

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Badji Mokhtar Annaba

Faculté des Sciences

Département de Biochimie



Polycopié de Cours
de Microbiologie de l'environnement
3^{ème} Année Licence Microbiologie

Année universitaire 2024/2025

Introduction générale

La microbiologie de l'environnement est une science qui consiste à étudier la biodiversité microbienne dans les différents écosystèmes (sol, eau et air), ainsi que l'importance et le rôle des microorganismes dans leur habitat et leur niche écologique. Cette branche de la microbiologie se concentre sur les interactions des microorganismes entre eux et avec leur environnement. Ces relations révèlent l'importance de leur contribution au développement des autres membres de la communauté biotique. Les microorganismes jouent un rôle essentiel dans le bon fonctionnement et la santé des écosystèmes terrestres et aquatiques, accomplissant des tâches importantes, comme la transformation des déchets, la solubilisation des ions minéraux, la production de composés organiques, la fixation de l'azote moléculaire et l'altération de la roche mère. Ces processus sont indispensables au bon fonctionnement des cycles biogéochimiques de la matière.

Ce manuscrit a été conçu pour les étudiants en 3^{ème} année de Licence en Microbiologie. Il a été élaboré en conformité avec les programmes de la Licence en Microbiologie, suivant le cadre défini par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Algérien. Le manuscrit se compose de cinq chapitres. Le premier chapitre met en lumière les interactions des microorganismes entre eux et avec d'autres organismes présents dans l'écosystème, ainsi que la diversité et la dynamique des microorganismes dans leurs habitats. Le deuxième chapitre, quant à lui, se concentre sur la diversité des microorganismes des milieux marins et dulçaquicoles, ainsi que leur impact sur la qualité des eaux. Le chapitre trois aborde la microbiologie du sol, qui se structure en quatre parties : la composition du sol, la microflore du sol, les interactions des microorganismes avec la faune et les végétaux, et la symbiose rhizobienne. Le chapitre quatre s'intéresse à la microflore digestive de l'homme et des ruminants, sa composition, son rôle dans la digestion et son influence sur la santé intestinale. Le dernier chapitre traite la contamination et l'hygiène des locaux, en mettant en évidence l'importance de contrôler les microorganismes dans les environnements hospitaliers et industriels afin de garantir la sécurité sanitaire.

Syllabus

Intitulé de la Licence : Microbiologie

Semestre : 6

Unité d'enseignement Fondamentale (UEF 3.2.1) : Microbiologie Appliquée

Matière 2: Microbiologie de l'environnement

Crédits : 6

Coefficient : 3

Objectifs de l'enseignement :

Cet enseignement permet la connaissance des relations existantes entre le microorganisme et le milieu constitué par les eaux, les sols ou le tube digestif de l'homme et de l'animal. Les principaux groupes de microorganismes (indicateurs ou spécifiques) dans ces différents écosystèmes et les interactions microbes-(faune, eaux, végétaux, sols) sont particulièrement étudiés. Le rôle des microorganismes dans les différents cycles de la matière vivante (cycles biogéochimiques des éléments) est également largement évoqué.

Connaissances préalables recommandées :

Contenu de la matière :

Introduction: Notion d'écosystème ; place, diversité et spécificité des microorganismes

Chapitre I : La microbiologie des eaux

- Les eaux naturelles
- Les eaux usées
- Les eaux brutes et leur potabilité

Chapitre II : La microbiologie du sol

- Spécificité de l'écosystème tellurique
- La microflore du sol : principaux groupements microbiens
- Interactions avec la faune, les eaux et les végétaux
- La fixation d'azote : symbiose légumineuses-Rhizobium

Chapitre III : Eléments de microbiologie du tube digestif

- La microflore digestive de l'homme

- La microflore du tube digestif des ruminants

Chapitre IV : Contaminations et hygiène des locaux

- Sources de contaminations microbiennes: air, eaux, matières premières, personnel
- Principales contaminations: milieux hospitaliers, milieux industriels
- Règles d'hygiène et normes de sécurité
- Désinfection des locaux

Travaux pratiques :

TP1: Isolement et caractérisation des microorganismes à partir des eaux :

Eau usée, eau de robinet, eau de source naturelle (non conditionnée)

TP2 : Isolement et caractérisation des microorganismes à partir du sol

TP3 : Isolement et caractérisation des microorganismes à partir de l'air

Mode d'évaluation :

Contrôle continu (40%) et Examen semestriel (60%)

Programme

Liste des figures

Liste des tableaux

Chapitre 1. Introduction à la microbiologie de l'environnement

Introduction.....	1
1. Concepts de base de l'environnement.....	1
2. Notion d'écosystème	1
3. Place, diversité et spécificité des microorganismes dans l'environnement	2
3.1. Place	2
3.2. Diversité.....	3
3.3. Spécificité.....	4
Conclusion.....	6

Chapitre 2. La microbiologie des eaux

Introduction.....	7
1. Les eaux naturelles	7
1.1. Les eaux marines.....	9
1.2. Les eaux douces	10
1.2.1. Eaux de surface	10
1.2.2. Eaux souterraines	12
1.3. Autoépuration naturelle des eaux	12
2. Les eaux usées.....	14
2.1. Généralités sur les eaux usées.....	14
2.3. Traitement des eaux usées	15
2.3.1. Le prétraitement.....	16
2.3.2. Traitement primaire (physicochimique)	17
2.3.3. Traitement secondaire (biologique)	18

2.3.4. Traitement tertiaire	22
3. Les eaux brutes et leur potabilité	24
3.1. Les eaux brutes	24
3.2. Les eaux potables.....	24
3.3. Traitement des eaux potables.....	25
3.4. L'analyse microbiologique de l'eau potable.....	28
3.5. Les maladies d'origine hydrique	28
Conclusion.....	29
Chapitre 3. La microbiologie du sol	
Introduction.....	30
1. Spécificité de l'écosystème tellurique	30
1.1. Constituants du sol	30
1.2. Profil du sol.....	33
2. La microflore du sol: principaux groupements microbiens.....	34
2.1. Les bactéries.....	34
2.2. Les Archaea.....	36
2.2. Les champignons	36
2.3. Les virus.....	36
2.5. Les protozoaires.....	37
3. Interaction avec la faune, le milieu et les végétaux	37
3.1. Interactions des microorganismes avec la faune.....	37
3.2. Interaction des microorganismes avec le milieu	39
3.3. Interaction entre les microorganismes et les plantes	40
3.3.1. Interaction entre les microorganismes non symbiotiques et les plantes.....	42
3.3.2. Les interactions symbiotiques entre les microorganismes et les plantes	44
4. La fixation de l'azote : symbiose légumineuses-Rhizobium.....	49
Conclusion.....	53

Chapitre 4. Éléments de microbiologie du tube digestif

Introduction	54
1. La microflore digestive de l'homme	54
1.1. Définition.....	54
1.2. Composition de la microflore intestinale.....	55
1.3. Répartition de la microflore intestinale.....	55
1.4. Implantation de la flore intestinale.....	57
1.5. Fonctions du microbiote intestinal.....	57
1.6. Dysbiose et pathologies associées.....	60
1.7. Modulation de la flore intestinale.....	61
2. La microflore du tube digestif des ruminants.....	62
2.1. Introduction.....	62
2.2. Anatomie de l'estomac des ruminants.....	63
2.3. La population microbienne du rumen	65
2.4. La digestion chez le ruminant	67
Conclusion.....	71

Chapitre 5. Contamination et hygiène des locaux

Introduction.....	72
1. Sources de contaminations microbiennes: air, eaux, matières premières, personnel	72
2. Principales contaminations: milieux hospitaliers, milieux industriels	74
2.1. Le milieu hospitalier	74
2.2. Le milieu industriel.....	75
3. Règles d'hygiène et normes de sécurité	76
3.1. Règles d'hygiène dans le milieu hospitalier.....	76
3.2. Règles d'hygiène dans les industries alimentaires.....	77
4. Désinfection des locaux.....	77
4.1. Désinfection des surfaces	79

4.2. Désinfection des dispositifs médicaux	80
4.3. Désinfection de l'air des locaux.....	81
Conclusion.....	82

Liste des figures

Figure 1. Stratification thermique du lac.

Figure 2. Représentation schématique d'une station d'épuration des eaux usées.

Figure 3. Représentation schématique du dessablage et déshuilage au cours du prétraitement.

Figure 4. Traitement primaire des eaux usées dans un décanteur raclé.

Figure 5. Traitement biologique par lagunage.

Figure 6. Traitement des eaux usées par boues activées.

Figure 7. Traitement biologique par lit bactérien.

Figure 8. Représentation schématique de la digestion anaérobie des boues secondaires et primaires.

Figure 9. Représentation schématique du traitement de potabilisation de l'eau de surface.

Figure 10. Filtration sur un lit de sable.

Figure 11. Filtration sur filtre à charbon actif.

Figure 12. Représentation schématique d'un agrégat.

Figure 13. Représentation schématique des différentes couches d'un sol.

Figure 14. Symbiose mutualiste entre *Buchnera* et les aphides.

Figure 15. Représentation de la phyllosphère et de la rhizosphère.

Figure 16. Représentation schématique de différents mécanismes de solubilisation de potassium.

Figure 17. Représentation schématique des mécanismes de solubilisation et de minéralisation du phosphate par les microorganismes du sol.

Figure 18. Coupes transversales de racines illustrant différentes interactions mycorhiziennes.

Figure 19. La symbiose Ectomycorhizienne.

Figure 20. La symbiose mycorhizienne à vésiculo-arbusculaires.

Figure 21. La symbiose mycorhizienne des Ericoïdes.

Figure 22. Nodules sur racines de *Medicago* sp.

Figure 23. Des nodules actinorhiziens induits par *Frankia* dans *Ceanothus*.

Figure 24. Dialogue moléculaire entre *Rhizobium* et la plante pour l'établissement de la symbiose.

Figure 25. Structure des facteurs Nod.

Figure 26. Fixation de *Rhizobium* aux poils absorbants de la racine.

Figure 27. Déformation du poil absorbant en crosse de berger.

Figure 28. Initiation de la pénétration bactérienne et formation du cordon d'infection.

Figure 29. Libération des bactéries dans les cellules de la zone d'infection et formation d'un symbiosome.

Figure 30. Représentation schématique de la fixation de l'azote dans les nodules.

Figure 31. Les conditions écologiques abiotiques et leur influence sur le microbiote dans les différentes niches de l'intestin.

Figure 32. Impact de l'altération des jonctions sur la perméabilité de l'épithélium intestinal.

Figure 33. Représentation schématique du tractus digestif d'un ruminant.

Figure 34. La dégradation des glucides par les bactéries du rumen.

Figure 35. Lipolyse et biohydrogénation des acides gras par le microbiote ruminal.

Liste des tableaux

Tableau 1. Les bactéries les plus communément retrouvées dans le milieu aquatique marin dulçaquicole.

Tableau 2. Les limites des paramètres de pollution dans les effluents des réseaux des eaux usées.

Tableau 3. Paramètres microbiologiques de la qualité de l'eau de consommation humaine.

Tableau 4. Les principales bactéries rencontrées dans le sol.

Chapitre 1. Introduction à la microbiologie de l'environnement

Introduction

Bien que la planète terre existe depuis plus de 4.5 Milliards d'années, les microorganismes existaient 2 milliards d'années avant l'homme. Les microorganismes occupent l'ensemble de la croûte terrestre, la totalité de la masse aqueuse et l'atmosphère. Cette forte colonisation est due à une extraordinaire adaptabilité à la fois génotypique et phénotypique.

1. Concepts de base de l'environnement

Écologie : a été proposé par E. Haeckel en 1866 pour désigner la science qui étudie les rapports entre les organismes et le milieu où ils vivent. C'est l'étude de l'écosystème.

Écologie microbienne : se limite à la considération d'un segment de l'écologie d'un écosystème : les microorganismes et leur environnement.

Environnement : ensemble des éléments physiques, chimiques ou biologiques, naturels et artificiels, qui entourent un être humain, un animal ou un végétal.

Microbiologie de l'Environnement : branche de la microbiologie qui s'intéresse à la biodiversité et le rôle des microorganismes dans différents écosystèmes et différentes niches écologiques.

2. Notion d'écosystème

Un écosystème : est un système dynamique, abritant une communauté biologique (la biocénose) formée d'organismes vivants en interaction dans un milieu physique et chimique (le biotope).

L'écosystème peut se décliner sous différentes tailles : il peut être grand (comme un étang ou un lac) ou petit (comme la cavité orale de l'homme, les racines d'une plante ou le rumen).

La biocénose renferme trois catégories d'organismes :

Les producteurs, qui transforment l'énergie lumineuse en énergie chimique et qui élaborent des composés organiques (végétaux, algues et bactéries photosynthétiques),

Les consommateurs, qui se nourrissent de ces matières organiques (animaux),

Les décomposeurs, qui recyclent la matière organique morte afin de restituer aux producteurs les matières minérales nécessaires à la poursuite de leurs activités (bactéries et champignons).

Habitat : désigne la zone où un organisme a donné vit. À chaque organisme est attribué au moins un habitat dans lequel il peut croître et se multiplier, et à partir duquel il peut être isolé (par exemple, le sédiment d'un lac, l'humus du sol ou la cavité nasale). Un microorganisme peut avoir plusieurs habitats.

Niche : désigne le rôle spécifique ou la fonction d'un organisme au sein de la communauté. La niche écologique occupée par un organisme englobe non seulement l'endroit où l'organisme vit, mais aussi la fonction qu'il remplit. Elle est déterminée par plusieurs paramètres tels que les demandes nutritionnelles, capacités biochimiques et tolérances aux conditions environnementales.

Biofilm : en l'absence d'un habitat structuré, les microorganismes ont tendance à créer leur propre microenvironnement ou niche. Il s'agit de systèmes microbiens organisés.

- Par rapport à un écosystème donné, les microorganismes sont soit autochtones soit allochtones.

Les microorganismes autochtones sont indigènes, toujours présent dans un écosystème donné, et leur présence est basée sur les conditions typiques et normales de celui-ci.

Les microorganismes allochtones, quant à eux, sont étrangers à l'écosystème, apparaissant occasionnellement (souvent transitoires provenant d'autre écosystème). Leur présence est liée à des changements occasionnels des conditions spécifiques de l'écosystème. Les milieux naturels les plus communs, comme les eaux ou les sols, reçoivent en permanence une microflore allochtone.

3. Place, diversité et spécificité des microorganismes dans l'environnement

3.1. Place

Les microorganismes sont indispensables à l'homme et à l'environnement. Ils participent au cycle du carbone , au cycle de l'azote et du phosphate et accomplissent un rôle vital dans presque tous les écosystèmes, tel que la dépollution des milieux naturels, la production d'énergie et le recyclage d'autres organismes. Les microorganismes produisent au moins la moitié de l'oxygène élémentaire (O_2) de la planète par la photosynthèse oxygénique.

L'activité des microorganismes dans la biosphère et leur rôle dans les cycles biogéochimiques sont importants pour le maintien de toutes les formes de vie sur terre.

3.2. Diversité

Les microorganismes constituent la composante la plus diversifiée dans la nature, qui se répartit en trois domaines : Procaryotes, Eucaryotes et Archaeobactéries. La diversité repose sur deux points essentiels : la composition des membres de la communauté et la richesse ou l'abondance. L'étude de la diversité microbienne a évolué au fil du temps et peut être abordée sous deux approches :

-**Approche classique ou taxonomique**, repose sur l'isolement, la mise en culture, ainsi que la caractérisation morphologique et physiologique des microorganismes. Son objectif est de regrouper les isolats en taxons, puis de les classer.

-**Approche moléculaire** est l'ensemble des techniques basées sur le séquençage du matériel génétique. Actuellement, de nouvelles méthodes de séquençage à haut débit NGS (Nouvelle Génération de Séquençage) ainsi que l'étude métagénomique. La métagénomique vise à analyser les voies métaboliques pour déduire les fonctions globales d'un écosystème en se basant sur l'expression des gènes (métatranscriptomique) ou la production des protéines (métaprotéomique). Elles permettent ainsi d'obtenir des informations sur la dynamique fonctionnelle des communautés microbiennes. L'approche métagénomique constitue une véritable révolution en microbiologie de l'environnement en donnant accès aux bactéries non cultivées (les bactéries cultivables à partir d'un échantillon environnementale représente moins de 2% de la biodiversité réelle).

Les microorganismes sont présents dans tous les types d'environnements naturels. Ils colonisent divers écosystèmes, tels que les sols, les eaux douces et marines, ainsi que l'air. On peut les rencontrer également dans des environnements les plus hostiles (milieux extrême) tels que les déserts, le fond des océans, les environnements hyper salins ou encore acides etc. Elles sont qualifiées d'extrémophiles, la plupart d'entre eux appartiennent au domaine des *Archæ*. L'industrie porte un grand intérêt aux enzymes qui favorisent la croissance des microorganismes dans de telles conditions, car ces enzymes sont capables de tolérer des températures et des pH extrêmes, comme la Taq polymérase extraite de la bactérie *Thermus aquaticus*. Cette forte colonisation est le résultat d'une adaptabilité extraordinaire, tant génotypique que phénotypique.

3.3. Spécificité

Les microorganismes sont une composante essentielle de tout écosystème. Ils occupent des microhabitats spécifiques qui répondent à leurs besoins. Dans ces microhabitats, les microorganismes interagissent entre eux et avec les autres organismes et établissent des relations de différente nature: mutualisme, antagonisme, commensalisme, neutralisme, parasitisme, etc.

Mutualisme est une interaction à effet bénéfique réciproque. Le mutualisme peut se distinguer en symbiose et coopération. On peut citer le cas de bactéries thermophiles *Symbiobacterium thermophilum* et *Bacillus*. *Symbiobacterium* ne peut être cultivé sans la présence de *Bacillus*, qui lui fournit le CO₂ généré par sa respiration. Ce CO₂ permet à *Symbiobacterium thermophilum* de compenser l'absence d'anhydrase carbonique, une enzyme impliquée dans plusieurs processus, notamment la photosynthèse.

-La coopération se manifeste dans la fabrication du yaourt, qui résulte de l'action de 2 ferments lactiques à 40- 45°C. *Streptococcus thermophilus* produit des facteurs de croissance bénéfiques pour *Lactobacillus bulgaricus*. Au début de la fermentation, ce sont surtout les streptocoques qui interviennent, puis ils laissent progressivement la place aux *Lactobacillus*, plus résistants en milieu acide. Les deux germes fermentent donc le lait plus rapidement et de manière plus efficace qu'un seul germe.

Antagonisme repose sur l'action de diffusion d'un agent antimicrobien dans des milieux liquides ou solides afin d'inhiber la croissance des microorganismes, qu'ils soient pathogènes ou non. L'antagonisme peut se distinguer en compétition et antibiose.

-La compétition peut se produire entre deux ou plusieurs microorganismes dans un même environnement, que ce soit pour les nutriments, l'espace ou d'autres facteurs environnementaux devenant limitant pour leur croissance. Le microorganisme avec le métabolisme le plus rapide tend à dominer. Par exemple, la dominance du champignon du genre *Fusarium* dans la rhizosphère serait liée à son pouvoir compétitif élevé, grâce à l'arsenal enzymatique qu'il possède.

-L'antibiose est une activité antagoniste utilisée par les bactéries pour la prévention des attaques des pathogènes et pour la suppression et le contrôle des maladies d'origine biotique. Elle repose sur la production à de faibles concentrations des métabolites secondaires de nature diverse aux propriétés antifongiques ou antibiotiques, comme : le cyanure d'hydrogène HCN,

phénazine, oomycinA et zwittermycin. Le Champignon parasite *Gaeumannomyces graminis* est inhibé par une phénazine élaborée par un *Pseudomonas fluorescent* présent sur les racines du blé. Cette inhibition est suffisamment intense pour protéger les blés qui hébergent cette bactérie.

Commensalisme est une interaction fréquente dans le sol rhizosphérique. Les activités d'un microorganisme visent à créer un environnement favorable au développement et à la survie d'un autre. De plus, certains organismes ont la capacité de dégrader ou de neutraliser des substances toxiques, ce qui facilite la croissance d'autres organismes ou microorganismes. On peut citer l'exemple de bactérie chimiolithotrophe nitritante *Nitrosomonas* qui transforme l'ammonium en nitrite, alors que la bactérie chimiolithotrophe nitratante *Nitrobacter* dépend de ce que *Nitrosomonas* lui fournit.

Neutralisme désigne l'absence de relations significatives entre les microorganismes. Il correspond à une situation où deux espèces occupent le même habitat, mais pas la même niche. Une telle association peut être transitoire ; lorsque les conditions environnementales changent, comme la disponibilité des nutriments, la relation peut évoluer. Les bactéries sont généralement associées à l'enveloppe gélatineuse de la paroi externe des hyphes de certains champignons responsables de pourriture molle. Il a été suggéré que ces bactéries pourraient interférer avec la rétro-inhibition de la cellulase et accélérer la décomposition. Il est généralement difficile de prouver que les organismes n'interagissent pas ou ne s'influencent pas.

Le parasitisme est une interaction dans laquelle les microorganismes parasites vivent au dépend de l'hôte et profite de cette relation. Le parasite établit des liens avec l'hôte pour répondre à ses besoins nutritionnels ou créer des conditions de vie favorables. De nombreuses bactéries sont phytopathogènes, comme *Erwinia amylovora*, responsable du « feu bactérien » sur les poiriers et pommiers, ou *Xanthomonas campestris*, qui provoque des lésions et des nécroses sur le limbe des feuilles.

Dans l'environnement, les microorganismes interviennent dans tous les écosystèmes en tant que producteurs, consommateurs et décomposeurs.

-Les microorganismes producteurs sont photolithotrophes, ils tirent leur énergie de la lumière : les bactéries sulfureuses pourpres (*Chromatium*), les bactéries sulfureuses vertes (*Chlorobium*). Elles ne croissent pas en l'absence de lumière et utilisent des composés réduits

du soufre (H_2S) pour la fixation du CO_2 . Ou chimiolithotrophes, tirent l'énergie des composés inorganiques et synthétisent des matières organiques (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Thiobacillus*, etc.)

-Les microorganismes décomposeurs sont chimioorganotrophes. 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 dans l'environnement. On peut citer l'exemple de *Streptomyces* sp. dans la dégradation des substrats organique de nature ligneuse riches en lignocelluloses.

-Les microorganismes consommateurs sont hétérotrophes, ils se nourrissent d'autres organismes ou de substances organiques pour obtenir leur énergie. On peut citer l'exemple de *Bdellovibrio bacteriovorus*, une bactérie prédatrice qui consomme d'autres bactéries, en particulier celles à Gram négatif.

Conclusion

Les microorganismes jouent un rôle important dans tous les écosystèmes grâce à leur diversité, leur capacité d'adaptation et les différentes interactions complexes qu'ils peuvent établir, à savoir le mutualisme, le commensalisme, l'antagonisme, le parasitisme et le neutralisme. Par ailleurs, les microorganismes assurent des fonctions écologiques essentielles : producteurs, consommateurs ou décomposeurs, ils participent activement aux cycles de la matière et de l'énergie. Leur présence est donc indispensable à l'équilibre des milieux naturels, à la fertilité des sols et à la survie des autres formes de vie.

Chapitre 2. La microbiologie des eaux

Introduction

L'eau représente un écosystème dynamique et très complexe considéré comme l'un des principaux réservoirs de la diversité biologique, il est estimé que les eaux abritant une communauté microbienne très diversifiés. La microbiologie des eaux a pour objectif d'étudier les microorganismes habitant les systèmes aquatiques que soit les eaux douces ou les eaux salines, les interactions entre les communautés microbiennes et notamment le rôle dans la dépollution.

1. Les eaux naturelles

Les eaux naturelles comme les eaux marines et les eaux douces sont des habitats microbiens très importants. Elles présentent des superficies et des volumes très divers, allant de l'alcalinité à l'acidité extrême. Les températures auxquelles les microorganismes se développent, vont de -5°C à -15°C dans les profondeurs, et peuvent atteindre jusqu'à 113°C dans les zones géothermiques. L'eau représente près de 71 % de la surface de la terre.

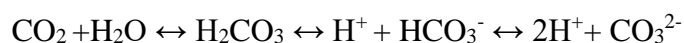
-La nature des eaux naturelles

La valeur de l'eau comme habitat microbien dépend de nombreux facteurs physiques, contrôlant la communauté microbienne :

- La faible teneur en nutriments: les eaux naturelles sont généralement oligotrophes. Il en résulte que les microorganismes aquatiques indigènes doivent pouvoir subsister dans des conditions où la disponibilité des nutriments est limitée.

- Énergie lumineuse : dépend de la transparence, de la couleur et de la profondeur de l'eau. La lumière pénètre généralement entre 10 et 200 m, créant ainsi la zone photique, où la photosynthèse se produit. En raison des conditions de lumière différentes, le développement des photoautotrophes varie, étant le plus important entre 0,5 et 2 m de profondeur.

- pH et gaz dissous : le pH de l'eau de mer se situe généralement entre 8,0 et 8,3, tandis que celui des eaux douces varie entre 6,0 et 9,0. Les valeurs maximales de pH correspondent souvent au développement du phytoplancton et à l'activité photosynthétique des algues, comme observé lors des marées vertes. Le CO₂ est trois fois plus soluble que l'O₂. Le pouvoir tampon des eaux naturelles est régulé par un important équilibre:



L'oxygène dans l'eau est le résultat d'une dissolution directe de l'oxygène atmosphérique et de la photosynthèse. La dissolution de l'oxygène est limitée fortement par les températures élevées et les faibles pressions. A la surface, l'eau est saturée en O₂ dissout, et peut atteindre un pic de l'ordre de 170%, lorsqu'il y a une efflorescence phytoplanctonique. Sa concentration diminue avec la profondeur, atteignant un minimum au-dessous de la zone photique à cause de la respiration bactérienne.

-La communauté microbienne des eaux naturelles

L'eau est un environnement physique particulier favorisant l'existence de nombreux types de microorganismes qui regroupe des bactéries, champignons et virus (**tableau 1**).

Les organismes vivant à l'état libre dans les milieux aquatiques portent le nom de plancton. Le plancton désigne l'ensemble des organismes présents dans les eaux douces, saumâtres et marines, le plus souvent en suspension. On distingue le phytoplancton (organismes végétaux), le zooplancton (organismes animaux) et le microplancton (microorganismes).

Certains d'autres organismes aquatiques vivant sur le fond des mers, des océans et des lacs portent le nom de benthos. Les bactéries benthiques sont liées aux particules et à la matière organique et leur répartition dans la colonne sédimentaire dépend principalement de leur métabolisme. Le développement et la diversité des communautés bactériennes dans les sédiments dépendent, entre autres, de la granulométrie, avec une relation négative entre la taille moyenne des particules du sédiment et le nombre de bactéries. Le potentiel redox des sédiments constitue également un facteur déterminant dans la structuration de ces communautés.

