

Bien entendu, les inocula microbiens ne constituent pas un remède. Ils doivent être utilisés de manière appropriée pour obtenir les meilleurs résultats. Il est important de choisir un inoculum adapté à la culture et aux conditions locales. Il est également important de suivre les instructions du fabricant pour assurer une application correcte.

L'utilisation d'inocula microbiens dans les agro-systèmes peut avoir à la fois des avantages et des inconvénients sur le plan écologique. Voici un aperçu des principaux impacts écologiques associés à l'utilisation d'inocula microbiens dans l'agriculture:

Impacts positifs

Amélioration de la santé des sols: les inocula microbiens peuvent contribuer à la restauration et à la préservation de la santé des sols en favorisant des populations microbiennes bénéfiques. Ils peuvent augmenter la biodiversité microbienne, améliorer la structure du sol et favoriser la décomposition des MO.

Augmentation de la fertilité des sols: certains inocula microbiens, comme les bactéries fixatrices d'azote et les mycorhizes, peuvent contribuer à l'apport de nutriments essentiels aux plantes, ce qui peut réduire le besoin d'engrais chimiques.

Lutte biologique contre les pathogènes: les inocula microbiens contenant des organismes antagonistes ou compétiteurs des pathogènes des plantes peuvent contribuer à la réduction de l'utilisation de pesticides chimiques en agissant comme des agents de lutte biologique.

Résilience des cultures: les inocula microbiens peuvent améliorer la résistance des cultures aux stress environnementaux, tels que la sécheresse, les maladies et les changements de pH du sol.

Impacts négatifs potentiels

Altération de la biodiversité microbienne: l'introduction d'inocula microbiens exotiques peut modifier la composition de la microbiologie du sol, ce qui peut avoir des conséquences imprévues sur la biodiversité microbienne indigène.

Déplacement d'espèces indigènes: les inocula microbiens exotiques ou agressifs peuvent potentiellement concurrencer ou déplacer les microorganismes indigènes, ce qui peut perturber les écosystèmes locaux.

Résistance aux pathogènes: une utilisation excessive d'agents de lutte biologique basés sur des inocula microbiens peut favoriser l'émergence de souches résistantes de pathogènes, compliquant ainsi la lutte contre les maladies des cultures.

Effets sur la qualité de l'eau: l'utilisation d'inocula microbiens peut entraîner le lessivage de nutriments et de microorganismes dans les eaux souterraines et de surface, contribuant à la pollution de l'eau.

Effets sur la faune: les microorganismes introduits peuvent affecter la faune dépendante des ressources microbiennes du sol, comme les vers de terre et les insectes.

Pour minimiser les impacts écologiques négatifs, il est essentiel de choisir judicieusement les inocula microbiens, de favoriser les produits contenant des souches indigènes, de mettre en place des pratiques agricoles durables, de surveiller les effets environnementaux et de respecter les réglementations en vigueur. Une approche de gestion intégrée qui prend en compte l'équilibre entre les avantages et les inconvénients est essentielle pour une utilisation responsable des inocula microbiens dans les agro-systèmes.

3.7 Dépollution des eaux douces

3.7.1 Définition de la pollution

C'est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaines, au travers des effets directs ou indirects des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et autre produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède, les possibilités récréatives des milieux ou encore en enlaidissant la nature.

La pollution des eaux de surface s'inscrit dans un contexte de changement global. Les milieux aquatiques sont donc généralement soumis à une multiplicité de pressions chimiques (pollutions trophiques et toxiques) et/ou physiques. De ce fait, les communautés aquatiques sont le plus souvent exposées à des situations de multi-stress (ou stress multiple). Une des questions prégnantes en écotoxicologie concerne donc l'évaluation des impacts toxiques dans le cas de mélanges (à faibles doses) ou de combinaison multi-stress.

L'eau est indispensable pour l'environnement, cependant, les activités domestiques et industrielles (textiles, pharmaceutiques...), causent sa pollution quand les stations d'épuration ne parviennent pas à la traiter. Afin de préserver la qualité de l'eau et faire face à la pénurie croissante en cette ressource naturelle vitale, plusieurs équipes de recherches développent des techniques innovantes de dépollution de l'eau. Le défi est créé des systèmes capables de détruire les polluants difficiles à éliminer aujourd'hui.

3.7.2 Les sources de la pollution de l'eau

Les principales sources de contamination des eaux sont anthropiques, c'est-à-dire qu'elles proviennent des activités humaines. Parmi ces causes, on retrouve continuellement dans le milieu:

Les rejets agricoles: ils sont source de polluants chimiques (pesticides, nitrates et phosphates des engrais) et de microorganismes comme les bactéries, provenant des excréments d'animaux. Drainés par les pluies, ces contaminants finissent par rejoindre les cours d'eaux, les rivières et pour ensuite finir dans les mers et les océans.

Des rejets urbains provenant des eaux utilisées dans les immeubles et habitations (évier, douches, toilettes etc.) font partie et contiennent des molécules chimiques, ainsi que des microorganismes. Ces eaux usées sont traitées en station d'épuration pour tenter d'éliminer les contaminants avant d'être rejetées dans le milieu naturel. Malheureusement, certaines substances résistent au traitement et ne sont pas dégradées.

Des rejets industriels provenant des entreprises fabricants des médicaments, des emballages, des voitures et autres, contenant des milliers de tonnes de polluants chimiques (hydrocarbures, plastiques, métaux lourds...).

Il existe d'autres sources de pollution liée aux activités humaines, comme les accidents industriels (fuites de produits chimiques, marées noires etc.), les eaux ruisselant le long des rues qui entraînent les déchets directement vers le milieu naturel, ou encore les rejets d'eaux chaudes des centrales nucléaires.

La pollution peut également être d'origine naturelle, avec par exemple une libération de métaux lourds enfermés dans une roche ancienne ou encore une abondance de micro algues toxiques dans l'océan. Cependant, une pollution dite d'origine naturelle est souvent causée par des facteurs anthropiques. En effet, une multiplication de micro-algues peut être liée à la présence d'une grande quantité de phosphate et de nitrate provenant des engrais agricoles.

3.8 La dépollution

La dépollution désigne l'élimination des pollutions et des contaminations des milieux ambiants tels que les sols, les nappes phréatiques, les sédiments ou les eaux de surface. Les enjeux de la dépollution sont souvent financiers mais aussi d'intérêt général (protection de la santé publique et de l'environnement).

Pour la dépollution des eaux, des procédés physiques (sorption sur résines, sorption sur minéraux) et des procédés biologiques (utilisation des plantes et des microorganismes

accumulatrices). Les procédés biologiques de dépollution représentent le mécanisme le plus économiques, sans effets néfastes pour l'environnement et souvent efficace.

L'utilisation des microorganismes offre un potentiel intéressant, qui peut être hautement sélectif, efficace et peu coûteux. Ils peuvent devenir compétitifs avec les résines échangeuses d'ions et les minéraux.

3.8.1 Phytorestauration: un mécanisme de dépollution de l'eau

L'utilisation des filtres plantés de Roseaux (**figure 18**) sous le nom de « Phragmifiltre » semble être une bonne alternative aux stations d'épuration.

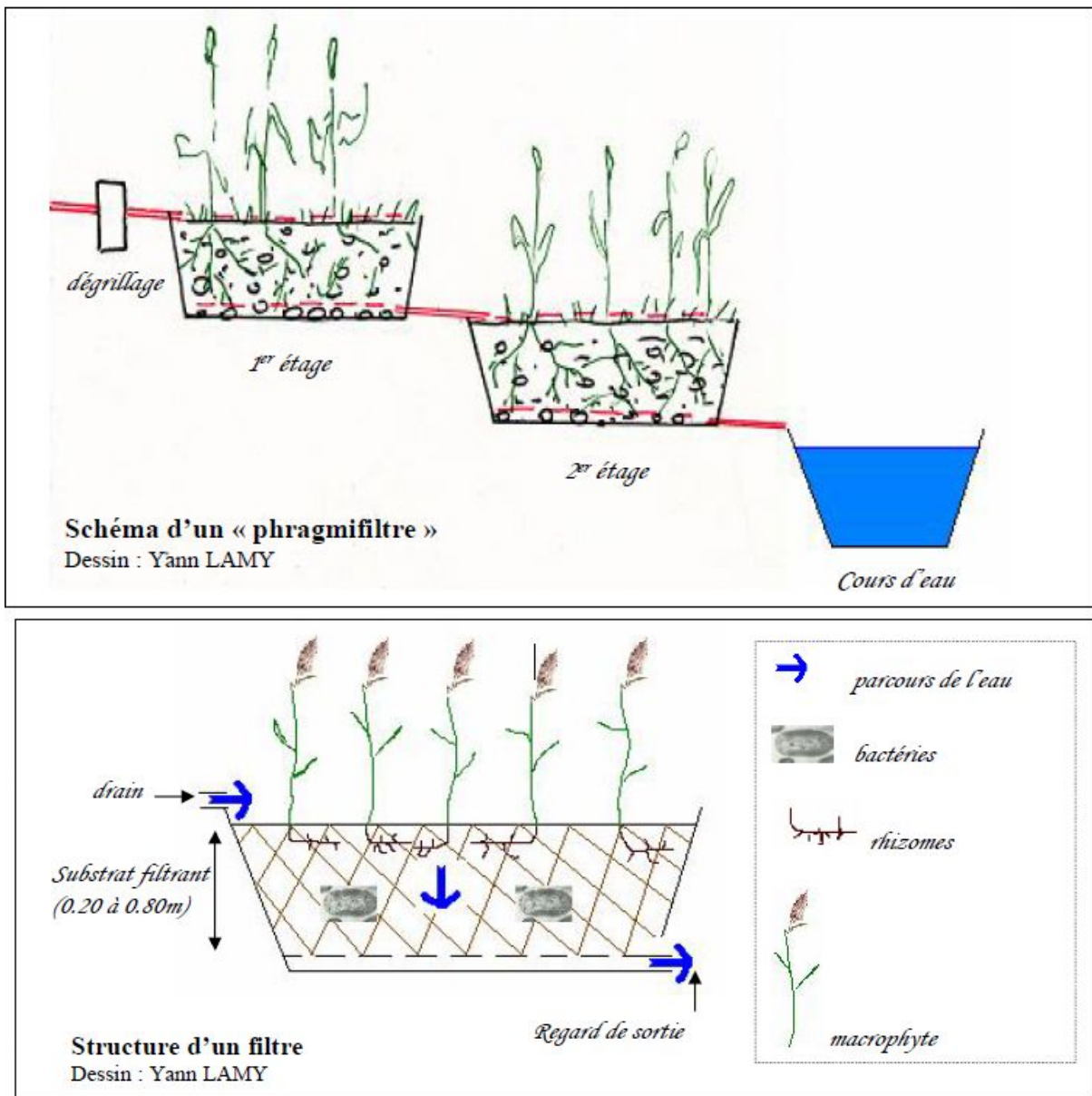


Figure 18. Des filtres plantés de Roseaux « Phragmifiltre ».

Ces filtres sont constitués de deux étages de traitement par filtration verticale et alimentés en eaux brutes après un simple dégrillage (éliminer les débris et autres gros objets). L'eau est ensuite envoyée sur le premier étage (composé de trois filtres en parallèle), l'eau subit une filtration physique ainsi que biologique par l'activité des microorganismes (bactéries). Le second étage est composé de deux filtres, l'eau subit aussi un traitement biologique.

La qualité de l'eau en sortie respectant largement la réglementation et le faible coût de fonctionnement en font un système très intéressant. D'autres systèmes innovants sont utilisés pour la dépollution de l'eau telle que les lombrics (ingénieurs écologiques).

3.8.2 Dépollution des eaux usées contaminées par des métaux lourds

Les rejets d'effluents ne correspondent pas toujours aux normes quand les traitements utilisés sont l'ultra-filtration, l'échange d'ions, ... on fait donc appel aux propriétés de certains micro-organismes à fixer sélectivement et en quantités appréciables des métaux lourds. En effet certains micro-organismes sont capables d'accumuler les métaux lourds par mécanisme de bio-fixation. Cette fixation peut être soit actif, nécessitant une activité métabolique, soit passif, ne nécessitant pas d'activité métabolique (**tableau 3**).

