

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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

Université de RELIZANE
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences Biologiques



POLYCOPIÉ DE COURS

Destiné aux étudiants de la Deuxième Année
Filière : Ecologie & environnement

Intitulé

Microbiologie

Elaboré par :

Dr. SI MOHAMMED Abdesselem

Année universitaire : 2023/2024



Table des matières

	Page
1. Introduction à la microbiologie	1
2. Historique	1
3. Place des micro-organismes dans le monde vivant	13
3.1. Classification de Haeckel	13
3.2. Distinction entre cellules eucaryotes et procaryotes selon Chatton	14
3.3. Classification selon Murray	14
4.3. Classification à cinq règnes	14
4. Caractéristiques générales de cellules procaryotes / cellules eucaryotes	15
5. La cellule bactérienne.....	16
5.1. Définition de bactérie	16
5.2. Techniques d'études et d'observation de cellule bactérienne	17
5.2.1. L'observation à l'état frais	17
5.2.2. L'observation de frottis séchés, fixés et colorés	19
5.2.3. Les méthodes immuno-cytochimiques.....	20
6. Morphologie cellulaire	21
6.1. Formes des cellules bactériennes	21
6.1.1. Bactéries de forme sphérique, arrondies ou cocci.....	21
6.1.2. Bactéries de forme cylindrique ou en bâtonnet.....	21
6.1.3. Bactéries de forme spiralée :	21
6.1.4. Forme filamenteuse :	21
6.2. Taille.....	21
6.3. Associations cellulaires	22
7. Structure bactérienne	23
7.1. La Paroi	24
7.1.1. Composition de la Paroi	24
A. Les peptidoglycanes	24
B. Les acides teichoïques	26
C. Les lipoprotéines.....	26
D. Les protéines de surface	26
7.2. La membrane	28
7.3. Le cytoplasme	28



7.4. Appareil nucléaire	29
7.5. ARN et ribosomes	29
7.6. Les plasmides	29
7.7. La capsule.....	29
7.8. Les flagelles.....	30
7.9. Pili	30
7.10. Les formes de résistance (spores).....	31
8. Nutrition bactérienne.....	31
8.1. Les bactéries phototrophes ou photosynthétiques.....	31
8.1.1. Les bactéries photoautotrophes	32
A. Les bactéries photolithotrophes	32
8.2. Les bactéries chimiotrophes ou chimiosynthétiques.....	33
9. Besoins élémentaires	34
<input type="checkbox"/> Source de carbone.....	34
<input type="checkbox"/> Source d'azote	34
<input type="checkbox"/> Autres éléments minéraux	34
<input type="checkbox"/> Besoins spécifiques (facteurs de croissance).....	35
A. Température.....	36
<input type="checkbox"/> Les mésophiles	36
<input type="checkbox"/> Les psychrophiles	36
<input type="checkbox"/> Les thermophiles :	36
<input type="checkbox"/> Les thermophiles extrêmes ou hyper thermophiles :	36
B. Le pH :	36
10. Courbe de croissance.....	37
10.1. Phénomène de diauxie.....	38
11. Méthodes de mesure de la croissance bactérienne	39
11.1. Mesure du nombre de cellule bactérienne	39
A. Comptage avec lames	39
B. Méthode des dilutions.....	40
<input type="checkbox"/> Dénombrement en milieu solide.....	40
12. Taxonomie bactérienne	41
13. Notions de mycologie.....	43
13.1. Mycologie (levure et moisissure).....	43
13.1.1. Morphologie & structure cellulaire	43



13.1.2. Croissance et reproduction	46
13.1.3. Reproduction	48
A. Reproduction asexuée.....	48
B. La reproduction sexuée.....	49
13.1.4. Culture au laboratoire.....	50
13.1.5. Classification des champignons	51
C. Les Ascomycètes (Ascomycota)	55
D. Les Basidiomycètes (Basidiomycota)	57
E. Les Zygomycètes (Zygomycota)	59
F. Les Deutéromycètes (Deuteromycota).....	60
13.1.6. Intérêt des champignons.....	65
14. Notion de virologie.....	66
14.1. Définition des virus et des virions.....	66
14.1. Définition des virus et des virions.....	67
14.2. Structure des virus et des bactériophages.....	68
A. Structure des virus	68
B. Structure des bactériophages	70
14.3. La systématique virale.....	70
14.4. Les génomes viraux.....	71
14.5. Le cycle viral	72
A. L'attachement.....	72
B. Pénétration	72
C. La décapsidation	73
D. La réplication.....	73
E. L'assemblage et la maturation	74
F. La libération des virus.....	74
14.6. La restriction virale	75

Liste des figures

	Page
Figure 1. Les différentes branches de la microbiologie.....	1
Figure 2. Antoni Van Leeuwenhoek et son microscope.....	2
Figure 3. Portrait de Louis Pasteur	2
Figure 4. Louis Pasteur lors de la vaccination de Joseph Meister	3
Figure 5. Portrait de Robert Koch	4
Figure 6. Coloration de Gram et portrait de Hans Gram	4
Figure 7. Virus de la mosaïque du Tabac et portrait d' Ivanovski et Beijerinck.....	5
Figure 8. Portrait de David Hendricks Bergey	6
Figure 9. Portrait de Frederick Griffith	6
Figure 10. Portrait de Chain, Florey et Flemming.....	7
Figure 11. Portrait de Lederberg et Tatum	8
Figure 12. Bactériophage T, portrait de Lederberg et Zinder.....	9
Figure 13. Jacob (assis) et Monod à l'Institut Pasteur en 1971.....	10
Figure 14. Portrait de Barre-Sinoussi et Montagnier.....	11
Figure 15. Portrait de Karry Mullis	11
Figure 16. SARS-CoV-2 coronavirus.....	12
Figure 17. Coloration à l'encre de Chine des bactéries avec capsules.....	17
Figure 18. Microscopie de Bactéries Gram + vs Bactéries Gram -	18
Figure 19. Mycobacterium tuberculosis (en rose) après coloration de Ziehl Neelsen	18
Figure 20. Mise en évidence des spores (Bacillus subtilis).....	19
Figure 21. Les différentes formes et associations bactériennes.....	22
Figure 22. Structure bactérienne (Eléments constants/inconstants)	23
Figure 23. Peptidoglycane, composant principal de la paroi bactérienne	24
Figure 24. Structure du peptidoglycane.....	25
Figure 25. Structure de la paroi (Bactérie Gram + vs Gram -).....	26
Figure 26. Différentes ciliatures	30
Figure 27. Forme, position et déformation de la spore.....	31
Figure 28. Courbe de croissance bactérienne	37
Figure 29. Courbe de croissance bactérienne lors du phénomène de diauxie	38
Figure 30. La cellule de Malassez	39
Figure 31. Structure de la cellule fongique.....	44
Figure 32. Thalle siphonné et thalle cloisonné	45
Figure 33. Thalle levuriforme.....	45
Figure 34. Flux cytoplasmique	47

Figure 35. Les types de thallospores	48
Figure 36. Les cellules issues de reproduction sexuée	49
Figure 37. Thalle eucarpique chez les Chytridiomycètes	53
Figure 38. Cycle de reproduction des Oomycètes	54
Figure 39. Ascocarpe de type "Périthèce"	55
Figure 40. Ascocarpe de type "Apothécie"	55
Figure 41. Ascocarpe de type "Cleistothèce"	55
Figure 42. Reproduction sexuée et asexuée chez les Ascomycètes.....	56
Figure 43. Morphologie du Basidiomycète	57
Figure 44. Cycle de reproduction des Basidiomycètes.....	58
Figure 45. Cycle de vie des Zygomycètes	59
Figure 46. Quelques Deutéromycètes et conidiophores	62
Figure 47. Différence entre Endomycorhizes et Ectomycorhizes	63
Figure 48. Processus de formation des spores	64
Figure 49. Structure du virus	69
Figure 50. Différents types de virus	69
Figure 51. Structure du bactériophage.....	70
Figure 52. Les types de génomes viraux	71
Figure 53. Les différentes étapes du cycle viral	74

Avant-propos

La microbiologie est une discipline scientifique fondamentale qui étudie les micro-organismes tels que les bactéries, les virus, les champignons et les protozoaires. Ces micro-organismes jouent un rôle essentiel dans de nombreux processus biologiques et ont un impact significatif sur la santé humaine, l'agriculture, l'environnement et l'industrie.

L'étude de la microbiologie a connu des avancées majeures au cours des dernières décennies grâce aux progrès technologiques dans le domaine de la biologie moléculaire, de la génomique et de la bioinformatique. Ces avancées ont permis une meilleure compréhension de la diversité microbienne, de leur physiologie, de leur écologie et de leur génétique.

La microbiologie joue un rôle crucial dans de nombreux domaines. En médecine, elle est essentielle pour comprendre les mécanismes de pathogénicité des agents infectieux, développer de nouveaux traitements antimicrobiens et concevoir des vaccins. Dans le domaine de l'agriculture, la microbiologie est importante pour améliorer la productivité des cultures, contrôler les maladies des plantes et promouvoir des pratiques agricoles durables. Sur le plan environnemental, elle est cruciale pour comprendre le rôle des micro-organismes dans le cycle des éléments nutritifs, la dégradation des polluants et la préservation de la biodiversité.

La microbiologie est également un domaine clé dans l'industrie alimentaire, où elle est utilisée pour produire des aliments fermentés, contrôler la qualité microbiologique des produits alimentaires et assurer la sécurité alimentaire. De plus, elle est essentielle dans l'industrie pharmaceutique pour la production de médicaments, l'ingénierie génétique de micro-organismes et le développement de nouvelles thérapies.

Enfin, la microbiologie est un domaine de recherche fondamental qui contribue à élargir nos connaissances sur le monde microbien et à explorer de nouvelles applications potentielles dans divers domaines.

Ce polycopié offre une introduction complète à la microbiologie, en abordant les principes fondamentaux de la discipline, les méthodes d'étude des micro-organismes, leur diversité, leur physiologie, leur écologie et leur interaction avec les autres organismes. Nous espérons qu'il sera utile aux étudiants et à tous ceux qui s'intéressent à ce domaine passionnant et en constante évolution.

1. Introduction à la microbiologie

Les microbes, également connus sous le nom de micro-organismes, sont un groupe d'organismes vivants microscopiques qui ne sont pas visibles à l'œil nu. Malgré cette caractéristique commune, ils présentent une grande diversité en termes de morphologie, physiologie, mode de reproduction et écologie. La microbiologie est la discipline scientifique qui se consacre à l'étude de ces organismes microscopiques, et elle est subdivisée en différentes branches en fonction du type de microbe étudié.

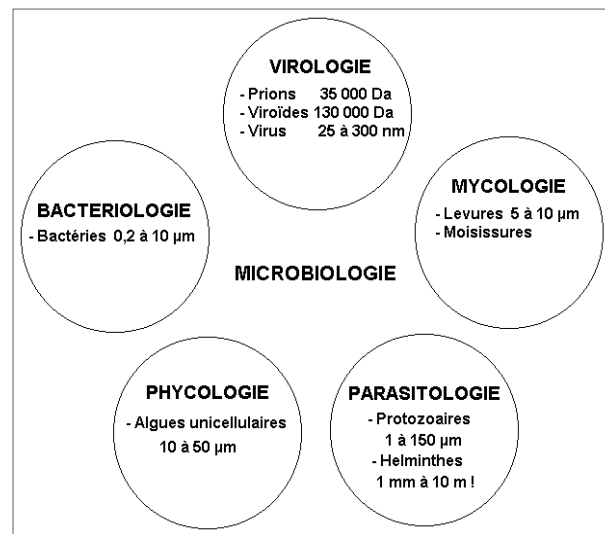


Figure 1. Les différentes branches de la microbiologie

2. Historique

- Le commerçant et naturaliste Néerlandais : **Antoni van Leeuwenhoek** (1632-1723) observe et décrit en 1676 des microorganismes dans des échantillons d'eau, de décoctions de foin et de salive. Il a décrit ces organismes comme des "animalcules". Il a été le premier à observer des bactéries, des protozoaires et des algues grâce ses propres microscopes fabriqués à partir de lentilles qu'il a polies lui-même. Ses microscopes avaient un pouvoir grossissant allant jusqu'à 270 fois, ce qui était remarquable pour l'époque.

Les observations de Van Leeuwenhoek ont en effet révolutionné la science et ouvert la voie à la microbiologie. Parmi ses observations les plus importantes, on peut citer :

- ✓ En 1676, il a observé des bactéries dans des échantillons d'eau.
- ✓ En 1677, il a observé des protozoaires dans des décoctions de foin.
- ✓ En 1683, il a observé des algues dans de l'eau de pluie.
- ✓ En 1684, il a observé des spermatozoïdes humains.

Les observations de van Leeuwenhoek ont eu un impact majeur sur la compréhension de la nature. Elles ont montré que le monde est peuplé d'organismes invisibles à l'œil nu. Elles ont également contribué à la compréhension des maladies infectieuses. Van Leeuwenhoek est considéré comme le "père de la microbiologie". Il est l'un des pionniers de cette science moderne.

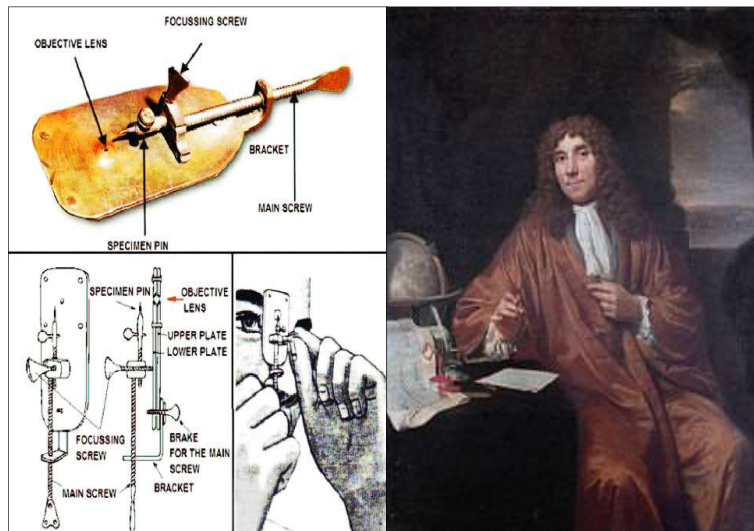


Figure 2. Antoni Van Leeuwenhoek et son microscope

- En 1857, le chimiste et physicien Français : **Louis Pasteur** (1822-1895) est chargé par les brasseurs du nord de la France de résoudre des problèmes de fermentation du sucre en acide lactique. Il commence par observer que la fermentation ne se produit pas dans un liquide stérilisé. Il en conclut que la fermentation est due à un microorganisme, qu'il parvient à cultiver et à identifier comme étant une bactérie du genre *Lactobacillus*. Il participe à la remise en cause de la théorie de la génération spontanée (apparition d'organismes vivants à partir de matière non vivante).

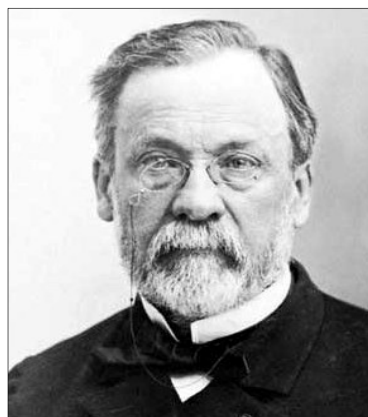


Figure 3. Portrait de Louis Pasteur

- Pasteur a commencé ses recherches sur la rage en 1877. Il a découvert que le virus de la rage se trouve dans la salive des animaux infectés. Il a également découvert que le virus peut être atténué en le cultivant dans des conditions spécifiques. En 1885, Pasteur a testé son vaccin pour la première fois sur un jeune garçon, Joseph Meister, qui avait été mordu par un chien enragé. Le vaccin a été un succès et Meister a survécu. La découverte du vaccin contre la rage a été une avancée majeure dans la médecine. Elle a permis de sauver des millions de vies et a contribué à éradiquer la rage dans de nombreuses régions du monde.



Figure 4. Louis Pasteur lors de la vaccination de Joseph Meister

- En 1876 : **Robert Koch** (1843-1910) a isolé *Bacillus anthracis*, la bactérie responsable du charbon, à partir de tissus d'animaux infectés. Il a ensuite cultivé cette bactérie sur de la gélatine, ce qui a permis d'observer sa croissance et sa morphologie. Koch a également montré que cette bactérie était capable de provoquer la maladie chez des animaux sains lorsqu'elle était inoculée.

En 1882, Koch a découvert *Mycobacterium tuberculosis*, la bactérie responsable de la tuberculose. Il a utilisé les mêmes méthodes qu'il avait utilisées pour le charbon pour cultiver et étudier cette bactérie. Koch a montré que *Mycobacterium tuberculosis* était également capable de provoquer la maladie chez des animaux sains.

Les postulats de Koch, qui ont été publiés pour la première fois en 1884, sont une série de critères qui peuvent être utilisés pour établir qu'une bactérie est l'agent causal d'une maladie infectieuse. Ces postulats sont les suivants :

1. Le micro-organisme doit être présent dans tous les individus qui présentent la maladie, mais absent des individus sains.
2. Le micro-organisme doit pouvoir être isolé et cultivé en milieu de culture pur.

3. Lorsque le micro-organisme cultivé est inoculé à un animal sain, il doit provoquer la maladie chez cet animal.
4. Le micro-organisme doit être ré-isolé de l'animal infecté.

Les postulats de Koch ont été d'une importance capitale pour le développement de la médecine moderne. Ils ont permis de mettre en évidence le rôle des bactéries dans les maladies infectieuses et ont conduit au développement de nouveaux traitements et vaccins. Robert Koch est considéré comme le père de la bactériologie médicale et moderne à travers ses travaux sur le charbon et la tuberculose qui ont révolutionné notre compréhension des maladies infectieuses.

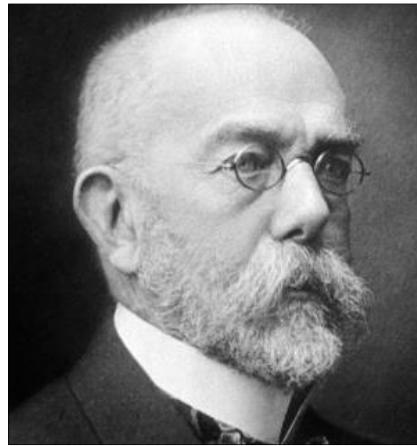


Figure 5. Portrait de Robert Koch

- En 1884, le bactériologiste Danois : **Hans Christian Gram** (1853-1928) a développé la technique de coloration qui porte son nom, la méthode de coloration de Gram. Cette méthode est encore largement utilisée aujourd'hui pour différencier les bactéries en deux groupes principaux, les bactéries à Gram positif et les bactéries à Gram négatif, en fonction de la structure de leur paroi cellulaire.

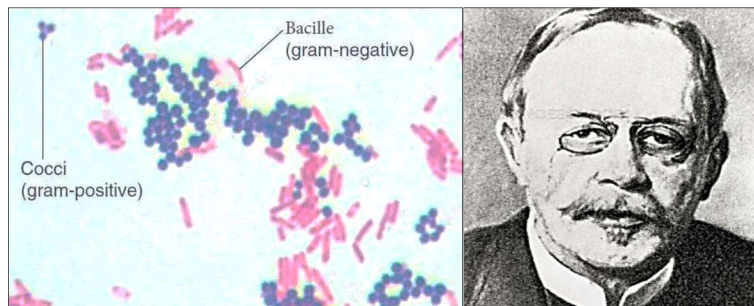


Figure 6. Coloration de Gram et portrait de Hans Gram

- En 1892, le Russe **Dmitri Ivanovski** a remarqué que le filtrat d'extraits de feuilles de tabac infectées par la maladie de la mosaïque du tabac était encore infectieux. Il a conclu que la maladie était causée par un agent infectieux qui était plus petit que les bactéries et pouvait passer à travers des filtres qui retenaient les bactéries.

En 1898, le Néerlandais **Martinus Beijerinck** a confirmé les observations d'Ivanovsk. Il a également appelé l'agent infectieux "virus", du latin pour "poison". Il a proposé que les virus soient des entités biologiques distinctes des bactéries. La découverte des virus a eu un impact profond sur la compréhension des maladies infectieuses. Elle a conduit à la découverte de nombreux autres virus, y compris les virus de la poliomyélite, de la rougeole, de la grippe et du VIH

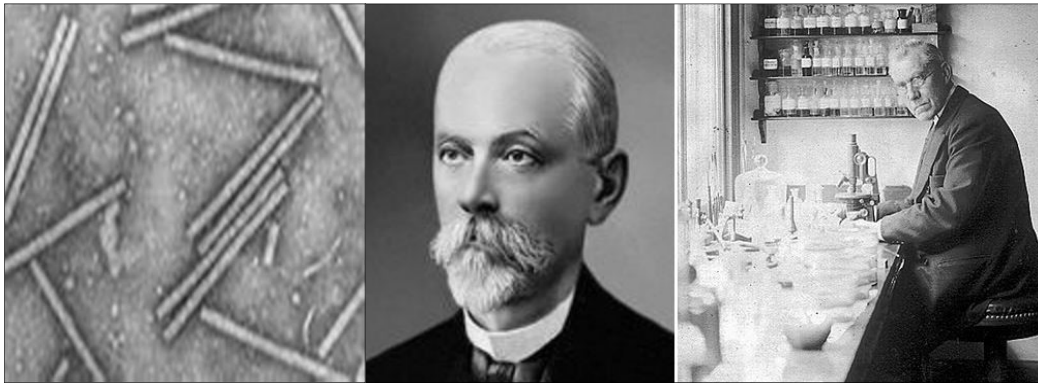


Figure 7. Virus de la mosaïque du Tabac et portrait d' Ivanovski et Beijerinck

- La première édition du manuel de **David Hendricks Bergey** intitulée « Manual of Determinative Bacteriology » est publiée en 1923. Ce manuel est une référence en matière de classification des bactéries et est considéré comme l'un des ouvrages les plus importants de la bactériologie.

Bergey a commencé à travailler sur le manuel en 1917, avec l'aide d'une équipe de collaborateurs. Le manuel a été un succès immédiat et a été révisé et mis à jour à plusieurs reprises depuis lors. La 10^{ème} édition, publiée en 2020, est le manuel de référence le plus complet sur la classification des bactéries.

- ✓ Il s'agit d'un ouvrage de 800 pages, divisé en 12 chapitres.
- ✓ Il décrit plus de 2 000 espèces de bactéries.
- ✓ Il utilise un système de classification basé sur les propriétés morphologiques, physiologiques et chimiques des bactéries.

Le manuel de Bergey a eu un impact considérable sur le développement de la bactériologie. Il a contribué à la compréhension de la diversité des bactéries et a permis aux scientifiques de classer et d'identifier les bactéries avec plus de précision.

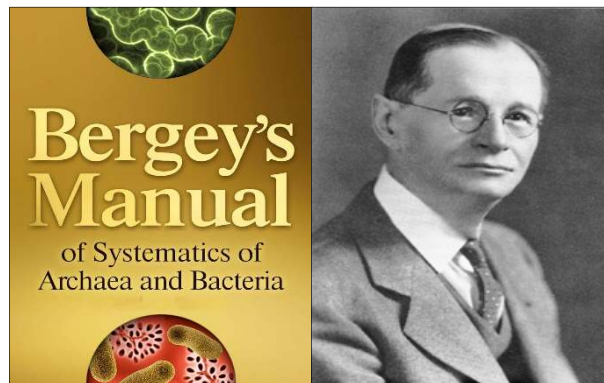


Figure 8. Portrait de David Hendricks Bergey

- En 1928, le médecin et bactériologue Britannique : **Frederick Griffith** découvre la transformation bactérienne, un processus par lequel une bactérie peut acquérir du matériel génétique d'une autre bactérie. La conjugaison bactérienne est un processus différent, par lequel deux bactéries s'accouplent et échangent du matériel génétique. Elle a été découverte en 1946 par Joshua Lederberg et Edward Tatum.

L'expérience de Griffith a montré qu'en injectant à une souris des pneumocoques de souche R ("rugueux" et non virulents) ainsi qu'une petite quantité de pneumocoques S ("lisses", encapsulés et virulents) tués, la souris meurt et on récupère des pneumocoques des deux souches dans son sang. Griffith a conclu que les pneumocoques S tués avaient transmis à la souche R leur virulence, ce qui a permis à la souche R de devenir virulente et de tuer la souris. Il a appelé ce phénomène "transformation".

L'expérience de Griffith a été une étape importante dans la compréhension de la transmission des gènes entre les bactéries. Elle a conduit à la découverte de la recombinaison génétique, un processus qui est essentiel à l'évolution des bactéries.



Figure 9. Portrait de Frederick Griffith

- En 1929, le médecin, biologiste et pharmacologue Britannique : **Alexander Fleming** a observé par hasard que des colonies de staphylocoques, une bactérie responsable de nombreuses infections, étaient détruites autour de moisissures de *Penicillium notatum*. Il a soupçonné que la moisissure produisait une substance qui inhibait la croissance des bactéries. Il a isolé et nommé cette substance « pénicilline ». La pénicilline a été initialement considérée comme trop difficile à produire pour être utilisée à des fins médicales. Cependant, dans les années 1940, **Howard Florey** et **Ernst Chain**, travaillant à l'Université d'Oxford, ont développé des méthodes pour produire la pénicilline en grandes quantités. La pénicilline a été utilisée avec succès pour traiter les infections bactériennes, y compris la pneumonie, la septicémie et la méningite. Elle a sauvé des millions de vies et a révolutionné le traitement des maladies infectieuses. Fleming, Florey et Chain ont partagé le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1945 pour leur découverte de la pénicilline.



Figure 10. Portrait de Chain, Florey et Fleming

- En 1946, les deux scientifiques américains **Joshua Lederberg** et **Edward Tatum** ont mis en évidence la conjugaison bactérienne. Cette découverte a révolutionné la génétique bactérienne et a permis de comprendre comment le matériel génétique peut être échangé entre des bactéries.

L'expérience de Lederberg et Tatum consistait à mélanger deux souches de bactéries, l'une résistante à l'antibiotique streptomycine et l'autre résistante à l'antibiotique pénicilline. Ces deux souches étaient également mutantes pour la production de tryptophane, un acide aminé essentiel. Les chercheurs ont constaté que, dans certains cas, des bactéries résistantes aux deux antibiotiques et capables de produire du tryptophane se formaient. Ces bactéries étaient le résultat d'un transfert de matériel génétique entre les deux souches initiales.

