



UNIVERSITE DU BURUNDI
FACULTE DES SCIENCES
BP 2700 Bujumbura-Burundi

**SYLLABUS DU COURS DE MICROBIOLOGIE DE
L'ENVIRONNEMENT**

Classe de Master 2 en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement
Spécialité Eau et Assainissement

Volume horaire : 45 heures

(Théorie : 30 heures, Travaux pratiques : 15 heures)

Préparé par:

Dr Prudence Bararunyeretse, chargé de cours

Année académique 2023-2024

Tables de Matière

Tables de Matière	i
CHAP. 1. INTRODUCTION	1
1.1. Descriptif et contenu du cours.....	1
1.2. Objectifs du cours.....	1
1.2.1. But du cours.....	1
1.1.2. Objectifs spécifiques	1
1.2. Contenu du cours.....	2
1.3. Méthodologie.....	2
1.3.1. Méthodes d'enseignement	2
1.3.2. Mode d'évaluation.....	2
1.4. Quelques définitions.....	3
1.5. Microbiologie environnementale comme discipline scientifique.....	4
CHAP.2. PLACE DES MICROORGANISMES DANS LE MONDE VIVANT.....	7
2.1. Introduction	7
2.2. Ultrastructure de la cellule (Vu au microscope électronique)	8
2.3. Comparaison cellule eucaryote / cellule procaryote.....	11
CHAP.3. INFLUENCE DES MICROORGANISMES SUR NOTRE VIE	16
3.1. Influence des microorganismes sur la qualité de la vie sur terre.....	16
3.2. Les micro-organismes comme agents infectieux.....	20
3.3. Ils jouent un rôle important comme sources d'agents antimicrobiens	20
3.4. Les microorganismes influencent la qualité de nos boissons	21
3.5. Les microorganismes et nos aliments.....	21
3.6. Les microorganismes et la qualité de l'air que nous respirons.....	22
CHAP. 4. LES MICROORGANISMES DANS L'ENVIRONNEMENT	23
4.1. Classification	23
4.2. Morphologie des bactéries.....	23
4.3. Microorganisme du sol.....	25
4.3.1. Spécificité de l'écosystème tellurique	25
4.3.2. Caractérisation.....	25
4.3.3. Diversité spécifique	26

4.3.4. Diversité fonctionnelle	28
4.3.5. Cas de la rhizosphère.....	30
4.4. Microorganismes de l'eau	31
4.5. La microbiologie du sol.....	39
4.5.1. Spécificité de l'écosystème tellurique	39
4.5.2. La rhizosphère	40
4.5.3. Effet direct des PGPR sur les plantes	42
4.5.4. Effet indirecte des PGPR sur les plantes	43
4.6. Le microbiote intestinal humain et des ruminants.....	48
4.6.1. Le microbiote intestinal humain.....	48
4.6.2. Fonction du microbiote intestinal.....	50
4.6.3. Le microbiote intestinal des ruminants.....	51
CHAP. 5. PHYSIOLOGIE BACTERIENNE	53
5.1. Métabolisme bactérien	53
5.2. Facteurs écologiques structurant les communautés microbiennes dans l'environnement.....	54
5.2.1. L'Eau et effet de l'eau libre.....	54
5.2.2. La Pression hydrostatique.....	56
5.2.3. La Pression osmotique.....	56
5.2.4. La Température	56
5.2.5. Le pH.....	57
5.2.6. Les Besoins en Oxygène	57
5.2.7. La Pression mécanique	58
5.2.8. Les Radiations	58
5.3. Les facteurs biotiques	60
Références	61

CHAP. 1. INTRODUCTION

1.1. Descriptif et contenu du cours

La complexité de la nature impose aux spécialistes environnementaliste de comprendre et maîtriser les différents constituants du système vivant, leurs rôles spécifiques pour le fonctionnement des écosystèmes et les conséquences de la destruction ou la perturbation de chaque maillon de la chaîne vivante qui les relie.

La microbiologie de l'Environnement est une science qui étudie les microorganismes (bactéries, champignons, virus, algues microscopiques, etc.) présents dans différents milieux naturels tels que le sol, l'eau, et l'air ainsi que leur interaction entre eux et avec l'environnement. Elle implique ainsi une maîtrise des rôles des microorganismes dans les cycles bio-géo-chimiques et autres processus écologiques, la décontamination et la détoxification, la fertilisation des sols, etc.

1.2. Objectifs du cours

1.2.1. But du cours

Ce cours de microbiologie de l'environnement a pour but de :

- 1) Comprendre et maîtriser les principes et notions de la microbiologie environnementale;
- 2) Acquérir des connaissances de base sur la diversité, les fonctions et les interactions microbiennes du sol, des milieux aquatiques et des organismes vivants;
- 3) Acquérir des connaissances sur l'influence microbienne sur la qualité de la vie sur terre
- 4) Comprendre facteurs écologiques influençant la vie microbienne dans l'environnement.

1.1.2. Objectifs spécifiques

A la fin du cours, l'étudiant sera capable de :

1. Maîtriser la diversité taxonomique et fonctionnelle des microbes dans différents écosystèmes;
2. Décrire les différences structurales entre les différents groupes de microorganismes d'intérêt environnemental
3. Maîtriser le rôle des microorganismes dans l'Environnement
4. Maîtriser les mécanismes de transformation microbienne et biogéochimique des écosystèmes;
5. Décrire les principaux domaines dans lesquels les micro-organismes jouent un rôle majeur;

6. Expliquer l'influence des paramètres physiques et biochimiques du milieu sur le développement des micro-organismes;
7. Expliquer le développement d'une population de micro-organismes ainsi que les principales méthodes de quantification des populations;
8. E l'implication microbienne en biotechnologies environnementales.
9. Maitriser les besoins nutritionnels et physiologiques des microorganismes vivants

1.2. Contenu du cours

Ce cours de microbiologie environnementale s'articule sur cinq chapitres consacrés à une introduction générale (chapitre 1), la place des microorganismes dans le monde vivant (chapitre 2), influence des microorganismes sur notre vie (chapitre 3), les microorganismes dans l'environnement (chapitre 4) et la physiologie bactérienne (Chapitre 5).

1.3. Méthodologie

1.3.1. Méthodes d'enseignement

Ce cours de microbiologie de l'environnement est d'une charge horaire de 45heures réparties en 30 heures d'enseignement magistrales, exercices et travaux dirigés des étudiants présentées en classes pendant le cours et 15heures de travaux de terrain et travaux pratiques faits au laboratoires. Les principes du système BMD en application à l'Université du Burundi seront bien respectés.

Les supports pédagogiques comprennent les présentations power point et le syllabus du cours mis à disposition des étudiants. Des illustrations qui permettront aux étudiants de mieux comprendre la matière seront faites. L'interaction enseignant-étudiant sera privilégiée afin de créer un bon climat d'apprentissage.

1.3.2. Mode d'évaluation

Une évaluation sommative sous forme de sessions semestrielles est prévue. Un examen écrit sera pondéré sur une moyenne de 12 soit 60% et les travaux (dirigés, de terrain et pratiques) effectués en cours de l'année seront pondérés sur une moyenne de 8 soit 40%. Le total sera pondéré sur 20. Enfin un examen de rattrapage écrit sera coté sur 100%.

1.4. Quelques définitions

Microorganisme : Il s'agit d'un être vivant infiniment petit, invisible à l'œil nu, mais visible après grossissement par un microscope.

La **microbiologie :** C'est une branche spécialisée de la biologie qui traite des organismes microscopiques ou micro-organismes [**bactéries, champignons, protozoaires, algues (micro algues) et virus**]. Plus spécifiquement, la microbiologie se consacre à :

- ✓ l'identification et la caractérisation des micro-organismes ;
- ✓ l'étude de leur origine et de leur évolution ;
- ✓ définir leurs caractéristiques, les produits de leurs activités et leurs besoins ;
- ✓ comprendre les relations qu'ils entretiennent entre eux et avec leur milieu naturel ou artificiel.

Les microbes se distinguent les uns des autres par leur forme, leur taille et leur mode de vie (ex. physiologie, reproduction, écologie). Tout comme les organismes pluricellulaires, ils ont la capacité de se nourrir et se reproduire.

Les virus, quant à eux sont bien connus comme des structures acellulaires et parasites intracellulaires stricts (incapables d'effectuer de métabolisme à l'extérieur de la cellule hôte). Ils vivent aux dépens des cellules hôtes infectées (parasites obligatoire) et sont incapables de se reproduire sans détourner la machinerie cellulaire d'un autre organisme. De ce fait, ils sont de moins en moins considérés comme de vivants à part entière. La microbiologie s'intéresse parfois de leurs actions sur les micro-organismes mais n'a pas pour but de les étudier en tant qu'entités. Cette étude fait l'objet la virologie.

La microbiologie s'intéresse aux cellules isolées ou cellule unique (les unicellulaires), aux colonies de cellules (multicellulaires) et aux organismes ou particules acellulaires (sans structure cellulaire).

La microbiologie s'étend sur diverses sous-branches:

- ▶ En fonction du type de microbe étudié, on distingue la bactériologie, la mycologie, la parasitologie, la phycologie, la virologie (Fig. 1.1)

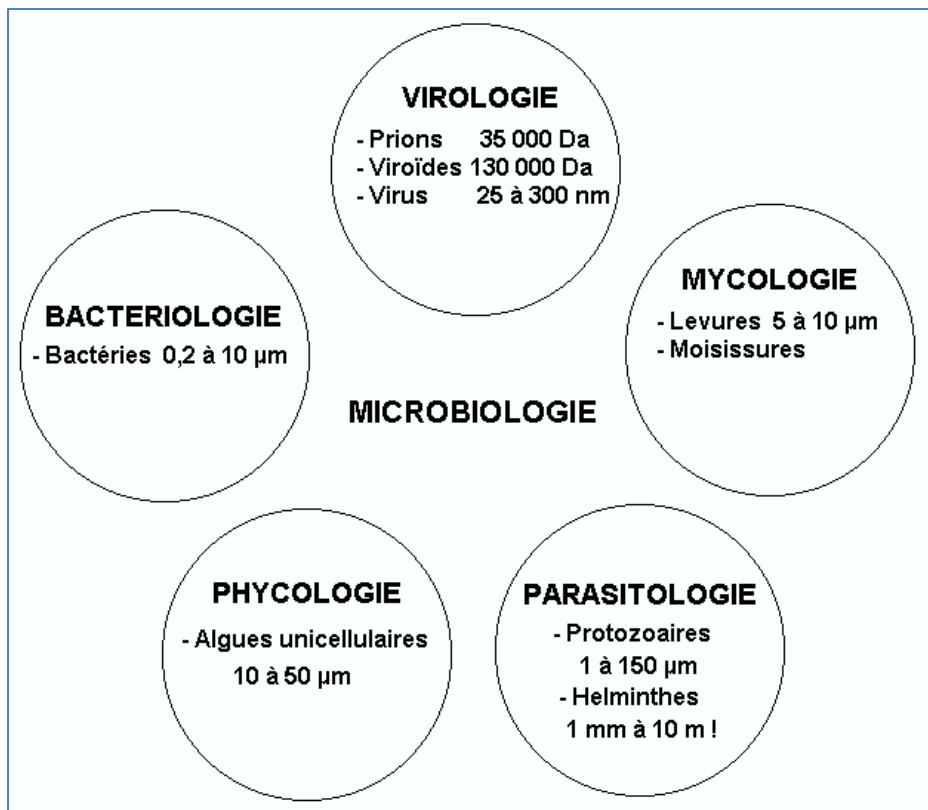


Figure 1.1 Les différentes branches de la microbiologie

En fonction de l'intérêt poursuivi, on distingue, entre autre:

- ✓ **La microbiologie environnementale:** étude des microorganismes dans leur environnement pour une meilleure compréhension des mécanismes de l'écologie et une meilleure conservation des milieux
- ✓ **La microbiologie appliquée:** l'étude et l'exploitation des microorganismes pour le bénéfice de la société
- ✓ **La microbiologie clinique:** l'étude des microorganismes pathogènes et de leurs effets sur l'homme, etc.

1.5. Microbiologie environnementale comme discipline scientifique

La microbiologie de l'environnement concerne l'étude et l'analyse de la diversité des microorganismes et de leurs fonctions dans leur environnement naturel (sol, eau et air) et artificiel. Cela inclut leurs impacts bénéfiques et néfastes sur la santé et le bien-être.

La microbiologie environnementale est liée, mais également différente, à l'écologie microbienne », qui se concentre sur les interactions impliquant des micro-organismes au sein d'un environnement tel que l'air, l'eau ou le sol. La principale différence entre les deux

disciplines réside dans le fait que la microbiologie environnementale est un domaine appliqué dans lequel on cherche à améliorer l'environnement et d'en faire bénéficier à la société.

La microbiologie environnementale est également liée à de nombreuses autres disciplines comme la microbiologie industrielle, la bio remédiation, la biotechnologie, etc. (Fig. 1.2)

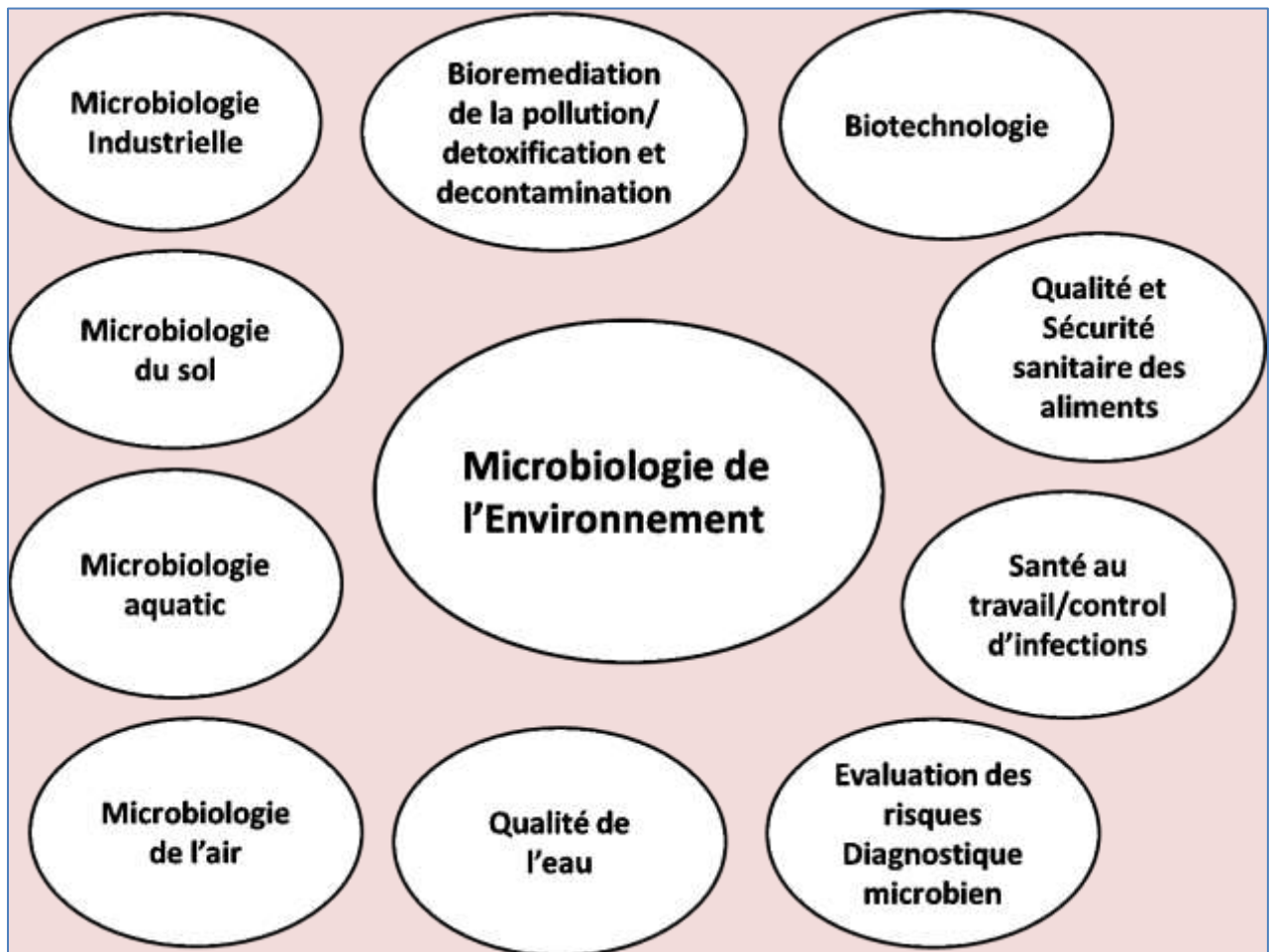


Figure 1.2 Interfaces entre microbiologie de l'environnement et d'autres disciplines.

L'importance de cette discipline repose sur le rôle crucial des microorganismes dans le fonctionnement des écosystèmes et dans le maintien de la vie sur terre. Leur multiple rôles dans l'environnement inclut notamment :

- La décomposition de la matière organique :

Les microorganismes sont de véritables décomposeurs de la matière organique morte et morte, le recyclage et recycleurs d'éléments nutritifs essentiels pour les plantes et d'autres organismes

- la fixation de l'azote

Des microorganismes comme les bactéries fixatrices d'azote, transforment l'azote atmosphérique en une forme utilisable par les plantes, favorisant ainsi la croissance des végétaux

- La production d'oxygène : les microorganismes photosynthétiques comme les cyanobactéries produisent l'oxygène lors de la photosynthèse, contribuant ainsi à l'oxygénation de l'atmosphère.

- la fermentation

Les microorganismes sont utilisés dans la fermentation pour produire une variété de produits alimentaires tels que le pain, les produits laitiers (ex. fromage, yaourt), la bière et le vin.

- La Bio remédiation

Des microorganismes peuvent dégrader des polluants et les contaminants dans l'environnement, contribuant à la dépollution des sols, de l'eau et de l'air ainsi qu'à la gestion des déchets.

-La symbiose avec les autres organismes

Les microorganismes établissent des relations symbiotiques avec d'autres organismes.

Ex. Association avec les légumineuses, contribuant à une fixation d'azotes atmosphérique utiles pour les végétaux ;

- Bactéries du tube digestif contribuant à la digestion des aliments chez les humains et chez les animaux

-Lutte biologique (protection contre les maladies

Des microorganismes spécifiques peuvent concurrencer ou inhiber la croissance de pathogènes, ce qui contribue à maintenir la santé des plantes, des animaux et des humains.

- Régulation de la qualité de l'eau et de l'air

CHAP.2. PLACE DES MICROORGANISMES DANS LE MONDE VIVANT

2.1. Introduction

Un microorganisme (microbe, germe) est un organisme vivant né d'un autre être vivant. Ceci contrarie la théorie selon laquelle une cellule vivante pourrait provenir d'une matière non vivante. La complexité du vivant pourrait se résumer comme suit:

Atome → Molécule → CELLULE → Tissu → Organe → ORGANISME → Population → Communauté → Ecosystème → Biosphère.

Les microorganismes constituent un groupe extrêmement diversifié d'organismes microscopiques, unicellulaires et répartis dans les **trois domaines du vivant (bactérie, archées et eucaryote)** (Fig. 2.1).