Tableau 3. Mécanismes de fixation des métaux par les bactéries.

| Mécanismes de fixation | Bactéries |
|--|--|
| Actif intracellulaire Transfert à travers la membrane et exclusion d'ions | <i>Staphylococcus aureus</i> <i>E. coli</i> |
| Synthèse de protéines: pseudothionéines | <i>Pseudomonas putida, E. coli, Vibrio marin</i> |
| Actif extracellulaire Précipitation en surface cellulaire avec PO ₄ ³⁻ ou sous forme cadmium sulfide Exopolysaccharides | <i>Citrobacter sp.</i> <i>Klebsiella aerogenes</i> <i>Zoogloea ramigera, Klebsiella aerogenes, Azotobacter sp.</i> |
| Capsule polysaccharides | <i>Pseudomonas putida, Arthrobacter viscosus</i> |
| Passif intracellulaire Adsorption-complexation (diffusion simple) | |
| Passif extracellulaire Adsorption-complexation | <i>E. coli K12, Bacillus subtilis</i> <i>Micrococcus luteus</i> |

Une grande diversité de biomasses montre des capacités de fixation importantes: bactéries, algues, levures, champignons.

Des auteurs ont étudié l'adsorption de l'uranium sur *Streptomyces albus*, ces cellules immobilisées adsorbent l'uranium de manière sélective. L'uranium adsorbé était désorbé avec NaCO_3 . Les résultats ont montré que les cellules sont plus stables après immobilisation et peuvent être utilisées de façon répétée pour le processus adsorption-désorption.

Une étude a montré que le Cd s'adsorbe sur la paroi de la souche *Pseudomonas putida* avec un rendement de 90 - 97%, d'où une dépollution efficace possible d'effluents métallifères. Un meilleur rendement de fixation est obtenu à pH7 à 30 °C.

3.8.3 Biodégradation des herbicides dans le sol

3.8.3.1 Définition des herbicides

Un herbicide est un produit phytopharmaceutique à usage agricole qui cible plus précisément les mauvaises herbes. Il s'agit de molécule, de synthèse ou d'une substance naturelle, qui possède une activité sur le métabolisme des plantes entraînant ainsi la mort de ces dernières, il sert à éliminer les plantes indésirables qui ne peuvent que nuire aux rendements, en raison de la compétition sur les nutriments ou sur l'espace, qu'elles exercent sur les cultures en émergence.

3.8.3.2 Classification des herbicides

Il existe de nombreux herbicides à la disposition des agriculteurs. On peut les classer selon différents critères, que ce soit le but, le moment d'application (ou de traitement), mode de pénétration dans la plante ou bien la famille chimique ou la sélectivité. La **figure 19** résume la classification des herbicides selon ces critères.

La biodégradation des herbicides dans le sol est un processus naturel par lequel des organismes vivants, tels que des bactéries, des champignons et des protozoaires, transforment ces substances chimiques en composés plus simples et non toxiques. Ce processus est essentiel pour la protection de l'environnement, car il permet de limiter la contamination des sols et des eaux par les herbicides.

La biodégradation des herbicides est un processus complexe qui peut être influencé par de nombreux facteurs, tels que la nature de l'herbicide, les conditions du sol et la présence d'autres organismes vivants.

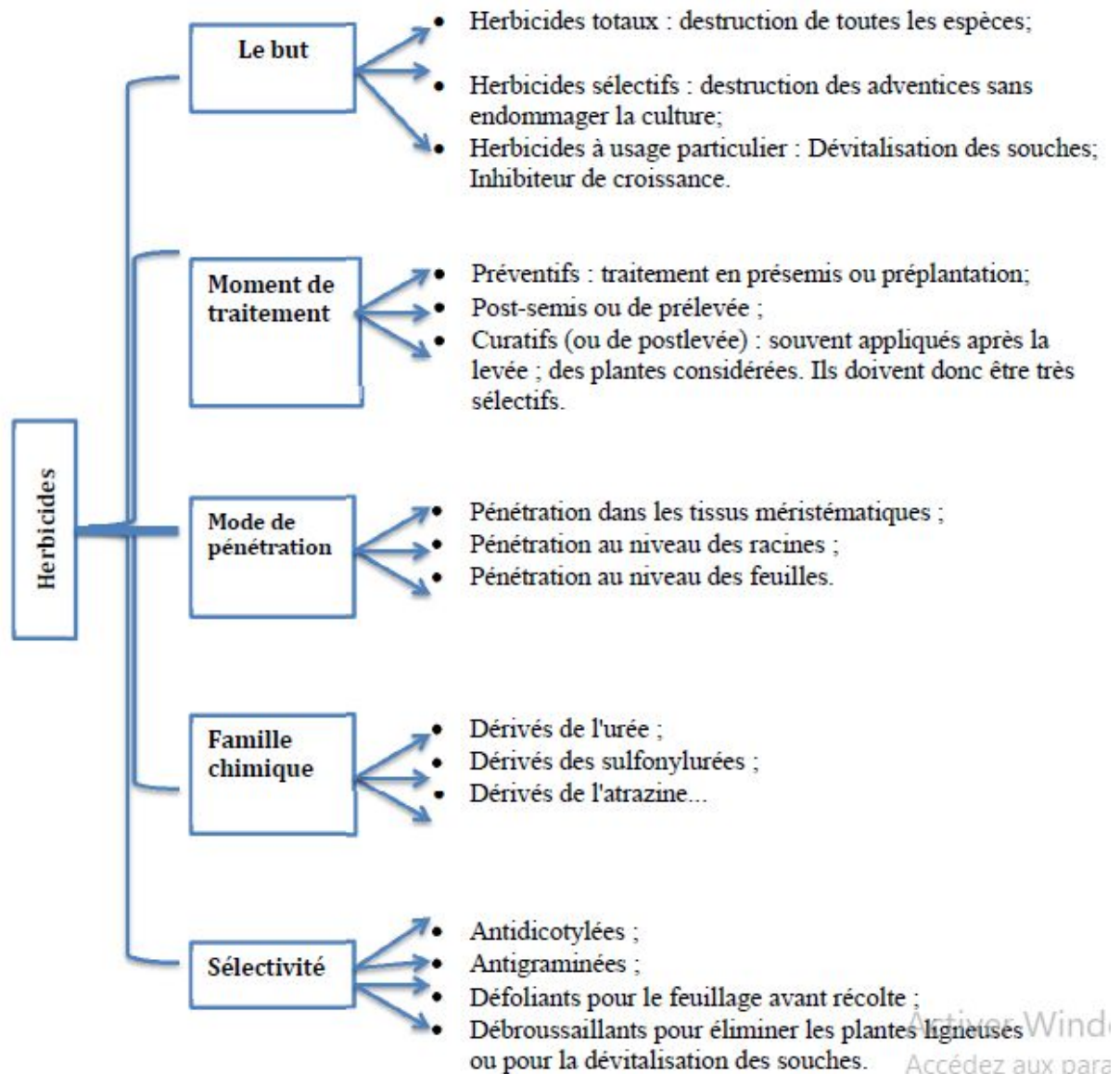


Figure 19. Classification des herbicides.

3.8.3.3 Les facteurs influençant la biodégradation des herbicides

La nature de l'herbicide est le facteur le plus important influençant sa biodégradation. Les herbicides peuvent être classés en deux grandes catégories: les herbicides de contact et les herbicides systémiques. Les herbicides de contact agissent uniquement sur les tissus des plantes qu'ils touchent, tandis que les herbicides systémiques sont absorbés par les racines des plantes et se propagent dans tout le système vasculaire. Les herbicides de contact sont généralement plus faciles à biodégrader que les herbicides systémiques.

Les conditions du sol peuvent également influencer la biodégradation des herbicides. La température, l'humidité, le pH et la composition minérale du sol peuvent tous affecter la vitesse et l'efficacité de la biodégradation. En général, les herbicides sont plus facilement biodégradables dans des sols chauds et humides que dans des sols froids et secs.

La présence d'autres organismes vivants dans le sol peut également influencer la biodégradation des herbicides. Les bactéries, les champignons et les protozoaires jouent un rôle important dans la biodégradation des herbicides. Les bactéries sont les organismes les plus efficaces pour biodégrader les herbicides.

- Exemple d'une dégradation d'un herbicide :

Le dicamba (acide 3,6-dichloro-2-méthoxybenzoïque) est utilisé comme herbicide pour la lutte sélective contre les mauvaises herbes de la famille du blé noir dans les céréales. Il est également appliqué pour lutter contre les mauvaises herbes à larges feuilles dans les parcours dans les prairies et les pâturages. Une étude a montré que le dicamba subit une dégradation dans les sols humides non stériles. Cet herbicide est plus rapidement dégradé sur les sols organiques que sur les sols argileux ou sablonneux et le taux de dégradation augmente à des températures plus élevées et avec l'humidité du sol. Sa dégradation est d'origine microbienne puisque, le sol stérilisé n'a pas permis sa dégradation.

3.9 Impact des produits polluants sur les micro-organismes

Les microorganismes, tels que les bactéries, les champignons et les protozoaires, sont des organismes vivants essentiels à la santé des écosystèmes. Ils jouent un rôle important dans la décomposition de la MO, la fixation de l'azote, le cycle du carbone et d'autres processus vitaux. Les produits polluants, tels que les métaux lourds, les pesticides, les herbicides et les produits pharmaceutiques, peuvent avoir un impact négatif ou positif sur les microorganismes. Ces substances peuvent être toxiques pour les microorganismes, ce qui peut entraîner leur mort ou leur diminution, ou contraire, ils peuvent s'adapter aux agents polluants engendrant sa dégradation.

Impact négatif: les effets des produits polluants sur les microorganismes peuvent être à court terme ou à long terme. Les effets à court terme peuvent se manifester par une diminution du nombre de microorganismes, une réduction de leur activité ou des changements dans leur structure génétique. Les effets à long terme peuvent entraîner une perte de la diversité microbienne, une diminution de la productivité des écosystèmes et une augmentation du risque d'épidémies.

Les produits polluants peuvent avoir un impact sur les microorganismes de différentes manières. Ils peuvent être absorbés par les microorganismes, ce qui peut les rendre toxiques. Ils peuvent également modifier l'environnement des microorganismes, ce qui peut les empêcher de se développer ou de se reproduire.

Impact positif, le développement d'outils permettant d'établir les liens entre exposition aux toxiques et effets biologiques représente un enjeu particulièrement important afin d'appréhender finement l'impact des contaminants sur la qualité écologique des milieux récepteurs. L'exposition chronique des communautés microbiennes à de faibles doses de toxiques organiques ou inorganiques peut se traduire par la sélection d'espèces tolérantes mais également par des phénomènes d'adaptation génétique ou physiologique. Au sein des communautés microbiennes, ces processus d'adaptation peuvent ainsi engendrer l'acquisition et le développement de capacités de tolérance ou de biodégradation pour les composés métabolisables. L'étude de ces capacités adaptatives, généralement assez spécifiques d'un composé ou d'une famille de composés, s'avère donc très prometteuse pour établir *in situ* des liens entre exposition et effets biologiques sur les communautés microbiennes.

3.9.1 Adaptation à la biodégradation des pesticides

Parmi les impacts positifs important, en cas d'exposition prolongée à des polluants organiques, les processus d'adaptation microbienne peuvent aussi conduire à la stimulation des capacités de biodégradation de ces composés. Cette fonctionnalité concerne principalement les microorganismes hétérotrophes (essentiellement les bactéries et les champignons) capables de dégrader les polluants (totalement ou partiellement) en les utilisant comme source énergétique. Ces processus d'adaptation microbienne ont principalement été étudiés à partir d'approches culturelles visant à isoler et caractériser des souches dégradantes ou par l'évaluation du potentiel de dégradation de communautés naturelles provenant de sols agricoles. Ces travaux suggèrent donc l'existence d'un lien fort entre l'historique d'exposition des communautés microbiennes édaphiques aux pesticides et leurs capacités à les dégrader.

Suite à une application régulière et/ou en grande concentration de différents polluants, les bactéries du sol ont acquis et/ou développé la capacité de les métaboliser et de les utiliser comme source nutritive dans un milieu où les nutriments sont rares. Cette adaptation des bactéries aux molécules xénobiotiques se réalise via différents évènements:

- l'induction d'enzymes spécifiques qui étaient absentes (ou présentes à un faible niveau) dans la population avant l'exposition au contaminant.