Les bactéries photosynthétiques sulfureuses et non sulfureuses ainsi que les oxydants aérobies du sulfure d'hydrogène, *Beggiatoa* et *Thiothrix*, existe dans les zones détrempées contenant du sulfure d'hydrogène.

Il faudrait également mentionner plusieurs groupes particuliers de chimiohétérotrophes. On y distingue les bactéries engainées et sessiles des genres *Sphaerotillus* et *Leucothrix*, les bactéries pédonculées et bourgeonnantes des genres *Caulobacter* et *Hyphomicrobium*. Ces bactéries et d'autres peuvent se comporter comme des colonisateurs de surfaces submergées.

Tableau 1. Les bactéries les plus communément retrouvées dans le milieu aquatique marin dulçaquicole.

Bactéries	Quelques caractères	Habitat
<i>Spirochaeta plicatilis</i>	-Gram -, anaérobies ou micro-aérophiles	Eaux saumâtres et eau douces riches en H ₂ S
<i>Sphaerotillus natans</i>	-Gram -, aérobies -Dégradation des composants organiques	Attachée aux plantes et pierres dans les eaux courantes riches en éléments nutritifs
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	-Gram -, anaérobies ou aérobies -Photosynthétique, bactérie pourpre non sulfureuse	Lacs
<i>Caulobacter vibrioides</i>	-Gram négatif, aérobies -Bactérie prédatrice	Système aquatique dulçaquicole
<i>Chromatium Chlorobium</i>	-Gram négatif, anaérobies -Photosynthétique, bactérie pourpre sulfureuse	Système aquatique
<i>Cytophaga hutchinsonii</i>	-Gram négatif, aérobies -Dégradation des polysaccharides et protéines	Les sédiments des lacs et des rivières
<i>Bdellovibrio bacteriovorus</i>	-Gram -, aérobies ou microaérophiles. -Parasites de bactéries et d'algues	Largement présentes dans les eaux douces et le sol
<i>Azotobacter chroococcum</i>	-Gram négatif, aérobies, fixateur d'azote important	Large gamme de système terrestre et aquatique dulçaquicoles
<i>Beggiatoa alba</i>	Gram -, aérobies, oxyde d'H ₂ S	Dans les sédiments à l'interface entre la zone anoxique et la zone oxygénée supérieur
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	-Gram négatif, aérobies -Dégradation de la matière organique	Très répandue dans les environnements aérobies du milieu dulçaquicole
<i>Escherichia coli</i>	-Gram négatif, anaérobies facultatives -Dégradation de la matière organique	Contaminant fécal des eaux douces
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	Gram négatif, anaérobies strictes	Sédiments anaérobies et hypolimnion
<i>Methylomonas methanica</i>	-Gram négatif, aérobies, -Bactéries oxydant le méthane	Interfaces oxiques-anoxiques de divers habitats d'eau douce

1.1. Les eaux marines

Les mers et les océans constituent 97,5 % des eaux de la terre. Ils se distinguent par leur forte salinité, qui avoisine les 35 g/L, ce qui rend leur utilisation difficile, notamment en raison du coût élevé de leur traitement. Cette eau est en grande partie à une température de 2 à 3 °C, sans lumière et à 62 % sous une pression élevée, supérieure à 100 atm.

La pression dans le milieu marin, augmente de 1 atmosphère/10m de profondeur, et elle atteint des valeurs proches de 1000 atmosphères aux plus grandes profondeurs. Cette pression considérable constitue le principal facteur de distribution des organismes vivants dans ce type d'écosystème.

Les bactéries marines, contrairement à celles des eaux douces, sont barophiles et halophiles. L'activité photosynthétique est la principale source de matière organique dans les eaux marines, prédominée par les genres *Synechococcus* et *Prochlorococcus*, qui sont les microbes photosynthétiques les plus abondants sur terre et contribuent à plus de 50 % de la photosynthèse marine totale. La matière organique est évaluée par la mesure du Carbone Organique Total (COT) et seule une fraction de 10% est assimilée par les microorganismes.

En outre, les océans abritent de grandes populations de virus, particulièrement dans les régions côtières. Ces virus provoquent des réductions importantes de la production primaire en infectant les cyanobactéries. Par exemple le virus d'*Emiliana huxleyi*, une algue capable de produire du diméthylsulfate, lors de sa dégradation dans l'eau par lyse cellulaire. Le diméthylsulfate ainsi produit, après oxydation dans l'atmosphère, contribue à l'effet de serre.

1.2. Les eaux douces

Les eaux douces sont des eaux naturelles qui ne présentent que 2.5% de la totalité des eaux terrestres. Elles sont caractérisées par une faible salinité qui est moins de 1 g/l de sels dissouts. Elles ont pour origine, soit des nappes profondes dont l'émergence constitue une source de ruisseau, de rivière, soit les eaux de ruissellement. Les eaux douces naturelles peuvent être classées dans les eaux atmosphériques, eaux de surface et les eaux souterraines.

1.2.1. Eaux de surface

Ce type d'eau inclut toutes les eaux en circulation ou stockées à la surface des continents, comme les rivières, lacs, fleuves, étangs, barrages. La composition chimique des eaux de surface varie en fonction de la nature des terrains qu'elles traversent tout au long de leur parcours dans les bassins versants.

-Les lacs : font partie des environnements d'eau douce les plus complexes. Ils peuvent présenter une composition chimique particulière et créer des conditions extrêmes. On trouve les lacs salés, les lacs amers riches en $MgSO_4$ et les lacs borax riches en $Na_2B_4O_7$.

Sur le plan nutritif on distingue deux types principaux :

-Les lacs oligotrophes , pauvre en éléments nutritifs (teneur en matière organique inférieure à 15 mg/l), aérobies pendant toutes l'année et les variations de température ne provoque pas de stratification distincte.

- Les lacs eutrophes, riches en substances nutritives (avec une teneur en matière organique supérieure à 30 mg/l), présentent une consommation d'O₂ élevée, ce qui entraîne une stratification thermique (**figure 1**).

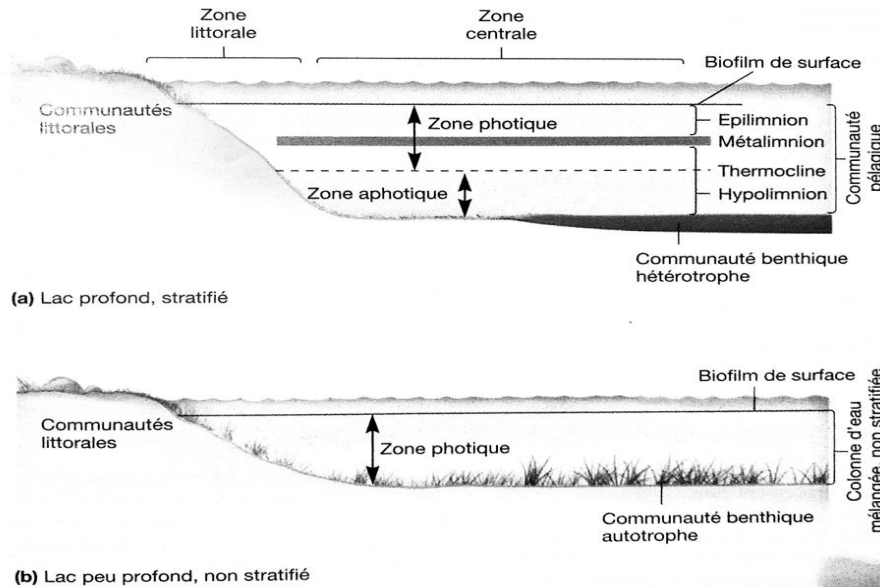


Figure 1. Stratification thermique du lac.

L'eutrophisation est le processus d'enrichissement progressif d'un lac en éléments nutritifs, tels que le phosphore et l'azote. Lorsqu'elle est modérée et que ses effets sont bénéfiques, elle constitue un processus de fertilisation. Cependant, lorsqu'elle devient excessive et que ses effets sont nuisibles, elle conduit à la pollution. Le processus d'eutrophisation accélérée est généralement causé par les activités humaines comme le rejet des eaux usées, de détergents et des engrais agricoles riches en composés limitant, tels que le phosphore et l'azote, dans les écosystèmes aquatiques. L'un des principaux effets néfastes de l'eutrophisation excessive est l'augmentation de la fréquence des efflorescences algales nuisibles, en particulier des cyanobactéries, telles qu'*Aphanizomenon flosaquae*, ce qui nécessite des plans de gestion des proliférations nuisibles.

Les rivières : présentent une situation différente du fait qu'il y a mouvement d'eau horizontal suffisant pour minimiser la stratification verticale. La majeure partie des microorganismes est fixé sur des surfaces, comme *Sphaerotilus* sp., sur les roches et les sédiments. La source de matière organique provient d'une production interne, due aux microorganismes photosynthétiques, ou externe (ruissèlement des sols et des feuilles d'arbres).

Lorsque la concentration en matière organique est plus supérieurs au pouvoir oxydant des microorganismes les eaux des rivières reste chargé an matière organique ce qui provoque une pollution organique. C'est particulièrement le cas dans les régions urbaines et agricoles irriguées par des cours d'eau. Ces ajouts de matière organique engendre des modifications nettes et prévisibles de la communauté microbienne et de l'oxygène disponible. Ils entraînent un affaissement de la courbe d'oxygène dissous.

1.2.2. Eaux souterraines :

D'un point de vue hydrogéologique, les eaux souterraines se divisent en :

-Nappes phréatiques, peu profondes et alimentées directement par les précipitations pluvieuses ou les écoulements d'eau en dessus.

-Les nappes captives, situées plus profondément que les nappes phréatiques et séparées de la surface par une couche imperméable, sont alimentées par l'infiltration d'eau sur leurs bordures.

Les eaux souterraines constituent une source importante d'eau potable en raison de leur position sous le sol, qui leur offre une protection naturelle contre les pollutions organiques et chimiques. La composition chimique des eaux souterraines dépend de la nature du terrain sous-jacent.

Les eaux souterraines sont moins vulnérables aux pollutions, mais la croissance démographique incontrôlée ainsi que l'accroissement des activités industrielles mènent à la dégradation de la qualité de cette ressource souterraine.

1.3. Autoépuration naturelle des eaux

Lorsqu'une eau reçoit une quantité de matières organiques et de microorganismes (pollution due aux déchets ou aux eaux usées), ces substances disparaissent progressivement, et l'eau retrouve son état naturel après un certain temps. Ce processus est appelé autoépuration

naturelle. L'autoépuration naturelle implique la coopération entre des facteurs physico-chimiques et biologiques.

-Les facteurs physicochimiques : Il s'agit des phénomènes d'adsorption, de dilution, de sédimentation, d'oxydation ainsi que de l'action bactéricide de la lumière et de l'influence de la température.

- Le principal facteur biologique de l'autoépuration est la minéralisation des matières organiques par les microorganismes (bactéries et champignons). Le développement des bactéries réduit la quantité de matière organique polluante, mais entraîne également une diminution de la quantité d'oxygène. Ce processus génère aussi des matières minérales (nitrates, sulfates, CO₂..), qui favorisent le développement des phototrophes. Le brassage de l'eau par les courants et la photosynthèse des algues et cyanobactéries permettent de réoxygéner l'eau. Ainsi, l'eau retrouve ses qualités écologiques naturelles. Les microorganismes épurateurs sont des chimioorganotrophes, aérobiques facultatifs ou stricte, tels que *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Cytophaga* et *Flavobacterium*.

D'autres facteurs biologiques interviennent et influencent le processus :

-Les bactériophages et la bactérie *Bdellovibrio bacteriovorus* sont des parasites capables de détruire d'autres bactéries.

-Les bactéries, qui dégradent les matières organiques, sont elles-mêmes consommées par les protozoaires prédateurs, comme *Colpidium campylum*.

-L'activité antagoniste entre certaines bactéries contre d'autres bactéries. Par exemple: *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus coagulans* et *B. licheniformis* produisent des métabolites qui inhibent les coliformes.

La capacité du processus d'autoépuration est limitée. Lorsque les rejets de matières organiques sont excessifs, la capacité naturelle d'autoépuration des organismes vivants est saturée, et la pollution persiste. De plus, la présence de substances toxiques peut entraver ce phénomène naturel.

2. Les eaux usées

2.1. Généralités sur les eaux usées

Une eau usée est une eau chargée de microorganismes pathogènes dont la teneur dépasse 10^6 germes/ml. Les eaux usées des égouts renferment, quant à elles, entre 10^8 et 10^{11} germes/ml. Les eaux usées se divisent en deux grandes catégories : les eaux résiduaires urbaines et les eaux résiduaires industrielles.

-Eaux résiduaires urbaines

Les eaux résiduaires urbaines (**ERU**) comprennent les eaux ménagères, les eaux vannes et les eaux de ruissellement. La composition et les caractéristiques d'une eau résiduaire urbaine sont peu variables par rapport aux eaux usées industrielles.

-Eaux résiduaires industrielles

Les caractéristiques des eaux usées industrielles varient considérablement en fonction de nombreux paramètres, type d'industrie, les processus de production, les méthodes de nettoyage, les différentes étapes du procédé industriel et l'état des équipements. Les principaux polluants présents dans ces eaux usées sont les métaux toxiques, les toxines organiques, les matières colorées, les huiles et graisses, les sels, ainsi que la pollution organique.

Evaluation de la pollution des eaux

Trois principaux paramètres mesurent les matières polluantes des eaux usées :

- **Les matières en suspension (MES) mg/litre.** Ce sont les matières non dissoutes de diamètre supérieur à $1\mu\text{m}$ contenues dans l'eau. Elles comportent à la fois des éléments minéraux et organiques et décantent spontanément.

- **La demande biochimique en oxygène (DBO), mg d'O₂/litre.**

La **DBO** exprime la quantité de matières organiques biodégradables présentes dans l'eau. Pour mesurer ce paramètre, on prend comme référence la quantité d'oxygène consommé au bout de cinq jours. C'est la **DBO₅**.

-**La demande chimique en oxygène (DCO), mg d'O₂/litre.** Ce paramètre correspond à la quantité d'oxygène totale consommée par l'oxydation chimique de ces matières organiques.

Les limites des paramètres de pollution dans les effluents des réseaux d'eaux usées sont définies par des normes et réglementations visant à protéger l'environnement et la santé publique (**tableau 2**).

Tableau 2. Les limites des paramètres de pollution dans les effluents des réseaux des eaux usées.

Type de réseaux	MES (en mg/l)	DCO (en mg/l)	DBO5 (en mg/l)
Effluents de réseaux unitaires	152 -670	114-570	48 -270
Effluent de réseaux séparatifs	34 -460	28 -320	13-40
Eaux épurées	35	125	25

2.3. Traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées domestiques et industrielles avant leur rejet dans l'environnement se fait dans une installation destinée à épurer les eaux, appelée station d'épuration des eaux usées (**STEP**) (**figure 2**). L'objectif principal de ce traitement est de réduire la matière organique, d'éliminer les substances toxiques et les microorganismes pathogènes présents dans le milieu récepteur. Le traitement des eaux usées comprend plusieurs étapes :

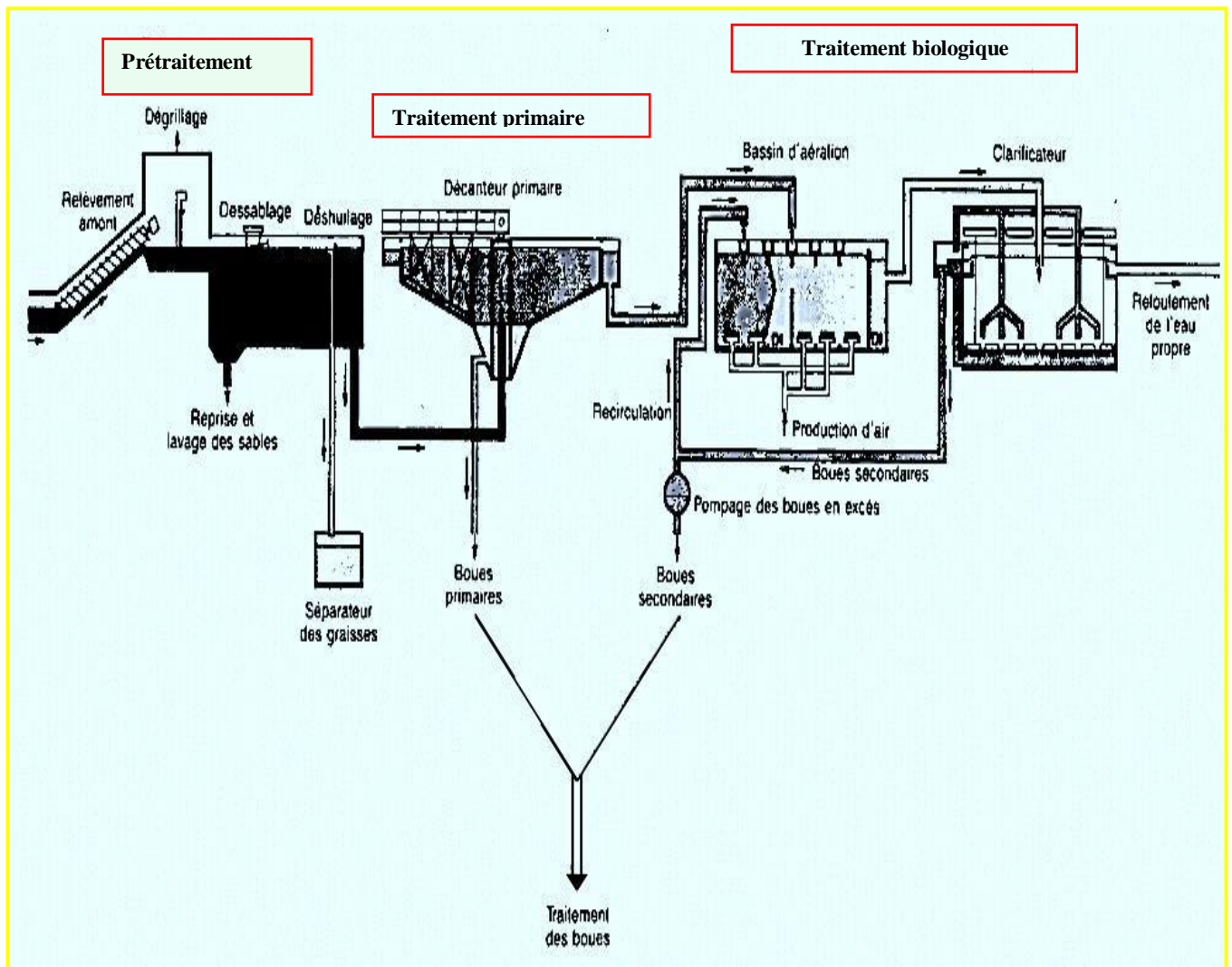


Figure 2. Représentation schématique d'une station d'épuration des eaux usées.

2.3.1. Le prétraitement

Le prétraitement a pour objectif d'éliminer les éléments les plus grossiers. L'eau traverse une première grille qui permet d'éliminer les plus gros déchets solides : c'est le dégrillage, puis passe au travers du tamis, c'est le tamisage. Les sables et graviers se déposent au fond de bassins conçus à cet effet et sont évacués : c'est le dessablage. Les graisses remontent grâce à une injection d'air et sont collectées à la surface : c'est le déshuilage (**figure 3**).

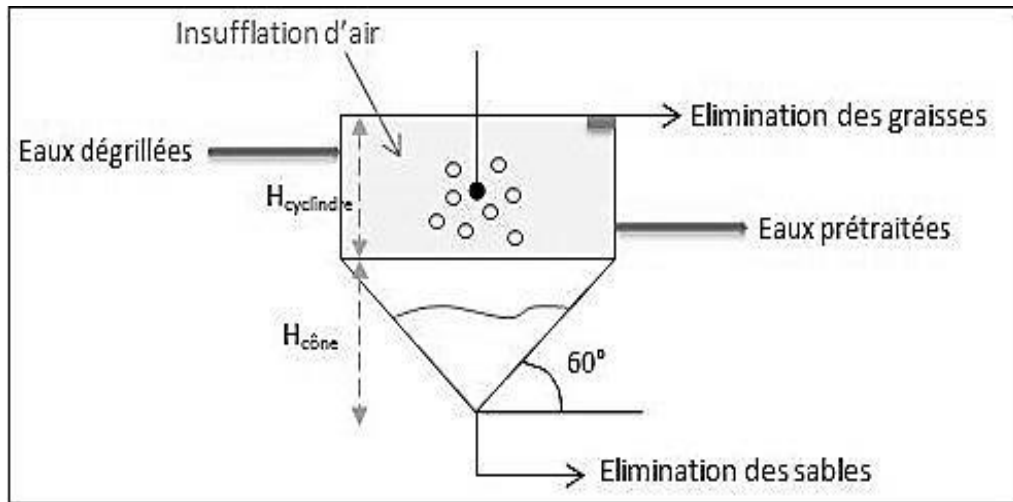


Figure 3. Représentation schématique du dessablage et déshuilage au cours du prétraitement.

H cylindre : Hauteur du cylindre ; **H cône** : Hauteur du cône

2.3.2. Traitement primaire (physicochimique)

L'effluent subit une décantation dans un bassin de décantation (décanteur primaire) qui permet d'éliminer 50 à 55% des matières en suspension. Celles-ci se déposent au fond du bassin pour former les boues primaires (**figure 4**). Le traitement primaire élimine 20 à 30% de la DBO.

L'utilisation d'un décanteur lamellaire permet d'augmenter le rendement de la décantation. Ce type d'équipement est équipé de lamelles parallèles et inclinées, ce qui augmente la surface de décantation et accélère le processus de dépôt des particules. La décantation lamellaire permet ainsi d'éliminer plus de 70 % des matières en suspension et de réduire DBO de plus de 40 %.

Les performances de la décantation peuvent être améliorées également par l'adjonction de réactifs chimiques, qui permet, après coagulation et floculation, de capter jusqu'à 90 % des matières en suspension et diminue 75% de la DBO.

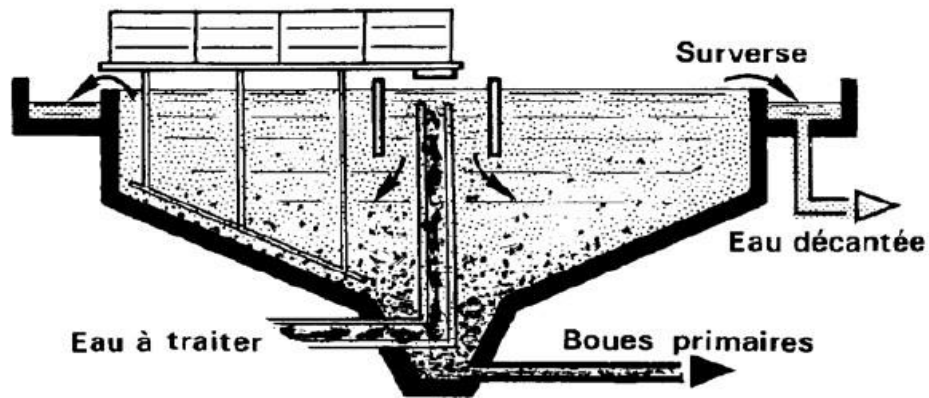


Figure 4. Traitement primaire des eaux usées dans un décanteur raclé.

2.3.3. Traitement secondaire (biologique)

Le traitement biologique permet d'éliminer les polluants solubles biodégradables et non décantables. Il s'agit de mettre la matière organique contenue dans les eaux usées au contact d'une masse bactérienne active en présence d'oxygène. On peut distinguer deux types de procédés, selon la biomasse épuratrice qui se trouve soit : libre (procédés à culture libre) ou fixée à un support (procédés à culture fixe).

Traitement biologiques par lagunage artificiel

Le lagunage repose sur la capacité épuratrice de plans d'eau peu profonds. L'eau est dirigée vers une série de bassins appelés lagunes (**figure 5**). La pollution organique se dégrade grâce à l'action des bactéries présentes dans ces plans d'eau. Les caractéristiques du traitement biologiques par lagunage artificiel sont les suivants :

- La durée de séjour des eaux usées dans les bassins peut aller jusqu'à 60 jours
- Permet d'éliminer 80 % à 90 % de la DBO et 20 à 30% d'azote
- Il a l'inconvénient d'utiliser des surfaces importantes et il est très lent.

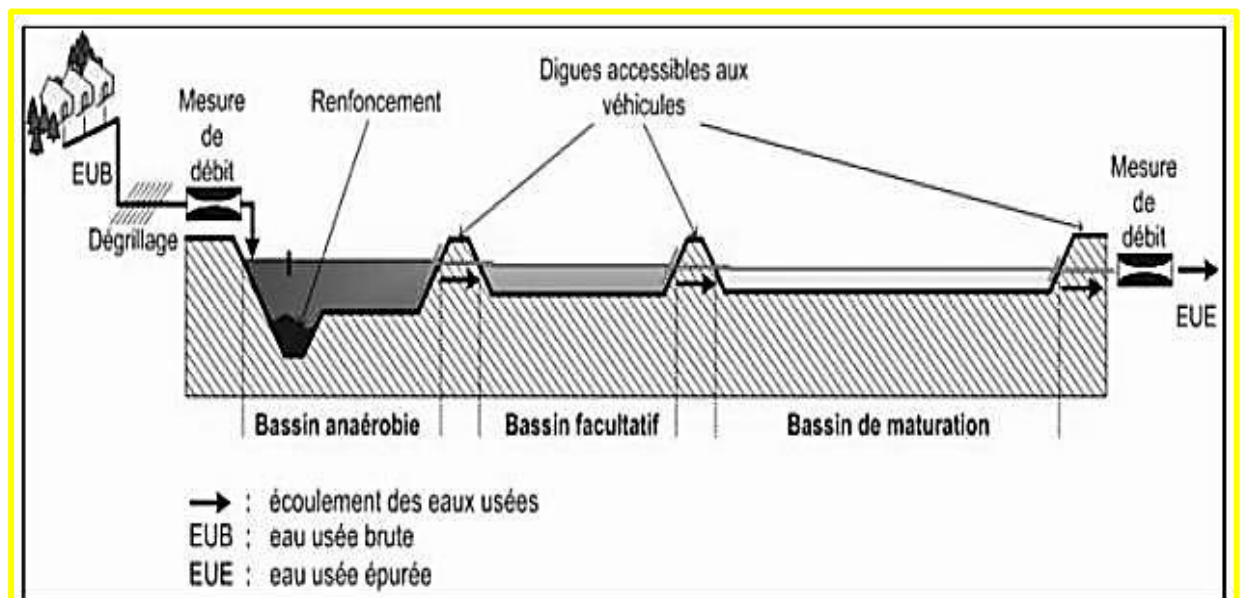


Figure 5. Traitement biologique par lagunage.

Traitement biologiques par boues activées (procédé à culture libre)

Dans ce procédé, la biomasse est sous forme de boues dites activées. Il consiste à mettre en contact la biomasse (boues activées) avec les eaux usées à épurer dans un bassin aéré et brassé (figure 6). L'action des microorganismes dans ce procédé est bipartite:

-ils dégradent une partie des matières organiques en solution.