Les microorganismes seraient apparus sur la terre depuis plusieurs milliards d'années, peu après la formation de la planète et bien avant l'apparition de toute autre forme de vie. Néanmoins leur origine serait encore scientifiquement discutable.

Les microbes se trouvent partout: ils colonisent tous les écosystèmes, y compris les sols, les eaux douces et les eaux marines, l'air. Leur dispersion spatiale et à travers le monde est assurée par le vent, l'eau, les animaux, les invertébrés et autres vecteurs. Ils sont adaptés à diverses conditions environnementales. Ils habitent aussi bien des environnements favorables que des environnements plus hostiles tels que les pôles et zones glaciaires, les sols arides, les milieux salins, les eaux thermales et les geysers, le fond des océans, etc. Ce sont de colonisateurs efficaces (croissance rapide). Ils constituent la forme la plus dominante sur terre (plus de 60% de toute la matière organique sur terre).

Avec la méthode classique de caractérisation (basée sur la culture microbienne), seule 1% ont été caractérisés (24 royaumes), les 99% restant ne pouvant pas être caractérisés. L'utilisation des techniques basées sur la biologie moléculaire s'est montrée plus révolutionnaire, permettant la caractérisation de près de 99% des microorganismes.

L'arbre de vie ou arbre phylogénétique peut être généré en utilisant l'ARNr comme chronomètre.

Grace à leur diversité et ubiquité, les microorganismes sont des acteurs clés dans de nombreux processus biologiques et écologiques. Bien qu'ils fournissent une vaste gamme de services à la planète, ils produisent également des dommages (rôle pathogènes, production de toxines).

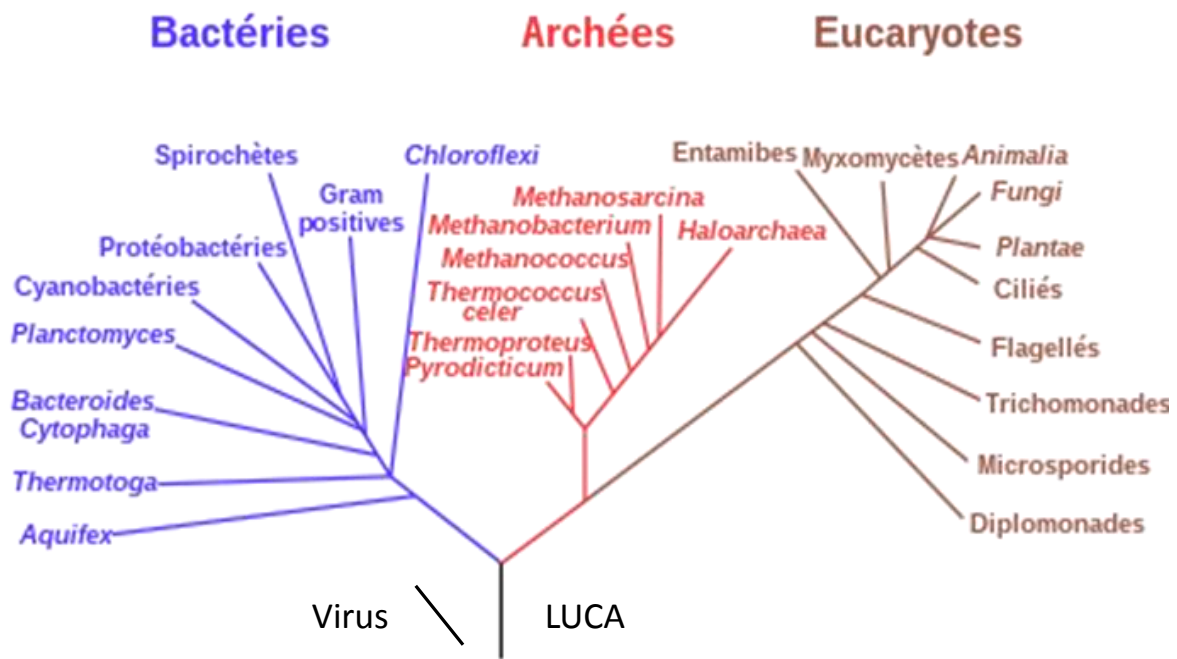


Figure 2.1 Un arbre phylogénétique du vivant défini sur base séquences d'ARN ribosomal et reliant les principaux groupes d'organismes vivants, à savoir les bactéries, les archées et les eucaryotes, au LUCA. Seuls quelques groupes d'organismes de chaque groupe sont représentés.

N.B : Le LUCA (Last Universal Common Ancestor), ou Dernier Ancêtre Commun Universel (DACU) en français, est le plus récent organisme dont sont issues toutes les espèces vivant actuellement et dans le passé sur Terre. Cela inclut tous les organismes cellulaires, mais pas nécessairement les virus. Il correspond à l'hypothèse que tous les êtres vivants sont issus d'une même lignée divergente d'ancêtres communs, remontant jusqu'à l'époque où la seule reproduction était la division cellulaire.

2.2. Ultrastructure de la cellule (Vu au microscope électronique)

Une cellule est une structure complexe, avec des organites dont la nature et/ou le nombre varie d'un type de microorganismes à l'autre. Elle comprend une membrane plasmique contenant un cytoplasme, lequel est formé d'une solution aqueuse (cytosol) dans laquelle se trouvent de nombreuses biomolécules telles que des protéines et des acides nucléiques, organisées ou non dans le cadre d'organites.

Chez les végétaux les algues, les champignons et les bactéries (excepté les mycoplasmes) la membrane cytoplasmique est surmontée d'une paroi, ce qui n'est pas le cas chez les cellules animales eucaryotes. Dans la cellule végétale, il s'agit d'une paroi pectocellulosique constituée de polysaccharides, notamment de cellulose, d'hémicellulose et de pectine. Elle est de nature

cellulosique chez les algues (ou de nature calcaire chez certaines algues; alcoolique ou en lignine chez les plantes). Chez les champignons, elle est formée de chitine (moins rigide que la cellulose). Chez les bactéries, la paroi est un polymère de N-acétyl- muramique et N-acétyl-glucosamine. La paroi est imperméable chez les végétaux et les algues tandis qu'elle est perméable chez les champignons et les bactéries. La cellule végétale contient aussi des chloroplastes ainsi que des vacuoles.

Les bactéries n'ont ni réticulum endoplasmique, ni l'appareil de Golgi, ni mitochondries, ni noyau délimité par une membrane nucléaire. Comme chez les végétaux, on rencontre chez les bactéries photosynthétiques et les algues des structures moléculaires assurant la photosynthèse. Les figures suivantes montrent l'ultrastructure des cellules eucaryotes animales (Figure 2.2), cellule eucaryote végétale (Fig. 2.3), cellule procaryote (bactérie) (Fig. 2.4), cellule fongique (Fig. 2.5) et d'un virus (organismes acellulaire) (Fig. 2.6)

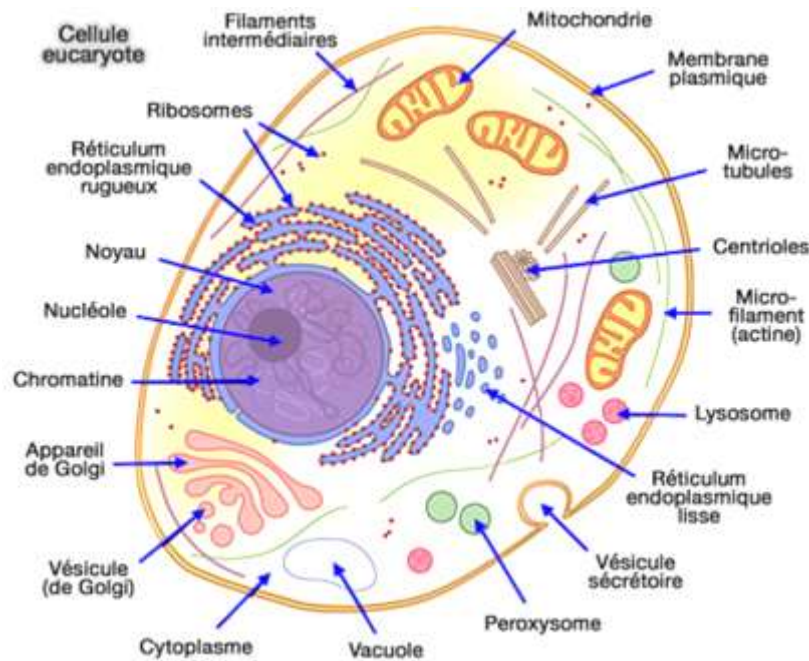


Figure 2.2 structure d'une cellule animale –Eucaryotes (coupe transversale)

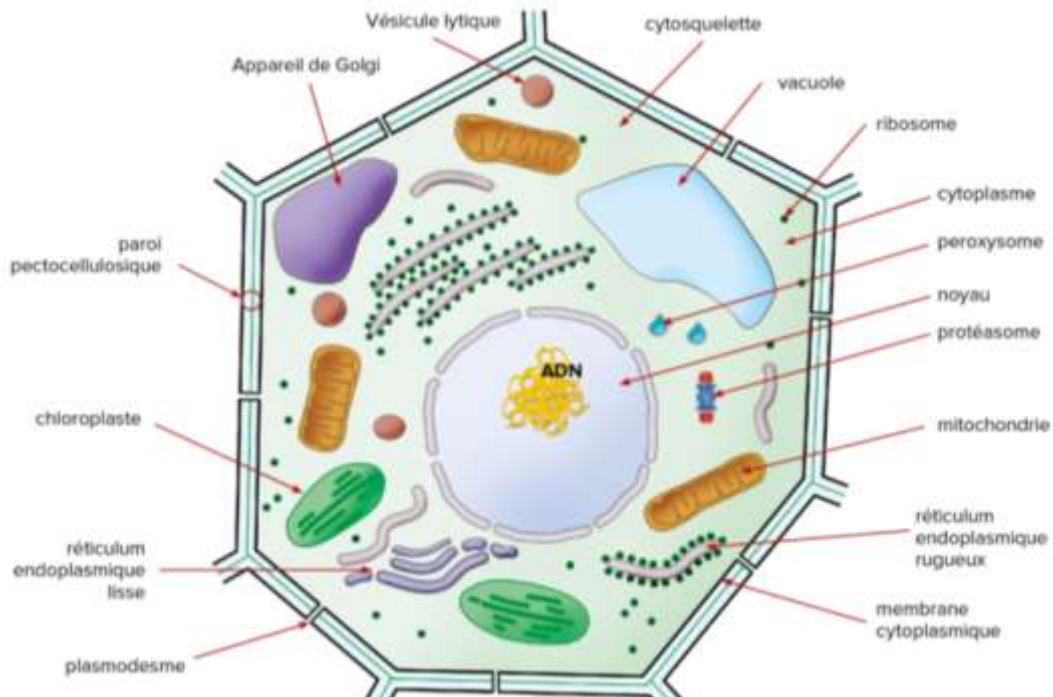


Figure 2.3 Structure d'une cellule végétale- Eucaryotes (coupe transversale)

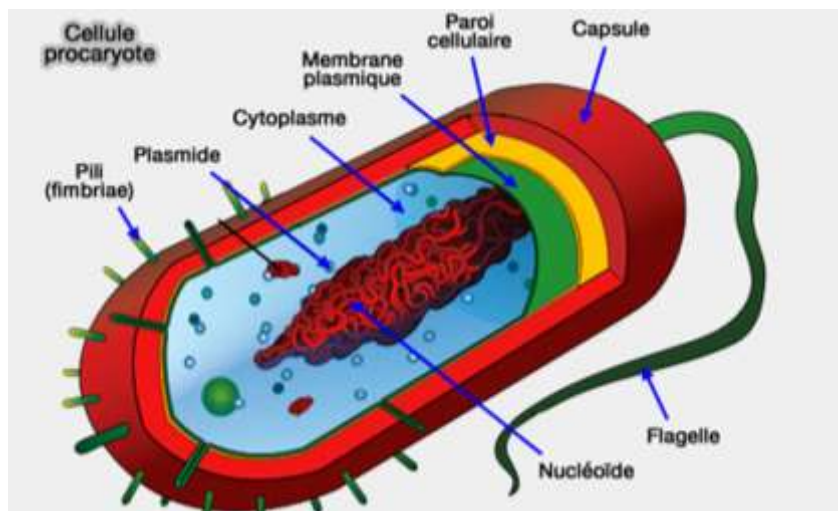


Figure 2.4 Structure d'une cellule procaryote.

Pour permettre les échanges entre la cellule et le milieu environnant, la paroi non perméable possède des plasmodesmes ou canaux de passage des éléments.

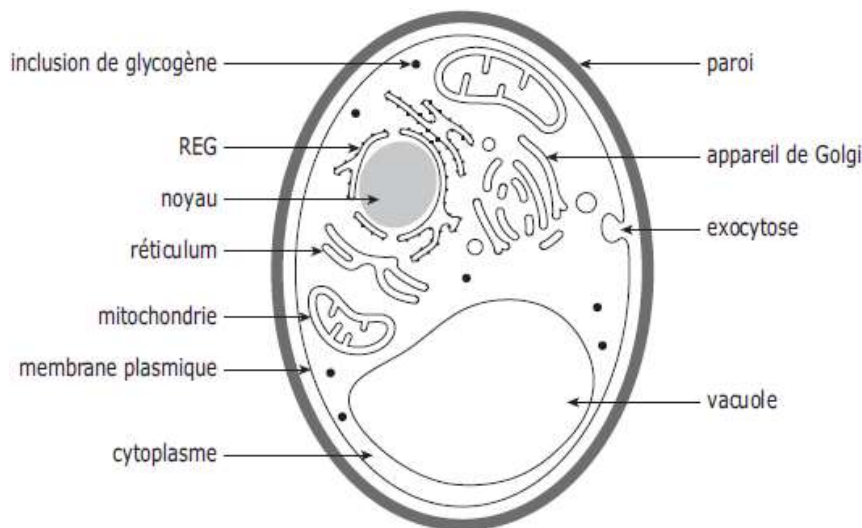


Figure 2.5 Structure d'une Cellule de levure (Coupe transversale)

Les virus n'ont que de l'ARN ou ADN protégé par une structure protéique plus complexe appelée capside (chez certains virus, la capside est surmontée d'une enveloppe glucido-lipidique).

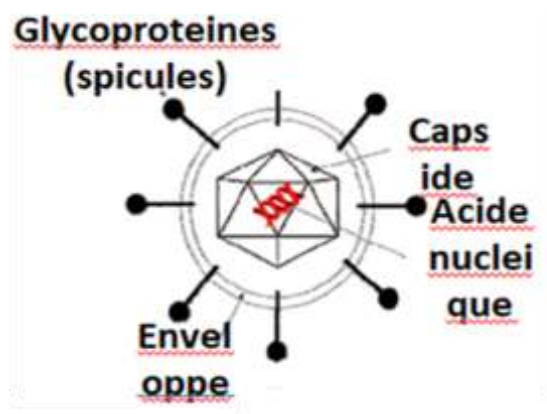


Figure 2.6 Structure d'une particule virale

NB: Les virus dépendent entièrement des cellules hôtes infectées et sont incapables de se reproduire sans détourner la machinerie cellulaire d'un autre organisme. Ils ne sont donc pas généralement considérés comme vivants. Ils ont une structure très simplifiée car seule le génome (ADN ou ARN) et la capside sont obligatoires. Ainsi on les met dans la catégorie d'organismes acellulaires.

2.3. Comparaison cellule eucaryote / cellule procaryote

- Les êtres vivants peuvent être divisés en deux groupes en fonction de l'organisation cellulaire, les virus ou organismes acellulaires constituant un groupe à part (Tableau 2.1):

- les organismes **procaryotes** (Bactérie, archées, cyanophycée), dont l'organisation cellulaire est simple, sans noyau différencié. L'ADN portant l'information génétique est généralement regroupé dans un nucléoïde et est directement au contact du cytoplasme. Bien qu'ils puissent former des colonies très nombreuses, ils sont toujours des organismes unicellulaires
- Les organismes **eucaryotes** (vrai noyau) dont le matériel génétique est contenu, sous forme de chromosomes, dans un noyau. Les eucaryotes comprennent un grand nombre de formes d'organismes unicellulaires et organismes multicellulaires.

Tableau 2.1. Trois catégories d'êtres vivants : organismes procaryotes, eucaryotes et acellulaires

organismes non cellulaires	Procaryotes	Eucaryotes
Virus	Protistes inférieurs ou procaryotes (cellules de type rudimentaire) ✓ Bactéries ✓ Cyanobactéries (algues bleu-vert)	➤ Plantes vasculaires et Bryophytes ➤ Animaux (métazoaires) ➤ Protistes supérieurs ou eucaryotes: ✓ Algues (sauf Cyanophytes = cyanobactéries) ✓ Protozoaires ✓ Champignons

Les **procaryotes** sont pourvus de tous les processus biologiques vitaux, y compris les mécanismes de **signalisation cellulaire**, un **système complexe de communication** qui régit les processus fondamentaux des **cellules** et coordonne leur activité. Plus petites et plus simples que les cellules d'**eucaryotes**, les cellules de procaryotes sont dépourvues de **système endomembranaire** et des **organites** qui le constituent, à commencer par le **noyau**.

Les principales différences entre les cellules de procaryotes et cellules d'eucaryotes sont montrées dans le tableau ci-après (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Principales différences entre les cellules de procaryotes et cellules d'eucaryotes

Caractéristiques	Cellule prokaryote	Cellule eukaryote
Taille typique	1-10µm	10-100µm
Type de noyau	Une région nucléaire diffuse, le Nucléole (Pas de véritable noyau)	Vrai noyau limité par une membrane nucléaire
Division de la cellule	Division simple, Amitose	Mitose (réplication de la cellule) Méiose (pr la formation de gamètes)
Organisation génétiques		
Membrane nucléaire	Non	Oui
Nombre de chromosome	Général unique, haploïde	Plusieurs chromosomes diploïdes
Chromosome circulaire	Oui	Non (chromosomes linéaires visibles au moment de la division cellulaire)
Association ADN-Histones	Non (ADN lié à des protéines basiques)	Oui (ADN lié à des histones)
Présence d'autre ADN	Plasmidique	Mitochondriale, chloroplastique
Recombinaison génétique	Partielle	Totale
Nucléole	Non	Oui
Echange génétique	Transfert unidirectionnel	Fusion des gamètes
ARN et synthèse de protéines	Couplé au cytoplasme	Synthèse d'ARN dans le noyau Synthèse de protéines dans le cytopl.
Premier acide aminé initiant la synthèse d'une chaîne polypeptidique	Méthionine ou N-formylméthionine	Méthionine
Caractéristiques	Cellule procaryote	Cellule eucaryote
Structure cellulaires et organites		
Appareil de Golgi, et Réticulum Endoplasmique.	Non	Oui
Lysosomes	Non	Oui
Mitochondries	Non	Oui
Chloroplastes	Non	Oui chez les plantes
Paroi	Présente (composée de peptidoglycane)	- Absente chez animaux et protozoaires; -Présentes chez plantes, champignons et algues (polysaccharides)
Présence de stérols dans les membranes	Non	Oui
Photosynthèse	chromatophores ou chlorosomes (système membranaire interne)	chloroplastes
Endospores	Oui, parfois	Non
Taille des ribosomes	70 S	80 S, sauf mitochondries et chloroplastes

Localisation des ribosomes	Dispersés dans le cytoplasme	Dispersés dans le cytoplasme ou liés au réticulum endoplasmique
Constances de sédimentation des ARN ribosomaux	16S, 23S, 5S	18S, 28S, 5.8S, 5S
Attributs fonctionnels		
Phagocytose	Non	Oui, parfois
Pinocytose	Non	Oui, parfois
Flux cytoplasmique	Non	Oui
Mobilité/ mouvement cellulaire	- pas de mouvement amiboïde (paroi rigide). - mouvement flagellaire	- Mouvement amiboïde (eucaryotes sans paroi). - Mouvement flagellaire.
Système respiratoire/ Site de transport des électrons	Membrane cellulaire	Membrane des organites/mitochondries

L'**ADN** d'un procaryote forme un unique **chromosome** en contact direct avec le **cytoplasme**. La région nucléaire du cytoplasme est appelée **nucléoïde** et n'est pas nettement séparée du reste de la cellule. La plupart des procaryotes sont les plus petits des êtres vivants connus, avec un diamètre compris entre 0,5 et 2 μm .

