



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة جيلالي بونعامة خميس مليانة

Université Djilali Bounaama de khemis Miliana

كلية علوم الطبيعة و الحياة و علوم الأرض

Faculté des Sciences de la Nature et de la vie et science de la Terre



Polycopié de Cours

Biodiversité Microbienne

Département : Biologie

Cycle : M1 Biotechnologie Microbienne

Présenté par :

Dr. LATTAB Aicha

Année Universitaire

2022-2023

Sommaire



Introduction

01

Chapitre 1 : Les Archaea

1.1. Généralités sur les Archaea	03
1.1.1. La paroi	03
1.1.2. Sensibilité aux antibiotiques	03
1.1.3. La forme et mode de groupement	03
1.1.4. La multiplication	03
1.1.5. Mode de respiration et type trophique	04
1.1.6. L'habitat	04
1.2. Classification des Archaea	05
1.2.1. Phylum des <i>Crearchaeota</i>	05
1. Ordre des <i>Desulfurococcales</i>	05
2. Ordre des <i>Acidilobales</i>	05
3. Ordre des <i>Fervidicoccales</i>	05
4. Ordre des <i>Thermoprotéales</i>	06
5. Ordre des <i>Sulfolobales</i>	06
1.2.2. Phylum des <i>Euryarchaeota</i>	06
1. Les archées méthanogènes et méthanotrophes	06
2. Les halophiles extrêmes	07
3. Les acidophiles	07
4. Les thermophiles extrêmes	07
5. Mésophiles et psychrophiles	08
6. Les archées réductrices de sulfates	08
1.2.3. Phylum des <i>Nanoarchaeota</i>	08
1.2.4. Phylum des <i>Thaumarchaeota</i>	08
1.2.5. Phylum des <i>Aigarchaeota</i>	09
1.2.6. Phylum des <i>Korarchaeota</i>	09

Chapitre 2 : Bactéries à coloration de Gram négatives

2.1. Protéobactéries « Protéobacteria »	10
2.1.1. La classe des <i>Alphaproteobacteria</i> (Protéobactéries alpha)	10
1. <i>Rickettsiales</i>	10
2. <i>Rhizobiales</i>	11
2.1.2. La classe des <i>Betaproteobacteria</i> (Protéobactéries bêta)	12
1. L'ordre des <i>Neisseriales</i>	12
2. L'ordre des <i>Burkholderiales</i>	12
3. L'ordre des <i>Nitrosomonadales</i>	12
4. L'ordre des <i>Hydrogenophilales</i>	12
2.1.3. La classe des <i>Gammaproteobacteria</i> (Protéobactéries gamma)	12
1. L'ordre <i>Thiotrichales</i>	13
2. L'ordre des <i>Methylococcales</i>	13
3. L'ordre des <i>Legionnellales</i>	13

4. L'ordre <i>Pseudomonadales</i>	13
5. L'ordre des <i>Alteromonadales</i>	14
6. L'ordre des <i>Vibrionales</i>	14
7. L'ordre des <i>Enterobacteriales</i>	14
8. L'ordre des <i>Pasteurellales</i>	15
2.1.4. La classe des <i>Deltaproteobacteria</i> (Protéobactéries delta)	15
1. Les ordres <i>Desulfovibrionales</i> , <i>Desulfobactériales</i> et <i>Desulfuromonadales</i>	15
2. L'ordre des <i>Bdellovibrionales</i>	15
3. L'ordre des <i>Myxococcales</i>	16
2.1.5. La classe des <i>Epsilonproteobacteria</i> (Protéobactéries epsilon)	16
2.2. Cyanobactéries « <i>Cyanobacteria</i> »	17
2.2.1. Caractérisations	17
2.2.2. Diversité morphologique	17
2.2.3. Diversité écologique	18
2.2.4. Cytologie	18
2.2.5. Reproduction chez cyanobactéries	21
2.2.6. Facteurs favorisant les proliférations de cyanobactéries	21
2.2.7. Les cyanobactéries toxiques	22
2.2.8. Classification	22
1. Sous classe : <i>Coccogonophycidées</i>	22
Ordre 1 : <i>Chroococcales</i>	22
Ordre 02 : <i>Chamaesiphonales</i>	23
Ordre 3 : <i>Pleurocapsales</i>	23
2. Sous classe : <i>Hormogonophycidées</i>	23
Ordre 01 : <i>Nostocales</i> :	23
Ordre 02 : <i>Stigonimatales</i>	25

Chapitre 3 : Les bactéries Gram positives pauvres en GC

3. Les bactéries Gram positives pauvres en GC	27
3.1. La classe des <i>Mollicutes</i> « Mycoplasmes »	27
1. <i>Mycoplasmatales</i>	27
2. <i>Entomoplasmatales</i>	27
3. <i>Acholeplasmatales</i>	27
4. <i>Anaeroplasmatales</i>	27
3.2. La classe des <i>Clostridia</i>	29
3.3. La classe des <i>Bacilli</i>	30
3.3.1. L'ordre des <i>Bacillales</i>	30
3.3.2. L'ordre des <i>Lactobacillales</i>	33

Chapitre 4 : Les bactéries Gram positives riches en GC (Actinobactérien)

4.1. Mode de vie chez les actinobactérien	35
4.2. Les actinomycètes constituent un groupe de microorganismes fascinant	35

4.3. Morphologie des actinomycètes	36
4.4. Mobilité	37
4.5. Aspect macroscopique au niveau de laboratoire	39
4.6. Le cycle biologique	40
4.7. Classification des actinomycètes	40
1. Classe des <i>Actinobacteria</i>	41
1.1. Sous Classe : <i>Actinobacteridae</i>	41
1.1.1. Ordre <i>Actinomycetales</i>	41
1- Sous ordre <i>Actinomycéneae</i>	41
2- Sous ordre <i>Micrococcineae</i>	41
3- Sous ordre <i>Corynebacterineae</i>	41
4- Sous ordre <i>Micromonosporineae</i>	42
5- Sous ordre <i>Propionibacterineae</i>	43
6- Sous ordre <i>Streptomycineae</i>	43
7- Sous ordre <i>Streptosorangineae</i>	44
8- Sous ordre <i>Frankineae</i>	44
9- Sous ordre <i>Pseudonocardieae</i>	44
10- Sous ordre <i>Actinopolysporineae</i>	44
11- Sous ordre <i>Glycomycineae</i>	45
12- Sous ordre <i>Catenulisporineae</i>	45
13- Sous ordre <i>Kineosporineae</i>	45
14- Sous ordre <i>Jiangellineae</i>	45
1.1.1. Ordre <i>Bifidobacteriales</i>	45

Chapitre 5 : Les champignons

5.1. Moisissure	46
5.2. Mode de vie et de nutrition des mycètes	46
5.3. Habitat	47
5.4. L'importance	47
5.5. La structure (Le Thalle des champignons)	48
5.6. La reproduction chez les champignons	52
5.7. Facteurs environnementaux et nutritifs	56
5.8. Classification des champignons	56
5.8.1. <i>Chytridiomycota</i> ou Chytridiomycètes	57
5.8.2. <i>Oomycota</i> ou Oomycètes	58
5.8.3. <i>Ascomycota</i> ou Ascomycètes	58
5.8.4. <i>Basidiomycota</i> ou Basidiomycètes	60
5.8.5. <i>Zygomycota</i> ou Zygomycètes	60
5.8.6. <i>Deuteromycota</i>	62

Chapitre 6 : Les algues

6.1. Ultrastructure des Algues	64
6.2. La morphologie des algues	66
6.2.1. Les formes unicellulaires	66
6.2.2. Les formes coloniales	67

6.2.3. Les formes filamenteuses	68
6.3. La reproduction des algues	69
6.4. Classification des algues	72
6.4.1. Les Cyanophytes	72
6.4.2. Les Chlorophytes	72
6.4.3. Les Euglénophytes	73
6.4.4. Les Chrysophytes	73
1. Les Chrysophycées	73
2. Les Xanthophycées	73
3. Les Diatomées ou Diatomophycées	73
4. Les Phéophycée	74
5. Les Raphidophycées	74
6.4.5. Les Rhodophytes	74
6.4.6. Les Pyrrophytes	74



Chapitre 7 : Les protozoaires

7.1. Cellule protozoaire	75
7.2. La locomotion	76
7.3. Les principaux types de protozoaires	77
7.3.1. Les protozoaires sans cil ni fouet	77
7.3.2. Les ciliés qui sont recouverts de cils.	77
7.3.3. Les flagellés comportant des fouets.	77
7.4. Nutrition et comportement de survie	77
7.5. La reproduction chez les protozoaires	78
7.5. La classification des Protozoaires	80
7.5.1. Embranchement des Flagellés (<i>Mastigiphora</i>)	80
7.5.2. Embranchement des Rhizopodes	83
7.5.3. Embranchement des Sporozoaires	84
7.5.4. Embranchement Cnidosporides	87
7.5.5. Embranchement des Ciliés (Infusoires)	88

Introduction

Les **micro-organismes** aussi appelés **microbes** et **protistes**, forment un ensemble d'organismes vivants **microscopiques**, invisibles à l'œil nu. C'est leur seul point commun, car ils diffèrent et varient par leur morphologie, leur physiologie, leur mode de reproduction et leur écologie.

Les protistes se composent : des **bactéries**, des **protozoaires**, des **champignons** (Mycètes) microscopique, et des **algues**.

Les **virus** sont considérés comme des micro-organismes non vivants, acellulaires qui dépendent entièrement des cellules hôtes infectées.

Place des micro-organismes dans le monde vivant

Depuis leur découverte par **Anthony van Leeuwenhoek** en **1673**, (il est le premier scientifique à entrevoir les formes de vie unicellulaires qu'il nomme **animalcules**), la place des bactéries dans le monde vivant a beaucoup évoluée.

En 1735, le botaniste suédois **Carl van Linné**, élabora une première classification des organismes vivants en deux règnes **Plantae** et **Animalia**.

En 1857, **Karl van Nägeli** proposa de classer les bactéries et les champignons dans le règne des Plantes.

En 1866, **E. Haeckel** divise le monde vivant en **trois règnes**, le règne **animal**, le règne **végétal** et le règne des **protistes** qui rassemble les algues, les protozoaires, les champignons et les bactéries.

➤ **Distinction entre cellules eucaryotes et procaryotes selon Edward Chatton**

En 1937 et grâce à l'invention du **microscope électronique**, **Edward Chatton** mis en opposition deux types de cellules, la cellule eucaryote (noyau est entouré d'une membrane et qui renferme des d'organites cellulaires) et la cellule procaryote (noyau sans membrane et dont l'organisation est très simple).

En 1938, **H.F. Copeland** sépare le règne des bactéries (ou "Monera") de celui des protistes. Cette définition des procaryotes fut renforcée **en 1961** par **Roger Stanier**.

➤ **Classification selon Murray**

En 1968, **R.G.E. Murray**, dans la continuité du travail d'**E. Chatton**, divise le monde vivant en deux règnes, celui des "Eucaryotae" et celui des "Procaryotae" (ou "Monera").

Au sein du règne des Procaryotae, **R.G.E. Murray** distinguait 04 divisions retrouvées dans le manuel de Bergey :

- La division des "**Gracilicutes**". Regroupant les bactéries à Gram négatif.
- La division des "**Firmicutes**". Regroupant les bactéries à Gram positif.
- La division des "**Tenericutes**". Bactéries dépourvues de paroi.
- La division des "**Mendosicutes**". Archaeobactéries.

➤ **Classification à cinq règnes**

En 1969, Robert H. Whittaker décrit une classification à cinq règnes. Quatre règnes eucaryotes (Animal, Végétal, Champignons et Protistes). Les procaryotes se regroupent dans le règne des monères.

➤ **Classification Génomique selon CR, Woese (1978)**

Le développement des techniques de **biologie moléculaire** a permis de caractériser les gènes qui codent pour **les ARN ribosomiaux (ARNr)**. En comparant une multitude de séquences d'ARNr 16S, appartenant à divers organismes vivants, il est arrivé à diviser les organismes vivants en trois domaines. Le domaine des Bacteria ou Eubacteria, le domaine des Archaea et le domaine des Eucarya (animaux, plantes, les mycètes et les protistes).