-ils flocculent et entraînent avec eux une partie des substances organiques présentes dans l'eau. Les floccs, d'une taille variant de 40 à 400 μm , sont constitués de cellule bactérienne, de leurs produits visqueux de sécrétion et des matières organiques colloïdales du milieu. *Zoogloea ramigera*, qui génère une grande quantité de matrice extracellulaire (slime), joue un rôle important dans le processus de floculation.

La présence de champignons est indésirable, car ils se multiplient rapidement en conditions inhabituelles et défavorables à la croissance bactérienne, ce qui perturbe le phénomène de floculation. Ils seraient responsables du phénomène de **bulking** (formation de boues encombrantes) dues au développement massif de champignons et de bactéries filamenteuses telles que *Sphaerotilus* et *Thiothrix*. Ces boues sédimentent difficilement et donnent naissance à un effluent de mauvaise qualité.

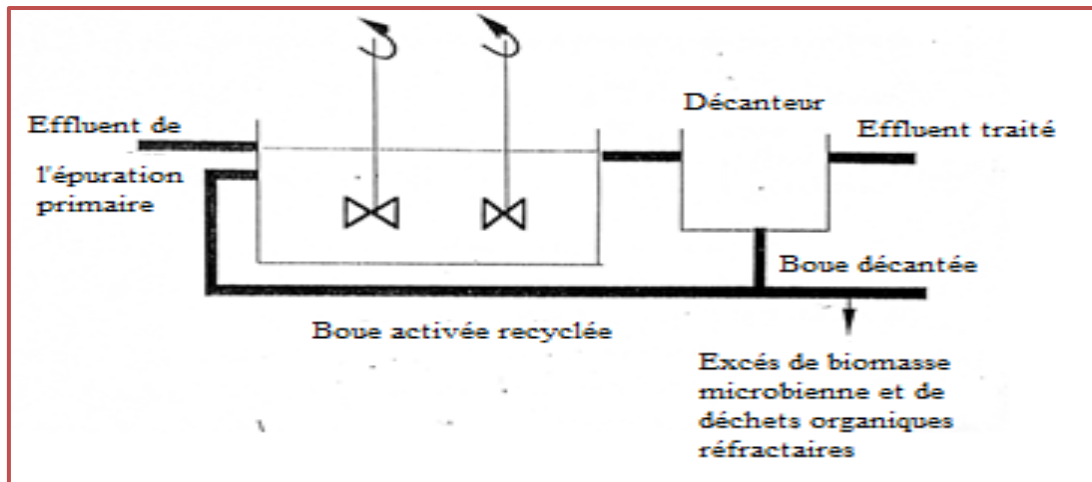


Figure 6. Traitement des eaux usées par boues activées.

Après un temps de séjour dans le bassin d'aération d'environ 10 h, l'effluent est renvoyé dans un clarificateur appelé aussi décanteur secondaire où les boues sont éliminées par décantation (boues secondaire). Ensuite, les boues sont envoyées vers une unité de traitement spécifique pour leur épandage agricole ou leur élimination, ou bien une partie est réinjectée dans le bassin d'aération. Cette opération est appelée la recirculation des boues.

Les traitements par boues activées permettent d'éliminer de 85 à 95% de la DBO, en fonction des installations. C'est le traitement biologique le plus simple et le plus couramment utilisé.

-Traitement par lit bactérien (procédé à culture fixe)

La technique des lit bactériens consiste à faire ruisseler les eaux à traiter sur un support solide généralement poreux (garnissage) où se développe une culture de microorganismes épurateurs le film biologique ou biofilm (sont des amas structurés de cellules bactériennes) (**figure 7**).

- L'effluent provenant du traitement primaire est pulvérisé à la surface du lit filtrant qu'il traverse en environ 60 minutes.

- C'est au cours de ce passage que l'effluent élimine ses matières organiques en solution qui sont soit floculées ou dégradées par les bactéries présentes dans le lit filtrant.

- Ce système génère des boues, ce qui nécessite un bassin de décantation pour leur élimination.

Le rendement maximum de ce procédé est de 80 % d'élimination de la DBO.

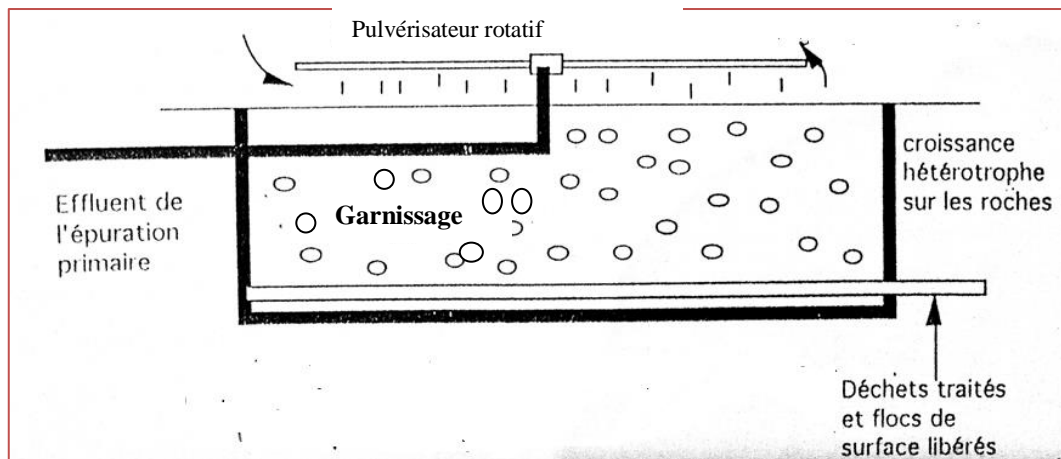


Figure 7. Traitement biologique par lit bactérien.

Biofiltration

La biofiltration utilise une culture bactérienne fixée sur un support granulaire. Le milieu granulaire joue simultanément le rôle de filtre et de support pour les cultures bactériennes. Cette installation offre donc la possibilité de réaliser la dégradation des matières polluantes et la clarification des eaux usées. Le matériau choisi doit impérativement se caractériser par son action filtrante et permettre une fixation maximale des cultures biologiques. Un système d'aération est mis en place pour fournir l'oxygène nécessaire à l'intérieur du filtre. Ce procédé permet d'éliminer environ 90% de la DBO et peut également réduire les concentrations d'azote.

Traitement des boues d'épuration :

Les boues générées lors des traitements primaires et secondaires doivent également être traitées avant d'être éliminées. Il existe plusieurs méthodes parmi lesquelles :

- **La digestion anaérobie** consiste en une fermentation réalisée dans un digesteur pendant une période de 2 à 3 semaines. Les microorganismes anaérobies transforment la matière organique complexe en produisant principalement du gaz, notamment du CO_2 et du CH_4 . Le méthane ainsi produit peut être valorisé comme source d'énergie, par exemple pour le chauffage. Elle peut être schématisée comme suit (**figure 8**).

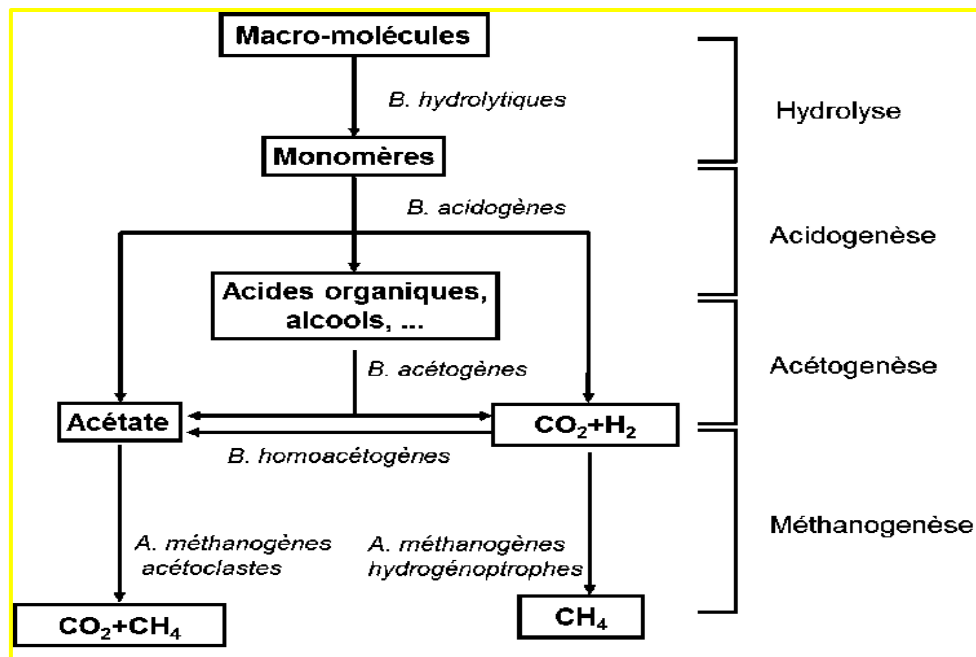


Figure 8. Représentation schématique de la digestion anaérobie des boues secondaires et primaires.

-Les boues sont déshydratées, incinérées, puis épandues ou bien elles sont enfouies, selon le type de boues et la législation du pays.

2.3.4. Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire qui est soit physique ou biologique permet d'éliminer les substances chimiques, l'azote et le phosphore inorganique mais aussi d'autres composés récalcitrants, qui n'ont pas été éliminés par les traitements primaires et secondaires.

-L'élimination de l'azote:

Les stations d'épuration conçues pour éliminer les matières carbonées ne parviennent à éliminer qu'environ 50 % de l'azote présent dans les eaux usées, ce qui peut avoir un impact considérable sur l'écosystème d'un lac. Pour satisfaire aux normes de rejets en zones sensibles, des traitements complémentaires doivent être mise en place.

L'élimination de l'azote se fait par voie biologique grâce à l'activité bactérienne. L'azote organique dans les eaux usées est converti en ammoniacque (NH_4). L'élimination de l'azote ammoniacal est obtenue grâce à des traitements biologiques de nitrification-dénitrification. La nitrification consiste en une transformation, par culture bactérienne (*Nitrosomonas* et *Nitrobacter*) en aérobiose du NH_4 en nitrates (NO_3). Une seconde phase, la dénitrification, complète le processus. Les nitrates, sous l'action de bactéries dénitrifiantes (*Pseudomonas*) et

dans un milieu pauvre en oxygène, sont transformés en azote gazeux N_2 . Ce gaz s'échappe alors dans l'atmosphère.

-L'élimination du phosphore :

L'élimination du phosphore peut être réalisée par des voies physicochimiques ou biologiques.

La déphosphatation biologique est réalisée grâce à l'activité des phosphates accumulating bacteria (**PAB**). Elle consiste à provoquer l'accumulation du phosphore en plaçant alternativement des cultures bactériennes, tels qu'*Acinetobacter* sp., en phase anaérobie et aérobie.

- ✓ En phase anaérobie, les bactéries relarguent des phosphores inorganiques
- ✓ En phase aérobie, elles reconstituent leurs réserves en polyphosphates.

Cette réabsorption est plus importante à la quantité de phosphore relarguée, ce qui entraîne une accumulation progressive de phosphore dans ces microorganismes, pouvant atteindre jusqu'à 10 % de leur poids sec. Le rendement moyen de l'élimination du phosphore est de l'ordre de 50 à 65% seulement.

Le traitement physicochimique est la technique la plus couramment employée, et repose sur une précipitation chimique par le sel de fer, d'aluminium, ou de calcium. On obtient des précipités insolubles de phosphates métalliques séparés de l'eau par décantation. Elle permet une élimination entre 80% et 90% du phosphore, mais engendre une importante production de boues.

Désinfection :

L'eau est désinfectée par le chlore et l'ozone pour éliminer les germes pathogènes. La réduction de la pollution bactériologique des effluents avant rejet dans le milieu récepteur peut se justifier dans un certain nombre de cas : protection sanitaire des zones de baignade et de loisirs, protection sanitaire des zones littorales, réutilisation d'effluents à des fins d'irrigation.

3. Les eaux brutes et leur potabilité

3.1. Les eaux brutes

L'eau brute est l'eau prélevée aux captages d'eaux souterraines ou de surface avant tout traitement de potabilisation.

-Les eaux souterraines résultent de l'accumulation des eaux d'infiltration dans le sol. Elles présentent l'avantage d'être naturellement filtrées, ce qui leur confère une bonne qualité microbiologique, et sont privilégiées comme source d'alimentation, à condition qu'elles soient à l'abri de la pollution. Toutefois, les eaux souterraines peuvent contenir des éléments dont les concentrations dépassent largement les normes de potabilité, en raison de la composition du terrain de stockage. Parmi ces éléments, on peut citer : le fer (**Fe**), le manganèse (**Mn**), le sulfure d'hydrogène (**H₂S**) et le fluor (**F**). Il est donc nécessaire de traiter les eaux souterraines avant leur distribution chaque fois que la concentration d'un ou de plusieurs de ces éléments dépasse les valeurs autorisées par la réglementation en vigueur.

- Les eaux de surface, quant à elles, sont une source facilement accessible mais vulnérable à la pollution. Elles sont mobilisées dans les rivières, les lacs ; les étangs, les barrages et sont les plus exposées aux pollutions, principalement liées aux activités humaines, comme les rejets domestiques et industriels, ainsi qu'aux activités agricoles. Leur qualité est souvent médiocre et nécessite des traitements complexes.

3.2. Les eaux potables

L'eau potable est une eau destinée à la consommation humaine sans danger pour la santé, et doit répondre à plusieurs critères de qualité :

-La qualité microbiologique de l'eau potable doit être confirmée par l'absence de microorganismes pathogènes.

-La qualité chimique de l'eau est confirmée par la recherche des substances chimiques toxiques à l'état de trace (μg par litre). Ces substances font l'objet de normes très sévères

-La qualité physique et gustative l'eau potable est confirmée par une eau limpide, claire, sans couleur, ni odeur, ni goût désagréable.

De plus, l'eau potable doit contenir sans excès certains éléments minéraux dont la présence lui confère une saveur agréable.

3.3. Traitement des eaux potables

Le traitement des eaux d'alimentation a pour objectif l'élimination des microorganismes et des substances chimiques. Le type de traitement appliqué est directement lié à leur qualité initiale et comprend plusieurs étapes (**figure 9**):

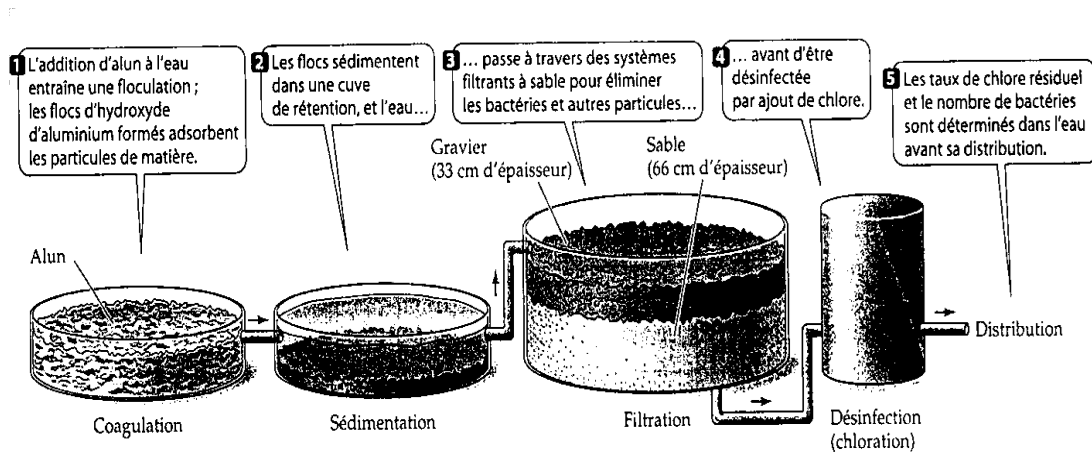


Figure 9. Représentation schématique du traitement de potabilisation de l'eau de surface.

Dégrillage et tamisage :

L'eau est d'abord filtrée à travers une grille afin de retenir les gros déchets solides, puis elle passe dans des tamis à mailles fines retenant des déchets plus petits.

Coagulation/floculation et décantation :

L'eau est dirigée dans des bassins, ou elle est mélangée à des agents chimiques coagulant tels que l'alun (sulfate d'aluminium) et la chaux provoquant l'agglomération des particules colloïdales en flocons en neutralisant leur charge électrostatique. Ces floccs sont ensuite éliminés par décantation dans des cuves de rétention. Ce processus permet d'éliminer les microorganismes, la matière organique, les contaminants toxiques et les particules fines en suspension, telles que l'argile qui pourrait rester en suspension indéfiniment. 90 % des matières en suspension (MES) sont ainsi éliminées.

Filtration :

Après décantation, l'eau est encore purifiée en passant à travers une unité de filtration. On utilise à cette fin des lits de sable fin et/ou un filtre à charbon actif. La filtration est un

processus qui permet de retenir physiquement les particules non encore décantées. 10% des matières en suspension sont éliminés par filtration.

-Filtre à sable : C'est le type de filtre le plus couramment utilisé dans le traitement des eaux destinées à la consommation (**figure 10**). On utilise des filtres à sable rapide (grain de sable de 1 mm) retenant les fines particules et les floccs. Ce procédé consiste à faire passer l'eau à travers une épaisse couche de sable (80 cm à 1,5 m), disposée sur un plancher poreux. Cette filtration élimine plus de 99% des bactéries restantes. Ce filtre est régulièrement nettoyé par l'envoi de l'eau et de l'air de bas en haut, ce qui permet de détacher les floccs des grains de sable et d'éviter ainsi les risques de colmatage.

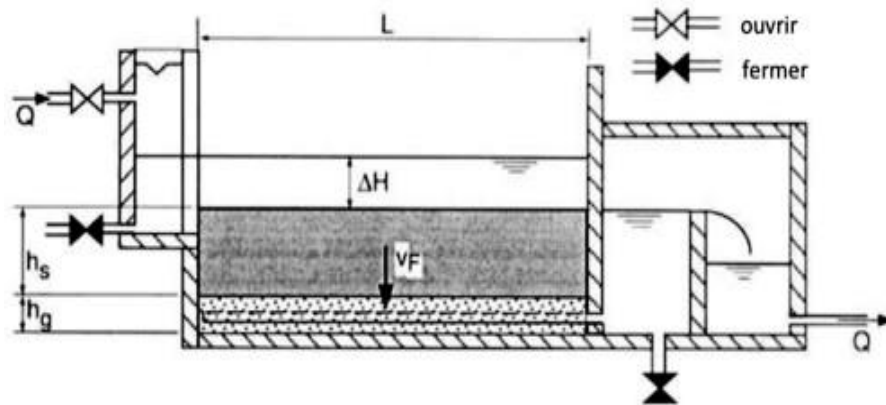


Figure 10. Filtration sur un lit de sable.

Q : débit d'eau à traiter ; V_F : volume filtré ; h_s : hauteur du lit de filtrant ; h_g : hauteur géométrique ; Q : débit d'eau épurée ; ΔH : perte de charge ; L : largeur du bassin.

Des filtres à sable lents permettent une élimination de kystes de *Girardia*. Ce traitement plus biologique que physique implique le passage lent de l'eau à travers un lit de sable. Les microorganismes d'origines aquatiques sont éliminés par adhésion à la couche microbienne de surface.

Filtre à charbon actif : présente une construction similaire à celle des filtres à sable (**figure 11**). Le charbon élimine non seulement les fines particules, mais aussi les polluants chimiques organiques dissous, tels que les pesticides et les métaux lourds, par adsorption (en fixant les micropolluants). Ce système de traitement permet également d'éliminer les virus avec un rendement élevé.



Figure 11. Filtration sur filtre à charbon actif.

La désinfection :

La désinfection a pour objectif de détruire les microorganismes pathogènes qui n'ont pas été éliminés par les étapes précédentes par l'utilisation d'un désinfectant. Cette étape comporte habituellement une chloration mais l'ozonation devient de plus en plus courante.

-La chloration

La désinfection par le chlore (Cl_2) est l'une des méthodes les plus couramment utilisées. Elle est très efficace contre les microorganismes pathogènes, faciles à appliquer et relativement bon marché. Cependant, le chlore n'est pas suffisamment puissant pour éliminer de manière fiable les virus et les kystes de *Giardia intestinalis*, ainsi que les oocystes de *Cryptosporidium*. On considère maintenant que *Giardia* est l'agent pathogène d'origine aquatique le plus fréquemment identifié.

L'efficacité de la désinfection au chlore dépend de plusieurs facteurs : la concentration en chlore, le temps de contact, la température, le pH, la teneur en matières organiques, ainsi que le nombre et le type de micro-organismes présents. Par exemple, dans une eau chlorée à 1 mg/l, *E. coli* est éliminé en moins d'une minute, tandis que *Giardia* nécessite environ 45 minutes. Lors de la chloration, la dose de chlore doit être suffisamment importante pour maintenir le chlore libre résiduel à une concentration comprise entre 0,2 et 2,0 mg/l.

Il convient de porter une vigilance particulière à la formation de sous-produits de désinfection, tels que trihalomethanes à 100µg/l (substances cancérigènes) et le chlorophénols (odeurs désagréables) qui se forment lorsque le chlore réagit avec la matière organique de l'eau.

-L'ozonation

L'ozone (O_3) est un désinfectant de 10 à 100 fois plus puissant que le chlore. Mélangé à l'eau,

l’ozone permet d’éliminer tous les types de microorganismes même les spores et les kystes de *Giardia intestinalis*, et de désactiver certains toxiques comme les pesticides. Il améliore également le goût de l’eau et permet d’éliminer d’éventuelles couleurs et odeurs indésirables de l’eau traitée. Cependant, en raison de sa grande instabilité chimique, il présente l’inconvénient de l’absence d’une activité résiduelle qui expose alors les eaux déjà traitées à une recontamination éventuelle dans les circuits de distribution.

3.4. L’analyse microbiologique de l’eau potable

L’analyse microbiologique de l’eau potable consiste à rechercher les microorganismes pathogènes qu’elle peut contenir, mais cette démarche est impossible à réaliser. Il est plus facile d’estimer la présence éventuelle de germes pathogènes en recherchant les bactéries d’origine fécale qui les accompagnent, appelées bactéries indicatrices de contamination fécale. Les indicateurs bactériologiques les plus couramment recherchés et intégrés aux protocoles de contrôle microbiologique des eaux potables sont :

- la flore totale aérobie mésophile (FTAM) ;
- les coliformes totaux, les coliformes fécaux, *E. coli*
- les streptocoques fécaux
- les entérocoques
- les *Clostridium sulfito-réducteurs*

Le tableau 3, représente les paramètres microbiologiques de qualité de l’eau de consommation humaine selon le Journal officiel N° 18 du 23 Mars 2011.

Tableau 3. Paramètres microbiologiques de la qualité de l’eau de consommation humaine.

Bactéries	Unités	Valeurs limites
<i>Escherichia coli</i>	Nb/100 mL	0
Entérocoques	Nb/100 mL	0
Sulfitoréductrices y compris les spores	Nb/20 mL	0

3.5. Les maladies d’origine hydrique

L’eau peut être la principale cause de mortalité et de maladies dans le monde. En Algérie, malgré les efforts déployés, les résultats demeurent insuffisants à ce jour. L’épidémie de choléra qui a frappé le pays en 1986 a causé la mort de 475 personnes, et en 2018 a causé la

mort de 2 personnes sur 161 cas hospitalisés. Parmi les infections à transmission hydrique présentes en Algérie, on peut citer : le choléra, la fièvre typhoïde, les dysenteries et la poliomyélite.

Le choléra

Chaque année, plus de 100 000 cas de choléra et 2 000 à 3 000 décès sont officiellement déclarés à l'OMS. Le choléra est une infection intestinale aiguë due à l'ingestion d'eau ou d'aliments contaminés par l'espèce *Vibrio cholerae*. La dose infectieuse, déterminée au cours d'expérimentations sur des volontaires, est relativement élevée, de l'ordre de 10^8 à 10^{11} bactéries, avec une durée d'incubation courte de quelques heures à cinq jours. La bactérie produit une entérotoxine qui provoque des vomissements et une diarrhée abondante, pouvant entraîner rapidement une déshydratation sévère et la mort du patient si un traitement approprié n'est pas administré rapidement.

-Fièvres typhoïde

La fièvre typhoïde est une infection potentiellement mortelle causée par *Salmonella typhi* qui est transmise lors de l'ingestion d'eau contaminées par des selles. Une eau propre et un bon assainissement permettent de prévenir la propagation de la typhoïde. Le taux de mortalité est de 10% en l'absence de traitement antibiotique efficace.

Conclusion

En étudiant la diversité, les interactions et les fonctions des microorganismes présents dans les milieux d'eau douce et d'eau salée, ceci permet de mieux appréhender leur influence sur la qualité de l'eau et la santé humaine. Ces connaissances sont fondamentales pour développer des stratégies performantes de traitement des eaux usées et brute, et de préservation des ressources aquatiques.

Chapitre 3. La microbiologie du sol

Introduction

Le sol se développe sur de longues périodes de temps grâce à des interactions complexes entre les matériaux de base (roche, sable et matériaux de sédiments glaciaires..), la topographie, le climat, et les organismes vivants. Cette communauté biologique complexe contribue à la formation, l'entretien, et à la dégradation des sols. En raison des changements dans la croissance des plantes, la température, les précipitations, la perturbation et l'érosion, un sol qui a pris des centaines d'années pour se former peut être rapidement dégradé si cette communauté microbienne est activée. Dans la plupart des sols les principaux producteurs de la matière organique sont les plantes vasculaires, bien que les algues, les cyanobactéries et les bactéries photosynthétiques puissent également contribuer à ces processus, en particulier dans les environnements désertiques

1. Spécificité de l'écosystème tellurique

1.1. Constituants du sol

Le sol est un environnement polyphasique et complexe composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse et, colonisé par des organismes vivants tels que les bactéries, les champignons, les algues, les protozoaires, les virus, les insectes et les nématodes. Il est traversé par des flux d'énergie et de matière, dont la régulation repose en grande partie sur les communautés vivantes qui le colonisent. C'est un milieu organisé et cette organisation, qui influe directement sur l'ensemble des propriétés du sol, dépend des interactions bio-organo-minérales.

Phase solide :

La phase solide est constituée de la matière minérale et organique. Généralement, un sol contient 45 à 50% de solides en volume.

-La fraction minérale représente l'ensemble des produits de la décomposition physico-chimique de la roche mère. On distingue les éléments grossiers de diamètre supérieur à 2 mm comme les cailloux et les graviers, et de la terre fine dont le diamètre varie de moins de 0,002 à 2 mm constitué de sables, de limons et d'argile. La proportion relative de ces particules définit la texture du sol ou composition granulométrie (sols argileux, limoneux et sableux).