Lederberg et Tatum ont montré que ce transfert de matériel génétique était réalisé par un processus appelé conjugaison. Ce processus implique deux types de bactéries :

- ✓ La bactérie donatrice, qui possède un plasmide appelé F. Ce plasmide contient des gènes qui codent pour les protéines nécessaires au processus de conjugaison.
- ✓ La bactérie receveuse, qui ne possède pas de plasmide F.

Le processus de conjugaison commence par l'adhésion des deux bactéries. Le plasmide F de la bactérie donatrice se lie ensuite à la paroi cellulaire de la bactérie receveuse. Le plasmide est ensuite transféré de la bactérie donatrice à la bactérie receveuse.

Le plasmide F peut transférer un ou plusieurs gènes à la bactérie receveuse. Ces gènes peuvent conférer à la bactérie receveuse de nouvelles propriétés, telles que la résistance aux antibiotiques ou la capacité de produire un acide aminé essentiel. La découverte de la conjugaison bactérienne par Lederberg et Tatum a eu un impact majeur sur la génétique bactérienne. Cette découverte a permis de comprendre comment le matériel génétique peut être échangé entre des bactéries et a ouvert la voie à de nouvelles applications, telles que la production de bactéries recombinantes. En 1958, Lederberg et Tatum ont reçu le prix Nobel de physiologie ou médecine pour leurs travaux sur la génétique bactérienne.

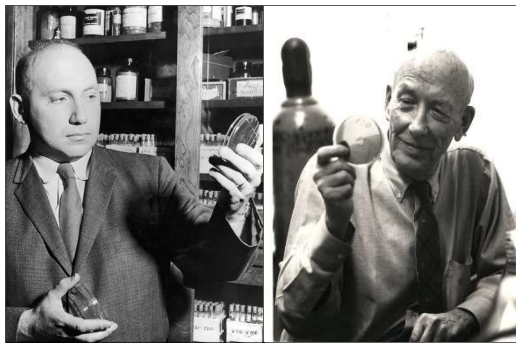


Figure 11. Portrait de Lederberg et Tatum

- En 1952, Les biologistes Américains : **Norton Zinder** et **Esther Lederberg** ont découvert la transduction généralisée, un mécanisme par lequel un virus peut transporter des gènes d'une bactérie à une autre. Cette découverte a été une étape importante dans la compréhension de la génétique des bactéries et a ouvert la voie à de nouvelles recherches sur la manipulation génétique.

- Zinder et Lederberg travaillaient sur un virus appelé phage T1, qui infecte la bactérie *Escherichia coli*. Ils ont découvert que le phage pouvait transporter des fragments d'ADN de la bactérie hôte vers d'autres bactéries.

- Ces fragments d'ADN pouvaient ensuite être intégrés dans le génome des bactéries receveuses, ce qui pouvait entraîner des changements génétiques.

La transduction généralisée est un mécanisme important de la génétique bactérienne. Elle peut être utilisée pour transférer des gènes d'intérêt d'une bactérie à une autre, ce qui peut être utile pour la recherche ou la production industrielle.

Les étapes clés de la transduction généralisée sont les suivantes :

1. Le phage infecte une bactérie hôte.
2. Le phage se réplique dans la bactérie hôte.
3. Au cours de la réplication, le phage peut incorporer des fragments d'ADN de la bactérie hôte dans son propre génome.
4. Le phage se libère de la bactérie hôte.
5. Le phage infecte une autre bactérie.
6. Le phage transfère les fragments d'ADN de la bactérie hôte à la bactérie receveuse.
7. Les fragments d'ADN peuvent être intégrés dans le génome de la bactérie receveuse.

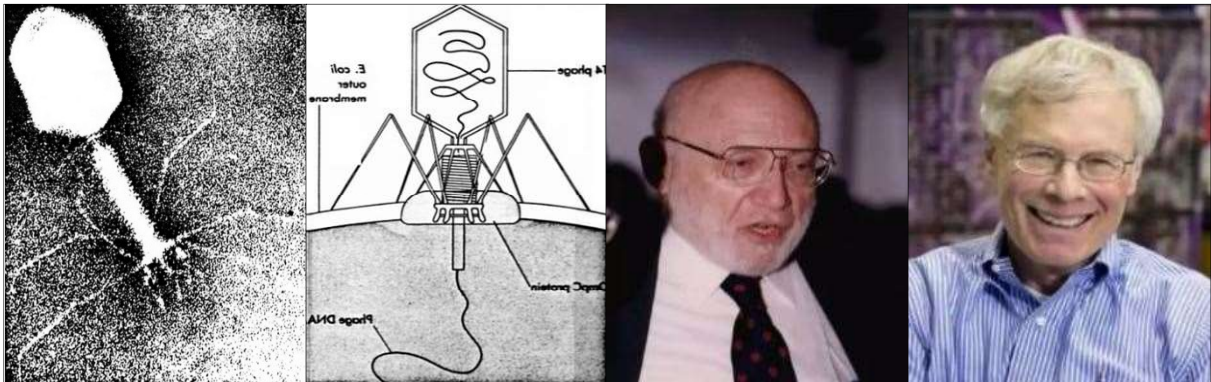


Figure 12. Bactériophage T, portrait de Lederberg et Zinder

- En 1961, Les biologistes et biochimistes Français : **François Jacob** et **Jacques Monod** proposent le modèle de l'opéron pour la régulation des gènes. Ce modèle est basé sur leurs travaux sur l'opéron lactose, une unité génétique qui contrôle la production des enzymes nécessaires à la dégradation du lactose.

L'opéron lactose est constitué de trois gènes de structure, lacZ, lacY et lacA, qui codent pour les enzymes β -galactosidase, lactose perméase et transacétylase. Ces gènes sont régulés par un gène régulateur, lacI, qui code pour une protéine répresseur.

En l'absence de lactose, le répresseur se lie à l'opérateur, une séquence d'ADN située en amont des gènes de structure. Cette liaison empêche l'ARN polymérase de se fixer au promoteur et de commencer la transcription des gènes. En présence de lactose, le lactose se lie au répresseur et le rend inactif. Cela permet à l'ARN polymérase de se fixer au promoteur et de commencer la transcription des gènes de structure.

Le modèle de l'opéron est un modèle général de la régulation des gènes chez les procaryotes. Il a été appliqué à de nombreux autres opérons, y compris l'opéron tryptophane, l'opéron arginine et l'opéron arabinose.

Le modèle de l'opéron a été un modèle révolutionnaire dans la compréhension de la régulation des gènes. Il a permis de comprendre comment les cellules peuvent contrôler l'expression de leurs gènes en fonction de leurs besoins. Les contributions de Jacob et Monod à la biologie moléculaire ont été reconnues par le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1965.



Figure 13. Jacob (assis) et Monod à l'Institut Pasteur en 1971

- En 1981, aux États-Unis. Les patients présentaient une combinaison de symptômes inhabituels, notamment une perte de poids, une fièvre, une diarrhée, une fatigue et des infections opportunistes. Les médecins ont rapidement compris qu'il s'agissait d'une nouvelle maladie grave, mais ils ignoraient sa cause.

En 1983, une équipe de chercheurs de l'Institut Pasteur, dirigée par **Luc Montagnier** et **Françoise Barré-Sinoussi**, a isolé un nouveau virus dans le sang d'un patient atteint du sida. Ce virus, qu'ils ont nommé LAV (lymphadenopathy-associated virus), était un rétrovirus, un type de virus qui infecte les cellules en les obligeant à produire de nouvelles copies du virus.

Les travaux de Montagnier et Barré-Sinoussi ont été confirmés par d'autres équipes de recherche, et le LAV a été renommé VIH (virus de l'immunodéficience humaine). La découverte du VIH a permis de comprendre que le sida est une maladie infectieuse, transmise par contact sexuel, par le sang ou de la mère à l'enfant.

La découverte du VIH a eu un impact considérable sur la lutte contre le sida. Elle a permis de développer des traitements antirétroviraux, qui permettent aux personnes vivant avec

le VIH de vivre une vie normale. Elle a également permis de développer des programmes de prévention, qui ont permis de réduire la transmission du virus.

En 2008, Montagnier et Barré-Sinoussi ont reçu le prix Nobel de médecine pour leur découverte du VIH.



Figure 14. Portrait de Barre-Sinoussi et Montagnier

- En 1983, **Kary Mullis**, un biochimiste américain, est crédité de la conception de la réaction en chaîne par polymérase (PCR). La PCR est une technique qui permet de copier de très petites quantités d'ADN, ce qui permet de détecter du matériel génétique qui serait autrement invisible.

La PCR a eu un impact sur de nombreux domaines de la science et de la technologie. En médecine, la PCR est utilisée pour diagnostiquer des maladies génétiques, détecter des agents infectieux et surveiller l'efficacité du traitement. En criminalistique, la PCR est utilisée pour analyser les preuves ADN des scènes de crime. En biotechnologie, la PCR est utilisée pour cloner des gènes, ingénier des organismes génétiquement modifiés et développer de nouveaux tests de diagnostic. Et en archéologie, la PCR est utilisée pour analyser l'ADN ancien pour en apprendre sur l'histoire et l'évolution des populations humaines. En 1993, il est lauréat du prix Nobel de chimie contributions au développement de méthodes en chimie de l'ADN et pour son invention de la méthode de réaction en chaîne par polymérase.



Figure 15. Portrait de Karry Mullis

- En 2019, une maladie infectieuse virale qui s'est propagée dans le monde entier depuis sa découverte fin 2019. Elle est causée par le virus **SARS-CoV-2**.

Le virus se propage principalement par les gouttelettes respiratoires produites lorsqu'une personne infectée tousse ou éternue. Il peut également se propager par contact avec des surfaces contaminées. Les symptômes du COVID-19 comprennent la fièvre, la toux, la fatigue, l'essoufflement, les douleurs musculaires, les maux de tête, les maux de gorge, la perte du goût ou de l'odorat, la congestion ou un écoulement nasal, la diarrhée et les vomissements. Certaines personnes infectées ne présentent aucun symptôme. La COVID-19 peut être grave, en particulier pour les personnes âgées et les personnes atteintes de maladies chroniques. Elle peut entraîner une pneumonie, une insuffisance rénale, une septicémie et même la mort.

Les chercheurs ont fait d'importantes découvertes sur le COVID-19. Ils ont identifié le virus, compris son mode de transmission, et mis au point des tests de diagnostic efficaces. Ils ont également développé des traitements et des vaccins prometteurs. Malgré les défis, les chercheurs ont fait des progrès remarquables dans la compréhension et la lutte contre le COVID-19.

- ✓ En janvier 2020, les chercheurs de l'Institut Pasteur ont identifié le virus SARS-CoV-2, responsable de la COVID-19.
- ✓ En février 2020, des chercheurs chinois ont publié une étude montrant que le virus se transmettait par les gouttelettes respiratoires.
- ✓ En mars 2020, des chercheurs américains ont mis au point un test de diagnostic rapide et efficace pour le COVID-19.
- ✓ En avril 2020, des chercheurs britanniques ont commencé les essais cliniques d'un vaccin contre le COVID-19.
- ✓ En mai 2020, des chercheurs américains ont mis au point un traitement antiviral contre le COVID-19.

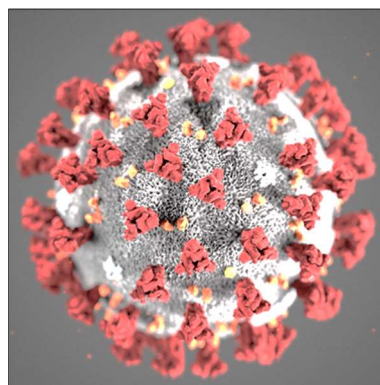


Figure 16. SARS-CoV-2 coronavirus

3. Place des micro-organismes dans le monde vivant

Depuis leur découverte par Anthoni van Leeuwenhoek, la place des bactéries dans le monde vivant a beaucoup évolué. Le botaniste suédois Carl von Linné (1735) a élaboré une première classification des organismes vivants en deux règnes, Plantae et Animalia.

En 1857, Karl von Nägeli a proposé de classer les bactéries et les champignons dans le règne des plantes. Cette évolution dans la classification des organismes vivants montre comment notre compréhension de la diversité biologique a progressé au fil du temps. Au départ, les bactéries étaient considérées comme des plantes en raison de leur capacité à photosynthétiser, mais des découvertes ultérieures ont révélé leurs différences fondamentales par rapport aux plantes et aux animaux.

Aujourd'hui, nous savons que les bactéries sont des organismes unicellulaires prokaryotes qui se distinguent à la fois des plantes et des animaux. Leur structure cellulaire, leur mode de reproduction et leur métabolisme les placent dans un règne distinct, appelé Monera ou Bacteria. Cette classification plus précise reflète notre compréhension actualisée de la diversité du monde microbien.

Les bactéries jouent un rôle essentiel dans de nombreux processus biologiques, tels que la décomposition des matières organiques, la fixation de l'azote atmosphérique et la production d'antibiotiques. Leur diversité génétique et métabolique en fait des acteurs clés dans les écosystèmes terrestres et aquatiques.

Comprendre la place des bactéries dans le monde vivant est donc crucial pour apprécier la complexité et l'interdépendance de tous les organismes sur Terre. Grâce aux progrès de la science et de la technologie, nous continuons à découvrir de nouvelles espèces de bactéries et à explorer leur rôle dans des domaines tels que la médecine, l'agriculture et l'environnement.

En résumé, bien que la classification initiale des bactéries ait été influencée par notre compréhension limitée à l'époque, des avancées scientifiques ultérieures ont permis de reconnaître leur place distincte dans le règne du vivant. Cette évolution témoigne de l'importance de remettre en question nos idées préconçues et d'intégrer de nouvelles connaissances pour mieux comprendre le monde qui nous entoure.

3.1. Classification de Haeckel

Ernst Haeckel (biologiste et philosophe allemand) a joué un rôle majeur dans la classification du monde vivant. En 1866, il a proposé une division en trois règnes : le règne animal, le règne végétal et le règne des protistes. Ce dernier regroupe les algues, les protozoaires, les champignons et les bactéries. Cette classification a été importante pour mieux

comprendre la diversité du monde vivant et a posé les bases de la biologie moderne. Les protistes, en particulier, sont des organismes souvent méconnus mais qui jouent un rôle essentiel dans de nombreux écosystèmes. Grâce aux travaux d'Haeckel, nous avons pu commencer à appréhender la complexité et la richesse de la nature, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses découvertes ultérieures.

3.2. Distinction entre cellules eucaryotes et procaryotes selon Chatton

Édouard Pierre Léon Chatton, biologiste et zoologiste français, a joué un rôle crucial en 1937 grâce à sa découverte de la différence entre la cellule eucaryote et la cellule procaryote. C'est grâce à l'invention du microscope électronique qu'il a pu mettre en opposition ces deux types de cellules, ouvrant ainsi la voie à une meilleure compréhension de la biologie cellulaire. Cette avancée a eu un impact significatif sur de nombreux domaines de la science, notamment la microbiologie et la recherche médicale. Grâce aux travaux de Chatton, les scientifiques ont pu approfondir leur compréhension des organismes vivants et de leur fonctionnement au niveau cellulaire, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour la recherche et la médecine.

3.3. Classification selon Murray

Robert George Everitt Murray (microbiologiste et bactériologiste britannique) a apporté une contribution majeure à la classification du monde vivant. En 1968, il a poursuivi les travaux d'E. Chatton en proposant une division en deux règnes : les "Eucaryotae" et les "Procaryotae" (ou "Monera"). Cette classification a eu un impact significatif sur notre compréhension de la diversité biologique et a jeté les bases de la taxonomie moderne. Les "Eucaryotae" comprennent les organismes dont les cellules possèdent un noyau, tels que les animaux, les plantes et les champignons, tandis que les "Procaryotae" regroupent les organismes dépourvus de noyau, comme les bactéries. Cette division a permis de mieux structurer l'étude des organismes vivants et a ouvert la voie à de nombreuses avancées dans le domaine de la biologie.

4.3. Classification à cinq règnes

En 1969, l'écologue et botaniste américain Robert Harding Whittaker a proposé une classification à cinq règnes. Il a regroupé les eucaryotes en quatre règnes distincts : Animal, Végétal, Champignons et Protistes. Les organismes procaryotes, quant à eux, ont été regroupés dans le règne des monères. Cette classification a permis de mieux comprendre la diversité du monde vivant et a été largement adoptée dans le domaine de la biologie.

Grâce à cette approche, il est devenu plus facile de classer et d'étudier les différentes formes de vie sur notre planète. La proposition de Whittaker a donc eu un impact significatif sur la manière dont nous comprenons et étudions la biodiversité.

4. Caractéristiques générales de cellules procaryotes / cellules eucaryotes

Les protistes peuvent être classés en deux groupes principaux : les procaryotes et les eucaryotes. **Les protistes procaryotes** sont caractérisés par une organisation cellulaire simple, sans noyau, où l'ADN est directement en contact avec le cytoplasme. Ce groupe inclut les bactéries. En revanche, **les protistes eucaryotes** présentent une organisation cellulaire plus complexe, avec un noyau contenant l'information génétique portée par l'ADN des chromosomes. Cette distinction entre les deux groupes de protistes est importante pour comprendre la diversité et la complexité des organismes unicellulaires.

Tableau 1. Caractéristiques générales de cellules procaryotes / cellules eucaryotes

Caractéristiques	Cellule Procaryote	Cellule Eucaryote
Taille typique	1-10 µm	10-100 µm
Type de noyau	nucléotide (pas de véritable noyau)	vrai noyau avec double membrane
Division de la cellule	division simple	mitose (réplication de la cellule) méiose (menant à la formation de gamètes)
Organisation génétique		
Membrane nucléaire	Non	oui
Nombre de chromosomes	1 chromosome (Haploïde)	Plusieurs chromosomes Diploïde)
Chromosome circulaire	Oui	non
Histones	Non	oui
Nucléole	Non	oui
Echange génétique	transfert unidirectionnel	fusion de gamètes
ARN et synthèse des protéines	couplé au cytoplasme	synthèse d'ARN dans le noyau synthèse de protéines dans le cytoplasme
Premier acide aminé initiant la synthèse d'une chaîne polypeptidique	méthionine ou N-formylméthionine	méthionine
Structures cellulaires et organites		
Réticulum endoplasmique	Non	oui
Appareil de Golgi	Non	oui
Lysosomes	Non	oui
Mitochondries	Non	oui
Chloroplastes	Non	oui chez les plantes
Microtubules	Non	oui
Paroi cellulaire avec peptidoglycane	Oui	non
Présence de stérols dans les membranes	Non	oui
Endospores	oui, parfois	non
Taille des ribosomes	70 S	80 S, sauf mitochondries et chloroplastes
Localisation des ribosomes	dispersés dans le cytoplasme	dispersés dans le cytoplasme ou liés au réticulum endoplasmique
Constantes de sédimentation des ARN ribosomaux	16S, 23S, 5S	18S, 28S, 5,8S, 5S
Attributs fonctionnels		
Phagocytose	Non	oui, parfois
Pinocytose	Non	oui, parfois
Flux cytoplasmique	Non	oui
Mouvement de la cellule	flagelles faites de flagelline	flagelle et cils faits de tubuline
Site du transport des électrons	membrane cellulaire	membrane des organites

5. La cellule bactérienne

5.1. Définition de bactérie

Les bactéries typiques sont des organismes unicellulaires procaryotes, ce qui signifie qu'elles n'ont pas de noyau organisé et que leur ADN est dispersé dans le cytoplasme. Elles sont également caractérisées par une petite taille, avec une longueur typique de 0,5 à 5 micromètres.

Les bactéries se divisent en deux grands groupes : les **eubactéries** et les **archaebactéries**.

- ✓ Les **eubactéries** sont les bactéries "classiques" et sont les plus nombreuses et les plus diversifiées. Elles sont présentes dans tous les environnements sur Terre, y compris dans l'eau, le sol, l'air et les organismes vivants.
- ✓ Les **archaebactéries** sont un groupe plus petit et moins diversifié, mais elles sont également présentes dans une grande variété d'environnements. Elles sont souvent associées à des environnements extrêmes, tels que les sources chaudes, les zones acides ou les milieux salins.

Ces deux groupes de bactéries englobent nombreuses types tel que :

Les bactéries ubiquitaires : sont des bactéries qui sont présentes dans tous les milieux, qu'ils soient terrestres, aquatiques ou aériens. Elles peuvent survivre dans des conditions très variées, y compris dans des environnements extrêmes, comme les sources chaudes, les déserts ou les océans profonds.

Les bactéries commensales : sont des bactéries qui vivent en association avec un autre organisme, sans lui nuire. Elles sont souvent bénéfiques pour l'hôte, car elles contribuent à sa digestion, à sa défense immunitaire ou à son métabolisme. Par exemple, la flore intestinale est composée de bactéries commensales qui jouent un rôle important dans la digestion des aliments.

Les bactéries pathogènes : sont des bactéries qui provoquent une infection chez l'hôte. Elles peuvent pénétrer dans l'organisme par différentes voies, comme la peau, les muqueuses ou le sang. Les infections bactériennes peuvent être bénignes, comme une angine, ou graves, comme une méningite ou une septicémie.

Les bactéries opportunistes : sont des bactéries commensales qui peuvent provoquer une infection chez un hôte immunodéprimé. En effet, les défenses immunitaires de l'hôte sont affaiblies, ce qui permet aux bactéries opportunistes de se multiplier et de provoquer une infection.

5.2. Techniques d'études et d'observation de cellule bactérienne

La mise au point du premier microscope par Antoni Van Leeuwenhoek au cours du 17^{ème} siècle marque le point de départ de la microbiologie. L'appareil utilisé, constamment amélioré depuis, permet avec des grossissements pouvant aller jusqu'à 2500 (1000 étant l'utilisation courante) d'observer des structures dont la taille est de l'ordre de 1µm, Divers procédés peuvent être utilisés :

5.2.1. L'observation à l'état frais

L'observation à l'état frais est une technique simple qui permet d'observer des bactéries en milieu liquide. Elle consiste à déposer une goutte de culture bactérienne sur une lame, à recouvrir d'une lamelle et à observer au microscope. Cette technique permet d'observer la forme, la taille et le groupement des bactéries. Elle peut également être utilisée pour mettre en évidence la présence de capsules. La coloration à l'encre de Chine est une variante de l'observation à l'état frais qui permet de mettre en évidence les capsules bactériennes. L'encre de Chine est un colorant noir qui ne pénètre pas dans les capsules. Les capsules apparaissent donc sous forme d'un halo clair entourant les corps bactériens.

La coloration à l'encre de Chine est une technique simple et rapide qui peut être utilisée pour identifier les bactéries productrices de capsules.

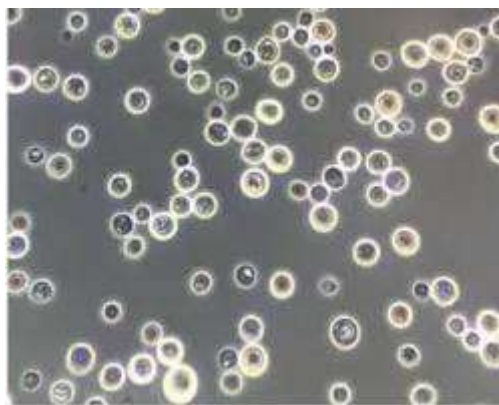


Figure 17. Coloration à l'encre de Chine des bactéries avec capsules

Il existe d'autres méthodes de coloration, chacune ciblant des aspects bactériens particuliers. Voici quelques-unes des plus courantes :

Coloration de Gram : la plus utilisée en microbiologie, elle classe les bactéries en deux groupes principaux : Gram positif et Gram négatif, en fonction de la composition de leur paroi cellulaire.

- ✓ Les bactéries Gram positives ont une paroi épaisse riche en peptidoglycane, qui retient le violet de gentiane, apparaissant violette au microscope.

- ✓ Les bactéries Gram négatives ont une paroi plus mince et ne retiennent pas le violet de gentiane, nécessitant une contre-coloration à la fuschine qui les colore en rose.

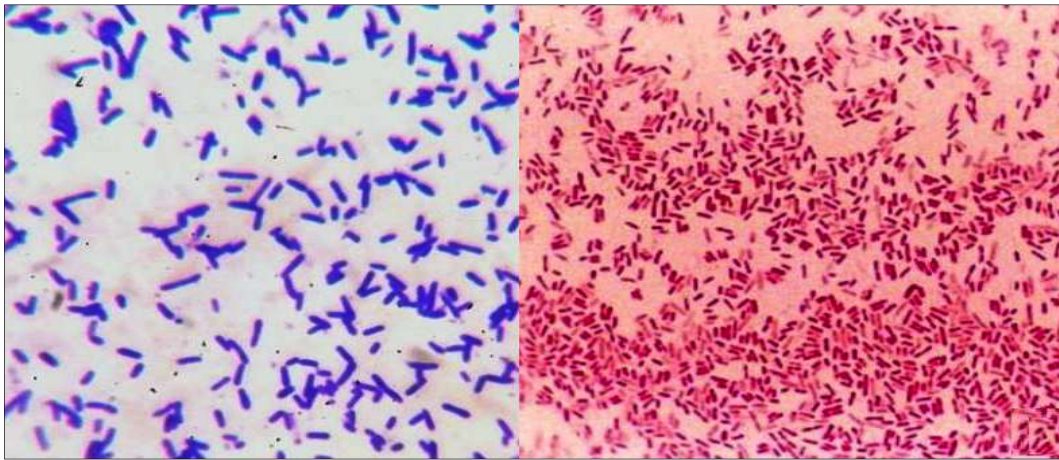


Figure 18. Microscopie de Bactéries Gram + vs Bactéries Gram -

Coloration de Ziehl-Neelsen : identifie les bactéries acido-résistantes, notamment les mycobactéries responsables de la tuberculose et de la lèpre. Ces bactéries retiennent le colorant rouge fuchsine après décoloration à l'acide et aux alcools, apparaissant rouges sur un fond bleu.