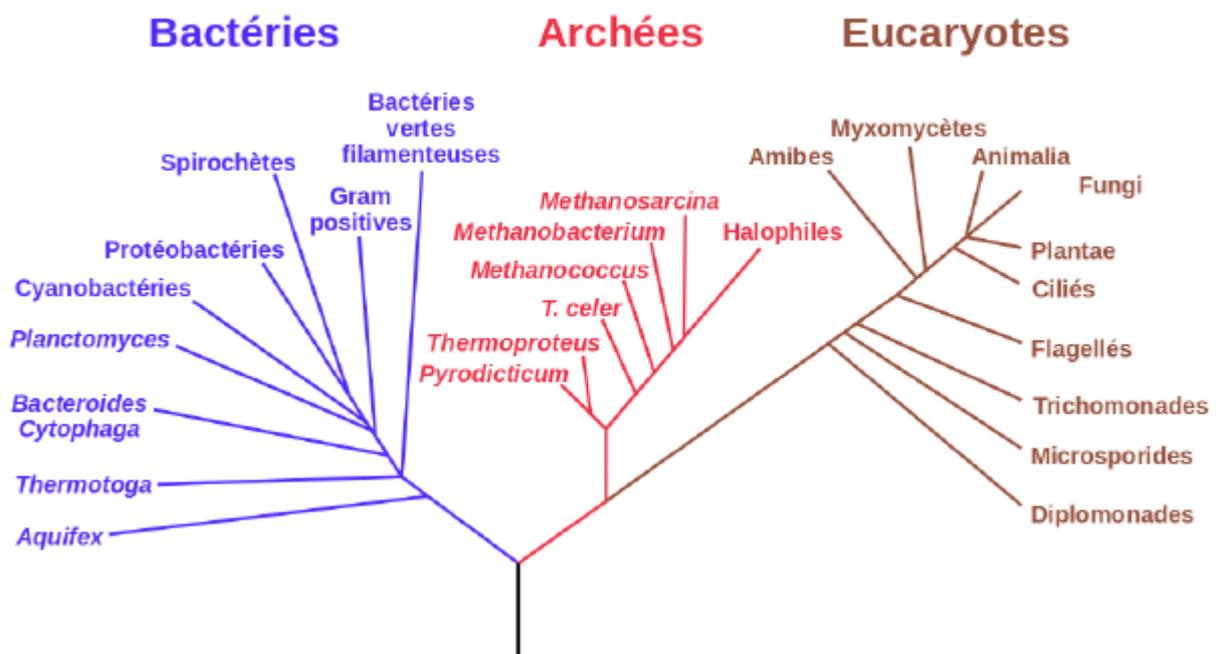


Figure 1 : Arbre phylogénétique du monde vivant d'après Woese *et al.* (1990)

Chapitre 1 : Les Archaea

1.1. Généralités sur les Archaea

Carl Woese décrit sa découverte des Archaea comme chanceuse mais non inattendue. Le Domaine Archaea a été identifié à la fin des années **1970** lorsque l'on a commencé à appliquer l'analyse de l'ARN de la partie 16S des ribosomes. Cette analyse a permis de regrouper des organismes phylogénétiquement voisins, représentant une branche distincte de l'évolution des bactéries, avec des altérations systématiques dans la forme des ribosomes et dans la proportion de protéines acides.

Le terme Archaea vient d'un mot grec qui désigne Originel ou primitif. Ils sont des microorganismes procaryotes unicellulaires de forme semblable à celle des bactéries. Les Archaea ont plusieurs caractéristiques en commun avec les **Eucarya**, et d'autre avec les **bacteria**, sans oublier des éléments qui sont uniquement archéens. En général, les gènes liés à l'information, ceux qui encodent les protéines impliquées dans la réplication, la transcription et la traduction, ressemblent à ceux des Eucarya tandis que les gènes du métabolisme sont similaires aux gènes bactériens.

1.1.1. La paroi

A la coloration de Gram, elles sont soit positives, soit négatives, mais elles ont des parois cellulaires uniques tout à fait de celles des bactéries. Les parois des Archeae ne contiennent pas de peptidoglycane. Elles peuvent être composées de pseudomuréines, des polysaccharides ou de glycoprotéines et d'autres protéines

1.1.2. Sensibilité aux antibiotiques

Ceci les rend insensibles aux antibiotiques inhibiteurs de la synthèse de la paroi tels que pénicilline, vancomycine et phosphomycine et au lysozyme. D'autres différences existent au niveau de la constitution des lipides cellulaires qui sont des diéthers de phytanol (glycérol et acide palmitique avec branchements méthyl). Les transporteurs d'électrons classiques (cytochromes, quinones, flavines) sont absents et remplacés par des cofacteurs uniques (CoM, F420, F430, méthanoptérine).

1.1.3. La forme et mode de groupement

Les Archeae sont très diverses, aussi bien en morphologie qu'en physiologie. Elles peuvent être sphériques, en bâtonnet, spiralées, lobées, cuboïdes, triangulaires, aplaties, de forme irrégulière ou pléomorphes. Certaines vivent en cellule isolée tandis que d'autre forment des filaments ou des agrégats Les endospores sont absentes.

1.1.4. La multiplication

La multiplication peut se faire par scissiparité, par bourgeonnement, par fragmentation ou par d'autres mécanismes.

1.1.5. Mode de respiration et type trophique

La plupart sont anaérobies stricts mais certains sont aérobies. Beaucoup sont mobiles. De point de vue de la nutrition, elles vont des chimiolithoautotrophes aux organotrophes. On y trouve des psychrophiles, des mésophiles et des hyperthermophiles capables de croître à plus de 100°C.

1.1.6. L'habitat

Les Archaea colonisent une immense variété d'habitats. En effet, de nombreuses Archeae habitent des niches comprenant des zones de température ou de pH extrêmes, ou concentrées en sels, ou complètement anoxiques. En revanche, les archées contribuent pour au moins de 20% à la biomasse procaryotique du plancton marin et sont des membres importants de certaines communautés du sol, environnements qu'on ne peut qualifier d'extrêmes. En outre, certaines archées sont symbiotiques dans l'appareil digestif d'animaux.

Tableau 1 : Leurs caractéristiques et leur comparaison avec les eubactéries

Caractéristiques	Bactérie	Archaea
Présence d'acide muramique dans la paroi Si la paroi est présente	Oui	Non
Peptidoglycane	Oui	Non
Lipides membranaires	Acides gras aliphatiques liés au glycérol par des liaisons Esters	Chaines hydrocarbonées liés au glycérol par des liaisons Ether
Premier acide aminée initiant la synthèse de la chaîne polypeptidique	N-formylméthionine	Méthionine
Sensibilité aux bêta-lactamines	Variable	Non
Synthèse des protéines inhibée par l'anisomycine	Non	Oui
Synthèse des protéines inhibée par la streptomycine et le chloramphénicol	Oui	Non
Synthèse des protéines inhibée par la toxine diphtérique	Non	Oui
Présence des introns dans les gènes codant pour les ARNt	Non	Oui
L'inhibition de l'RNA polymérase DNA dépendante par la rifampicine	Oui	Non

1.2. Classification des Archaea

On distingue les Phylum suivants.

1.2.1-Phylum des *Crenarchaeota*

Les *Crenarchaeota* sont des organismes hyperthermophiles ou thermophiles. Le phylum ne comprend qu'une seule classe, les *Thermoprotei*, qui est divisée en cinq ordres.

1. Ordre des *Desulfurococcales*

Les deux familles de cet ordre contiennent des hyperthermophiles coccoides ou en forme de disque. Leurs températures de croissance varient autour de 90°C, et peuvent monter jusqu'à plus de 100°C. La majorité des *Desulfurococcales* sont anaérobies, stricts ou facultatifs, et leurs métabolismes sont assez variés.

- La famille des *Desulfurococcaceae* comprend le genre *Ignicoccus*.
- La famille des *Pyrodictiaceae* comprend le genre *Pyrodictidium*. A cette famille, appartient aussi le genre *Pyrolobus*. *P. fumari* est l'un des microbes les plus thermophiles isolés à ce jour. Son optimum de température se situe à 106°C et son maximum à 113°C (Anderson *et al.*, 2011).

2. Ordre des *Acidilobales*

Les Acidilobales ont été proposés récemment par Prokofeva et collaborateurs en 2009, et incluraient les organismes des genres *Acidilobus* et *Caldisphaera*. Ces organismes sont thermophiles, anaérobies, organotrophes et acidophiles. Ils ont été isolés dans différentes sources chaudes acides, au Kamchatka en Russie, à Laguna aux Philippines ou dans le parc de Yellowstone aux Etats-Unis. Les analyses phylogénétiques de leur ARNr SSU les placent groupe frère des *Desulfurococcales*, conduisant les auteurs à proposer un nouvel ordre de *Crenarchaeota* (Prokofeva *et al.*, 2009).

3. Ordre des *Fervidicoccales*

Peu de temps après, en 2010, ce nouvel ordre de *Crenarchaeota* est proposé (Perevalova *et al.*, 2010), après l'isolement de *Fervidicoccus fontis* dans les sources chaudes volcaniques du Kamchatka. C'est un organisme thermoacidophile (croissance optimale entre 65 et 70°C, à pH 5,5-6), anaérobie et organotrophe. L'analyse phylogénétique de l'ARNr SSU de cet organisme le place en groupe frère des *Acidilobales*, avec d'autres séquences environnementales trouvées dans des environnements de type sources hydrothermales à Yellowstone ou en Islande. Cette position phylogénétique a conduit les auteurs à proposer que ces séquences soient les représentantes d'un nouvel ordre.

4. Ordre des *Thermoprotéales*

Sont aussi des organismes hyperthermophiles et anaérobies pour la plupart. Ils vivent aussi dans ces mêmes milieux et principalement dans des sources chaudes terrestres sulfureuses, les solfatares, à des températures légèrement plus basses que les Desulfurococcales. Certains sont légèrement acidophiles et ont été isolés à des pH inférieurs à 7, comme *Thermoproteus tenax*, isolé à un pH de 5,6 dans un solfatare en Islande (Siebers *et al.*, 2011).

Cet ordre contient deux familles :

- La famille des *Thermoproteaceae* comprend des genres bâtonnets hyperthermophiles anaérobies ou facultatifs.
- La famille des *Thermophilaceae* n'a qu'un représentant : *Thermophilum pendens*.

5. Ordre des *Sulfolobales*

Sont des organismes thermophiles ou hyperthermophiles plus modérés que les autres ordres, leurs températures de croissance sont plutôt comprises entre 60 et 85°C, et on les trouve principalement dans des sources chaudes terrestres, comme celles de Solfatare en Italie, de Yellowstone ou du Kamchatka. On trouve aussi plus d'organismes aérobies dans ce groupe, alors qu'ils sont minoritaires dans les autres ordres de *Crenarchaeota*, et d'acidophiles extrêmes, vivant à des pH entre 2 et 5. Par exemple *Sulfolobus acidocaldarius* croît entre 75 et 80°C, à un pH entre 2 et 3, et est strictement aérobie et organotrophe (Chen *et al.*, 2005).

1.2.2. Phylum des *Euryarchaeota*

Les *Euryarchaeota* constituent un phylum très diversifié, comprenant de nombreux genres répartis dans cinq groupes physiologiques principaux : les méthanogènes, les halobactéries, les thermoplasmes, thermophiles extrêmes qui réduisent le soufre et les archées qui réduisent le sulfate.

1. Les archées méthanogènes et méthanotrophes

Les méthanogènes sont des organismes anaérobies stricts capables d'obtenir de l'énergie par la synthèse du méthane à partir de composés organiques ou inorganiques (CO₂, méthanol ou composés méthylés), le méthane étant le produit principal de ce métabolisme énergétique. Seules des archées possèdent les enzymes nécessaires à ce métabolisme complexe (Offre *et al.*, 2013 ; Liu et Whitman 2008). Actuellement sept ordres de méthanogènes ont été décrits :

Les *Methanopyrales*, les *Methanobacteriales* et les *Methanococcales* sont plus proches entre eux et ont été proposés comme « Methanogen Class I ». Les *Methanosarcinales*, les *Methanomicrobiales* et les *Methanocellales* sont aussi plus proches entre eux et ont été proposés comme « Methanogen Class II » (Baptiste *et al.*, 2005). Le septième ordre de méthanogènes a été proposé par Paul et

collaborateurs en 2012 suite à l'analyse de nombreuses séquences environnementales se plaçant à proximité des *Thermoplasmatales* (Mihajlovski *et al.*, 2008 ; Paul *et al.*, 2012).

2. Les halophiles extrêmes

Sont des chimiohétérotrophes. On les trouve dans des habitats tels que la Mer Morte, les lacs salés et le poisson salé. Deux ordres d'archées phylogénétiquement proches sont particulièrement adaptés à ces milieux, les *Halobacteriales* et les *Nanohaloarchaea*. Ces organismes sont capables de croître à des concentrations en sel entre 2,5 et 5,2 M de NaCl pour les plus extrêmes, et entre 0,5 et 2,5 M pour les halophiles modérés. Les environnements dans lesquels ils se développent sont très divers, dans la mesure où la concentration en sel est forte, par exemple, *Haloterrigena turkmenica* a été isolé dans des sols (Zvyagintseva et Tarasov 1988), *Halalkalicoccus jeotgali* sur des crustacés fermentés au sel (Roh *et al.*, 2010)

3. Les acidophiles

Des archées sont adaptées aux milieux extrêmement acides, particulièrement les *Thermoplasmatales*, *Aciduliprofundum boonei*, archée du groupe DHVE2 « Deep-sea Hydrothermal Vent Euryarchaeotic », phylogénétiquement proches des *Thermoplasmatales*, et les archées du groupe ARMAN pour « archaeal Richmond Mine acidophilic nanoorganisms ». La plupart des *Thermoplasmatales* et les ARMAN ont été mises en évidence dans des mines acides ou dans des champs hydrothermaux volcaniques, à des pH compris entre 1 et 2 (Dopson *et al.*, 2004). L'ordre *Thermoplasmatales* est aussi caractérisé par l'absence de paroi cellulaire leur donnant ainsi une morphologie proche des bactéries du groupe *Mycoplasmatales* avec lesquels ces organismes étaient classés jusqu'à ce que Woese analyse leurs ARNr SSU (Woese *et al.*, 1978). Ces organismes acidophiles peuvent aussi être thermophiles, vivant à des températures comprises entre 35 et 70°C.