La texture du sol apporte des informations utiles à la gestion de l'eau et de la fertilisation. Par exemple, un sol sableux draine beaucoup plus vite qu'un sol argileux. Les particules argileuses jouent un rôle important dans la mise en réserve de nombreux éléments nutritifs présents dans le sol (la silice, l'oxygène, l'aluminium, le Fe, le Mg, le K, le Ca et le Na), sur la taille des pores du sol et la capacité de rétention de l'eau. La fraction argileuse du sol exerce une influence majeure sur les microorganismes du sol en raison de ses surfaces importantes et des phénomènes d'absorption qui s'y produisent.

En outre, la matière minérale dans le sol fournit le support pour les racines et libère lentement des sels minéraux dans la solution du sol.

-La fraction organique du sol, quant à elle, est constituée de débris de plantes, d'animaux et de microorganismes morts ainsi que de l'humus, qui représente 50 à 60 % de la matière organique totale. L'humus constitue la partie stable de la matière organique, capable de persister plusieurs années dans le sol, particulièrement lorsqu'il est lié à la matrice minérale du sol (argile et limon).

La matière organique du sol joue un rôle crucial dans le maintien de la structure du sol et contribue à sa stabilité face aux agressions extérieures telles que les pluies, l'érosion et la compaction. Elle joue également un rôle environnemental majeur en retenant les micropolluants organiques et les pesticides. De plus, elle assure le stockage du carbone dans le sol, réduisant ainsi les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère et contribuant à limiter les émissions de gaz à effet de serre.

-Les particules élémentaires du sol ne sont généralement pas indépendantes, mais agrégées en unités structurales sous l'effet des liants organiques ou minéraux (polysaccharides et d'autres métabolites microbiens) (**figure 12**). En outre, cette structure est maintenue physiquement par les hyphes fongiques et les racines des plantes.

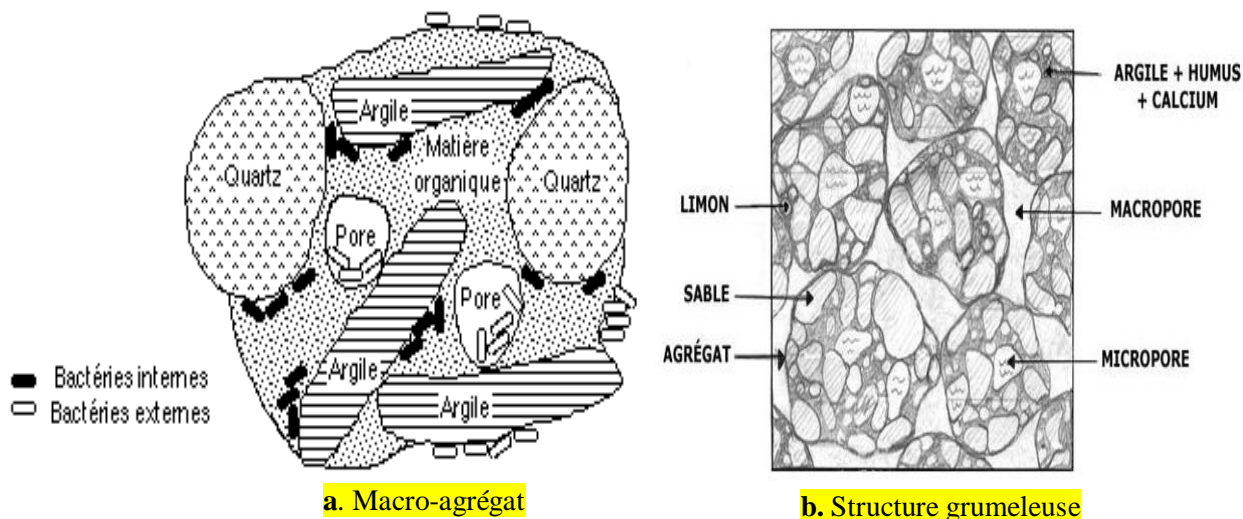


Figure 12. Représentation schématique d'un agrégat.

Phase liquide :

La phase liquide du sol n'est pas de l'eau pure mais une solution dont la composition est complexe et très variable. Elle est désignée par l'expression « **solution du sol** » et composée d'eau, de substances organiques et inorganiques. L'eau est retenue dans le sol en raison des forces capillaires agissant à l'intérieur de ses agrégats ou bien elle s'étend sous forme de films sur les particules solides. Les échanges ioniques entre l'eau et le substrat solide, en particulier les argiles constituent une des fonctions du sol les plus importantes pour la nutrition végétale.

Phase gazeuse

L'atmosphère du sol est l'air qui remplit les espaces libres entre les particules solides, qui ne sont pas remplis d'eau. La quantité d'air dans le sol varie généralement entre 8 et 35% du volume du sol. Les gaz les plus importants dans l'air du sol sont: N_2 , O_2 et CO_2 . L'air du sol contient 10 fois plus de CO_2 que l'air dans l'atmosphère, l' O_2 et N_2 sont en pourcentage plus faible par rapport à l'atmosphère.

Une des caractéristiques du sol est que les microorganismes sont en contact physique étroit avec l'oxygène, qui y est présent à des niveaux élevés. Lorsque ces microorganismes consomment de l'oxygène, celui-ci peut être rapidement réapprovisionné par diffusion, permettant ainsi aux microbes de maintenir des conditions aérobies, à l'exception des sols saturés en eau. Lorsque la concentration d'oxygène diminue en dessous de 1%, le

métabolisme aérobie ne peut plus avoir lieu, et un passage au métabolisme anaérobie se produit, impliquant des processus comme la réduction des sulfates et la dénitrification.

D'autres gaz (N_2O , CH_4 , H_2 , CO_2 ...) sont présents dans l'atmosphère du sol et peuvent servir de substrats ou d'inhibiteurs à l'activité des microorganismes. Par exemple, le N_2O peut être produit par des bactéries dénitrifiantes durant la réduction des nitrates en conditions anaérobies, mais à des concentrations élevées, il peut également inhiber des processus essentiels comme la nitrification.

Autres caractéristiques

La lumière du soleil

La lumière ne pénètre pas au-delà des quelques centimètres de la surface du sol. Les microorganismes phototrophes sont donc limités aux couches superficielles du sol. Cependant, certains microorganismes phototrophes, y compris les algues, ont la capacité de passer à un mode de nutrition hétérotrophe en l'absence de lumière, ce qui leur permet de se retrouver à des profondeurs importantes dans le sol.

pH du sol:

Les sols ont des valeurs de pH du sol comprises entre 6 et 8, et la plupart des organismes du sol ont un pH optimal dans cette plage. Des études récentes ont rapporté que le pH du sol semble être un déterminant majeur de la diversité bactérienne.

1.2. Profil du sol:

Le processus de formation du sol génère différentes couches horizontales ou horizon pédagogiques, caractéristiques d'un sol particulier (**figure 13**). Dans les sols, on distingue les principaux horizons:

Horizon O : il s'agit de la couche superficielle d'un sol, sombre et riche en matière organique. Elle est composée de la litière et de l'humus.

Horizon A : il s'agit d'une couche de couleur plus claire, composée d'humus et de morceaux de roches de différentes grosseurs.

Horizon B : cette couche est pauvre en humus. Elle est très riche en minéraux tels que l'oxyde de fer et les silicates et possède de gros morceaux de roches.

Horizon C : cette couche est composée de roche mère dont provient le sol, altérée et fragmentée par des facteurs physico-chimiques. Il peut être sableux argileux ou dur.

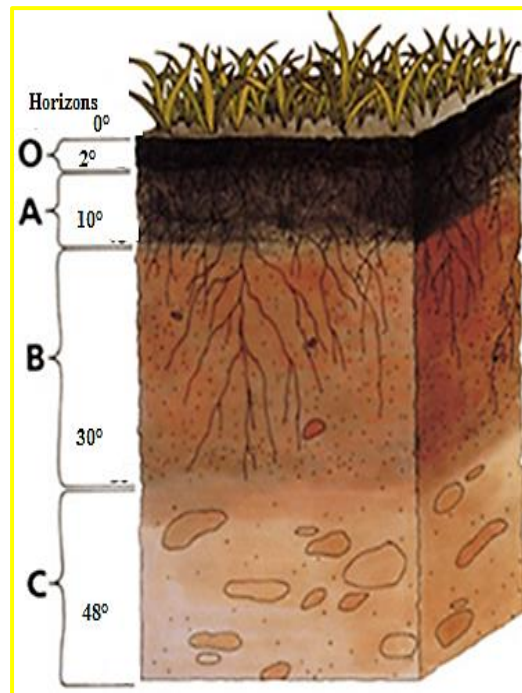


Figure 13. Représentation schématique des différentes couches d'un sol.

2. La microflore de sol: principaux groupements microbiens

Le sol est donc l'un des écosystèmes les plus complexes de la nature et l'un des habitats les plus divers sur terre. Un gramme de sol peut contenir jusqu'à environ 10^{10} bactéries, plus d'un km d'hyphes fongiques, 10^4 algues, 30 000 protozoaires et 50 à 100 nématodes et des virus.

La population microbienne est plus abondante à la surface du sol, généralement à une profondeur de 10 cm, et décroît rapidement avec la profondeur. Cette couche superficielle est riche en nutriments, tels que les feuilles, les débris végétaux et animaux. Le développement et l'activité des microorganismes sont influencés par plusieurs facteurs physicochimiques : la teneur en eau, la présence d'oxygène, la température et le pH.

2.1. Les bactéries:

Les bactéries sont les organismes les plus abondants dans le sol. Les populations bactériennes cultivables peuvent atteindre jusqu'à 10^8 par gramme de sol, tandis que les populations totales peuvent dépasser 10^{10} cellules par gramme. Parmi les bactéries cultivables dominantes dans le

sol, on trouve : *Arthrobacter* (jusqu'à 40 % des bactéries cultivables), les actinomycètes (5-20 %), *Pseudomonas* (10-20 %) et *Bacillus* (2-10 %).

Les bactéries aérobies sont plus abondantes que les anaérobies dans les sols non saturés. Les populations anaérobies tendent à croître avec la profondeur du sol, mais prédominent rarement, sauf lorsque les sols sont inondés.

La majorité des bactéries du sol se trouvent sur les surfaces des particules du sol et nécessitent de l'eau et des éléments nutritifs présents dans leur voisinage immédiat. Elles sont souvent localisées sur les surfaces intérieures des pores les plus fins du sol (2 à 6 µm de diamètre), où elles sont probablement moins exposées à la prédation par les protozoaires, contrairement à celles situées à la surface externe d'un grain de sable ou d'une particule de matière organique. Les bactéries qui sont principalement rencontrées dans le sol sont représentées par le tableau 4.

Tableau 4. Les principales bactéries rencontrées dans le sol.

Bactéries	Fonction
<i>Pseudomonas</i>	Cycle des nutriments et biodégradation, y compris la matière organique récalcitrante.
<i>Rhizobium</i>	Fixe l'azote en symbiose avec les légumineuses
<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	Phytopathogène, provoque la maladie de la Galle du collet
<i>Achromobacter</i> , et <i>Flavobacterium</i>	Produisent des pigments jaunes ou oranges
<i>Arthrobacter</i>	Organisme typique du sol (dégradation de la matière organique)
<i>Thiobacillus</i>	Oxydation du soufre (oxyde le S en SO_4^{2-})
<i>Nitrosomonas</i>	Nitrification (convertit NH_4^+ en NO_2^-)
<i>Nitrobacter</i>	Nitrification (convertit NO_2^- en NO_3^-)
<i>Clostridium</i>	Cycle de carbone (fermentation), production de toxine
<i>Bacillus</i>	Cycle de carbone, production d'insecticides et d'antibiotiques.
<i>Methylosinus</i>	Oxydants le méthane et qui peuvent co-métaboliser le trichloroéthène (cancérogène) en utilisant le méthane monoxygénase.
<i>Cytophaga</i>	Se nourrissent de composés organiques insolubles.

Les Actinomycètes représentent un composant important de la communauté bactérienne, en particulier dans des conditions de pH élevé et de température élevée. Elles jouent un rôle majeur en tant que décomposeurs primaires des matières végétales résistantes comme l'écorce, les feuilles et les tiges. Ils sont particulièrement efficaces dans la dégradation de certains polymères présents chez les insectes et les plantes, tels que la cellulose, la chitine et la lignine, qui constituent la principale matière apte à fournir l'humus. Elle produit de la géosmine,

responsable des odeurs caractéristiques des sols, principalement par le genre *Streptomyces*. Ces bactéries sont également reconnues pour leur capacité à produire des antibiotiques. Parmi les genres que l'on rencontre dans le sol, on trouve *Streptomyces*, *Nocardia*, *Actinomyces* et *Frankia*.

2.2. Les Archaea

Les études métagénomiques révèlent que les *Archaea* sont aussi abondante que les bactéries dans le sol et peuvent atteindre jusqu'à 10^8 . Les *Archaea* contribuent à de multiples processus du sol, y compris le cycle biogéochimique de C, N et S. en particulier la méthanogenèse. De nombreuses études ont révélé des populations d'*Archaea* oxydant l'ammoniac dans divers écosystèmes, principalement parmi les Crénarchéotes. Contrairement à la nitrification, la méthanogenèse est exclusivement due à l'activité des *Archaea* et revêt une importance cruciale pour le cycle global du carbone, puisque 40 % des émissions mondiales de méthane proviennent des sols et des zones humides associées.

2.2. Les champignons :

Les champignons varient habituellement entre 10^5 et 10^6 /g, et se développent fortement dans les sols acides. Il joue un rôle essentiel dans la dégradation de polymères complexes comme la lignine et la cellulose. Certains champignons sont également capables de décomposer diverses molécules polluantes. L'espèce la plus connu est le *Phanerochaete chrysosporium*, un champignon de la pourriture blanche. D'autres champignons, tels que *Fusarium* sp., *Pythium* sp. et *Rhizoctonia* sp., sont des phytopathogènes importants. Certains champignons forment des associations symbiotiques avec les plantes, appelées mycorhize (développement de *Pisolithus tinctoris* sur les racines de pin).

2.3. Les virus

Bien que leur présence soit avérée, les virus et leur écologie restent largement inexplorés. Les sols pourraient contenir jusqu'à 10^9 particules virales/g. Ils peuvent être d'une grande importance dans le sol car ils peuvent infecter plusieurs catégories d'organismes. De plus, les virus jouent un rôle important dans les processus de transfert génétique horizontal.

2.4. Les algues :

Les populations d'algues sont plus élevées dans les 10 cm de la surface de sol où elles peuvent varier de 5000 à 10 000 /g.

Les algues sont souvent les premières à coloniser les surfaces des sols qui sont dépourvues de matière organique et participe au processus de formation du sol :

- fournissent un apport de carbone organique,
- libèrent de l'acide carbonique (H_2CO_3),
- produisent une grande quantité de polysaccharides extracellulaires, contribuant également à la formation du sol.

La population d'algue est fortement influencée par l'humidité et le pH. Les *Chlorophyceae* et les *Cyanophyceae* montrent une plus grande résistance à la sécheresse comparativement aux diatomées. De plus, chaque espèce d'algue a un pH spécifique qui optimise sa croissance. Les *Cyanophyceae* se développent principalement dans les sols neutres ou alcalins, étant absentes des sols dont le pH est inférieur à 5, et quelques espèces seulement sont présentes dans les sols dont le pH varie entre 5 et 6. Les diatomées sont abondent dans les sols calcaires. Les *Chlorophyceae*, moins limitées par le pH, dominant la flore algale des milieux acides, où leur présence est favorisée par l'absence d'autres formes algales.

2.5. Les protozoaires

Le nombre de protozoaires varie de 30 000 à 350 000 par gramme de sol. Les protozoaires sont hétérotrophes et survivent en consommant des bactéries, des levures, des champignons et des algues. Ils sont généralement concentrés près des surfaces des racines qui ont une forte densité de bactéries et d'autres proies.

3. Interaction avec la faune, le milieu et les végétaux

Les microorganismes interagissent avec le milieu et avec d'autres organismes au niveau du sol.

3.1. Interactions des microorganismes avec la faune :

Il existe de nombreuses relations qui peuvent être symbiotiques mutuelles et même pathogènes entre les microorganismes et la faune.

Une symbiose mutualiste fascinante s'établit entre *Buchnera* et les aphides (puceron). *Buchnera* est une bactérie endosymbiote qui vit à l'intérieur des cellules de l'insecte et lui fournit des acides aminés essentiels (tryptophane, leucine) (**figure 14**). Afin d'augmenter sa production en acide aminé, chaque cellule bactérienne produit entre 50 et 200 copies de son chromosomes.

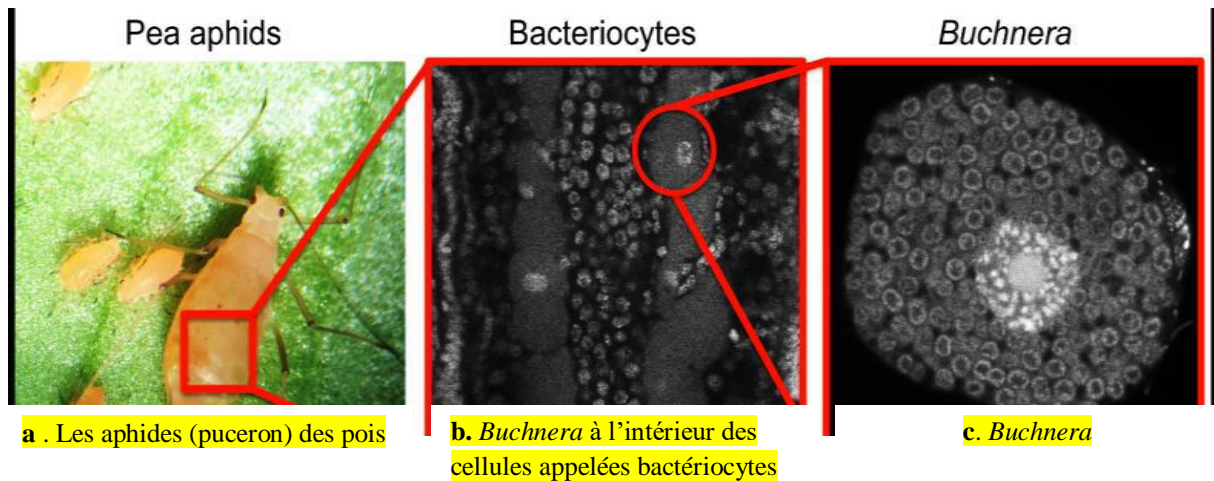


Figure 14. Symbiose mutualiste entre *Buchnera* et les aphides.

La bactérie *Wolbachia* est hébergée dans des organes génitaux de certains insectes (les moustiques). Cette bactérie peut induire le contrôle de la reproduction de son hôte. Un phénomène où les mâles infectés ne peuvent pas se reproduire avec des femelles non infectées. Ce mécanisme est parfois utilisé dans des stratégies de lutte contre les maladies transmises par les moustiques, comme la dengue ou le chikungunya, car en infectant les moustiques avec *Wolbachia*, il est possible de réduire leur capacité à transmettre ces virus.

Les termites peuvent être colonisés par des bactéries fixatrices d'azote, les spirochètes. La symbiose microbienne apporte donc aussi bien des sources d'azotes et de carbone aux termites.

D'autres bactéries, présentes dans le rumen des herbivores, permettent la digestion de la cellulose chez ces animaux. Chez l'homme, les bactéries de la flore intestinale participent non seulement à la digestion des aliments, mais elles produisent également des vitamines, telles que la vitamine K et la biotine.

Certaines bactéries colonisent le jabot du Hoazin (*Opisthocomus hoazin*), un oiseau folivore. Ces bactéries permettent la digestion de la cellulose des feuilles, de manière comparable à la digestion qui se produit dans le rumen des ruminants.

Des bactéries bioluminescentes, comme *Photobacterium*, sont fréquemment associées à des poissons ou des invertébrés marins. Elles résident dans des organes spécifiques de leurs hôtes et produisent de la lumière grâce à une protéine appelée luciférase. Cette bioluminescence est

utilisée par les animaux dans divers comportements, tels que la reproduction, l'attraction des proies ou la défense contre les prédateurs.

Les vers tubicoles *Riftia pachyptila* et les crevettes *Rimicaris exoculata*, qui se développent près des cheminées hydrothermales des fonds océaniques, vivent en symbiose avec des bactéries chimiolithotrophes.

3.2. Interaction des microorganismes avec le milieu

Les microorganismes agissent à divers niveaux sur leur milieu.

Les microorganismes jouent un rôle essentiel dans les cycles biogéochimiques des éléments nutritifs (cycle de carbone, d'azote et du soufre et d'autres éléments). Ils participent aussi à un processus appelé humification, qui mène à la formation de l'humus, un composé complexe et majeur du cycle de la matière organique tellurique et de la fertilité du sol.

Les microorganismes contribuent à l'amélioration de la structure du sol par la formation d'agrégats stables, qui augmente l'infiltration et protège le sol contre l'érosion. Les champignons appartenant aux genres *Cladosporium*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Fusarium*, *Mucor* et *Sclerotium* ont l'effet le plus prononcé dans le processus d'agrégation et de stabilisation des agrégats. En effet, de nombreux champignons secrètent des substances à fort pouvoir collant, comme des polysaccharides et des gommes, qui favorisent l'agrégation. Les mycéliums des champignons renforcent également la structure du sol par enchevêtrement mécanique des particules minérales entre les hyphes et en offrant une résistance mécanique des filaments fongiques face aux contraintes physiques.

Les microorganismes, en particulier les champignons et certains types de bactéries, contribuent à améliorer la capacité de rétention d'eau dans le sol, ce qui est important dans des conditions de sécheresse. En effet, ils forment des structures qui favorisent l'augmentation de la porosité du sol.

Les microorganismes contribuent à la décontamination des sols pollués par la biodégradation des polluants tels que les hydrocarbures, les métaux lourds et les xénobiotiques.

Enfin, certains microorganismes sont également capables de modifier le pH du sol, ce qui influence la solubilité de certains éléments nutritifs. Plusieurs recherches ont associé l'acidification (diminution du pH) à l'activité solubilisante du phosphate. Selon les travaux de

Lin et al. (2006), la modification du pH, ainsi que le potentiel de réduction, seraient à l'origine de la dissolution du Tricalcium phosphate (TCP) dans l'environnement.

3.3. Interaction entre les microorganismes et les plantes

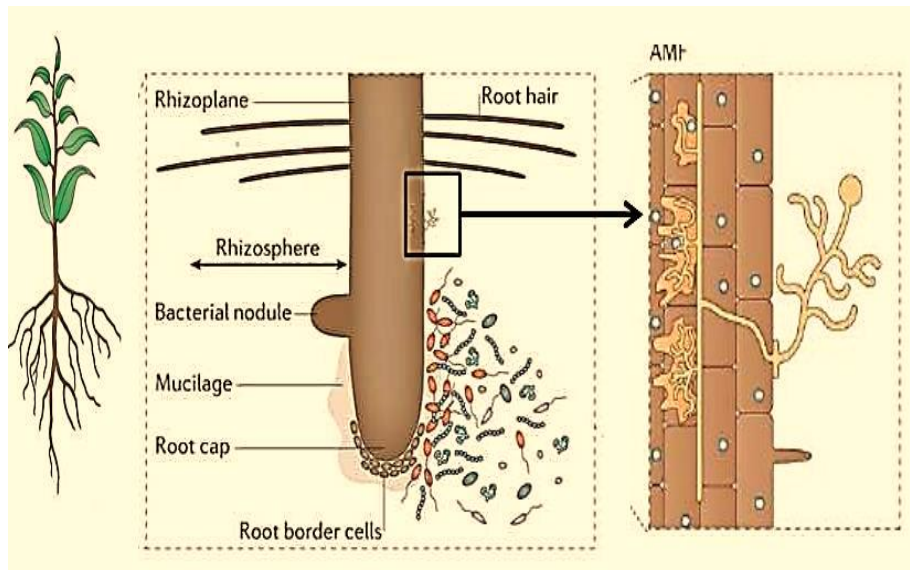
Les plantes constituent la principale source de matière organique dont la majorité des microorganismes du sol dépendent. En outre, les plantes sont fortement colonisées par des microorganismes, dont beaucoup ont établi des relations étroites avec les végétaux, qu'elles soient de type commensal, mutualiste ou pathogène.

Différents types de microorganismes sont associés aux feuilles, tiges, fleurs, graines et aux racines. La communauté microbienne influence directement ou indirectement les plantes. Elle comprend des microorganismes qui se développent à la surface des plantes (épiphytes) ainsi qu'à l'intérieur des cellules végétales (endophytes). On distingue les microorganismes de la phyllosphère et les microorganismes de la rhizosphère et du rhizoplan (**figure 15**).

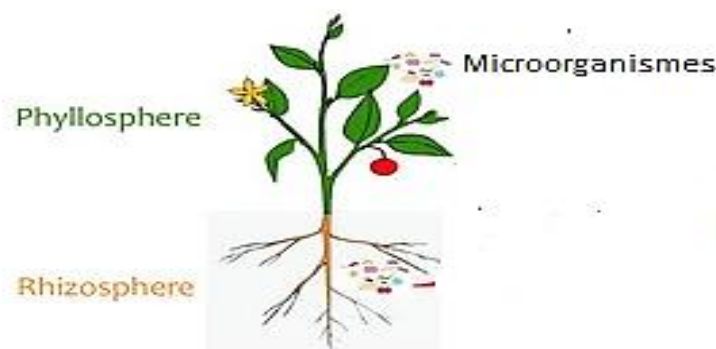
Les microorganismes de la phyllosphère se trouvent sur les surfaces et dans les parties aériennes des plantes (tiges et feuilles..). Les feuilles et les tiges libèrent des composés organiques, et cela peut conduire à un développement massif de microorganismes, incluant les *Sphingomonas*. Ces bactéries sont capables de survivre à des niveaux élevés de rayonnement UV en produisant des pigments qui agissent comme un écran solaire. Couramment présentes dans les sols et les eaux, les *Sphingomonas* peuvent atteindre des concentrations de 10^8 cellules par gramme de tissu végétal. Elles représentent souvent la majorité des espèces cultivables. Les microorganismes de la phyllosphère jouent un rôle important dans la protection mais peuvent éventuellement nuire à la plante.

La rhizosphère est représentée par le volume de sol autour de la racine, elle s'étend de quelques micromètres à plus de 2 mm en dehors de la surface racinaire. Dans la rhizosphère jusqu'à 30% des composés photosynthétisés par la plante sont remis à la disposition des microorganismes qui y vivent par le biais d'un phénomène appelé exsudation racinaire (rhizodépôts). Ces exsudats racinaires incluent une grande quantité d'acides aminés organiques, de sucre, d'alcool et des nucléotides ainsi que des composés organiques complexes. Ceci permet de créer des environnements uniques pour les microorganismes du sol. La surface de la racine de la plante est appelée rhizoplan fournit également un environnement exceptionnel pour les microorganismes. Un large éventail de microorganismes

du rhizoplan et de la rhizosphère peut promouvoir la croissance des plantes en communiquant avec elles au moyen de signaux chimiques.



a . La rhizosphère



b. La phyllosphère

Figure 15. Représentation de la phyllosphère et de la rhizosphère.