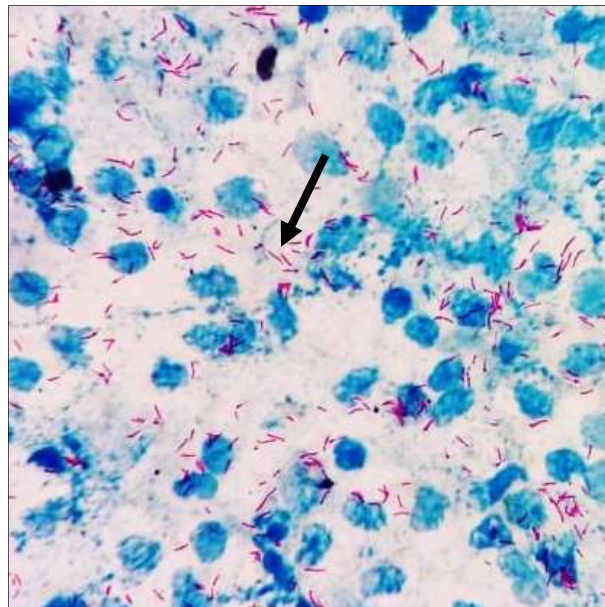


Figure 19. Mycobacterium tuberculosis (en rose) après coloration de Ziehl Neelsen

Coloration au bleu de méthylène : colorant simple et rapide utilisé pour observer la morphologie bactérienne, la taille, l'arrangement et la présence de flagelles. Toutes les bactéries (vivantes) prennent une coloration bleue.

Colorations spécifiques : des colorants ciblent des structures bactériennes particulières, comme les spores (coloration de Schaeffer-Fulton), les flagelles (coloration de Leifson) ou les inclusions cytoplasmiques (coloration au Gram-Weigert).

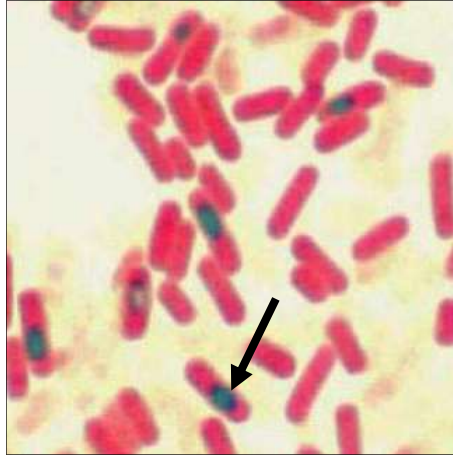


Figure 20. Mise en évidence des spores (*Bacillus subtilis*)

Le choix de la technique de coloration dépend du type d'information recherchée et des caractéristiques suspectées des bactéries présentes dans l'échantillon. La coloration bactérienne est un outil diagnostique crucial en microbiologie, aidant à l'identification des agents pathogènes, à la compréhension de la pathogenèse et à la mise en place d'un traitement antibiotique approprié.

5.2.2. L'observation de frottis séchés, fixés et colorés

L'observation des frottis à l'immersion est une technique de microscopie optique qui permet d'obtenir une image plus nette des structures observées. Elle consiste à placer une goutte d'huile spéciale entre la lentille de l'objectif et la préparation. L'huile a un indice de réfraction proche de celui du verre, ce qui permet de réduire la perte de lumière et d'améliorer la résolution de l'image. L'observation à l'immersion est une technique courante en microbiologie. Elle est utilisée pour observer la forme, la taille et la structure des bactéries, des virus et d'autres microorganismes.

La microscopie électronique est une technique de microscopie qui utilise des électrons au lieu de la lumière pour former l'image. Les électrons ont une longueur d'onde beaucoup plus courte que la lumière, ce qui permet d'obtenir une résolution beaucoup plus importante. La microscopie électronique peut être utilisée pour observer des structures de très petite taille, telles que les virus, les molécules et les structures cellulaires internes.

Il existe deux principaux types de microscopie électronique : **la microscopie électronique en transmission (MET)** et **la microscopie électronique à balayage (MEB)**.

La **MET** est utilisée pour observer des structures en coupe. L'échantillon est coupé en tranches très fines, puis il est transmis à travers un faisceau d'électrons. Les électrons qui sont transmis par l'échantillon sont détectés et forment une image.

La **MEB** est utilisée pour observer la surface d'un échantillon. L'échantillon est balayé par un faisceau d'électrons. Les électrons qui sont diffusés par l'échantillon sont détectés et forment une image.

5.2.3. Les méthodes immuno-cytochimiques

Les méthodes immuno-cytochimiques sont basées sur la réaction spécifique entre un anticorps et son antigène. L'antigène est une molécule présente à la surface ou à l'intérieur d'une cellule, et l'anticorps est une protéine produite par le système immunitaire d'un animal. Lorsque l'anticorps rencontre son antigène, il se lie à lui de manière spécifique et covalente.

Il existe plusieurs techniques immuno-cytochimiques, qui diffèrent par la manière dont l'antigène est révélé.

La méthode de la peroxydase-anti-peroxydase (PAP) est la technique la plus courante. Elle utilise un anticorps marqué à la peroxydase, une enzyme qui catalyse la transformation du peroxyde d'hydrogène en eau et en dioxygène. Lorsque l'anticorps marqué à la peroxydase rencontre son antigène, il se lie à lui et catalyse la transformation du peroxyde d'hydrogène en eau et en dioxygène. La formation de dioxygène peut être détectée par l'utilisation d'un colorant, comme le bleu de bromophénol, qui se colore en brun en présence de dioxygène.

La méthode de la biotine-streptavidine (BS) utilise un anticorps marqué à la biotine, une vitamine qui se lie à la streptavidine, une protéine qui se lie à la biotine. Lorsque l'anticorps marqué à la biotine rencontre son antigène, il se lie à lui et se lie ensuite à la streptavidine. La streptavidine peut être marquée à un colorant fluorescent, qui permet de visualiser la localisation de l'antigène.

Les méthodes fluorescentes utilisent des anticorps marqués à des molécules fluorescentes, comme la fluorescéine ou la rhodamine. Ces molécules absorbent la lumière d'une longueur d'onde donnée et la réémettent sous forme de lumière d'une longueur d'onde différente. La localisation de l'antigène peut être visualisée à l'aide d'un microscope à fluorescence.

6. Morphologie cellulaire

Lorsqu'on observe des bactéries au microscope optique à partir de prélèvements pathologiques ou d'un milieu de culture, on reconnaît rapidement la **forme** des cellules, leurs **dimensions**, les **arrangements** ou les **groupements** qu'elles constituent entre elles. Toutes ces informations définissent la **morphologie bactérienne** et constituent un des critères de reconnaissance et d'identification.

Cette observation minutieuse est cruciale dans le domaine de la microbiologie, car elle permet de distinguer différentes espèces bactériennes et d'identifier des caractéristiques spécifiques pouvant être utiles pour des applications médicales ou industrielles.

La **morphologie bactérienne** peut également fournir des indications sur le mode de reproduction, le potentiel pathogène ou les conditions environnementales préférées des bactéries observées. Ainsi, l'analyse de la morphologie bactérienne revêt une grande importance dans la compréhension et l'étude des micro-organismes.

6.1. Formes des cellules bactériennes

Les bactéries sont des organismes unicellulaires de formes variées. Elles peuvent être sphériques, en forme de bâtonnet ou en spirale.

6.1.1. Bactéries de forme sphérique, arrondies ou cocci : isolées, en chaînette, en amas (nombre variable de cellules). Exemple : Streptocoques Staphylocoques, etc.

6.1.2. Bactéries de forme cylindrique ou en bâtonnet : on en distingue deux principales :

- **Le bâtonnet droit ou bacille (allongée) :** isolée, en chaînette ou en amas, de longueur et de diamètre variables comme : *E. coli*, *Salmonella*, *Bacillus*.
- **Le bâtonnet incurvé ou vibron :** bacille incurvé, en virgule comme : *Vibrio cholerae*.

6.1.3. Bactéries de forme spiralée : spirilles, spirochètes, comme : *Treponema*.

6.1.4. Forme filamenteuse : un groupe particulier de bactéries se rapprochant des moisissures comme : les Actinomycètes.

6.2. Taille

Les bactéries varient énormément en taille, allant de 0,2 μm pour les plus petites, comme *Chlamydia*, à 250 μm pour les plus longues, telles que certains Spirochètes. En moyenne, la taille des bactéries se situe entre 1 et 10 μm . Cette diversité de tailles est remarquable et témoigne de l'incroyable variété de formes et de structures que l'on trouve dans le monde microscopique. Malgré leur petite taille, les bactéries jouent un rôle essentiel dans de nombreux

processus biologiques et environnementaux. Leur capacité à s'adapter à des conditions extrêmes et à évoluer rapidement en fait des organismes fascinants à étudier.

6.3. Associations cellulaires

Les espèces bactériennes peuvent apparaître sous forme de **cellules isolées**, séparées les unes des autres, ou bien en **groupements caractéristiques**. Ces regroupements peuvent prendre différentes formes selon les espèces bactériennes. Par exemple, certaines bactéries peuvent s'associer par **paires**, formant ainsi des duos. D'autres peuvent former des **amas**, regroupant un grand nombre de cellules ensemble. Il existe également des espèces bactériennes qui se regroupent **en chaînettes**, formant ainsi une structure allongée. Enfin, certaines bactéries peuvent apparaître par **quatre**, formant des tétrades. Ces différentes formes de regroupement sont propres à chaque espèce bactérienne et peuvent être utilisées pour les identifier et les étudier en laboratoire.

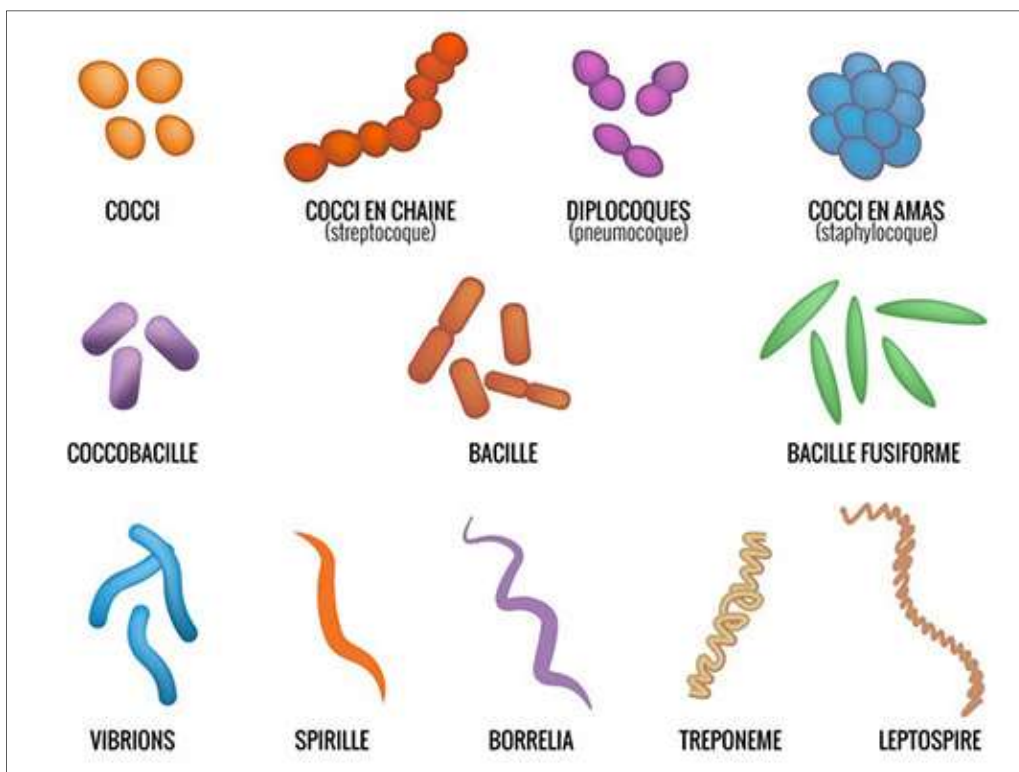


Figure 21. Les différentes formes et associations bactériennes

7. Structure bactérienne

Les bactéries possèdent des **structures constantes** et **obligatoires**, présentes chez toutes les espèces, ainsi que des **éléments inconstants** ou **facultatifs** qui ne se retrouvent que chez certaines bactéries. Ces caractéristiques structurelles sont importantes pour comprendre la diversité et l'adaptation des bactéries à leur environnement. Les éléments constants peuvent jouer un rôle essentiel dans les fonctions vitales des bactéries, tandis que les éléments inconstants peuvent être liés à des adaptations spécifiques à certaines conditions environnementales. Comprendre ces différences structurelles peut avoir des implications importantes en microbiologie, notamment dans le développement de nouvelles stratégies de lutte contre les infections bactériennes.

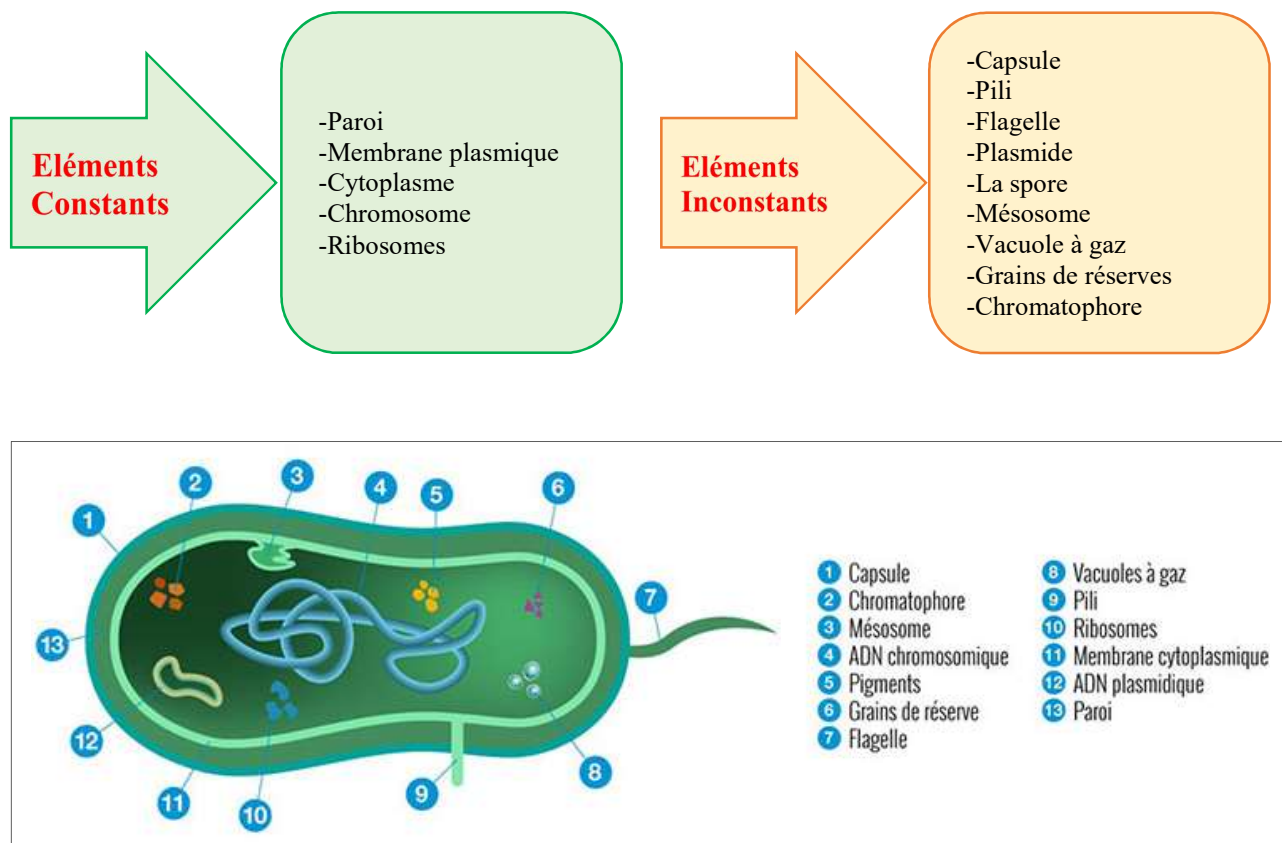


Figure 22. Structure bactérienne (Eléments constants/inconstants)

7.1. La Paroi

La paroi cellulaire des bactéries joue un rôle crucial dans leur intégrité et leur protection contre les variations de pression osmotique. Cette enveloppe rigide est présente chez la plupart des bactéries, mais elle est absente chez les Mollicutes, tels que le Mycoplasma. La paroi cellulaire permet également de distinguer deux grands types de bactéries : les bactéries à **gram positif** et les bactéries à **gram négatif**. Cette distinction repose sur la structure de la paroi et a des implications importantes en microbiologie et en médecine. En comprenant les différences entre ces deux types de bactéries, les scientifiques peuvent mieux comprendre leur physiologie et développer des stratégies pour les combattre. La paroi cellulaire est donc un élément fondamental de la biologie des bactéries et mérite une attention particulière dans l'étude de ces micro-organismes.

7.1.1. Composition de la Paroi

La paroi cellulaire des bactéries est composée de polymères qui varient selon les espèces bactériennes. Ces polymères et leur mode de liaison sont spécifiques à chaque type de bactérie.

Cette diversité dans la composition de la paroi cellulaire contribue à la variabilité des propriétés biologiques des bactéries, telles que leur **résistance aux antibiotiques** ou leur **capacité à s'adapter à différents environnements**. Les chercheurs étudient ces différences pour mieux comprendre la biologie des bactéries et développer de nouvelles stratégies pour lutter contre les infections bactériennes.

A. Les peptidoglycanes

Le peptidoglycane (ou muréine, ou mucocomplexe, ou mucopeptide) est le composant principal de la paroi bactérienne. Il s'agit d'un polymère constitué de chaînes de sucres (N-acétylglucosamine et N-acétylmuramique) reliées par des ponts peptidiques. Le peptidoglycane est responsable de la forme et de la rigidité de la cellule bactérienne.

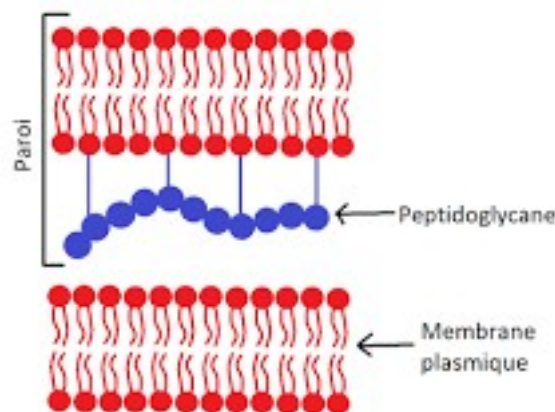


Figure 23. Peptidoglycane, composant principal de la paroi bactérienne

Rôle du peptidoglycane

La paroi cellulaire est un élément crucial pour maintenir la forme des cellules et assurer une protection mécanique contre la pression osmotique. Chez les bactéries **Gram négatif**, elle se présente sous forme d'une couche fine, tandis que chez les bactéries **Gram positif**, elle est plus épaisse. Cette paroi cellulaire est composée de différentes molécules telles que le peptidoglycane, les lipoprotéines et les polysaccharides, qui lui confèrent ses propriétés de résistance et de maintien de la forme. En plus de son rôle structural, la paroi cellulaire est également impliquée dans les interactions avec l'environnement et d'autres organismes. Ainsi, elle joue un rôle essentiel dans la survie et la fonction des cellules bactériennes.

Structure du peptidoglycane

Le peptidoglycane est un polymère composé de deux types de monomères :

- **Les glycanes** : sont des polysaccharides formés d'une alternance de molécules de N-acétylglucosamine (NAG) et d'acide N-acétylmuramique (NAM).
- **Les peptides** : qui sont de courtes chaînes d'acides aminés liées aux molécules de NAM.

Le glycane

Le glycane est formé d'une alternance de molécules de NAG et NAM. Les NAG et NAM sont liés entre eux par des liaisons glycosidiques 1-4 identiques.

La structure du glycane est la suivante :

N-acétylglucosamine - (1-4) - acide N-acétylmuramique

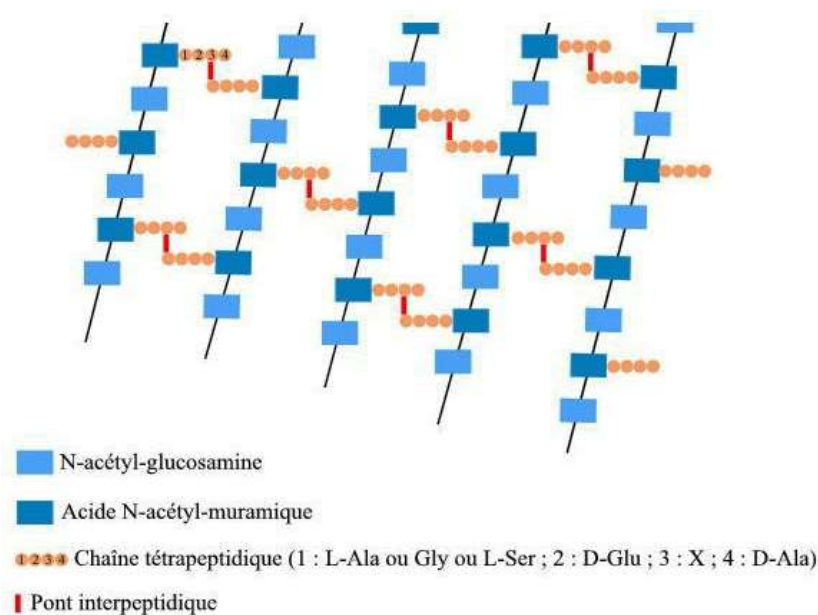


Figure 24. Structure du peptidoglycane

Le peptide

Le peptide est lié à la molécule de NAM par une liaison peptidique entre la D-alanine terminale du peptide et l'acide lactique de la molécule de NAM.

B. Les acides teichoïques

Ce sont des polysaccharides qui sont liés au peptidoglycane. Ils sont présents chez certaines bactéries, mais pas chez d'autres. Les acides teichoïques peuvent conférer à la cellule bactérienne une charge électrique négative, ce qui peut affecter son interaction avec son environnement.

C. Les lipoprotéines

Ce sont des protéines qui sont liées à la membrane cytoplasmique. Elles peuvent contribuer à la rigidité de la paroi bactérienne et à la protection de la cellule contre les dommages.

D. Les protéines de surface

Situées à la surface de la paroi bactérienne. Elles jouent un rôle dans la communication entre les cellules bactériennes, la résistance aux antibiotiques et l'adhérence à d'autres surfaces.

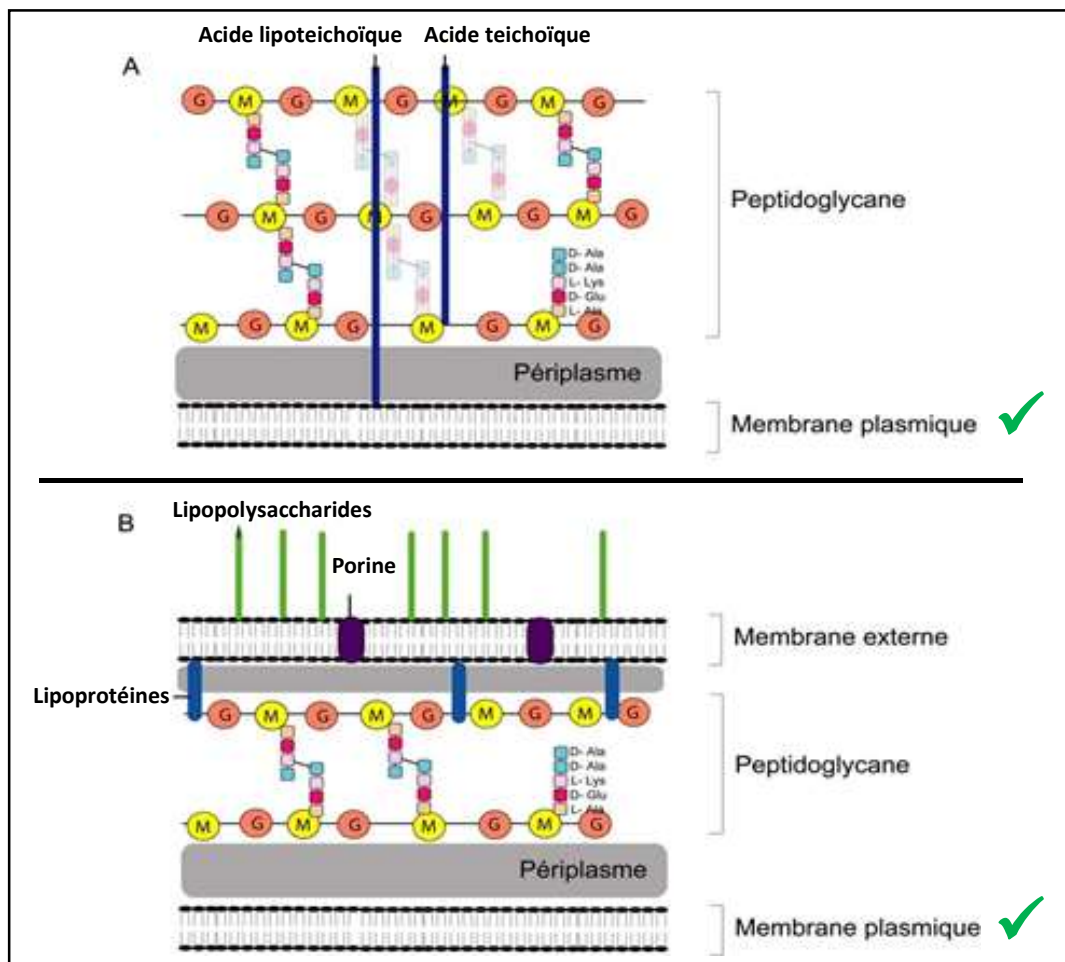


Figure 25. Structure de la paroi (Bactérie Gram + vs Gram -)

Tableau 2. Composition de la paroi des bactéries Gram+ et Gram -

Composant	Gram+	Gram-
La membrane externe	-	+
Le peptidoglycane	-Constituant majeur (90%) ; -Couche épaisse (15 à 30nm) très solide.	-Couche mince (3 à 5nm) ; -Incrusté au milieu du péricplasme.
Les acides teïchoïques	-(10%), sont des polymères de glycérol et de ribitol reliés à des groupes PO4 et ne dépassent pas la paroi.	-
Les acides lipoteichoïques	-Les acides lipoteichoïques s'enchâssent dans la membrane cytoplasmique ; -Les acides lipoteichoïques retiennent le violet lors de la coloration de Gram.	-
Protéines	-Peu ou pas de protéines, sauf exceptions comme la protéine A de <i>S. aureus</i> .	-Présence de PORINES
Les lipo-polysaccharides (LPS)	-	formé de 3 parties : -Le lipide (A) possédant une partie hydrophobe et une partie hydrophile ; -Le polysaccharide central, constitué de 10 sucres ; -La chaîne latérale O, ou antigène O, chaîne courte, sa composition varie selon la souche bactérienne.