- la sélection de nouvelles capacités métaboliques suite à des événements de mutations. Il a été récemment montré que sous forte pression d'atrazine et après 320 générations, la souche dégradante *Pseudomonas* sp. ADP a augmenté sa capacité de dégradation en dupliquant un gène intervenant dans le processus.
- l'acquisition de cette information génétique par transfert horizontal de gènes (souvent d'origine plasmidique)
- l'augmentation du nombre d'organismes capables de catalyser la réaction de dégradation.

3.10 Réhabilitation par voie biologique des sédiments contaminés après un apport massif d'hydrocarbures

3.10.1 Le devenir des hydrocarbures

Du fait de la très faible solubilité des hydrocarbures dans l'eau, ils s'étalent à la surface avant de subir une série de modifications suite à l'action de facteurs abiotiques et biologiques.

La sédimentation est le passage du pétrole de la surface vers le fond. Ce phénomène concerne les résidus goudronneux constitués de la fraction pétrolière la plus lourde et dont la densité est supérieure à celle de l'eau de mer. Les hydrocarbures adsorbés préférentiellement sur les particules en suspension sont entraînés gravitairement vers le sédiment marin. Ce phénomène est d'ailleurs capital en termes d'exportation de la surface vers le fond, notamment en eau océanique profonde. La sédimentation conduit à la constitution d'agrégats de haute densité difficilement dégradables par voie naturelle.

La réhabilitation par voie biologique des sédiments contaminés après un apport massif d'hydrocarbures consiste à stimuler la biodégradation des contaminants par les microorganismes présents naturellement dans les sédiments ou introduits artificiellement. C'est une technique prometteuse qui présente un potentiel important pour la restauration des milieux aquatiques pollués par les hydrocarbures.

Les hydrocarbures sont des composés organiques qui comprennent les pétroles, les combustibles fossiles, les solvants et les produits pétroliers. Ils sont très toxiques pour les organismes aquatiques et peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement.

La biodégradation est un processus naturel par lequel les microorganismes décomposent les substances organiques. Dans le cas des hydrocarbures, ce processus est catalysé par des enzymes spécifiques produites par les microorganismes.

Bioremédiation: voir section 2.5.1.

Phytoremédiation: voir section 2.5.2.

Mycoremédiation: utilise des champignons pour dégrader les hydrocarbures. Certains champignons sont capables de décomposer les contaminants pétroliers en produits moins toxiques. Cette méthode est encore en cours de recherche et développement.

Biopiles: sont des installations conçues pour stimuler la bioremédiation en créant des conditions favorables à la croissance des microorganismes dégradant les hydrocarbures. Les sédiments contaminés sont empilés en couches dans des bacs, et des bactéries pétrolières sont introduites, tout en maintenant des niveaux d'oxygène, de nutriments et de température optimaux.

Bioaugmentation: consiste à introduire délibérément des souches spécifiques de bactéries dégradant les hydrocarbures dans les sédiments contaminés pour accélérer le processus de dégradation. Cela peut être particulièrement utile lorsque les microorganismes indigènes ne sont pas suffisamment actifs.

Surveillance environnementale: il est essentiel de surveiller en permanence l'efficacité de la réhabilitation par voie biologique en effectuant des analyses chimiques et biologiques pour évaluer la réduction des niveaux de contaminants et la récupération de l'écosystème.

3.10.2 Procédure de réhabilitation

La réhabilitation par voie biologique des sédiments contaminés se déroule en plusieurs étapes :

- Évaluation de la contamination

La première étape consiste à évaluer l'étendue et la gravité de la contamination. Cette évaluation permet de déterminer la technique de biodégradation la plus appropriée.

- Préparation du site

La deuxième étape consiste à préparer le site pour le traitement biologique. Cela peut impliquer le retrait de la végétation aquatique, l'élimination des sédiments non contaminés et l'ajout de nutriments ou d'oxygène.

- Application de la technique de biodégradation

La troisième étape consiste à appliquer la technique de biodégradation choisie. Cela peut impliquer l'ajout de nutriments, d'oxygène ou d'enzymes, ou l'introduction artificielle de microorganismes.

- Suivi du traitement

La quatrième étape consiste à suivre le traitement pour s'assurer qu'il est efficace. Cela implique la mesure de la concentration des contaminants dans les sédiments.

- **Exemples de projets de réhabilitation**

La réhabilitation par voie biologique des sédiments contaminés a été utilisée avec succès dans de nombreux projets à travers le monde.

Un exemple notable est le projet de réhabilitation des sédiments contaminés par des hydrocarbures dans le port de Rotterdam, aux Pays-Bas. Ce projet a utilisé une technique de bioaugmentation pour traiter une zone de 100 hectares de sédiments. Les résultats ont montré que la concentration des hydrocarbures dans les sédiments a été réduite de plus de 90%.

Un autre exemple est le projet de réhabilitation des sédiments contaminés par des hydrocarbures dans la baie de Chesapeake, aux États-Unis. Ce projet a utilisé une technique de biostimulation pour traiter une zone de 10 hectares de sédiments. Les résultats ont montré que la concentration des hydrocarbures dans les sédiments a été réduite de plus de 70%.

3.10.3 Avantages et limites de la biodégradation

La biodégradation est une méthode naturelle et durable d'assainissement des sédiments contaminés. Elle est également relativement peu coûteuse et peut être utilisée sur place, ce qui réduit les risques de pollution environnementale.

Cependant, la biodégradation peut être lente, en particulier pour les hydrocarbures complexes. De plus, elle peut être inhibée par la présence de certains contaminants, tels que les métaux lourds.

4.1 Introduction

Les réservoirs microbiens, la dissémination des agents pathogènes, et la santé publique sont des domaines interconnectés qui jouent un rôle crucial dans la compréhension, la prévention et la gestion des maladies infectieuses. Voici quelques points clés pour aborder ces concepts:

- Réservoirs microbiens:

- Un réservoir microbien est un milieu naturel où les agents pathogènes peuvent survivre, se reproduire et parfois évoluer.
- Les réservoirs microbiens peuvent être humains, animaux, ou environnementaux (sol, eau, etc.).
- Certains agents pathogènes peuvent avoir plusieurs réservoirs, ce qui complique la tâche de contrôle.

- Dissémination des agents pathogènes:

- La dissémination des agents pathogènes peut se faire par contact direct entre individus, par l'intermédiaire d'objets contaminés, par voie aérienne, ou via l'eau et les aliments.
- Les maladies infectieuses peuvent se propager à l'échelle locale, nationale, voire mondiale, en fonction de la facilité de transmission et des déplacements humains.

- Santé publique:

- La santé publique englobe les efforts déployés pour prévenir les maladies, promouvoir la santé, et prolonger la vie au niveau de la population.
- La surveillance épidémiologique, la recherche, la vaccination, la quarantaine, et l'éducation sanitaire sont des composantes importantes de la santé publique.

- Interventions pour la santé publique :

- La compréhension des réservoirs microbiens et des modes de dissémination est essentielle pour concevoir des interventions efficaces.
- Des mesures telles que la vaccination, l'hygiène personnelle, la gestion de l'eau et des déchets, et le contrôle des vecteurs sont mises en place pour prévenir la propagation des maladies.

- Exemples de maladies liées aux réservoirs microbiens:

- La grippe aviaire, la rage, la maladie de Lyme, et certaines intoxications alimentaires.

- Émergence de nouvelles maladies :

- Les changements environnementaux, les déplacements de population, l'interaction accrue entre humains et animaux, ainsi que d'autres facteurs, peuvent contribuer à l'émergence de nouvelles maladies infectieuses.

La collaboration entre les professionnels de la santé, les scientifiques, les gouvernements et la communauté internationale est cruciale pour prévenir, surveiller et répondre aux menaces pour la santé publique associées aux réservoirs microbiens et à la dissémination des agents pathogènes. La recherche continue et l'innovation dans le domaine de la santé publique sont essentielles pour faire face aux défis émergents et éviter la propagation rapide de maladies infectieuses.

4.2 Qualité de l'eau et peuplements microbiens

La mauvaise qualité d'eau de boisson est responsable des risques sanitaires chez les consommateurs. Les risques à moyen et à long terme sont liés à une mauvaise qualité physico-chimique, alors que ceux à court terme sont liés aux caractéristiques microbiologiques. Si la qualité microbiologique des eaux de baignade est parfois appréciée par la recherche et l'isolement des coliphages et bactériophages, celle des eaux de consommation est régulièrement appréhendée par la recherche et l'isolement des bactéries témoins de contamination, fécale (bio-indicateurs) telles que les coliformes, streptocoques fécaux, *Clostridium* sulfite-réducteur, et de bactéries pathogènes opportunistes comportant plusieurs espèces du genre *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Flavobacterium*, *Serratia* et *Klebsiella*. Quant à l'espèce *Aeromonas hydrophila* et *Pseudomonas aeruginosa* sont responsables, chez les sujets immuno-déficients, de diarrhées, d'infections des plaies, d'infections génito-urinaires et oculaires.

Le développement des communautés microbiennes dans les eaux de surface ou souterraines est lié aux facteurs météorologiques tels que les précipitations, et aux caractéristiques physico-chimiques et biologiques du biotope à l'instar de la température, du pH, des MO et de l'oxygène dissous, et de la microflore endogène. Une hausse quantitative des bactéries en milieu aquatique souterrain peut réduire la survie des coliphages. La survie d'*E. coli* et d'*Enterobacter faecalis* dans un environnement aquatique est ainsi parfois régulée par l'activité des bactériophages et des protozoaires prédateurs. Cette existence microbienne est également influencée par des transferts intra ou interspécifiques des matériels génétiques tels les plasmides, ainsi que par la composition microfloristique du biotope qui sert à l'appréciation qualitative du milieu.

L'activité de contrôle de la qualité de l'eau s'exerce, en priorité, sur les zones de captages de l'eau destinée à l'alimentation des villes. Si, dans de nombreux pays, la plupart des habitants bénéficient de réseaux de distribution d'eau potable, dans beaucoup d'autres pays, la population ne dispose souvent que des puits et des sources ou parfois de l'eau de surface des cours d'eau, avec l'appoint aléatoire des eaux des pluies.

4.2.1 L'eau potable et normes

D'après les normes européennes, 64 paramètres permettent de définir l'eau potable (directive du conseil 98/83/EC) (**tableaux 4-5**). Parmi eux, on distingue:

- Les paramètres organoleptiques (couleur, turbidité, odeur, saveur).
- Les paramètres physicochimiques (température, pH, concentration en minéraux etc.).
- La quantité de substances indésirables (nitrates, fer etc.).
- La présence ou non de substances toxiques (plomb, mercure, arsenic).
- Les paramètres microbiologiques (streptocoques, coliformes etc.).