Les bactéries colonisant les racines qui exercent des effets bénéfiques sur le développement des plantes par des mécanismes directs ou indirects sont définies comme des rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (**PGPR**) (Plant Growth Promoting *Rhizobacteria*). Elles appartiennent à plusieurs genres incluant *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* et *Gluconacetobacter*,... Actuellement, ces bactéries sont utilisées dans l'agriculture moderne comme des biofertilisants afin d'améliorer le rendement de différentes cultures.

3.3.1. Interaction entre les microorganismes non symbiotiques et les plantes

L'activité des microorganismes est importante dans la rhizosphère et agit sur la nutrition de la plante et sur son environnement.

- De nombreuses bactéries, vivant à l'état libre dans le sol, permettent la fixation de l'azote atmosphérique pour le rendre disponible pour la plante. Parmi les bactéries diazotrophes libres on peut citer les cyanobactéries (*Anabaena* sp.), *Rhodobacter* sp. et *Azotobacter* sp. Ces cellules bactériennes libres fixent de petites quantités d'azote comprises entre 1 à 2 kg N/hectare/an.

-Les bactéries jouent un rôle important dans la solubilisation des éléments minéraux tels que le phosphate et le potassium. En effet, les bactéries solubilisatrices des potassiums (KSB) telles qu'*Acidithiobacillus*, *Pseudomonas* et *Burkholderia* jouent un rôle clé dans le cycle naturel du potassium (k). Elles permettent de convertir le potassium minéral insoluble et inaccessible en une forme disponible pour l'absorption par les plantes (**figure 16**). La solubilisation du potassium se réalise grâce à la libération d'acides organiques, tels que l'acide oxalique et l'acide citrique, qui forment des complexes avec des ions métalliques (Ca^{2+} , Al^{3+} et Fe^{3+}), stimulant ainsi la solubilisation du potassium.

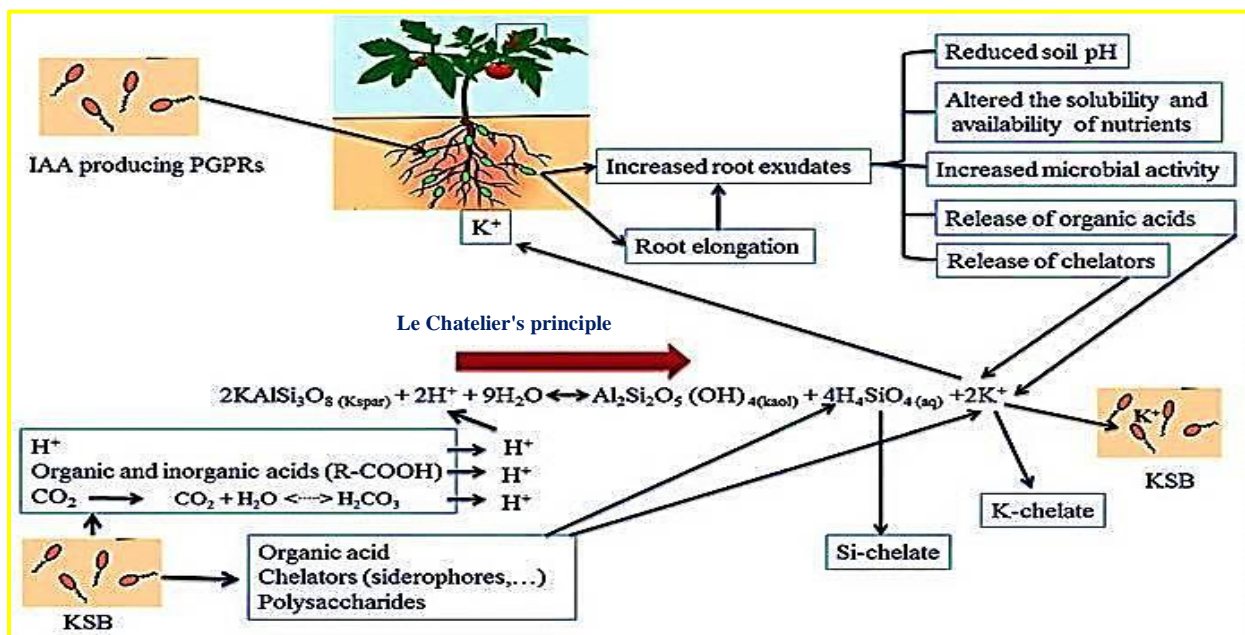


Figure 16. Représentation schématique de différents mécanismes de solubilisation de potassium.

Les bactéries solubilisant le phosphate ou les PSB (Phosphate Solubilizing Bacteria) permettent sa disponibilité pour les plantes sous formes H_2PO_4 et de HPO_4^{2-} (**figure 17**). La solubilisation du phosphate se fait par la libération des acides organiques qui mobilisent le phosphore grâce aux interactions ioniques avec les cations du sel de phosphate conduisant à l'acidification des cellules microbiennes et de leur environnement, cette diminution de pH entraîne la dissociation des liaisons dans les composés phosphorés insolubles ce qui rend le phosphate soluble. Ou bien encore, par la production d'enzymes, tels que des phosphatases non spécifiques (aussi appelés phosphohydrolase), des phytases, des phosphonatasés et des C-P lyases, qui permettent la solubilisation de phosphate organique. La solubilisation des phosphates insolubles a été observée chez *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Azotobacter*, *Erwinia*, *Agrobacterium* et *Serratia*.

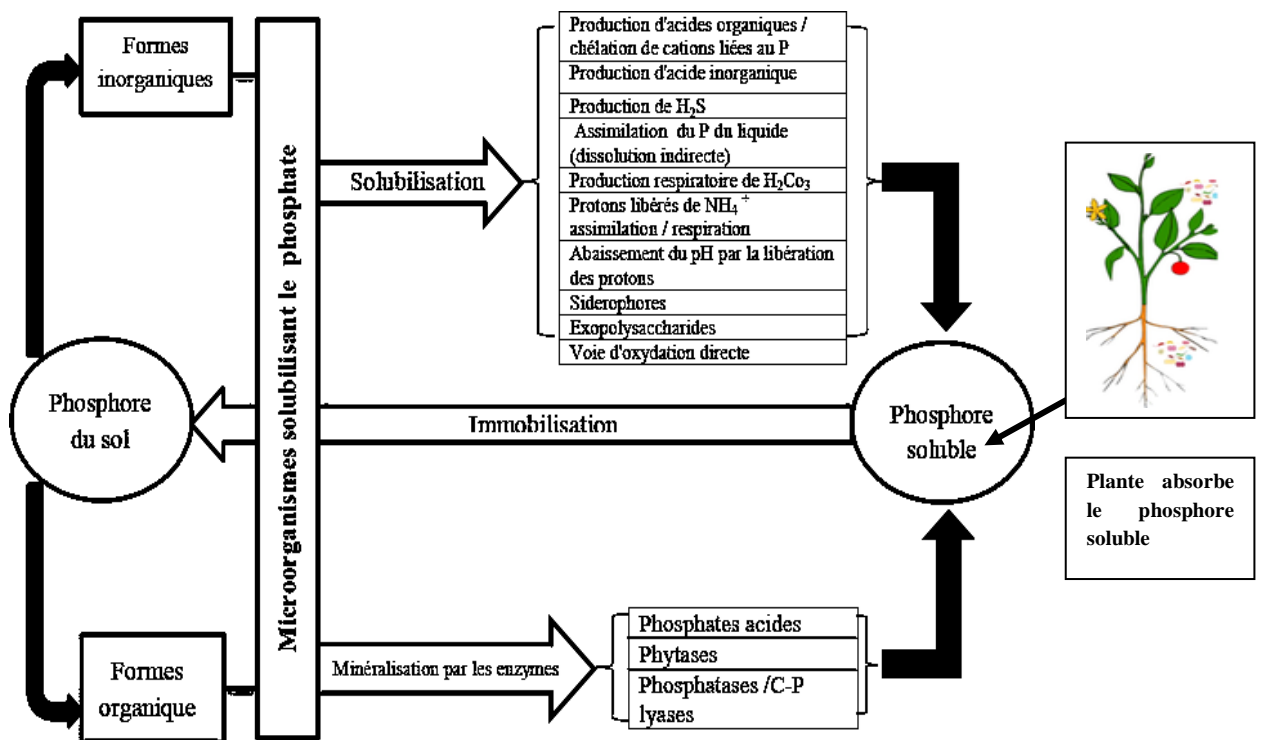


Figure 17. Représentation schématique des mécanismes de solubilisation et de minéralisation du phosphate par les microorganismes du sol.

- Les bactéries PGPR produisent des sidérophores, composés organiques de faible poids moléculaire (400-1000 Daltons) et contenant des groupements fonctionnels capable de capter le fer en le rendant assimilable pour les plantes. De plus, les sidérophores peuvent accroître la

disponibilité de phosphore pour les plantes en chélatant des cations tels que Ca^{2+} , Al^{3+} et Fe^{3+} , ce qui entraîne la formation de précipités avec le phosphore, ou par échange de ligands. Les bactéries productrices de sidérophores appartiennent aux genres *Bradyrhizobium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* et *Streptomyces*.

- Les bactéries trouvées dans la rhizosphère, stimulent la croissance de la plante par la production de phytohormones. Ces hormones végétales sont de petites molécules de signal produites à très faible concentration, et leur synthèse est soigneusement régulée. Elles sont chimiquement analogues aux hormones produites naturellement par les plantes. Elles influencent les processus biochimiques, physiologiques et morphologiques des plantes, et jouent également un rôle crucial dans leur réponse aux stress biotiques et abiotiques. Les principales phytohormones produites par les rhizobactéries sont : les auxines (AIA) par *Acinetobacter*, Cytokinine par *Azotobacter*, l'éthylène par *Serratia*, les gibbérellines par *Pseudomonas* et l'acide abscisique (ABA) par *Phyllobacterium brassicacearum* strain STM196.

-Les bactéries jouent un rôle protecteur contre les agents phytopathogènes soit par la synthèse des substances de nature diverse aux propriétés antifongiques et antibiotiques (les lipopeptides cycliques, le cyanure d'hydrogène HCN et zwittermycin), ou bien en entrant en compétition avec les microorganismes pathogènes. En effet, une rhizobactérie à croissance rapide pourrait éliminer les pathogènes fongiques par la compétition pour le carbone et les autres sources d'énergie. Parmi les bactéries capables d'exercer ce genre de mécanisme : *Pseudomonas putida*, *Bacillus pumilus* et *Serratia marcescens*.

3.3.2. Les interactions symbiotiques entre microorganismes et plantes

Dans les interactions plante-microorganismes, deux systèmes symbiotiques sont les plus importants, il s'agit de la symbiose mycorhizienne et de la symbiose fixatrice d'azote.

La symbiose mycorhizienne

C'est une relation mutualiste qui se développe entre les racines d'une plante et un champignon. Les mycorhizes sont si abondantes qu'un gramme de sol peut contenir jusqu'à 100 m de filament mycorhiziens. Ils existent différents types de mycorhizes, en fonction de la morphologie de l'interaction, caractérisés par une interaction superficielle (ectomycorhize) ou interne (endomycorhize) ou les deux à la fois (ectoendomycorhize) (**figure 18**).

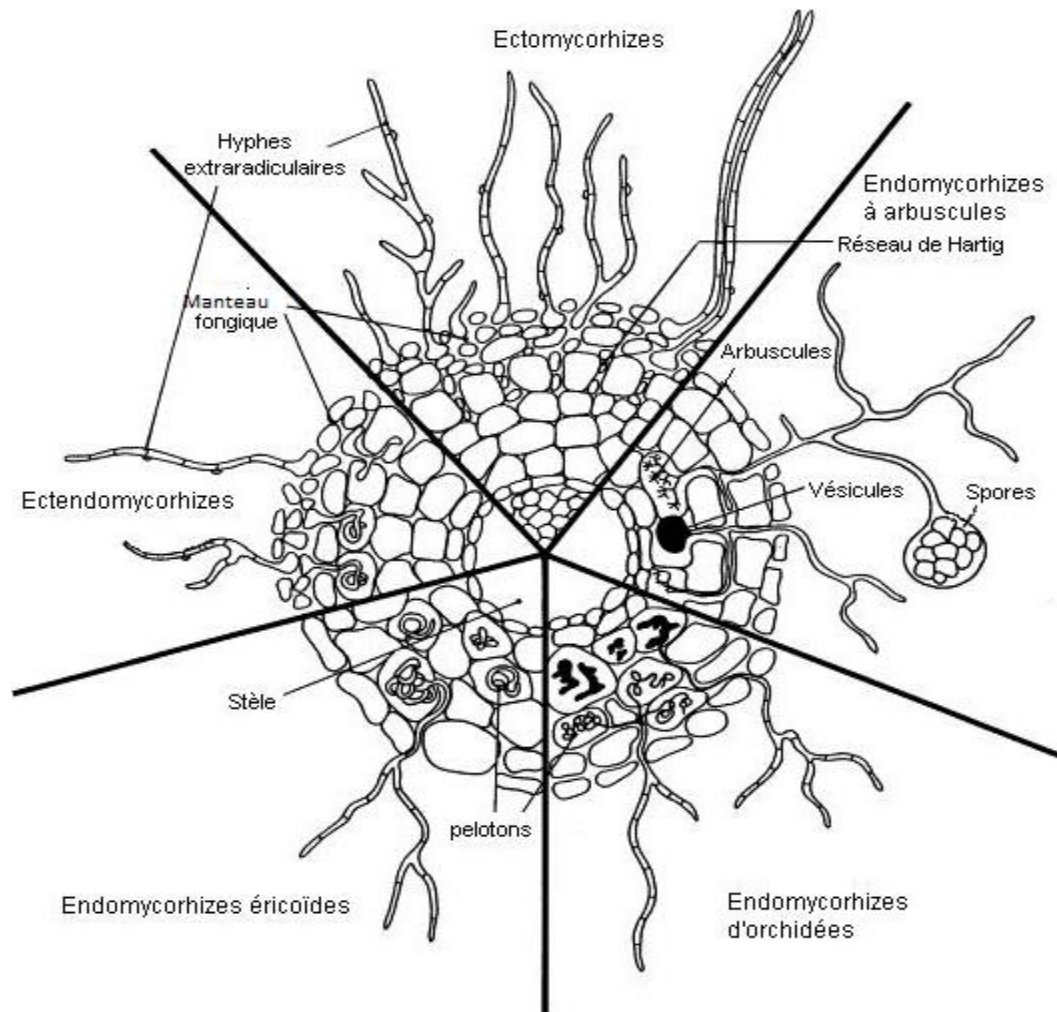
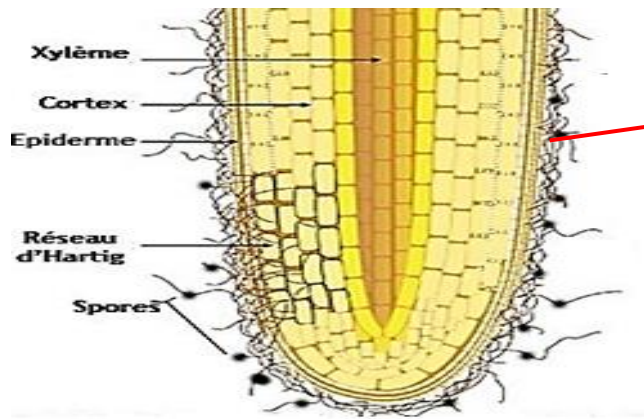
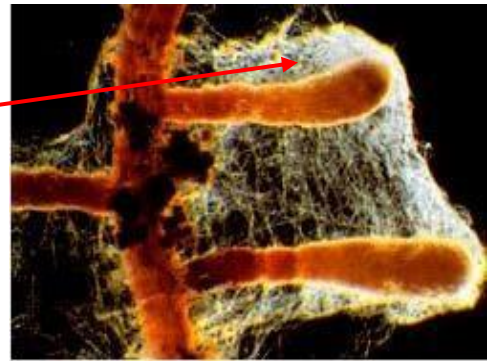


Figure 18. Coupes transversales de racines illustrant différentes interactions mycorhiziennes.

-Les **ectomycorhizes** est la forme fréquente chez les plantes ligneuses et les arbustes et implique une très grande variété de champignons des Basidiomycètes et Ascomycètes. Au cours de l'interaction, le partenaire fongique reste à l'extérieure des cellules végétales formant une gaine ou un manteau autour des racines. À partir de ce manteau, plusieurs hyphes s'insinuent entre les cellules de la partie externe du cortex ou l'écorce racinaire, formant ainsi un réseau mycélien intercellulaire appelé le réseau de Hartig. Ce dernier ne pénètre jamais à l'intérieur des cellules (**figure 19**).



a. Coupe longitudinale d'une Ectomycorhize

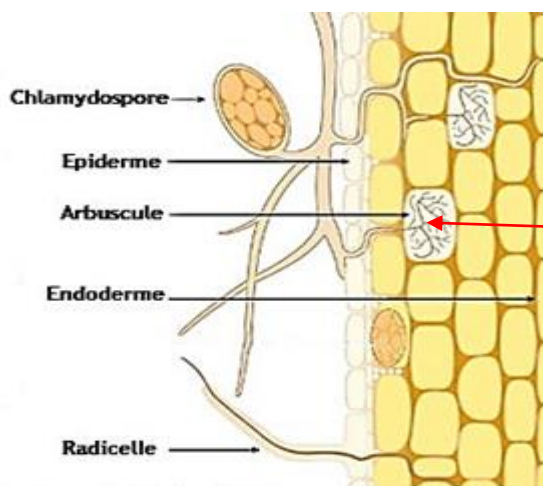


b. Une ectomycorhize sur la racine d'une plante

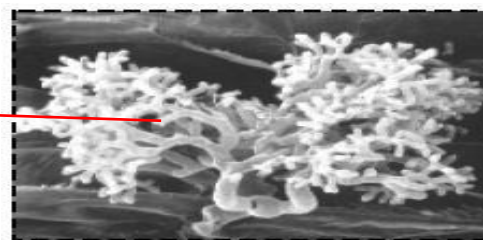
Figure 19. La symbiose Ectomycorhizienne.

- Les **endomycorhize** sont caractérisés par la présence des structures fongiques dans les cellules de la racine de la plante hôte. En fonction de la morphologie de l'appareil fongique intracellulaire, on différencie plusieurs types d'endomycorhizes.

- Les mycorhizes à vésiculo-arbusculaires est la forme la plus dominante (90%) des plantes vasculaires notamment les genres *Glomus* et *Gigaspora* dans le phylum *Glomeromycota*. Elles sont caractérisées par la présence de structure de réserve les vésicules et des structures ramifiées les arbuscules (**figure 20**).



a. Endomycorhize



b. Arbuscule

Figure 20. La symbiose mycorhizienne à vésiculo-arbusculaires.

- Les mycorhizes des Ericacées et des Orchidées, l'hyphe du champignon (Ascomycète ou Basidiomycète) forme un peloton à l'intérieur d'une cellule (**figure 21**).

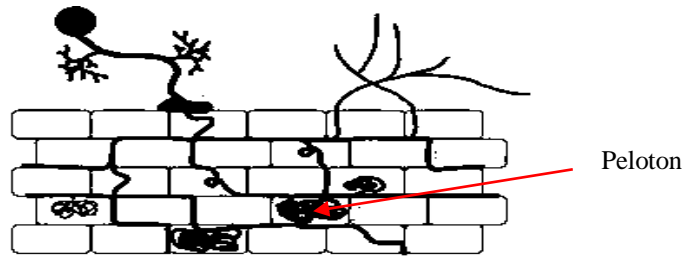


Figure 21. La symbiose mycorhizienne des Ericoïdes.

Dans les deux cas, pelotons ou vésiculo-arbusculaires, ces structures intracellulaires sont le site des échanges de nutriments entre les deux partenaires.

-L'ecto-endomycorhize est une forme qui présente à la fois des structures propres aux ectomycorhizes (manteau fongique) et d'autres similaires à celles des endomycorhizes de type Ericoïdes et Orchidoïdes, telles que la pénétration intracellulaire et formation de pelotons d'hyphes cloisonnés. Seuls les champignons d'*Ascomycota* du genre *Wilcoxina* qui sont impliqués.

Les champignons mycorhiziens exploitent des hydrates de carbone provenant de la photosynthèse de leur hôte. En retour, les plantes bénéficient d'une amélioration de l'absorption des nutriments, grâce à l'élargissement de la zone d'absorption de la rhizosphère, ce qui leur permet d'absorber et de transporter plus efficacement des éléments tels que les phosphates et l'azote. Certains champignons mycorhiziens peuvent également sécréter des composés dans la rhizosphère qui agissent comme des antagonistes envers les microorganismes phytopathogènes du sol.

Les symbioses fixatrices d'azote

L'azote est un nutriment essentiel et limitant pour le développement des plantes, alors que l'atmosphère terrestre est composée de 78% de N₂. Ce paradoxe est dû au fait que même si l'azote gazeux diffuse dans le sol, les plantes ne sont pas capables de l'assimiler sous cette forme. Certaines plantes peuvent s'associer en symbiose avec des microorganismes diazotrophes qui sont capables de fixer l'azote atmosphérique, notamment grâce à la nitrogénase, un complexe enzymatique qui catalyse la réduction de l'azote atmosphérique en ions ammonium (NH₄⁺) forme assimilables par la plante. La symbiose avec les bactéries donne naissance à un nouvel organe au niveau des racines ou des tiges, le nodule fixateur

d'azote. À l'intérieur des nodules, les bactéries, protégées et nourries par la plante, lui fournissent de l'azote fixé en échange.

Chaque année, ces associations symbiotiques contribuent à la réduction de 120 millions de tonnes d'azote atmosphérique en ammonium. Plusieurs symbioses fixatrices d'azote existent et sont classées en fonction des microorganismes impliqués : *Rhizobium*, les Actinomycètes et les Cyanobactéries.

La symbiose rhizobienne est une interaction symbiotique entre les plantes légumineuses (ou Fabaceae) tels que le soja, l'haricot, les pois et l'arachide, et un groupe de bactéries dites les rhizobia (**figure 22**).



Figure 22. Nodules sur racines de *Medicago* sp.

Les actinorhizes ou des relations actinorhiziennes, se produisent également (**figure 23**). Celles-ci sont formées par l'association des bactéries actinomycète du genre *Frankia* avec huit familles de plantes non légumineuses (Betulaceae, Casuarinaceae, Coriariaceae, Datisceae, Elaeagnaceae, Myricaceae, Rhamnaceae et Rosaceae). Elles fixent l'azote au niveau des racines et sont importantes, en particulier pour les arbres et les arbustes. Les membres du genre *Frankia* sont à croissance lente.



Figure 23. Des nodules actinorhiziens induits par *Frankia* dans *Ceanothus*.

Dans la symbiose cyanobactéries-plantes, les cyanobactéries ne se limitent pas aux racines, mais peuvent aussi infecter le thalle, les tiges et les feuilles. Le bénéfice des cyanobactéries dans cette symbiose est moins évident, car elles sont capables de fixer le carbone par elles-mêmes. Toutefois, elles semblent bénéficier d'une protection contre la prédation et des conditions environnementales extrêmes. La fixation de l'azote se produit dans des cellules spécialisées, appelées hétérocystes.

4. La fixation de l'azote : symbiose légumineuses-*Rhizobium*

La fixation de l'azote par la symbiose *Rhizobium*-légumineuse représente de 50% à 70% de la fixation biologique mondiale de l'azote. Elle présente un intérêt agronomique majeur. La symbiose permet l'enrichissement naturel du sol en azote et réduit le besoin d'apports d'engrais. L'azote fixé par la symbiose est restitué au sol après la décomposition de la matière végétale (racines, nodules, parties aériennes) ou par les déjections des animaux ayant pâture.

La symbiose légumineuses-*Rhizobium* est une symbiose morphologiquement et fonctionnellement spécialisée composée de deux partenaires : le macro symbiote désigné par les légumineuses et le micro symbiote représenté par le *Rhizobium*. En plus du genre *Rhizobium*, plusieurs genres ont été décrits, à savoir *Allorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium* et *Sinorhizobium*. Récemment, des bactéries du genre *Methylobacterium* ont été rapportées dans la formation de nodules chez les légumineuses.

L'établissement de la symbiose entre *Rhizobium* et les légumineuses est un phénomène complexe impliquant de nombreux gènes, signaux physiologiques et processus de différenciation cellulaire synchronisés dont la chronologie est essentielle à la formation du nodule. Le processus de formation du nodule peut être résumé en trois étapes.

-Mécanismes de reconnaissance entre les deux partenaires

L'échange de signaux moléculaires marque le début de l'interaction symbiotique entre les légumineuses et les bactéries. Dans des conditions limitantes en azote, la plante exsude dans le milieu des flavonoïdes qui activent la transcription des gènes Nod chez les bactéries. Le produit du gène NodD, synthétisé de manière constitutive, joue un rôle important dans la reconnaissance de ce signal et dans l'activation de la transcription des autres gènes Nod. La transcription des autres gènes Nod entraîne la production des facteurs Nod, des molécules bactériennes reconnues à leur tour par la plante.

Le type de facteur Nod produit, ainsi que sa quantité, déterminent la reconnaissance spécifique de chaque bactérie par son partenaire végétal. Les facteurs Nod, sont directement responsables de la courbure des poils absorbants racinaires, la formation du cordon d'infection et de l'induction d'un méristème, de la formation des nodules chez la plante (figure 24).