7.1.2. Quelques fonctions de la paroi bactérienne

- Assurer le maintien de la forme de la bactérie.
- Assurer une protection contre la pression osmotique intracellulaire.
- Propriétés antigéniques.
- Permettre la fixation des bactériophages. Ils reconnaissent des récepteurs localisés sur le peptidoglycane des Gram (+) ou la membrane externe des Gram (-).
- Participer à la mobilité. En effet, les flagelles sont implantés dans la membrane cytoplasmique mais ne peuvent pas fonctionner en absence de peptidoglycane.
- La toxicité. Chez les Gram(-), le LPS est une endotoxine.
- La perméabilité. La paroi laisse passer de petites molécules comme l'eau, les sels minéraux ou des métabolites simples.

7.2. La membrane

La membrane cytoplasmique bactérienne, tout comme toutes les membranes biologiques naturelles, est principalement composée de phospholipides et de protéines. En observant la membrane au microscope électronique, on peut distinguer deux bandes sombres séparées par une bande claire, formant une bicouche lipidique fluide qui intègre des protéines.

Cette structure permet à la membrane de remplir diverses fonctions essentielles pour la bactérie, elle agit comme une barrière semi-perméable, permettant le passage de molécules lipophiles tout en empêchant le passage des molécules hydrophiles. En plus de servir de site de fixation des flagelles, elle abrite des protéines membranaires qui sont impliquées dans divers processus cellulaires. Ces protéines comprennent des enzymes responsables de la biosynthèse et de l'excrétion de molécules nécessaires à la synthèse de la paroi cellulaire, ainsi que des enzymes de la chaîne respiratoire et de la photosynthèse. De plus, la membrane cellulaire est essentielle pour la détection des signaux et des composés présents dans l'environnement, grâce aux protéines transmembranaires du chimiotactisme. Ainsi, les bactéries peuvent naviguer vers les endroits les plus favorables en termes de nutriments et éviter les endroits contenant des substances toxiques.

7.3. Le cytoplasme

Le cytoplasme est une substance essentielle dans la cellule, avec sa consistance colloïdale coagulable. Il est principalement composé de 80% d'eau, ce qui en fait un milieu propice aux réactions biochimiques. En plus de l'eau, le cytoplasme contient également des éléments constitutifs tels que les ribosomes, qui sont responsables de la synthèse des protéines, ainsi que des inclusions qui peuvent varier en fonction du type cellulaire. Ces inclusions peuvent inclure des réserves de nutriments, des pigments ou d'autres substances nécessaires au fonctionnement de la cellule. Ainsi, le cytoplasme joue un rôle crucial dans le maintien de l'homéostasie cellulaire et dans la réalisation des processus métaboliques essentiels à la vie.

- **Des substances de réserve** = inclusions cytoplasmiques : en général, chaque groupe de bactéries synthétise une seule catégorie de substances de réserve qui forment des agrégats, parfois de grande taille. Cela peut être des glucides (amidon et glycogène), des lipides (poly-hydroxy-butyrates), du polyphosphate, et parfois des minéraux (fer, soufre).
- **Des organites spécialisés** : On trouve des chromatophores (organites spécialisés dans la photosynthèse), des vacuoles à gaz (permettant aux bactéries aquatiques de flotter à la surface de l'eau).

7.4. Appareil nucléaire

L'appareil nucléaire est une région à l'intérieur d'une cellule habituellement composée de 60% d'ADN (chromosome) et 40% d'ARN. Il est important de noter que l'ADN chez les procaryotes n'est pas couplé aux protéines histones, contrairement aux cellules eucaryotes. Cette composition complexe joue un rôle crucial dans le fonctionnement et la régulation des processus cellulaires. L'ADN contient les informations génétiques nécessaires à la synthèse des protéines et au contrôle des activités cellulaires, tandis que l'ARN est impliqué dans la traduction de ces informations en protéines fonctionnelles. La relation entre l'ADN, l'ARN et les protéines est fondamentale pour la survie et le fonctionnement des cellules.

7.5. ARN et ribosomes

Les ribosomes sont de petites granulations sphériques de 10 à 30 nm de diamètre qui paraissent remplir totalement le cytoplasme, leur constante de sédimentation est de 70 S (Svedberg), les ribosomes sont constitués d'ARN (65%) et de protéines (35%).

7.6. Les plasmides

La cellule bactérienne peut contenir des éléments génétiques extra-chromosomiques dont les principales fonctions sont les suivantes :

- ✓ Production de toxines, facteurs de pathogénicité, facteur de virulence (ex : *Clostridium tetani*)
- ✓ Production des bactériocines.
- ✓ Résistance aux ATB (90% plasmidique) et agents antagonistes : métaux lourds rayonnements, bactériophages.

7.7. La capsule

La capsule bactérienne est un élément crucial pour la bactérie, car elle lui confère une organisation et une définition solides, tout en la protégeant contre les ultraviolets, la déshydratation, ainsi que les agents physiques et chimiques. De plus, elle joue un rôle important dans la virulence de la bactérie en diminuant son adhésion aux macrophages. Sur le plan antigénique, les antigènes capsulaires sont responsables de la spécificité sérologique, notamment l'antigène K. Ainsi, la capsule bactérienne est un élément clé qui contribue à la survie et à la capacité pathogène de la bactérie.

7.8. Les flagelles

La plupart des bactéries mobiles se déplacent grâce à des flagelles qui s'étendent à l'extérieur de la membrane plasmique et de la paroi cellulaire. Ce sont des structures minces d'environ 20 nm de diamètre et 15 à 20 µm de long, constitués d'une même protéine la flagélline structurée en sous unités hélicoïdales.

Composés de trois parties : un filament hélicoïdal externe, un crochet coudé qui fixe le filament à la cellule, un corps ou granule basal entièrement logé dans la cellule et terminé par un système complexe d'anneaux qui permettent sa fixation.

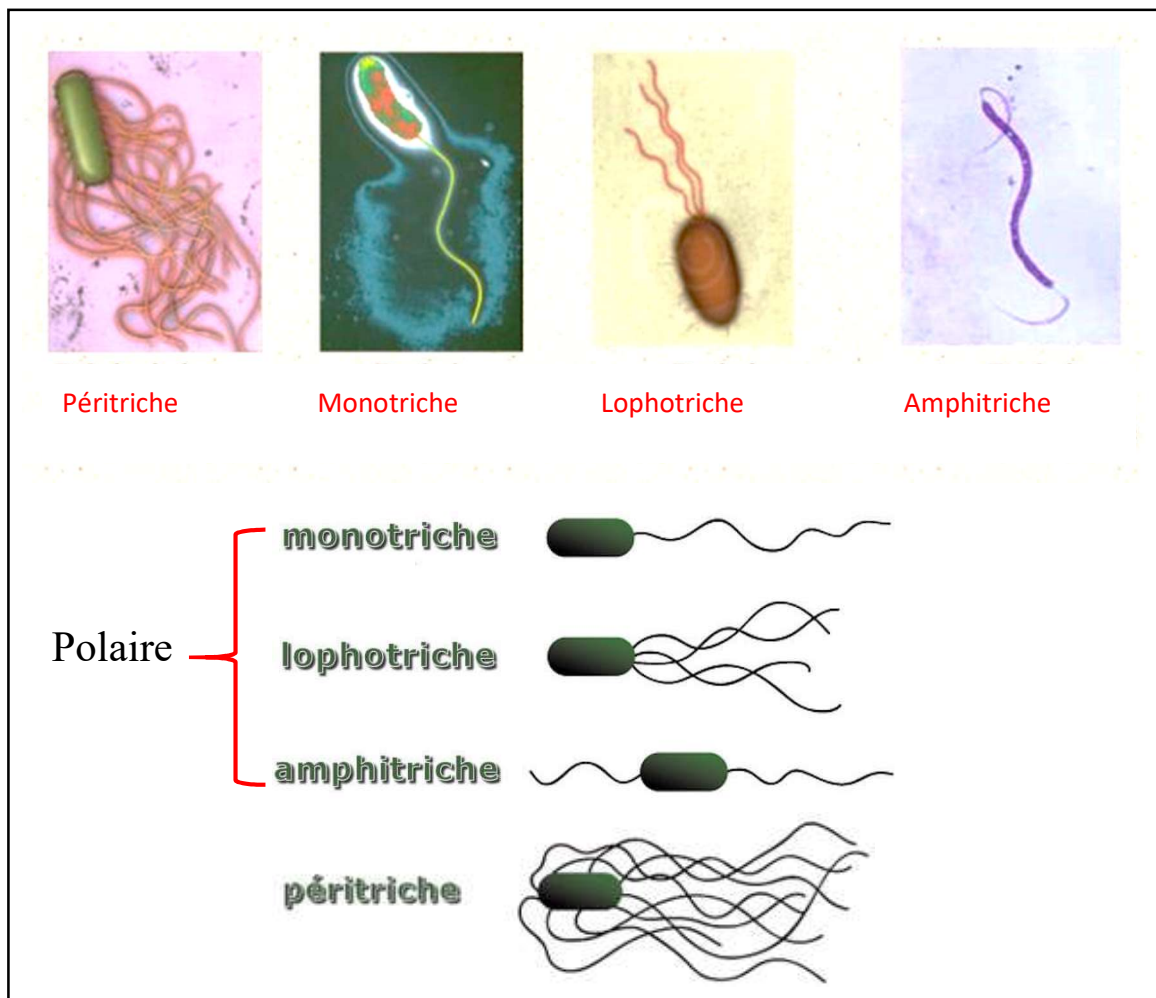


Figure 26. Différentes ciliatures

7.9. Pili

Ils sont nombreux chez les bacilles à G⁻, rares chez les G⁺, on distingue deux catégories de morphologie et de fonction distinctes : les **pili communs**, les **pili sexuels**. Les premiers sont distribués en grand nombre autour de la bactérie jusqu'à plusieurs centaines, ils sont courts, les seconds sont plus longs atteignant 20µm, leur nombre est faible, varie de 1 à 4, ils jouent un

certain rôle au cours de la conjugaison bactérienne, il est possible qu'ils interviennent dans la reconnaissance entre les bactéries « mâles » qui sont les seuls à en posséder et bactéries « femelles ».

7.10. Les formes de résistance (spores)

Certaines bactéries ont le pouvoir de se transformer en petites unités ovales ou sphériques de résistance lorsque le milieu s'épuise en éléments nutritifs ou lorsque les conditions physico-chimiques extérieures changent, on les appelle « spores » ou « endospores » puisque leur formation est intracellulaire. Les endospores caractérisent 3 principaux germes bactériens. *Bacillus*, *Clostridium* et *Sporosarcina*.

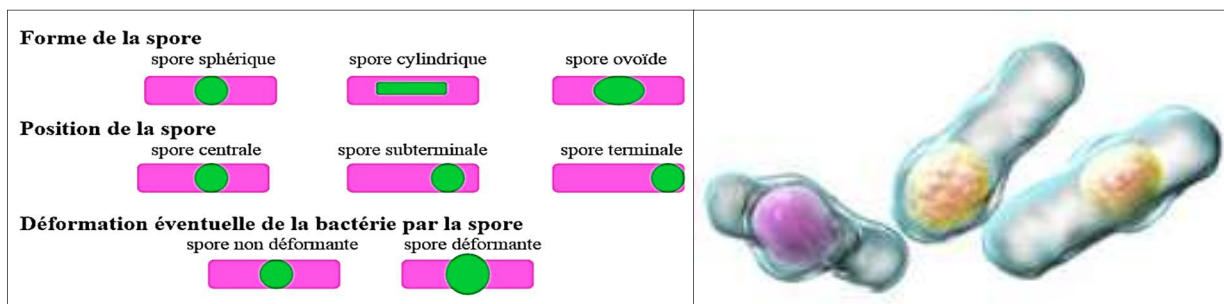


Figure 27. Forme, position et déformation de la spore

8. Nutrition bactérienne

Selon le type d'énergie utilisée, on peut reconnaître 2 catégories de bactéries. Les bactéries **phototrophes ou photosynthétiques** utilisent la lumière comme source d'énergie pour produire de la matière organique, tandis que les bactéries **chimiotrophes ou chimiosynthétiques** utilisent des composés chimiques comme source d'énergie.

Les bactéries phototrophes comprennent les cyanobactéries, qui effectuent la photosynthèse, tandis que les bactéries chimiotrophes comprennent les bactéries nitrifiantes, qui utilisent l'ammoniac comme source d'énergie. Cette distinction est importante pour comprendre le rôle des bactéries dans les écosystèmes et dans des processus tels que la décomposition des matières organiques et le cycle des éléments nutritifs.

8.1. Les bactéries phototrophes ou photosynthétiques

Les bactéries phototrophes sont des organismes unicellulaires (essentiellement procaryotes) qui utilisent l'énergie lumineuse comme source d'énergie. Elles sont présentes dans tous les environnements, y compris les eaux douces et marines, les sols, les roches et même les sources hydrothermales.

Il existe deux grands types de bactéries phototrophes :

8.1.1. Les bactéries photoautotrophes

Ces bactéries utilisent la lumière pour fixer le dioxyde de carbone (CO_2) et produire des molécules organiques, comme les glucides, les protéines et les lipides. Elles sont donc à l'origine de la production primaire dans les écosystèmes aquatiques et terrestres.

A. Les bactéries photolithotrophes

Ce sont des organismes autotrophes qui utilisent la lumière comme source d'énergie et des substances inorganiques comme source de carbone. Elles sont présentes dans une grande variété d'environnements, notamment les eaux hydrothermales, les sols et les roches. Les bactéries photolithotrophes utilisent la lumière pour produire de l'énergie, généralement sous forme d'ATP. Elles utilisent ensuite cette énergie pour réduire des composés inorganiques, tels que le dioxyde de carbone (CO_2), en composés organiques, tels que le glucose.

Il existe de nombreux types de bactéries photo-litotrophes, dont les suivantes :

- **Les bactéries sulfureuses vertes** sont des bactéries qui utilisent le sulfure d'hydrogène (H_2S) comme source de carbone. Elles produisent du sulfure de carbone (CS_2) comme sous-produit.
- **Les bactéries pourpres sulfureuses** sont des bactéries qui utilisent le sulfure d'hydrogène (H_2S) comme source d'énergie. Elles produisent du sulfate (SO_4^{2-}) comme sous-produit.
- **Les bactéries nitrifiantes** sont des bactéries qui utilisent l'ammoniac (NH_3) comme source d'énergie. Elles produisent de l'acide nitrique (HNO_3) comme sous-produit.
- **Les ferrobactéries** sont des bactéries qui utilisent le fer ferreux (Fe^{2+}) comme source d'énergie. Elles produisent du fer ferrique (Fe^{3+}) comme sous-produit.

B. Les bactéries photoorganotrophes

Ce sont des bactéries phototrophes ou photosynthétiques qui utilisent des molécules organiques comme source de carbone, une molécule organique comme source d'électrons pour la réduction de ce carbone, et la lumière comme source d'énergie.

Elles sont classées dans la catégorie des **bactéries hétérotrophes**, car elles ne peuvent pas synthétiser leur propre carbone à partir du dioxyde de carbone (CO_2). Elles doivent donc obtenir leur carbone à partir de molécules organiques, telles que le glucose, le lactate ou l'acétate. Il existe deux principaux types de bactéries photoorganotrophes :

- **Les bactéries photoorganoautotrophes** utilisent le CO₂ comme source de carbone, mais ont recours à des molécules organiques comme source d'électrons respiratoires.
- **Les bactéries photoorganohétérotrophes** utilisent des molécules organiques comme source de carbone et d'électrons.

8.1.2. Les bactéries photohétérotrophes

Ces bactéries utilisent la lumière pour produire de l'ATP, mais elles ne peuvent pas fixer le CO₂. Elles doivent donc obtenir leurs molécules organiques d'autres sources, comme des composés organiques dissous dans l'eau ou des cellules mortes. Il existe de nombreux types de bactéries photohétérotrophes, dont les suivantes :

- **Bactéries pourpres non sulfureuses** : Ces bactéries se trouvent dans les eaux douces et marines, où elles utilisent des substances organiques comme source de carbone. Elles produisent des pigments rouges ou violets, qui leur donnent leur nom.
- **Bactéries vertes non sulfureuses** : Ces bactéries se trouvent également dans les eaux douces et marines. Elles utilisent des pigments verts, qui leur donnent leur nom.
- **Bactéries contenant de la protéorhodopsine** : Ces bactéries se trouvent dans les environnements extrêmes, tels que les déserts et les sources chaudes. Elles utilisent un pigment appelé protéorhodopsine pour convertir la lumière en énergie.

8.2. Les bactéries chimiotrophes ou chimiosynthétiques

Les bactéries chimiotrophes sont des organismes qui utilisent l'énergie de l'oxydation de composés chimiques comme source d'énergie. Elles peuvent être divisées en deux catégories principales : les chimioautotrophes et les chimiohétérotrophes.

Les chimioautotrophes sont capables de synthétiser leurs propres molécules organiques à partir de CO₂ et d'eau en utilisant l'énergie de l'oxydation de composés minéraux. Elles sont donc considérées comme des producteurs primaires, car elles sont à la base des chaînes alimentaires.

Les chimiohétérotrophes sont incapables de synthétiser leurs propres molécules organiques et doivent donc les obtenir à partir d'autres sources. Elles sont donc considérées comme des consommateurs parmi les exemples de bactéries chimiotrophes on trouve :

- A. **Les bactéries nitrificatrices**, qui oxydent l'ammoniac (NH_3) en nitrite (NO_2) puis en nitrate (NO_3). Elles sont essentielles au cycle de l'azote.
- B. **Les bactéries sulfureuses**, qui oxydent le sulfure d'hydrogène (H_2S) en sulfate (SO_4^{2-}). Elles sont présentes dans les sources hydrothermales et les eaux souterraines riches en sulfure.
- C. **Les bactéries méthanogènes**, qui produisent du méthane (CH_4) à partir de CO_2 et d'hydrogène. Elles sont présentes dans les intestins des animaux, les marais et les sédiments marins.

9. Besoins élémentaires

➤ Source de carbone

Ces exigences nutritionnelles conduisent à envisager deux grandes catégories de micro-organismes : Les bactéries **autotrophes** capables de se développer en milieu inorganique contenant CO_2 comme seule source de carbone. Les bactéries **hétérotrophes** exigent des composés organiques (sucre, acide organique, acide lactique etc.).

➤ Source d'azote

Les micro-organismes ont besoin de substances azotées pour synthétiser leurs protéines. Seules quelques bactéries sont capables de fixer l'azote atmosphérique N_2 , qui est sa forme la plus simple. Fixer l'azote signifie le convertir en une forme utilisable par les organismes vivants. Ces bactéries jouent un rôle crucial dans la biodiversité et la fertilité des sols. En fixant l'azote, elles contribuent à enrichir les sols en nutriments essentiels pour la croissance des plantes. Cela peut également réduire la dépendance à l'égard des engrais azotés synthétiques, ce qui a des avantages environnementaux.

➤ Autres éléments minéraux

Certains de ces éléments jouent sans aucun doute un rôle de l'équilibre physico-chimique de la cellule, ce sont le *sodium*, le *potassium*, le *magnésium* et le *chlore*, ils sont souvent appelés **micro-éléments**.

D'autres éléments tels que le calcium, le cuivre, le magnésium, le manganèse jouent le rôle de cofacteurs ou d'activateurs enzymatiques, on les appelle **oligo-éléments** car ils sont indispensables en quantité infime, le plus souvent apportés sous forme de traces par les produits chimiques qui servent à préparer les milieux de culture.

➤ **Besoins spécifiques (facteurs de croissance)**

Certaines bactéries exigent pour leur développement la présence de substances organiques qu'elles sont incapables de synthétiser, on doit lui fournir par un apport extérieur, c'est alors là qu'on parle de **facteurs de croissance**.

En fonction de ces besoins on distingue :

- **bactéries prototrophes** qui ne nécessitent pas de facteurs de croissance, les éléments habituels déjà cités leur étant suffisants,
- **les bactéries auxotrophes** qui exigent les facteurs de croissance. Le nicotinamide est un métabolite essentiel pour *Proteus*.

Les bactéries prototrophes sont capables de croître sur un milieu qu'on appelle **milieu minimum**, qui ne contient que les éléments essentiels.

Nature et propriétés des facteurs de croissance

- **Acides aminés** : sont des facteurs de croissance car ils sont indispensables à la synthèse des protéines (25µg/l)
- **Bases puriques et pyrimidiques** : font partie des acides nucléiques et ils sont nécessaires à la synthèse des protéines (10µg/l)
- **Vitamines** : jouent un rôle de coenzyme (1 à 20 µg/l)

Lorsqu'un facteur de croissance n'est présent qu'en faible quantité dans le milieu, il limite la croissance : on dit qu'il est **un facteur limitant** de la croissance.

Il existe plusieurs types de facteurs de croissance :

- **Facteurs de croissance stricte** : en leur absence il n'y a pas de culture.
- **Facteurs stimulants** : ils favorisent la multiplication bactérienne.
- **Facteurs de départ** : ils sont indispensables lors d'une première culture.

➤ **Facteurs physiques**

Les nutriments constituent les éléments essentiels pour le développement des micro-organismes. Leur apport doit être réalisé dans des conditions environnementales spécifiques. Plusieurs facteurs physiques peuvent influencer le processus de nutrition, soit en l'empêchant, en l'inhibant ou en le favorisant. Il est donc important de comprendre et de contrôler ces conditions pour assurer la croissance et la survie des micro-organismes. Des recherches approfondies sont nécessaires pour déterminer l'impact de ces facteurs et pour optimiser les conditions environnementales afin de favoriser le développement des micro-organismes dans des contextes spécifiques, tels que la production alimentaire ou la biotechnologie.

A. Température

Elle influence profondément la multiplication aussi bien que le métabolisme (action sur la vitesse des réactions biochimiques).

Selon la température on distingue :

- **Les mésophiles** : préférant une température moyenne comprise entre 20 et 40°C (optimum 30 – 37°C).
- **Les psychrophiles** : dont la température optimale de croissance est située aux environs de 10°C.
- **Les thermophiles** : qui se multiplient préférentiellement entre 45 et 55°C.
- **Les thermophiles extrêmes ou hyper thermophiles** : ayant un optimum situé vers 70°C.

B. Le pH : les bactéries se multiplient à des pH neutres ou légèrement alcalin ou acide

C. L'oxygène O₂

- **Aérobies stricts** : exigent l'oxygène libre pour leur développement.
- **Anaérobies stricts** : ne peuvent se multiplier qu'en l'absence d'oxygène.
- **Aéro-anaérobies ou anaérobies facultatifs** : capables de croître avec ou sans oxygène libre.
- **Micro-aérophiles** : ne se reproduisent qu'en présence d'une faible tension d'oxygène.

D. La pression osmotique

La plupart des bactéries insensibles aux variations des pressions osmotiques, elles sont protégées par leur paroi rigide mais généralement quand la concentration du NaCl est supérieure à 2% la croissance des bactéries est inhibée, à l'exception de quelques bactéries appelées **bactéries halophiles** qui se développent à une concentration en NaCl plus élevée ex : les bactéries qui vivent dans les marais salants, ex : *Staphylococcus*, *Pseudomonas* = NaCl 2 à 5%.

E. L'humidité : A.W = Activity of Water

Certains micro-organismes, tels que *Micrococcus* et *Staphylococcus*, ont la capacité de s'adapter à des activités de l'eau (AW) faibles. Ces espèces qui résistent à des valeurs de l'activité de l'eau faibles sont appelées xérophiles. Les xérophiles sont des organismes capables de survivre et de se développer dans des environnements présentant une faible disponibilité en eau. Leur capacité à prospérer dans des conditions de faible activité de l'eau en fait des micro-organismes d'un grand intérêt pour divers domaines, tels que la recherche en microbiologie et

la préservation des aliments. Comprendre comment ces organismes s'adaptent à des conditions de faible activité de l'eau peut avoir des implications importantes dans la lutte contre la contamination microbienne et dans la préservation des produits alimentaires.

10. Courbe de croissance

La croissance des bactéries est un phénomène fascinant. En laboratoire, les scientifiques observent attentivement la courbe de croissance des bactéries pour comprendre comment elles se multiplient.

Cette courbe présente généralement quatre phases :

- **La phase de latence** : cette phase est caractérisée par une faible croissance des bactéries. Les bactéries s'adaptent aux conditions du milieu de culture et commencent à synthétiser les protéines et les enzymes nécessaires à la croissance.
- **La phase exponentielle (logarithmique)** : cette phase est caractérisée par une croissance rapide des bactéries. Les bactéries se divisent en deux toutes les 20 à 30 minutes, ce qui entraîne une augmentation exponentielle de leur nombre.
- **La phase stationnaire** : cette phase est caractérisée par un arrêt de la croissance des bactéries. Les nutriments du milieu de culture sont épuisés et les déchets s'accumulent. Les bactéries commencent à mourir à un rythme égal à celui de leur croissance.
- **La phase de déclin** : cette phase est caractérisée par une diminution progressive du nombre de bactéries. Les bactéries restantes continuent à mourir à un rythme croissant.

La durée de chaque phase dépend des conditions de culture, notamment de la température, du pH, de la concentration des nutriments et de la présence de facteurs inhibiteurs. Les courbes de croissance bactériennes sont utilisées pour étudier la physiologie des bactéries et pour contrôler les infections bactériennes.