4. Les thermophiles extrêmes

Différentes classes d'euryarchées vivent dans de tels milieux à des températures supérieures ou égales à 80°C. Les Thermococcales sont tous hyperthermophiles, et ont été observés dans des sources hydrothermales terrestres ou sur des cheminées hydrothermales sous-marines, de surface ou profondes. Une espèce a même été isolée depuis un puits de pétrole, *Thermococcus sibiricus* (Mardanov *et al.*, 2009). Leurs températures de croissance optimale varient entre 80 et 100°C. Ce sont des organismes anaérobies, chimiorganotrophes ou chimiolithotrophes, utilisant le soufre comme accepteur final d'électrons.

5. Mésophiles et psychrophiles

A contrario, on trouve aussi des euryarchées dans des milieux extrêmement froids. Les groupes d'archées non cultivées II et III découverts dans les océans (DeLong 1992 ; Fuhrman *et al.*, 1992) ont été la première preuve que des archées sont présentes dans ces milieux océaniques froids, l'eau pouvant avoir une température de l'ordre de 4°C. En réalité, ces milieux froids ou tempérés (jusqu'à 50°C) sont plutôt majoritaires sur terre, et les organismes mésophiles (vivant entre 4 et 50°C) et psychrophiles (vivant à des températures inférieures à 4°C) sont très abondants, y compris parmi les archées (Cavicchioli, 2006).

6. Les archées réductrices de sulfates

Les *Archaeoglobales* sont aussi des organismes hyperthermophiles anaérobies vivant dans des sédiments de sources chaudes ou des cheminées hydrothermales. Les espèces du genre *Archaeoglobus* sont sulfato-réductrices, propriété relativement rare dans le vivant, partagée seulement avec quelques bactéries comme les *Desulfurovibrio* (Von Jan *et al.*, 2010).

1.2.3. Phylum des Nanoarchaeota

Actuellement *Nanoarchaeum equitans* est le seul représentant cultivé de ce phylum et dont le génome ait été séquencé. C'est une archée hyperthermophile, de toute petite taille (~ 400 nm), avec un génome très réduit et vivant justement en symbiose avec *Ignicoccus hospitalis*, une crenarchée avec laquelle elle a pu être cultivée (Huber *et al.*, 2002). Le séquençage de son génome a révélé des caractéristiques particulières typiques des organismes symbiotiques (Waters *et al.*, 2003), à savoir un génome très réduit avec absence de beaucoup de gènes essentiels du métabolisme (biosynthèse des acides aminés, nucléotides, cofacteurs et lipides), des gènes intervenant dans les différentes voies d'assimilation du carbone ou de trois ARNt (glutamate, histidine et tryptophane). L'absence de ces gènes rend *N. equitans* complètement dépendant d'*I. hospitalis* et tend à confirmer son évolution par réduction de génome due à un mode de vie symbiotique.

1.2.4. Phylum des Thaumarchaeota

Les *Thaumarchaeota* ont été découverts par DeLong et Furhmann en 1992 et nommés « groupe I ». Phylogénétiquement proches des *Crenarchaeota* elles étaient considérées comme des «Crenarchaeota mésophiles » (DeLong 1992 ; Fuhrman *et al.*, 1992). En 2008, après la publication du génome de *Cenarchaeum symbiosum*, Brochier-Armanet et collaborateurs ont réanalysé la position de ce groupe par des méthodes de phylogénomique et ont proposé que les membres du groupe I ne soient pas des *Crenarchaeota* mais un phylum à part entière. Ils ont proposé le nom de «*Thaumarchaeota*» (Brochier-Armanet *et al.*, 2008). De nombreux organismes se placent parmi les *Thaumarchaeota*, mais très peu sont cultivés axéniquement, le premier a été *Nitrosopumilus maritimus*.

1.2.5. Phylum des *Aigarchaeota*

Ce phylum proposé par Nunoura et collaborateurs en 2011 (Nunoura *et al.*, 2011), où il se place en groupe frère des *Crenarchaeota*. Ce phylum a été proposé en même temps que la publication du génome de *Candidatus Caldiarchaeum subterraneum* dont il a déjà été question plus tôt. Ces organismes sont présents dans des environnements thermophiles classiques : sources chaudes terrestres (Nunoura *et al.*, 2005) et sous-marines, sources hydrothermales de mer profonde. Aucun représentant n'est cultivé. Le génome de *Ca. Caldiarchaeum subterraneum* a été obtenu à partir de l'enrichissement d'un tapis microbien de surface dans de l'eau géothermale d'une mine d'or, dans lequel ce groupe était dominant, et a été reconstruit à partir d'une banque de données métagénomiques (Nunoura *et al.*, 2011).

1.2.6. Phylum des *Korarchaeota*

Le phylum *Korarchaeota* a été proposé en 1996 par Barns et collaborateurs (Barns *et al.*, 1996) sur la base de séquences environnementales produites à partir d'une source chaude de Yellowstone. Ce groupe reste aujourd'hui encore très peu connu et il serait intéressant d'avoir plus de données, génomiques et de culture, sur ces organismes ayant une place si importante dans l'histoire évolutive des archées.

Chapitre 2 : Bactéries à coloration de Gram négatives

2.1. Protéobactéries « *Protéobacteria* »

Ce groupe le plus vaste et le plus diversifié de Bactéries à **Gram-négatif** comprend les **quatre types** majeurs de **nutrition** bactérienne et compte plus de 500 genres. Certains sont des **photoautotrophes** (photosynthétiques), des **chimioautotrophes**, **chimiolithotrophes** et des **hétérotrophes**. Les Protéobactéries englobent tant des espèces **anaréobies** que des espèces **aérobies**.

La comparaison des séquences de l'ARNr 16S a révélé cinq lignées dans le phylum des *Proteobacteria* (Woese *et al.*, 1984) :

2.1.1. La classe des *Alphaproteobacteria* (Protéobactéries alpha)

Les alpha-protéobactéries (AP), reclassées par Cavalier-Smith (2002) dans la classe *Alphabacteria*, ont des modes de vie variés et originaux. Cette classe inclut la plupart des protéobactéries oligotrophes (celles qui sont capables de croître à des teneurs nutritionnelles faibles). Elles sont capables, en particulier, d'établir des relations étroites avec la cellule eucaryote. Ainsi les AP regroupent des pathogènes des animaux, intracellulaires obligatoires (*Rickettsia*, *Anaplasma*, *Cowdria*, *Ehrlichia*, ...), ou intracellulaires facultatifs (*Brucella* et *Bartonella*), des pathogènes de la cellule végétale (*Agrobacterium*) et des symbiotes des végétaux (*Rhizobium*.)

1. *Rickettsiales*

Les membres de l'ordre des *Rickettsiales* présentent une plus grande divergence génétique, mais ont évolué vers un mode de vie spécialisé commun, pathogène intracellulaire de l'homme et des animaux, à l'exception de certains membres du genre *Wolbachia* qui ont un comportement plutôt symbiotique.

Rickettsia

Le genre *Rickettsia* est placé dans l'ordre des *Rickettsiales* et la famille *Rickettsiaceae*. Ces bactéries sont en forme de bâtonnet, coccoïdes ou pléomorphes, avec des parois Gram négatives typiques et pas de flagelles. Toutes les espèces sont parasites ou mutualistes.

Ce genre comprend de nombreux pathogènes importants tels que *Rickettsia prowazekii* *R. typhi* associées au typhus murin et à celui transmis par les poux, et *R. rickettsii* associées à la fièvre pourprée des montagnes rocheuses.

Les *Caulobacteraceae* et les *Hyphomicrobiaceae*

Un certain nombre de *Proteobacteria* ne sont pas de simples bâtonnet ou coques, mais possèdent des sortes d'appendices. Ces bactéries ont des cycles biologiques qui comportent une prosthèques ou une reproduction par bourgeonnement.

Une prosthèque, aussi appelé pédoncule, est une extension de la cellule incluant la membrane cytoplasmique et la paroi cellulaire, plus étroite que la cellule mature. Le bourgeonnement est tout à fait différent que la scissiparité normalement utilisée chez les bactéries.

Les familles des *Caulobacteraceae* et des *Hyphomicrobiaceae* contiennent deux genres à prosthèques les mieux étudiés : *Caulobacter* et *Hyphomicrobium*.

Les bactéries du genre *Caulobacter* ont une morphologie qui alterne bâtonnets à flagelle polaire et cellules avec prosthèque et crampon, crampon grâce auquel elles s'attachent à des supports solides. On isole habituellement les *Caulobacter* à partir d'eaux douces et marines à niveau nutritionnel faible, mais ils sont aussi présents dans le sol.

Le genre *Hyphomicrobium* comprend des bactéries bourgeonnantes, aérobie, chimiohétérotrophes qui s'attachent fréquemment à des supports solides dans les milieux dulçaquicoles, marins et terrestres.

2. *Rhizobiales*

L'ordre des *Rhizobiales* dans les alphaproteobactéries contient 11 familles avec une grande variété de phénotypes. Une importante famille de cet ordre est celle des *Rhizobiaceae*, où figurent deux genres aérobie, *Rhizobium* et *Agrobacterium* (Broughton, 2003)

Les membres du genre *Rhizobium* sont des bâtonnets mobiles de 0,5 à 0,9 sur 1,2 à 3,0µm, qui deviennent pléomorphes lorsque les conditions sont défavorables. Les cellules contiennent souvent des inclusions de poly β hydroxybutyrate. Elles croissent en symbiose dans les cellules des nodules radiculaires des légumineuses, sous forme de bactéroïdes fixateurs d'azote. Dans ces nodules, les microorganismes réduisent ou fixent l'azote atmosphérique sous forme d'ammonium, ce qui le rend directement disponibles à l'hôte végétal.

Le genre *Agrobacterium* est placé dans la famille des *Rhizobiaceae*, mais diffère de *Rhizobium* parce qu'il est phytopathogène. Les *Agrobacterium* envahissent les collets, racines et tiges de nombreuses plantes et transforment les cellules végétales en cellules tumorales dont la prolifération est autonome. L'espèce la mieux étudiée est *A. tumefaciens* qui pénètre dans beaucoup de plantes à large feuilles par des blessures et est responsable de la maladie de la galle du collet (Rhouma *et al.*, 2004).

L'ordre des *Rhizobiales* inclut aussi la famille des *Brucellaceae*. Le genre *Brucella* est un pathogène important de l'homme et des animaux (notamment le bétail) (Meyer et Shaw, 1920). La

brucellose, appelée aussi fièvre ondulante, fièvre de Malte, est une maladie zoonotique : une maladie transmise à l'homme par les animaux .

2.1.2. La classe des *Betaproteobacteria* (Protéobactéries bêta)

Diversifié sur le plan nutritionnel, ce groupe comprend

1. L'ordre des *Neisseriales*

L'ordre des *Neisseriales* compte une famille, les *Neisseriaceae*, avec 15 genres. Le genre le plus connu et le plus étudié est *Neisseria*. Les membres de ce genre sont des coques, aérobies non mobiles, qu'on trouve le plus souvent par paires avec les côtés adjacents aplatis. Ils peuvent avoir des capsules et des fimbriae. Ces bactéries vivent dans les membranes muqueuses des mammifères et certaines sont pathogènes pour l'homme. *Neisseria gonorrhoeae* est l'agent causal de la blennorragie, *Neisseria meningitidis* est responsable de certains cas de méningite bactérienne (Varon, 2009).

2. L'ordre des *Burkholderiales*

L'ordre contient quatre familles, dont trois comprennent des genres bien connus. Le genre *Burkholderia* fait partie de la famille des *Burkholderiaceae*. Les membres du genre *Burkholderia* sont des bâtonnets droits, mésophiles, non sporulants, non fermenteurs, aérobies. A l'exception d'une espèce, tous sont mobiles grâce à un seul flagelle polaire ou à une touffe de flagelles polaires.

3. L'ordre des *Nitrosomonadales*

On trouve un bon nombre de chimiolithotrophes dans l'ordre des *Nitrosomonadales*. Les chimiolithotrophes pédonculé *Gallionella* fait partie de cet ordre. La famille des *Spirillaceae* compte un genre, *Spirillus*.

Deux genres de Bactéries nitrifiantes *Nitrosomonas* et *Nitrosospira* sont membres de la famille *Nitrosomonadaceae* et oxydent l'ammonium en nitrite.

4. L'ordre des *Hydrogenophilales*

Ce petit ordre contient *Thiobacillus* et *Acidithiobacillus*, les chimiolithotrophes les mieux étudiés et les plus remarquables des bactéries sulfureuses incolores. La plupart sont unicellulaires en formes de bâtonnets ou spiralées, oxydatrices du soufre, non mobiles ou flagellées.

2.1.3. La classe des *Gammaproteobacteria* (Protéobactéries gamma)

Les γ -protéobactéries constituent le plus grand sous-groupe des protéobactéries, d'une extraordinaire variété de types physiologiques. Beaucoup de genres importants sont chimioorganotrophes et anaérobies facultatifs. D'autres genres contiennent des chimioorganotrophes aérobies, des photolithotrophes, des chimiolithotrophes ou des méthylotrophes. Cette classe compte 14 ordres et 28 familles.

1. L'ordre *Thiotrichales*

L'ordre des *Thiotrichales* comprend trois familles, dont la plus grande est celle des *Thiotrichaceae*. Dans cette famille, plusieurs genres oxydent les composés soufrés. Du point de vue morphologique, on trouve des bâtonnets et des formes filamenteuses. Deux des genres les mieux étudiés sont :

Beggiatoa est micro aérophiles et se développe dans des habitats riches en sulfure.