Tableau 4. Normes OMS et algériennes des paramètres physico-chimiques pour l'eau potable.

| Substances | Unité | Normes OMS | Normes algériennes |
|--|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| Turbidité | NTU | <2,5 | <2 |
| Température | C° | <25 | <5 |
| TA | mg/l | <15 | <5 |
| TAC | mg/l | <15 | < |
| Calcium | mg/l | <270 | <200 |
| Magnésium | mg/l | <50 | <150 |
| Chlorure | mg/l | <250 | <500 |
| Concentration en ions hydrogène | PH | ≥ 6,5 et ≤ 9,5 | ≥ 6,5 et ≤ 9 |
| Dureté | mg/l de CaCO ₃ | <500 | <500 |
| Conductivité à 20°C | µS/cm | <2100 | <2800 |
| Ammonium | mg/l | <0,5 | <0,5 |
| Potassium | mg/l | <20 | <12 |
| Aluminium | mg/l | <0,2 | <0,2 |
| Cadmium | µg/l | <3 | <3 |

| | | | |
|------------------------|---------------------|--------|---------------------|
| Cuivre | mg/l | <2 | <2 |
| Oxygène dissous | O ₂ | <6,5 | Pas de valeur guide |
| Fluorure | mg/l | <1,5 | <1,5 |
| Fer | mg/l | <0,3 | <0,3 |
| Manganèse | mg/l | <0,4 | <0,05 |
| Nitrate | mg/l | <50 | <50 |
| Nitrite | mg/l | <0,1 | <0,1 |
| Oxydabilité | mg/l O ₂ | <5 | <5 |
| Sulfate | mg/l | <400 | <400 |
| Zinc | mg/l | <3 | <5 |
| Phosphate | mg/l | <0,5 | <0,5 |
| Cyanure | mg/l | <0,07 | <0,07 |
| Résidu sec | mg/l | < 1500 | <2000 |

Tableau 5. Normes OMS des paramètres bactériologiques pour l'eau potable.

| Variable | Concentration maximale admissible (eau désinfectée) |
|-------------------------------|--|
| Coliformes totaux / 100 ml | 0 |
| Coliformes fécaux / 100 | 0 |
| Streptocoques fécaux / 100 ml | 0 |

4.3 Ecologie des amibes libres pathogènes pour l'homme

Les amibes libres sont des protozoaires ubiquitaires particulièrement retrouvés dans les environnements hydriques. Elles peuvent être responsables de pathologies graves mais exceptionnelles, comme la méningoencéphalite amibienne primitive due à *Naegleria fowleri* ou l'encéphalite granulomateuse amibienne due à *Acanthamoeba* sp. ou à *Balamuthia mandrillaris*. Les amibes libres sont rencontrées dans les environnements aquatiques naturels (rivières, lacs, sources,...), les réseaux de distribution d'eau de consommation humaine et les circuits de refroidissement industriels (CRI). Certains de ces CRI sont confrontés au développement de l'amibe *N. fowleri* responsable chez l'homme de méningo-encéphalite amibienne primitive.

Les amibes libres ont de plus la particularité de pouvoir héberger d'autres microorganismes (bactéries, champignons, virus...), leur accordant ainsi une certaine forme de protection et permettant un entraînement à leur survie ultérieure dans les macrophages. Les amibes retrouvées dans les réseaux d'eau peuvent ainsi endosser le rôle de réservoir de pathogènes potentiels et être indirectement en lien avec différentes infections.

Parmi les amibes libres, quatre genres sont actuellement reconnus responsables directs de pathologies, avec par ordre de fréquence: *Acanthamoeba*, *Naegleria*, *Balamuthia* et *Sappinia*. Parmi ces genres, certaines espèces sont également capables d'héberger des microorganismes, s'impliquant ainsi dans leur développement et/ou leur dissémination.

4.3.1 Association Amibes avec d'autres microorganismes

Le risque de contamination des réseaux par les légionelles est aujourd'hui bien connu. Ces bactéries sont naturellement résistantes à un certain nombre de stress, elles peuvent survivre de façon prolongée dans les biofilms et proliférer de façon très importante via une croissance intracellulaire dans les amibes. Les amibes peuvent elles-mêmes présenter une résistance élevée aux traitements de décontamination usuels et offrent donc une protection supplémentaire aux légionelles. Si l'association amibes-légionelles dans les réseaux a été largement étudiée, il n'en est pas de même pour un certain nombre d'autres associations existant entre les amibes et des microorganismes pathogènes avérés ou pathogènes émergents.

Parmi les agents pathogènes émergents associés aux amibes, de nouvelles espèces bactériennes apparentées aux *Chlamydia* pourraient être responsables de pneumonies et d'avortements à répétition chez l'Homme et l'animal. Ces nouvelles espèces de *Chlamydia* présentent de nombreuses particularités, dont une survie à l'état libre dans l'environnement beaucoup plus importante que celles des *Chlamydia* "classiques" et une résistance importante aux températures élevées.

De nouveaux virus "géants" associés aux amibes ont aussi été récemment décrits. Ils présentent de nombreuses particularités biologiques par rapport aux virus plus classiques, certains de ces virus pourraient être responsables de pneumonies.

Enfin, l'association amibes libres - mycobactéries soulève des questions importantes. Des études ont démontré que des mycobactéries atypiques résistantes à certains traitements de décontamination (glutaraldéhyde notamment) sont aussi plus résistantes à certains traitements antibiotiques et plus à même de survivre dans les amibes. Par ailleurs la plupart des espèces de mycobactéries présentent la capacité de survivre dans les kystes amibiens, eux-mêmes très résistants à la plupart des traitements de décontamination.

4.3.2 Ecologie de *Naegleria fowleri*

Elle est rencontrée dans les eaux douces des pays tropicaux à tempérés. Une température relativement élevée (supérieure à 20 °C minimum) accompagnée d'une source de nourriture suffisante (MO ou bactéries) et de faibles populations de prédateurs ou compétiteurs favorise la multiplication de *N. fowleri*.

La forme trophozoïte de *N. fowleri* a la particularité d'être thermo-tolérante, supportant des températures allant jusqu'à 50 °C. La température optimale est de 37 °C, ce qui explique qu'elle se développe dans les eaux chaudes et riches en bactéries du type *Escherichia coli* tel que les lacs et les rivières, surtout en été, les canaux d'irrigation, les eaux de refroidissement industrielles ainsi que les piscines dont l'eau est insuffisamment voire non traitée. *N. fowleri* a également été retrouvée dans les narines ou la gorge de sujets asymptomatiques.

N. fowleri ne tolère pas une salinité supérieure à 5g/l, ni une dessiccation de plus de cinq minutes. Cependant, les kystes peuvent survivre 24 heures dans l'eau de mer soit à une salinité de 40 g/l. Il a été montré que *N. fowleri* est capable de supporter une large gamme de pH (2-12). Les kystes peuvent survivre en environnement anaérobie, ce qui pourrait expliquer la réapparition estivale de *N. fowleri* dans des lacs où l'échantillonnage est négatif en hiver: les kystes hiberneraient dans les sédiments du fond. Par ailleurs, il semble établi que les kystes peuvent être transportés par voie aérienne (**figure 20**).

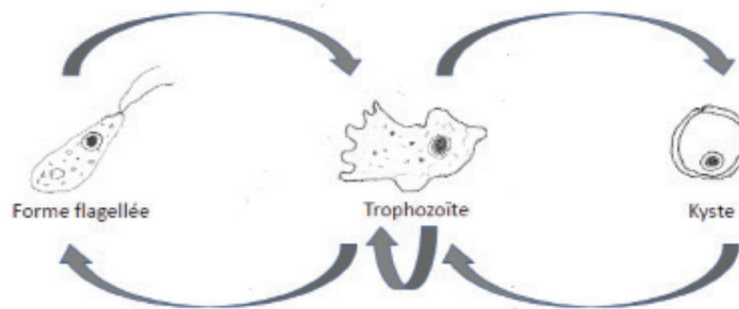


Figure 20. Représentation schématique du cycle de *Naegleria fowleri*.

4.3.3 Le pouvoir pathogène de *Naegleria fowleri*

N. fowleri est l'amibe libre la plus virulente en étant responsable de la méningo-encéphalite amibienne primitive (**figure 21**).

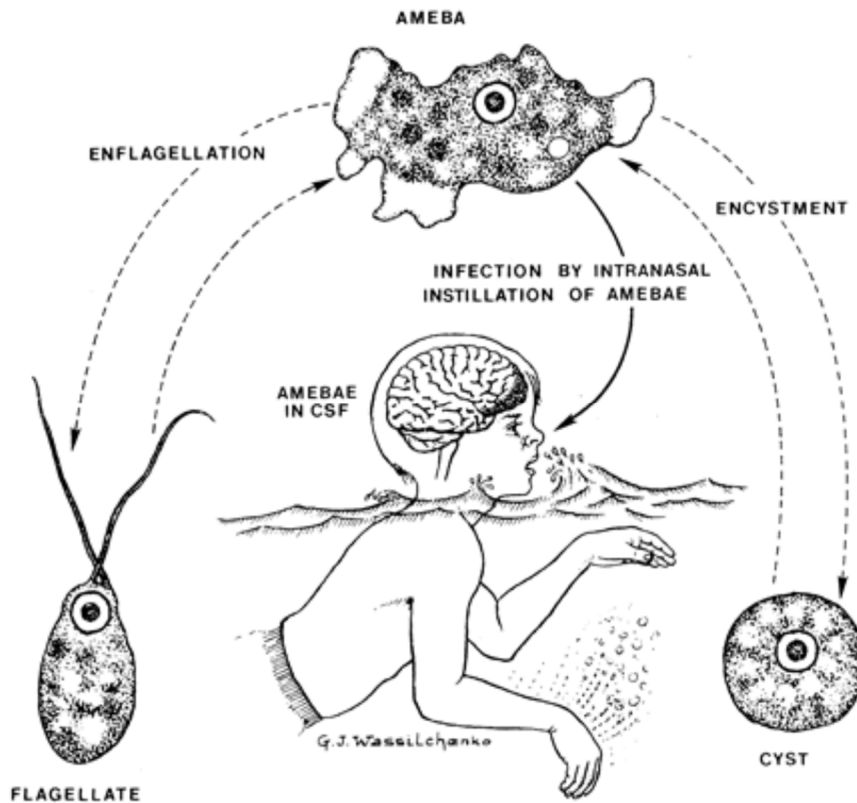


Figure 21. Cycle biologique complet de *Naegleria fowleri*.

Les cas de méningo-encéphalite amibienne primitive ont été décrits partout dans le monde après un passage dans des piscines chauffées, des lacs d'eau douce, des sources d'eau chaude. La baignade dans ces eaux expose les muqueuses respiratoires supérieures directement au contact de l'eau contaminée.

Le premier cas d'infection par *N. fowleri* a été évoqué en 1965, en Australie. Une année plus tard, trois cas mortels ont été reportés en Floride. Dans chaque cas, la contamination par *N. fowleri* s'est faite après une baignade en eau chaude. Depuis ce temps, des recherches ont été faites et *N. fowleri* a été retrouvée dans les piscines, les étangs, les lacs, les ruisseaux, les bains chauds, les eaux thermales polluées et les eaux usées.

Les trophozoïtes de *N. fowleri* pénètrent à travers la muqueuse nasale et gagnent les bulbes olfactifs du système nerveux central. À ce stade, l'amibe se divise rapidement et la mort survient dans les 7 à 10 jours, causée par une nécrose hémorragique fulminante du cerveau. Les premiers signes surviennent généralement 1 à 2 jours après l'exposition et regroupent céphalées, nausées, vomissements, fièvre (38,5-41 °C) et rigidité de la nuque. Le diagnostic peut être obtenu par examen microscopique (contraste de phase de préférence) du liquide céphalorachidien (LCR), pour visualiser l'amibe mobile.

Le test de flagellation permet de mettre en évidence les amibes du genre *Naegleria* se transformant en formes flagellées au contact de l'eau. Une culture sur gélose non nutritive recouverte de bactéries inactivées peut être réalisée mais compte tenu du caractère fulminant de cette infection, le diagnostic devra être rapide.

4.4 Dissémination aérienne des microorganismes pathogènes

4.4.1 La flore microbienne de l'air

L'air est un milieu difficile à étudier, et en plus les germes aériens sont associés à des supports de caractères propres dont il faut savoir tenir compte. Pendant de nombreuses années, peu de bactériologistes s'intéressaient aux microorganismes vivant dans l'air. En 1883, Miguel met en évidence dans son "laboratoire d'aérobiologie extérieur", l'influence des saisons, de l'hygrométrie, de la température, de la pression atmosphérique, de l'électricité statique et de la radioactivité sur les variations quantitatives des microorganismes aériens. En 1955, Maisson et, grâce à son Hydroaéroscope, procède à l'analyse qualitative de la flore microbienne de l'air, découvre la faible teneur en germes contenus dans l'atmosphère et démontre l'uniformité des espèces, quelles que soient les lieux ou les saisons de prélèvements, quelles que soient les latitudes ou les longitudes. Depuis cette description (1962), on oppose une flore microbienne saprophyte de base, qualitativement constante et une flore accidentelle, de transit, à laquelle appartiennent les germes pathogènes. La flore de base a été identifiée à des années d'intervalles, et en tous lieux : en air marin, en zone subtropicale et tempérée. Elle se compose de *Bacillus*, de Sarcines, de Flavobactéries de *Galfkia* et d'*Achromobacter*. Pour Maisson, il existe un équilibre entre flore de base et flore de transit, réalisant un écosystème bactérien de l'atmosphère, véritable zone de protection à l'égard du développement des germes pathogènes.