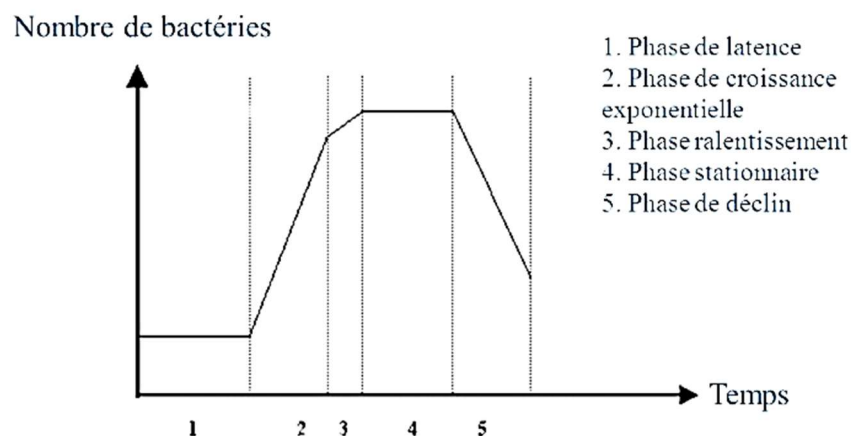


Figure 28. Courbe de croissance bactérienne

10.1. Phénomène de diauxie

Le phénomène de diauxie est un processus fascinant observé chez les bactéries lorsqu'elles sont confrontées à deux sources de carbone différentes. Lorsqu'une source de carbone est plus facilement métabolisable que l'autre, la bactérie va d'abord utiliser la source de carbone la plus facilement accessible avant de se tourner vers la source de carbone moins facilement métabolisable.

Ce phénomène montre l'adaptabilité des bactéries face à des conditions environnementales changeantes, et met en lumière leur capacité à optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

La diauxie est un exemple de la façon dont les organismes vivants s'adaptent pour survivre dans des environnements variables, et elle soulève des questions passionnantes sur la régulation génétique et le métabolisme des bactéries.

Dans un milieu synthétique contenant un mélange de 2 substrats carbonés **une courbe diphasique**, ce phénomène a été décrit par **Jacques Monod** (biologiste et biochimiste français) sous le nom de **diauxie**.

Ex : on cultive *E.Coli* sur un milieu contenant comme source de carbone un mélange de fructose et arabinose, on observe une **première phase** d'adaptation au fructose (A) et utilisation du fructose (B) et une **deuxième phase** d'adaptation à l'arabinose (C) et enfin l'utilisation de l'arabinose (D).

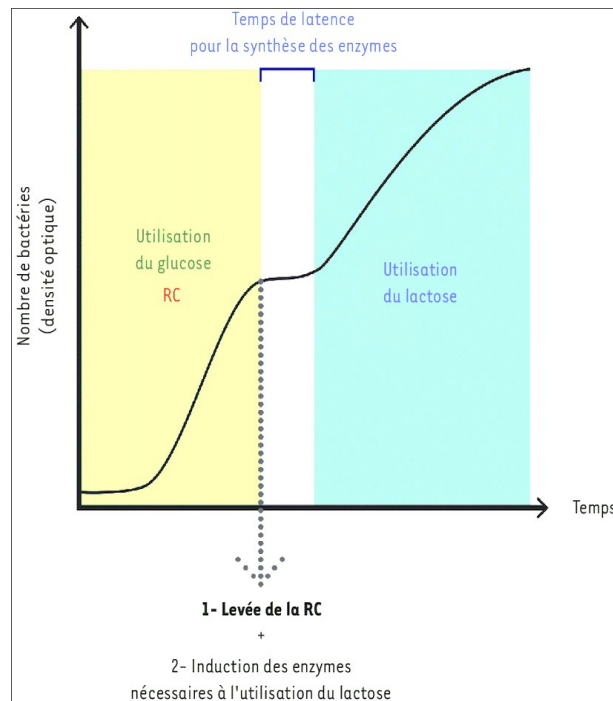


Figure 29. Courbe de croissance bactérienne lors du phénomène de diauxie

En effet, les enzymes nécessaires à la métabolisation du glucose sont constamment synthétisées, tandis que la synthèse des enzymes pour le lactose est réprimée par un phénomène appelé : **répression catabolique (RC)**.

Cependant, une fois que le glucose est épuisé, la répression catabolique est levée, permettant aux bactéries d'induire la synthèse des enzymes nécessaires à l'utilisation du lactose. Ce sucre agit en tant qu'inducteur, permettant ainsi aux bactéries de s'adapter à leur environnement changeant. Ce phénomène de diauxie met en lumière la remarquable capacité des bactéries à réguler leur métabolisme en fonction des sources de nutriments disponibles dans leur environnement.

11. Méthodes de mesure de la croissance bactérienne

11.1. Mesure du nombre de cellule bactérienne

A. Comptage avec lames

Le comptage avec lames est une méthode précise pour dénombrer les bactéries en utilisant des lames spécialement conçues pour la petite taille de ces organismes. Les lames sont dotées de petites chambres de comptage, souvent quadrillées pour faciliter le processus de comptage. Il existe différents types de lames ou cellules adaptées à cette méthode, telles que la **cellule de Thoma** et la **cellule de Malassez**.

Ces outils permettent aux expérimentateurs de réaliser des comptages précis et fiables, essentiels dans de nombreuses applications en microbiologie. Grâce à cette méthode, il est possible d'obtenir des données précises sur la densité bactérienne dans un échantillon donné, ce qui est crucial dans de nombreux domaines de la recherche et de l'industrie.

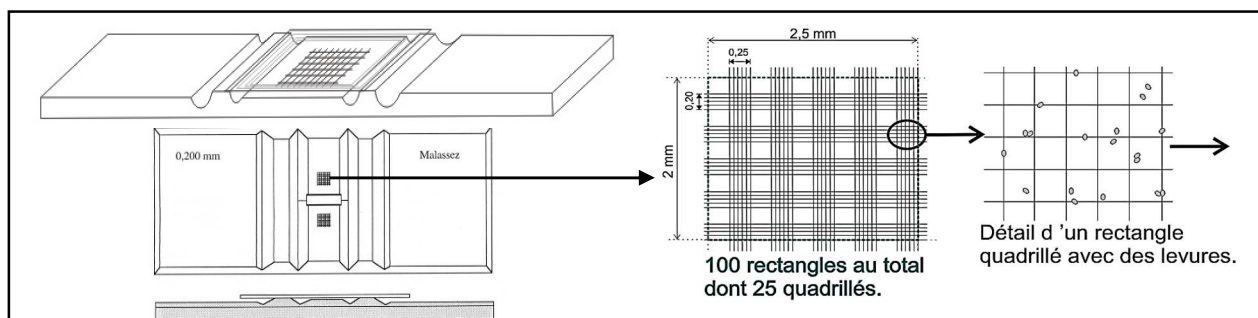


Figure 30. La cellule de Malassez

B. Méthode des dilutions

Le dénombrement sur milieu solide ou liquide en bactériologie est une méthode utilisée pour compter le nombre de bactéries présentes dans un échantillon.

Le dénombrement en bactériologie est une technique utilisée pour déterminer la concentration en bactéries d'un échantillon. Il existe deux principales techniques de dénombrement : le dénombrement en milieu solide et le dénombrement en milieu liquide.

- **Dénombrement en milieu solide**

Le dénombrement en milieu solide est la technique la plus courante. Elle consiste à déposer une quantité d'inoculum sur un milieu gélosé. Les bactéries se développent alors dans le milieu gélosé et forment des colonies. Le nombre de colonies est ensuite compté et permet de déterminer la concentration en bactéries de l'échantillon. Il existe deux principales techniques de dénombrement en milieu solide : le **dénombrement en surface** et le **dénombrement dans la masse**.

Dénombrement en surface : l'inoculum est déposé sur la surface du milieu gélosé. Les bactéries se développent alors à la surface du milieu et forment des colonies visibles à l'œil nu. Cette technique est simple à réaliser et permet de dénombrer rapidement un grand nombre d'échantillons.

Dénombrement dans la masse : L'inoculum est introduit dans le milieu gélosé. Les bactéries se développent alors dans la masse du milieu et forment des colonies. Cette technique est plus précise que le dénombrement en surface, mais elle est également plus longue et plus difficile à réaliser.

- **Dénombrement en milieu liquide**

Le dénombrement en milieu liquide est une technique moins courante que le dénombrement en milieu solide. Elle consiste à incuber l'échantillon dans un milieu liquide. Les bactéries se développent alors dans le milieu liquide et forment une turbidité.

Le degré de turbidité est ensuite mesuré et permet de déterminer la concentration en bactéries de l'échantillon.

Il existe plusieurs techniques de dénombrement en milieu liquide :

- La technique de turbidimétrie : le spectrophotomètre est utilisé pour mesurer la turbidimétrie d'une population bactérienne en milieu liquide. Le principe est basé sur la quantité de lumière dispersée proportionnellement à la quantité de bactérie. La mesure de l'absorbance est effectuée à 620 nm. On constate que l'absorbance est toujours linéaire en fonction de la concentration en bactérie.

- La technique de néphélomètre : la turbidité est mesurée à l'aide d'un néphélomètre qui fonctionne en faisant passer un faisceau de lumière à travers l'échantillon. La lumière diffusée par les particules en suspension est ensuite mesurée par un capteur. La quantité de lumière diffusée est proportionnelle à la concentration des particules en suspension.
- La technique de filtration sur membrane : l'échantillon est tout d'abord filtré sur une membrane, les bactéries sont retenues sur la membrane et sont ensuite comptées.

Le choix de la technique de dénombrement dépend de l'échantillon et de la précision souhaitée. Il est important de prendre en compte ces facteurs pour sélectionner la méthode la plus appropriée afin d'obtenir des résultats fiables.

12. Taxonomie bactérienne

La taxonomie est une branche de la systématique, qui est la science des êtres vivants et de leurs relations. Elle consiste à caractériser les bactéries en les classant selon leur similitude, en utilisant des catégories telles que les **genres** et les **espèces**. De plus, la taxonomie implique l'application du code international de la nomenclature pour nommer ces organismes, par exemple : *Escherichia coli*.

Un aspect important de la taxonomie est l'identification de nouveaux organismes et la détermination de leur appartenance à une espèce connue. Cela peut être crucial pour comprendre la diversité biologique et l'évolution des êtres vivants. Ainsi, la taxonomie joue un rôle essentiel dans la classification et l'identification des organismes vivants, ce qui est fondamental pour de nombreuses disciplines scientifiques, y compris la microbiologie, l'écologie et la biologie évolutive.

L'unité taxonomique principale dans la classification biologique est l'**espèce**. Une espèce biologique est définie comme un groupe d'individus partageant un haut degré de **ressemblance phénotypique**.

- Tout individu appartient à une *espèce*
- Les espèces proches sont groupées en un *genre*
- Les genres rapprochés sont réunis en une *famille*
- Les familles présentant des similitudes formant un *ordre*
- Les ordres apparentés sont rangés dans une *classe*
- Les classes semblables sont réunies en une *division, phylum* ou *embranchement*
- Les phylums se réunissent dans un *règne*
- Les règnes forment le *domaine*

La systématique bactérienne s'appuie sur une variété de caractéristiques, notamment :

- **Morphologie** : La forme et la taille des bactéries peuvent varier considérablement. Elles peuvent être cocci (rondes), bacilles (en forme de bâtonnet), spirilles (en forme de spirale) ou filamenteuses.
- **Gram coloration** : La coloration de Gram est une technique de coloration utilisée pour différencier les bactéries à Gram positif et à Gram négatif. Les bactéries à Gram positif ont une paroi cellulaire épaisse qui retient la coloration violette, tandis que les bactéries à Gram négatif ont une paroi cellulaire plus fine qui n'absorbe pas la coloration violette.
- **Caractères biochimiques** : Les bactéries peuvent être différenciées par leurs capacités biochimiques, telles que la capacité à fermenter différents sucres ou à produire différentes enzymes.
- **Analyse d'acide nucléique** : Les techniques d'analyse d'acide nucléique, telles que le séquençage de l'ARNr 16S, peuvent être utilisées pour identifier les bactéries et déterminer leurs relations évolutives.

Le but de la systématique bactérienne est de développer un système de classification cohérent et précis pour les bactéries, identifier les bactéries d'importance clinique et environnementale et comprendre l'évolution des bactéries. La systématique bactérienne est un domaine en constante évolution. De nouvelles technologies sont constamment développées pour identifier et classer les bactéries. Cela a conduit à une meilleure compréhension de la diversité bactérienne et de son rôle dans le monde.

La première édition du manuel de David Hendricks Bergey intitulée "Manual of Determinative Bacteriology" a été publiée en 1923. Ce manuel est une référence incontournable en matière de classification des bactéries et est considéré comme l'un des ouvrages les plus importants de la bactériologie. Il a permis de poser les bases de la taxonomie bactérienne et a grandement contribué à l'avancement des connaissances dans ce domaine. Grâce à cet ouvrage, de nombreux scientifiques ont pu identifier et classer les différentes espèces bactériennes, ce qui a eu un impact majeur sur la recherche en microbiologie. Même après presque un siècle, le "Manual of Determinative Bacteriology" demeure une référence incontournable pour tous les spécialistes travaillant dans le domaine de la bactériologie.

En 1917, Bergey a entrepris la rédaction d'un manuel avec l'aide d'une équipe de collaborateurs. Ce manuel a connu un succès immédiat et a fait l'objet de plusieurs révisions et

mises à jour depuis lors. La 10^{ème} édition, parue en 2020, est devenue la référence la plus complète en matière de classification des bactéries.

- ✓ Il s'agit d'un ouvrage de 800 pages, divisé en 12 chapitres.
- ✓ Il décrit plus de 2 000 espèces de bactéries.
- ✓ Il utilise un système de classification basé sur les propriétés morphologiques, physiologiques et chimiques des bactéries.

Le manuel de Bergey a eu un impact significatif sur le domaine de la bactériologie. Il a grandement contribué à la compréhension de la diversité des bactéries et a permis aux scientifiques de les classer et de les identifier avec une plus grande précision.

13. Notions de mycologie

13.1. Mycologie (levure et moisissure)

Les champignons, également connus sous le nom de mycètes, sont des organismes eucaryotes hétérotrophes qui se distinguent par leur paroi polysaccharidique. Contrairement aux autres végétaux, ils ne possèdent pas de pigments photosynthétiques et sont donc incapables de produire leur propre nourriture par photosynthèse.

Les champignons se présentent sous différentes formes, allant des levures unicellulaires aux moisissures mycéliennes, en passant par les champignons champêtres et les plasmodes à structure plus développée.

Bien qu'ils aient une structure végétale, ils sont en réalité des organismes non photosynthétiques. Cette diversité de formes et de modes de vie fait des champignons un groupe fascinant d'organismes à étudier.

13.1.1. Morphologie & structure cellulaire

La cellule fongique est une structure complexe composée de plusieurs éléments essentiels à son fonctionnement. Le noyau, les mitochondries, l'appareil de Golgi, le réticulum endoplasmique, les ribosomes, les vacuoles de réserves contenant du glycogène, le cytosquelette, la membrane cytoplasmique et la paroi sont tous des composants clés de la cellule fongique. Chez les mycètes pluricellulaires, la communication entre les cellules se fait par des pores au niveau des septes transversales.

Les moisissures, quant à elles, possèdent une paroi cellulaire complexe composée de plusieurs couches superposées. Cette paroi est principalement constituée de polysaccharides, avec une petite proportion de protéines et de lipides. La chitine est un composé spécifique de la paroi des champignons, jouant un rôle majeur dans sa composition.

Cependant, chez certaines espèces, la chitine peut être partiellement ou totalement remplacée par la cellulose, comme c'est le cas pour les Oomycètes qui en sont complètement dépourvus. Cette particularité a un impact significatif sur la classification taxonomique des champignons.

La chitine se présente sous forme de microfibrilles entourées d'une couche de protéines, d'une couche de glycoprotéines enchâssées dans une matrice de glucanes et de mannanes, puis d'une couche externe de glucanes.

Cette complexité dans la composition des cellules fongiques et des moisissures souligne l'importance de ces organismes dans les écosystèmes et leur diversité biologique.

Les protéines de la paroi des cellules fongiques sont essentielles pour assurer leur structure et leur fonctionnement. Elles sont principalement associées au mannose, ce qui les rend des mannoprotéines. En plus de ces molécules, la paroi renferme également des glycosylphosphatidylinositol (GPI) protéines et des protéines hydrophobes, qui confèrent aux champignons un caractère hydrophobe. Ces protéines hydrophobes ne se retrouvent que chez les champignons filamenteux.

La paroi contient aussi des protéines telles que les chitine-synthases et les glucanes-synthases, qui sont impliquées dans la synthèse des composants de la paroi. En outre, des protéines ancrées à la membrane cytoplasmique et à la paroi sont observées, bien que leur rôle précis reste à définir. Enfin, quelques lipides sont également présents dans la paroi, contribuant à sa composition complexe et à ses propriétés physiques.

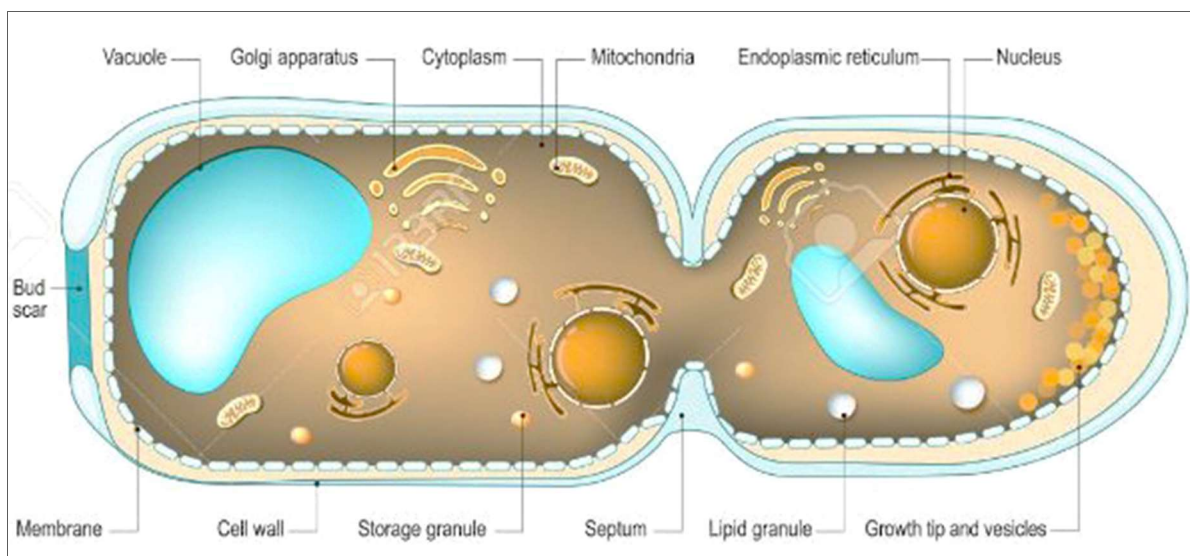


Figure 31. Structure de la cellule fongique

Chez les champignons, les thalles fongiques sont les structures végétatives et sont constituées de filaments appelés hyphes. Il existe deux principaux types de thalles fongiques :

a) **Thalle septé (cloisonné)**

Hyphes divisés par des cloisons à intervalles réguliers. Diamètre régulier (3 à 5 μm).

Champignons appelés **Septomycètes**. Exemples : Ascomycètes, Basidiomycètes.

b) **Thalle non septé (siphonné ou coenocytique)**

Hyphes non divisés par des cloisons. Diamètre irrégulier (5 à 15 μm).

Champignons appelés **Siphomycètes**. Exemples : Zygomycètes, Oomycètes.

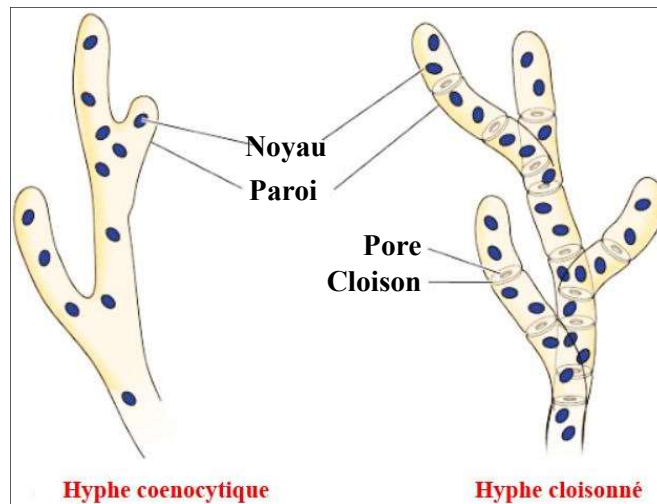


Figure 32. Thalle siphonné et thalle cloisonné

c) **Thalle levuriforme**

Thalle unicellulaire.

Reproduction par bourgeonnement.

Exemples : *Saccharomyces cerevisiae* (levure de boulanger).

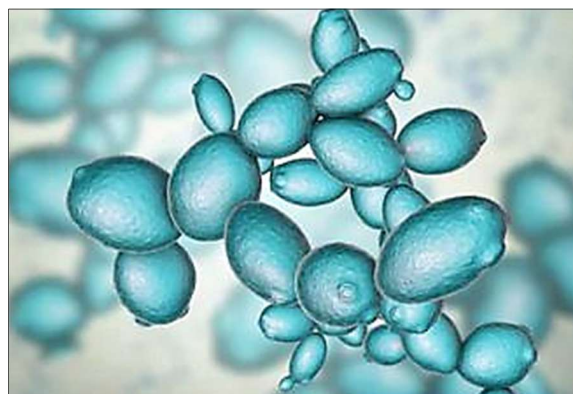


Figure 33. Thalle levuriforme

13.1.2. Croissance et reproduction

La croissance du thalle chez les champignons est un processus fascinant qui se déroule uniquement à l'extrémité des filaments, connu sous le nom de « croissance apicale ». Ce type de croissance implique la lyse de la paroi et la synthèse de nouveau matériel pariétal. L'apex, ou extrémité, est riche en vésicules contenant des précurseurs de la paroi, et l'élongation apicale est le résultat d'un flux cytoplasmique orienté par ces vésicules. Lorsque la membrane des vésicules fusionne avec le plasmalemme, elles déversent leur contenu à l'extérieur du cytoplasme, formant une paroi nouvellement synthétisée. Des ramifications peuvent également apparaître si les vésicules sont trop nombreuses pour être toutes utilisées à l'apex. Ces processus sont influencés par la disponibilité des nutriments, qui se dirigent des parties âgées du mycélium vers les parties nouvellement constituées.

En effet, la croissance apicale du thalle chez les champignons est un phénomène biologique fascinant et unique. Ce mode de croissance, où l'élongation se produit uniquement à l'extrémité des filaments, présente plusieurs caractéristiques intéressantes :

➤ **Localisation précise de la croissance**

Contrairement aux cellules animales et végétales qui peuvent croître en plusieurs points, la croissance des champignons est confinée à l'apex des hyphes. Cette localisation permet une extension et une exploration efficaces du substrat environnant à la recherche de nutriments.

➤ **Dynamisme membranaire**

L'apex est caractérisé par une activité membranaire intense. Des vésicules transportant des précurseurs de la paroi fusionnent avec la membrane plasmique, libérant leur contenu et contribuant à l'élongation du filament.

➤ **Flux cytoplasmique dirigé**

Un flux cytoplasmique constant achemine les nutriments et les organites vers l'apex, assurant un approvisionnement continu en matériaux nécessaires à la croissance.

➤ **Rôle des vésicules**

Les vésicules jouent un rôle crucial dans la croissance apicale. Elles transportent les précurseurs de la paroi et les enzymes nécessaires à sa synthèse. Leur nombre et leur organisation influencent la direction et la vitesse de croissance.

➤ **Ramification et adaptation**

Lorsque l'apex reçoit un surplus de vésicules, des ramifications peuvent se former. Cela permet au champignon d'explorer de nouvelles zones et d'augmenter sa surface d'absorption des nutriments.

➤ Influence des nutriments

La disponibilité des nutriments est un facteur crucial pour la croissance apicale. Les parties âgées du mycélium, riches en nutriments, les transportent vers les zones nouvellement formées à l'apex, favorisant ainsi l'élongation des hyphes.

En résumé, la croissance apicale chez les champignons est un processus complexe et dynamique qui implique une coordination précise de divers mécanismes cellulaires et membranaires. Cette stratégie de croissance permet aux champignons de coloniser efficacement leur environnement et de jouer un rôle important dans les écosystèmes.

Points supplémentaires à considérer :

- **Rôle du cytosquelette** : le cytosquelette, composé de microtubules et d'actine, joue un rôle important dans la croissance apicale en guidant le transport des vésicules et en maintenant la forme de l'apex.
- **Régulation de la croissance** : divers facteurs internes et externes, tels que la lumière, la température et les hormones, peuvent influencer la croissance apicale en modulant l'activité des enzymes et la dynamique membranaire.
- **Différences entre les espèces** : le mode de croissance apicale peut varier légèrement entre les différentes espèces de champignons.