Leucothrix est un chimioorganotrophe aérobies qui forme de longs filaments ou trichome. Il est habituellement marin et s'attache à des substrats solides au moyen d'un crampon (Harold et Stanier en 1955).

2. L'ordre des *Methylococcales*

La seule famille de l'ordre est celle des *Methylococcaceae*. Elle contient des bâtonnets, des vibrions et des coques qui utilisent le méthane et le méthanol comme seules sources de carbone et d'énergie, dans des conditions aérobies ou microaérobies. C'est-à-dire qu'il s'agit de méthylotrophes. La famille contient sept genres, dont nous citerons : *Methylococcus* (cellules sphérique non mobiles) et *Methylomonas* (batonnet droits, incurvés ou ramifiés avec un seul flagelle polaire).

3. L'ordre des *Legionnellales*

Deux familles constituent l'ordre des *Legionnellales*. La première est celle des *Legionnellaceae*, avec son seul genre *Legionnella*. La seconde famille est celle des *coxiellaceae* qui a deux genres : *Coxiella* et *Rickettsiella* (à ne pas confondre avec l' α -proteobacteries *Rickettsia*). Tous ces microbes sont des pathogènes intracellulaires qui ont un mode de vie dimorphique.

Legionnella pneumophila est l'agent d'un type de pneumonie spécifique appelé maladie des Légionnaires.

4. L'ordre *Pseudomonadales*

Pseudomonas est le genre le plus important dans l'ordre des *Pseudomonadales*, familles des *Pseudomonadaceae*. C'est des bâtonnets droits ou légèrement incurvés de 0,5 à 1,0 μm sur 1,5 à 5,0 μm de long. Ils sont mobiles grâce à un ou plusieurs flagelles polaires. Ces Chimiohétérotrophes pratiquent habituellement la respiration aérobie. Ils utilisent parfois le nitrate comme accepteur d'électrons dans une respiration anérobies.

Le genre *Pseudomonas* est un taxon exceptionnellement hétérogène actuellement composé d'environ 60 espèces. Beaucoup peuvent être placées dans l'un des sept groupes d'homologie d'ARNr. Les trois groupes les mieux caractérisés sont subdivisés selon des propriétés comme la présence de poly β hydroxybutirate (PHB), la production d'un pigment fluorescent, la pathogénécité, la présence d'arginine dihydrolase et l'utilisation du glucose. Par exemple, le sous-groupe fluorescent

n'accumule pas de PHB, mais produit un pigment vert jaune diffusible, soluble dans l'eau fluorescent sous irradiation UV. *Pseudomonas aeruginosa*, *P. fluorescens*, *P. putida* et *P. syringa* sont membres de ce groupe.

P. aeruginosa est un pathogène opportuniste. Il est aussi responsable d'infections ophtalmiques, du tractus urinaire et des poumons. C'est également le pathogène le plus fréquemment responsable de mortalité chez les individus atteints de la mucoviscidose (Zemanick *et al.*, 2011).

Le genre *Azotobacter* fait aussi partie de la famille des *Pseudomonadaceae*, très répandu dans les sols et dans les eaux. Le genre est aérobie et fixe l'azote sans symbiose.

5. L'ordre des *Alteromonadales*

Le genre *Alteromonas* dans l'ordre des *Alteromonadales* concerne des bâtonnets aérobies généralement stricts. Ils sont mésophiles et ont besoin de sodium pour leur croissance. De nombreuses espèces de ce genre ont été reclassées dans différents genres du même ordre dont *Marinomonas*, *Pseudoalteromonas* et *Shewanella*.

6. L'ordre des *Vibrionales*

L'ordre des *Vibrionales* ne comprend qu'une seule famille, les *Vibrionaceae*. Les membres de cette famille sont des bâtonnets flagellés Gram négatifs droits et incurvés. La plupart sont oxydase positifs. En majorité, ce sont des microorganismes aquatiques très répandus dans les eaux douces et dans les mers. Il y a huit genres dans la famille : *Vibrio*, *Photobacterium*, *Salinivibrio*, *Listonella*, *Allomonas*, *Enterovibrio*, *Catencoccus* et *Grimontia*.

Vibrio cholerae est l'agent du choléra et *V. parahaemolyticus* peut causer des gastroentérites chez l'homme, après consommation des fruits de mer contaminés. *V. anguillarum* et d'autres sont responsables de maladies chez les poissons en particulier dans les fermes piscicoles.

7. L'ordre des *Enterobacteriales*

L'ordre des *Enterobacteriales* ne compte qu'une famille, les *Enterobacteriaceae*, avec 44 genres. Elle contient des bâtonnets droits à flagelles péritriches ou non mobiles, anaérobies facultatifs, dont les besoins nutritionnels sont simples.

Tous les membres de cette famille, souvent appelés entérobactéries ou bactéries entériques (du grec entrikos, appartenant à l'intestin), Comme les bactéries entériques sont de morphologie tellement semblable, on utilise normalement des tests biochimiques pour les identifier, après un examen préliminaire de leur morphologie, de leur mobilité et de leur croissance. Quelques un des tests les plus communément utilisés concernent le type de fermentation, l'utilisation du lactose et du citrate,

la production d'indole à partir de tryptophane, l'hydrolyse de l'urée et la production de sulfure d'hydrogène. Par exemple *Escherichia* et *Enterobacter* fermentent le lactose, mais *Shigella*, *Salmonella* ou *Proteus* ne le font pas.

Escherichia coli est la bactérie la mieux étudiée et l'organisme expérimental de choix pour beaucoup de microbiologistes. C'est un habitant du colon de l'homme et des autres animaux à sang chaud. L'espèce *E. coli* est une bactérie versatile qui comprend, à la fois, des bactéries commensales du tube digestif, des bactéries pathogènes et des bactéries adaptées à l'environnement (Tenailon *et al.*, 2010).

Plusieurs genres contiennent des pathogènes humains très importants, responsables de diverses maladies : *Salmonella* pour la fièvre typhoïde et les gastroentérites, *Shigella* pour la dysenterie bacillaire, *Klebsiella* pour la pneumonie et *Yersinia* pour la peste. Les membres du genre *Erwinia* sont des phytopathogènes importants et sont la cause de rouilles, de flétrissements et de plusieurs autres maladies des plantes cultivées.

8. L'ordre des *Pasteurellales*

La famille des *Pasteurellaceae* dans l'ordre des *Pasteurellales* diffère des *Vibrionales* et des *Enterobacteriales* par plusieurs aspects. Ces microorganismes sont petits, non mobiles et ils ont des besoins nutritionnels complexes, et parasitent des vertébrés. La famille comprend sept genres : *Pasteurella*, *Haemophilus*, *Actinobacillus*, *Lonepinella*, *Mannheimia*, *Phocoenobacter* et *Gallibacterium*.

Pasteurella multocida est responsable du choléra aviaire qui tue chaque année de nombreux poulets, dindes, canards et oies. *P. haemolytica* est au moins partie responsable de pneumonies chez les bétails, les moutons et les chèvres. *Haemophilus influenzae* sérotype b est un pathogène majeur de l'homme, il est la cause de diverses maladies dont la méningite, la sinusite, la pneumonie et la bronchite.

2.1.4. La classe des *Deltaproteobacteria* (Protéobactéries delta)

Cette classe compte huit ordres et 20 familles.

1. Les ordres *Desulfovibrionales*, des *Desulfobacterales* et des *Desulfuromonadales*

Forment un groupe diversifié des bactéries réductrices du sulfate ou du soufre (BRS). On les y a rassemblées à cause de leur nature anaérobie et de leur capacité d'utiliser le soufre élémentaire et d'autres formes oxydées du soufre dans la respiration anaérobie.

2. L'ordre des *Bdellovibrionales*

L'ordre ne compte que la famille de *Bdellovibrionaceae* (prédateurs des autres bactéries) et quatre genres. La taille des *Bdellovibrionaceae* varie généralement entre 0,2 à 0,5 µm en largeur, et 0,5 et 2,5 µm en longueur (Crossman *et al.*, 2013).

Le genre *Bdellovibrio* contient des bâtonnets Gram négatifs, incurvés, aérobies, porteurs de flagelles polaires.

3. L'ordre des *Myxococcales*

Les myxobactéries sont des bactéries du sol, aérobies et Gram négatives. Elles se caractérisent par une mobilité par glissement, un cycle biologique complexe avec production de structures cellulaires appelées fructifications et la formation de spores appelées myxospores.

2.1.5. La classe des *Epsilonproteobacteria* (Protéobactéries epsilon)

Les ϵ -protéobactéries sont les plus petites bactéries dans les cinq classes de protéobactéries. Ce sont des bâtonnets minces, Gram négatifs qui peuvent être droits, incurvés ou hélicoïdaux. Des analyses phylogénétiques basées sur les séquences d'ARNr identifient deux ordres : les *Campylobacterales* (familles *Campylobacteriaceae*, *Helicobacteriaceae* et *Hydrogenimonaceae*) et les *Nautiliales* (genres *Nautilia*, *Caminobacter* et *Lebetimonas*). Deux genres pathogènes, *Campylobacter* et *Helicobacter*, sont des bâtonnets Gram négatifs, microaérophiles, mobiles, hélicoïdaux ou vibroïdes.

Le genre *Campylobacter*

Le genre *Campylobacter* fait partie, avec les genres *Arcobacter*, et *sulfurospirillum*, de la famille des *Campylobacteraceae*. Ce genre contient 27 espèces isolées à partir de nombreux hôtes différents allant des lézards, aux oiseaux domestiques ou sauvages, mammifères (l'homme) ou coquillages (Thepault, 2018).

Campylobacter fetus est responsable d'une maladie de la reproduction et des avortements chez le bétail et les moutons.

Campylobacter jejuni sont agents responsables de diarrhées et de fausse couche (campylobactérioses) au sein de troupeaux de bovins et de moutons.

Le genre *Helicobacter* contient au moins 23 espèces, toutes isolées de l'estomac ou de l'intestin grêle de l'homme, du chien, du chat ou d'autres mammifères. Le principal pathogène de l'homme est *Helicobacter pylori*, qui est la cause de gastrite et d'ulcères gastriques (Mégraud et Broutet, 2000).

2.2. Cyanobactéries « *Cyanobacteria* »

Le terme cyanobactéries désigne des micro-organismes procaryotes à Gram négatif dont la pigmentation peut varier du bleu-vert au rouge. Les cyanobactéries sont les premiers organismes à être apparus sur Terre, il y a environ de trois 3,5 milliards d'années (Schopf, 2002).

Les cyanobactéries sont des procaryotes photosynthétiques. Ces microorganismes ont longtemps été rangés dans le règne végétal car ils présentent, outre des propriétés spécifiques des bactéries, des caractéristiques propres aux algues : comme : des Cyanophytes dénommées aussi Algues bleues ou Schizophytes ou encore Myxophytes.

Les cyanobactéries ne possèdent pas de noyau à membrane définie "Procaryotes". On les trouve dans tous les milieux aquatiques et terrestres et les milieux extrêmes (température, salinité et pH) (neige, glaces, sources chaudes, déserts...etc.). L'analyse par microscopie électronique a montré leur véritable structure Procaryote et les analyses de l'ARNr 16S montre qu'elles sont sur une lignée particulière au sein des Bacteria.

Il persiste encore actuellement un système double de classification des *Cyanobacteria* car elles sont répertoriées par les bactériologistes et les botanistes.

2.2.1. Caractérisations

Est similaire à celle des bactéries et caractérisée en particulier par :

- absence de noyau véritable (un chromosome circulaire est libre dans le cytoplasme).
- absence de **plastides**,
- système de lamelles portant de la chlorophylle (Thylacoïdes épars dans le cytoplasme).
- Jamais de **flagelle**.
- absence de **mitochondries**, (la respiration se fait par membrane plasmique).
- absence d'**appareil de Golgi**,
- absence de **reproduction sexuée**.

Ce groupe de bactéries photosynthétiques diffère de toutes les autres bactéries (bactéries vertes et pourpres sulfureuses, comme *Chlorobacteriaceae* et *Athiorhodaceae*) car les *Cyanobactéries* phototrophes sont les seules procaryotes qui réalisent la photosynthèse oxygénique au cours de laquelle l'O₂ est produit.

2.2.2. Diversité morphologique

- soit unicellulaires, vivant solitaires ou en colonies
- soit organisées en trichomes, quand le thalle est composé d'une série de cellules sans gaine.

- soit organisées en filaments, quand le thalle est composé d'une série de cellules **enveloppées** d'une gaine (Flores et Herrero, 2010).

2.2.3. Diversité écologique

Les cyanobactéries présentent des caractéristiques écologiques très variées qui leur ont permis de coloniser la plupart des habitats, aquatiques ou terrestres. Elles sont libres ou vivent en symbiose avec d'autres organismes, (des champignons, des végétaux et certains mollusques). Certaines de ces symbioses ont une importance écologique ou agronomique (Huisman *et al.* 2018).