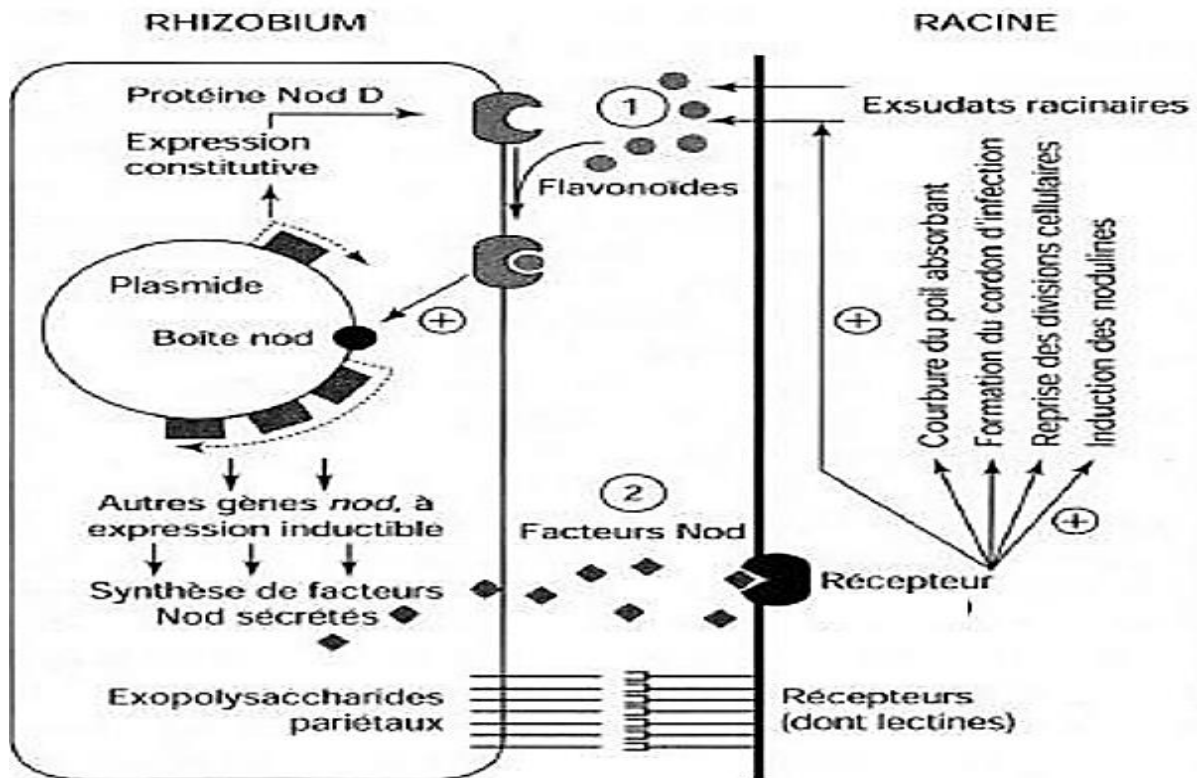


Figure 24. Dialogue moléculaire entre *Rhizobium* et la plante pour l'établissement de la symbiose.

Les facteurs Nod, isolés de différentes espèces de *Rhizobium*, partagent tous une structure de base similaire: ce sont des lipo-chito-oligosaccharides constitués d'un squelette d'oligochitine de 3 à 5 résidus de N-acétyl-glucosamine. La nature de l'acide gras et des substituants chimiques présents sur le squelette d'oligochitine sont caractéristiques d'une espèce bactérienne donnée et déterminent la spécificité d'interaction entre la bactérie et sa plante hôte (figure 25).

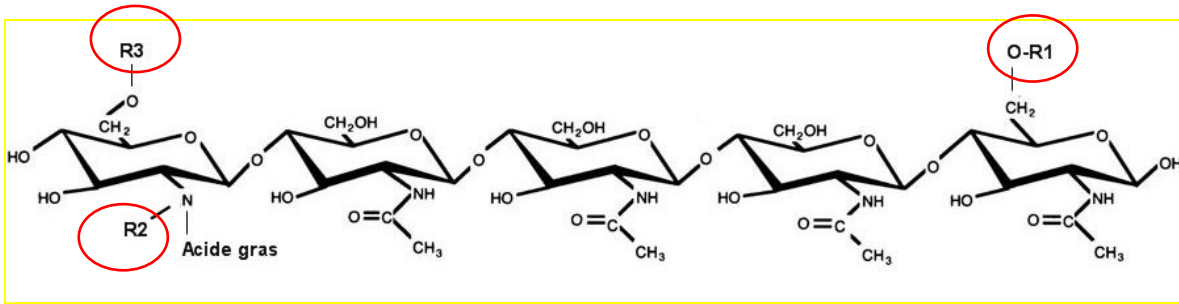


Figure 25. Structure des facteurs Nod.

-Attachement aux racines et infection

Le mécanisme le plus courant d'infection des légumineuses par *Rhizobium* est l'infection intracellulaire. Une fois qu'une bactérie est reconnue comme compétente, elle peut s'attacher spécifiquement aux poils absorbants de la racine de la plante hôte. L'adhésion des bactéries aux poils absorbants se fait grâce aux structures extracellulaires bactériennes (exopolysaccharides et lipopolysaccharide...), et aux lectines présentes sur les racines (**figure 26**).

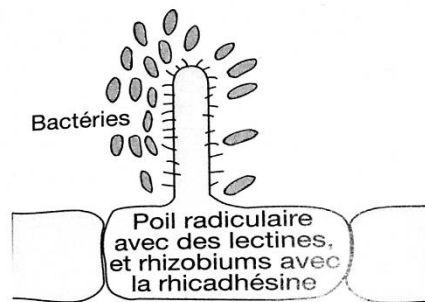


Figure 26. Fixation de *Rhizobium* aux poils absorbants de la racine.

Le poil absorbant subit alors, une déformation caractéristique dite en **croûte de berger**, piégeant ainsi les bactéries (**figure 27**).

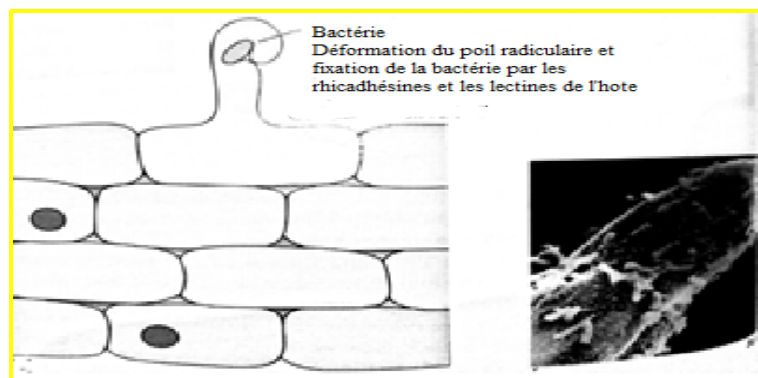


Figure 27. Déformation du poil absorbant en croûte de berger.

La membrane du poil absorbant va s'invaginer et former un tube appelé **cordon d'infection** qui contient les bactéries et progresse de cellule en cellule en direction des cellules du cortex racinaire (**figure 28**).

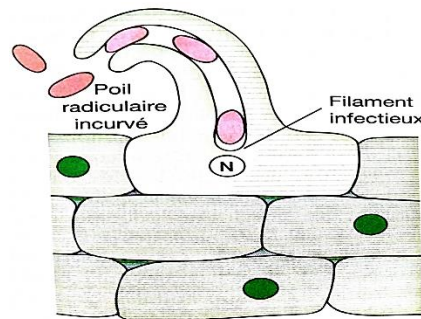


Figure 28. Initiation de la pénétration bactérienne et formation du cordon d'infection.

Pénétration des bactéries et formation du nodule

La pénétration des bactéries s'accompagne de divisions cellulaires au niveau du cortex racinaire. Ces divisions conduisent à la formation d'un méristème à l'origine d'un primordium nodulaire, lequel se développe ensuite en lobe nodulaire.

Les cellules du lobe nodulaire sont envahies par les cordons d'infection. Les bactéries sont alors libérées dans le cytoplasme des cellules végétales par endocytose où elles sont entourées par un espace péribactéroïdien et une membrane péribactéroïdienne. Les symbiosomes résultants remplissent le cytoplasme des cellules végétales et les bactéries se différencient en bactéroïdes, forme fixatrice d'azote (**figure 29**).

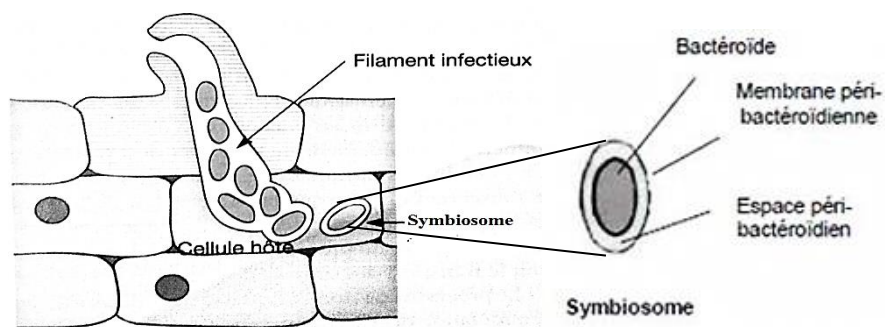


Figure 29. Libération des bactéries dans les cellules de la zone d'infection et formation d'un symbiosome.

Le nodule établit des relations avec le système vasculaire racinaire, facilitant l'apport en carbone et l'exportation de l'azote organique fixé vers les autres parties de la légumineuse infectée.

La réduction du N₂ atmosphérique en ammoniac par les bactéroïdes repose sur la production d'une protéine nommée leghémoglobine. Cette dernière, en liant l'oxygène, aide à maintenir des conditions micro-aérophiles dans le nodule mature, favorisant ainsi l'activité de la nitrogénase, enzyme responsable de la fixation de l'azote et inhibée par l'oxygène (**figure 30**).

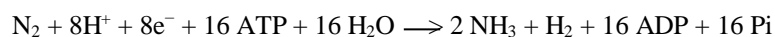
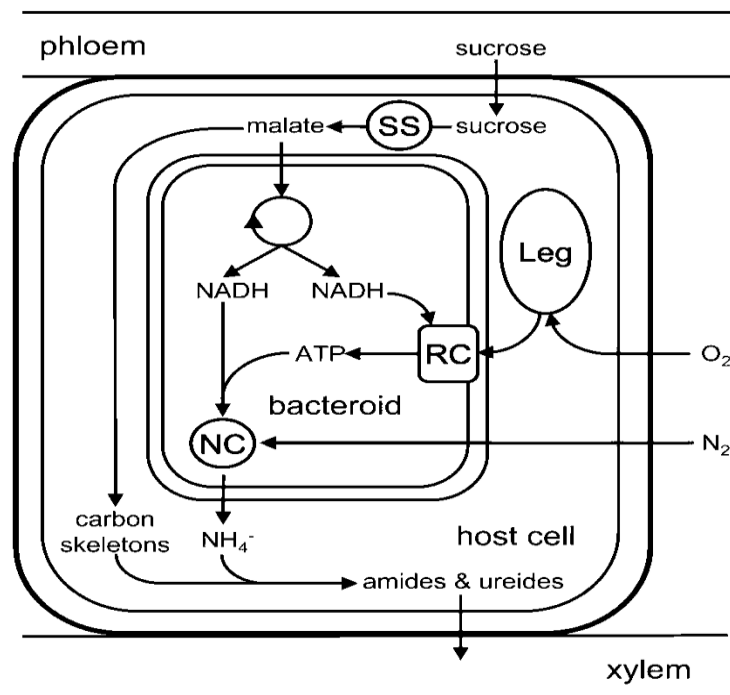


Figure 30. Représentation schématique de la fixation de l'azote dans les nodules.

Conclusion

Les microorganismes du sol jouent un rôle fondamental dans le maintien de la fertilité des sols, le recyclage des nutriments, la dégradation de la matière organique et la régulation des cycles biogéochimiques. Leur interaction constante avec les plantes, les animaux et les composants abiotiques du sol démontre l'importance de cette biodiversité invisible pour l'équilibre et la résilience des écosystèmes. La microbiologie du sol apparaît comme une discipline importante pour concevoir des pratiques agricoles durables, restaurer les sols dégradés et préserver les ressources naturelles.

Chapitre 4. Éléments de microbiologie du tube digestif

Introduction

L'organisme des êtres vivants héberge toute une communauté de microorganismes, regroupés sous le terme de « microbiote », ils participent à de nombreuses fonctions biologiques. Chez l'homme, ces microorganismes, que soit bactéries, virus, parasites et champignons, sont non pathogènes et commensaux, et cohabitent avec lui quelle que soit leur localisation (peau, bouche, vagin, poumons, intestin...). Chaque individu a un microbiote qui lui est propre en fonction de la combinaison dont il a hérité à sa naissance et de l'ensemble de son vécu par la suite. Le microbiote est aujourd'hui considéré comme un organe à part entière.

1. La microflore digestive de l'homme

1.1. Définition

Le microbiote intestinal humain ou flore intestinale est l'ensemble de microorganismes non pathogène vivant dans l'intestin. Sur une surface totale de 400 m², entre la bouche et l'anus, des centaines de milliards de bactéries cohabitent. Du fait que le tube digestif présente le nombre le plus important de bactéries et c'est là que leur influence sur la physiologie de l'organisme semble déterminante, on considère le microbiote intestinal comme le plus important et le plus étudié.

La flore intestinale est constituée par environ **10¹⁴** de bactéries regroupées en 500 espèces réparties le long du tube digestif, soit 10 fois plus que le nombre de cellules de l'organisme (100 fois plus de gènes que le génome humain), auxquelles il faudrait ajouter les virus et les champignons, le tout représentant une masse d'environ un kilogramme.

L'identification et l'étude des bactéries intestinales sont très difficiles car la grande majorité de ces espèces sont anaérobies et seulement 20 % sont cultivables par les méthodes bactériologiques classiques. Actuellement, le développement de la culturomique (approche basée sur l'utilisation de plus de 200 conditions de cultures différentes) nécessitant l'identification de plusieurs milliers de colonies par l'utilisation de la spectrométrie de masse telle que le spectromètre de masse MALDI-TOF (Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight) et des techniques de séquençage à haut débit ou next-generation sequencing (NGS) ont permis de contourner ces difficultés et d'entreprendre l'étude à grande échelle de la flore microbienne normale et pathologique.

1.2. Composition de la microflore intestinale humaine

Le microbiote intestinal est composé d'une très large majorité de bactéries anaérobies. La quantité d'archées et de fungi est plus faible. **95 %** du microbiote est représenté par 5 phyla bactériens :

Les Firmicutes représentent plus de **50%** des microorganismes de la flore intestinale. Ce phylum comporte les genres suivants : *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Faecalibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Roseburia*, *Peptostreptococcus* et *Streptococcus*.

Le phylum des *Bacteroidetes* représente jusqu'à **30%** de la population bactérienne. On y retrouve notamment la bactérie *Bacteroides fragilis* (bactérie sous forme de bacille Gram négatif et anaérobie) et les bactéries des genres *Prevotella* et *Xylanibacter*.

Le phylum des *Actinobacteria* représentent en général moins de **10%** de la population du microbiote. Ce sont des bactéries Gram positif, notamment les genres *Bifidobacterium* et *Mycobacterium*.

Le phylum des *Proteobacteria*, dont communément des *Escherichia* et des bactéries du genre *Desulfovibrio* que l'on retrouve en faible quantité.

Le phylum des *Verrucomicrobia* inclut les *Akkermansia* qui semblent spécialisées dans la dégradation des mucus.

Le microbiote contient des archées méthanogènes principalement *Methanobrevibacter smithii*, impliqué dans la méthanogènes intestinale et des fungi présentés par *Candida*, *Saccharomyces* et *Aspergillus*.

1.3. Répartition de la microflore intestinale :

La répartition de cette microflore varie selon les segments du tube digestif. Elle dépend de la teneur du milieu en oxygène, du pH, des sécrétions du tube digestif, des nutriments disponibles et de la vitesse de transit (**figure 31**).

L'estomac : En raison du pH très bas (1-2) et de la présence d'oxygène, la microflore est quasi inexistante ($10\text{-}10^2$ UFC/g). Malgré cette forte acidité, il a fallu attendre la découverte d'*Helicobacter pylori* qui est responsable de la majorité des ulcères gastriques.

L'intestin grêle : caractérisé par un pH compris entre 6 et 7 et une faible concentration en oxygène, présente une variation quantitative (duodénum 10^3 - 10^4 UFC/g, jéjunum 10^4 - 10^6 UFC/g, iléon 10^6 - 10^8 UFC/g) et qualitative, avec une diminution progressive des bactéries aérobies au profit des bactéries anaérobies strictes. Bien que peu de bactéries y soient présentes, elles jouent un rôle limité dans ce segment.

-Le côlon : Le pH est de 6-7, l'oxygène est pratiquement absent, le transit, très fortement ralenti, est à l'origine d'une stase d'où l'augmentation importante de la population bactérienne (de 10^8 - 10^{12} UFC/g). C'est une véritable chambre de fermentation, siège de très nombreuses biotransformation des résidus alimentaires non assimilés au niveau du grêle.

Le côlon est la seule zone colonisée de façon permanente : la flore principalement anaérobie est dense et active, produisant localement de nombreux métabolites.

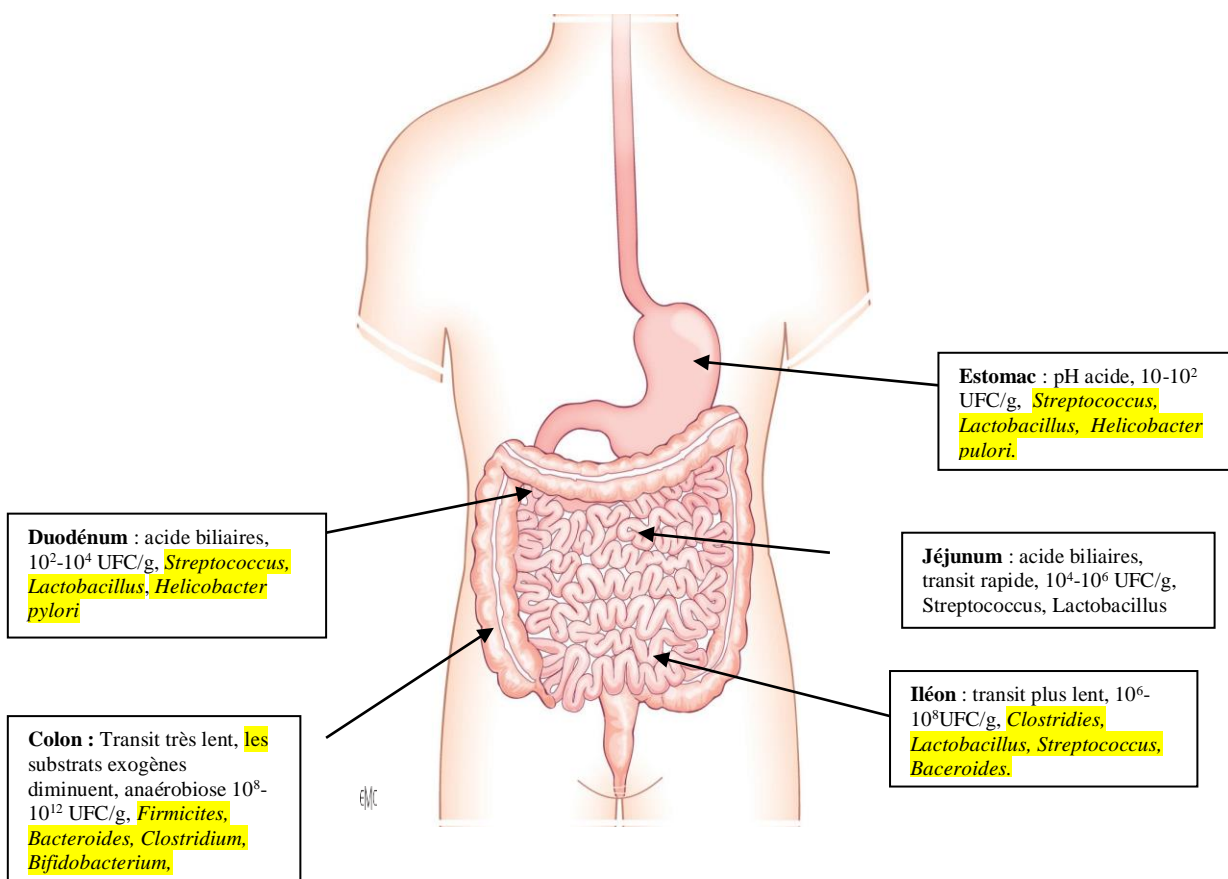


Figure 31. Les conditions écologiques abiotiques et leur influence sur le microbiote dans les différentes niches de l'intestin.

1.4. Implantation de la flore intestinale

La colonisation du tube digestif débute dès la rupture des membranes fœtales et se poursuit pendant plusieurs mois.

-À la naissance, le tube digestif est stérile, mais il est rapidement colonisé par la flore de la mère et de l'environnement immédiat. En 48 heures, la population bactérienne dans le côlon atteint entre 10^9 et 10^{12} UFC/g. Le mode d'accouchement influence considérablement cette colonisation. En effet, les nourrissons nés par voie basse présentent un microbiote intestinal plus similaire à celui du vagin maternel, riche en lactobacilles. En revanche, les nourrissons nés par césarienne sont privés de cette exposition naturelle et leur microbiote se compose principalement de bactéries provenant de l'environnement de naissance, des mains du personnel médical et de la peau, telles que *Clostridium difficile*, *Staphylococcus* et *Propionibacterium*.

-Chez le nouveau-né, l'alimentation joue un rôle important dans le développement du microbiote intestinal. Un nouveau-né allaité par sa mère développe une flore bactérienne principalement composée de bifidobactéries, tandis que les nourrissons nourris uniquement au lait commercial présentent un microbiote plus varié, avec une présence accrue d'*Escherichia coli*, de *Clostridia* et de *Bacteroides*. Les microorganismes présents dans le lait maternel et ingérés quotidiennement en grande quantité, favorisent considérablement le système immunitaire, en exerçant des effets à la fois anti-infectieux et anti-inflammatoires.

- Chez l'enfant âgé de 1 à 4 ans, sous l'influence de la diversification alimentaire, la composition du microbiote intestinal va évoluer qualitativement et quantitativement pour se stabiliser à l'âge de 3 à 4 ans avec une population bactérienne de 10^{10} à 10^{14} bactéries. À ce stade, le microbiote intestinal de l'enfant ressemble à celui de l'adulte, que l'on qualifie de microflore normale.

Cette période d'acquisition du microbiote semble très importante pour la maturation du système immunitaire et influence le risque de maladies ultérieures comme certaines allergies.

1.5. Fonctions du microbiote intestinal

Le microbiote intestinal a un rôle de protection, métaboliques, immunitaires et sur l'épithélium intestinale.

-Protection contre les pathogènes:

Le microbiote de l'intestin joue un rôle de barrière protectrice contre des pathogènes intégrées par :

-L'opposition à la colonisation et à la prolifération par d'autres bactéries : une compétition pour le substrat et l'espace (occupe le même site d'adhésion) ou bien par la production de métabolites antagonistes tel que les bactériocines.

- L'activation du système immunitaire ou l'induction d'autres défenses comme la production de mucus et de défensines par l'hôte.

Le microbiote intestinal joue un rôle de barrière protectrice contre les pathogènes ingérés, comme l'avaient suggéré les infections fréquentes d'origine intestinale observées lors des traitements perturbant cet équilibre. Un excellent exemple est la fréquence des infections à *C. difficile* quand une antibiothérapie altère le microbiote endogène dominant. Des travaux expérimentaux et des études cliniques randomisées chez l'homme ont montré que la fonction de barrière peut être renforcée par des microorganismes exogènes thérapeutiques. Par exemple, *Saccharomyces boulardii* diminue le risque de rechute de *C. difficile*

-Effets sur le système immunitaire:

Le microbiote joue un rôle important dans la maturation du système immunitaire intestinal. Cela a été clairement démontré par les nombreuses anomalies observées chez les souris élevées dans des conditions stériles, et donc dépourvues artificiellement de microbiote. Il permet également la régulation de la réponse immunitaire (immunomodulation) et l'induction des Immunoglobulines A (IgA).

-Fonction métabolique et nutritionnelle:

Les microorganismes intestinaux effectuent une grande variété de réactions métaboliques essentielles qui produisent divers composés.

-La fermentation des hydrates de carbone non digestibles tels que l'amidon et la pectine, conduit à la production d'acides gras à chaînes courtes (l'acétate, le propionate et le butyrate), qui sont assimilables par l'hôte et utilisés comme source d'énergie pour les cellules

épithéliales, le butyrate représentant environ 50 % de cette énergie. Cette fermentation produit également des gaz, notamment le CO₂ et l'H₂.

Les acides gras à chaîne courte présentent des propriétés spécifiques. Le butyrate produit par les espèces des genres *Eubacterium*, *Roseburia* et *Faecalibacterium*, exerce des effets trophiques et immunomodulateurs, tandis que le propionate synthétisé principalement par les espèces du genre *Bacteroides*, est absorbé par la muqueuse colique, peut moduler la production de cholestérol par le foie.

-La flore intestinale est responsable de la production de vitamines (K, B). Des bactéries anaérobies strictes (*Clostridium butyricum*, *Veillonella* sp.) sont capables de synthétiser la vitamine B12.

- Les stéroïdes produits par le foie et libérés dans l'intestin sous forme d'acides biliaires par la vésicule biliaire subissent des modifications par la microflore intestinale. Les composés stéroïdiens ainsi modifiés et bioactifs sont ensuite absorbés par l'intestin.

-Effets sur l'épithélium intestinal:

-Le maintien de l'intégrité de l'épithélium intestinal est primordial pour préserver l'homéostasie intestinale (**figure 32**). Cela est assuré par la production de mucus, les jonctions serrées et le développement des villosités. En effet, *Lactobacillus plantarum* stimule la production des protéines composant les jonctions serrées.

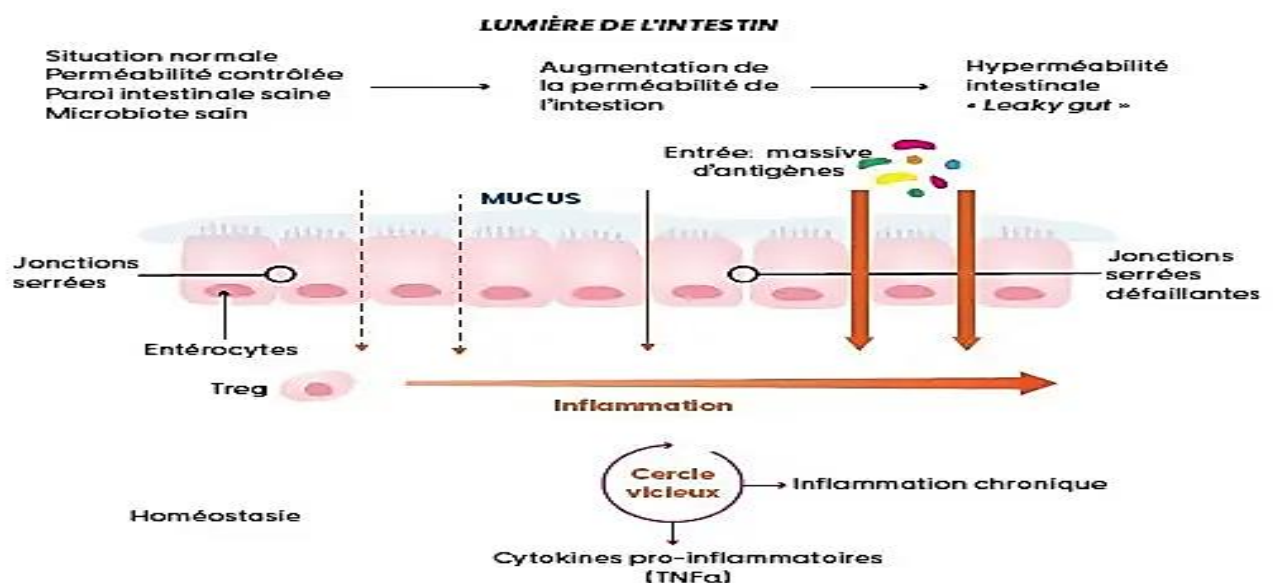


Figure 32. Impact de l'altération des jonctions sur la perméabilité de l'épithélium intestinal.