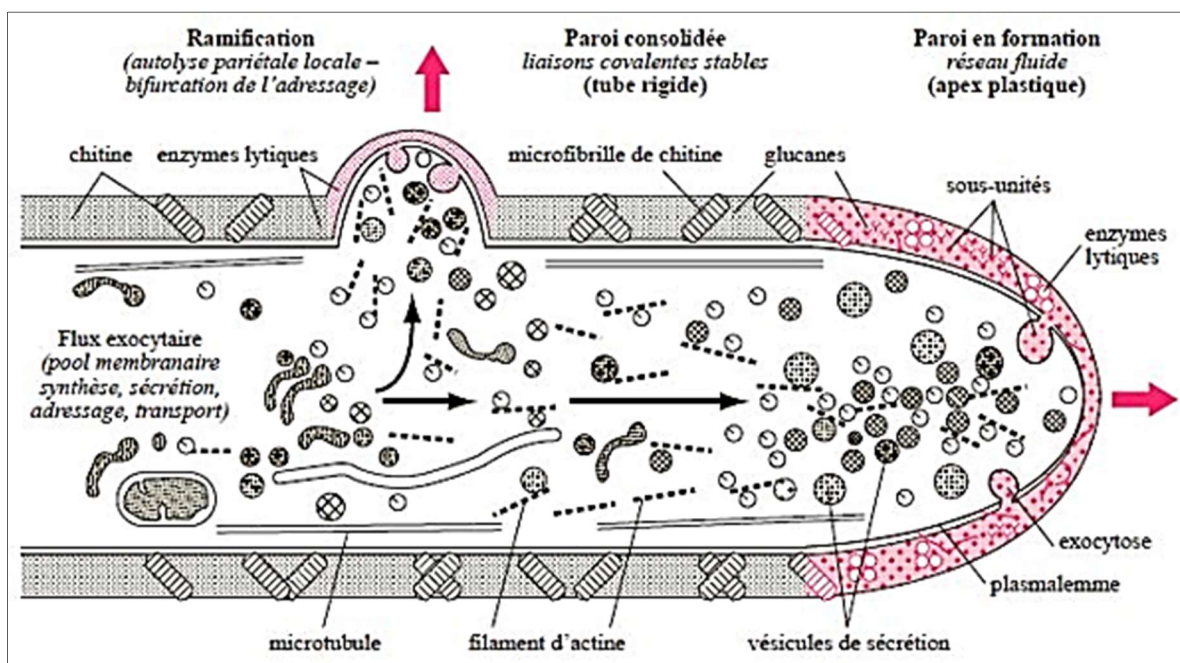


Figure 34. Flux cytoplasmique

13.1.3. Reproduction

A. Reproduction asexuée

La reproduction des champignons est un processus fascinant qui implique la formation de cellules à $2n$ chromosomes, donnant naissance à des individus identiques aux premiers. Ces cellules peuvent être des spores asexuées ou conidies, produites par le thalle, ou bien formées par différenciation d'un élément préexistant du thalle, tel que les hyphes, et sont alors qualifiées de thallospores. Les spores sont produites de différentes manières selon les sections des champignons. Elles peuvent être produites directement sur les filaments mycéliens, sur des sporophores ou par des phialides. La plupart des champignons produisent des spores asexuées immobiles, mais certains sont capables de produire des spores flagellées appelées "zoospores", tels que les Chytridiomycètes et les Oomycètes.

En fonction du type de différenciation, les mycètes forment quatre types de thallospores :

- Les **arthrospores**, formées par fragmentation du thalle, comme c'est le cas pour *Geotrichum*.
- Les **blastospores**, formées par bourgeonnement du thalle, comme chez *Blastomyces*.
- Les **chlamydo-spores**, qui sont des cellules de résistance formées en cas de conditions défavorables, avec un contenu lipidique dense et une paroi épaisse. Elles peuvent être intercalaires ou terminales, et sont présentes chez des champignons tels que *Fusarium* et *Candida*.
- Les **dictyospores**, formées par plusieurs divisions successives d'un élément préexistant, comme chez *Alternaria*.

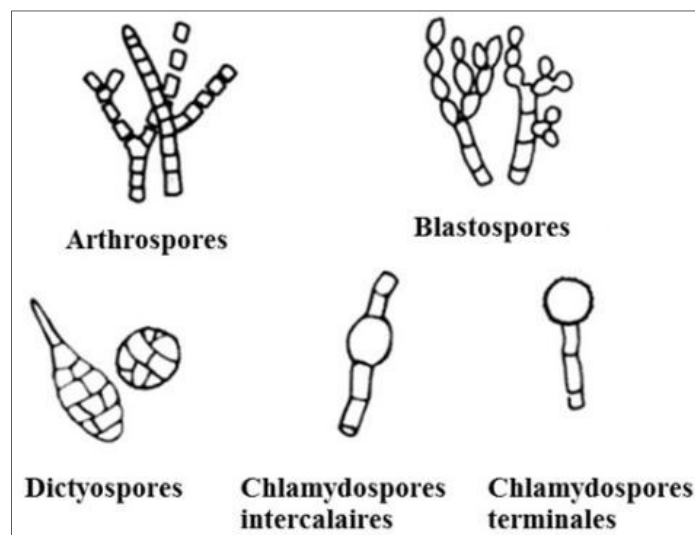


Figure 35. Les types de thallospores

B. La reproduction sexuée

Les différentes cellules de reproduction sexuée jouent un rôle crucial dans la classification des champignons. Quatre types de cellules sont connus : les **ascospores**, les **basidiospores**, les **oospores** et les **zygospores**.

Les ascospores se forment dans des structures spécialisées appelées "asques". Une fois mûres, elles sont libérées à l'extérieur par contraction des asques. Ce mode de reproduction est caractéristique des Ascomycètes.

Les basidiospores sont formées à l'extérieur des "basides" et portées par des filaments fins appelés "stérigmates". Après maturité, les stérigmates se brisent et libèrent les basidiospores. Ces cellules sont caractéristiques des Basidiomycètes.

Les oospores se forment par la fusion de deux sporocystes de sexes opposés (l'oogone et le spermatocyste) chez les thalles plasmodiaux. La fécondation se fait à l'intérieur de l'oospore. Cette forme de reproduction est rencontrée chez les Oomycètes.

Les zygospores se forment également par la fusion de deux sporocystes de sexes opposés et sont rencontrées chez les moisissures à thalle siphonné, les Zygomycètes. Les zygospores sont portées par des sporophores qui se différencient en "suspenseurs". Comme pour l'oospore, la fusion se fait à l'intérieur.

Ces différents modes de reproduction sexuée sont caractéristiques de différents groupes de champignons et jouent un rôle important dans leur classification.

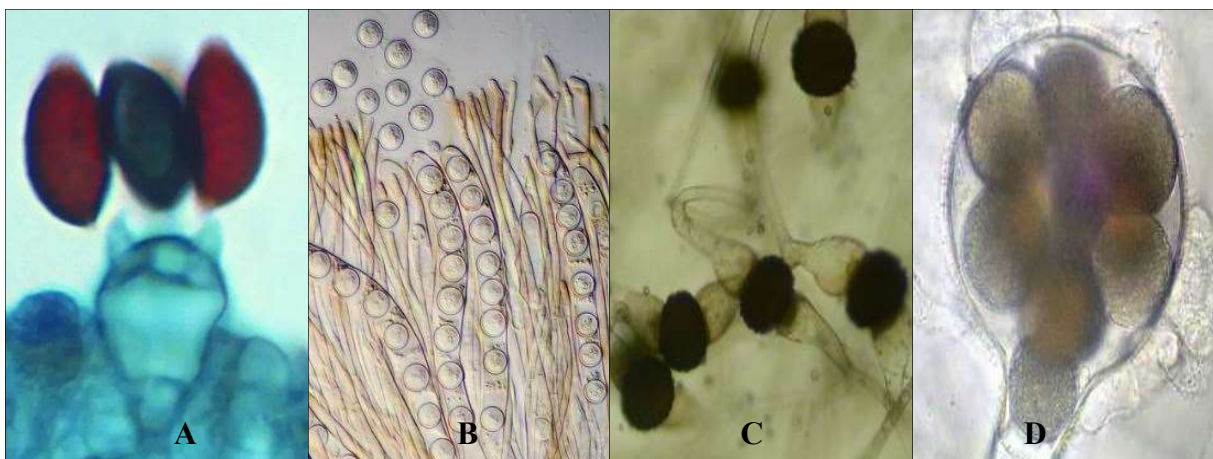


Figure 36. Les cellules issues de reproduction sexuée

A : Basidiospores

B : Ascospores

C : Zygospores

D : Oospores

13.1.4. Culture au laboratoire

Les mycètes peuvent être cultivés sur des milieux solides tels que des boîtes de Pétri, des tubes à essais ou des béchers, ou sur des milieux liquides comme des tubes ou des béchers, en fonction de l'objectif recherché. Par exemple, pour étudier l'aspect microscopique des mycéliums et des colonies, la culture est effectuée sur des géloses en boîtes de Pétri. Si l'objectif est la conservation des mycètes pendant un certain temps, il est préférable de réaliser une culture en gélose inclinée dans des tubes.

En ce qui concerne les milieux de culture, il existe de nombreux types utilisés en mycologie tels que le Sabouraud, l'Extrait de Malt, le Potatose Dextrose Agar (gélose dextrosée à la pomme de terre), le Czapek Yeast Agar, etc. Ces milieux permettent la croissance des champignons tout en inhibant les autres microorganismes, notamment les bactéries. On les qualifie de "milieux de routine" ou "milieux usuels".

Il est important de choisir le milieu de culture approprié en fonction de l'objectif de la culture des mycètes. Cela permet d'obtenir des résultats précis et de garantir la croissance optimale des champignons tout en limitant le développement d'autres microorganismes indésirables.

La culture des mycètes est une étape essentielle dans de nombreuses applications en microbiologie et en recherche scientifique. Elle permet d'étudier la morphologie, la physiologie et le développement des champignons, ainsi que leur interaction avec d'autres organismes. De plus, la culture des mycètes est également utilisée dans la production industrielle de substances d'intérêt telles que les antibiotiques, les enzymes et les composés bioactifs.

Les conditions de croissance des mycètes sont essentielles pour favoriser le développement de certains champignons. Pour cela, l'utilisation de milieux spécifiques est courante, où un inhibiteur de croissance est ajouté à un milieu de routine. Par exemple, le Sabouraud au chloramphénicol et à la gentamicine ou le Milieu d'Eggs et Pugh sont utilisés dans ce but. Ces milieux permettent de cibler spécifiquement les champignons tout en inhibant la croissance des bactéries.

En ce qui concerne les conditions environnementales, la température joue un rôle crucial. Les mycètes se développent généralement entre 25 et 35°C, avec une température idéale de 25°C pour les moisissures et un intervalle de 30 à 37°C pour les levures. Certains champignons pathogènes pour l'homme se cultivent même préférentiellement à 37°C.

Le pH est également un facteur important, avec une préférence pour un pH légèrement acide entre 5,5 et 6,5. En ce qui concerne l'oxygène, les mycètes sont en général aérobies facultatifs, bien que certaines espèces soient anaérobies et colonisent des habitats particuliers.

Il est intéressant de noter que la lumière n'est pas indispensable pour la croissance végétative des champignons, mais qu'elle peut jouer un rôle dans la sporulation en favorisant la sporogénèse chez certaines espèces.

La culture à grande échelle

La culture en bioréacteur est une méthode utilisée pour produire des substances à partir de microorganismes tels que des levures ou des moisissures. Cette méthode présente plusieurs variations en fonction de la souche utilisée, du milieu de culture, du produit recherché et du coût économique.

Deux types de cultures peuvent être effectués : **la culture en batch** et **la culture en milieu renouvelé**.

La culture en batch nécessite des bioréacteurs équipés de systèmes de mesure et de réglage des paramètres de culture, tandis que la culture en milieu renouvelé nécessite en plus le renouvellement du milieu de culture et de la souche si nécessaire.

Il est important que la souche utilisée soit pure, ce qui peut être obtenu par purification avec des repiquages successifs ou en utilisant des souches de référence. La culture dans les bioréacteurs peut se faire en utilisant différents types de milieux tels que des milieux solides, des milieux liquides stationnaires, des milieux liquides agités ou des gels de culture (culture immobilisée). Pour éviter les contaminations, il est essentiel de nettoyer et stériliser le bioréacteur avant son utilisation. Dans le cas de grands formats, le montage doit s'effectuer dans des conditions aseptiques. La culture en bioréacteur est souvent utilisée pour les productions industrielles car elle permet de prolonger le temps de culture et de contrôler les paramètres de croissance des microorganismes.

13.1.5. Classification des champignons

La classification des champignons repose principalement sur plusieurs critères :

➤ **Le type de thalle**

- Thalle unicellulaire : Levures
- Thalle filamenteux : Moisissures
- Thalle développé : Champignons champêtres
- Thalle primitif : Plasmodes

➤ **Le type de reproduction**

- Reproduction sexuée : Production de spores
- Reproduction asexuée : Production de conidies

➤ **L'écologie**

- Champignons saprophytes
- Champignons parasites
- Champignons mycorhiziens
- La constitution cellulaire :
- Champignons à paroi cellulaire en chitine
- Champignons à paroi cellulaire en cellulose

Les champignons sont regroupés en six divisions principales, chacune ayant ses propres caractéristiques distinctes.

Les **Chytridiomycètes** sont une division de champignons comprenant des espèces à thalles unicellulaires, tandis que les **Oomycètes** sont connus pour leurs thalles filamenteux.

Les **Ascomycètes** et les **Basidiomycètes** sont deux divisions importantes qui comprennent de nombreuses espèces de champignons, y compris des champignons comestibles et des champignons toxiques. Les **Zygomycètes** et les **Deutéromycètes** complètent la classification des champignons, chacun ayant ses propres caractéristiques uniques.

Il est intéressant de noter que les champignons ne se limitent pas aux seules formes visibles à l'œil nu. En effet, les levures, qui sont des champignons unicellulaires, ainsi que les moisissures et les champignons champêtres, font également partie de cette classification diversifiée. De plus, les champignons primitifs, tels que les plasmodes, ajoutent une dimension supplémentaire à la diversité des champignons.

Un aspect fascinant de la classification des champignons est l'importance des mycorhizes. Ces associations symbiotiques entre les champignons et les racines des plantes sont essentielles pour de nombreux écosystèmes. Les champignons mycorhiziens jouent un rôle crucial dans l'absorption des nutriments par les plantes, tout en bénéficiant également de composés organiques produits par les plantes.

Les **levures** se reproduisent généralement de deux manières différentes. La plupart des levures effectuent une reproduction sexuée en formant des asques contenant des ascospores, ce qui les classe parmi les Ascomycètes. Par exemple, les genres *Saccharomyces* et *Candida* appartiennent à cette catégorie. En revanche, certaines levures sont incapables de se reproduire sexuellement et se multiplient uniquement par mitose des noyaux, un processus appelé

bourgeonnement. Ces levures font partie des champignons imparfaits, également connus sous le nom de **Deutéromycètes**.

A. Les Chytridiomycètes

Ce sont un groupe de champignons aquatiques capables de se reproduire sexuellement. Ils peuvent vivre en parasites, saprophytes ou symbiotes. Leur mode de reproduction sexuée implique des cellules sexuées monoflagellées appelées "zoïdes" ou "zoospores sexuées". Ces cellules se développent en thalles avec des "gamétanges" ou "sporangies sexués", qui produisent à leur tour des zoïdes mâles ou femelles.

Lorsque ces zoïdes se fusionnent, ils forment des zygotes diploïdes biflagellés. Ensuite, le zygote subit des mitoses successives pour produire une multitude de zoospores monoflagellées asexuées, marquant le passage à la phase asexuée du cycle de reproduction des Chytridiomycètes.

La germination qui s'ensuit donne naissance à de nouveaux thalles diploïdes munis de sporanges asexués qui forment les zoospores. Le retour à la phase sexuée s'effectue par une mitose des noyaux des sporanges, formant des zoïdes flagellés, et le cycle recommence. Parmi les genres appartenant aux Chytridiomycètes, on trouve Chytridium, Monoblepharis et Allomyces. Ce dernier est connu pour sa production d'une phéromone appelée sirénine.



Figure 37. Thalle eucarpique chez les Chytridiomycètes

B. Les Oomycètes

Les Oomycètes sont des organismes appartenant au règne des champignons, mais ils se distinguent par leur thalle primitif siphonné et leur mode de reproduction particulier. Ils se trouvent dans des environnements aquatiques ou très humides, où ils se fixent aux substrats par des rhizoïdes. Contrairement à d'autres champignons, **leur paroi cellulaire ne contient pas de**

chitine. La reproduction asexuée des Oomycètes implique des zoospores dépourvues de paroi cellulaire, qui sont mobiles grâce à **deux flagelles**. Ces zoospores, appelées planospores, sont le résultat de la division cellulaire asexuée.

La reproduction sexuée des Oomycètes se produit par la fusion d'un gamétange mâle (spermatocyste) avec un gamétange femelle (oogone), formant ainsi une oospore. Contrairement à d'autres organismes, la fécondation se produit à l'intérieur de l'oospore, sans libération de gamètes. Les spores formées sont diploïdes et sont libérées sous forme de zoospores biflagellées. Après germination, chaque zoospore donne naissance à un thalle siphonné diploïde muni de sporocystes asexués. En cas de conditions environnementales défavorables, les sporocystes subissent une méiose pour former à nouveau des spermatocystes et des oogones, relançant ainsi le cycle de reproduction.

Les Oomycètes se divisent en deux principaux groupes : les **Saprolégniales**, qui vivent dans les eaux douces, et les **Péronosporales**, qui sont des parasites des plantes et causent des maladies telles que les mildious et les rouilles blanches.

Exemples d'Oomycètes :

- *Phytophthora infestans* : Agent du mildiou de la pomme de terre.
- *Pythium insidiosum* : Agent de la fonte des semis.
- *Albugo candida* : Agent du blanc du chou.

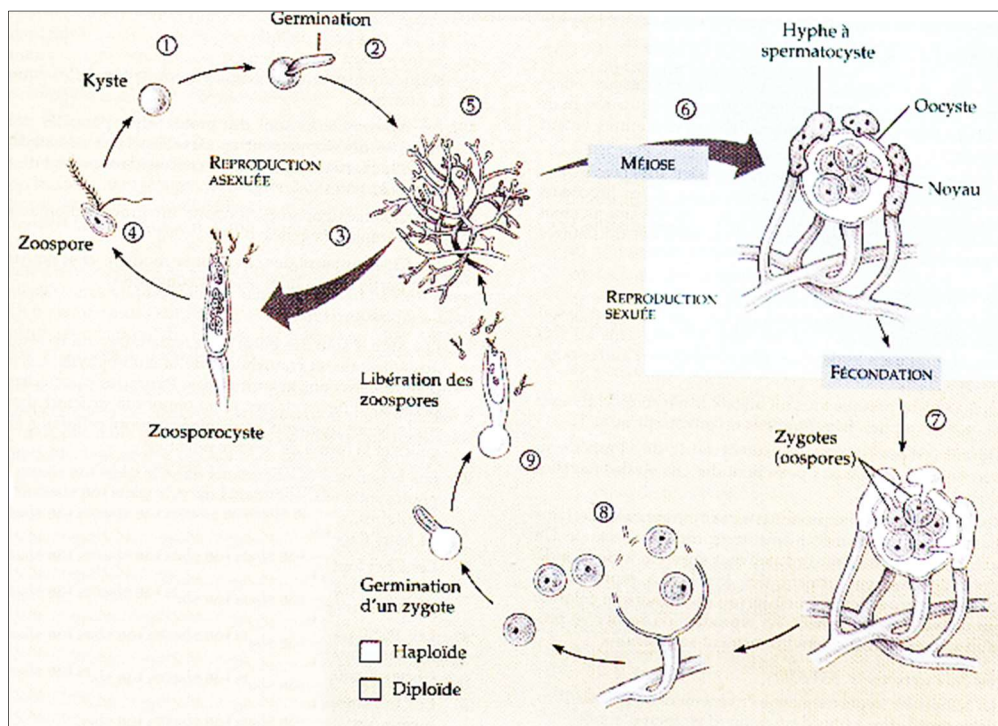


Figure 38. Cycle de reproduction des Oomycètes

C. Les Ascomycètes (Ascomycota)

Les Ascomycètes constituent un embranchement des champignons regroupant environ 64 000 espèces. Ils se distinguent des autres champignons par la présence d'asques, structures en forme de sac contenant des ascospores. Contrairement à d'autres divisions, leur thalle est bien défini, soit septé ou lévuroïde. Ils se reproduisent sexuellement en formant des asques contenant un nombre pair d'ascospores. La libération des ascospores se fait par ouverture de la partie supérieure des asques, les qualifiant de spores "internes exogènes". Ces asques sont regroupés dans une structure appelée "ascocarpe", qui peut prendre la forme d'un **cleistothèce**, d'un **périthèce** ou d'une **apothécie**. Les Ascomycètes comprennent des champignons développés, des moisissures et des levures, tous capables de produire des asques.

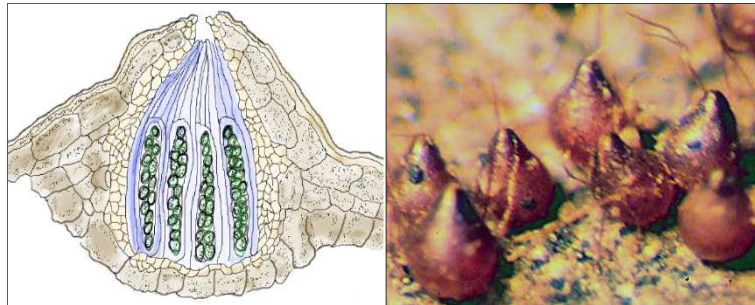


Figure 39. Ascocarpe de type "Périthèce"

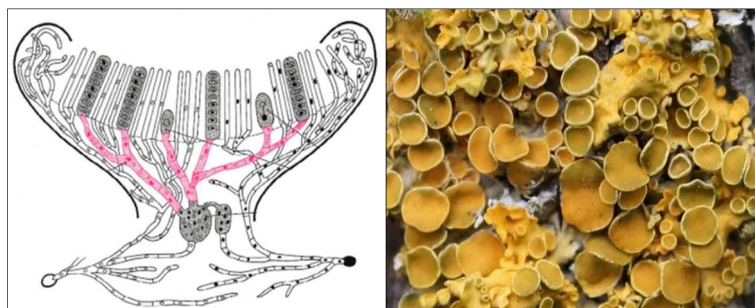


Figure 40. Ascocarpe de type "Apothécie"



Figure 41. Ascocarpe de type "Cleistothèce"

Le cycle de reproduction des Ascomycètes implique deux modes distincts :

La **reproduction asexuée** est un processus courant chez les champignons, se produisant lorsque les conditions environnementales sont favorables. Elle se réalise par bourgeonnement, où une petite excroissance se forme sur une cellule parentale haploïde (n) et finit par se séparer pour former un nouvel individu génétiquement identique. Certains Ascomycètes peuvent également se reproduire par conidiation, où des spores haploïdes appelées conidies se forment sur des structures spécialisées. Ces conidies peuvent être transportées par le vent ou l'eau pour former de nouveaux individus.

La **reproduction sexuée** chez les champignons est un processus complexe qui se produit dans des conditions environnementales moins favorables. Elle implique la fusion de deux mycéliums haploïdes compatibles de types sexuels différents. Ce processus débute par la plasmogamie, où les parois cellulaires de deux hyphes compatibles fusionnent, permettant aux cytoplasmes et aux noyaux de se fondre partiellement. Cela forme un mycélium dicaryotique contenant deux noyaux haploïdes par cellule. Les noyaux haploïdes peuvent ensuite fusionner par caryogamie pour former un noyau diploïde ($2n$). Ce noyau diploïde subit ensuite la méiose, produisant quatre noyaux haploïdes génétiquement uniques, encapsulés dans des spores spécialisées appelées ascospores. Ces ascospores se développent à l'intérieur d'une structure reproductive appelée asque, et une fois mures, elles sont libérées pour former de nouveaux mycéliums haploïdes lorsqu'elles germent.

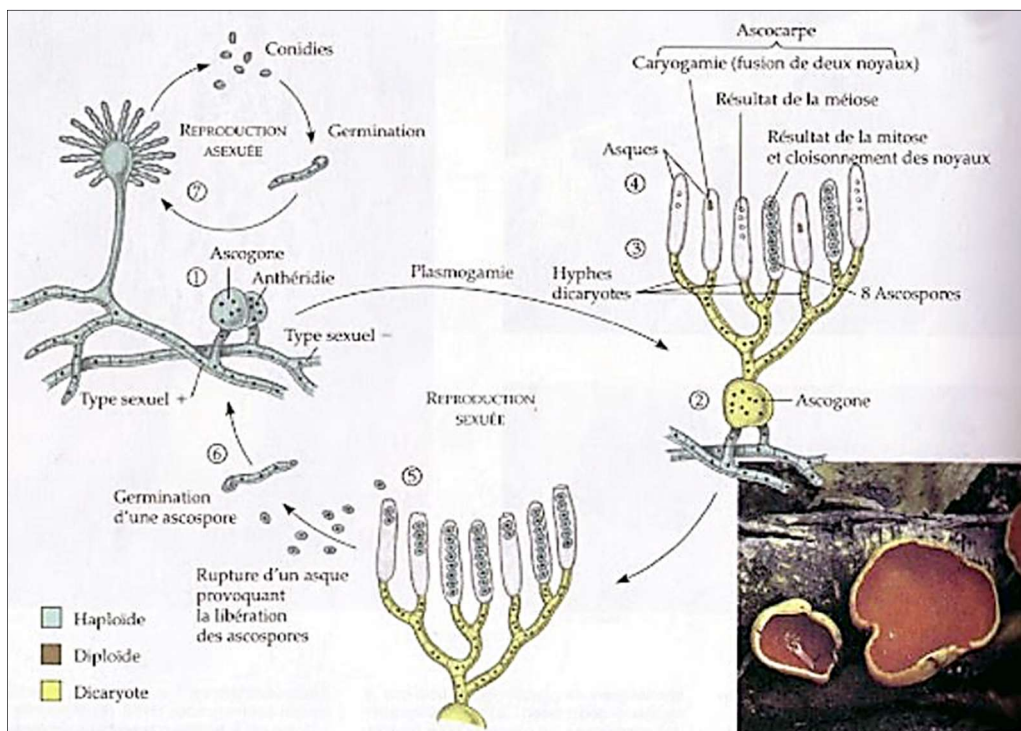


Figure 42. Reproduction sexuée et asexuée chez les Ascomycètes

D. Les Basidiomycètes (Basidiomycota)

Les Basidiomycètes sont un groupe de champignons qui se distinguent par leur thalle septé bien développé et leur capacité à effectuer la reproduction sexuée en formant des basides. Ces champignons sont considérés comme parfaits et supérieurs en raison de leur complexité et de leur importance dans les écosystèmes.

Les basides sont des structures clés dans le cycle de reproduction des Basidiomycètes. Elles produisent des basidiospores portées par des stérigmates, de petits pédoncules. Après la méiose dans la baside, les stérigmates permettent le passage des noyaux haploïdes vers les basidiospores formées à l'extérieur. Une fois mûres, ces dernières sont libérées par la rupture des stérigmates. Contrairement aux ascospores, les basidiospores sont considérées comme des spores "externes".

Les basides sont regroupées dans une structure appelée "basidiocarpe", plus communément connue sous le nom de "chapeau". La surface interne du basidiocarpe, appelée "hyménium", est constituée de fines lamelles portant les basides. Le basidiocarpe est soutenu par le "carpophore" ou "basidiocarpophore", généralement désigné sous le nom de "pied". Ce dernier se termine par une partie végétative souterraine composée de rhizoïdes et de filaments septés.