Un grand nombre d'entre elles sont adaptées à des environnements extrêmes (glaciers, sources chaudes, cendres volcaniques), grâce à des capacités qui leur permettent de supporter :

- des températures élevée (genre *Synechococcus* observe dans des sources thermales a plus de 70°C),
- des pH faibles (certaines *Picocyanobacteries* sont observées à des pH de l'ordre de 4),
- ou encore une large gamme d'éclairements (genre *Prochlorococcus* pouvant faire de la photosynthèse sous des éclairements de moins de 1 $\mu\text{mol photons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et jusqu'à environ 2000 $\mu\text{mol photons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

En milieu aquatique, les cyanobacteries sont planctoniques, c'est-à-dire en suspension dans la colonne d'eau, ou benthiques quand elles se développent fixées sur les sédiments.

2.2.4. Cytologie

Une cellule typique de cyanobactérie comprend, de l'extérieure vers l'intérieur :

1- une gaine mucilagineuse : Souvent épaisse et donnant à toute la colonie une consistance d'où le nom de **Myxophycées** « **algues gélatineuses** ». Cette enveloppe mucilagineuse composée de **pectine** et **hémicellulose**. La gaine fait défaut dans une partie des espèces.

2- une paroi externe : La paroi cellulaire est une **paroi feuilletée** constituée généralement de **4 couches**.

Les **3 premières**, sont composées de **glucides**, **lipides** et **protéines** et la **couche interne** d'**acide muramique** correspondant à des saccules de murène (la structure et de la composition sont voisines de celles des bactéries Gram-).

3- une membrane cytoplasmique : C'est la membrane unitaire de tous les êtres vivants. Elle est constituée d'une bicouche lipidique et de glycoprotéines. Chez les procaryotes, cette membrane joue également un rôle dans la respiration.

4-Cytoplasme : La micrographie montre deux parties : le **chromatoplasme** (gouttelettes lipidiques, réserves, pigments) et le **centroplasma** (ADN).

*Un chromatoplasme

Une couche colorée constituant l'appareil photosynthétique, il formé de thylacoïdes qui, à la différence des végétaux eucaryotes, ne sont pas inclus dans des **chloroplastes** (les pigments ne sont pas portés par des plastes mais sont diffus dans le cytoplasme et donnent aux cellules une coloration homogène. Le mélange de ces pigments dans le cytoplasme donne en général la **teinte bleu-vert** caractéristique des Cyanophycées mais on rencontre aussi des teintes **vert-noirâtres, brunâtres, rouges, bleues** ou même **violettes**).

La lamelle principale du **thylacoïde** contient de la **chlorophylle a** et plusieurs **caroténoïdes**, dont certains particuliers aux cyanobactéries. Les **thylacoïdes** portent à leur surface des alignements de granules dits **phycobilisomes** qui contiennent deux pigments, la **phycocyanine** et la **phycoérythrine**.

- **la phycocyanine** qui donne au *Cyanobacteria* leur couleur caractéristique **bleu-vert**.
- **la phycoérythrine**, certaines sont **rouges** à cause de ce pigment.

* Un centroplasma

La partie centrale (Nucléoplasme) qui est sorte de noyau non figuré contenant des filaments d'ADN et homologue de l'appareil nucléaire des bactéries.

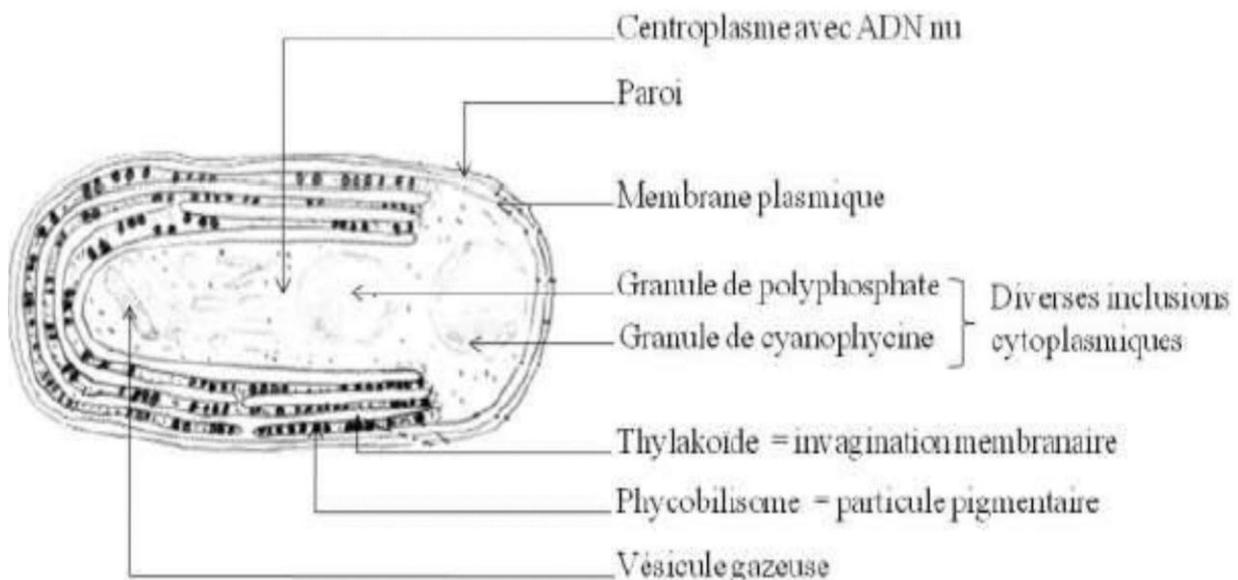


Figure 2 : Ultrastructure d'une Cyanobactérie

La cellule contient en outre, différentes inclusions :

- Des **ribosomes** surtout nombreux dans le centroplasma (des ribosomes de type procaryote 70 S).

- Des grains de **cyanamylon** : polysaccharide à base de glucose proche du **rhodamylon (polymère ramifié de glucoses)** surtout abondants dans le chromatoplasme.
- Des grains de **cyanophycine** (réserve protéique) souvent situés dans le chromatoplasme appliqué sur les parois transversales
- Des grains métachromatiques (volutine) plutôt localisés dans le centroplasma et correspondant à des polyphosphates.
- Des **carboxysomes** qui contiennent des enzymes pour la fixation du carbone.
- Des gouttelettes lipidiques (graisse)
- Dans certains genres (ex : *Microcystis*, *Planktothrix*...), la présence dans les cellules végétatives de **vacuoles à gaz** qui assurent la flottabilité des cyanobactéries dans les milieux aquatiques et de se positionner à différents niveaux dans la colonne d'eau, selon leurs besoins en lumière et en nutriments.

Toutes les cyanobactéries utilisent le cycle de Calvin pour la fixation du CO₂. Elles sont abondantes partout où l'on trouve de l'eau. Elles fournissent une énorme quantité de nourriture aux écosystèmes d'eau douce ou d'eau salée.

Certaines colonies filamenteuses comprennent des cellules spécialisées dans la fixation du diazote, processus métabolique qui convertit le N₂ atmosphérique en composant pouvant s'incorporer dans des protéines et d'autres molécules organiques.

L'hétérocyste : est une cellule transparente, à paroi épaisse, habituellement translucide, qui se rencontre chez certaines cyanobactéries (dites hétérocystées). Exp : *Nostoc sp.*

Les hétérocytes se développent à partir des cellules végétatives. Au cours du développement, l'appareil thylakoïde se dégrade et entraîne des réarrangements spécifiques de l'ADN. Par exemple, les hétérocytes synthétisent l'enzyme nitrogénase, qui permet la fixation de l'azote gazeux (N₂) de l'atmosphère (ou dissous dans l'eau) (Flores et Herrero, 2010).

Il est caractérisé par la présence de nodules polaires aux points d'attache aux cellules végétatives. Suivant les espèces on rencontre des hétérocystes intercalaires et/ou terminaux.



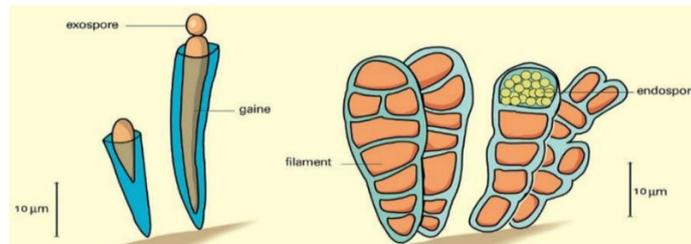
Les hétérocystes peuvent être circulaires, ovales, triangulaires, carrés ou rectangulaires

2.2.5. Reproduction chez cyanobactéries

Par scissiparité : c'est une division binaire

Les Spores : unicellulaire (**coccospores**) qui peuvent être :

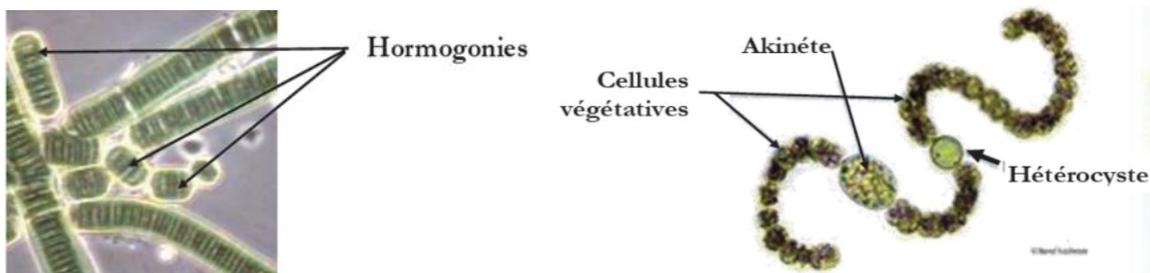
- des **endospores** se forment à l'intérieur des cellules végétatives dont le cytoplasme se divise et dont la paroi devient l'enveloppe du sporocyste.
- des **exospores** se forment par une succession des divisions transversales qui bourgeonnent en spores ou peuvent rester attachées en chapelet



Les Hormogonies : Ce sont groupe de cellules qui s'échappent à l'extrémité de la gaine de certaines formes des cyanobactéries filamenteuses, ou qui résultent de la germination d'akinètes. Les hormogonies peuvent être **mobiles** ou **immobiles** (Flores et Herrero 2010).

Ces fragments de thalles libérés peuvent se développer et former un nouveau thalle.

***Les Akinètes** : Sont des cellules généralement plus grandes que les **cellules végétatives** et les **hétérocystes**, leur paroi est très épaisse, leur **durée de vie** très grande (**plus de 100 ans**). Sont des spores de résistance immobiles, capables de résister à des conditions écologiques très défavorables et qui, après retour à une situation environnementale normale, peuvent germer et redonner un thalle. (Flores et Herrero 2010).



2.2.6. Facteurs favorisant les proliférations de cyanobactéries

Les proliférations de cyanobactéries sont le plus souvent associées

- des concentrations élevées en nutriments dont le phosphore et/ou l'azote qui sont souvent les éléments nutritifs limitant dans les plans d'eau.
- une stabilité élevée de la colonne d'eau au moment du développement.
- des conditions météorologiques favorables : luminosité, température.

2.2.7. Les cyanobactéries toxiques

Plusieurs espèces de cyanobactéries emmagasinent dans leurs cellules des poisons naturels appelés cyanotoxines. Ces toxines sont libérées dans l'eau lors de la rupture ou de la mort de la cellule.

Une même toxine peut être produite par des espèces différentes. Ainsi, les microcystines ont déjà été observées chez des espèces du genre *Microcystis*, mais également chez des espèces des genres *Anabaena*, *Planktothrix* ou encore *Nostoc*.

Une même espèce peut produire différentes toxines. C'est ainsi qu'*Anabaena spiroïdes* peut produire de l'anatoxine-a mais également des microcystines.

Les effets des cyanotoxines sur la santé

Il existe trois catégories de toxines produites par les cyanobactéries, chacune pouvant avoir des effets variables sur la santé :

- **Les dermatotoxines** peuvent causer des irritations et créer des problèmes d'allergies. En contact avec la peau, ces toxines peuvent provoquer des sensations de brûlures ainsi que des **démangeaisons rougeâtres et boursoufflées**.
- **Les hépatotoxines** favoriseraient l'apparition de troubles chroniques du foie et du tube digestif.
- **Les neurotoxines** affectent le fonctionnement du système nerveux. En stimulant constamment les **muscles**, elles peuvent provoquer des **crampes**, une **grande fatigue** et même une **paralysie**.

2.2.8. Classification

En raison du polymorphisme des cyanobactéries, les classifications ont donné naissance à de très nombreux genres et espèces (environ 120 genres et plus de 1 500 espèces).

La classe des Cyanobactéries divisé en deux sous-classes :

- les *Coccogonophycidées* qui sont des formes solitaires ou coloniales parfois filamenteuses, mais **sans hormogonie** et se multipliant uniquement par **coccospores unicellulaires**.
- les *Hormogonophycidées* qui sont des formes filamenteuses à trichomes souvent entourés d'une gaine, à multiplication par **hormogonie pluricellulaire**. Dans cette sous-classe, on rencontre souvent des espèces à hétérocystes.

1. Sous classe : Coccogonophycidées

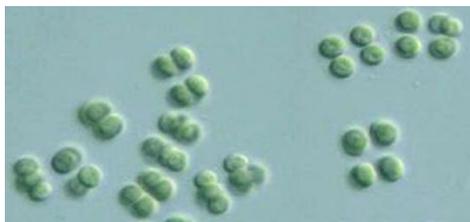
Cette **sous classe** renferme **les cyanobactéries primitives**, on les trouve soit en colonie, soit isolées, elles se multiplient par des **coccospores**.