Une cellule de procaryote contient trois régions distinctes :

- l'**extérieur** de la cellule porte des **flagelles** et des **pili** qui sortent de la surface cellulaire chez un grand nombre de procaryotes. Ces structures permettent à ces cellules de se déplacer (**motilité** cellulaire) et de communiquer entre elles ;
- la **surface** de la cellule est délimitée par l'**enveloppe cellulaire**, formée généralement d'une **paroi cellulaire** recouvrant une **membrane plasmique**. Certaines bactéries sont recouvertes d'une couche supplémentaire appelée **capsule**. L'enveloppe confère sa rigidité à la cellule et sépare l'intérieur de la cellule de l'environnement de cette dernière en jouant le rôle d'un filtre protecteur. La paroi cellulaire des bactéries contient une substance fondamentale, le **peptidoglycane** et agit comme barrière supplémentaire contre les agents extérieurs. Elle empêche également la cellule de se dilater et d'éclater (**cytolysse**) sous l'effet de sa pression osmotique interne dans un environnement hypotonique. Certains eucaryotes sont également pourvus d'une paroi cellulaire. C'est le cas des cellules végétales et les cellules fongiques ;
- l'**intérieur** de la cellule possède une région qui contient le génome (ADN) et contient également des ribosomes et divers types d'inclusions. Les ribosomes sont responsables de l'aspect granulaire du cytoplasme des procaryotes. Le matériel génétique est libre dans le cytoplasme. Les procaryotes peuvent porter des éléments extra chromosomiques appelés plasmides, qui sont généralement circulaires.

Ces plasmides encodent des gènes supplémentaires, comme des gènes de résistance aux antibiotiques.

Les plantes, les animaux, les mycètes, les protozoaires et les algues sont des eucaryotes. Ces cellules sont en moyenne 15 fois plus grandes qu'un procaryote typique, et peuvent être jusqu'à mille fois plus volumineuses.

La principale caractéristique qui distingue les eucaryotes des procaryotes est leur compartimentation en organites spécialisés au sein desquels se déroulent des processus métaboliques spécifiques. Parmi ces organites se trouve le noyau, qui héberge l'ADN de la cellule. C'est la présence de ce noyau qui donne son nom à ce type de cellules. Le mot *eucaryote* est forgé à partir de racines grecques signifiant « à vrai noyau ».

Il faut également noter que:

- la fonction biologique de la membrane plasmique des eucaryotes est semblable à celle des procaryotes, bien que la structure puisse être un peu différente.
- le matériel génétique des eucaryotes est organisé en une ou plusieurs molécules d'ADN linéaires associées à des histones pour former des chromosomes. Tout l'ADN chromosomique d'un eucaryote est contenu dans le noyau, séparé du cytoplasme par la membrane nucléaire. On rencontre de l'ADN extra chromosomique chez certains eucaryotes. C'est le cas des mitochondries.
- de nombreuses cellules d'eucaryotes sont pourvues de cils primaires, qui jouent un rôle important dans la perception par la cellule d'informations chimiques, mécaniques et thermiques sur son environnement. Les cils primaires doivent donc être vus comme des antennes cellulaires sensibles qui coordonnent un grand nombre de voies métaboliques de signalisation cellulaire, parfois en couplant la signalisation à la motilité ou à la division cellulaire, voire à la différenciation cellulaire⁷ ;
- certaines cellules d'eucaryotes peuvent se déplacer par motilité au moyen de cils vibratiles ou de flagelles. Ces derniers forment des systèmes plus simples chez les eucaryotes que chez les procaryotes.

CHAP.3. INFLUENCE DES MICROORGANISMES SUR NOTRE VIE

Les microorganismes sont des acteurs influençant notre vie sous différents aspects :

- Ils exercent leur influence sur la qualité de la vie sur terre,
- Ils jouent le rôle d'agent infectieux,
- Ils affectent la qualité de l'eau de boissons, de nos aliments et de l'air que nous respirons,
- Ils jouent un rôle important comme sources d'agents antimicrobiens.

3.1. Influence des microorganismes sur la qualité de la vie sur terre

Microorganismes en tant que producteurs et décomposeurs

Dans l'environnement, les microorganismes interviennent en tant que producteurs ou décomposeurs. Les microorganismes producteurs sont photolithotrophes ou chimiolithotrophes. Ils tirent leur énergie de la lumière ou des composés inorganiques et synthétisent des matières organiques. En raison de ces propriétés, ils constituent le point de départ de nombreuses chaînes alimentaires.

Les microorganismes décomposeurs sont chimiolithotrophes. Par leurs activités métaboliques, ils dégradent les matières organiques en matières minérales. Ce recyclage permanent entretient la vie en rendant les éléments nutritifs constamment disponibles bien qu'ils soient en quantités limitées dans l'environnement. Les décomposeurs, recyclent la matière organique morte afin de restituer aux producteurs les matières minérales nécessaires à la poursuite de leurs activités. Ce rôle primordial concerne aussi la chaîne d'énergie (Fig. 3.1)

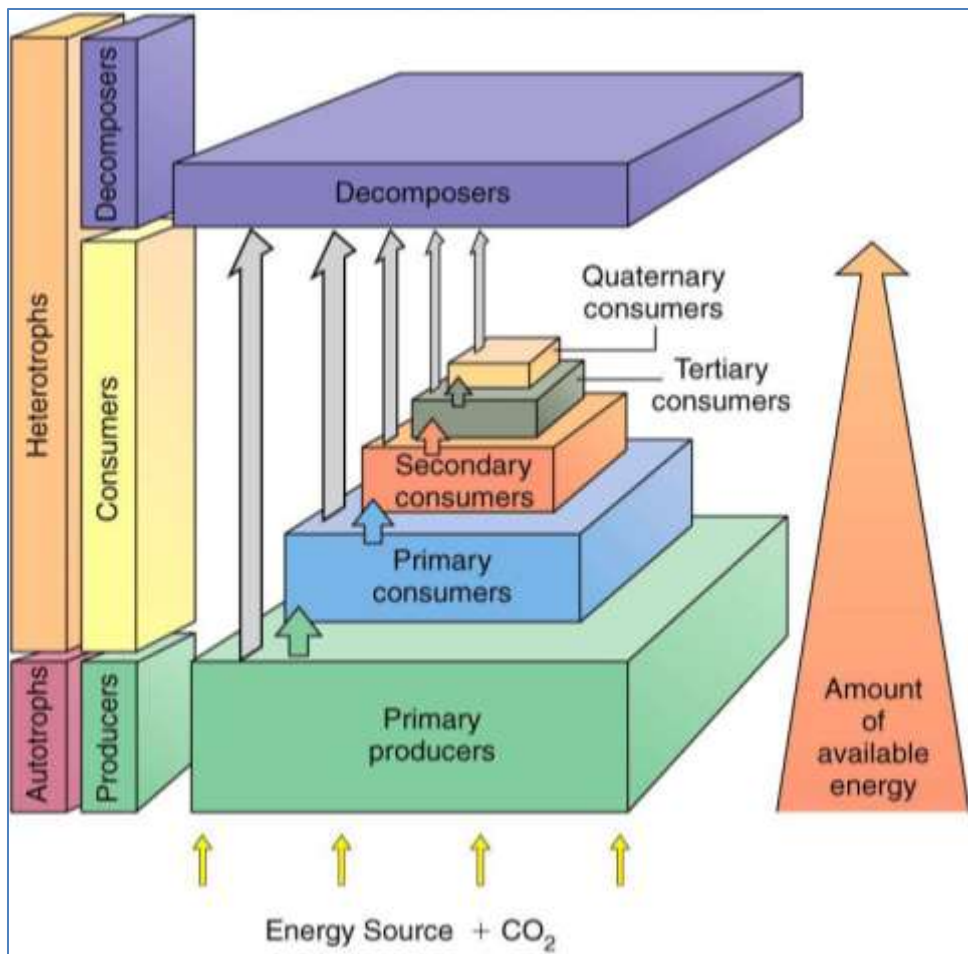


Figure 3.1. Chaîne trophique et d'énergie

Rôle microbien dans les cycles biogéochimiques

Les microorganismes jouent un rôle indispensable dans les cycles biogéochimiques dont dépend la vie sur terre. Par exemple, comme c'est le cas pour les plantes, des microorganismes photosynthétiques sont impliqués dans le cycle du carbone (Fig.3.2) en participant à l'élimination du dioxyde carbone atmosphérique lors de la photosynthèse (conversion du C_{inorg} du CO_2 en C_{org}).

Au cours de ce processus, le dioxyde de carbone est converti en éléments constitutifs du carbone organique sous forme de biomasse végétale ou microbienne, ce qui aboutit finalement à la formation de matière organique. Cette matière organique est par la suite dégradée par des micro-organismes via des processus respiratoires qui rejettent à nouveau du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Sans respiration (conversion du C_{org} de la matière organique en C_{inorg}), microbienne, une vaste gamme de matières organiques s'accumulerait.

Des processus biogéochimiques similaires existent pour tous les autres éléments et sont également pilotés par des micro-organismes. En outre, ces cycles peuvent être bénéfiques

pour l'activité humaine, comme dans le cas de la dépollution des polluants organiques et métalliques. Néanmoins, ils peuvent aussi porter préjudice environnementale, comme dans le cas de la formation de gaz à effet de serre (Ex. l'oxyde d'azote) qui peuvent appauvrir la couche d'ozone de atmosphérique terrestre.

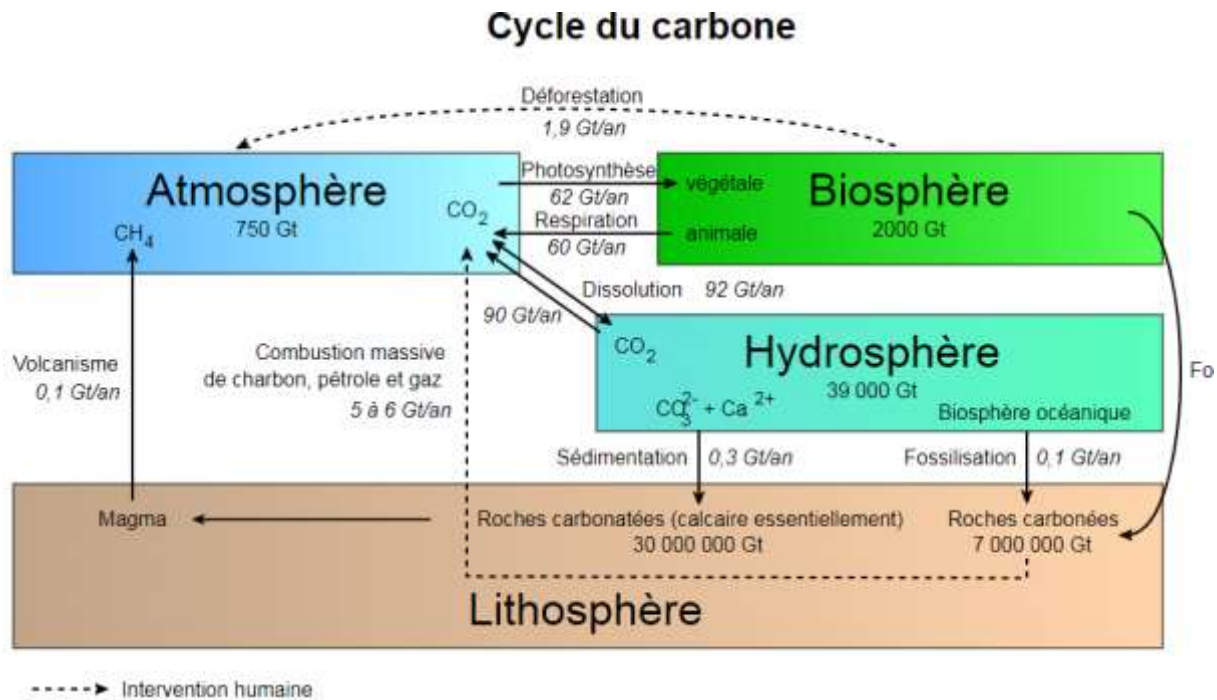


Figure 3.2. Cycle du carbone (Bendeck — Travail personnel, CC BY-SA 3.0)

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25376977>

L'immense réservoir de carbone est la lithosphère qui stocke 80 000 000 gigatonnes (Gt) de carbone minéral, sous forme de roches carbonatées et 14 000 Gt de carbone dans la matière organique — pétrole, charbon, gaz — fossile (réévaluation par rapport aux données du schéma). L'hydrosphère est un réservoir intermédiaire qui stocke 39 000 Gt de carbone sous forme de CO_2 . L'atmosphère et la biosphère sont des petits réservoirs : le premier stocke 750 Gt principalement sous forme de CO_2 , le second deux à trois fois plus selon les auteurs. Comme pour d'autres cycles biogéochimiques, le cycle de carbone exige une implication microbienne (Fig.3.3)

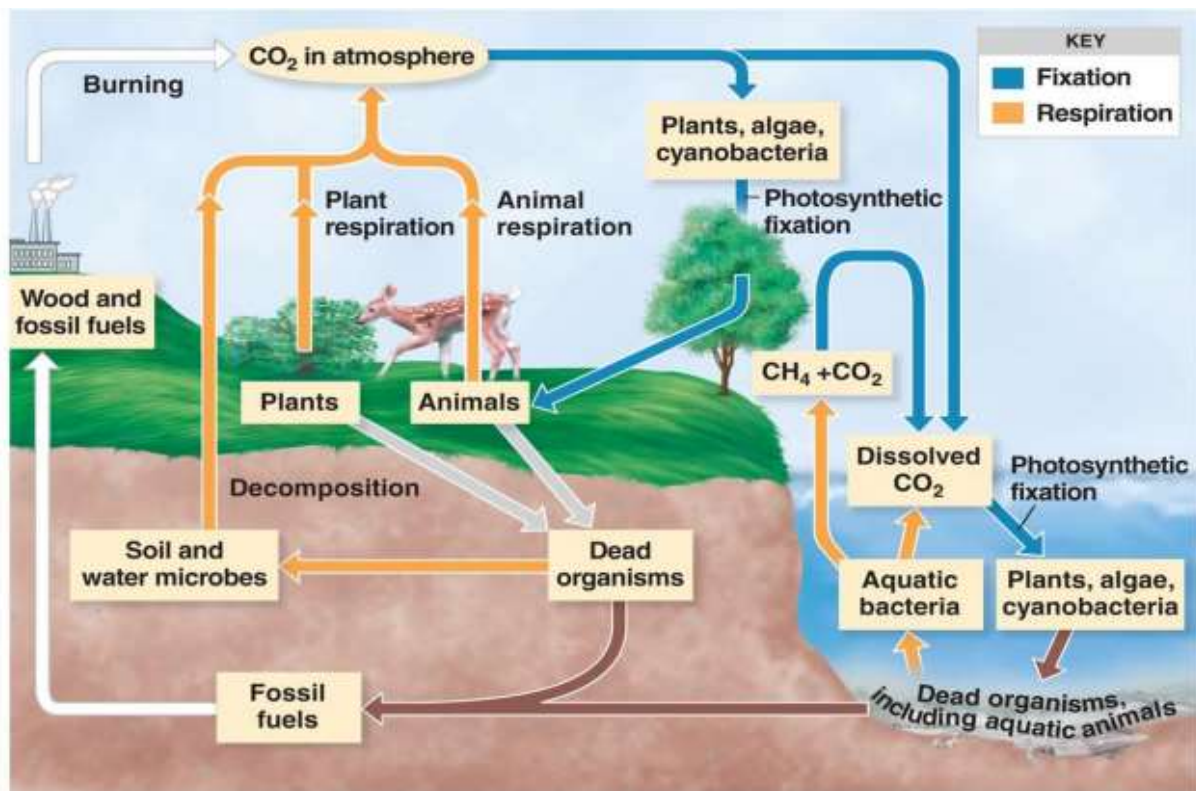


Figure 3.3 Implication microbienne dans le cycle de carbone

<http://www.eagri.org/eagri50/AMBE101/pdf/lec16.pdf>

Des fonctions similaires à celles impliquées dans le cycle de carbone existent pour le cycle d'autres éléments comme l'Azote (Fig.3.4), de phosphore, etc.

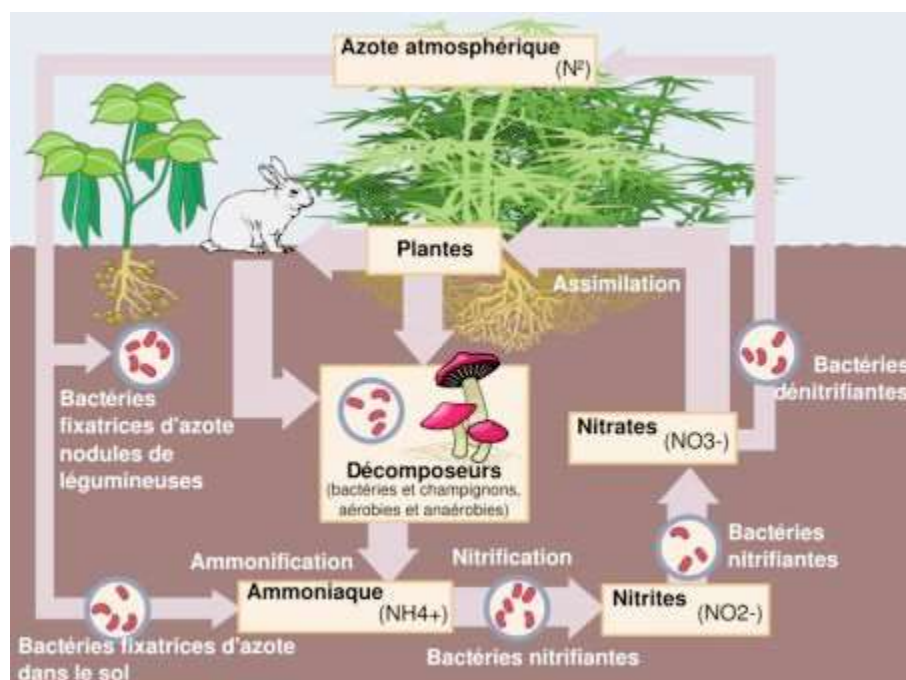


Figure 3.4 Cycle de l'Azote (<https://serc.carleton.edu/eslabs/carbon/5a.html>)

L'influence des microorganismes du sol sur le réchauffement climatique pourrait être un des effets indirects majeurs de leur activité.