4.4.2 Le transport aérien des particules microorganismes

Les germes ne vivent que très rarement à l'état libre et leur transport aérien requiert le concours d'un support de nature variable. Ce peut être :

- des poussières, de grandes tailles, visibles à l'œil nu, assimilées à des réservoirs de nature animale ou végétale, elles offrent tous les éléments propices à la survie des bactéries; elles sédimentent rapidement.
- des gouttelettes de Flugge (1888), chargées d'inoculum bactérien, dont la taille est fonction de l'activité respiratoire de l'homme. En atmosphère humide, leur sédimentation rapide, minimise leur innocuité.

- des Doplets Nucléi, gouttelettes de petites tailles qui, en se desséchant, se réduisent à l'état de noyau de 2 à 3 microns. Animés de mouvements Browniens, ils demeurent indéfiniment en suspension dans l'air. On peut leur apparenter les virus de la grippe et de la rougeole qui en sont de belles illustrations.

Pour la plupart des germes, leur support est également aéroporté. Certains microorganismes nécessitent un vecteur actif (moustique, mouche, acarien) et d'autres, un vecteur obligatoire: anophèle pour le paludisme, aèdes pour la fièvre jaune, simulie pour l'onchocercose, tique pour la rickettsiose. Les microorganismes et leurs supports, la qualité de l'environnement forment un ensemble particulière aérien indissociable, réalisant l'aéro-bio-contamination. L'air extérieur contient 1 à 5 milliards de particules supérieures à 0,5 microns /m².

4.4.3 Les sources de la contamination

La connaissance des sources et des gîtes des microorganismes contaminants affecte autant l'homme que son environnement. La teneur en germes est faible lorsque la densité de la population est faible, mais elle augmente considérablement dès que l'on pénètre dans les agglomérations polluées par l'industrialisation.

La pollution micro-organique trouve principalement sa source dans l'activité humaine. L'homme produit un nombre incommensurable de germes, qu'il transporte d'un endroit à l'autre par ses mouvements et par tout ce qu'il touche.

La peau, les cheveux, la respiration constituent des sources inépuisables. Les tissus de nos vêtements, le coton et la laine, abritent de nombreuses particules alors que les tissus synthétiques les attirent par leurs propriétés électrostatiques.

Selon son activité, une personne émet par minute, une quantité impressionnante de particules, d'un diamètre moyen de 0,5 micron. A savoir :

- 100 000 p. : assis, sans activités ;
- 1 000 000 p. : assis, ou debout, avec mouvements des bras, des jambes, de la tête et du corps ;
- 5 000 000 p. : pendant une marche normale ;
- 10 000 000 p. : pendant une marche accélérée.

Ce renouvellement permanent des germes au détriment de notre organisme nous permettent de distinguer:

- des microorganismes résidents, formant une population stable, qu'il n'est pas possible d'éliminer.

- des microorganismes transportés, contaminants, répandus dans l'environnement, qu'il y a lieu d'éradiquer.

La biocontamination est nettement plus importante en air confiné qu'en air libre. Parler de microorganismes de l'air, mérite que l'on s'intéresse à leurs lieux de prolifération à haute densité: les salles et les lieux à hauts risques de contagiosité.

4.5 Ecologie microbienne des aliments, nouveaux pathogènes

La qualité des aliments se définit selon ses différents volets, nutritionnel, organoleptique, sanitaire, environnemental, etc... Les qualités organoleptique et sanitaire peuvent être affectées par la présence ou l'activité de microorganismes. En effet, les produits alimentaires sont pour la plupart non stériles et susceptibles d'être un support de croissance des microorganismes. L'ensemble des microorganismes présents dans les aliments constitue le microbiote alimentaire.

Celui-ci provient soit d'un ensemencement ciblé dans le cas des produits fermentés soit de contaminations non intentionnelles originaires des matières premières, animales ou végétales, ou des environnements de production. Certains de ces microorganismes contaminants peuvent altérer la qualité ou la sécurité des produits alimentaires. Si ce sont des microorganismes non pathogènes et qu'ils ont la possibilité de se développer pour atteindre des niveaux de population élevés (généralement supérieurs à 10^6 bactéries/g), il y a altération de la qualité marchande (organoleptique). L'aspect des produits est dégradé avec par exemple l'apparition de mycéliums de moisissures visibles en surface d'un aliment ou d'odeurs voire de goûts désagréables engendrés par la production de métabolites microbiens. Ces aliments deviennent impropres à la consommation, mais cette dégradation biologique n'entraîne pas de conséquences en termes de santé publique, malgré des conséquences financières non négligeables.

En revanche, quand le microorganisme contaminant est pathogène et qu'il atteint un niveau jugé inacceptable, la sécurité sanitaire du produit n'est plus garantie, ce qui peut engendrer des conséquences en termes de santé publique avec le déclenchement potentiel d'une intoxication alimentaire microbiologique.

4.5.1 Types d'intoxications alimentaires bactériennes et leurs mécanismes associés

Les maladies bactériennes d'origine alimentaire sont généralement classées en deux catégories, les maladies infectieuses d'origine alimentaire et les intoxications. Les premières sont dues à l'activité infectieuse d'un microorganisme ingéré vivant et les secondes à l'activité d'une toxine microbienne pré-formée dans l'aliment.

Parmi les premières, il est courant de distinguer les toxi-infections et les infections d'origine alimentaire. Les toxi-infections sont des maladies déclenchées par l'action prédominante d'une toxine (avec invasion des cellules épithéliales ou non) et provoquant des symptômes majoritairement digestifs dans un délai d'apparition relativement court après l'ingestion de l'aliment. Les infections d'origine alimentaire sont des maladies caractérisées par une invasion de l'hôte, une dissémination bactérienne dans la circulation lymphatique ou sanguine et des symptômes pouvant être autres que digestifs ou apparaissant avec des délais d'incubation plus longs.

Le pouvoir pathogène d'une bactérie pathogène alimentaire comprend plusieurs composantes dont:

- i) le pouvoir infectieux, qui correspond à la capacité du microorganisme à se développer dans le tube digestif et à le coloniser,
- ii) le pouvoir invasif, qui correspond à la capacité de la bactérie à pénétrer dans les cellules épithéliales et éventuellement à se répandre dans les tissus adjacents,
- iii) le pouvoir de résistance aux défenses de l'hôte,
- iv) le pouvoir toxigène, capacité du pathogène à produire des toxines chez l'hôte conduisant à l'apparition d'effets délétères.

4.5.1.1 Les maladies infectieuses d'origine alimentaire

Après ingestion avec le bol alimentaire, les bactéries arrivent dans l'estomac qui constitue une barrière chimique très efficace (piège gastrique). La réduction de la population est généralement importante à ce stade même si le bol alimentaire peut neutraliser en partie l'acidité de l'estomac.

Le cas de *Clostridium perfringens* est un cas particulier. Cette bactérie doit être ingérée vivante sous forme végétative pour déclencher la maladie, mais elle n'interagit pas directement avec les cellules épithéliales de l'hôte. Lors du passage de la bactérie dans l'estomac, l'acidité gastrique induit sa sporulation qui provoque de façon concomitante la production d'une toxine exogène qui interagit avec l'épithélium intestinal et déclenche une diarrhée. Toutes les autres bactéries infectieuses doivent entrer en contact avec la muqueuse intestinale pour déclencher la maladie. Les bactéries pathogènes infectieuses d'origine alimentaire peuvent alors provoquer plusieurs types d'infections décrites succinctement ci-dessous (**figure 22**).

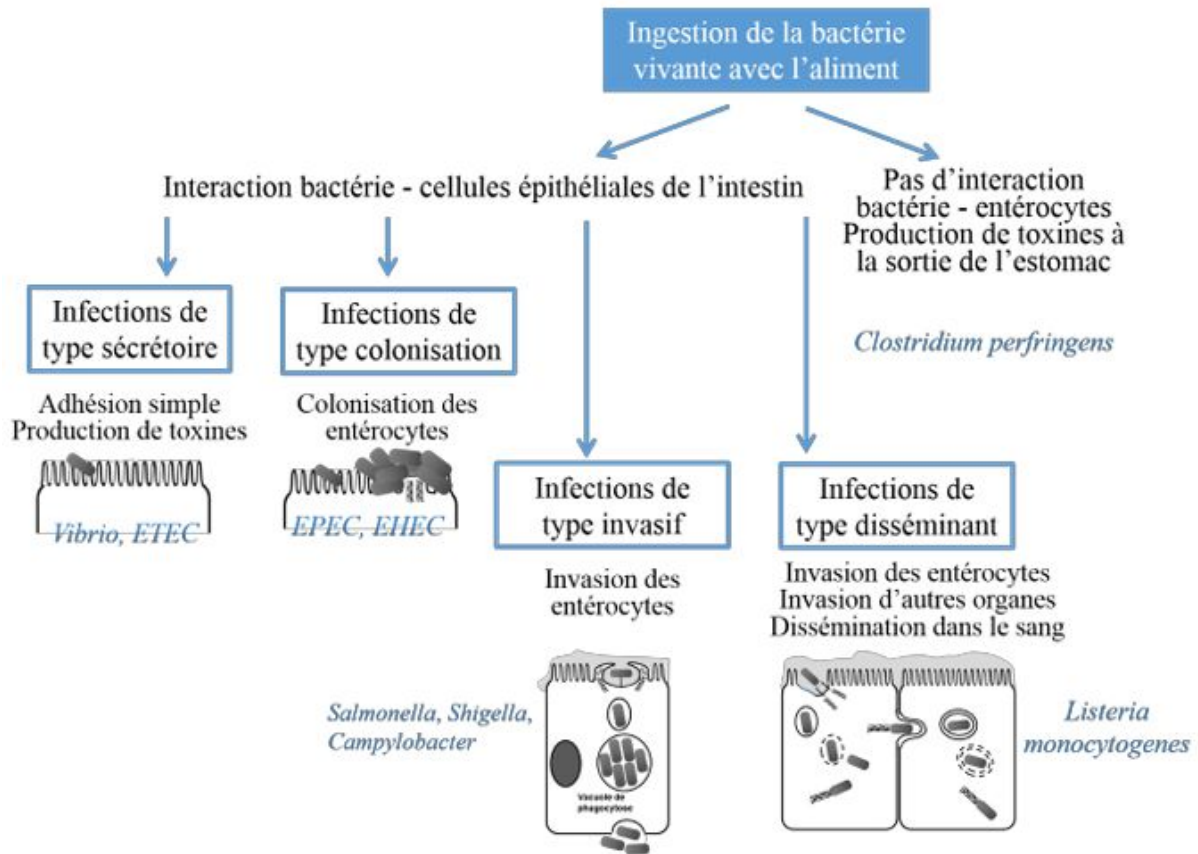


Figure 22. Les différents types d'infections bactériennes alimentaires.

4.5.1.2 Les intoxications

Les intoxications sont provoquées par des molécules exogènes produites dans les aliments par des microorganismes. Ces derniers sont considérés comme pathogènes bien que non infectieux et leur pouvoir pathogène n'a que la composante toxinogène. L'ingestion du microorganisme n'est pas nécessaire pour déclencher la maladie. L'effet délétère des toxines sur le métabolisme normal des cellules de l'hôte est très rapide (quelques minutes à quelques heures). En revanche, la production de ces métabolites nécessite systématiquement une croissance de la bactérie productrice dans l'aliment et les conditions de production de ces métabolites sont généralement plus restrictives que les conditions de croissance. L'histamine est un cas particulier car il ne s'agit pas d'une toxine à proprement parlé, mais d'une amine biogène présente naturellement dans le corps humain. La maladie n'est déclenchée qu'en cas d'ingestion de fortes doses pouvant avoir été produites dans les aliments par une flore histaminogène capable de décarboxyler l'histidine (*Enterobacteriaceae*, *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Vibrio*, *Pseudomonas*, *Photobacterium*).