Les Basidiomycètes jouent un rôle essentiel dans la décomposition de la matière organique et dans la symbiose avec de nombreuses plantes. Certains d'entre eux sont également utilisés dans l'industrie alimentaire, comme les champignons comestibles, tandis que d'autres ont des propriétés médicinales.

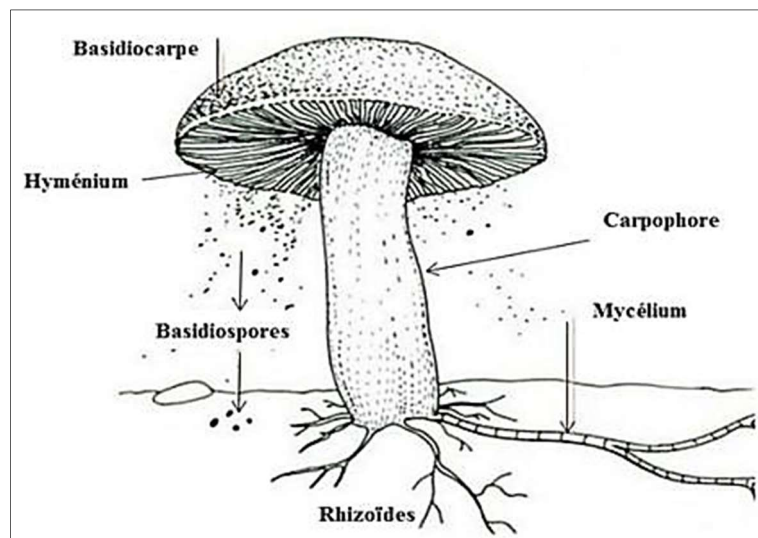


Figure 43. Morphologie du Basidiomycète

Les Basidiomycètes peuvent se reproduire de deux manières :

Reproduction sexuée :

- Fusion de deux mycéliums haploïdes compatibles, échange de noyaux.
- Formation d'un mycélium dicaryotique avec des cellules binucléées.
- Développement de basidiocarpes, structures macroscopiques.
- Formation de basides sur l'hyménium, production de basidiospores haploïdes par méiose.
- Dispersion des basidiospores par le vent, germination et développement de nouveaux mycéliums.

Reproduction asexuée :

- Forme rare chez les Basidiomycètes.
- Production de spores asexuées appelées conidies par fragmentation du mycélium ou par des cellules spécialisées.
- Dispersion des conidies par le vent ou l'eau.
- Germination des conidies et développement de nouveaux mycéliums.

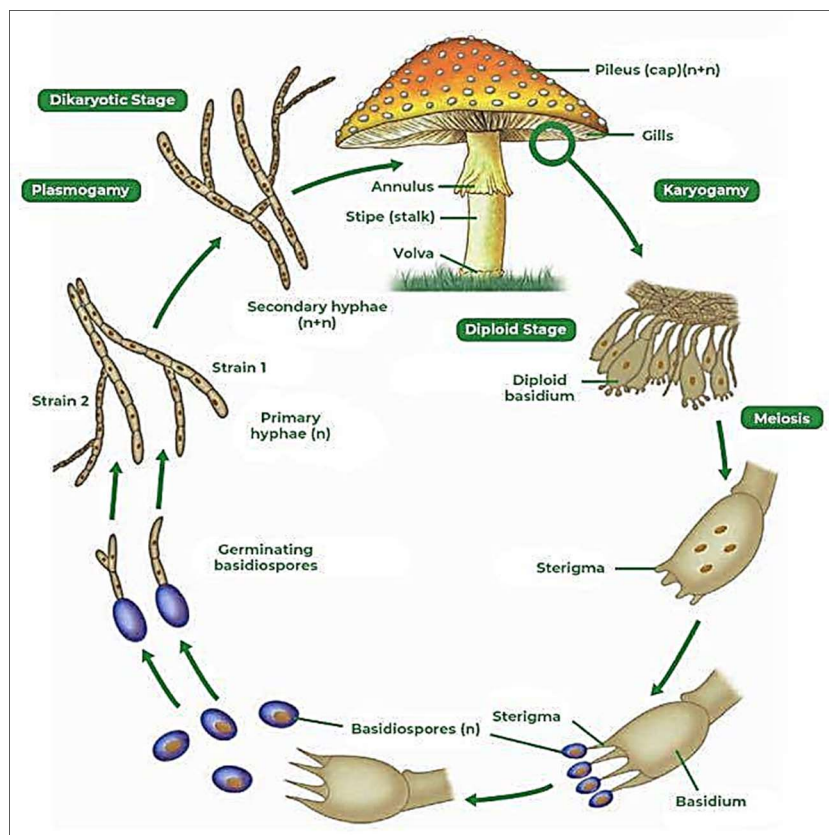


Figure 44. Cycle de reproduction des Basidiomycètes

E. Les Zygomycètes (Zygomycota)

Les Zygomycètes sont un groupe de champignons fascinants qui se distinguent par leur thalle siphonné et leur mode de reproduction sexuée par formation de zygospores. Ces champignons parfaits présentent un mycélium souvent envahissant, fixé au substrat grâce à des rhizoïdes et surmonté d'un grand nombre d'organes reproducteurs.

Le thalle des Zygomycètes se compose de quatre parties distinctes. Tout d'abord, les sporocystes ou gamétocystes, qui représentent les organes reproducteurs et sont souvent munis d'une « columelle » ou « vésicule centrale ». Ensuite, les sporophores, des filaments souvent dressés qui portent les sporocystes. Ces sporophores peuvent être enflés à leur extrémité formant des « apophyses », ou bien avoir une septé sous les organes reproducteurs. Ils peuvent également être ramifiés ou non ramifiés.

Le « stolon » ou le « manchon » constitue une autre partie du thalle de ces champignons, c'est un mycélium large, long, siphonné, non ou peu ramifié qui porte les sporophores. Enfin, les rhizoïdes permettent la fixation du thalle sur le substrat et l'absorption des nutriments.

Il est intéressant de noter que des chlamydozoospores peuvent être observées chez les Zygomycètes lorsque les conditions environnementales deviennent défavorables. Ces chlamydozoospores constituent une adaptation de ces champignons à des conditions difficiles et contribuent à assurer leur survie dans des environnements hostiles.

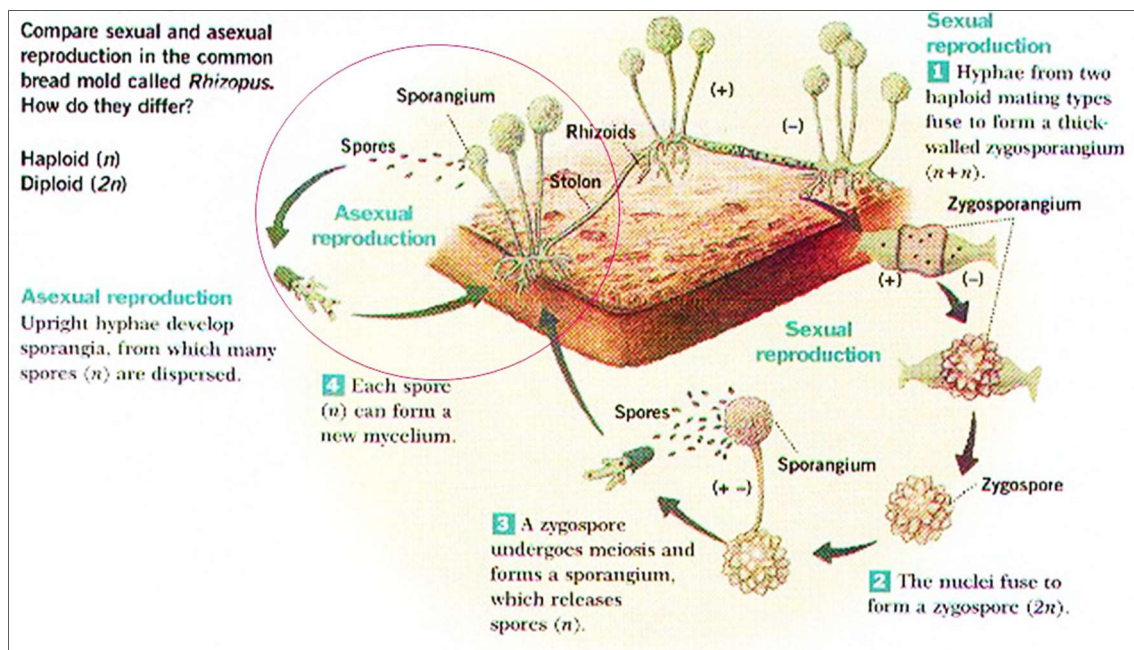


Figure 45. Cycle de vie des Zygomycètes

La division des Zygomycètes comprend une classe importante, celle des Zycomycotina et une seconde classe : les Trichomycotina. Les Zygomycètes sont un groupe de champignons filamenteux qui se distinguent par leur mode de reproduction sexuée, caractérisé par la formation de zygospores après la fusion de deux hyphes haploïdes. Cette division est également connue pour sa reproduction asexuée, qui se produit par la formation de spores.

Lors de la reproduction asexuée, les spores des Zycomycotina sont formées de deux manières différentes permettant de diviser la classe en deux ordres importants : les Mucorales et les Entomophthorales.

Les Mucorales produisent des spores immobiles à l'intérieur des sporocystes, ces spores « internes » sont qualifiées de « sporocystospores ». Ces champignons sont principalement rencontrés sur les aliments détériorés. Les genres représentant sont *Mucor*, *Rhizopus* et *Alternaria*.

Les Entomophthorales, quant à eux, produisent des spores « exogènes ». Une fois mûres, ces cellules sont projetées à l'extérieur du sporocyste. Les Entomophthorales sont pour la majorité des parasites d'insectes utilisés dans la lutte biologique. Quelques espèces seulement sont saprophytes, telles que : *Entomophthora*, *Entomophaga* et *Pandora*.

La classification des Zygomycètes est essentielle pour comprendre la diversité et l'écologie de ces champignons, ainsi que leur rôle dans les écosystèmes. En outre, ces informations sont importantes pour la recherche en biologie et en biotechnologie, notamment dans le domaine de la lutte biologique contre les parasites d'insectes.

F. Les Deutéromycètes (Deuteromycota)

Les deutéromycètes, également connus sous le nom de champignons imparfaits, sont un groupe de champignons qui ne présentent pas de stade de reproduction sexuée. Ils sont classés comme champignons imparfaits car on ne connaît pas leur stade de reproduction sexuée, ou s'ils en ont un. On pense qu'il s'agit d'un groupe polyphylétique, ce qui signifie qu'ils ne descendent pas d'un ancêtre commun.

Les deutéromycètes sont un groupe de champignons très diversifié, avec plus de 30 000 espèces décrites. Ils se trouvent dans une grande variété d'habitats, y compris le sol, l'eau et l'air. Certains deutéromycètes sont des agents pathogènes importants des plantes et des animaux, tandis que d'autres sont utilisés dans la production d'aliments, de médicaments et d'autres produits.

Les champignons imparfaits ont longtemps intrigué les scientifiques en raison de leur mode de reproduction mystérieux. Contrairement à de nombreux autres organismes, ils ne

semblent pas suivre le schéma classique de reproduction sexuée. Cela a rendu difficile la classification et la compréhension de leur évolution.

Malgré leur mystère, les deutéromycètes jouent un rôle crucial dans de nombreux écosystèmes. Leur capacité à décomposer la matière organique contribue au recyclage des éléments nutritifs, ce qui est essentiel pour la santé des sols et des écosystèmes en général. De plus, certains deutéromycètes ont des applications pratiques dans l'industrie et la médecine.

En effet, plusieurs espèces de champignons imparfaits sont utilisées dans la production alimentaire, que ce soit pour la fabrication de fromages ou pour la fermentation de produits tels que la sauce soja. Leur capacité à décomposer la matière organique est également exploitée dans le domaine de la biotechnologie, où ils sont utilisés pour produire des enzymes et d'autres composés utiles.

Parallèlement à leurs utilisations industrielles, certains deutéromycètes ont des propriétés médicinales intéressantes. Des études ont montré que certaines espèces produisent des composés aux propriétés antibiotiques ou antifongiques, ce qui ouvre des perspectives prometteuses pour le développement de nouveaux médicaments.

Les deutéromycètes peuvent exister sous différentes formes, y compris :

- **Moisissures** : ce sont les formes les plus courantes de deutéromycètes. On les trouve sur une variété de substrats, y compris les aliments, les textiles et les surfaces ménagères.
- **Levures** : ce sont des deutéromycètes unicellulaires. Ils sont utilisés dans la production de pain, de vin et d'autres produits fermentés.
- **Champignons charnus** : ce sont des deutéromycètes qui produisent des structures en forme de champignon. Certains champignons charnus sont comestibles, tandis que d'autres sont vénéneux.

Les deutéromycètes se reproduisent de manière asexuée par un certain nombre de méthodes, notamment :

- **Sporulation** : les spores sont des cellules reproductrices qui peuvent être transportées par le vent ou l'eau.
- **Fragmentation** : l'hyphe peut se fragmenter en morceaux, chacun pouvant se développer en un nouvel individu.
- **Bourgeonnement** : de nouvelles cellules peuvent se développer à partir de cellules existantes.

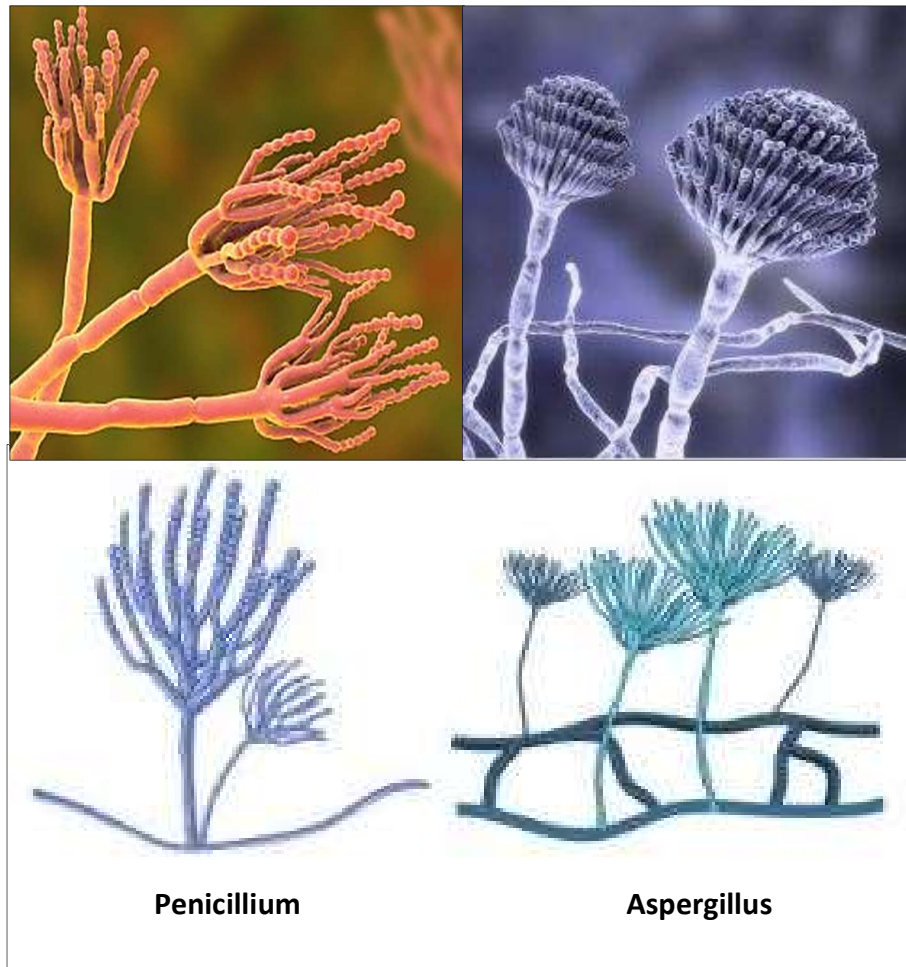


Figure 46. Quelques Deutéromycètes et conidiophores

G. Les Glomérromycètes (Glomeromycota)

Les **Glomérromycètes** constituent un minuscule groupe de champignons très peu connus mais écologiquement indispensables. Ce sont des champignons mycorhiziens (du grec myco ; champignon et rhiza ; racine) vivant en symbiose obligatoire avec les racines d'un grand nombre de plantes. Environ 90 % des végétaux forment de telles associations symbiotiques avec les Glomérromycètes qui leur fournissent les minéraux essentiels en échange des glucides.

On distingue deux types principaux de mycorhizes :

- 1) Les **endomycorhizes** (ou mycorhizes internes) sont la forme la plus répandue. Ce sont des mycorhizes qui pénètrent à l'intérieur des racines pour mieux s'y associer.

Il existe plusieurs types d'endomycorhizes :

- Les **endomycorhizes à arbuscules ou arbusculaires** : c'est le cas le plus répandu, ces champignons mycorhiziens arbusculaires colonisent environ 80 % des plantes vasculaires terrestres et sont formées

uniquement par des champignons appartenant à la division des Glomérormycètes. Les hyphes s'étendent dans le parenchyme cortical de la racine, formant des vésicules de réserves et des arbuscules.

- *Les endomycorhizes à pelotons intracellulaires* : les hyphes forment des amas dans les cellules corticales des racines. Elles impliquent des basidiomycètes, en symbiose avec les Orchidées.
- *Les endomycorhizes éricoïdes* : les hyphes forment des pelotons dans les racines transitoires de faible diamètre. Elles impliquent des Ascomycètes ou Basidiomycètes en symbiose avec les Éricacées.
- *Les endomycorhizes arbutoïdes* : les hyphes forment des pelotons intracellulaires et un manteau autour de la racine chez les Éricacées.

2) Les *ectomycorhizes* (ou mycorhizes externes) concernent seulement 5 % des plantes vasculaires, en majorité des arbres de forêts tempérées (ex : les Pinacées) et des champignons appartenant à la division des Ascomycètes, des Basidiomycètes ou des Zygomycètes. Ces mycorhizes ne pénètrent pas à l'intérieur des cellules de la plante, mais entourent simplement les racines, formant un manteau de mycélium et un réseau autour de la paroi des cellules de la racine.

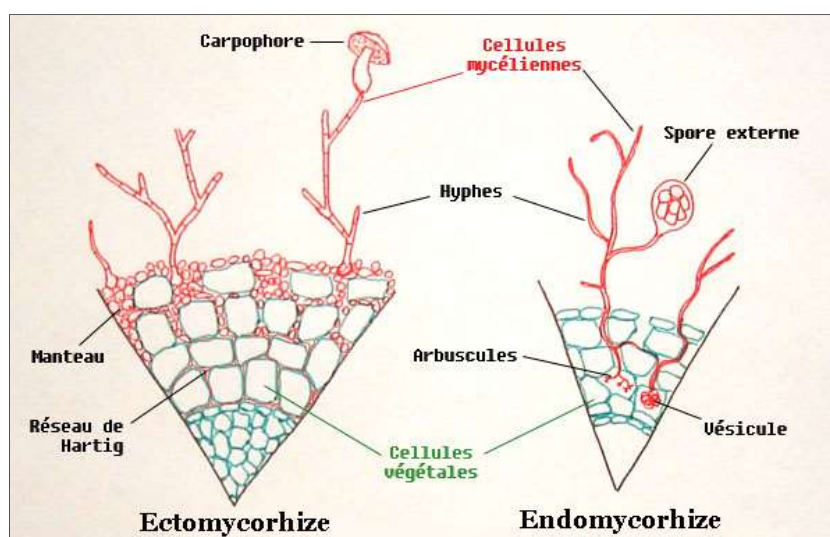


Figure 47. Différence entre Endomycorhizes et Ectomycorhizes

Les champignons sont un sujet fascinant qui met en lumière les limites de nos connaissances sur les mycètes. En particulier, la caractérisation des Glomérormycètes représente un défi majeur. En effet, ces organismes ne présentent aucune preuve de reproduction sexuée, ce qui complique grandement leur classification. De plus, les hyphes des Glomérormycètes se

distinguent par l'absence de septums, une caractéristique partagée avec la plupart des Zygomycètes. Autrefois classés dans l'ordre des Glomales parmi les Zygomycètes (Zygomycota), les Gloméromycètes soulèvent de nombreuses questions sur leur évolution et leur place au sein du règne fongique. Ainsi, l'étude approfondie de ces champignons pourrait nous permettre de mieux comprendre la diversité et la complexité des mycètes, tout en repoussant les frontières de notre compréhension de ces organismes fascinants.

Cependant, la comparaison des séquences de la petite sous-unité d'ARNr a montré que les Gloméromycètes constituent un groupe monophylétique distinct des Zygomycètes. Contrairement à ces derniers, les Gloméromycètes n'ont pas de zygospores. Ils sont apparus il y a au moins 600 à 620 millions d'années, bien avant l'apparition des champignons supérieurs. Actuellement, il existe environ 150 espèces, mais il en existe beaucoup plus.

Au niveau systématique, les Gloméromycètes constituent une division (embranchement) du règne des champignons (Fungi ou Mycota). D'après la 10^e édition de Dictionary of the Fungi (2007), classe est constituées des ordres suivants :

- Ordre des *Diversisporales* ;
- Ordre des *Paraglomerales* ;
- Ordre des *Glomerales* (autrefois appelées Glomales) ;
- Ordre des *Archaeosporales* (autrefois appelées Geosiphonales) contenant le genre *Geosiphon* (autrefois considéré comme une espèce lichénisée « *Geosiphon* + *Nostoc* »).

Le suivi des gènes accompagnés de marqueurs moléculaires n'a pas permis de mettre en évidence des recombinaisons génétiques. Il est donc actuellement admis par la majorité des mycologues que ces champignons sont dépourvus de reproduction sexuée et qu'ils forment des spores asexuées (mitospores) bien que, la question de savoir, si les noyaux du mycélium coenocytique sont génétiquement identiques ou non, fasse l'objet de nombreux débats.

Les microspores se forment lorsque l'association symbiotique commence à passer en phase de sénescence ou lorsque le champignon commence à réutiliser les nutriments préalablement stockés dans les racines. Cette élaboration peut se faire à partir des hyphes de la racine ou des hyphes du sol.

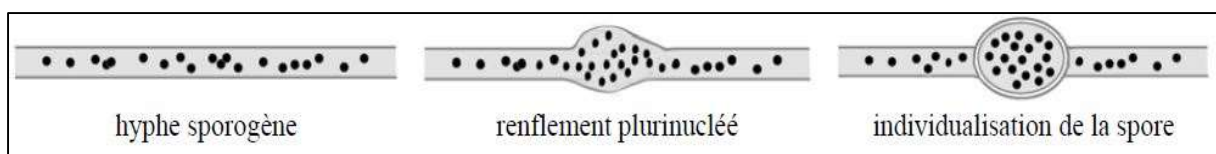


Figure 48. *Processus de formation des spores*

Certaines hyphes mycéliennes coenocytiques, appelées hyphes sporogènes, forment des renflements qui contiennent du cytoplasme, de nombreux noyaux, des réserves, principalement sous forme de lipides. Ces renflements s'entourent ensuite d'une paroi ± épaisse, ce qui permet l'individualisation des spores. Parfois la spore est portée par un petit pédicelle (ex. chez les *Archaeospora*) ou se forme à l'extrémité de l'hyphe sporogène (ex. chez les *Glomus*). Dans quelques cas, les mitospores sont regroupées, formant des agglomérats, les mitosporomes. Les hyphes sporogènes jouent un rôle crucial dans le processus de reproduction des champignons et sont essentielles à la dispersion des spores. Cette formation complexe est étudiée en mycologie pour mieux comprendre la diversité et l'évolution des champignons.

13.1.6. Intérêt des champignons

Les champignons sont des aliments qui présentent de nombreux intérêts nutritionnels, pour la santé, culinaires, environnementaux et autres. Ils sont riches en protéines, en fibres, en minéraux tels que le potassium, le phosphore, le magnésium, le fer et le zinc, ainsi qu'en vitamines du groupe B. Leur teneur en calories est faible, ce qui en fait un aliment idéal pour ceux qui cherchent à contrôler leur poids. Sur le plan de la santé, les champignons sont reconnus pour leurs propriétés antioxydantes, qui contribuent à lutter contre le vieillissement cellulaire et à prévenir certaines maladies. Ils sont également bénéfiques pour la santé cardiovasculaire, grâce à leur teneur en fibres et en potassium. De plus, les champignons sont une source naturelle de vitamine D, essentielle pour la santé des os et pour renforcer le système immunitaire.

Côté culinaire, les champignons offrent une grande diversité de saveurs et de textures, ce qui en fait un ingrédient polyvalent pour de nombreuses recettes. Qu'ils soient utilisés crus en salade, cuits à la poêle, farcis, en sauce ou en soupe, les champignons apportent une touche d'originalité et de gourmandise à de nombreux plats. Leur goût unique et leur capacité à absorber les arômes des autres ingrédients en font un allié précieux en cuisine.

D'un point de vue environnemental, la culture des champignons présente des avantages notables. En effet, les champignons sont des organismes décomposeurs qui participent au recyclage des matières organiques. Leur culture nécessite peu d'eau et d'espace par rapport à d'autres cultures agricoles, ce qui en fait une option écologique pour l'alimentation. De plus, les déchets de culture de champignons peuvent être utilisés comme fertilisant naturel pour les sols.

Enfin, les champignons sont également source d'inspiration pour de nombreuses traditions culinaires à travers le monde. Leur utilisation remonte à des siècles dans de nombreuses cultures, où ils sont appréciés pour leurs qualités gustatives et nutritionnelles.

14. Notion de virologie

Les virus sont des entités microscopiques qui ne peuvent se reproduire qu'en infectant des cellules hôtes. Leur potentiel pathogène est bien connu, étant capable de causer des maladies graves chez les humains, les animaux et les plantes. Certains virus peuvent avoir plusieurs hôtes, ce qui les rend particulièrement redoutables.

En 1892, Dimitri Ivanovsky a démontré que l'agent responsable était non filtrable, ne pouvant être retenu par les filtres bactériens. Ce n'est qu'en 1935 que Wendell Stanley a réussi à isoler le virus responsable et à entreprendre les premières études morphologiques et chimiques sur le virus purifié.