On distingue **03 ordres** :

Ordre 1 : *Chroococcales*

Le taxon des Chroococcales a été considérablement réduit dans la nouvelle classification proposée par Komárek *et al.* (2014). Il regroupe plus de 120 espèces (McGregor, 2013;). Il comprend

uniquement les cyanobactéries de formes coccoïdales unicellulaires ou coloniales (multicellulaires), non filamenteuses. qui ont des tylakoïdes plus ou moins irréguliers. Les principaux genres sont *Aphanothece*, *Chroococcus*, *Gloeocapsa*, *Gloeothoece*, *Gomphosphaeria*, *Microcystis*,



Chroococcus sp.

Ordre 02 : Chamaesiphonales

Sont des espèces en forme filamenteuse. La multiplication se fait à travers des endo ou exospores.

Ordre 3 : Pleurocapsales

Des algues bleues ont un trichome (filament simple), multiplication à travers des endospore

Pleurocapsales se caractérisent par la présence de **boocytes (type d'endospores)**, des cellules spécialisées où se produit par une fission multiple. Il comprend une vingtaine de genres dont le plus connu est *Pleurocapsa* (Ishida *et al.*, 2001; Whitton, 2011).



Pleurocapsa sp.

2. Sous classe : Hormogonophycidées

Des algues bleues généralement en forme filamenteuse. La multiplication se fait par hormogonie, dans cette sous classe on peut trouver des espèces avec hétérocystes ou akinetes.

Ordre 01 : Nostocales : Cet ordre comprend 03 familles :

Famille 01 : Oxillatoraiceae

Ont des cellules qui sont jointes bout à bout pour former de longs **filaments non ramifiés** constitués de cellules cylindriques,

Toutes les cellules du filament peuvent être presque **identiques (Sans cellules spécialisés)** ou le filament peut être légèrement effilé.

Le genre Oscillatoria :

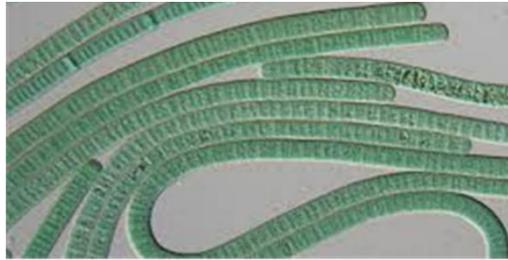
- Algue filamenteuse poussant en amas ou enchevêtrements denses. Au microscope, on voit les minces filaments se tordre.

- Les filaments sont homocystés (absence d'hétérocystes et les akinètes sont également absents).

- Le filament est sous forme d'un trichome droit, sans gaine, les cellules végétatives ont une forme en disque.
- A l'extrémité il y a la calyptra qui est une formation épaissie sous forme de coiffe.

Reproduction :

Elle s'effectue par rupture transcellulaire du trichome du filament et formation d'hormogonies.



Oscillatoria limosa

Famille 02 : Nostocaceae

Il comprend des formes filamenteuses, à la fois **simples** ou **ramifiées**, et à la fois celles qui se présentent sous forme de brins simples ou de brins multiples dans une gaine.

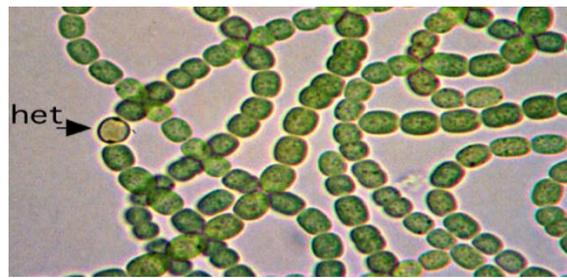
Certains membres présentent une diminution de la largeur à partir de la base, et certains ont des hétérocystes (Adams et Duggan, 1999).

Le genre : Nostoc

- Se regroupent en colonie ou filaments. Les filaments peuvent flotter ou s'attacher à des objets ; vit aussi dans les cours d'eau rapides ou sur les berges humides. Dans les lacs, peut croître dans l'eau jusqu'à 20 m de profondeur.
- Ressemble à un collier de perles avec des cellules vides plus grosses parsemées le long du filament. Enfermé dans une masse gélatineuse.
- Cellules végétatives sphériques, ovoïdes ou cylindriques. Hétérocystes aux deux extrémités du filament (hétérocyste terminaux)
- Chez les plus longs filaments, Les akinètes, quand ils existent, sont en position intermédiaire entre deux hétérocystes et sont souvent en chaîne.

Reproduction : Asexuée comme toutes les cyanobactéries

- Soit une **fragmentation** par **hormogonies** en conditions favorables, il y a une rupture du trichome.
- Soit par **germination des akinètes**, ces dernières se forment dans les filaments les plus vieux et en conditions défavorables, quand les conditions deviennent favorables, ces akinètes germent par une division binaire et donnent directement de nouveaux filaments ou chez certains *Nostoc* les akinètes donnent d'abord des hormogonies puis des filaments.
- Très rarement par germination des hétérocystes qui subissent une division végétative (binaire) et donnent des hormogonies.



Nostoc sp.

Famille 03 : Rivulariaceae

Filaments constitués de trichomes couverts de gaine importante.

Le genre *Rivularia* :

Description :

- Filaments constitués de trichomes couverts de gaine importante.
- Présentent de fausses ramifications.
- Présences d'hétérocystes terminaux.
- Chaque filament part d'un hétérocyste.
- Présence de poils
- Absence d'akinètes.

Reproduction :

- Par germination des hétérocystes et formation d'hormogonies ou par rupture du trichome.

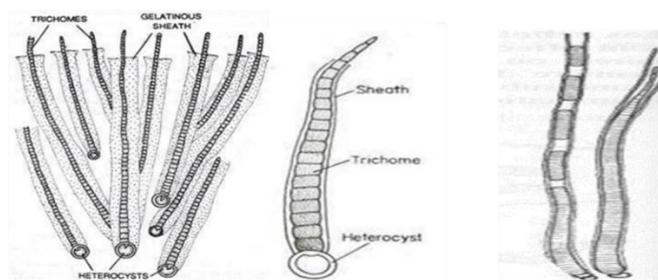
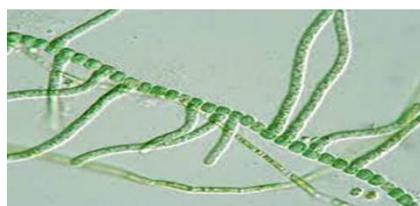


Figure 3 : A. Filaments de *Rivularia*, B. Formation d'hormogonies chez *Rivularia*

Ordre 02 : Stigonimatales

Famille : Stigonemataceae

Il comprend des formes filamenteuses ramifiées



Stigonema sp.

Chapitre 3 : Les bactéries Gram positives pauvres en GC

Les bactéries Gram positives

Les bactéries Gram positives étaient historiquement groupées selon leur forme générale (bâtonnets, coques ou formes irrégulières) et leur capacité de former des endospores. Cependant, l'analyse de leurs relations phylogénétiques, par comparaison des séquences des ARNr 16S, montre qu'elles sont divisées en (Stackebrandt, 2004).

- Les bactéries Gram positives pauvre en G+C
- Les bactéries Gram positives riche en G+C ou groupe actinobactérien.

Tableau 2 : Quelques différences caractéristiques entre les bactéries Gram (-) et (+)

propriétés	Bactéries Gram négatives	Bactéries Gram positives
Paroi cellulaire	Paroi cellulaire de type Gram négatif avec une couche interne de peptidoglycane de 2 à 7nm et une membrane externe épaisse de 7à 8nm) contenant des lipides, des protéines et des lipopolysaccharides	Paroi cellulaire de type Gram positif homogène et épaisse (20 à 80 nm) faite principalement de peptidoglycane. Il peut y avoir d'autre polysaccharide et des acides techoique.
cellulaire	Sphère, ovale, bâtonnets droits ou courbés, hélices ou filaments, certaines ont des gaines ou des capsules	Sphères, bâtonnets ou filaments peuvent avoir de vraies ramifications
Reproduction	Scissiparité, parfois bourgeonnement	Scissiparité, les formes filamenteuses croissent par allongement de l'extrémité.
Métabolisme	Phototrophes, chimiolithoautotrophes, ou chimioorganohétérotrophes.	Généralement chimioorganohétérotrophes quelques-uns sont phototrophes
Mobilité	Mobiles ou non mobiles. La localisation des flagelles. La mobilité peut être due à des filaments axiaux (spirochètes) ou à du glissement.	Le plus souvent non mobiles ; si mobiles ont des flagelles péritriches.
Appendices	Peuvent produire différents types d'appendices : pili, fimbriae, prosthèques, pédoncules	Généralement sans appendices (peuvent avoir des spores sur des hyphes)
Endospores	Ne forment pas d'endospores	Certains groupes formes des endospores

3. Les bactéries Gram positives pauvres en GC

Le phylum Firmicutes (*Firmus cutis* : peau dure) a été décrit en 1978 par Gibbons et coll. comme regroupant les bactéries à Gram positif (Murray, 1984). Il a ensuite été divisé en deux pour séparer les bactéries à bas G+C% (inférieur ou proche de 55 mol%), de celles à haut G+C% qui sont aujourd'hui classées dans le phylum *Actinobacteria* (Stackebrandt, 2004).

Initialement basée sur l'étude des caractères phénotypiques, la classification des Firmicutes s'est ensuite trouvée bouleversée par l'utilisation des séquences du gène de l'ARNr 16S. Ainsi, selon la seconde édition du Bergey's Manual (Garrity *et al.*, 2005), les Firmicutes se divisent en trois classes :

Les *Mollicutes*

Les *Clostridia*

Les *Bacilli*.

3.1. La classe des *Mollicutes* « Mycoplasmes »

Les membres de la classe des *Mollicutes*, communément appelés mycoplasmes, sont particuliers parce qu'ils n'ont pas de paroi, Ces dernières avaient été rattachées en 2004 au phylum des Firmicutes sur la base d'une analyse phylogénétique des séquences protéiques de la phosphoglycérate kinase (Wolf *et al.*, 2004). Les Mycoplasmes ont de petits génomes et des voies métaboliques simplifiées. Lors de leur découverte, ils étaient considérés comme des organismes assez primitifs, mais l'analyse moléculaire a révélé qu'ils descendaient d'un ancêtre Gram positif.

Les mycoplasmes forment des colonies très petites en milieu solide (1 mm de diamètre). Leur petit génome apparait comme le résultat d'une réduction génomique telle qu'ils ont perdue de nombreuses propriétés métaboliques et notamment celle de pouvoir synthétiser les précurseurs du peptidoglycane. La classe des Mollicutes comprend 4 ordres et 7 familles.

1. *Mycoplasmatales*

- Famille I. *Mycoplasmataceae* (*Mycoplasma*, *Ureaplasma*),
- Famille II. *Incertae sedis* (*Eperythrozoon*, *Haemobartonella*)

2. *Entomoplasmatales*

- Famille I. *Entomoplasmataceae* (*Entomoplasma*, *Mesoplasma*),
- Famille II. *Spiroplasmataceae* (*Spiroplasma*),

3. *Acholeplasmatales*

- Famille I. *Acholeplasmataceae* (*Acholeplasma*)
- Famille II. *Incertae sedis* (*Candidatus*, *Phytoplasma*)

4. *Anaeroplasmatales*

- Famille I. *Anaeroplasmataceae* (*Anaeroplasma*, *Asteroleplasma*).

Forme et Génome des Mollicutes

Comme ils ne sont entourés que par une membrane cytoplasmique, ces bactéries sont pléomorphes ; leur forme varie depuis l'organisme sphérique ou pyriforme, avec un diamètre d'environ 0,3 à 0,8µm, jusqu'à des filaments ramifiés ou hélicoïdaux.

Le génome des *Mollicutes* est l'un des plus petits trouvés chez les bactéries, allant de 0,7 à 1,7 Mb. Ceci explique la perte de nombreuses propriétés métaboliques. Ces bactéries utilisent des voies métaboliques simplifiées et elles sont incapables de synthétiser nombreuses macromolécules tels que les précurseurs du peptidoglycane ; et donc l'absence de la paroi. L'absence de cette dernière rend les *Mollicutes* particulièrement sensibles aux changements osmotiques. Comme les *Mycoplasmes* sont dépourvus de paroi cellulaire, ils sont sensibles à l'alcool et aux détergents mais résistantes aux pénicillines dont le site d'action est au niveau du peptidoglycane.

Genre : *Mycoplasma*

Un genre important de *Mollicutes* est *Mycoplasma*. Ce sont aussi, après les Nanobactéries, les plus petites cellules connues avec un diamètre de 0.1µm.

Les *Mycoplasmes* ont un petit génome (0,7-1,7Mb) et ont donc un nombre limité de gènes. Les espèces *Mycoplasma genitalium*, *M. pneumoniae* ont moins de 1000 gènes.

Certains membres de ce genre tirent leur énergie de la fermentation des sucres par la voie d'Embden-Meyerhof pour produire de l'acide lactique, de l'acide pyruvique et de l'acide acétique. D'autres dégradent l'arginine (acide aminé) comme source d'énergie.

De nombreux vivent dans le sol, mais certaines espèces de ce genre sont des parasites ou des pathogènes des animaux. On les trouve particulièrement sur les tissus épithéliaux des muqueuses. *M. pneumoniae* est l'agent d'une pneumonie bactérienne.