Les toxines bactériennes sont des protéines exogènes, généralement produites par des bactéries à Gram positif. Elles ont un effet délétère sur l'Homme à des concentrations

extraordinairement basses et sont à ce titre de puissants poisons. Elles ont généralement une cible spécifique: les entérotoxines interfèrent avec les cellules épithéliales de l'intestin, alors que les neurotoxines agissent sur les cellules neuronales. *Staphylococcus aureus* produit plus d'une vingtaine de SE (*Staphylococcus* Enterotoxin) ou SEI (SE-like) qui forment un groupe de protéines extracellulaires aux structures proches et ayant une très grande capacité de résistance à la chaleur et à la digestion par des enzymes digestives. L'activité superantigénique se traduit par une activation non spécifique des lymphocytes T déclenchant un choc systémique. L'activité émétique de la toxine est un déclenchement de vomissements violents qui pourrait être dû à la présence d'une cible cellulaire de la toxine au niveau abdominal sur des récepteurs cellulaires putatifs. Certaines souches de *Bacillus cereus* peuvent également produire dans l'aliment une entérotoxine émétique, appelée céréulide. Ce peptide cyclique n'est pas détruit par les traitements classiquement appliqués aux aliments et n'est pas affecté par l'acidité gastrique ou les protéases digestives. L'effet émétique de la toxine céréulide serait dépendant de la stimulation de récepteurs sur les neurones vagues afférents.

Les toxines botuliques sont des neurotoxines inhibant la transmission des influx nerveux. Elles sont produites par des *Clostridium* neurotoxiques, dont *C. botulinum*. Elles sont sécrétées sous forme d'un précurseur inactif de 150 kDa, qui est clivé par *Clostridium* ou par des protéases tissulaires en une chaîne courte (50 kDa) et une chaîne longue (100 kDa). Après liaison de la toxine à un récepteur membranaire des cellules neuronales de l'hôte puis internalisation dans une vacuole d'endocytose, il y a translocation membranaire de la chaîne courte dans le cytoplasme et blocage de l'exocytose des neurotransmetteurs stimulants. Les contractions musculaires sont inhibées, ce qui induit une paralysie flasque.

4.5.2 Les réservoirs de contamination des aliments

Les réservoirs de microorganismes pathogènes pouvant contaminer les aliments sont multiples. Beaucoup de pathogènes alimentaires trouvent leur origine dans les réservoirs animaux et contaminent les aliments parce qu'ils sont présents chez l'animal vivant, le lait ou les œufs, ou parce qu'ils sont présents dans les matières fécales d'animaux infectés qui contaminent ensuite les aliments.

A titre d'exemples, les réservoirs de *Campylobacter* sont les volailles (et d'autres oiseaux) ainsi que le bétail; ceux des *E. coli* producteurs de shigatoxines (*E. coli* STEC) sont les bovins et autres ruminants; ceux de *Salmonella* sont notamment les volailles, les bovins. La contamination des aliments ou des ingrédients alimentaires par les animaux sauvages

constitue également un sérieux potentiel de transmission de maladies. Une part non négligeable de maladies d'origine alimentaire, causées par *E. coli* pathogènes, *Campylobacter* ou encore *Salmonella* a eu pour origine des espèces sauvages telles que les rongeurs, les cervidés, les sangliers et les oiseaux. Les maladies causées par les parasites sont également fortement liées à la faune sauvage.

L'Homme peut être l'hôte de pathogènes qui contaminent les aliments via les personnes infectées. Il existe plusieurs types de réservoirs humains: les personnes malades (présentant des signes ou des symptômes de maladie), les personnes colonisées (l'agent infectieux est présent mais l'individu ne développe pas d'infection) et les porteurs asymptomatiques ou porteur sain (les individus sont infectés mais ne présentent aucun signe ni symptôme). L'Homme peut ainsi transmettre l'ensemble des microorganismes d'origine entérique. Il peut être un réservoir parmi d'autres (cas des *E. coli* pathogènes) ou être le réservoir unique (cas de *Salmonella typhi*). Le portage cutané ou nasal de *Staphylococcus aureus* (37% de porteurs sains) est également un problème reconnu de longue date.

L'environnement peut également être une source de contamination des aliments. Certains agents pathogènes peuvent survivre pendant de longues périodes dans le sol et l'eau, avant d'infecter de nouveaux hôtes et/ou de contaminer des produits alimentaires par des voies très diverses reflétant la variété des écosystèmes qui sont en lien avec notre chaîne de production des aliments. La survie dans l'environnement est notamment favorisée pour les formes sporulées ou les bactéries organisées en biofilm. Le changement climatique pourrait à moyen terme bouleverser la persistance et la dynamique des agents pathogènes dans l'environnement. Parmi les sources potentielles de contamination des plantes avant la récolte, on peut mentionner l'eau d'irrigation, l'épandage de fumier non traité, l'eau de ruissellement provenant des exploitations d'élevage, ou encore l'intrusion de la faune sauvage dans les champs.

Enfin, les ateliers de production peuvent être une source de contamination des aliments lors de leur transformation (milieu, main d'œuvre, matériel, méthode). Cette contamination secondaire est généralement distinguée des contaminations primaires dues aux matières premières lors de l'analyse globale des causes de contaminations des aliments. Certains pathogènes dits ubiquistes, tels que *Listeria monocytogenes*, ont la capacité à se maintenir dans les habitats que constituent les ateliers de production. D'autres bactéries pathogènes dont on connaît le réservoir principal ont également la capacité à se trouver un habitat dans l'environnement de production des ateliers, comme *E. coli* O157, *Salmonella* ou encore *Bacillus cereus*, où elles persistent parfois sous forme de biofilm ou de spores. La maîtrise des

pathogènes dans les ateliers repose sur le contrôle des voies d'entrée (contamination aéroportée, lutte contre les nuisibles par exemple) et l'application adéquate de procédures de nettoyage et désinfection. Il est à noter que le niveau de population de ces microorganismes contaminants est susceptible d'évoluer après contamination lors des différentes étapes de transformation et de stockage et que cette évolution doit être prise en compte depuis les matières premières jusqu'à la préparation avant consommation dans le cadre de l'analyse de risque microbiologique effectuée pour garantir la sécurité des produits.

4.6 Maladies à prions: risques en santé publique

4.6.1 Définitions

Ces maladies causées par un agent transmissible non conventionnel (ATNC) communément appelé PRIONS pour « proteinaceous infectious particles », ont été largement décrites ces dernières décennies. Un agent infectieux de nature protéique, la PrP, dont son conformation non pathogène, la PrP^C est présente naturellement dans les cellules des systèmes nerveux centraux. Le changement de conformation de cette protéine en forme pathogène PrP^{Sc}, cause des encéphalopathies spongiformes subaiguës transmissibles (ESST), généralement fatale. En effet, la présence de cette conformation dans des tissus de cerveau des individus mort par cette atteinte, a été liée à des maladies neurodégénératives. La particularité de ces prions, qu'ils résistent à des protéases et des traitements thermiques (même l'autoclave les inactivent que partiellement).

Contrairement aux agents infectieux traditionnels tels que les virus ou les bactéries, les prions sont composés principalement de protéines.

Chez l'homme, les ESST forment un groupe rare d'affections neurodégénératives (prévalence globale 1,5/million habitant/an) qui comprend: la maladie de Creutzfeldt-Jakob (MCJ), le Kuru, le syndrome de Gerstmann-Sträussler-Scheinker et l'insomnie familiale fatale. Ces maladies se caractérisent, sur le plan clinique, par une démence et divers troubles moteurs, et, sur le plan neuropathologique, par une dégénérescence spongiforme du cerveau, associée à une gliose réactionnelle.

Ces affections sont le plus souvent de nature sporadique (80-90% des cas), mais elles peuvent avoir une étiologie (l'étude des causes et des facteurs d'une maladie) infectieuse ou génétique, ce qui les rend uniques dans la nosologie médicale. Les formes génétiques sont héritées de façon autosomique dominante et elles sont toutes liées à des mutations du gène de la PrP. Le cerveau de patients atteints de formes génétiques ou sporadiques s'est lui-même

révélé infectieux, faisant ainsi le lien entre PrP mutée et prions. Les formes infectieuses font suite à des contaminations centrales (greffe de dure-mère) ou plus souvent périphériques, telles que l'historique Kuru lié à un cannibalisme rituel ou la douloureuse contamination d'enfants associée à l'utilisation d'hormones de croissance purifiées à partir de cerveaux de personnes atteintes de MCJ.

4.6.2 Santé publique

La dernière forme infectieuse en date est représentée par le variant de la MCJ (vMCJ) qui touche des patients jeunes, contrairement aux formes classiques de MCJ sporadiques, et qui a une répartition géographique se calquant sur celle de l'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB). Le vMCJ, identifié en 1996 en Angleterre, est en effet lié, sur les plans épidémiologique et biologique, à l'agent infectieux de l'ESB (la maladie de la vache folle). Sa découverte a confirmé le passage possible de l'ESB à l'homme, ce qui a déclenché une crise majeure avec une défiance du consommateur et un embargo européen sur les produits bovins d'origine britannique, ce fut la première crise de la vache folle. Cette préoccupation pour la santé publique était légitime au vu des millions de personnes ayant été exposées par voie alimentaire à l'agent infectieux. Compte tenu des incertitudes en termes de sensibilité de la population, de dose infectante ou de durée d'incubation, les fourchettes d'estimation du nombre de personnes atteintes, très larges initialement, n'ont pu être précisées qu'avec un suivi épidémiologique associé à des modélisations mathématiques plus affinées.

Les risques en santé publique liés aux maladies à prions incluent:

1. **Transmission interespèces:** Certains cas d'ESB chez les bovins ont été associés à des cas de la maladie de Creutzfeldt-Jakob chez l'homme. Cela soulève des préoccupations quant à la transmission potentielle des prions entre espèces.
2. **Transmission iatrogène:** Il y a eu des cas de transmission de la maladie de Creutzfeldt-Jakob à la suite de traitements médicaux, tels que l'utilisation de greffes de dure-mère ou d'instruments chirurgicaux contaminés.
3. **Contamination alimentaire:** L'ESB chez les bovins a été associée à la consommation de produits animaux contaminés. Des mesures de contrôle strictes ont été mises en place dans de nombreux pays pour réduire ce risque.
4. **Transmission sanguine:** Il y a des préoccupations quant à la possibilité de transmission des prions par transfusion sanguine. Des mesures de sécurité sont mises en place dans certains pays pour minimiser ce risque.

5. **Stabilité environnementale:** Les prions sont connus pour être relativement stables dans l'environnement. Cela signifie que des résidus infectieux pourraient persister dans l'environnement pendant des années, posant des défis pour l'élimination et la désinfection.
6. **Délai d'incubation prolongé:** Les maladies à prions ont souvent un délai d'incubation prolongé, ce qui signifie que les symptômes peuvent prendre des années voire des décennies à se manifester après l'exposition, rendant difficile la détection et la gestion des épidémies potentielles.

4.7 Les transferts de gènes chez les bactéries dans les conditions naturelles

Les premiers phénomènes de transferts de gènes horizontaux ont été découverts par Griffith (1928) qui démontra expérimentalement qu'en co-injectant à des souris deux souches de pneumocoques (*Streptococcus pneumoniae*), des pneumocoques non virulents avaient acquis la virulence de l'autre souche de pneumocoques (initialement virulents).

Les éléments mobiles (plasmides, transposons, intégrons et phages) sont largement reconnus comme jouant un rôle prépondérant dans le transfert de gènes de résistance aux antibiotiques au sein de communautés microbiennes (**figure 23**).