Néanmoins, l'impact net des microorganismes sur le processus de réchauffement climatique est sujet de débat

Les sols peuvent être une source de « gaz à effet de serre » tels que le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux en raison de la respiration microbienne. Ils peuvent aussi être un puits de carbone en raison de l'activité photosynthétique accrue et de la séquestration du carbone qui en résulte. Cela laisse penser que même des changements relativement minimes dans le stockage du carbone dans le sol pourraient avoir un impact significatif sur le bilan carbone mondial et sur le réchauffement climatique.

3.2. Les micro-organismes comme agents infectieux

L'homme est constamment exposé à une diversité d'agents pathogènes qui peuvent être de nature bactérienne, protozoaire ou virale. La voie d'exposition est variable et peut se faire par ingestion ou inhalation d'aliments, d'eau ou d'air contaminés, ou par contact avec des sols ou des vecteurs passifs.

Les infections résultant d'agents pathogènes microbiens peuvent être légères à graves, voire mortelles. Dans des cas extrêmes, des pandémies peuvent survenir, comme dans le cas de la pandémie de grippe de 1918-1919, qui s'est propagée dans le monde entier et a tué plus de personnes que le nombre de morts pendant la Première Guerre mondiale (Brundage et Shanks, 2008). C'est aussi le cas du potentiel d'une pandémie provenant du virus de la grippe aviaire (H5N1) (Malik Peiris et al. 2007) et de l'actuelle pandémie de COVID 19 qui s'est démarqué ses effets néfastes sur la santé, la paralysie des activités économiques, les relations entre pays et la privation de liberté de mouvement.

3.3. Ils jouent un rôle important comme sources d'agents antimicrobiens

Bien que de nombreux microbes soient pathogènes pour les humains, plus nombreux autres constituent une source de produits naturels essentiels au maintien ou à l'amélioration de la santé humaine, tout comme celle des animaux et même des plantes. Les premières classes de composés découverts étaient les antibiotiques, composés produits par des micro-organismes environnementaux qui tuent ou inhibent d'autres micro-organismes.

Le premier antibiotique découvert fut la pénicilline isolée du champignon *pénicillium* par Sir Alexander Fleming en 1929. Plus tard, Selman Waksman découvrit la streptomycine en 1943, un exploit pour lequel il reçut le prix Nobel. Cet antibiotique a été isolé de *Streptomyces*

griseus et, depuis lors, les actinomycètes du sol se sont révélés être une source majeure d'antibiotiques.

Outre les bactéries, les champignons sont également une source de produits naturels bénéfiques pour la santé humaine. En particulier, les endophytes, qui sont des microbes qui colonisent les racines des plantes sans effets pathogènes, constituent une riche source de nouveaux antibiotiques, antimycotiques, immunosuppresseurs et agents anticancéreux (Strobel et Daisy, 2003). Stabilisation des microtubules des agents (MSA) tels que le paclitaxel ont été isolés de champignons endophytes associés à des espèces d'ifs (*Taxus* spp.). Parce que le paclitaxel agit comme un poison cellulaire qui arrête la division cellulaire, il est devenu un agent anticancéreux très puissant (Snyder, 2007). Il a également été démontré que les endophytes ont des applications utiles dans l'agriculture et l'industrie (Mei et Flinn, 2010). Une nouvelle technologie connue sous le nom d'« exploitation minière génomique » a donné lieu à de nouvelles découvertes de produits naturels utiles. Ces technologies moléculaires permettent l'identification de nouveaux produits médicamenteux résultant de groupes de gènes qui ne sont normalement pas exprimés dans des conditions de laboratoire (Gross, 2009). Ces nouvelles approches sont de bon augure pour les futures sources de nouvelles ressources naturelles de produits qui amélioreront la santé humaine.

3.4. Les microorganismes influencent la qualité de nos boissons

Les microbes environnementaux influencent directement ou indirectement la qualité de l'eau de boissons. Les effets négatifs directs peuvent inclure la contamination des eaux de surface ou des eaux souterraines par des micro-organismes pathogènes.

Les microbes peuvent également exacerber la contamination chimique de l'eau, comme dans le cas de l'arsenic. Plus précisément, certains microbes du sol utilisent l'arséniate comme accepteur terminal d'électrons dans des conditions anaérobies, convertissant ainsi l'arséniate en arsénite, une espèce plus toxique et plus mobile, plus susceptible de contaminer les eaux souterraines (National Conseil de recherche, 2007). Par contre, les microbes peuvent également protéger ou améliorer indirectement la qualité de l'eau, par exemple par la dégradation des matières organiques toxiques dans la zone critique qui protège les eaux souterraines (Lin, 2010).

3.5. Les microorganismes et nos aliments

Le sol est un support fondamental pour la production alimentaire puisque la grande majorité des aliments destinés à la consommation humaine ou animale proviennent du sol. Le sol situé

à proximité des racines des plantes est connu sous le nom de rhizosphère et contient un grand nombre de micro-organismes du sol indispensable à la croissance des plantes. Sans organismes de la rhizosphère, la croissance des plantes est sévèrement réprimée, puisque les microbes bénéfiques améliorent l'absorption des nutriments. De plus, des bactéries spécifiques du sol, appelées rhizobia, fixent l'azote atmosphérique en ammoniac pour les légumineuses, et les champignons mycorhiziens améliorent l'absorption du phosphate par les plantes. Les effets néfastes des micro-organismes sur ce que nous mangeons incluent également la contamination par des microbes pathogènes et des toxines microbiennes.

3.6. Les microorganismes et la qualité de l'air que nous respirons.

Les microbes peuvent être aérosolisés par les activités naturelles et humaines. Les humains influencent le transport des aérosols microbes à travers diverses activités, notamment épandage des déchets sur le terrain. L'introduction de tours de refroidissement et de douches chaudes crée également une voie d'exposition humaine à la bactérie *Legionella* en aérosol, ce qui peut entraîner des infections potentiellement mortelles. Alors que 80 % de notre temps est désormais passé à l'intérieur, la qualité de l'air dans ces environnements peut également entraîner le « syndrome des bâtiments malsains » et des crises d'asthme.

Les allergènes d'origine microbienne sont également facilement transportés dans et à travers l'air. Les mycotoxines produites par les moisissures fongiques du sol, notamment *Aspergillus*, *Alternaria*, *Fusarium* et *Penicillium*, peuvent causer divers problèmes de santé. Par exemple, l'aflatoxine produite par *Aspergillus flavus* est un puissant cancérigène.

CHAP. 4. LES MICROORGANISMES DANS L'ENVIRONNEMENT

4.1. Classification

Les microorganismes vivant ont pendant longtemps été classifiés suivant des critères phénétiques ou phénotypiques. Une telle classification se base sur un certain nombre de caractères tels que la morphologie et la structure cellulaire, aspects macroscopiques des colonies, l'habitat, conditions de culture, le pouvoir pathogène, pouvoir antigénique, la capacité à sporuler et l'existence de caractères biochimiques divers jugés essentiels. Cependant, ce type de critères rendent instable cette classification qui n'a que peu de chance d'être cohérente en regard des critères phylogénétiques. Ces critères de classification sont progressivement remplacés par des critères moléculaires (GC%, hybridation, étude des ARNr...).

4.2. Morphologie des bactéries

L'observation au microscope optique à partir de prélèvements pathologiques ou d'un milieu de culture, permet distinguer la forme des cellules, leurs dimensions, et les arrangements ou les groupements qu'elles constituent entre elles. Ces informations définissent la morphologie bactérienne et constituent un des critères de reconnaissance et d'identification.

Taille: les bactéries les plus petites ont une taille d'environ 0,2 μm (*Chlamydia*) et les plus longues certains Spirochètes peuvent atteindre 250 μm de long. En moyenne la taille se situe entre 1 et 10 μm .

Forme

Parlant de la forme des cellules, on distingue différents groupes (Fig. 4.1):

- a. Des bactéries de forme sphérique, arrondies ou cocci, isolées, en chaînette, en amas (nombre variable de cellules) : Staphylocoques, Streptocoques ...
- b. Des bactéries de forme cylindrique ou en bâtonnet: On en distingue deux principales:
 - ✓ Le bâtonnet droit ou bacille (allongée), isolée, en chaînette ou en amas, de longueur et de diamètre variables : *E.coli*, *Salmonella*, *Bacillus*.
 - ✓ le bâtonnet incurvé ou vibron: forme cylindrique est celle du vibron, bacille incurvé, en virgule :(*Vibrio cholerae*)
- c. Des bactéries de forme spiralée: spirilles, spirochètes, comme *Treponema*.
- d. Un groupe particulier de bactéries de forme filamenteuse se rapprochant des moisissures : les Actinomycètes.

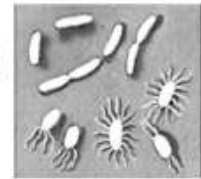
Associations cellulaires: une espèce bactérienne peut apparaître sous forme de cellules isolées séparées ou en groupements (ex. au cours de la division et multiplication des cellules) caractéristiques variables selon les espèces: **association par paires, en amas réguliers, en chaînette, par quatre (tétrades), etc.**

✓ **Formes arrondies ou sphériques → coques**

Amas, grappe (*Staphylocoques*)
Chaînette (*Streptocoques*)
Diplocoque (*Pneumocoque*)



✓ **Formes intermédiaires → coccobacilles** (*Haemophilus influenzae*)



✓ **Formes allongées en forme de bâtonnet → bacilles**

Extrémités carrées (*Bacillus anthracis*)
Extrémités éfilées (*Fusobacterium*)
Pléiomorphes (*Corynebacterium diphtheriae*)
Incurvées : vibrions (*Vibrio cholerae*)



BACILLE



BACILLE FUSIFORME



VIBRIONS



✓ **Formes spiralées**

Flexibles : Spirochètes (*Treponema palidum*)
Rigide (*Spirilles*)



SPIRILLE



BORRELIA



TREPONEME



LEPTOSPIRE

Figure 4.1 Forme et mode d'association bactérienne

Certaines structures sont présentes chez toutes les bactéries, ce sont les éléments « constants »; d'autres sont retrouvés seulement chez certaines bactéries: ce sont les éléments « inconstants » ou « facultatifs ».

Les éléments constants comprennent la Paroi, la membrane plasmique, le Periplasme (espace periplasmique), le Cytoplasme, l'Appareil nucléaire (Chromosome), les Ribosomes, et les Polysomes

Quant aux éléments inconstants ou facultatifs, il s'agit notamment de la Capsule, les Pili et Fimbriae, la Flagelle, le Mésosome, les Plasmides, les Vacuoles à gaz (bactéries aquatiques), les inclusions de réserve, et les Endospore (bactéries sporulant).

La composition et les rôles spécifiques à chacune de ces structures sont définis dans le cours de microbiologie générale. Toutefois il faut signaler que la présence ou l'absence de telle ou telle autre structure, la composition chimique constitue des éléments importants pour la diversité et l'adaptation microbienne aux conditions diverses, y compris les milieux hostiles.

En termes d'effectifs d'individus, les microorganismes dominent sur le reste des êtres vivants (Whitman et al. Prokaryotes: The unseen majority, Proc. Natl. Acad. Sci. 95:6578, 1998) :

- Estimation globale (sol, eau, atmosphère): 5×10^{30} (environ 350-550 $\times 10^{15}$ g de Carbone ou environ 60-100% de la masse totale de C dans les plantes)
- Océans (200m) : 3.5×10^{30}
- Sol/subsol /sédiment : $0.25-2.5 \times 10^{30}$
- Océans (>200m) : 0.12×10^{30}
- Animaux domestiques : 4×10^{24} (peau/intestins)
- Atmosphère (3km) : 5×10^{19}

Leur taux de production cellulaire totale est estimé à 1.7×10^{30} cellules/année.

Leur taux de rotation (turnover rate) est estimé à :

- ▶ Océans (200m) : 6-25 jours
- ▶ (>200m) : 0.8 années
- ▶ Sol de surface : 2.5 années
- ▶ Subsol : 10^3 années

4.3. Microorganisme du sol

4.3.1. Spécificité de l'écosystème tellurique

Le sol supporte une large proportion de la biodiversité terrestre. Il héberge en effet une grande diversité d'organismes (microorganismes, animaux et végétaux).

La plupart sont responsables de processus de biotransformation et de transfert des éléments ou des composés. De nombreux processus se déroulant dans le sol sont assurés par une variété d'organismes (bactéries, champignons, protozoaires, racines, faune). Les organismes du sol affectent aussi la productivité végétale, que ce soit de manière directe ou indirecte (modifications des cycles du carbone et des nutriments, de la structure du sol, interactions trophiques et contrôle des parasites et pathogènes). La distribution dans le temps et dans l'espace des processus biologiques n'est ni aléatoire, ni homogène. Les activités des organismes du sol sont concentrées dans des sites riches en substrats carbonés

4.3.2. Caractérisation

Les méthodes classiques de caractérisation des populations du sol reposent sur des techniques de culture *in vitro* (en laboratoire) sur des milieux nutritifs sélectifs (favorisant un groupe particulier de microbes par rapport aux autres) ou non sélectifs, la quantification étant faite

par l'observation avec microscope ou d'autres méthodes directes de détection. Malgré que ces techniques aient permis d'obtenir des informations précieuses en microbiologie, les connaissances de la communauté microbienne du sol sont restées incomplète. De nombreuses espèces microbiennes (99% de toutes les espèces) présentes dans le sol sont non cultivables dans les conditions de laboratoires.

Le développement de techniques de biologie moléculaire, entrepris depuis les années 2000, a été d'un succès révolutionnaire dans la caractérisation des communautés microbiennes des sols sur la base de l'ADN du sol. En effet, l'ADN extrait directement du sol contient tous les génomes des microorganismes présents dans l'échantillon. Avec les méthodes de séquençage d'ADN ou ARN, on arrive à identifier la diversité microbienne dans un échantillon de sol. En outre, la quantification de cet ADN permet de mesurer la biomasse moléculaire microbienne d'un sol. Avec la diversification et l'extension de l'échantillonnage, il a été possible de construire un référentiel pour la biomasse moléculaire microbienne des sols et la diversité microbienne des sols (Biomasse moléculaire microbienne ; biodiversité bactérienne des sols, etc.). Ces référentiels ont permis de mettre en évidence la dépendance de la biomasse moléculaire ou de la biodiversité bactérienne des sols à des caractéristiques physico-chimiques des sols (pH, texture du sol, teneur en carbone, rapport entre la teneur en carbone et en azote); mais aussi de l'utilisation du sol (grandes cultures, forêts, prairies,...).

D'autres études démontrent la sensibilité des communautés microbiennes des sols aux pratiques agricoles, d'autres traitement ou pratiques qui affectent la qualité du sol. Cette sensibilité associée à l'existence de référentiels fait aujourd'hui des communautés microbiennes des sols des bio-indicateurs opérationnels pour évaluer l'impact (positif ou négatif) des pratiques agricoles et autres types de traitements du sol.

4.3.3. Diversité spécifique

Le sol héberge une forte diversité d'espèces microbiennes pouvant être classées en différents groupes sur base de leur caractéristiques phénétiques (morphologie, métabolisme, ressources nutritives...), génomiques, et fonctionnelles. Les groupes microbiens du sol les plus étudiés incluent les bactéries, les champignons, les actinomycètes, les algues, les levures,

Plusieurs facteurs déterminent la distribution de microorganismes dans le sol. Il s'agit principalement de :

1. Le type de sol : Les types de microorganismes, leurs nombres et leurs formes diffèrent selon la structure mécanique du sol. Les sols lourds sont plus riches en micro-organismes que les sols sableux.

2- Lumière : La plupart des microorganismes préfèrent se tenir à l'écart de la lumière sauf les algues qui préfèrent vivre à la surface du sol ou à proximité.

3-Aération : La plupart de la microflore du sol est aérobie, ce qui signifie qu'elle prolifère le plus en présence de l'air. Certains d'entre eux sont anaérobies, ce qui signifie que leur croissance s'arrête lorsque l'air est présent. Un autre type est facultatif (il peut pousser en présence ou en l'absence d'air).

4- Humidité : Est essentiel pour revitaliser le sol mais cela diffère selon le degré de tolérance à la sécheresse.

5- Température : La plupart des microorganismes peuvent vivre dans tous les types de sols, mais certains d'entre eux aiment les températures basses ou modérées. L'autre type de microorganismes préfère des hautes températures avec un sol riche en matières organiques.

6- Acidité : La plupart des microorganismes du sol préfèrent un pH neutre pour vivre, et certains préfèrent vivre dans un sol acide ou alcalin.

7- Types et quantité du nutriment : Les microorganismes du sol sont soit parasites, prédatrices ou opportunistes.

Le tableau ci-après montre le nombre de microbes trouvés par gram d'un sol typique à différentes profondeurs (Tableau 4.1). Il est à remarquer que les bactéries sont les microorganismes les plus dominants sur terre. Pour toutes les catégories, l'effectif diminue à mesure que la profondeur du sol augmente, le changement des caractéristiques du sol comme la disponibilité et l'accessibilité de matière nutritive, l'aération, etc., pouvant être parmi des facteurs limitant. La partie superficielle contenant de la matière organique objet de décomposition et riche en matière nutritive est la plus favorable au développement microbienne

Tableau 4.1. Répartition de microorganisme en fonction de la profondeur d'un sol typique et fonctionnelle

Depth (cm)	Bacteria	Actinomycetes*	Fungi	Algae†
3-8	9,750,000	2,080,000	119,000	25,000
20-25	2,179,000	245,000	50,000	5000
35-40	570,000	49,000	14,000	500
65-75	11,000	5000	6000	100
135-145	1400	—	3000	—

*Filamentous bacteria

†Algae found at lower depths are not metabolically active but were probably introduced by drainage or mechanical movement.

SOURCE: Adapted from M. Alexander, *Introduction to Soil Microbiology*, 2nd ed. New York: Wiley, 1991.

4.3.4. Diversité fonctionnelle

Les microorganismes du sol jouent un rôle essentiel et diversifiées dont dépend la vie de l'écosystème et des humains. Ils jouent particulièrement les fonctions ci-après:

- Améliorer la structure du sol

Les communautés microbiennes, notamment bactériennes, jouent un rôle dans le maintien de l'état structural du sol. En effet, la sécrétion de mucilages (composés de glucides et de protéines) par les bactéries permet de stabiliser les micro-agrégats dans le sol grâce à leur propriété collante et le développement des hyphes de champignons permet de stabiliser les macro-agrégats. Ce qui confère au sol à la fois une structure grumeleuse, une capacité à stocker de l'eau et une moindre sensibilité à l'érosion.