Les *mycoplasmes* sont remarquablement réponsus et peuvent être isolés d'animaux, de plantes, du sol.

Chez les animaux, les *mycoplasmes* colonisent muqueuses et articulations, et sont souvent associés à des maladies des systèmes respiratoire et urogénital, par exemple :

Mycoplasma mycoides : Agent responsable de la pleuropneumonie bovine contagieuse dans le bétail

Mycoplasma gallisepticum : Agent responsable de la maladie respiratoire chronique des volailles.

M. hyopneumoniae : agent de la pneumonie des porcs.

Mycoplasma genitalium : a été détectée en 1980, est un agent d'infections sexuellement transmissibles (IST). Il est responsable d'urétrites non gonococciques (UNG) aiguës et chroniques et

représente la 2^{ème} cause d'UNG derrière *Chlamydia trachomatis*. Il est retrouvé chez 1 à 3 % de la population générale et sa fréquence augmente fortement dans les populations à risque d'IST.

Mycoplasma hominis : a été la première espèce de mycoplasme humain détectée en 1937, Est un saprophyte des voies génitales. Il colonise le tractus génital à la naissance ou peu après. Chez la femme, il ne joue pas de rôles pathogènes dans les cervicites, mais a été mis en cause dans les vaginoses bactériennes. Chez les nouveau-né, il serait responsables d'infections néonatales (infections pulmonaire, méningites, septicémies)

Genre : *Ureaplasma*

Parmi les espèces génitales, *Ureaplasma parvum*, *Ureaplasma urealyticum* (regroupés sous le terme *Ureaplasma* spp.) sont des commensaux du tractus uro-génital bas. La colonisation varie en fonction de l'âge, de la race, du niveau socio-économique, de l'activité sexuelle, du statut hormonal et augmente durant la grossesse.

Genre : *Spiroplasma*

Les **spiroplasmes** ont été isolés chez **des insectes**, des **tiges** et de nombreuses plantes. Ils provoquent des **maladies** chez les agrumes, les choux, les brocolis, le maïs et d'autres hôtes.

3.2. La classe des *Clostridia*

Il y a deux classes de bactéries Gram positives à faibles teneur en GC qui forment des endospores : les *Clostridia* et *Bacilli*.

La classe des *Clostridia* regroupe une très large variété de bactéries Gram positives distribuées, entre trois ordres et 11 familles.

La famille : *Clostridiaceae*

La famille *Clostridiaceae* comprend actuellement environ de 28 genres bactériens. Cette famille est en fait scindée en quatre sous-ensembles (*Clostridiaceae* 1 à 4). Le sous-ensemble *Clostridiaceae* 1 regroupe les genres *Anaerobacter*, *Caloramator*, *Clostridium*, *Oxobacter*, *Sarcina* et *Thermobrachium* (Wiegel *et al.*, 2006).

Genre : *Clostridium*

Le genre *Clostridium* a été décrit pour la 1^{ère} fois par Prazmowski en 1880 et est actuellement classé dans le phylum Firmicutes, classe *Clostridia*, ordre *Clostridiales* et famille *Clostridiaceae* (Cato *et al.*, 1986). Il est de loin le plus grand des *Clostridia*. Il comprend des bactéries fermentatives, anaérobies strictes (bien que certaines espèces puissent résister la présence d'oxygène « **Anaérobies aérotoleérant** »), qui forment des endospores.

Le genre contient bien plus de 100 espèces, qui appartiennent à plusieurs groupes phylogénétiques distincts. Il est constitué de bactéries largement répandues dans le sol, l'eau et les sédiments marins. Comme ils sont anaérobies et forment des endospores résistantes à la chaleur, ils sont responsables de nombreux cas de nourriture avariée, même en boîte de conserve. Parmi elles, de grands pathogènes humains tels :

Clostridium perfringens est l'agent causal de la gangrène gazeuse et l'empoisonnement alimentaire.

Clostridium butulinum est l'agent responsable du botulisme.

Clostridium tetani celui du tétanos.

Mais également de nombreux organismes ayant des applications industrielles ou biotechnologiques (par exemple *C. acetobutylicum* est utilisé pour la production de butanol) (Grosse-Herrenthey *et al.*, 2008).

Genre : *Desulfotomaculum*

Desulfotomaculum est un genre qui forme des endospores et qui réduit le sulfate (SO_4^{-2}) et le sulfite (SO_3^{-2}) en sulfure d'hydrogène (H_2S) pendant la respiration anaérobie. Bien qu'il donne une coloration de Gram négative, *Desulfotomaculum* montre, au microscope électronique, une paroi cellulaire de Gram positif. Ceci, ajouté aux études phylogénétiques, concourt à le placer dans les Gram positives à faible teneur en GC (Ludwig *et al.*, 2009).

3.3. La classe des *Bacilli*

La seconde édition du Bergey rassemble une grande variété de bactéries Gram positives en une seule classe, les *Bacilli*, c'est une classe phylogénétiquement bien définie constituée de deux ordres, *Bacillales* et *Lactobacillales*, supportés par des nœuds robustes. Ces ordres contiennent 17 familles et plus de 70 genres Gram positifs, comprenant des coques, des bâtonnets et des coques sporulants, et des bâtonnets non sporulants.

3.3.1. L'ordre des *Bacillales*

Cet ordre contient 4 familles

- Familles des *Bacillaceae*
- Famille des *Panococcaceae*
- Famille des *Staphylococcaceae*
- Famille des *Listeriaceae*

Familles des *Bacillaceae*

Genre : *Bacillus*

Le genre *Bacillus*, famille des *Bacillaceae*, est le plus vaste de l'ordre. Il comprend des bâtonnets Gram positifs, sporulants, chimiohétérotrophes, qui sont généralement mobiles, avec des flagelles péritriches. Le genre est aérobie, ou parfois facultatif, et catalase positif.

Bacillus subtilis

L'espèce type de genre, est la bactérie Gram positive la mieux étudiée (Sonenshein *et al.*, 2002), cette bactérie anaérobie facultative peut utiliser le nitrate comme accepteur terminal d'électrons ou effectuer une fermentation acide mixte qui fournit du lactate, de l'acétate et de l'acétoïne comme produits terminaux majeurs. Non pathogène, c'est un organisme modèle extraordinaire pour l'étude de la régulation génétique, de la division cellulaire, de la perception du quorum et de la différenciation cellulaire. Son génome de 4,2Mb a été l'un des premiers à être complètement séquencé.

Bacillus subtilis, est une bactérie qu'on retrouve facilement sous forme de spores dans une grande diversité de sols. Chose intéressante, on la retrouve aussi sous sa forme végétative (C-à-d pas sous forme de spores) lorsqu'elle est associée étroitement avec les racines des plantes ou avec du matériel en décomposition sur lequel elle se développe. Outre la sporulation (une forme de différenciation), *Bacillus subtilis*, peut aussi former des biofilms.

Beaucoup d'espèces de *Bacillus* ont une importance considérable. Certaines produisent des antibiotiques comme la bacitracine, la gramicidine et la polymyxine (Schallmeyer *et al.*, 2004).

Bacillus cereus : l'espèce responsable de certaines formes d'empoisonnement alimentaire.

Bacillus anthracis est l'agent causal du charbon qui peut affecter les animaux de ferme et l'homme.

Plusieurs espèces sont utilisées comme insecticides. Ainsi, lors de la formation d'endospores, ***B. thuringiensis*** et ***B. sphaericus*** forment un cristal protéique solide, le corps parasporal.

Le corps parasporal de ***B. thuringiensis*** contient des toxines protéiques qui peuvent tuer plus de cent espèces de papillons ; elles se dissolvent dans l'intestin alcalin des chenilles et en détruisent l'épithélium.

Le corps parasporal de ***B. sphaericus*** contient des protéines toxiques pour les larves de moustiques et peuvent être utiles pour le contrôle des moustiques qui véhiculent le parasite *Plasmodium*,

responsable de la malaria. *B. anthracis* est l'agent causal du charbon qui peut affecter les animaux de ferme et l'homme.

Famille des *Panococcaceae*

Genre : *Sporosarcina*

Sporosarcina est une bactérie qui appartient à l'un des cinq genres de la famille des *Panococcaceae* et est la seule bactérie à endospores connue, qui a une forme coccoides plutôt que celle d'un batonnet.

Famille des *Staphylococcaceae*

La famille des *Staphylococcaceae* comprend cinq genres, dont le plus important est le genre *Staphylococcus*.

Genre : *Staphylococcus*

Le nom de « *Staphylococcus* » a été attribué en 1882 à un regroupement de cocci causant un grand nombre de maladies pyogènes chez l'humain.

Le genre *Staphylococcus* a été séparé de celui de *Micrococcus* par Evans en 1957. Ces deux organismes donnent des colonies opaques, blanches, orange ou jaune sur gélose au sang. Tous deux sont des bactéries à Gram positif et catalase positive (NHS, 2007). Les membres de ce genre sont des coques Gram positifs, anaérobies facultatifs, non mobiles de 0,5 à 1,5µm de diamètre, observables seuls, en paires et en tétrades, et se divisant de façon caractéristique sous plus d'un plan pour former des amas irréguliers. Catalase positifs et oxydase négatifs, ils respirent avec l'oxygène pour accepter terminal d'électrons, bien que certains soient capables de réduire le nitrate en nitrite. Capables de fermentation, ils fermentent le glucose principalement pour donner du lactate.

Les staphylocoques sont normalement associés à la peau, aux glandes cutanées et aux muqueuses des animaux à sang chaud. Les staphylocoques sont responsables de nombreuses maladies humaines.

Staphylococcus epidermidis

Est un résident commun de la peau qui est parfois d'endocardites et d'infections chez des patients moins résistants (p.ex., infections des blessures, infections chirurgicales, infections de l'appareil urinaire, piercing corporels).

Staphylococcus aureus

Est une bactérie omniprésente chez l'homme, les animaux ainsi que dans l'aliment. Ces bactéries ont été isolées et analysées par le chirurgien Ecossais Sir Alexander Ogston en 1880. Il fut

démontré que les microorganismes dérivés de pus prélevés d'un abcès humain provoquaient les mêmes symptômes et des lésions pyogènes chez une souris (NHS, 2007).

La coagulase, qui provoque la coagulation du plasma sanguin, est l'un des facteurs de virulence par *S. aureus*. Les types de croissance et d'hémolyse sur gélose au sang sont également utiles pour identifier ces Staphylocoques.

Famille des *Listeriaceae*

La famille des *Listeriaceae* comprend deux genres : *Brocothrix* et *Listeria*.

Genre : *Brocothrix* est surtout observé dans la viande mais pas pathogène.

Genre : *Listeria*

Est le genre médicalement important de cette famille. Ce genre contient des bâtonnets courts, aérobies ou facultatifs, catalase positifs et mobiles avec flagelles péritriches. Il est largement distribué dans la nature, particulièrement dans la matière en décomposition. Doués de respiration aérobie, ces microbes fermentent le glucose principalement en lactate.

Listeria monocytogenes, pathogène pour l'homme et les autres animaux, est responsable de la listériose, une infection alimentaire importante.

3.3.2. L'ordre des *Lactobacillales*

De nombreux membres de l'ordre des *Lactobacillales* produisent de l'acide lactique comme principal ou unique produit de fermentation. *Streptococcus*, *Enterococcus*, *Lactococcus* et *Leuconostoc* sont tous membres de ce groupe. Les bactéries lactiques ne sporulent pas et ne sont habituellement pas mobiles. Pour leur énergie elles dépendent normalement de la fermentation des sucres. Parmi le genre *Streptococcus*, le groupe viridans comprend les agents d'acidification fréquents dans certains fromages et yaourts comme le cas de l'espèce *Sc. thermophilus* (Skinnel et Quesnel, 1978)

On range habituellement les bactéries lactiques dans les anaérobies facultatifs, mais certains les considèrent comme des aérotolestants.

Genre : *Lactobacillus*

Le genre *Lactobacillus* est quantitativement le plus important des genres du groupe des bactéries lactiques. Créé, pour la première fois, par Beijerinck en 1901, il comprend actuellement, au moins 145 espèces reconnues qui présentent une diversité phylogénétique, phénotypique et écologique extrême (Corrieu et Luquet, 2008 ; Barinov *et al.*, 2011). Cette diversité est due à la variation en contenu guanine/cytosine (G/C) qui varie entre 30 et 55 % selon les espèces (De Vos *et al.*, 2009). On trouve ce genre à la surface des plantes, des produits laitiers, la viande, l'eau, les égouts, la bière, les fruits et beaucoup d'autres produits. Les lactobacilles font aussi partie de la flore normale

du corps humain : dans la bouche, le tractus intestinal et le vagin. Habituellement, ils ne sont pas pathogènes.

Genre : *Leuconostoc*, (famille des *Leuconostocaceae*) représente les coques hétérofermentaires. La classification des espèces basée sur le GC% a permis de distinguer les espèces : *Ln. mesenteroides*, *Ln. lactis*, *Ln. paramesenteroides* et *Ln. enos* (Yang et Woese, 1989 ; Leveau et Bouix, 1993).

Les *Enterococcaceae* et les *Streptococcaceae* sont d'importantes familles de coques Gram positives, non sporulantes, mésophiles, chimiohétérotrophes.

La famille des *Streptococcaceae* comprend seulement deux genres : *Lactococcus* et *Streptococcus*.