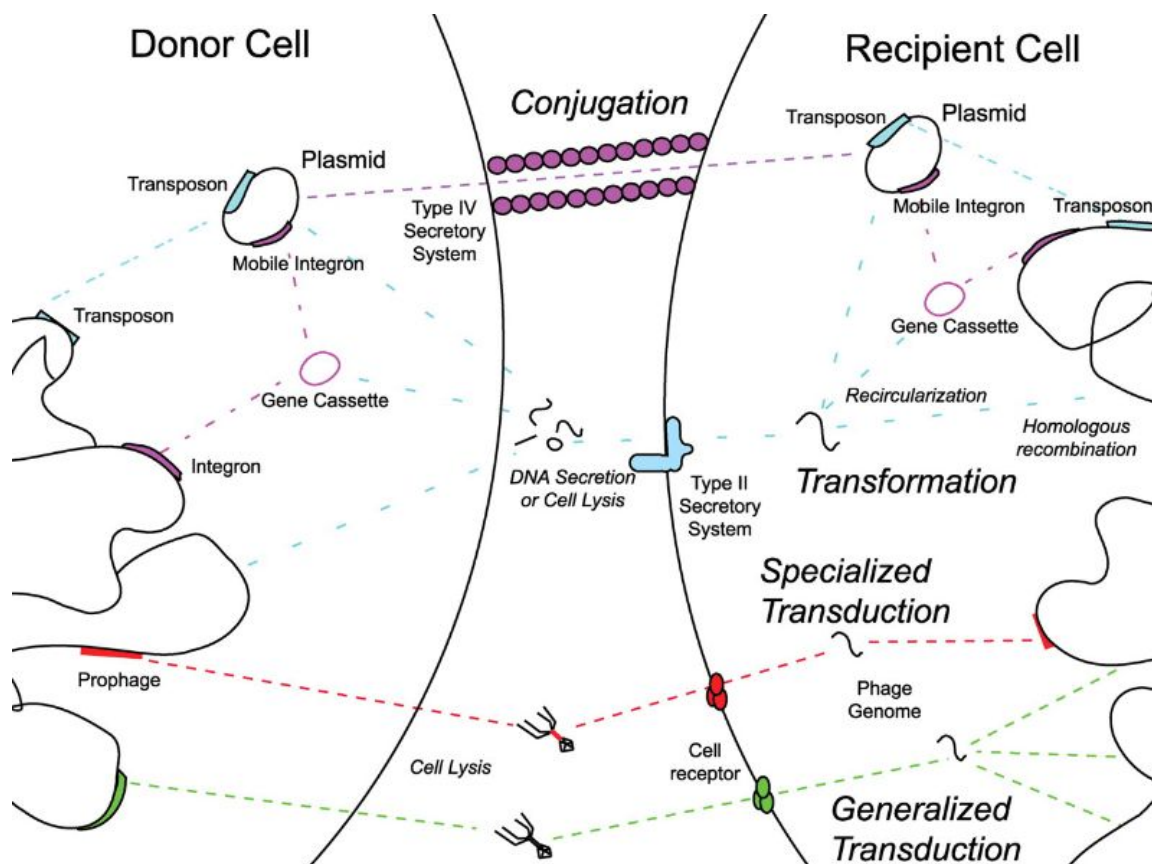


Figure 23. Mécanismes inter et intracellulaires impliqués dans les transferts horizontaux de gènes.

Un type d'élément mobile peut être mobilisé par plusieurs mécanismes de transferts différents. Les bactériophages avec la transduction, les transposons et les intégrons avec le déplacement et la capture de gènes, les plasmides transférables avec la conjugaison, ou encore la transformation par internalisation d'ADN libre extracellulaire.

Ces mécanismes de transfert de gènes jouent un rôle important dans l'évolution bactérienne en permettant la diversification génétique au sein des populations bactériennes. Ils sont également responsables de la propagation de traits tels que la résistance aux antibiotiques, ce qui peut avoir des implications significatives en médecine et en santé publique. Il convient de noter que ces mécanismes ne sont pas exclusifs les uns des autres, et les bactéries peuvent utiliser plusieurs de ces méthodes pour le transfert génétique.

4.7.1 Conséquences écologiques de la résistance aux antibiotiques dans l'agroalimentaire

La découverte des antibiotiques a constitué un progrès médical extraordinaire, qui a permis d'améliorer le pronostic des infections. Cependant, une résistance à ces produits s'est rapidement développée et a évolué jusqu'à constituer un problème de santé important à l'échelle mondiale. Les conséquences en sont très nombreuses, dont une augmentation de la morbidité et de la mortalité, un accroissement des coûts des soins de santé, causé par des hospitalisations plus longues, et la nécessité d'utiliser des médicaments plus coûteux et souvent plus toxiques. Certaines infections résistent même à tous les antibiotiques actuellement disponibles sur le marché.

L'utilisation d'antimicrobiens dans le secteur agroalimentaire contribue au fardeau environnemental de la résistance, puisque des populations bactériennes comportant de nombreuses souches résistantes aux antibiotiques sont libérées dans les excréments. Le transfert d'agents pathogènes résistants des animaux aux êtres humains peut aussi se faire par voie de contact direct ou au moyen d'eau ou de nourriture contaminées et permettre le transfert de gènes de résistance aux bactéries humaines. Le **tableau 6** présente les principaux antibiotiques utilisés et les principales raisons de leur utilisation.

Tableau 6. Antibiotiques utilisés dans le secteur agro-alimentaire.

| Secteur agro-alimentaire | Raisons de leur utilisation | Antibiotiques utilisés |
|------------------------------------|---|--|
| Animaux destinés à la consommation | Favoriser la croissance ; Prévenir les infections chez les animaux en santé vivant dans des espaces restreints ; Traiter les animaux malades. | Glycopeptides, quinolones, streptogramines, aminosides et céphalosporines. |
| Aquaculture | Limiter la production des bactéries sur les poissons. | Samoniculture utilisant de grandes quantités de tétracyclines et de quinolones. |
| Fruits et légumes | Allonger la période de conservation ; Contrôler et prévenir les infections d'origine bactérienne. | Maraichers américains pulvérisant les cultures avec de la tétracycline ou de la streptomycine. |

4.7.2 Conséquences écologiques de la résistance aux antibiotiques dans l'environnement

De nombreux microorganismes environnementaux (plus particulièrement des bactéries et des champignons ou micromycètes) produisent naturellement des antibiotiques, qui leur confèrent un avantage sélectif de croissance vis-à-vis des autres espèces environnementales. Ces microorganismes possèdent des gènes codant pour des mécanismes de résistance aux antibiotiques qu'ils produisent, les microorganismes non producteurs d'antibiotiques peuvent également héberger naturellement des gènes d'antibiorésistance.

Chez les bactéries, les échanges génétiques sont nombreux, entre individus d'une même espèce ou d'espèces différentes, ce phénomène de dissémination de l'antibiorésistance dans l'environnement est vraisemblablement très ancien (plusieurs milliards d'années) et se poursuit de nos jours. Les échanges internationaux (humains, animaux, produits alimentaires) nombreux et rapides ont également aggravé cette situation, l'environnement est pollué à la fois par les microorganismes résistants d'origine humaine et animale (**figure 24**), et par des concentrations résiduelles d'antibiotiques, ces deux types de pollutions favorisent l'émergence de nouvelles résistances aux antibiotiques et leurs transferts entre espèces bactériennes.

Les antibiotiques administrés à l'homme et aux animaux, et les bactéries résistantes sélectionnées chez ces hôtes, ont été largement disséminés dans l'environnement. Les bactéries ont évolué elles aussi vers une augmentation de leurs capacités d'antibiorésistance. L'occurrence de gènes de résistance aux antibiotiques dans l'environnement est bien antécédente à l'apparition de l'Homme sur la planète, comme en témoigne la détection de gènes dans des carottes glaciaires de 30 000 ans, dont certaines séquences sont proches de celles qui confèrent aujourd'hui la résistance aux bêta-lactamines.

En médecine vétérinaire, il a été démontré que la persistance de l'infection dans les élevages est facilitée par la grande résistance de la bactérie dans l'environnement (jusqu'à 540 jours dans le sol). En effet, l'Homme et les animaux essaient dans l'environnement les bactéries qui constituent leur flore commensale, en particulier celles porteuses de gènes d'antibiorésistance. Certaines espèces bactériennes sont capables de survivre de façon prolongée dans l'environnement (eau, sol, objets souillés, etc.).

Les stations d'épuration, où se concentrent une grande partie des eaux usées en lien avec les activités humaines, concentrent de très nombreuses bactéries résistantes aux antibiotiques et leurs gènes de résistance. Les boues fortement contaminées sont souvent utilisées pour fertiliser les terres agricoles. Les eaux épurées mais impropres à la consommation sont rejetées dans l'environnement alors qu'elles sont encore chargées en bactéries et gènes d'antibiorésistance. Ces stations d'épuration sont donc une source majeure de pollution environnementale par de nouveaux gènes d'antibiorésistance.

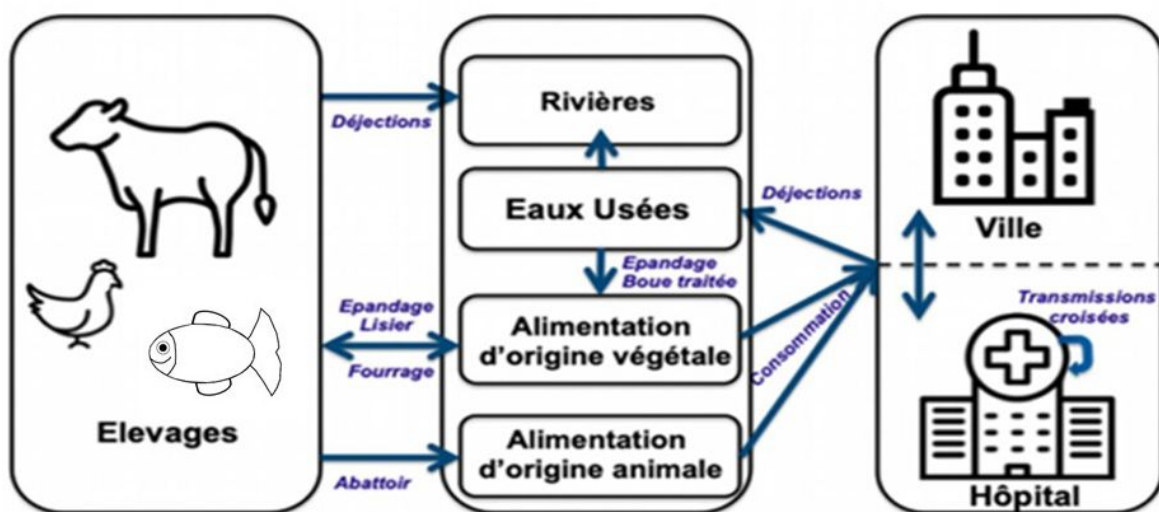


Figure 24. Diffusion de la résistance bactérienne dans l'environnement.

4.7.3 Exemple de conséquence d'utilisation de la céphalosporine de 3^{ème} génération

Au début des années 1980, les céphalosporines de troisième génération (C3G) ont été commercialisées, mais à la suite de leur sur-utilisation pour le traitement de plusieurs infections, des changements relativement mineurs des séquences des gènes originaux ont entraîné une modification significative de l'affinité des enzymes pour le substrat, et il s'est développé un groupe de β -lactamases à spectre étendu (BLSE). Actuellement, il existe plus de 90 types de β -lactamases. De nouvelles familles de BLSE ont été décrites récemment. La **figure 25** présente un exemple de conséquences dues à une sur utilisation des C3G.