Outre leur effet pathogène, les virus sont également reconnus pour jouer un rôle bénéfique dans l'évolution des cellules vivantes. En effet, de nombreux génomes viraux s'intègrent temporairement au génome de la cellule hôte, en extrayant certains gènes lorsqu'ils se détachent pour les transporter dans une nouvelle cellule. Ce phénomène a joué un rôle significatif dans l'évolution de nombreuses espèces.

Ainsi, bien que souvent associés à des maladies et des infections, les virus ont également eu un impact sur l'évolution biologique à travers l'histoire. Leur complexité et leur capacité à interagir avec les cellules vivantes en font un sujet d'étude fascinant pour les chercheurs dans le domaine de la microbiologie et de la biologie évolutive.

14.1. Définition des virus et des virions

Les virus sont des entités de matières organiques qui ne possèdent pas de structure cellulaire. Ils sont composés d'un acide nucléique (**ADN ou ARN**) et d'une coque protéique appelée « **capside** ». Certains virus peuvent être nus, c'est-à-dire sans enveloppe, tandis que d'autres sont entourés par une enveloppe. En raison de cette absence de structure cellulaire, on qualifie la structure des virus de « structure acellulaire ».

Lorsqu'un virus est expulsé par la cellule hôte après sa destruction, on parle de **virion** qui est complet, autonome et prêt à infecter un nouvel hôte.

Les virus sont capables de causer des maladies chez les organismes qu'ils infectent. Ils peuvent infecter divers types de cellules, qu'elles appartiennent à des êtres humains, des animaux, des plantes ou même des bactéries. Certaines maladies courantes causées par des virus comprennent le rhume, la grippe, la rougeole, la varicelle et bien d'autres.

La capacité des virus à infecter les cellules repose sur leur capacité à se lier à des récepteurs spécifiques à la surface des cellules hôtes. Une fois qu'ils ont pénétré dans la cellule

hôte, les virus utilisent les ressources de celle-ci pour se reproduire et propager leur matériel génétique. Ce processus peut entraîner divers effets sur la cellule hôte, allant de la perturbation de ses fonctions normales à sa destruction totale.

Il existe différents types de virus, chacun ayant ses propres caractéristiques et modes d'infection. Certains virus sont transmis par l'air, d'autres par contact direct ou par l'intermédiaire d'organismes vecteurs tels que les moustiques. La recherche sur les virus est essentielle pour mieux comprendre leur biologie, développer des vaccins et des traitements, et prévenir la propagation des maladies virales.

14.1. Définition des virus et des virions

Les virus, ces entités acellulaires de taille très petite, sont des organismes capables de traverser des filtres imperméables aux bactéries. Leur caractéristique principale réside dans leur capacité à se développer en détournant le métabolisme d'une cellule hôte. Incapables d'effectuer la moindre fonction physiologique, ils sont qualifiés de **"parasites obligatoires absolus"**.

En effet, leur reproduction ne peut se faire qu'en utilisant le métabolisme de la cellule hôte, dont ils dépendent pour accomplir toutes les fonctions nécessaires à leur survie et à leur réplication.

De plus, les virus sont capables de subir des mutations et des recombinaisons, leur permettant ainsi d'évoluer et de s'adapter aux changements de leur environnement. Cette capacité d'adaptation leur confère la possibilité de résister aux différents traitements et d'augmenter leur pouvoir pathogène. Un exemple frappant est celui du VIH, qui a su développer des mécanismes de résistance aux traitements antirétroviraux.

Cette capacité évolutive des virus constitue un défi majeur dans le domaine de la santé publique. En effet, elle rend difficile le développement de traitements efficaces contre certaines infections virales, car les virus peuvent rapidement devenir résistants aux médicaments. Cela souligne l'importance de la recherche continue pour comprendre les mécanismes d'évolution des virus et développer des stratégies innovantes pour les contrer.

Par ailleurs, il est crucial de souligner que les virus ne sont pas tous pathogènes pour l'homme. Certains d'entre eux jouent un rôle essentiel dans l'équilibre écologique, notamment en régulant les populations d'autres organismes. De plus, les virus sont également utilisés en biotechnologie, notamment dans le domaine de la thérapie génique.

14.2. Structure des virus et des bactériophages

A. Structure des virus

Les virus sont des agents pathogènes composés d'un acide nucléique, tel que l'ADN ou l'ARN, qui est entouré par des protéines formant une structure appelée « nucléocapside ». Cette nucléocapside peut être soit nue, c'est-à-dire non enveloppée, soit entourée par une enveloppe. La capsid, formée par ces protéines, protège l'acide nucléique viral et lui permet de pénétrer dans les cellules hôtes pour se reproduire. En fonction du type de virus, la présence ou l'absence d'une enveloppe peut influencer la capacité du virus à survivre dans l'environnement et à infecter un hôte. Comprendre la structure des virus est essentiel pour développer des stratégies de prévention et de traitement efficaces contre les maladies virales.

- **Le génome viral** : le génome viral est un acide nucléique, qui peut être soit de l'ADN ou de l'ARN, mais jamais les deux en même temps. Il peut exister sous forme monocaténaire ou bicaténaire, ce qui signifie que les virus peuvent posséder de l'ADN monocaténaire, de l'ADN bicaténaire, de l'ARN monocaténaire ou de l'ARN bicaténaire. De plus, cet acide nucléique peut être circulaire ou linéaire, segmenté ou attaché. Dans le génome viral, on ne trouve que les gènes des enzymes de la réplication et des enzymes responsables du détournement du métabolisme de la cellule hôte. Ainsi, la structure du génome viral varie en fonction du type de virus, mais elle contient toujours les informations nécessaires pour sa réplication et son interaction avec la cellule hôte. La taille du génome viral varie considérablement, allant de quelques milliers à 250 000 nucléotides. C'est pourquoi on parle de "génome" plutôt que de "chromosome". Pour mettre cela en perspective, rappelons que la bactérie *Escherichia coli* contient près de 4 millions de nucléotides dans son génome. Cette diversité de tailles génomiques parmi les virus est remarquable et souligne l'adaptabilité et la complexité de ces micro-organismes.

- **La capsid** : est entièrement constituée de protéines. Elle peut contenir un ou plusieurs types de molécules et ces dernières sont rassemblées pour former les capsomères, qui sont les sous-unités de la capsid. L'assemblage des capsomères est caractéristique de chaque virus et permet d'obtenir une morphologie précise de la capsid, qu'elle soit **hélicoïdale**, **polyédrique (multifaces)**, **cubique**, etc. La capsid joue un rôle crucial dans la protection du génome viral et dans la fixation sur la cellule hôte en déterminant l'antigénicité du virus.

- **L'enveloppe** : elle est constituée par la membrane cytoplasmique ou la membrane nucléaire de la cellule hôte. Cette enveloppe est composée de lipides, de glucides et de protéines, ce qui lui confère des propriétés essentielles à la survie et au fonctionnement de la

cellule. Les lipides constituent une barrière physique et chimique, permettant de contrôler les échanges avec l'environnement extérieur. Les glucides jouent un rôle dans la reconnaissance et l'interaction avec d'autres cellules, tandis que les protéines assurent des fonctions diverses telles que le transport des molécules et la communication cellulaire. Ainsi, l'enveloppe cellulaire est une structure fondamentale qui participe activement aux processus biologiques au sein de l'organisme.

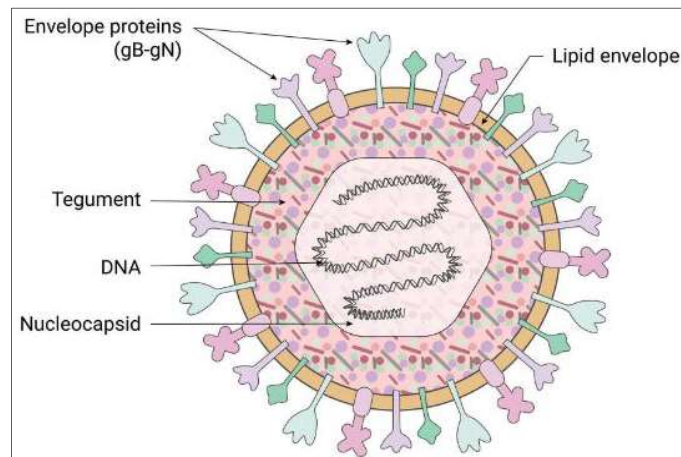


Figure 49. Structure du virus

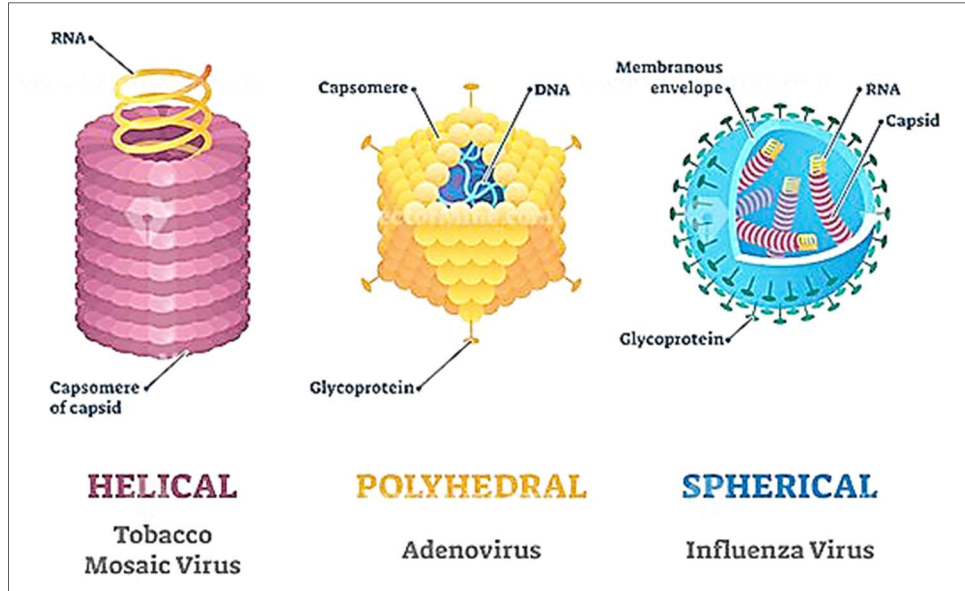


Figure 50. Différents types de virus

B. Structure des bactériophages

Les bactériophages, également connus sous le nom de phages, sont des virus qui infectent les bactéries. Leur structure unique leur permet de se fixer sur la paroi bactérienne et d'injecter leur matériel génétique à l'intérieur de la cellule hôte. Cette capacité en fait des outils prometteurs pour lutter contre les infections bactériennes résistantes aux antibiotiques. Les bactériophages peuvent être trouvés dans divers environnements, tels que les sols, les eaux usées et même dans le corps humain. Leur diversité génomique offre un potentiel considérable pour la recherche et le développement de thérapies phagiques ciblées. En comprenant mieux ces virus et en exploitant leurs mécanismes d'action, il est possible d'explorer de nouvelles approches pour combattre les infections bactériennes et améliorer la santé publique.

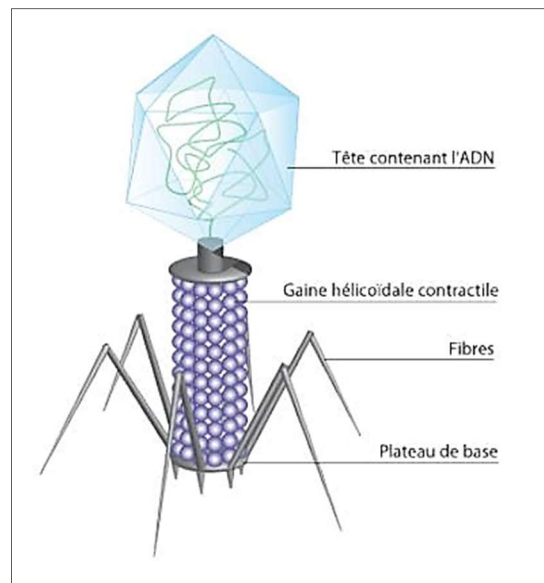


Figure 51. Structure du bactériophage

14.3. La systématique virale

Le Comité International de la Taxonomie des Virus (CITV) a établi trois principaux paramètres pour différencier et classer les virus. Ces paramètres ont permis de diviser les virus en familles, chaque famille contenant différents genres et espèces. Par la suite, les familles présentant des similitudes ont été regroupées en ordres. Les caractéristiques principales prises en compte par le CITV pour classer les virus sont les suivantes :

- La structure génétique : Le CITV a étudié la structure génétique des virus, en se basant sur leur ADN ou leur ARN. Cette caractéristique a permis de distinguer les différents genres et espèces de virus.

- Le mode de transmission : Le CITV a également pris en compte le mode de transmission des virus, qu'il soit aérien, vectoriel, ou par contact direct. Cette information a été cruciale pour regrouper les familles de virus présentant des similitudes dans leur mode de transmission.
- Les symptômes et effets sur l'hôte : Enfin, le CITV a examiné les symptômes et les effets des virus sur leurs hôtes. Certains virus peuvent causer des maladies spécifiques chez l'homme, les animaux ou les plantes, et cette caractéristique a été utilisée pour classer les virus en familles et en ordres.

En utilisant ces trois paramètres principaux, le CITV a pu établir une classification précise des virus, permettant ainsi aux scientifiques et aux professionnels de la santé de mieux comprendre la diversité et la complexité de ces agents pathogènes.

14.4. Les génomes viraux

Le génome viral peut présenter une grande diversité de formes et de compositions. Comme mentionné précédemment, il peut être composé d'ADN ou d'ARN. L'ADN viral peut être **monocaténaire** ou **bicaténaire**, **circulaire** ou linéaire, tandis que l'ARN viral peut également adopter ces différentes configurations. De plus, le génome viral peut être segmenté, c'est-à-dire divisé en plusieurs fragments distincts, ou bien il peut être présent sous forme d'un seul brin continu.

Cette variabilité dans la structure du génome viral est un élément clé de l'adaptabilité et de la diversité des virus, et elle influence également les stratégies de lutte contre les infections virales. Comprendre ces différentes caractéristiques du génome viral est essentiel pour développer des approches thérapeutiques et préventives efficaces contre les maladies virales.

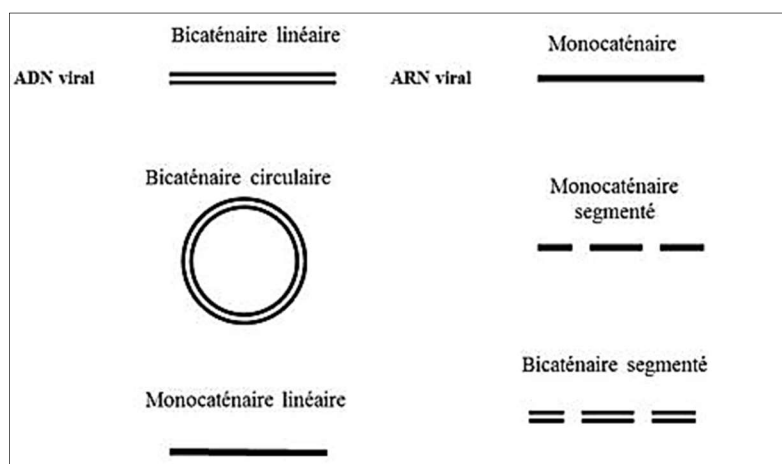


Figure 52. Les types de génomes viraux

Selon les génomes, les virus sont divisés comme suit :

- **Virus à ADN**
 - ADN bicaténaire : linéaire ou circulaire
 - ADN monocaténaire : linéaire
- **Virus à ARN**
 - ARN bicaténaire : segmenté
 - ARN monocaténaire à polarité positive (ARN +) : c'est un ARN qui peut être directement traduit par les ribosomes.
 - ARN monocaténaire à polarité négative (ARN -) : cet ARN doit être transcrit en ARNm avant la traduction.
 - ARN monocaténaire ambisens (ARN +/-) : c'est un ARN formé d'une portion à polarité positive liée à une autre portion à polarité négative.
- **Virus à rétro-transcriptase (RT) : Ces virus sont capables de coder une RT qui permet la synthèse de l'ADN à partir de l'ARN :**
 - Virus à ARN monocaténaire (+ RT)
 - Virus à ADN bicaténaire (+ RT)

14.5. Le cycle viral

A. L'attachement

Les virus sont des agents infectieux qui ne peuvent pas cibler délibérément les cellules hôtes, mais qui entrent en collision avec elles de manière accidentelle. Cependant, lorsqu'ils adhèrent aux cellules, cela se fait de manière spécifique grâce aux protéines de la capsid pour les virus nus et aux glycoprotéines pour les virus enveloppés. Ces molécules se fixent sur des récepteurs spécifiques présents à la surface des cellules hôtes, ce qui explique la spécificité de l'infection virale.

Par exemple, le VIH cible spécifiquement les lymphocytes CD4+ car son enveloppe ne peut se fixer que sur la molécule CD4. De même, les virus de la grippe infectent principalement les cellules respiratoires car leur enveloppe se lie aux acides sialiques présents à leur surface. Ainsi, la capacité des virus à infecter des cellules spécifiques repose sur la reconnaissance et l'interaction avec des molécules spécifiques à la surface des cellules hôtes.

B. Pénétration

Il existe trois mécanismes principaux par lesquels un virus peut pénétrer à l'intérieur d'une cellule. Pour les virus nus tels que le poliovirus, l'entrée se fait le plus souvent par

microphagocytose. En revanche, pour les virus enveloppés, l'entrée se fait par fusion de l'enveloppe virale avec la membrane cytoplasmique, formant ainsi une membrane unique. Ce processus est suivi d'une lyse, par la formation d'un pore à travers lequel la capsid virale peut pénétrer dans le cytoplasme de la cellule, comme c'est le cas pour le virus VIH. Un troisième mécanisme combine l'endocytose et la fusion. Après s'être attaché à son récepteur cellulaire, le virus est internalisé dans une vésicule ou un endosome. L'acidification du virus à l'intérieur de l'endosome est provoquée par une pompe à protons, comme c'est le cas avec la protéine M2 pour le virus de la grippe de type A. Cette acidification induit une modification conformationnelle des protéines de l'enveloppe virale, libérant ainsi des régions protéiques hydrophobes habituellement cachées. Ces régions réagissent alors avec les lipides membranaires de l'endosome, entraînant la fusion des membranes et la libération de la capsid virale dans le cytoplasme de la cellule. Ce mécanisme est observé chez de nombreux virus enveloppés tels que les Orthomyxoviridae et les Rhabdoviridae.

C. La décapsidation

Les structures virales subissent ensuite un processus de dégradation, à l'exception du génome qui, une fois libéré de sa capsid, se retrouve dépourvu de protection. La destruction de la capsid est essentielle pour permettre au génome, désormais exposé, de fonctionner et de transmettre son information génétique à l'intérieur de la cellule hôte. Généralement, cette étape est réalisée grâce à l'action des décapsidases cellulaires, à l'exception du poxvirus qui possède sa propre enzyme décapsidase. Une fois ces étapes d'initiation de l'infection accomplies, la phase de réplication et d'expression du génome viral peut alors débiter.

D. La réplication

Le processus de multiplication du génome viral implique la transcription, la traduction et la réplication. Une fois libéré, le génome viral prend le contrôle des synthèses dans la cellule, remplaçant en totalité ou en partie le génome cellulaire. Sous l'influence du génome viral, la cellule détourne sa machinerie au profit du virus, produisant des virus et inhibant parfois les synthèses d'ARN et d'ADN cellulaires. Plus précisément, la cellule effectue des copies du génome viral, ainsi que des protéines virales telles que les protéines de capsid et les glycoprotéines d'enveloppe.

La stratégie de multiplication virale dépend de la nature et de la structure du matériel génétique : ADN ou ARN, génome bicaténaire ou monocaténaire, segmenté ou non, circulaire ou linéaire.

E. L'assemblage et la maturation

Les nouveaux génomes produits par la cellule sont enveloppés par de nouvelles protéines virales synthétisées par la cellule elle-même. Ce processus, appelé encapsidation, conduit à la formation de nouveaux virus. Les mécanismes impliqués peuvent être relativement simples, impliquant l'auto-assemblage des protéines de la capsidite et l'encapsulation du génome.

Cependant, dans certains cas, ce processus peut être plus complexe, faisant intervenir des protéines virales spécifiques. Ces protéines jouent un rôle crucial dans la reconnaissance et l'emballage sélectif des génomes viraux, assurant ainsi la précision et l'efficacité du processus d'encapsidation.

F. La libération des virus

Les virus nouvellement formés sont libérés de la cellule hôte de différentes manières, selon leur structure. Les virus nus sont libérés par éclatement de la cellule hôte, tandis que les virus enveloppés sont libérés par bourgeonnement. Lors du bourgeonnement, les virus enveloppés acquièrent leur enveloppe, qui est une bicouche lipidique cellulaire ornée de spicules glycoprotéiques. Il est à noter que les Herpesvirus s'entourent d'une enveloppe dérivée de la membrane nucléaire de la cellule infectée, tandis que les rétrovirus s'entourent d'une enveloppe dérivée de la membrane cytoplasmique de la cellule. Il est estimé qu'une cellule infectée peut produire entre 100 et 1000 virus, soulignant ainsi la capacité de multiplication rapide des virus au sein de leur hôte.

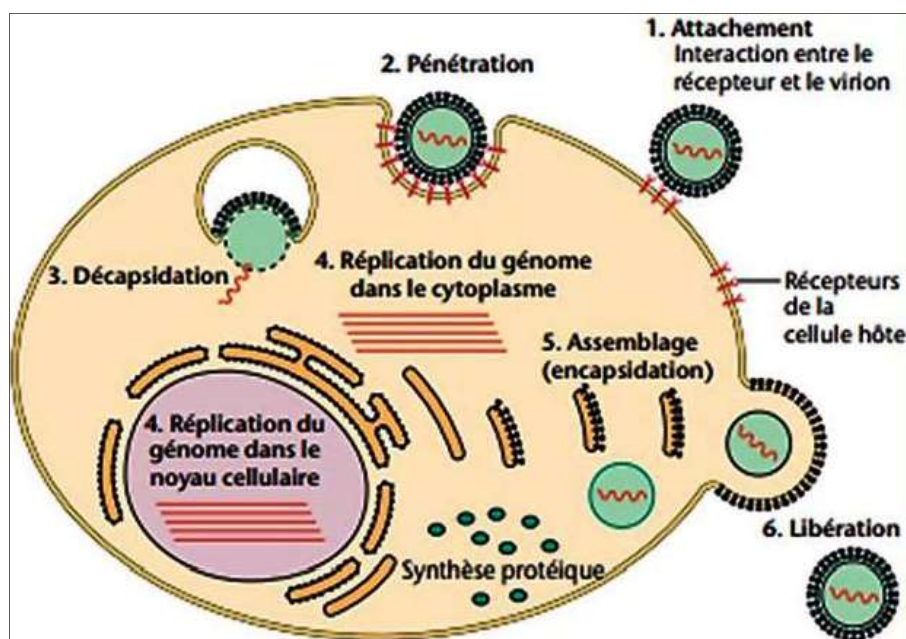


Figure 53. Les différentes étapes du cycle viral

14.6. La restriction virale

Lors d'une infection virale, le système immunitaire orchestre une série de réponses cellulaires visant à éliminer le virus. Parmi les acteurs clés de cette lutte se trouvent les lymphocytes et les plasmocytes, qui jouent un rôle central dans la défense de l'organisme. Les cellules dendritiques, quant à elles, jouent un rôle crucial dans la reconnaissance du virus et l'activation des mécanismes de défense.

Une fois qu'une cellule dendritique a phagocyté le virus, elle présente des fragments antigéniques du virus sur sa membrane, amorçant ainsi la réponse immunitaire innée. Par la suite, les cellules dendritiques migrent vers les ganglions lymphatiques où elles présentent l'antigène aux lymphocytes T-CD4. Cette présentation de l'antigène entraîne l'activation des lymphocytes T-CD4 et la sécrétion d'interleukines 2, favorisant la prolifération et la différenciation en lymphocytes T effecteurs (ou auxiliaires).

Les lymphocytes T effecteurs activent à leur tour la prolifération des lymphocytes B, qui se transforment en plasmocytes producteurs d'anticorps. Les plasmocytes sont alors chargés d'intercepter le virus, mobilisant à la fois l'immunité innée et l'immunité adaptative pour combattre l'infection virale.

Parallèlement, les cellules infectées par le virus exposent des fragments antigéniques du virus sur leur membrane, permettant aux lymphocytes de les cibler spécifiquement tout en préservant les cellules saines. Cette reconnaissance spécifique des cellules infectées contribue à limiter la propagation du virus dans l'organisme.

En somme, la coordination entre les différentes cellules du système immunitaire, notamment les cellules dendritiques, les lymphocytes T et B, ainsi que les plasmocytes, est essentielle pour assurer une réponse efficace contre une infection virale. Cette cascade de réactions immunologiques illustre la complexité et la précision du système immunitaire dans sa lutte contre les agents pathogènes viraux.



Références

- Bouchet, P., Guignard, J.-L., & Pouchus, Y.-F. (2005). Les champignons : Mycologie fondamentale et appliquée. Éditions Masson. pp. 3-70.
- Cavalla, M. (2011). Atlas de microbiologie. Cavalla Editions. pp. 9-38.
- De Reviers, B. (2002). Biologie et phylogénie des algues (Tome 1). Éditions Belin. pp. 53-265.
- Deconchat, C., & Polèse, J. M. (2002). Champignons l'encyclopédie. Éditions Artemis. pp. 8-90.
- Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A. (2006). Modern food microbiology (7th ed.). Springer Science/Business Media. pp. 167-168.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Stahl, D. A., & Bender, K. S. (2024). Brock Biology of Microorganisms (16th ed.). Pearson Education.
- Nicklin, J., Graeme Cook, K., Paget, T., & Killington, R. (2000). L'essentiel en microbiologie. Éditions Berti. pp. 213-353.
- Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2003). Microbiologie (4e éd.). Éditions De Boeck. pp. 578-580.
- Prescott, L. M., Sherwood, L. M., & Woolverton, C. J. (2010). Microbiology (7th ed.). De Boeck Supérieur. pp. 360-445.
- Ripert, C. (2013). Mycologie médicale (2e éd.). Technique & Documentation - Lavoisier. pp. 1-48.
- Wiley, J. M., Sherwood, L., Woolverton, C. J., & Prescott, L. M. (2009). Prescott's principles of microbiology. Mc Graw-Hill Higher Education. pp. 604-630.