- Augmenter l'aération et la pénétrabilité du sol

- Améliorer la fertilité et la productivité végétale du sol par la décomposition de matière organiques, le recyclage des éléments (C, N, P, etc.) et nutriments indispensables à la vie des plantes.

Avec les champignons, les bactéries du sol sont considérées comme les **ingénieurs chimiques** du sol. Elles réalisent un très grand nombre de fonctions impliquées par exemple dans la minéralisation des matières organiques, le cycle de l'azote, la disponibilité du phosphore ou encore la dégradation de molécules phytosanitaires.

A part quelques microorganismes photosynthétiques, la majorité de microorganismes du sol sont hétérotrophes. Ils dépendent d'une source de matière organique pour en tirer leur énergie et se multiplier. Ceci implique leur activité de décomposition de matière organique.

Les microorganismes du sol sont largement hétérotrophes. Ils dépendent d'une source de matière organique pour en tirer leur énergie et se multiplier. Ceci implique leur activité de décomposition de matière organique. Foster et ses collaborateurs (1983) ont montré que les microorganismes sont également distribués de façon hétérogène dans le sol et généralement sous forme de micro colonies pour la plupart en état de dormance dont la levée est nécessite l'apport d'une source d'énergie. Cela peut arriver soit par amendement (dépôt de litière ou de fumiers, résidus de papiers, les composts, etc.) ou soit par passage de racines en croissance près des colonies. Les microorganismes se multiplient rapidement des que ces conditions de croissance sont retrouvées.

Il faut noter que la production végétale dans les écosystèmes naturels ou cultivés est étroitement liée de l'activité de la microflore. Les microorganismes du sol trouvent l'énergie

dont ils ont besoin des organismes photosynthétiques (plantes chlorophylliennes essentiellement) qui mettent à leur disposition leurs produits de photosynthèse sous forme de résidus (matière organique fraîche). Après son incorporation dans le sol, la matière organique fraîche est oxydée par la microflore du sol jusqu'au stade de formation de CO₂ et H₂O avec libération d'éléments minéraux (Fig. 4.2).

Comme le soulignent certains auteurs, les plantes libèrent par les racines une grande variété de composés. En moyenne 17% du carbone formé au cours de la photosynthèse serait libéré au sol, les quantités libérées augmentant en réponse à un état de stress, d'origine biotique (ex. herbivorie des racines ou des parties aériennes) ou abiotique (carences, résistance mécanique du sol). On estime que 30 à 50% du carbone assimilé serait alloué aux racines, la moitié de ce carbone alloué aux racines étant libéré dans le sol.

Si les microorganismes n'intervenaient pas dans l'écosystème sol-végétation, les composés carbonés photosynthétisés s'accumuleraient et on aboutirait à un blocage sous forme organique de la réserve planétaire de CO₂ et à un épuisement rapide des réserves minérales, d'où arrêt de toute vie végétale à la surface du globe. Les microorganismes sont responsables de 80 à 90 % de l'oxydation biologique totale.

Par ailleurs, des espèces de bactéries sont connues pour leur implication dans la régulation de la croissance racinaire (Bactéries PGPR).

Les bactéries interviennent aussi dans le maintien de la qualité et la santé des sols, dans la transmission et le contrôle des maladies, etc.

Exemples de groupes fonctionnels impliqués dans la dégradation des matières organiques

- **Les bactéries cellulolytiques:** elles dégradent la cellulose. C'est le groupe le plus important dans la dynamique de la matière organique, car elles décomposent la cellulose, molécule structurelle la plus répandue chez les végétaux.
- **Les bactéries pectinolytiques:** elles dégradent la pectine et ses dérivés. Les bactéries les plus abondantes sont du genre *Arthrobacter*.

Exemples de groupes fonctionnels impliqués dans le cycle de l'azote

- **Les bactéries ammonifiantes:** elles décomposent les matières organiques azotées en ammoniac ou en ions ammonium.
- **Les bactéries nitrifiantes :** elles permettent l'oxydation de l'ammoniac en nitrate.
- **Les bactéries fixatrices d'azote:** elles captent l'azote atmosphérique (N₂) et le transforment en composés utilisables par les plantes (ammoniac). Ce sont notamment les bactéries

symbiotiques localisées dans la rhizosphère des plantes cultivées (rhizobium chez les légumineuses).

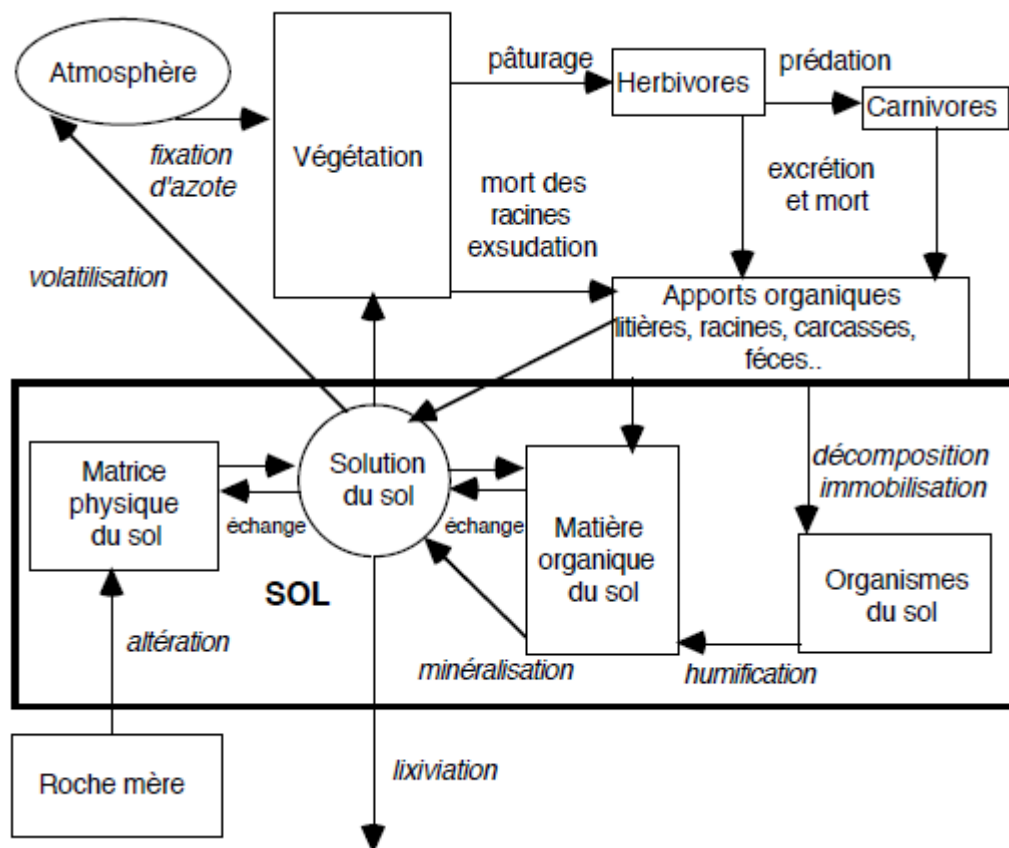


Fig.4.2 Schéma de la contribution des microorganismes au cycle de la matière organique dans les sols (les activités impliquant des activités microbiennes sont inscrites en italique)

4.3.5. Cas de la rhizosphère

La **rhizosphère** est la région du sol directement formée et influencée par les racines et les micro-organismes associés qui font partie du microbiote des plantes. Les éléments nutritifs y sont transformés en vue de leur absorption par la plante. On distingue en général le **rhizoplan** qui est l'interface racine/sol du **sol rhizosphérique** situé au voisinage immédiat de la racine et soumis à son influence. Elle est le lieu des échanges entre sol, racines, microorganismes et faune associés.

Dans la rhizosphère jusqu'à 30 % des composés photosynthétisés par la plante sont remis à la disposition des micro-organismes qui y vivent par le biais d'un phénomène appelé exsudation racinaire.

Ces exsudats racinaires incluent une grande quantité d'acides organiques et de sucres ainsi que des composés organiques complexes. Ils sont transformés en biomasse microbienne ou réoxydés en CO₂

4.4. Microorganismes de l'eau

On distingue différents types d'eaux. Selon l'origine et leurs utilisations, on distingue (1) les eaux naturelles, (2) les eaux industrielles et (3) les eaux usées.

a) Eau atmosphérique

Elle peut être solide (neige, grêle), liquide (pluie) ou gazeuse (brouillard) Théoriquement, il s'agit d'une eau distillée. Mais, en pratique, la pluie contient: (1) des gaz dissouts (O₂, CO₂ et N₂), (2) des dérivés azotés (ammoniac, acide nitrique, acide nitreux) qui peuvent jouer le rôle de fertilisant, (3) des polluants divers tel que l'hydrogène sulfuré, (4) des éléments radioactifs issus des réactions chimiques, etc.

b) Eau de surface

Il s'agit des eaux d'origine pluvieuse ou souterraine et peuvent être courantes ou stagnantes. Leur nature chimique dépend de la nature des terrains traversés.

c) Eau de mers et océans

Ce sont les plus grands réservoirs d'eau (97,4 % du volume d'eau de la planète). Elles ont une salinité très élevée, ce qui rend leur utilisation très coûteuse (teneur est en moyenne de 30 à 40 g/l)

d) Eaux de consommation

- ▶ **Eau de source, eau minérale naturelle et Eau souterraine** (nappe) =eaux brutes, naturellement potables
- ▶ **Eau de robinet et eau de table** : eau prélevée du milieu naturel et transformée en eau potable

e) Eaux Industrielles

Il s'agit de l'eau destinée à l'industrie: Ex. Industrie alimentaire, industries médicale & Pharmaceutique, etc. La quantité et la qualité varie en fonction de l'activité et la taille de l'industrie

3) Eaux Usées

Ces eaux sont générées par l'activité domestique ou industrielle. On distingue :

a) les eaux résiduaires urbaines (ERU): composée de 99,9% d'eau et 0,1% de matière solide (70% matière organique)

b) les **Eaux usées industrielles**: contiennent principalement des polluants tel que les métaux lourds, les colorants, les huiles

3) Répartition des microorganismes dans l'eau

La flore microbienne de l'eau est très abondante et diversifiée. Sa nature dépend du type d'eau. En absence de toute pollution, les microorganismes présents dans l'eau proviennent du sol, des végétaux, plantes aquatiques

Selon l'origine, on peut en distinguer deux types à savoir la flore autochtone ou indigène (c'est une flore permanente) et la flore de contamination (exogène):

La flore exogène change en fonction du temps, elle n'est pas stable, elle finit par disparaître s'il n'y a pas un apport continu de nutriments

A. Les microorganismes des milieux marins

1) bactéries:

Les bactéries les plus répandues sont les **cyanobactéries** tel que **Oscillatoria (ex: mer rouge)**. On trouve généralement les Gram – car ils ont une membrane externe qui contient des exoenzymes utilisées pour dégrader la matière organique du milieu externe. Donc ces bactéries n'ont pas besoin de synthétiser des enzymes donc pas de perte d'énergie.

- ▶ **Exemple de Gram négatif:** *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Vibrio*, *Acinetobacter*
- ▶ **Exemple de Gram positif:** *Bacillus*, *Clostridium* (sous forme sporulée) et *Staphylococcus*

2) **champignons**: On peut trouver les spores des: phycomycètes et les deutéromycètes

3) **Protozoaires** : Ex. les *Radiolaria*

B. Les microorganismes des eaux souterraines

C'est une flore lithotrophe. Ex: *Gallionella*, *Flavobacterium* et *Acinetobacter*

C. Les microorganismes des eaux douces (dulçaquicoles)

Les milieux microbiens sont différents de ceux des systèmes océaniques

1. Exemple des lacs:

Le mélange et l'échange des eaux sont limités. Il est plus facile qu'un lac soit contaminé car il est généralement à proximité des régions où les populations humaines sont développées.

Les lacs varient sur le plan des nutriments:

Dans les lacs pauvres en matière organique, on trouve des bactéries autolithotrophes, *EX. Flavobacterium, Acinetobacter, Caulobacter et Gallionella*. Exceptionnellement *Pseudomonas* (Hétérotrophe)

Dans les lacs riches en matière organique, on remarque que le nombre de *Pseudomonas* est élevé par contre celui de *Flavobacterium* et *Acinetobacter* diminue avec l'apparition de certaines bactéries hétérotrophes comme les entérobactéries et les *bacilliaceae*.

2. Exemple des rivières et fleuves:

- ▶ Les rivières et fleuves présentent une situation différente de celle des lacs, due au fait qu'il y a un mouvement horizontal important des eaux, ce qui ramène la majeure partie de la biomasse en surface
- ▶ la source des substances nutritives peuvent provenir :
 - d'une production interne (par les MO photosynthétiques).
 - Elle peut être aussi Externe par les ruissèlements des rives, aux feuilles et autre matière organique tombant dans l'eau.
 - Pour les eaux courantes, on trouve beaucoup plus des bactéries du sol essentiellement *Nitrosomonas, Nitrobacter, Azotobacter, Rhizobia et Nocardia*.

D. Microorganismes des stations de traitement des eaux usées

Principaux groups

Procaryotes: Bactéries, Actinomycetes, Cyanobactria, Archaeobacteria

Eucaryotes : Fungoid, algues microscopique, protozoaires, Vers parasites intestinaux

Organismes non cellulaire (Acellulaire): Virus, Viroids, prions

1. Les bactéries

a. Les bactéries sont de loin la classe d'organismes la plus importante dans le traitement biologique des eaux usées. Ce sont les principaux décomposeurs des polluants des eaux usées. Ils consomment ces matériaux pour leur croissance et leur entretien, éliminant ainsi les polluants de l'environnement.

b. Il existe un nombre important d'espèces de bactéries dans l'environnement, mais nous n'en connaissons qu'un nombre limité.

Ils ont diverses capacités d'obtenir de l'énergie à partir de composés organiques oxydants et inorganiques. Certains d'entre eux peuvent obtenir de l'énergie du soleil. Ils peuvent synthétiser de la MO ou des composés cellulaires à l'aide de composés organiques, de carbone et même à partir de CO₂.

c. Ils peuvent s'adapter pour dégrader certaines des molécules les plus récalcitrantes développées par l'humanité. Certains d'entre eux sont des agents pathogènes causant des maladies chez l'homme.

2. Les Archaea

Les archaea sont des microbes fonctionnellement similaires aux bactéries mais génétiquement différents. Ils sont la forme de vie la plus ancienne et peuvent survivre dans des environnements extrêmes.

Ils peuvent être:

- a. Thermophiles - environnement à haute température
- b. Halophiles - environnement à haute teneur en sel
- c. méthanogènes - produisent du CH₄ de manière anaérobie (important dans l'écosystème anaérobie de traitement des eaux usées)

3. Champignons

L'un des groupes de décomposeurs organiques, les hétérotrophes. Ce sont principalement des organismes du sol (levures, impliqués dans la production de pains et vins), mais sont détectés occasionnellement dans le système de traitement biologique. Ils peuvent décomposer une grande variété de matières organiques qui résistent à la décomposition bactérienne (lignine, cellulose). Ils se développent plus lentement que les bactéries.

Ils sont présents dans certains systèmes de traitement des eaux usées à pH faible. Ils sont intervenus dans la dépollution des déchets dangereux:

- Ex. dégradation des plastiques et des pesticides.

Leur utilisation industrielle majeure est la production d'antibiotiques

Ils peuvent être divisés en trois groupes généraux: Moisissures (Mold), Champignons(Mushroom) et Levure (Yeast)

4. Les Algues

Ce sont des organismes photosynthétiques possédant de la chlorophylle a. Ils sont très importants pour déterminer la qualité de l'eau dans l'environnement.

5. Les protozoaires

Ce sont des Eucaryotes hétérotrophes unicellulaires, aérobies ou anaérobies. Ils font parties de l'écosystème de la plupart des systèmes de traitement des eaux usées et fonctionnent comme polisseurs d'effluents car se nourrissent de bactéries et de petites particules organiques.

Ils constituent la proie d'organismes plus gros. Ils peuvent provoquer la formation de «flocs» par les bactéries afin de les protéger de la prédation. Leur présence indique généralement un bon environnement microbien pour la croissance ou l'absence de composés toxiques. Il existe environ 32 000 espèces dans la nature et 1/3 d'entre elles sont des parasites (Giardia; Cryptosporidium, etc.).

Écologie des protozoaires

- ▶ 101 à 107 organismes par gramme de sol
- ▶ 200 cellules / ml dans les lacs eutrophes (60% du zooplancton total)
- ▶ Rôles bénéfiques:
 - Les protozoaires broutent les bactéries et les champignons, contrôlant leur biomasse.
 - Les protozoaires peuvent être cultivés pour le traitement des eaux usées.
 - 5×10^4 / ml dans les boues activées
 - Faciliter la dégradation des déchets

6. Les Virus

Les virus sont considérés comme des créatures semi-vivantes. Ce sont essentiellement de petites entités d'ADN protégées et ne peuvent être répliquées dans une cellule vivante hôte qu'en prenant en charge son métabolisme. Le virus peut attaquer divers hôtes, des bactéries, des plantes aux humains. Leur nombre dans l'environnement est grand; 2 à 100 fois plus que celle des bactéries. Dans le milieu marin, 6 à 26% du carbone fixé par les producteurs primaires entrent dans le pool de matière organique dissoute (DOM) via la lyse induite par le virus à différents niveaux trophiques.

Leur rôle dans l'écologie du traitement des eaux usées est pour la plupart inconnu. Cependant, ce sont des menaces majeures pour la santé humaine: la variole, la rougeole, l'hépatite, le SRAS, le rhume, le VIH, la grippe H1N1 et la rage canine. Leur destruction est l'un des objectifs du traitement des eaux usées.

Nature infectieuse des virus

Plus de 70% de toutes les infections végétales et animales sont dues à des virus avec des génomes à ARN. Les virus ont de nombreux mécanismes de transmission

Ex. HSV-2: virus de l'herpès humain ; 2HBV: virus de l'hépatite B ; CMV: cytomégalovirus

Autres entités biologiques

Viroids: Virus comme l'ARN simple brin infectieux, sans capsid protectrice.

Prions: molécules de protéines infectieuses (maladie de la vache folle).

E. Les microorganismes auto-épérateurs et le phénomène de l'eutrophisation des eaux

Dans un écosystème aquatique en équilibre, l'eau est en bonne qualité. En cas de pollution, la qualité de l'eau est dégradée et son équilibre écologique est perturbé.

Les écosystèmes aquatiques sont généralement dotés de capacités à digérer la charge polluante. C'est ce que l'on appelle l'autoépuration. Celle-ci peut être de nature physique (filtration, décantation, transfert aval), biologique (les organismes présents dans le milieu vont s'alimenter à partir de ces ressources nutritives) ou les deux à la fois.

L'épuration biologique implique une flore autochtone qui participe à la dégradation ou la consommation de la matière organique. Son efficacité augmente avec l'augmentation de la température, du temps de séjour et de la teneur en oxygène.