-Active le renouvellement des cellules épithéliales et l'angiogenèse. En effet, la dégradation continue de la mucine par les enzymes mucinases sécrétées par *Akkermansia muciniphila* contribue au maintien de l'épaisseur optimale de la couche de mucus et à l'intégrité de la barrière intestinale. Cette dégradation génère des nutriments pour les cellules caliciformes, productrices de mucus, et stimule ainsi leur renouvellement.

1.6. Dysbiose et pathologies associées

La dysbiose est l'altération de l'équilibre normal de la flore intestinale. Elle consiste en une perte de la biodiversité microbienne, diminution ou augmentation du nombre de certaines espèces ou groupe microbiens. Le déséquilibre du microbiote, ou dysbiose, joue un rôle majeur dans le développement de divers états pathologiques, tels que l'obésité et le diabète, les maladies inflammatoires de l'intestin, le cancer colorectal, ainsi que certaines pathologies neurologiques comme l'autisme.

-Obésité et diabète :

La composition de la flore du microbiote révèle une diversité réduite chez les patients obèses, caractérisée par une augmentation du pourcentage de *Firmicutes* et une diminution du pourcentage des *Bacteroides*. Les analyses ont permis de classer les patients en deux groupes : LGC (faible compte de gènes) et HGC (fort compte de gènes).

Les LGC présentent un microbiote caractérisé par une prévalence élevée de cinq bactéries pro-inflammatoires (dont *R. gnavus*), et cette faible diversité génétique est associée à l'insulino-résistance et au diabète. En revanche, le groupe HGC se distingue par un pourcentage important de quatre bactéries anti-inflammatoires (dont *F. Prausnitzii*).

-Maladies inflammatoires chronique de l'intestin (MICI)

La Maladie de Crohn (**MC**) et Rectocolite Hémorragique (**RCH**) sont des maladies fréquentes de l'intestin et chronique qui semble due à une réaction inflammatoire inadaptée. Cette dysbiose est caractérisée par un déficit en certaines bactéries, telles que *F. prausnitzii*, du groupe des *Clostridium leptum* (clusters IV), mais aussi par une augmentation de certains pathogènes tels qu'*Escherichia coli* **AIEC** (Adherent-Invasive *E. coli*) ou *Mycobacterium avium paratuberculosis*.

Le rôle des *Escherichia coli* adhérents et invasifs (**AIEC**) a été mis en évidence, bien que leur contribution à la genèse et à l'évolution de la maladie ne soit pas élucidée. Les résultats de

l'étude clinique ont montré que la présence d'AIEC lors de la résection chirurgicale pourrait constituer un facteur de risque pour la récurrence post-opératoire.

-Cancer colorectal

Les personnes atteintes de cancer colorectal présentent fréquemment des modifications de la composition de leur microbiote intestinal. Dans une étude, les chercheurs ont établi une carte de la dysbiose associée au cancer colorectal en comparant les espèces bactériennes présentes dans les tumeurs et celles retrouvées dans les zones de muqueuse saine adjacente. Ils ont constaté que les zones tumorales du côlon présentaient moins de *Firmicutes* et plus de *Bacteroidetes* que les zones saines, et constituaient un environnement favorable pour les *Coriobacteria* (actinobactéries).

Il a également été démontré que les toxines bactériennes jouent un rôle dans le développement du cancer colorectal. Par exemple, la génotoxicité de certaines souches d'*Escherichia coli* produisant la colibactine, une toxine capable d'induire des cassures double-brin dans l'ADN, a été mise en évidence. La colibactine a ainsi été identifiée comme promotrice de tumeurs colorectales.

1.7. Modulation de la flore intestinale

La modulation du microbiote a pour objectif de rétablir l'équilibre du microbiote intestinal dans un but préventif et thérapeutique et ceci par différents moyens tels que les prébiotiques, les probiotiques, et les transplantations fécales.

-Les probiotiques

Les probiotiques sont des microorganismes vivants, non pathogènes, qui lorsqu'ils sont administrés en quantité suffisante, impactent positivement sur la santé de l'hôte.

Il existe des probiotiques aux propriétés démontrées chez l'homme, disponibles sous forme de médicaments, d'aliments ou de compléments alimentaires. Parmi les espèces bactériennes les plus courantes dans ces produits, on trouve *Bifidobacterium bifidum*, *Bifidobacterium longum*, *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus rhamnosus* et *Lactobacillus plantarum*. Des médicaments existent contenant ces espèces ou encore des *Saccharomyces* ou des *E. coli*.

Le mécanisme d'action précis des probiotiques reste encore mal compris. Cependant, trois principales hypothèses ont été avancées:

- Amélioration du fonctionnement de la barrière intestinale
- Modulation du système immunitaire
- Inhibition de la croissance des bactéries pathogènes ainsi que de leur adhésion à l'épithélium gastro-intestinal.

De nombreuses études ont déjà démontré l'efficacité des probiotiques dans le traitement des maladies inflammatoires chroniques de l'intestin. Par exemple, la souche *E. coli* Nissle 1917 (commercialisée sous le nom de Mutaflor) présente une efficacité comparable à celle des anti-inflammatoires de synthèse, tels que la mésalazine, dans le maintien en rémission de la RCH. Des recherches récentes suggèrent qu'*Akkermansia muciniphila* pourrait être un candidat prometteur pour le traitement de l'obésité et du syndrome métabolique.

Les prébiotiques

Les prébiotiques sont principalement des glucides complexes, tels que l'inuline ou les galacto- et fructo-oligosaccharides, qui ne sont pas digérés par l'homme mais stimulent la croissance de certains groupes bactériens (comme les *Bifidobacteria*, *Faecalibacteria*, etc.), modifiant ainsi la composition du microbiote de manière quantitative. Pour maintenir leurs effets, une consommation régulière et continue est nécessaire.

-Le transfert de flore fécale

Récemment, des médecins néerlandais ont recensé les essais de transplantation de microbiote fécal dans diverses pathologies digestives. Il a été démontré que, dans les cas d'infections récidivantes à *C. difficile*, la transplantation de microbiote présentait une efficacité de 90 %. En ce qui concerne la rectocolite hémorragique (**RCH**), les résultats sont encourageants, avec jusqu'à 68 % de rémission observée après la transplantation.

2. La microflore du tube digestif des ruminants

2.1. Introduction

Les ruminants sont des mammifères herbivores et polygastriques, dont la digestion pré-gastrique se fait en partie ou complètement en remastiquant les aliments après leurs ingestions. Ils se distinguent également par la présence de membres à deux doigts. Les ruminants comportent le bétail, les bisons, mouton, chèvre, antilope, cerf, chevrotain, girafe, chameau.

La complexité anatomique des réservoirs digestifs, chez les ruminants, est associée à la présence d'une population de microorganismes qui vivent en symbiose avec l'hôte et qui jouent un rôle capital dans la digestion et la nutrition de l'animal.

Les microorganismes du rumen permettent aux ruminants de transformer les plantes fourragères, non comestibles pour les humains, en aliments riches et de haute qualité. Cependant, ils sont aussi à l'origine de la production de méthane. La génomique et la métagénomique sont en train de révolutionner notre compréhension des fonctions des écosystèmes digestifs et des interactions entre les microorganismes et l'animal hôte.

2.2. Anatomie de l'estomac des ruminants

L'estomac des ruminants est composé de trois compartiments (pré-estomacs) placés avant la caillette qui est le véritable estomac (**figure 33**).

Le rumen (ou panse) est un sac bilobé, allongé d'avant en arrière, pesant environ 100 kg, et représentant entre 60 et 70 % du volume total du tube digestif chez la vache adulte. La surface intérieure du rumen est constituée par un épithélium corné, parsemée de papilles de tailles variant de 2 mm à 2 cm, serrées les unes contre les autres et kératinisées. Les papilles ont pour principal rôle d'absorber les produits issus des fermentations microbiennes. Cet organe est indispensable pour la digestion des ruminants, agissant comme un véritable fermenteur:

- un milieu riche en eau, avec une proportion variant entre 85 et 90 %
- un pH relativement élevé entre 6,4 à 7,0 tamponné par l'apport de minéraux (bicarbonates et phosphates) de la salive
- une température comprise entre 39 à 40°C
- anaérobie (primordiale dans le processus de digestion)
- pression osmotique constante proche de celle du sang
- milieu propice au développement et au maintien de populations microbiennes.

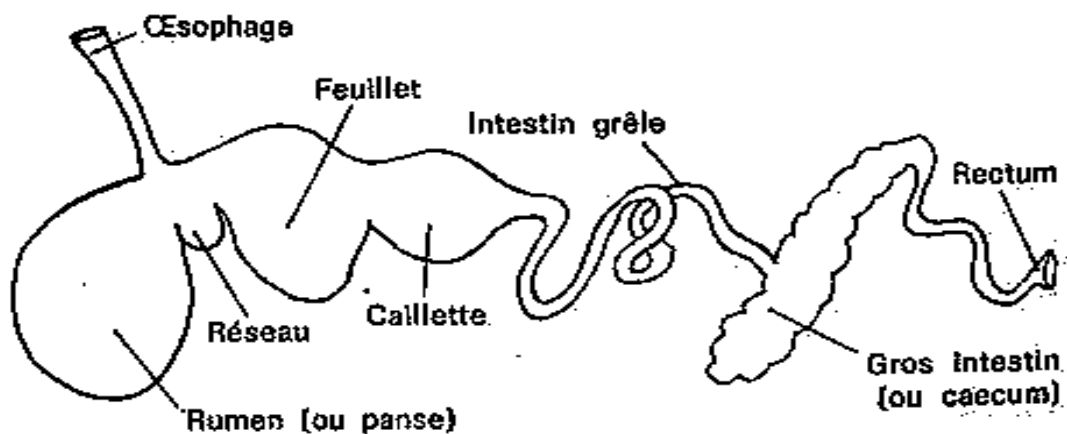
Les mouvements du rumen et du réseau entraînent un brassage continu de la masse alimentaire, permettant ainsi un ensemencement complet de tous les ingesta et une culture dans toute la masse.

Le réseau (ou réticulum) est le plus petit et le plus antérieur des pré-estomacs. Sa muqueuse caractérisée par une structure, hérissée de papilles absorbantes. Il joue un rôle dans la circulation des particules. Les particules qui passent par l'orifice réticulo-omasal doivent

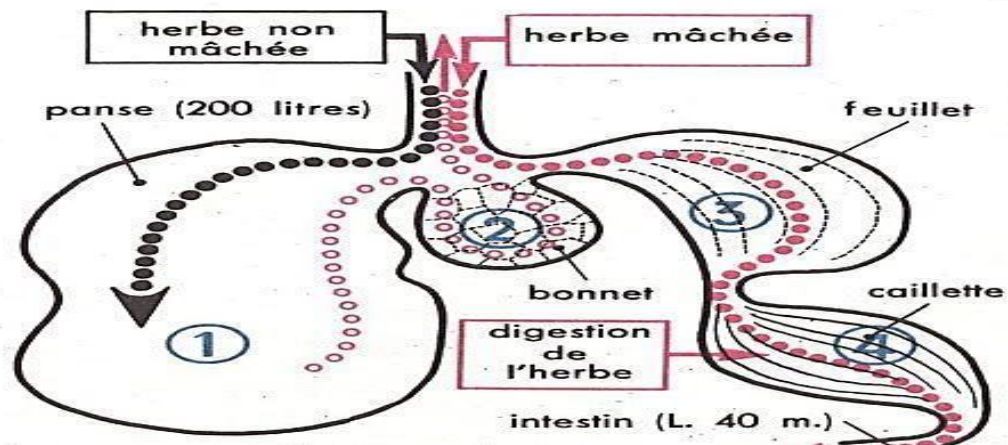
avoir une taille moyenne inférieure ou égale à 1 mm. En conséquence, les aliments solides sont retenus tant qu'ils n'atteignent pas cette taille minimale.

Le feuillet (ou omasum) un organe à l'intérieur duquel on trouve de très nombreuses lames, de hauteurs inégales, recouvertes d'un épithélium kératinisé, qui possède également des papilles. La cavité du feuillet est constituée d'un canal qui communique en amont avec le réseau et en aval avec la caillette. Ce canal a un contenu liquidien. C'est dans le feuillet que se réalise une grande partie de l'absorption de l'eau et des sels minéraux présents dans le contenu du rumen et du réseau.

La caillette (ou abomasum) est constitué d'une cavité tapissée par une muqueuse toujours recouverte d'une couche de mucus. Les fonctions digestives de la caillette des ruminants sont similaires à celles de l'estomac des mammifères mono-gastriques. Elle secrète l'HCl, de la pepsine, et d'autres sucs digestifs permettant la dégradation des protéines, des glucides et des lipides en substances plus simples. Ces dernières peuvent ensuite être transférées dans l'intestin grêle pour une digestion supplémentaire et une assimilation.



a. Schéma de la constitution du système digestif d'un ruminant.



b. Direction du mouvement de la nourriture dans l'estomac d'un ruminant.

Figure 33. Représentation schématique du tractus digestif d'un ruminant.

2.3. La population microbienne du rumen

Les conditions ambiantes du rumen sont propices au développement d'une population microbienne, caractérisée par sa variété et sa densité.

-Les bactéries :

Les bactéries du rumen sont de l'ordre de 10^{10} /ml (plus de 200 espèces bactéries), composées essentiellement de bactéries anaérobies strictes. On estime que moins de 15% des bactéries du rumen peuvent être cultivées en utilisant des techniques standards. Les trois quarts de la population bactérienne sont attachés aux particules alimentaires.

Les bactéries du rumen sont généralement classées selon les substrats qu'elles sont capables de fermenter ou de dégrader. On distingue :

Les bactéries fibrolytiques :

Les bactéries fibrolytiques se fixent sur les particules fibreuses et produisent des enzymes actives sur les glucides pariétaux (cellulose, hémicelluloses et pectines). Cette population bactérienne se développe de manière optimale lorsque le pH est supérieur ou égal à 6,5.

-Bactéries cellulolytiques : la plupart des travaux portant sur la dégradation de cellulose dans le rumen est fondée sur l'étude de trois bactéries cultivables : *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus albus* et *Ruminococcus flavefaciens*. Parce qu'elles sont capables d'hydrolyser

la cellulose cristalline, elles ont été considérées comme importantes dans le rumen. Les génomes de ces trois bactéries ont été séquencés et les stratégies enzymatiques de dégradation de la cellulose utilisées par chaque espèce ont été élucidées.

- Les bactéries hémicellulolytiques : l'hémicellulose, qui constitue environ 37 à 48 % des parois des plantes, présente une structure complexe, avec le xylane comme l'un des principaux polymères. Les bactéries hémicellulolytiques les plus importantes sont *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Prevotella ruminicola*, et les *Ruminococci*.

-Les bactéries pectinolytiques : la digestion de la pectine est réalisée par plusieurs bactéries, notamment *Butyrivibrio fibrisolvens* et *Prevotella ruminicola*.

Les bactéries amylolytiques:

Les bactéries amylolytiques préfèrent des pH inférieurs à 6. La digestion de l'amidon est assurée par un certain nombre de bactéries, parmi lesquelles : *Streptococcus bovis*, *Ruminobacter amylophilus* et *Prevotella ruminicola*.

Les bactéries protéolytiques

Ruminobacter amylophilus est une espèce particulièrement active dans la dégradation des protéines.

Les bactéries utilisatrices de lipides :

Un certain nombre de bactéries ruminales sont impliquées dans l'utilisation des lipides présents dans le rumen, parmi lesquelles *Anaerovibrio lipolytica* et certaines espèces du genre *Butyrivibrio*.

- Les Archées :

La population d'Archées dans le rumen est de l'ordre de 10^9 cellules /ml. Le microbiote ruminal comprend également des archées méthanogènes qui utilisent le dihydrogène généré par le métabolisme bactérien en conditions anaérobies pour réduire le dioxyde de carbone en méthane. Cette réaction est nécessaire car la présence en excès de dihydrogène inhiberait les fermentations et perturbe ainsi le fonctionnement normal du rumen. Il s'agit fréquemment d'espèces appartenant au genre *Methanobrevibacter*. En outre, le génome de *Methanobrevibacter ruminantium*, une espèce méthanogène omniprésente dans le rumen, est disponible.

- Les champignons :

Les Champignons du rumen sont anaérobies stricts, ce qui est exceptionnel dans le groupe des champignons. Chez le ruminant adulte, la densité de champignons mesurée par des méthodes de cultures, est comprise entre 10^3 et 10^4 champignons/ml de contenu ruminal. Des densités similaires ont été observées grâce à des techniques de biologie moléculaire. On décrit trois espèces qui sont *Neocallimastix frontalis*, *Piromonas communis* et *Sphaeromonas communis*.

Les champignons du rumen possèdent un fort potentiel fibrolytique, en raison de leur production élevée de polysidases, qui permettent la dépolymérisation de la cellulose et des hémicelluloses, ainsi que l'hydrolyse des oligosaccharides libérés mais ne dégradent pas la pectine. Les produits terminaux générés par la fermentation des glucides sont le formate, l'acétate, le lactate, l'éthanol, le CO_2 et le H_2 .

-Les protozoaires :

Les protozoaires ruminiaux représentent 10^6 organismes/ml de liquide ruminal. La majorité des protozoaires dans le rumen sont des ciliés anaérobies. Un nombre important de genres sont présents, parmi lesquels *Entodinium* dont l'espèce type est *Eodinium lobatum*, *Diplodinium* et *Eudiplodinium*.

La plupart des protozoaires sécrètent des enzymes (protéolytiques, fibrolytiques, amylolytiques) qui facilitent la digestion des particules ingérées. En tant que prédateurs des bactéries, les protozoaires récupèrent les acides aminés, peptides et acides nucléiques bactériens pour les intégrer à leur propre organisme. Une seule cellule protozoaire peut ingérer plusieurs milliers de bactéries en une heure, de sorte qu'ils jouent un rôle très important dans le maintien de la stabilité de la population microbienne du rumen.

Certains protozoaires peuvent consommer l'acide lactique, limitant ainsi les risques d'acidose. Certains types de protozoaires sont capables d'éliminer l'oxygène de telle sorte qu'ils ont un effet stabilisant sur l'anaérobiose. Les protozoaires ciliés produisent une grande quantité d'hydrogène, qui est un substrat pour les méthanogènes.

2.4. La digestion chez le ruminant

Les ruminants présentent une adaptation à leur régime alimentaire, qui est riche en fibres végétales indigestibles et faible en protéines. Les microorganismes ruminiaux produisent des

enzymes capables de dégrader les glucides, les protéines et les lipides. Les produits de la fermentation sont : acides gras volatils (AGV), méthane et dioxyde de carbone (CO₂).

- **Digestion des fibres**

Les glucides fibreux (cellulose, hémicelluloses, pectines) et l'amidon présents dans l'alimentation sont dégradés par les enzymes du microbiote ruminal en oses simples. Ces oses sont ensuite fermentés pour donner les composants utilisables par le métabolisme de l'animal, principalement les acides gras volatils (AGV) tels que l'acétate, le propionate et le butyrate. L'acide lactique est un intermédiaire de cette chaîne de dégradation, du CO₂ et du CH₄ sont également produits au cours de ce processus (**figure 34**).

Les AGV générés lors de la fermentation ruminale sont principalement absorbés dans le sang à travers la paroi du rumen. Ils représentent la principale source d'énergie pour l'animal hôte, fournissant de 70 à 80 % de l'énergie totale absorbée chez le ruminant. Le CO₂ et le CH₄, quant à eux, sont éliminés par éructation. On estime qu'une vache adulte produit 1500 litres de gaz dont 500 litres de méthane. De ce fait 18% des émissions mondiale de méthane sont attribué à l'élevage.

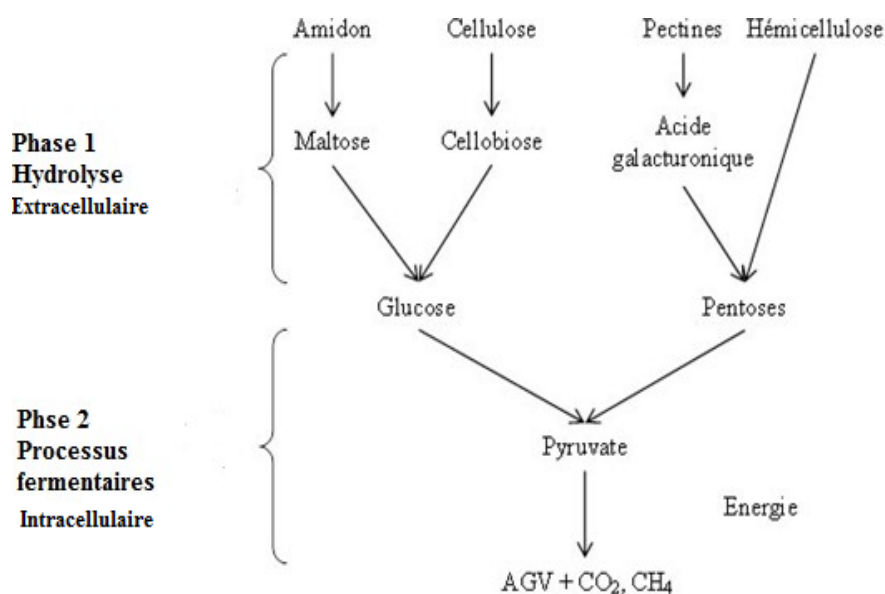


Figure 34. La dégradation des glucides par les bactéries du rumen.

-Digestion des lipides

Les lipides ne représentent généralement que de 2 à 5% de la plupart des aliments des ruminants. Ils sont composés d'acides gras insaturés en C18 : Acide linoléique présents dans les plantes fourragères.

Le métabolisme des lipides dans le rumen se caractérise par une lipolyse rapide et intense des triacylglycérols alimentaires, suivie d'une hydrogénation des acides gras. Environ 80 à 92 % des acides linoléiques et linoléiques subissent une hydrogénation dans le rumen. Les lipides alimentaires sont hydrolysés en glycérol et acides gras libres par les microorganismes du rumen en milieu extracellulaire. Le glycérol produit est rapidement fermenté en AGV, tandis les acides gras insaturés sont fortement hydrogénés. La biohydrogénation ruminale est complexe, se déroule en plusieurs étapes successives d'isomérisations et de réductions et nécessite l'intervention de plusieurs enzymes synthétisées par diverses espèces (**figure 35**). Les bactéries impliquées dans ce processus restent encore peu connues, à l'exception de celles du genre *Butyrivibrio*.

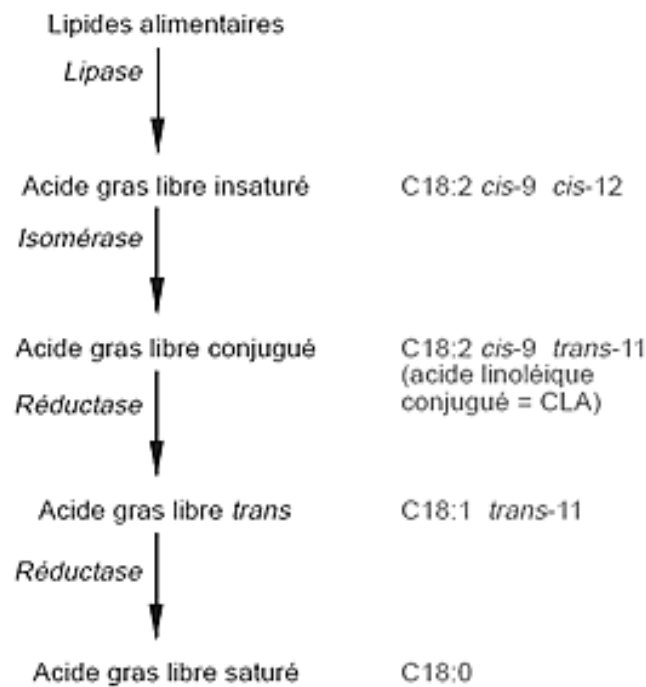


Figure 35. Lipolyse et biohydrogénation des acides gras par le microbiote ruminal.

Le degré de saturation des acides gras (**AG**) a un impact sur la nutrition et la santé des consommateurs de produits d'origine ruminante (lait, viande). Des études ont démontré que, chez l'homme, les acides gras saturés (acides laurique, myristique et palmitique) peuvent favoriser le développement du cancer et des maladies cardiovasculaires, tandis que les acides gras insaturés (acide oléique et polyinsaturés oméga 3) ont un rôle anticarcinogène et anti-athérogène.

-La digestion azotée

Les matières azotées alimentaires se divisent en deux catégories : l'azote protéique (**AP**) et l'azote non protéique (**ANP**), ce dernier incluant des amides, des acides aminés libres (environ 50%), ainsi que des bases azotées, des amines, du NH_3 , de l'urée et des nitrates. Dans les plantes fourragères, 75 à 85 % de l'azote se trouve sous forme de protéines, tandis que 15 à 25 % est sous forme d'ANP.

-Adaptation à l'utilisation de l'azote protéique

Les microorganismes présents dans le rumen dégradent une portion des protéines alimentaires. Cette protéolyse est principalement assurée par les bactéries, dont environ 30 % à 50 % des espèces isolées du rumen ont la capacité de lyser les protéines solubles chez les ruminants, principalement par les bactéries amylolytiques.

La dégradation des protéines se fait en deux étapes successives :

- Les peptides de grande taille sont hydrolysés par des peptidases liées à la membrane extracellulaire des bactéries, produisant ainsi des oligopeptides, des dipeptides, des tripeptides et des acides aminés, qui seront ensuite absorbés par les bactéries. Les peptides de petite taille sont directement assimilés et dégradés par les bactéries en acides aminés par des enzymes intracellulaires. Ces acides aminés servent de facteurs de croissance pour les bactéries cellulolytiques.
- Les acides aminés sont soit désaminés par des espèces bactériennes spécifiques, soit directement incorporés par les microorganismes pour synthétiser leurs propres protéines. La désamination entraîne la production de corps carbonés résiduels et d'ammoniac.

-Adaptation à l'utilisation de l'azote non-protéique

Les ruminants ont la capacité d'utiliser d'autres formes d'azote non-protéique (ANP). Par exemple, l'ammoniac ou l'urée sont utilisés par les bactéries du rumen pour la synthèse des acides aminés et de leurs propres protéines. Ces protéines bactériennes sont ensuite digérées dans l'intestin, fournissant ainsi les acides aminés nécessaires au ruminant.

Les protéines produites par les microorganismes peuvent fournir jusqu'à 90 % des acides aminés nécessaires aux ruminants.

De plus, les ruminants disposent d'un mécanisme permettant de conserver l'azote lorsque leur alimentation est pauvre en azote. L'urée présente dans le corps est éliminée par les urines. Toutefois, en cas de carence en azote, l'urée est retournée vers le rumen, où les bactéries peuvent l'utiliser, notamment via la salive.