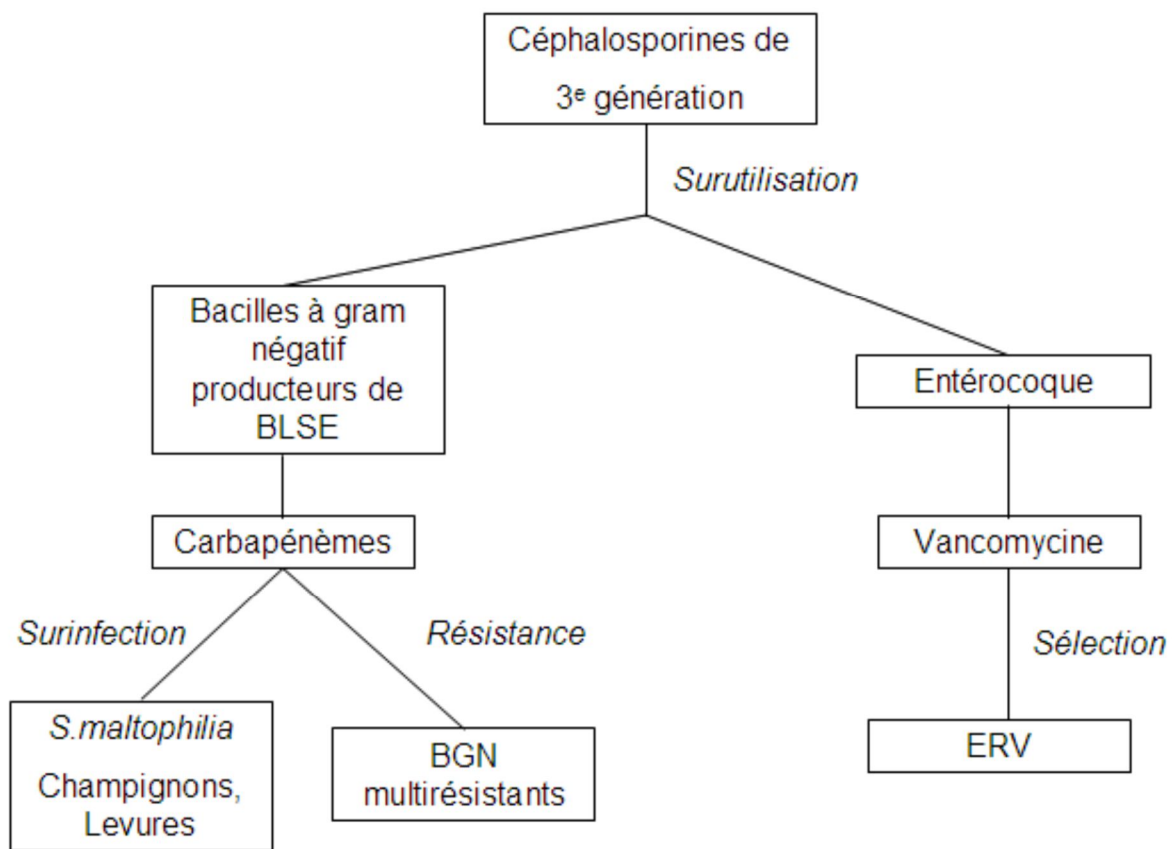


Figure 25. Conséquence d'une surutilisation de la céphalosporine de 3^{ème} génération. BGN : Bacilles à gram négatif; BLSE : β -lactamases à spectre étendu; ERV : Entérocoque résistant à la vancomycine.

La résistance a évolué rapidement, et la substitution d'un petit nombre d'acides aminés des β -lactamases a permis ensuite à un certain nombre de bactéries de devenir encore plus résistantes, les β -lactamases méditées par le gène AmpC ou céphalosporinases de haut niveau.

Récemment, l'hyperproduction de céphalosporinases chromosomiques de très haut niveau a conféré également une nouvelle sorte de résistance aux C3G. Ces enzymes ne détruisent pas l'antibiotique mais inhibent l'accès à son site d'action. Elles sont synthétisées chez des espèces naturellement productrices de céphalosporinases inductibles (entérobactéries, *Pseudomonas aeruginosa*) qui, à la suite d'une mutation, en produisent en très grandes quantités. Il s'agit d'un phénotype qualifié de « hyperproduction de céphalosporinases » ou de « céphalosporinases dérégulées ».

Par surcroît, la production de carbapénémases ou de métallo- β -lactamases par les BGN peut les rendre résistantes à toutes les β -lactamines, y compris les carbapénèmes.

Bref, l'augmentation progressive de la résistance aux pénicillines, aux C1G, C2G et aux C3G avec l'apparition des BLSE, puis la diminution de l'efficacité des inhibiteurs de β -lactamases et finalement la production de carbapénémases inactivant les carbapénèmes restreignent considérablement l'arsenal thérapeutique dont nous disposons et rendent le traitement antibiotique des infections résistantes de plus en plus complexe.

Références bibliographiques

- Agoussar, A. (2018). Effet des pesticides sur la diversité bactérienne des champs agricoles et la capacité des bactéries à les dégrader. Mémoire de Maîtrise en Microbiologie, Université de Montréal, Montréal.
- Ahmad, Z. U. (2015). Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil Using Indian Mustard and Marigold Plant. Thèse de doctorat, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dacca.
- Bessagnet, B., Beauchamp, M., Couvidat, F., Meleux, F., Favez, O., Colette, A., & Rouil, L. (2016). Impact de l'agriculture sur la qualité de l'air. *Rapport Scientifique INERIS*, 2016(2015-2016), 39-40.
- Bessagnet, B., Meleux, F., Favez, O., Menut, L., Beauchamp, M., Colette, A., Couvidat, F., & Rouil, L. (2016). Le rôle de l'agriculture sur les concentrations en particules dans l'atmosphère et l'apport de la modélisation. *Pollution Atmosphérique: Climat, Santé, Société, Numéro spécial*, 153-165.
- Carle, S. (2009). La résistance aux antibiotiques: un enjeu de santé publique important. *Pharmactuel*, 42(2), 6-21.
- Carré, F., Gardon, J., Dèvés, M., Giamberini, L., Mougín, C., Eckert, N., & Grandjean, G. (2021). La santé environnementale: l'opportunité d'instaurer une gouvernance des risques multidimensionnelle et intégrée. *Annales des Mines-Responsabilité et Environnement*, 104(4), 65-68.
- Cateau, E., Héchard, Y., & Rodier, M. H. (2014). Les amibes libres: un danger méconnu. *Revue Francophone des Laboratoires*, 2014(460), 41-51.
- Cellier, P., & Genermont, S. (2016). L'agriculture entre pollution atmosphérique et changement climatique. *Pollution Atmosphérique*, 229-230, 64-75.
- Dabouineau, L., Lamy, Y., & Collas, P. (2005). Phytoremédiation et phytorestauration ou l'utilisation des plantes pour la dépollution et l'épuration des eaux usées. *Le rôle d'eau*, 124, 8-15.
- Dell' Anno, F., Rastelli, E., Sansone, C., Brunet, C., Ianora, A., & Dell' Anno, A. (2021). Bacteria, Fungi and Microalgae for the Bioremediation of Marine Sediments Contaminated by Petroleum Hydrocarbons in the Omics Era. *Microorganisms*, 9, 1695.
- Dommergues, Y., & Manganot, F. (1970). Ecologie microbienne du sol. Masson, Paris, pp. 796.

- Doumenq, P., Guiliano, M., de Beaulieu, J. L., & Bertrand, J. C. (2005). Origines, devenir et effets des hydrocarbures dans les sédiments marins. Présentation des travaux du GDR Hycar. *Natures Sciences Sociétés*, 13(1), 76-80.
- Dubois-Brissonnet, F., & Guillier, L. (2020). Les maladies microbiennes d'origine alimentaire. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 55(1), 30-38.
- Festy, B., Hartemann, P., Ledrans, M., Levallois, P., Payment, P., & Tricard, D. (2003). Qualité de l'eau. In: Gérin, M., Gosselin, P., Gordier, S., Viau, C., Quénel, P., & Dewailly, E. (Ed.). *Environnement et santé publique-Fondements et pratiques*. Edisem / Tec & Doc, Acton Vale, Paris, pp. 333-368.
- Gospodarek, J., Rusin, M., Kandziora-Ciupa, M., & Nadgórska-Socha, A. (2021). The Subsequent Effects of Soil Pollution by Petroleum Products and Its Bioremediation on the Antioxidant Response and Content of Elements in *Vicia faba* Plants. *Energies*, 14(22), 7748.
- Jalilian, N., Najafpour, G. D., & Khajouei, M. (2020). Macro and micro algae in pollution control and biofuel production—a review. *ChemBioEng Reviews*, 7(1), 18-33.
- Kemache, N., & Tartar, H. (2021). Utilisation des antibiotiques en élevage et impact sur la santé publique. Thèse de doctorat, Université Laarbi Tebessi, Tebessa.
- Lehmann, S. (2006). Les maladies à prions. La maîtrise des maladies infectieuses. Un défi de santé publique, une ambition médico-scientifique. Rapport sur la science et la technologie, N° 24. EDP Science, Paris, pp. 211-225.
- Lopes, P. R. M., Cruz, V. H., De Menezes, A. B., Gadanhoto, B. P., Moreira, B. R. D. A., Mendes, C. R., Mazzeo, D. E. C., Dilarri, G., & Montagnolli, R. N. (2022). Microbial bioremediation of pesticides in agricultural soils: an integrative review on natural attenuation, bioaugmentation and biostimulation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 21, 851-876.
- Monard, C. (2008). Biodégradation des herbicides en sols tempérés - Contrôle des communautés bactériennes dégradantes par la bioturbation du sol. Thèse de doctorat, Université Rennes 1, Rennes.
- Mostajir, B., Amblard, C., Buffan-Dubau, E., de Wit, R., Lensi, R. & Sime-Ngando, T. (2012). Les Réseaux Trophiques Microbiens des Milieux Aquatiques et Terrestres. In: Bertrand, J.C. (Ed.). Presses Universitaires de Pau et des Pays de l'Adour, pp. 28.
- Namour, P. (1999). Auto-épuration des rejets organiques domestiques: nature et effet de la matière organique résiduaire en rivière. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon.

- Pesce, S. (2013). Réponses des communautés microbiennes aux pesticides organiques et inorganiques en milieu lotique. Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand.
- Pignol, F., Regimbaud, M., & Grimaldi, M. F. (1992). L'air, véhicule de facteurs pathogènes. *Médecine d'Afrique Noire*, 39(3), 189-194.
- Prescott, L. M., Willey, J. M., Sherwood, L. M., & Woolverton, C. J. (2018). Microbiologie. De Boeck Supérieur, Louvain-la-Neuve, pp. 1120.
- Rakesh, N. G., Saini, D., Gupta, V., Neelam, D., & Rahi, R. (2023). Role of microbes in bioremediation of hydrocarbon associated pollution. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 11, 1-13.
- Rodas-Gaitan, H., Fritz, J., Dahn, C., Köpke, U., & Joergensen, R. G. (2022). Biodynamic compost effects on soil parameters in a 27-year long-term field experiment. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(74).
- Sébastien, G., Pascaline, H., Sylvie, S., Sandrine, B., Laurence, M., & Frédéric, J. (2010). La température: facteur clef pour l'installation de l'amibe libre pathogène *Naegleria fowleri* dans des biofilms d'eau de rivière. SFM, Marseille.
- Smith, A. E., & Cullimore, D. R. (1975). Microbiological degradation of the herbicide dicamba in moist soils at different temperatures. *Weed Research*, 15(1), 59-62.
- Sonia, R. (2014). Evaluation de la contamination par les hydrocarbures des sédiments superficiels (fluviaux et marins) de la région de Skikda (nord-est algérien). Analyses statistiques. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba.
- t'Seyen, J. (1986). Elimination du phosphore des eaux résiduaires par voie biologiques : activité de la polyphosphate-kinase : utilisation d'une phase acidogène en amont d'un système de type "Phoredox modifié". Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine, Metz.
- Tardy, V. (2014). Lien entre la diversité microbienne, la stabilité des communautés microbiennes et le turnover des matières organiques du sol. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Dijon.
- <https://lejournal.cnrs.fr/articles/des-solutions-pour-une-eau-plus-propre> (éditeur: le journal CNRS, consulté le 05 octobre 2023).
- <https://slideplayer.fr/slide/5426314/> (auteur: Dominique Boutin, consulté le 12 décembre 2023).
- <https://wikimemoires.net/2022/03/la-matiere-organique-dans-les-milieux-aquatiques/> (éditeur: wikimemoires, consulté le 10 janvier 2024).

<https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/14639/boucle-microbienne> (auteur: Jean-François Fortier, consulté le 26 octobre 2023).

<https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/ecosys/fonctEcosAqu.html> (éditeur: CNRS, consulté le 23 novembre 2023).

<https://www.digischool.fr/cours/de-l-atmosphere-primitive-a-l-hydrosphere> (éditeur: digischool, consulté le 19 octobre 2023).

<https://www.osi-perception.org/La-pollution-de-l-eau-un-fleau-invisble.html> (éditeur: Objectif sciences international, consulté le 17 septembre 2023).

<https://www.projetecolo.com/la-pollution-du-sol-causes-consequences-et-solutions-32.html> (auteur: Antoine Decrouy, consulté le 28 janvier 2024).

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/biodepollution/2-la-biodepollution-de-l-eau/> (éditeur: Encyclopædia Universalis France, consulté le 29 septembre 2023).