Traitement des eaux usées

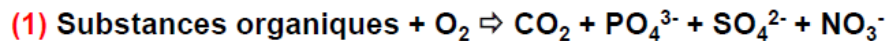
Le traitement biologique des eaux usées comprend une phase aérobie et une phase anaérobie comme nous le remarquons dans les lignes qui suivent

Traitement des eaux usées

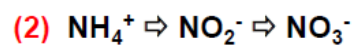
Traitement biologique :

✓Phase aérobie

Utilisation des boues activées et apport d'oxygène pour la minéralisation des composés organiques (**80% à 90%**).

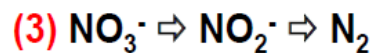


Nitrification par bactéries (**Nitrosomas** , **Nitrobacter**) des ions ammonium (NH_4^+) issus de la décomposition des protéines.



✓Phase anaérobie

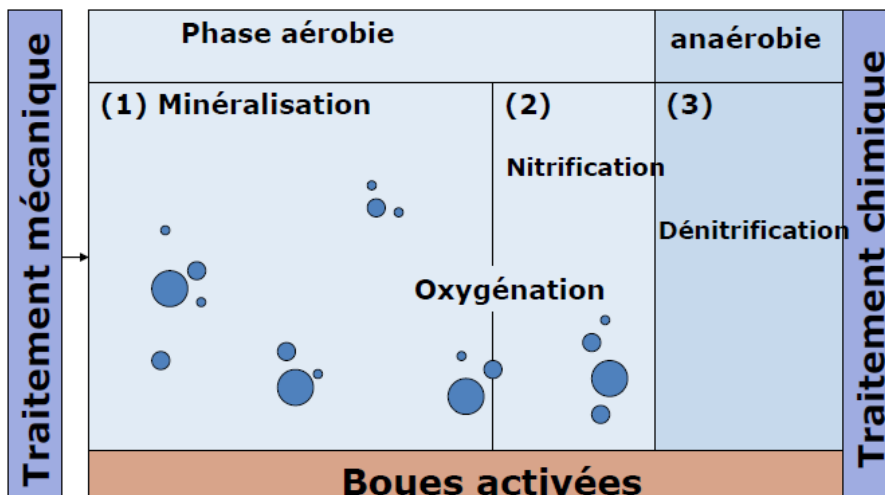
Dénitrification des ions nitrates (NO_3^-) par bactéries anaérobiques et quelques bactéries aerobiques (*Pseudomonas*) qui puisent l'oxygène dans les ions et rejettent de l'azote gazeux.

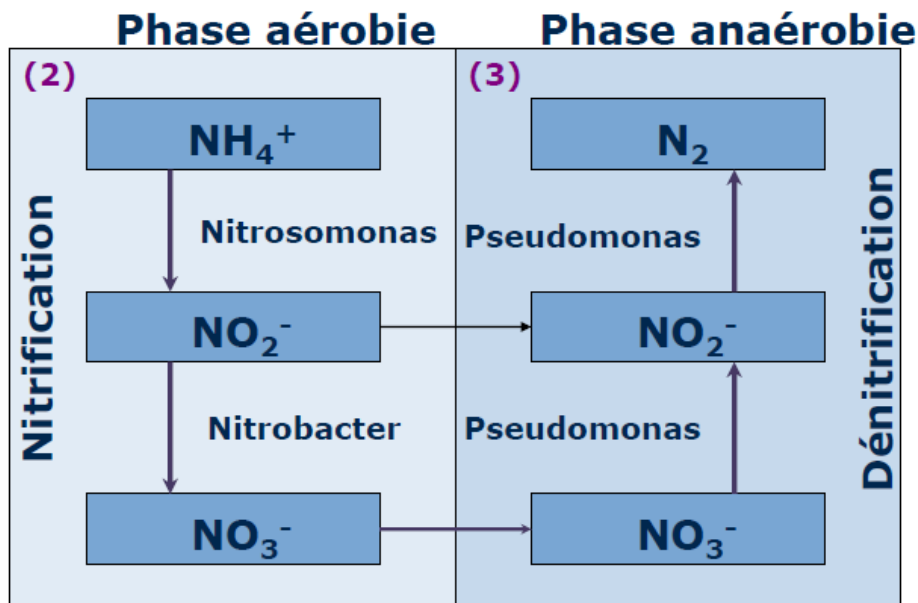


60% à 90% de NO_x^- sont dénitrifiés

Les nitrates sont des fertilisants, mais ils contribuent à l'eutrophisation des rivières.

Traitement biologique





F. Eutrophisation des eaux

L'eutrophisation des eaux est généralement associée à un excès du **Phosphore et d'Azote** dans l'eau.

Les sels nutritifs peuvent provenir de certains produits de nettoyage ou des détergents industriels, des rejets de pollution domestique, des engrais utilisés en agriculture, des déjections des animaux, etc. Ils constituent une vraie nourriture pour la flore aquatique (plantes aquatiques, algues fixées ou en suspension dans l'eau). La flore prolifère et réduit la transparence de l'eau (eau verte). Ces végétaux, en mourant, vont constituer un apport nutritif supplémentaire pour les bactéries qui vont se multiplier et consommer encore plus l'oxygène dissous dans l'eau. Par manque d'**O₂**, les invertébrés et les poissons peuvent disparaître.

Cas des algues:

- ▶ **En cas de croissance algale équilibrée dans la nature:**
- ▶ les algues deviennent la nourriture des organismes supérieurs et produisent de l'oxygène dissous dans les plans d'eau.
- ▶ **Lorsque les nutriments sont trop riches dans la masse d'eau, favorisant une croissance algale déséquilibrée se traduisant par :**
- ▶ Une augmentation de la turbidité dans l'eau
- ▶ Des problèmes de goût et d'odeur dans l'eau potable
- ▶ La tuerie de poissons en raison de la production de toxines

- ▶ Réduction de l'oxygène dissous dans les plans d'eau conduisant due à la mort et la désintégration des algues (Fig. 4.3)
- ▶ Eutrophisation des lacs.



Figure 4.3 Effet de l'Eutrophisation. Bloom algale (à gauche) et mort de poissons (à droite)

Dans le traitement des eaux usées, prédominent uniquement dans les lagunes ou dans certains systèmes de zones humides. Pas important dans d'autres réacteurs biologiques.

Les Cyanobactéries (anciennement appelées algues bleu-vert): Ce sont des bactéries photosynthétiques. Cela cause plus de problèmes dans l'environnement que les algues. Certains d'entre eux peuvent fixer l'ammoniac du N_2 dans l'air, donc si du phosphate est présent, une floraison se produira.

4.5. La microbiologie du sol

4.5.1. Spécificité de l'écosystème tellurique

Le sol supporte une large proportion de la biodiversité terrestre. Il héberge en effet une grande diversité d'organismes (microorganismes, animaux et végétaux). La plupart sont responsables de processus de biotransformation et de transfert des éléments ou des composés. De nombreux processus se déroulant dans le sol sont assurés par des organismes très variés (bactéries, champignons, protozoaires, racines, faune).

Les organismes du sol affectent aussi la productivité végétale, que ce soit de manière directe ou indirecte (modifications des cycles du carbone et des nutriments, de la structure du sol, interactions trophiques et contrôle des parasites et pathogènes).

La distribution dans le temps et dans l'espace des processus biologiques n'est ni aléatoire, ni homogène. Les activités des organismes du sol sont concentrées dans des sites riches en substrats carbonés.

4.5.2. La rhizosphère

La **rhizosphère** est la région du sol directement formée et influencée par les racines et les micro-organismes associés qui font partie du microbiote des plantes. Les éléments nutritifs y sont transformés en vue de leur absorption par la plante. On distingue en général:

- le **rhizoplan** qui est l'interface racine/sol
- le sol rhizosphérique situé au voisinage immédiat de la racine et soumis à son influence.

Elle est le lieu des échanges entre sol, racines, microorganismes et faune associés. Dans la rhizosphère jusqu'à 30 % des composés photosynthétisés par la plante sont remis à la disposition des micro-organismes qui y vivent par le biais d'un phénomène appelé exsudation racinaire. Ces exsudats racinaires incluent une grande quantité d'acides organiques et de sucres ainsi que des composés organiques complexes. Ils sont transformés en biomasse microbienne ou réoxydés en CO₂.

La flore rhizosphérique

Elle est représentée par quelques métazoaires, des protozoaires, des algues microscopiques, des champignons, des bactéries dont des actinomycètes, des cyanobactéries et des virus

➤ Les actinomycètes

Les actinomycètes sont les habitants communs du sol. Leur production de géosmine et de MIB (2-méthyl isobornéol), contribue significativement à l'odeur caractéristique du sol. Dans la rhizosphère les actinomycètes appartenant au genre *Frankia* sont extrêmement importants pour de nombreux types de plantes. Cette importance réside dans le fait qu'elles sont capables d'onduler les racines de ces plantes et de fixer l'azote atmosphérique. Cette association est appelée : association actinorhizienne.

➤ Les champignons

Les champignons mycorrhiziens de type arbusculaire (AMF : Arbuscular Mycorrhizal Fungi) = groupe le plus important dans la rhizosphère, peuvent établir une association symbiotique avec les racines, ce qui permettra à la plante de capter différents éléments nutritionnels. L'exemple le plus discuté est le phosphore qui se trouve dans le sol, qui est transporté le long des hyphes

et ensuite délivré à la plante hôte. Les interactions avec les mycorhizes peuvent stimuler aussi les mécanismes de défense contre les parasites et les pathogènes

➤ **Les rhizobactéries**

La communauté bactérienne de la rhizosphère est recrutée parmi les réservoirs de micro-organismes présents dans le sol. Les rhizobactéries sont des bactéries qui présentent l'aptitude à coloniser les racines de façon intense. Les bactéries sont les organismes les plus nombreux et représentent en moyenne 6.10^8 cellules par gramme de sol et un poids de 10000 kg/ha équivalant à 5% du poids sec des composés organiques du sol.

Les effets bénéfiques des rhizobactéries sont liés à leur position stratégique à l'interface sol-racine. En effet, le rhizoplan et la rhizosphère sont le siège d'échanges intenses entre la plante et le milieu environnant. Ces échanges sont réciproques

Les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR)

C'est la communauté bactérienne qui colonise compétitivement les racines des plantes, tout en améliorant leurs croissances. Les PGPR sont donc les bactéries qui colonisent la rhizosphère des plantes. Ainsi, une rhizobactérie est dite PGPR si, inoculée dans la rhizosphère d'une plante, elle est capable de lui apporter un effet bénéfique (Fig.4.4). Ex. Bactéries PGPR non symbiotiques: *Agrobacterium radiobacter*, *Azospirillum* spp, *Bacillus* spp, *Pseudomonas* spp. **Fluorescents, ...**

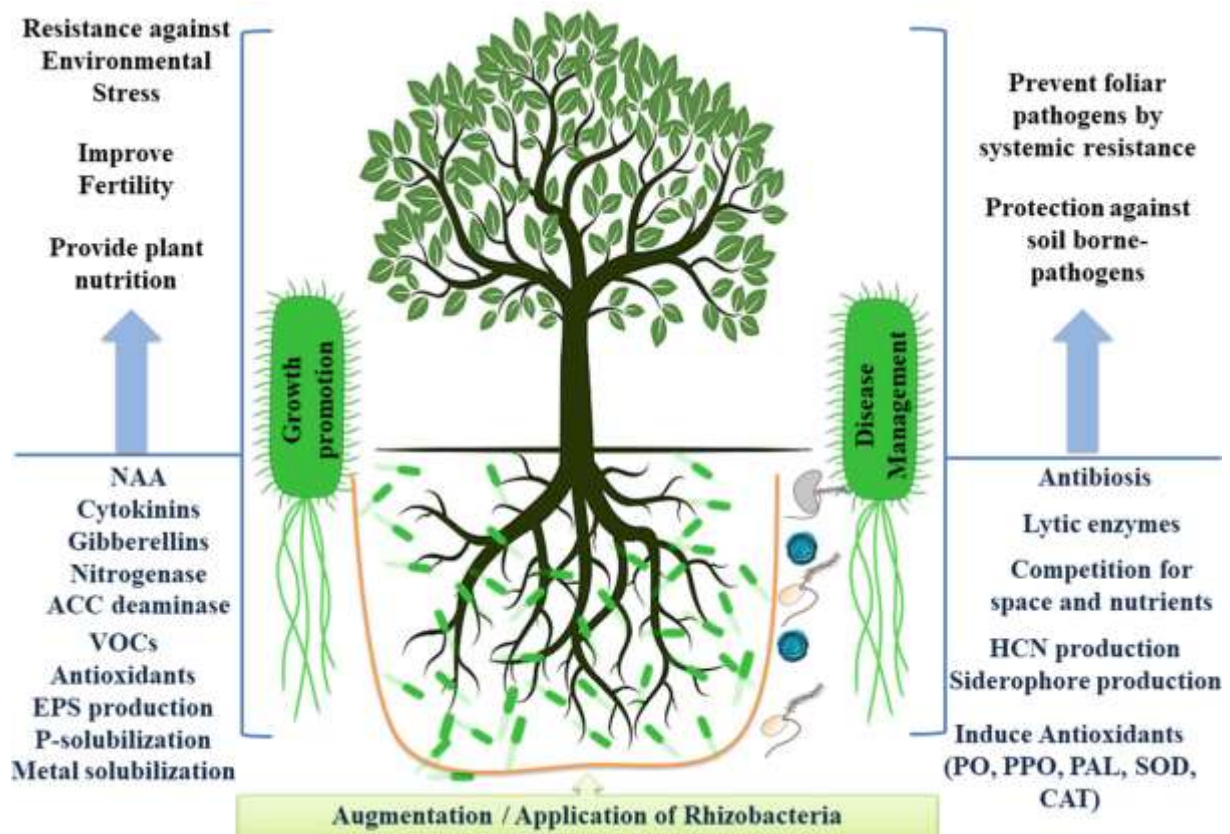


Figure 4.4. Effet des PGPR sur la plante

4.5.3. Effet direct des PGPR sur les plantes

a. Fixation de l'Azote:

La rhizobie est un vaste groupe de rhizobactérie qui ont la capacité d'établir des interactions symbiotiques par la colonisation et forme de nodules racinaires dans le végétale, dans lesquelles l'azote est fixé en ammoniacque qui est rapidement transformé en nitrates et le rendre disponible pour l'hôte ; La bactérie entre d'abord dans la racine et plus tard sur les nodules dans lesquelles se produit la fixation de l'azote

b. La solubilisation du potassium:

Les concentrations de potassium soluble dans le sol sont généralement très faibles et plus de 90% de potassium dans le sol existe sous forme de roches insolubles et de minéraux de silicate. Les microorganismes des sols jouent un rôle clé dans le cycle K naturel et, par conséquent, les microorganismes solubilisant de potassium présent dans le sol pourraient fournir une technologie alternative pour rendre le potassium disponible pour l'absorption par les plantes.

c. La production de sidérophores:

Le fer est un nutriment vital pour presque toutes les formes de vie. Certains PGPR produisent des sidérophores, composés de faibles poids moléculaire, généralement inférieurs à 1 kDa contenant des groupements fonctionnels capables de capter le fer en le rendant assimilable par les plantes

d. Solubilisation du Phosphore:

Les plantes sont incapables d'utiliser le phosphate car 95 à 99% de phosphate sont présents sous la forme insoluble, immobilisée et précipitée.

Les plantes absorbent le phosphate uniquement sous deux formes solubles : les ions monobasique (H_2PO_4) et basique (HPO_4^{2-}).

La solubilisation microbienne du phosphate joue un rôle important dans la conversion du phosphate insoluble en phosphate soluble.

Ces microorganismes produisent des acides organiques et relâchent des protons, qui à travers leurs groupements carboxyliques, chélatent les cations fixés au phosphates insolubles ce qui permet de les convertir en formes solubles.

e. La production des phytohormones :

Les hormones végétales, encore appelées phytohormones, sont des substances organiques naturelles qui influencent l'ensemble des processus physiologiques de croissance, de différenciation et de développement des plantes et leur confèrent leur capacité d'adaptation aux variations de conditions de l'environnement. Les phytohormones ne sont pas seulement produites par les plantes, une grande variété de microorganismes (champignons, bactéries) et même les algues peuvent les synthétiser.

Exemple de phytohormone: L'acide gibbérellique, les cytokinines, l'éthylène, l'acide abscissique, l'auxine.

4.5.4. Effet indirecte des PGPR sur les plantes

a. Production d'antibiotiques:

Les microorganismes telluriques produisent les antibiotiques qui sont des facteurs déterminants pour la vie dans un environnement aussi compétitif que la rhizosphère. La production des antibiotiques est un critère très important de compétitivité des microorganismes aux autres populations microbiennes. C'est un critère de performance pour la promotion indirecte de la croissance végétale. Il consiste à contrecarrer les agents phytopathogènes d'origine tellurique

b. Induction d'un système de résistance :

Les PGPR peut déclencher chez la plante un phénomène connu sous le nom d'induction de la résistance systémique qui est phénotypiquement similaire à la résistance systémique acquise qui se produit lorsque la plante active ses mécanismes de défense en réponse à une infection par un agent pathogène. Les plantes inoculées avec des PGPR peuvent également fournir une résistance

c. Effet phytoprotecteur des Sidérophores

Les PGPR, notamment du genre *Pseudomonas sp*, sont connues pour leur capacité à produire des sidérophores dans le milieu. La chélation du fer est un phénomène qui participe efficacement à l'antagonisme contre les agents phytopathogènes en réduisant leurs effectifs dans le sol.

d. Interactions entre les microorganismes du sol

Les interactions entre microorganismes et le type de coaction qui peut s'établir entre 2 microorganismes. Coaction c'est l'effet qu'a une espèce sur le taux de croissance d'une autre espèce. Ces coactions peuvent avoir un effet positif, neutre ou négatif.

✓ **Si coaction positif pour 2 partenaires => Symbiose.** Parfois on parle de symbiose mutualisme ou mutualisme et on parle aussi de coopération :

- **Mutualisme** = caractère obligatoire de l'association, au moins pour l'un des deux partenaires. Souvent l'association est très intime c'est-à-dire soit un nouvel organe formé, soit une des espèces est englobé dans l'autre.
- **Coopération** = les 2 espèces tirent profit de l'association mais il n'y a pas ce caractère obligatoire, les 2 partenaires peuvent vivre indépendamment l'un de l'autre

(**Symbiose** = association naturelle à bénéfice réciproque entre 2 êtres vivants d'espèces différentes).

- ✓ Si une espèce ne subit aucun effet (neutre) et que l'autre subit un effet négatif, on parle d'**amensalisme**.
- ✓ Si coaction a un effet délétère pour le taux de croissance des 2 organismes, les 2 pâtissent de l'interaction, on appelle cela la **compétition**. C'est très souvent en lien avec des ressources nutritives que les microorganismes doivent partager

4.5.5. Interactions entre Plantes et Microorganismes

Dans le règne végétal, les symbioses sont très répandues. Les plus communes sont les symbioses entre les racines des plantes et certains microorganismes du sol, tels des bactéries

ou des champignons. Ces derniers sont nommés symbiontes, tandis que la plante est appelée l'hôte.