Conclusion

La microbiologie du tube digestif révèle un écosystème complexe, constitué d'une diversité de microorganismes essentiels à la santé humaine. Ce microbiote intestinal joue un rôle important dans le métabolisme et la nutrition, la maturation de l'épithélium intestinal et la modulation du système immunitaire. Comprendre les interactions entre l'homme et ses microorganismes ouvre la voie à des avancées importantes en médecine, notamment dans le traitement des maladies digestives et métaboliques.

Chapitre 5. Contamination et hygiène des locaux

Introduction

La contamination biologique ou bio contamination correspond à la présence d'un élément biologique indésirable (bactérie, champignon, virus.) dans l'environnement des locaux (eau, air, surface). Les contaminants biologiques peuvent être des microorganismes mais également les toxines que certains d'entre eux synthétisent. La présence de ces contaminants peut être source de "danger" pour la santé de l'homme.

1. Sources de contaminations microbiennes: air, eaux, matières premières, personnel

Les contaminations microbiennes peuvent avoir différentes sources, air, eau, matières premières et personnel.

Air

L'air n'est pas un milieu très favorable à la prolifération des micro-organismes, vu l'absence de nutriments et d'humidité. Les bactéries de l'air sont en général associées à des particules inertes de taille variable : poussières (10 à 100 μ m), gouttelettes et micro-gouttelettes émises par les voies respiratoires humaines ou par aérosolisation (10 à 1 000 μ m) et noyaux de condensation issus de l'évaporation des gouttelettes (2 à 5 μ m). Certaines bactéries et moisissures sont présentes dans l'air sous formes de spores, ce qui leur permet de survivre en attendant de se trouver dans un environnement propice à leur développement.

Les plus petites particules, de l'ordre du micron, persistent dans l'atmosphère de manière prolongée car leur vitesse théorique de chute est lente (environ 1 mètre en 8 heures) ; elles peuvent être maintenues en suspension et diffuser à distance de leur point d'émission ; elles peuvent pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire et atteindre les alvéoles pulmonaires.

La flore de l'air est composée d'une flore naturelle saprophyte capable de résister fortement à la dessiccation et aux rayons ultraviolets. Elle inclut des bactéries Gram positives comme *Micrococcus* sp., *Sarcina* sp., et *Bacillus* sp., ainsi que des champignons filamenteux, tels que *Aspergillus*, *Penicillium* et *Mucor*. Une flore pathogène ou commensale d'origine humaine qui peut survivre bien en dehors de leur hôte, notamment dans les gouttelettes rhino-pharyngées ou les squames cutanées. Des microorganismes d'origine hydro-tellurique, tels que les bactéries *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, et *Acinetobacter* sont également présent. Une

augmentation du nombre de microorganismes ou la prédominance d'une espèce spécifique à l'intérieur peut représenter un risque pour la santé.

Eaux

L'eau peut être un puissant vecteur de contamination car elle est souvent riche en microorganisme. L'eau potable contient naturellement une flore aquatique complexe légionnelles, mycobactéries atypiques, *Pseudomonas*, *Aeromonas*, protozoaires, etc. A l'intérieur de l'établissement hospitalier ces microorganismes en quantité faible peuvent proliférer aux niveaux des bras morts, des extrémités des canalisations, des brise-jets, des robinets, des pommes de douches et dans les circuits d'eau chaude, lorsque les conditions de stockage, de circulation ou de filtration sont défectueuses. Une contamination par voie rétrogradé peut survenir au niveau des différents points d'usage et des dispositifs branchés sur le réseau (machines à laver des instruments, trompes à vide).

Dans les établissements de santé, l'eau utilisée à des fins thérapeutiques (l'eau de dialyse et l'eau de rinçage des dispositifs médicaux), alimentaires, sanitaires et techniques (réfrigérateurs et les systèmes de climatisation) peut être à l'origine de la contamination des patients par des microorganismes d'origine hydrique.

Dans l'industrie alimentaire, l'eau utilisée pendant les processus de transformation des produits ou pour le nettoyage peut être à l'origine de contamination. De plus, les eaux résiduelles, en particulier lorsqu'elles sont employées comme engrais pour les cultures, peuvent introduire des microorganismes dans les aliments, dont les plus importants sont les virus entéropathogènes.

Matières premières

Les matières premières utilisées dans les industries alimentaires et pharmaceutiques peuvent être à l'origine de contamination microbienne. L'utilisation de matière première d'origine animale ou végétale entraîne la fabrication de produits contaminés qui seront à l'origine d'une contamination pour le consommateur. Par exemple, des plantes utilisées pour extraire des principes actifs peuvent être porteuses de spores fongiques, ce qui peut compromettre la qualité et la sécurité des médicaments produits.

Personnel

Les personnes sont porteuses de microorganismes (flore cutanée, digestif, rhinopharyngée..) et contribuent à la propagation de l'infection. En effet, la peau héberge des milliards de bactéries et, comme l'être humain libère constamment des particules des peaux mortes et lors de l'expiration, il contamine en permanence l'air et les surfaces des locaux.

Dans le milieu hospitalier, la survie des microorganismes d'origine humaine sur les surfaces varie de quelques heures à plusieurs mois, en fonction des caractéristiques propres de ceux-ci et des conditions environnementales. Les spores de *Clostridium difficile* sont une forme de résistance dans l'environnement. Une humidité de plus de 70 %, une température peu élevée et la présence de matières organiques sont associés à la persistance de la plupart des microorganismes sur les surfaces. Certaines bactéries, comme *Staphylococcus aureus* et *Acinetobacter baumannii*, résistent aussi à la dessiccation et ont une survie prolongée sur surfaces sèches.

Dans l'industrie alimentaire, le personnel travaillant dans les zones de production peut être responsable de la contamination des produits alimentaires, ce qui peut entraîner des maladies d'origine alimentaire. La présence de coupures ou d'infections sur les mains, ainsi que des maladies telles que la grippe, l'angine streptococcique ou une hépatite à un stade précoce, peuvent aggraver la situation.

2. Principales contaminations: milieux hospitaliers, milieux industriels

2.1. Le milieu hospitalier

On parle de contaminations hospitalières ou infections nosocomiales. Une infection est dite « nosocomiale » lorsqu'elle est acquise dans un établissement de soins et qu'elle apparaît après un délai de 48 heures après l'admission.

Pour les infections du site opératoire, on considère comme nosocomiales les infections survenues dans les 30 jours suivant l'intervention. Lorsqu'une prothèse ou un implant est mis en place, dans l'année suivant l'intervention.

Les infections nosocomiales peuvent être endogènes causées par des agents infectieux provenant du patient lui-même, présents à la surface de la peau ou au niveau des muqueuses. Elles peuvent survenir lors de certains soins, par un acte invasif comme l'introduction d'un cathéter, la pose de sondes ou de drains, la respiration artificielle et les actes chirurgicaux. On

parle alors d'autoinfection. Ou bien elles sont exogènes, causées par des agents infectieux provenant de l'environnement du patient (personnel soignant, autres malades, eau, air, alimentation, surfaces ou dispositifs médicaux). On parle d'infection croisée.

Les infections nosocomiales les plus fréquentes sont les infections du site opératoire, les infections urinaires et les infections respiratoires basses. Des études ont montré que la prévalence maximale de ces infections se constate dans les unités de soins intensifs et dans les services de chirurgie d'urgence et d'orthopédie. Le rôle de l'air dans l'apparition des infections du site opératoire a été particulièrement étudié dans le cadre de la chirurgie orthopédique, notamment lors des interventions pour la pose de prothèses articulaires.

On peut citer d'autres exemples d'infection nosocomiale comme la gastro-entérite chez l'enfant, avec un *Rotavirus* comme principal agent pathogène et le *Clostridium difficile* chez l'adulte. Endométrite et autres infections de l'appareil génital après l'accouchement.

La présence du microorganisme dans le réservoir environnemental n'est pas à elle seule une condition suffisante dans la survenue d'une infection. L'association de plusieurs facteurs est nécessaire : le type de microorganisme (pathogène ou opportuniste), la taille de l'inoculum, la virulence, la voie de transmission (dispositifs médicaux, liquides, air, surfaces), la porte d'entrée (procédure invasive ou non) et le statut immunitaire de l'hôte. Par exemple, *Mycobacterium xenopi*, microorganisme peu pathogène, peut provoquer une infection lors de son introduction dans l'organisme au cours d'un acte invasif, par l'intermédiaire d'un matériel rincé avec une eau contaminée.

2.2. Le milieu industriel

Les microorganismes sont pour la plupart des agents à risques, et présentent, en zone de production industrielle alimentaire, une problématique inévitable. En effet, malgré le fait que certains microorganismes soient utilisés en industrie alimentaire, la grande majorité sont totalement indésirables sur les zones de production.

La présence de bactéries et de champignons indésirables dans l'industrie alimentaire peut potentiellement provoquer la détérioration des produits alimentaires et des maladies d'origine alimentaire. Les bactéries représentent le groupe le plus important en raison de leur omniprésence et leur taux de croissance rapide, même dans les conditions où les levures et les moisissures ne peuvent pas se développer, elles sont considérées comme les plus responsables de la détérioration des aliments et de la pathogénicité.

Les microorganismes détériorent la qualité des aliments en altérant leur texture (formation de films visqueux, changement de pigmentation), leur aspect, leur goût (production de H₂S, d'indole et d'alcool) ou leurs propriétés nutritives (destruction de molécules essentielles comme les acides aminés). Par exemple, la contamination des jus de fruits par *Clostridium* sp. contribue à leur acidification.

La contamination des aliments est néfaste pour la santé du consommateur. En effet, la consommation d'aliment contaminé est susceptible de provoquer des maladies chez le consommateur par l'invasion des cellules ou la production de toxine, et le risque pour la santé, pouvant être mortel. *Clostridium botulinum* est responsable du botulisme chez l'homme par ingestion de toxine préformée dans un aliment. La contamination du produit laitier par *Listeria monocytogenes* provoque la listériose. L'exposition à l'aflatoxine est responsable de cancers du foie chez l'homme, lors de manipulation ou consommation de graines oléagineuses contaminés par *Aspergillus flavus*.

En outre, l'industrie alimentaire expose ses travailleurs aux contaminants microbiens. Dans l'usine de transformation de viande, véritable bouillon de culture pour les germes, la manipulation des carcasses expose les travailleurs à de nombreuses infections. Dans l'industrie de l'abattage de la volaille, la manipulation des viscères de poulets entraîne fréquemment des érythèmes sur les doigts. On peut citer également la contamination par des bactéries transmises par les bovins, comme *Brucella melitensis* responsable de la brucellose.

3. Règles d'hygiène et normes de sécurité

3.1. Règles d'hygiène dans le milieu hospitalier

L'hygiène hospitalière consiste à un ensemble d'actions à différents niveaux :

-Actions sur l'environnement par nettoyage et désinfection des surfaces et des équipements et décontamination et stérilisation du matériel. Par exemple : le matériel utilisé pour les zones d'isolement des patients atteints de la COVID-19 devrait être codé par couleur et séparé des autres articles de nettoyage.

- Le personnel hospitalier est tenu de maintenir des normes d'hygiène strictes pour la prévention des infections nosocomiales. Cela inclut le port de tenues vestimentaires appropriées (blouses, gants), le lavage régulier des mains et le respect des règles d'asepsie.

-Les mesures d'isolement ont pour objectif d'établir des barrières à la transmission des microorganismes. Isolement protecteur aseptique par rapport à l'environnement et à sa contamination et isolement septique par rapport aux patients infectés.

3.2. Règles d'hygiène dans les industries alimentaires

Dans le cadre d'une production alimentaire hygiénique, souvent appelée bonne pratique d'hygiène, on inclut:

- Conception des locaux et des équipements. Elle implique l'emplacement et l'aménagement des locaux de manière à minimiser les risques sanitaires et à garantir une production alimentaire sûre. Les équipements utilisés doivent être de qualité alimentaire et facile à nettoyer.

- Contrôle du processus de production. Des mesures de contrôle sont appliquées tout au long de la chaîne de production, couvrant la matière première, l'emballage, l'eau de traitement, ainsi que le produit lui-même.

- Hygiène du personnel. Le personnel est tenu de maintenir des normes d'hygiène rigoureuses personnelles par le port de vêtements de protection, lavage régulier des mains. L'état de santé du personnel doit être surveillé régulièrement et toute maladie ou blessure doit être consignée.

-Entretien et nettoyage des installations. L'équipement de transformation doit être nettoyé et désinfecter selon un programme bien adapté. Des systèmes sont également nécessaires pour lutter contre les parasites.

- Diminuer la multiplication. Il existe une plage de température dangereuse, entre 10°C et 63°C, où la multiplication des microbes est rapide. Au-delà de cette plage, les microbes commencent à mourir progressivement. De même, en dessous d'une certaine valeur d'eau disponible, ou bien encore dans des environnements trop acides ou trop alcalins, cela entraîne soit la mort des microbes, soit l'arrêt de la production de toxines.

4. Désinfection des locaux

L'environnement hospitalier et industriel doit être maintenu à un niveau élevé de propreté. Deux types d'actions permettent d'assurer une bonne hygiène :

-Le nettoyage

Le nettoyage est une opération qui consiste à éliminer les salissures sans détériorer le matériau que l'on nettoie. A l'hôpital, les salissures étant porteuses de germes, une propreté bactériologique est recherchée. Selon la définition de la société française d'hygiène hospitalière les détergents sont des produits nettoyants ne contenant pas de substance antimicrobienne. Ces molécules éliminent les salissures grâce à leurs 4 actions (pouvoir mouillant, pouvoir émulsifiant, pouvoir dispersant et pouvoir moussant) qui constituent le pouvoir détergent.

-La désinfection

La désinfection selon l'Association Française de Normalisation (**AFNOR**) est une opération au résultat momentané permettant d'éliminer ou de tuer les microorganismes et/ou d'inactiver les virus indésirables portés par des milieux inertes contaminés (surface, sols, objets, air et eau). Le résultat de cette opération est limité aux microorganismes présents au moment de l'opération. Les désinfectants ont une action bactéricide, virucide et fongicide.

Le choix du désinfectant repose principalement sur le spectre d'action requis. Toutefois, il est essentiel de privilégier un produit à la fois efficace et le moins dommageable possible pour les personnes et le matériel. Les principaux désinfectants utilisés sont :

-Le chlore et ses dérivés constituent les désinfectants les plus employés pour le traitement des eaux de boisson et pour la désinfection des locaux. L'eau de javel est utilisée pour désinfecter les surfaces alimentaires. L'hypochlorite, quant à lui, présente un large spectre d'activité antimicrobienne et agit efficacement, à des concentrations différentes, contre plusieurs agents pathogènes. Une concentration de 0,05 % (500 ppm) suffit pour lutter contre le *Rotavirus*, un taux plus élevé, soit 0,5 % (5000 ppm), est nécessaire pour éliminer certains agents pathogènes particulièrement résistants en milieu hospitalier, tels que les *C. auris* et *C. difficile*. La concentration de 0,1 % (1000 ppm) est recommandée dans le cadre de la COVID-19. Il est cependant recommandé d'employer une concentration de 0,5% (5000 ppm) pour éliminer les déversements importants de sang et de fluides corporels (c'est-à-dire plus d'une dizaine de ml).

- Le formaldéhyde est reconnu pour son efficacité et présente un large spectre mais il s'agit de composés toxiques. Il peut être appliqué par vaporisation. Cependant, il est essentiel de

s'assurer qu'une quantité suffisante d'agent actif est dispersée dans la pièce et que l'humidité relative est suffisamment élevée.

-Le peroxyde d'hydrogène H_2O_2 est employé comme désinfectant de surface. L'institut Robert Koch indique que le peroxyde d'hydrogène n'est pas considéré comme suffisamment efficace pour être appliqué sur des surfaces déjà nettoyées. En France et en Suisse, le peroxyde d'hydrogène a remplacé le formaldéhyde pour la désinfection des locaux, en raison du potentiel cancérigène de ce dernier.

-L'acide peracétique est un produit dont l'usage se répand de plus en plus dans l'industrie agroalimentaire (et aussi dans le domaine médical pour la désinfection du matériel) car il est très actif.

4.1. Désinfection des surfaces

Dans tous les cas de désinfection des surfaces, le spectre d'action doit couvrir les bactéries et les levures. Les désinfectants des surfaces environnementales en milieu hospitalier devraient être choisis en fonction de la réduction logarithmique (ordre de grandeur décimal) du virus de Covid-19, d'autres agents pathogènes associés aux soins de santé, notamment les *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* sp., *Pseudomonas aeruginosa* et *Acinetobacter baumannii*, ainsi que des virus des hépatites A et B. Il conviendrait également de prendre en compte, dans certains milieux, les organismes qui persistent dans l'environnement, notamment les *Clostridioides difficile* et *Candida auris*, et qui résistent à certains désinfectants. Aussi faut-il soigneusement choisir les produits destinés aux établissements de soins.

En fonction de la surface à nettoyer, la désinfection peut être réalisée avec des lingettes imbibées de désinfectant, un spray sous pression ou un vaporisateur manuel.

Les produits classiques de nettoyage tels que les ammoniums quaternaires, les désinfectants phénoliques, l'hypochlorite de sodium et le peroxyde d'hydrogène sont couramment utilisés pour la décontamination des surfaces dans les milieux hospitaliers. Cependant, ces substances peuvent causer des problèmes de santé importants, tels que des irritations de la peau et des voies respiratoires, de l'asthme lié au travail et de la bronchite chronique.

Les désinfectants actuels comprennent des solutions liquides améliorées, à base de peroxyde d'hydrogène, une combinaison d'acide peracétique-peroxyde d'hydrogène, de l'eau électrolysée ou encore du plasma froid (gaz ionisé) à pression atmosphérique.

L'utilisation excessive de biocides dans les hôpitaux a suscité des préoccupations concernant l'émergence de bactéries résistantes aux désinfectants, ainsi que la résistance croisée aux antibiotiques. L'usage intensif de la chlorhexidine dans la prise en charge des infections a conduit à l'isolement de souches de *P. aeruginosa*, *P. mirabilis*, *P. stuartii* et *S. marcescens*, montrant une résistance accrue à la chlorhexidine, associée à une résistance à plusieurs antibiotiques.

Le développement de concepts de procédés automatisés de désinfection par voie aérienne a considérablement amélioré la qualité du nettoyage. Ces technologies reposent sur l'émission de lumière ultraviolette générée par des lampes à xénon pulsé ou l'utilisation de peroxyde d'hydrogène.

Des solutions alternatives aux désinfectants chimiques ont été proposées pour contrôler la contamination des surfaces, telles que l'utilisation de surfaces autodésinfectantes intégrant des métaux lourds comme l'argent et le cuivre, des matériaux imprégnés de germicides, ou encore des revêtements antimicrobiens activés par la lumière ou à caractère hydrophobe ou zwitterioniques. Ces approches semblent particulièrement efficaces pour prévenir l'adhésion bactérienne.

4.2. Désinfection des dispositifs médicaux :

La solution employée pour la désinfection des instruments doit être efficace non seulement pour les surfaces visibles, mais aussi pour les cavités difficiles à atteindre. Tous les produits spécifiquement destinés à la désinfection des dispositifs médicaux sont soumis à la directive relative aux dispositifs médicaux.

Trois niveaux de désinfection sont définis en fonction de l'usage du matériel et du risque infectieux associé, classant ainsi le matériel en non critique, semi-critique ou critique. On distingue ainsi la désinfection de bas niveau, de niveau intermédiaire ou de haut niveau, selon l'objectif à atteindre.

- Une désinfection de bas niveau vise à tuer les microorganismes végétatifs, sauf *Mycobacterium tuberculosis*, certains champignons microscopiques et certains virus.
- Une désinfection de niveau intermédiaire vise à tuer tous les champignons microscopiques et les microorganismes végétatifs et y compris *Mycobacterium tuberculosis* et inactiver les virus.

- Une désinfection de haut niveau a pour finalité de tuer les microorganismes végétatifs et désactiver les virus, sans toutefois garantir l'élimination des spores bactériennes en nombre élevé.

4.3. Désinfection de l'air des locaux :

La désinfection de l'air des locaux est de moins en moins pratiquée, notamment en raison de la reconnaissance du formaldéhyde comme agent cancérigène. Cependant, en Allemagne, la désinfection au formaldéhyde reste actuellement la méthode privilégiée. En France, la désinfection par un procédé chimique utilisant le peroxyde d'hydrogène ou l'acide peracétique s'avère nécessaire.

La désinfection de l'air est réalisée en respectant les consignes suivantes:

- Le produit est dispersé dans l'atmosphère des locaux à l'aide d'un appareil en l'absence de tout personnel.
- Il est essentiel de respecter le temps indiqué par le fabricant pour garantir l'efficacité de la désinfection.
- Il est également important, pour la protection de la santé des soignants, de respecter le temps d'attente recommandé avant toute ouverture du local désinfecté.

La désinfection de l'air est parfois effectuée en cas d'infections nosocomiales dues à des microorganismes ayant une forte capacité de survie dans l'environnement, comme *Clostridium difficile*. La désinfection de l'air peut s'avérer également indispensable dans les services accueillant des patients à haut risque d'infection comme les services d'hématologie ou de greffe d'organes, et en cas de contamination persistante par des moisissures du type *Aspergillus*. Dans ce cas, il est nécessaire d'utiliser un désinfectant fongicide reconnu pour son efficacité contre *A. niger*.

Les rayons ultraviolets ont démontré leur efficacité dans le traitement de l'air d'un local. Les rayonnements ultraviolets de courte longueur d'onde (UVC) sont utilisés pour la désinfection de l'air dans les hôpitaux et en particulier les UVC germicides qui émettent autour de la longueur d'onde de 254 nm. Ils permettent de désactiver les microorganismes et en particulier le SARS-CoV (Severe Acute Respiratory Syndrome -*Coronavirus*), en agissant sur leurs ADN ou bien sur leurs ARN. Cependant la manipulation de ce type de rayonnement sans précaution présente un danger potentiel important pour la santé humaine. Ce danger se

manifeste par des effets nocifs immédiats ou à long terme qui vont du simple érythème à d'authentiques cancers cutanés.

Conclusion

L'hygiène des locaux constitue un élément important dans la prévention des contaminations et la protection de la santé publique. Dans les secteurs sensibles comme le secteur agroalimentaire et de la santé, le respect strict des règles d'hygiène est indispensable pour limiter la propagation des microorganismes et garantir un environnement sain.

Conclusion générale

Les microorganismes sont une composante essentielle de tout écosystème, qu'ils soient aquatiques, terrestres, ou encore digestif. Leur diversité et leurs interactions avec l'environnement influencent la qualité des sols, des eaux et la santé des êtres vivants. Par ailleurs, leur présence dans divers milieux comme le secteur industriel et l'établissement de santé impose une vigilance constante en matière d'hygiène et de prévention des contaminations.

La recherche sur la manière dont les microorganismes interagissent dans l'environnement peut être transformée en domaines d'application pratiques, tels que l'amélioration de la biorestauration, la bioremédiation ou la découverte de métabolites microbiens d'intérêt. Cette approche peut aider à apporter des solutions à certains problèmes environnementaux, tels que l'énergie alternative (biocarburant), la remédiation de la pollution industrielle, la découverte de nouvelles molécules d'antibiotiques, la création de nouveaux produits biologiques (bioplastique), l'étude de l'impact du changement climatique sur l'environnement et notamment sur les microorganismes car ils jouent un rôle vital dans les cycles biogéochimiques de la matière.

Références

- Altmeyer N., Abadia G., Schmitt S. et Leprince A., 1990. Risques microbiologiques et travail dans les stations d'épuration des eaux usées. Documents pour le Médecin du Travail 44(34), 373-387.
- Debré P. et Le Galle J-Y., 2014. Microbiote intestinal. Bull. Acad. Natle Méd. 198 (9), 1667-1684.
- Duhoux E. et Nicole M., 2004. Biologie Végétale : Associations et interactions chez les plantes. Dunod, Paris. p 2-10.
- Gharbi I., Guettari M., Chroudi A., Houcine Touati H. et Hamza S., 2020. Technologie de désinfection dans les hôpitaux : Effets nocifs des UVC. La Tunisie Medicale 98, 434-441.
- Guerre P., Galtier P. et V. Burga V., 1996. Les aflatoxicoses chez l'animal : des manifestations cliniques aux mécanismes d'action. Revue Méd. Vét. 147 (7), 497 -518.
- Morgavi D.P., Kelly W.J., Janssen P.H. et Attwood G.T. 2013. La (méta) génomique des microorganismes du rumen et ses applications à la production des ruminants. INRA Prod. Anim. 26 (4), 347-362.
- Landman C. et Quévrain E., 2016. Le microbiote intestinal: description, rôle et implication physiopathologique. La Revue de médecine interne 37, 418-423.
- La Scola B., 2015. Nouvelle technique d'étude du microbiote : la culturomique A new technique for microbiota study: Revue Francophone des Laboratoires Culturomics 469, 83-87.
- Le Gallou F. et D. Lepelletier D., 2017. Contrôles particuliers et microbiologiques de l'air et contrôles microbiologiques des surfaces dans les établissements de santé. EMC - Biologie médicale 12, 1-11.
- Lin T.F., Huang H.I., Shen F.T. et Young, C.C., 2006. The protons of gluconic acid are the major factor responsible for the dissolution of tricalcium phosphate by *Burkholderia cepacia* CC-A174. Bioresource Technology 97(7), 957-960.
- Plagellat C., 2004. Origines et flux de biocides et de filtres UV dans les stations d'épuration des eaux usées. Thèse de doctorat de l'Université Lausanne, France.

Perry J.J., Staley J.T. et Lory S., 2004. Microbiologie: cours et questions de révision. Dunod. Paris. p 585-665.

Plovier H. et Cani P.D., 2017. *Akkermansia muciniphila*, une bactérie pour lutter contre le syndrome métabolique Optimisation des effets bénéfiques et évaluation de la sûreté chez l'homme médecine/sciences 33, 373-92.

Prescott L.M., Wiley J.M. Sherwood L.M. et Woolverton C.J., 2013. Microbiologie. 4^{ème} édition, De Boeck Supérieur s.a., Bruxelles. p 1051-1069.

Roger P.A. et Garcia J-L., 2001. Introduction à la microbiologie du sol. Polycopié de cours Université de Provence, Université de la Méditerranée, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Luminy. p191.

Tortora G.J., Funke B.R. et Case C.L., 2003. Introduction à la microbiologie. Edition du Renouveau pédagogique. Québec. p 823-847.

Yazigi A., Gaborit B., Nogueira J.P., Butler M-E. et Andreelli F., 2008. Rôle de la flore intestinale dans l'insulinorésistance et l'obésité. Presse Med. 37, 1427-1430.

Zened A., Forano E., Delbes C., Verdier-Metz I., Morgavi D., Popova M., Ramayo-Caldas Y., Bergonier D., Meynadier A. et Marie-Etancelin C., 2020. Les microbiotes des ruminants : état des lieux de la recherche et impacts des microbiotes sur les performances et la santé des animaux. INRAE Productions Animales 33 (4), 249-260.