- Les symbioses racinaires de plantes sont classées en deux grands groupes : les ectosymbioses et les endosymbioses (Fig.4.5)
- **Les ectosymbioses** ne concernent que 2% des plantes et se produisent surtout avec certains champignons du sol. Le mycélium de ces derniers entoure la racine et y pénètre en formant un réseau dans les espaces intercellulaires de la racine, sans entrer dans les cellules.
- Au contraire, **les endosymbioses** racinaires concernent une grande majorité des plantes terrestres. Leur particularité est que les microorganismes symbiotiques pénètrent les cellules racinaires afin d'entrer en symbiose avec la plante.
- **Symbiose mycorhizienne** : champignons + les racines des plantes.

Cette association améliore la nutrition minérale de la plante (**phosphore**), **rend plus efficace** l'absorption d'eau par la plante, protège la plante des agents pathogènes tandis que la plante fournit au champignon des assimilats photosynthétiques.

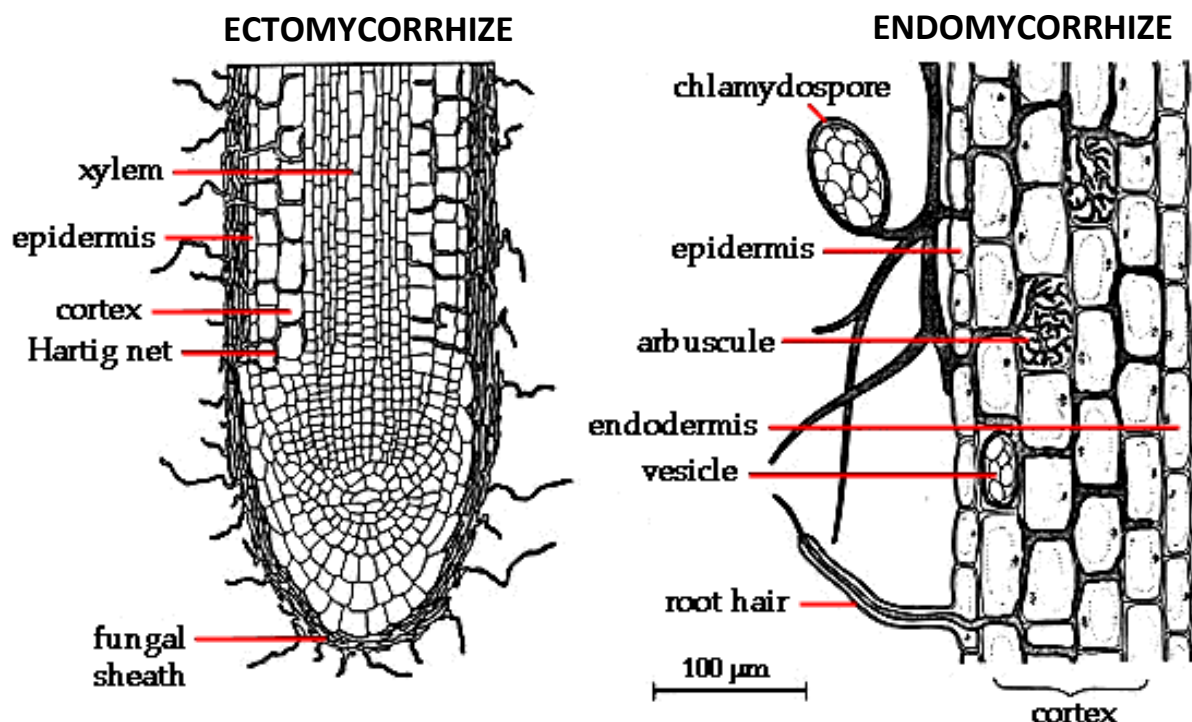


Figure 4.5 Endomycorrhization et ectomycorrhization

4.5.6. Les symbioses fixatrices d'azote (Fig.4.6)

- ▶ L'azote (N) est l'un des principaux atomes dont les plantes dépendent pour se développer et se multiplier.

- ▶ La plupart des plantes ne peuvent bénéficier de l'azote que sous forme minérale, c'est-à-dire sous forme de nitrates (NO_3^-), ou d'ion ammonium (NH_4^+), présents dans le sol en quantité variable.
- ▶ Pourtant, la plus grande réserve d'azote est l'atmosphère, qui contient 78% d'azote sous forme de N_2
- ▶ Au cours de l'évolution, certains organismes procaryotes ont acquis la faculté biologique de fixer l'azote atmosphérique.
- ▶ Cette capacité, appelée diazotrophie, nécessite chez le procaryote la présence de l'enzyme nitrogénase, qui transforme le N_2 en NH_3 .
- ▶ Ces organismes peuvent fixer l'azote à l'état libre, ce qui est le cas des bactéries du genre *Azotobacter*, ou en association avec des racines de plante, auquel cas ils font profiter celle-ci de l'azote.

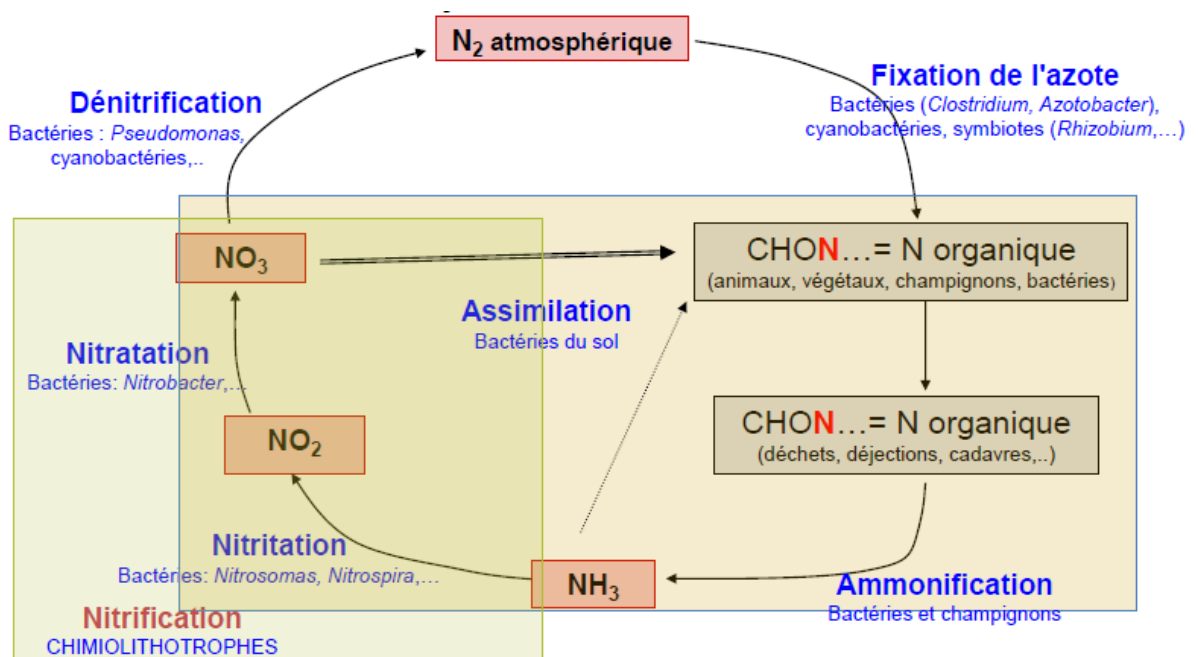
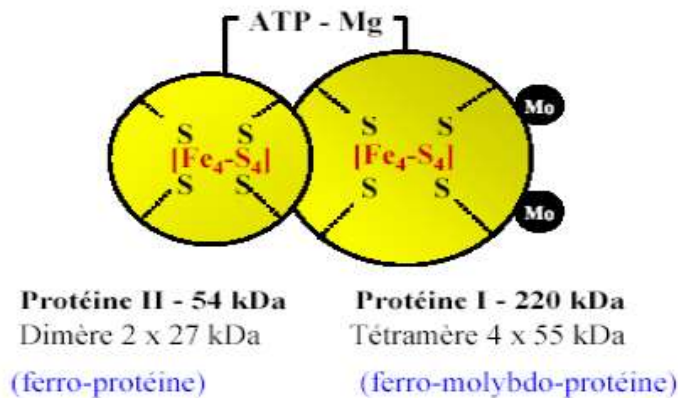


Figure 4.6 Implication microbienne dans le cycle de l'azote

Fixation de l'azote

Enzyme qui fixe l'azote → **la nitrogénase**
Très sensible à O₂

La nitrogénase (NT)



NT = Métallo-enzyme

Pour protéger la nitrogénase: synthèse d'un complexe protéique **Leghémoglobine**

La leghémoglobine

- Chromoprotéine
- Fe
- env. 150 aa
- 15 kDa

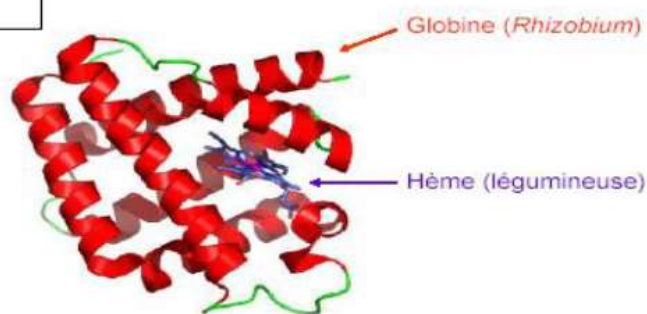
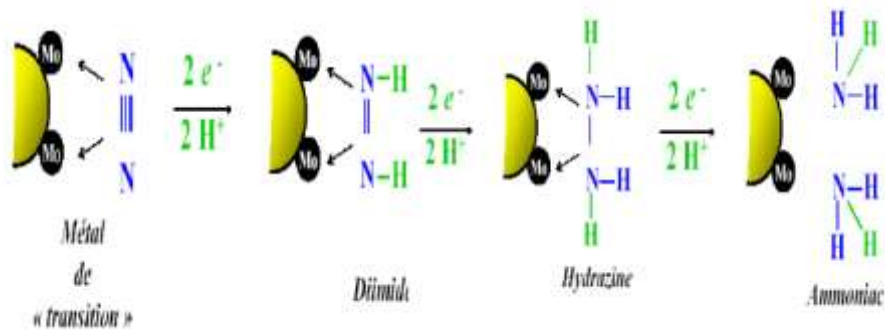


Schéma général de la fixation de N₂



D'où une équation globale de la fixation de N₂...

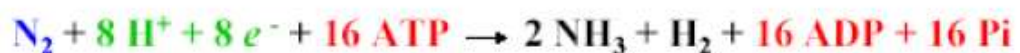
Équation théorique



Équation secondaire



Équation globale



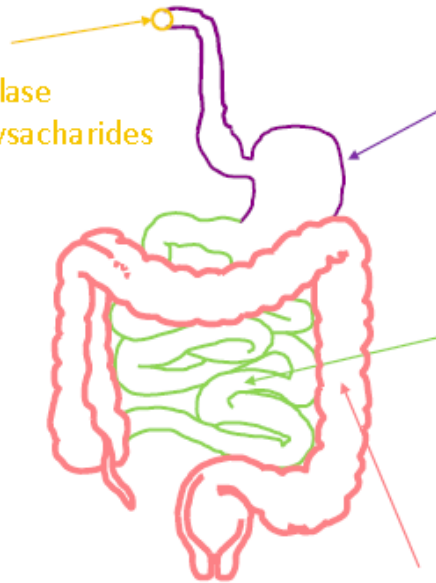
4.6. Le microbiote intestinal humain et des ruminants

4.6.1. Le microbiote intestinal humain

L'appareil digestif humain présente une variation de fonction et conditions de vie de microorganismes le long du tube digestif (Fig. 4.7). Il ne s'agit pas d'un milieu homogène.

Bouche :

- Mastication
- Sécrétion amylase
- = hydrolyse polysaccharides



Estomac :

- Brassage et mélange des aliments avec le suc gastrique
- Sécrétion pepsine (protéase) et HCl
- Présence d'O₂, pH = 1-2

Petit intestin :

- Digestion (pepsine, protéases pancréatiques)
- Absorption des nutriments (mono-osides, acides aminés,...)
- faible O₂, pH = 6-7

Gros intestin :

- absorption de l'eau, ions, ac. gras à courtes chaines
- absence d'O₂, pH = 5-7

Le tube digestif n'est pas un environnement homogène

Figure 4.7 Appareil digestif humain et variation de conditions physiologiques

Le microbiote intestinal humain est l'ensemble des microorganismes vivant dans l'intestin (ou flore intestinale). Le microbiote fécal est estimé à 10^{11} microorganismes par g de matière fécale, avec 1014 bactéries (environ 1000 espèces). Toutefois, seul 40% à 50% des bactéries de cette flore intestinale sont cultivables. Cette flore varie le long du tube digestif, la diversité maximale étant dans le gros intestin. La variation des conditions physiologiques influence la répartition du microbiote intestinal le long du tube digestif (Fig.4.8)

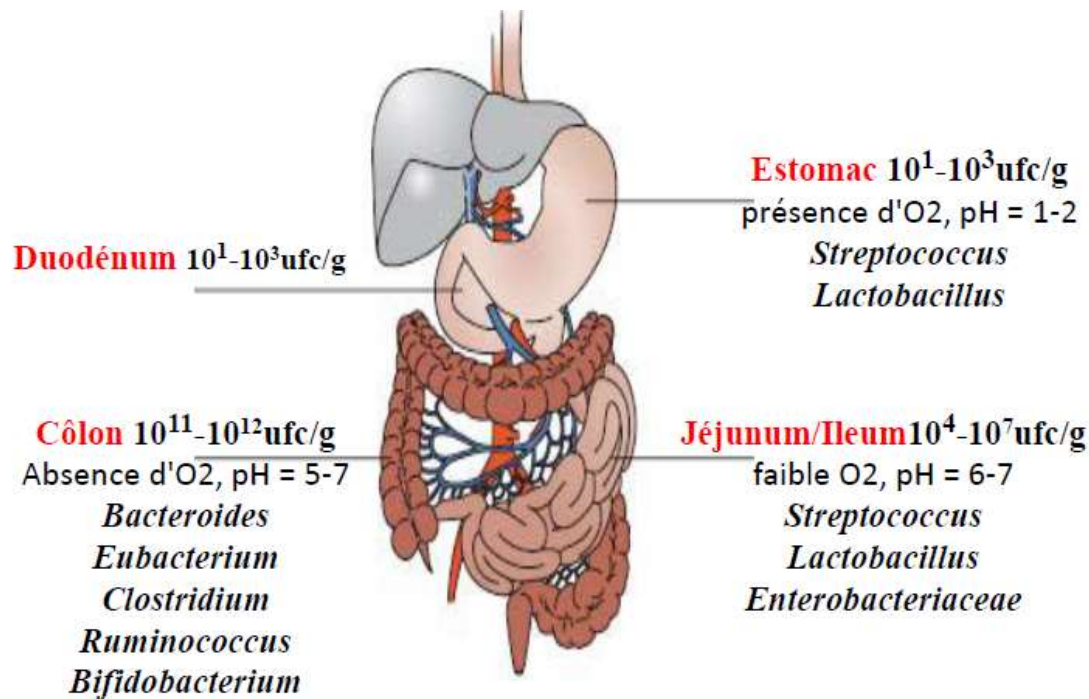


Figure 4.8 Répartition du macrobiote intestinale

4.6.2. Fonction du microbiote intestinal

- ▶ Le microbiote intestinal de l'homme intervient dans la préservation de la santé
- ▶ Stabilité de fonctionnement du système digestif
- ▶ Nutrition, physiologie, immunité et protection

a. Fonction de protection :

- ▶ Contre la colonisation par d'autres bactéries:
 - Compétition pour les nutriments
 - Production de molécules antibactériennes
 - Aide à la maturation du système immunitaire
- ▶ Induction de la réponse immunitaire

b. Fonction de structure

- Maturation de l'épithélium intestinal
- Vascularisation des villosités (angiogenèse)
- Renforcement des jonctions cellulaires

c. Fonction métabolique

- ▶ Production de vitamine
- ▶ Synthèse d'acides aminés
- ▶ Absorption des ions

- ▶ Fermentation des substrats non digérés par l'homme
- ▶ Production d'acide gras à courte chaîne

d. Dysfonctionnement du microbiote intestinal

Plusieurs pathologies digestives sont associées à un déséquilibre du microbiote intestinal. Le déséquilibre est lié:

- **Déséquilibre alimentaire**
- **Maladies inflammatoires chroniques intestinales.**
- **Contamination alimentaire**
- **Thérapies.**

4.6.3. Le microbiote intestinal des ruminants

- ▶ Les ruminants hébergent une quantité très importante d'espèces symbiotes, qui ont la capacité de digérer la matière végétale comme la **Cellulose, hémicellulose, amidon, pectine, cellobiose, maltose, fructose, glycérol.....**
- ▶ Cet écosystème possède **l'équipement enzymatique** nécessaire pour dégrader les substrats qui arrivent dans le **rumen**.
- ▶ La dégradation par les microorganismes est faite dans **le rumen**. Elle est conditionnée par:
 - **L'adhésion** des microorganismes aux particules du rumen
 - **L'accessibilité** aux substrats
 - **Activités enzymatiques** réalisées

4.6.4. Quelques éléments du microbiote intestinal des ruminants

- **Les bactéries**
 - **10e10 à 10e11** bactéries / g de contenu ruminal
 - La majorité des bactéries du rumen sont strictement anaérobies et plus de 200 espèces ont été isolées
 - Généralement la classification de ces bactéries se fait selon des critères physiologiques:
 - bactéries cellulolytiques,
 - bactéries hémicellulolytiques,
 - bactéries pectinolytiques,
 - bactéries amylolytiques,
 - bactéries protéolytiques,

- bactéries utilisatrices de lactate.....

➤ **Bacilles à Gram positif :**

Eubacterium, Propionibacterium, Bifidobacterium, Clostridium, Fibrobacter, Ruminobacter, Succinivibrio, Selenomonas, Fusobacterium, Lactobacillus, Enterobacter

➤ **Coques à Gram positif**

Majoritairement: Ruminococcus, Peptostreptococcus, Streptococcus, Enterococcus, Megasphaera, Veillonella

➤ **Les archées**

Les archées sont connues principalement pour leurs activités **méthanogènes dans les fermentations anaérobiques. On estime 10^8 à 10^9** archées/g de contenu ruminal, constituées majoritairement de *Methanobrevibacter, Methanomicrobium, Methanobacterium* et *Methanosarcina*

CHAP. 5. PHYSIOLOGIE BACTERIENNE

5.1. Métabolisme bactérien

a. Metabolism

Ensemble des réactions catalytiques, consistant à :

- ✓ **dégrader les éléments nutritifs** du milieu,
- ✓ à transférer à stocker l'énergie résultant de cette dégradation, afin de **réaliser les réactions anaboliques** permettant aux bactéries de réaliser la synthèse de leurs propres constituants.

b. Eléments essentiels pour la croissance et la multiplication (environ 10): **C, H, O, N, S, P, K, Ca, Mg et Fe.**

Ces éléments servent à la synthèse des glucides, des lipides, des protéines et d'acides nucléiques.

c. Facteurs de croissances: jouent un rôle vital (spécificité étroite) mais nécessaires en quantités infimes pour le métabolisme et la croissance des bactéries.

Le tableau ci-après (Tableau 5.1) montre les différents types trophiques en fonction de la classe et la nature des besoins des microorganismes.

Tableau 5.1 Types trophiques en fonction de la classe et la nature des besoins

Classe du besoin	Nature du Besoin	Type trophique
Source de carbone	CO ₂	Autotrophe
	Composé organique	Hétérotrophe
Substrat énergétique (donneur d'électrons)	Minéral	Lithotrophe
	Organique	Organotrophe
Source d'énergie	Lumière	Phototrophe
	Oxydation biochimique	Chimiotrophe

La capacité d'une bactérie à utiliser un nutriment déterminé comme source d'un élément dépend de l'existence d'un système enzymatique adéquat de dégradation et de l'existence de processus d'entrée du nutriment (perméases).

d. Phénomène de syntrophie

- ▶ C'est un phénomène d'interaction métabolique entre deux espèces.
- ▶ L'exigence d'une bactérie en facteur de croissance peut être assurée par la présence d'une autre espèce voisine de la première capable de synthétiser ce facteur de croissance.

e. Catabolisme

Le catabolisme, pour les bactéries hétérotrophes, passe par une série de réactions enzymatiques, groupées en trois phases :

- ✓ la digestion des substances organiques exogènes,
- ✓ la pénétration des produits de dégradation dans la cellule bactérienne
- ✓ et leur préparation à l'oxydation.

5.2. Facteurs écologiques structurant les communautés microbiennes dans l'environnement

Plusieurs facteurs environnementaux et biologiques influent sur la **croissance**, d'**activité** et la **composition des microorganismes dans l'environnement**.

Il s'agit principalement de: l'eau, la température, l'oxygène, le pH, la pression osmotique, les radiations, la disponibilité et la concentration des nutriments.

5.2.1. L'Eau et effet de l'eau libre

- ▶ L'eau représente 80% des constituants cellulaires, indispensables au développement.
- ▶ Certaines espèces sont plus sensibles que d'autres aux variations de la teneur en eau dans leur environnement.
- ▶ Les bactéries peuvent survivre sans eau mais ne se développent pas.
- ▶ La plupart des champignons ne se développent pas si la teneur en eau n'est pas élevée (A_w : 0,8-0,9) et les spores ne peuvent germer sans eau, sauf quelques exceptions
- ▶ Certaines espèces de moisissures ou de levures tolèrent une A_w de l'ordre de 0,6 pour les levures et de 0,7 pour les moisissures, elles peuvent donc se développer sur les milieux riches en sucre (confitures...) ou en sel.

L'Activité de l'eau (A_w) représente la **quantité** d'eau libre contenue dans un **aliment**. A_w ne représente pas la teneur totale en eau d'un aliment qui est **l'humidité**, mais la partie de cette eau qui est disponible (ou libre) pour être utilisée par les micro-organismes, les enzymes ou encore les réactions chimiques.

Ces derniers vont avoir pour action de dégrader le produit ; c'est pour cela que l' A_w est directement assimilé à la sensibilité d'un aliment à la **dégradation** ou à la **conservation**.

A_w est le symbole de « Activity of water » ou activité de l'eau. C'est une valeur sans unité comprise entre 0 et 1. 1 étant la valeur de l'eau pure

L'importance de l'activité de l'eau pour la stabilité des denrées alimentaires lors de traitements et entreposage est illustrée de manière très évidente ci-après (Fig.5.1). D'une manière générale, une stabilité optimale est obtenue lorsque l' a_w est situé entre 0,2 et 0,3.

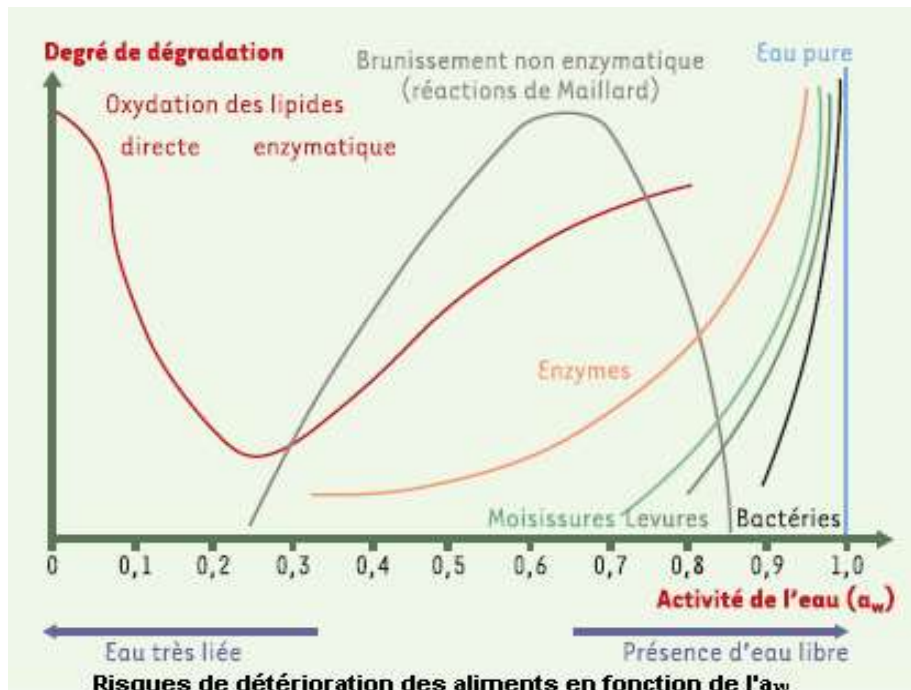


Figure 5.1. Importance de l'activité de l'eau sur la stabilité des denrées alimentaires

- ▶ La mesure de l'activité de l'eau ou de l'humidité relative d'équilibre est un élément clé pour le contrôle de la qualité des produits sensibles à l'humidité.
- ▶ L'activité de l'eau est, par définition, l'eau libre ou non cellulaire contenue dans les aliments et autres produits. L'eau liée, ou eau cellulaire, ne peut pas être mesurée par cette méthode.

Il est indispensable de mesurer l'activité de l'eau car :

- ▶ L'eau libre contenue par un produit influence sa microbiologie ainsi que sa stabilité chimique et enzymatique.
- ▶ Ce fait est particulièrement important, non seulement pour les produits périssables, comme les aliments, les céréales, les semences, etc. mais également pour les médicaments et autres produits des industries pharmaceutiques et cosmétiques.
- ▶ Si trop d'eau libre est présente, les produits vont se dégrader, dans le cas contraire, ce sont d'autres propriétés du produit qui subiront une influence négative.
- ▶ Le contrôle de l'activité de l'eau a donc une importance décisive sur la capacité de stockage d'un produit, etc.

5.2.2. La Pression hydrostatique

En milieu marin, la pression augmente de **1atm chaque 10m**

Elle peut atteindre **1000 atm en profondeur**

Certaines bactéries sont **barotolérantes** et se multiplient entre **0 et 400 atm** mais avec une croissance maximale à la **pression atmosphérique**

Les bactéries **barophiles** modérées ont un optimum de croissance à **400 atm**

5.2.3. La Pression osmotique

- ▶ La majorité de bactéries sont dotées d'une paroi rigide qui leur permet de résister aux variations de la pression osmotique du milieu.
- ▶ Cependant, selon leur sensibilité aux pressions osmotiques, les bactéries se classent en :
- ▶ **bactéries non halophiles**, nécessitant une concentration en NaCl inférieure à 0,2 M.
- ▶ **bactéries halophiles** qui peuvent se développer dans des milieux très salés comme la mer morte (milieux à plus ou moins 0,2 M en NaCl).
- ▶ **bactéries halophiles extrêmes**, tolérant plus que 5,2 M de NaCl.

5.2.4. La Température

- ▶ La température joue un rôle important dans la nutrition et le développement des microorganismes.
- ▶ Son augmentation ou son abaissement conduit à des effets remarquables quant à la croissance microbienne.
- ▶ Les différentes espèces ont une température minimale (température en dessous de laquelle ils ne peuvent pas se développer), une température optimale (c'est la meilleure à laquelle ils peuvent se développer) et une température maximale (au-delà de laquelle ils ne peuvent se développer).

Selon les températures optimales de croissance, on peut distinguer plusieurs catégories (sans frontières et avec possibilités de chevauchement):

- ✓ **Psychrophile** : la température optimale de croissance se situe en dessous de 10 °C. Ex. *Clostridium*, *Psychrobacter*
- ▶ **Mésophile** : préfèrent une température de croissance comprise entre 20 et 40 °C (optimum 30-37 °C). Ex. bactéries telluriques, bactéries ; pathogènes *Escherichia coli*
- ✓ **Cryophile** : la température de croissance est de 0 °C voire plus basse.

- ✓ *Psychrotrophe* : ayant une température optimale de croissance égale à 25 °C mais qui peuvent se développer à 0 °C.
- ✓ *Thermophile* : se multiplient préférentiellement entre 45 et 55 °C. Ex. *Thermus aquaticus*
- ✓ *Thermotrophe* : se multiplient visiblement vers 50 °C mais plus clairement à 30 °C.
- ✓ *Hyper-thermophile* : thermophiles extrêmes, leur température optimale de croissance se situe aux alentours de 70 °C. Ex. Archaea
- ▶ **Cas exceptionnel** : *Pyrodictium occultum* est un microorganisme vivant au fond des mers au contact des sources chaudes à des températures élevées (250 °C) et à de très forte pression (bactérie barophile).

5.2.5. Le pH

- ▶ Influence les réactions enzymatiques.
- ▶ Les milieux de cultures doivent avoir un pH correspondant avec l'espèce recherchée.
- ▶ plusieurs catégories microbiennes: **basophiles, neutrophiles, acidophiles...**
- ▶ La majorité des microorganismes se développent au pH neutre (6,5 – 7,5). Cependant, un intervalle de pH est toléré par les microorganismes. Exemple : *E. coli* tolère un pH de 4 – 9.
- ▶ **Basophiles** : les bactéries basophiles (*Alcalinophile*) préfèrent un pH de croissance alcalin. Exemple : le pH optimal de croissance de *Vibrio* est 9.
- ▶ **Acidophiles** : *Lactobacillus* se développe à un pH relativement acide: 6. D'autres microorganismes comme les champignons préfèrent un pH plus bas.

Remarque : pour éviter les changements brutaux du pH des milieux de cultures lors de la dégradation des métabolites par les bactéries, une *solution tampon* ou le *carbonate alcalin* sont prévus dans la préparation du milieu.

5.2.6. Les Besoins en Oxygène

Selon leurs exigences en oxygène, les bactéries se répartissent en quatre catégories distinctes :

- ▶ **Aérobie strict** : la bactérie exige pour son développement la présence d'oxygène libre (Ex. *Pseudomonas*).
- ▶ **Anaérobie strict** : ces bactéries se développent en absence totale d'oxygène, ce groupe de bactérie ne possède ni catalase ni superoxyde dismutase capables de d'éliminer les deux produits d'oxydation, le H₂O₂ et l'ion super oxyde qui sont toxiques pour la cellule. (EX. bactéries sulfato-réductrices)

- ▶ **Aéro-anaérobie facultatif** : appelées aussi anaérobie facultatif. Peuvent croître en présence ou en l'absence d'oxygène. (EX. les entérobactéries comme *Escherichia*, *Salmonella*), les streptocoques, les staphylocoques
- ▶ **Microaérophile** : les bactéries microaérophiles se développent en présence d'une faible tension en oxygène. (Pression partielle d'oxygène est inférieure à celle de l'air Ex. *Campylobacter*, *Mycobacteriaceae*).

Au laboratoire, on peut identifier les types de bactéries en fonction de la consommation ou des besoins en oxygène (Fig. 5.2)

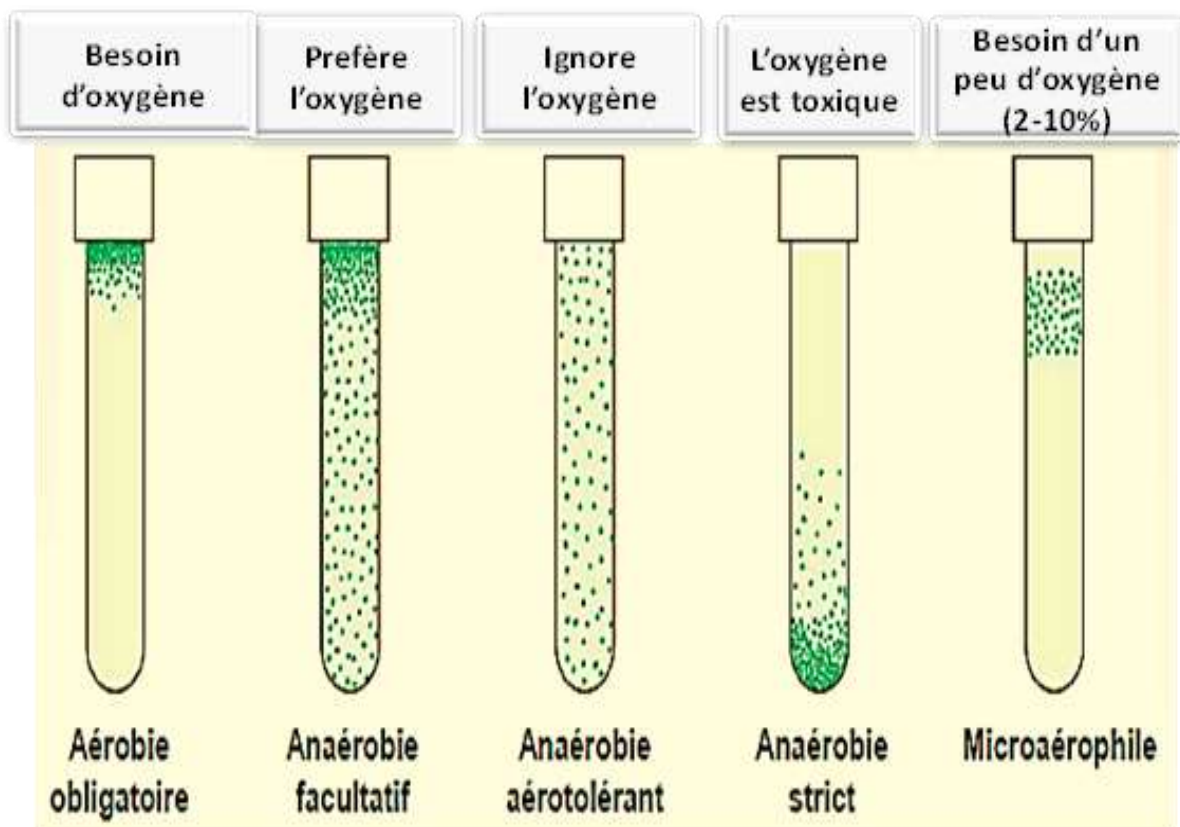


Figure 5.2. Catégories bactériennes en fonction de la consommation d'oxygène

5.2.7. La Pression mécanique

- ▶ Certaines bactéries résistent à de fortes pressions. Ce sont les bactéries barophiles. Exemple, *Streptococcus faecalis* résiste à une pression allant jusqu'à 1000 bars.

5.2.8. Les Radiations

- ▶ Déterminent un spectre électromagnétique dont une partie constitue la lumière visible perçue sous forme de couleur allant du pourpre au rouge.

- ▶ Certaines bactéries ont la propriété d'absorber, grâce à leur pigment, certaines radiations dont le rouge ou le bleu et peuvent transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique.
- ▶ Les rayons ultra-violetts permettent de détecter les mutants génétiques et d'éliminer certaines espèces bactériennes, surtout en médecine pour stériliser certaines surfaces dans les blocs opératoires par exemple.

En Zones éclairées:

▶ Phototrophes et autotrophes

- Bactéries primitives qui utilisent la lumière et H₂S comme source de pouvoir réducteur pour fixer le CO₂. Ex : Bactéries pourpres sulfureuses ex: *Thiospirillum*.
- Bactéries évoluées ou Cyanobactéries ; elles utilisent H₂O, réalisent une photosynthèse oxygénique (O₂ libéré).

Ex: *Prochlorococcus*, l'organisme photosynthétique le plus important (10^{e8}/L d'eau de mer).

▶ Phototrophes et hétérotrophes

- Bactéries qui utilisent la lumière pour fabriquer de l'ATP mais qui ne fixent pas le CO₂. Ex: Bactéries pourpres non sulfureuses Ex: *Caenispirillum*

À l'ombre :

▶ Chimiotrophes et autotrophes:

- Bactéries chimiosynthétiques : utilisent une source d'énergie chimique pour réduire le CO₂ en (CH₂O). Elles tirent leur énergie de réactions d'oxydation de composés minéraux, comme NH₄⁺, NO₂⁻ ou NO₃⁻
- Elles interviennent dans la nitrification des sols. Bactéries Ex : *Nitrosomas*, *Nitrobacter*

▶ Chimiotrophes et hétérotrophes

- Bactéries qui utilisent une fermentation (dégradation incomplète)
- Bactéries aérobies réalisant la respiration.

Ex : *Escherichia Coli*

- **La photolyse** induite par des ultraviolets influence l'augmentation ou la diminution de la matière organique dissoute et si la matière organique dissoute augmente, l'activité microbienne augmentera. Les ultra-violetts peuvent, en plus,

endommager les bactéries au niveau de leur ADN et donc affecter la composition de la communauté.

5.2.9. L'oligotrophie

Un milieu oligotrophe est un milieu eutrophe. C'est un milieu particulièrement pauvre en éléments nutritifs.

Visa à vis de ce facteur, on distingue deux catégories de bactéries à savoir les bactéries auxotrophes et les bactéries prototrophes. Les premiers comprennent des bactéries exigeantes, nécessitant des milieux complexes riches en nutriments tandis que les seconds comprennent des bactéries qui se développent sur des milieux pauvres en nutriments (Ex. océans)

5.3. Les facteurs biotiques

Les facteurs biotiques incluent la contamination par d'autres matières organiques, la compétition pour les nutriments, la prédation de bactéries (ex. prédation par des protozoaires), l'infection par des virus (ex. bactériophages).

Références

1. Pepper, I.L., C.P. Gerba, and T.J. Gentry, *Introduction to environmental microbiology*, in *Environmental Microbiology*. 2015, Elsevier. p. 3-8.
2. Woese, C.R., O. Kandler, and M.L. Wheelis, *Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1990. **87**(12): p. 4576-4579.
3. De Duve, C., *Singularités: Jalons sur les chemins de la vie*. 2005: Odile Jacob.
4. Ravishankara, A., J.S. Daniel, and R.W. Portmann, *Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century*. science, 2009. **326**(5949): p. 123-125.
5. Carof, M., et al., *Valorisation des interactions plante-sol pour la nutrition et la santé des plantes*. Innovations Agronomiques, 2018. **69**: p. 71-82.
7. Brundage, J. F., and Shanks, G. D. (2008) Deaths from bacterial pneumonia during 1918-19 influenza pandemic. *Emerg. Infect. Dis.* 14 (8), August 2008.
8. Roger P. et Garcia J.L., 2001. Introduction à la Microbiologie du sol