Genre : *Streptococcus*

. Les streptocoques sont des anaérobies facultatifs et catalase négatif. Ils sont le plus souvent impliqués en pathologie humaine et animale. Certaines espèces très virulentes, comme *Streptococcus pyogenes* ou *Streptococcus pneumoniae*, sont des pathogènes «obligatoires » responsables chez l'homme d'infections aiguës. D'autres espèces sont habituellement commensales mais deviennent des pathogènes «opportunistes » dans certaines circonstances [.

Chapitre 4 : Les bactéries Gram positives riches en GC (Actinobactérien)

Les bactéries Gram positives riches en G+C ou Actinobactérien sont des Gram positives, aérobies, qui se distinguent par la formation d'hyphes filamenteux qui se différencient pour produire des spores asexuées. Beaucoup d'entre elles ressemblent aux champignons par leur morphologie générale, mais pour éviter une confusion avec les champignons, on les appelle désormais Actinobactéries. Ils sont définis par un taux élevés en Guanine et Cytosine (Supérieur à 55%), ce qui les sépare des autres procaryotes ayant un taux inférieur en G+C (Holt *et al.*, 1994)

4.1. Mode de vie chez les actinobactérien

La majorité de ces espèces plutôt que vivre en liberté ont évolué pour devenir commensales et/ou symbiotes de plantes, champignons, insectes, éponges et d'autres organismes... ou elles sont saprophytes et principalement telluriques ; quelques-unes (ex *Mycobactérium*) peuvent être pathogènes chez des individus à résistance affaiblie.

Certaines vivent à l'intérieur de plantes pour lesquelles elles fixent l'azote de l'air et produisent des antibiotiques naturels.

4.2. Les actinomycètes constituent un groupe de microorganismes fascinant

- Ils sont la source de la plupart des antibiotiques utilisés en médecine aujourd'hui. Ils sécrètent près de 70% des molécules antibiotiques d'origine microbienne. Parmi les antibiotiques d'origine actinomycétale, 75% sont produits par le seul genre *Streptomyces* (Watve *et al.*, 2001). Plus de 50 antibiotiques différents ont été détectés dans le genre de *Streptomyces*, y compris la streptomycine, la néomycine, le chloramphénicol et les tétracyclines.
- Ils produisent aussi des métabolites employés comme médicament antitumorales et cytostatiques, antimitotique, antihistaminiques, analgésiques, vasodilatateurs, immunostimulants et immunosuppresseurs (Demain, 1999).
- Ils ont aussi une grande importance écologique. Ils peuvent dégrader une variété énorme de composés organiques et sont extrêmement important pour la minéralisation de la matière organique.
- Les actinomycètes sont d'excellents producteurs d'**enzymes** à utilisation industrielle variée telles que :
 - **La protéase** est une enzyme importante sur le plan industriel applications en pharmaceutiques, cuir, blanchisserie, alimentaire et les industries de traitement des déchets (Vonothini *et al.*, 2008).

- **Les amylases** sont utilisées dans l'industrie alimentaire comme conservateur dans la production des gâteaux, les jus des fruits et les sirops à base d'amidon et dans l'élimination des polluants environnementaux (Mobini-Dehkordi et Javan, 2012).
- **Les chitinases** utilisées dans la protection contre les champignons phytopathogènes (Tsuji et al., 2003).
- **Les lipases** sont couramment utilisées en boulangerie, en biscuiterie, en chocolaterie et dans le traitement des sols contaminés par des hydrocarbures.
- **Les cellulases** sont utilisées dans l'industrie du textile, l'industrie des pâtes et du papier et dans la production des vins (Mukhtar, 2017).
- **Les xylanases** sont utilisées dans la biotransformation des textiles et la fabrication des aliments pour animaux (exemple des producteurs : *Streptomyces* sp. et *Actinomadura* sp.).

4.3. Morphologie des actinomycètes

De nombreux actinomycètes comprennent le développement de cellules filamenteuse, appelées, hyphes, et de spores. Ressemble fortement à celle des mycètes. Toutefois, le diamètre des hyphes, de 0,5 à 1 μm , est 2 à 10 fois plus petit que celui des champignons (de 2 à 5 μm).

Les hyphes aériens forment par septation des spores à paroi mince. Ces spores sont considérées comme des exospores, parce qu'elles ne se développent pas dans une cellule mère, comme les endospores de *Bacillus* et *Clostridium*.

Le mycélium des actinomycètes présente une grande diversité de morphologies :

- ❖ des espèces dont le mycélium est rudimentaire au point d'être inexistant, allant du cocci (*Micrococcus*) à un cycle bâtonnet-cocci (*Arthrobacter* et les plupart des *Mycobacterium*).
- ❖ d'autres au mycélium fugace, qui se fragmente (*Nocardia*, *Nocardiosis*, *Rhodococcus*)
- ❖ des espèces au mycélium développé et persistant (*Streptomyces*, *Actinomadura*, *Streptosporangium*, etc.).

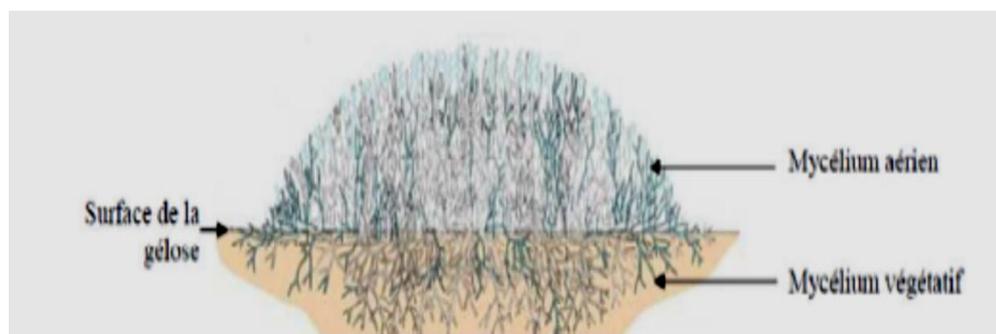


Figure 4 : Une colonie du genre *Streptomyces* sur milieu solide (Dvorak, 1999).

Le mycélium permanent peut être organisé en mycélium végétatif (appelé aussi mycélium de substrat ou mycélium de base) et/ou en mycélium aérien. On distingue trois cas :

- Soit seul le mycélium végétatif est formé (exemple : *Frankia*, *Dactylosporangium*). La croissance a lieu soit au sein, soit à la surface du milieu. Le mycélium est coénocytique : il renferme un cytoplasme commun multi-nucléoïde, et est donc dépourvu de septum.
- Soit il y a formation de mycélium végétatif puis de mycélium aérien mûri en conidies (*Streptomyces*). Le mycélium aérien croît à la surface du mycélium végétatif et utilise ce dernier comme substrat.
- Soit, seul le mycélium aérien est formé, ce qui n'est rencontré que pour le genre *Sporichthya*, dont les hyphes du mycélium aérien sont attachés au substratum par des crampons (Lechevalier *et al.*, 1986).

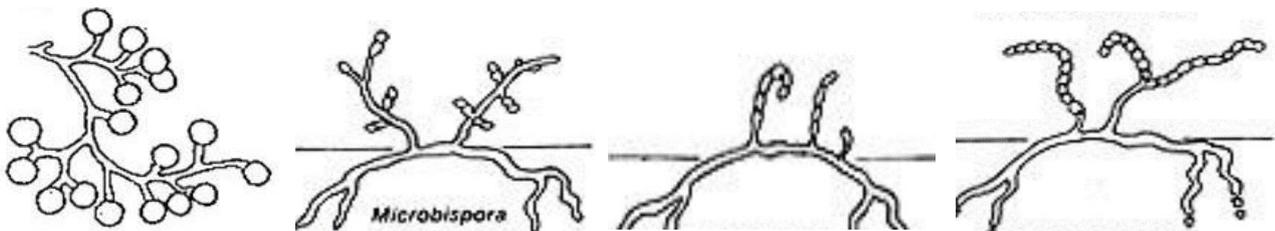
4.4. Mobilité

La plupart des actinomycètes ne sont pas mobiles, leurs spores se dispersent grâce au vent ou en adhérant à des animaux. Cependant, certains produisent des spores flagellées, appelées zoospores, permettant leur dispersion dans les habitats aquatiques.

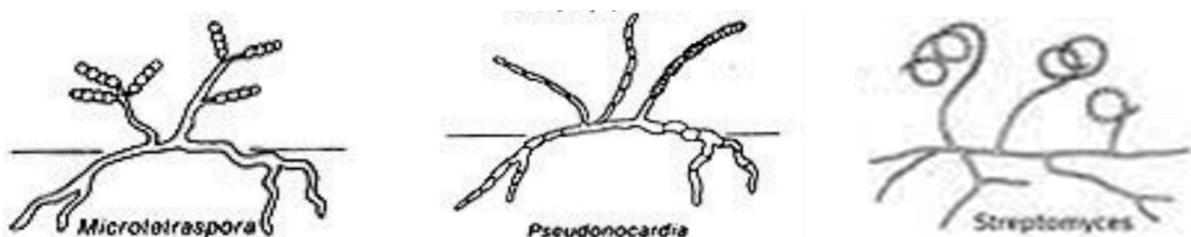
Arrangements des spores :

Les spores d'actinomycètes présentent une grande variété d'arrangements. Les spores peuvent être produites :

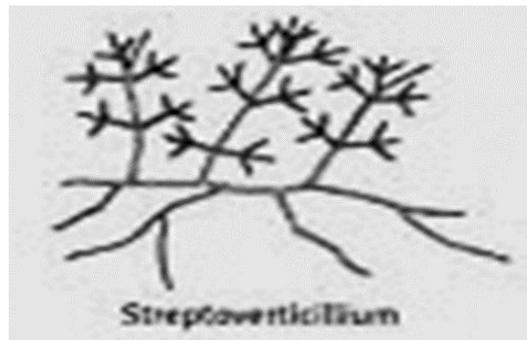
- Isolément (*Micromonospora*)
- Deux à deux longitudinalement (*Microbispora*)
- En courtes chaînettes (*Actinomadura*)
- En longues chaînettes (*Streptomyces*)



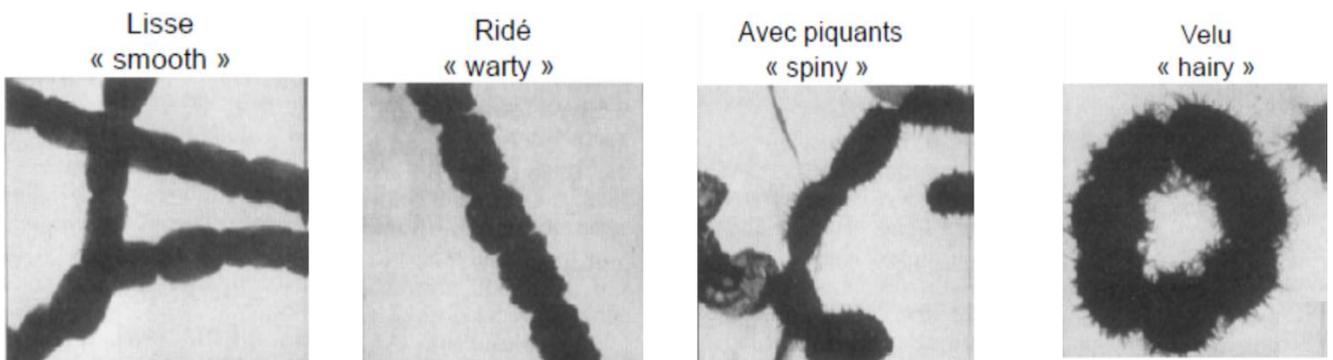
Les chaînettes de spores peuvent être : Ramifiées, droites, flexibles ou en spirales



Elles peuvent être rayonnantes autour d'hyphes sporophores.

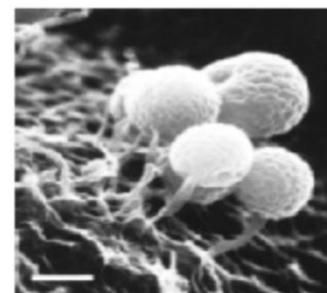
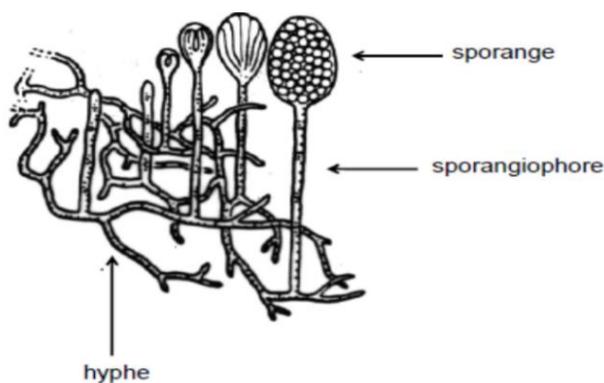


On rencontre également une importante diversité au niveau de la surface des spores :



Chez certains genres, les spores sont contenues dans un sporange : compartiment qui se développe à l'extrémité d'un hyphe spécial appelé sporangiophore.

Les sporanges contiennent quelques à plusieurs milliers de spores, formant des chaînes enroulées ou parallèles.



4.5. Aspect macroscopique au niveau de laboratoire

Les colonies formées **sur milieu solide** par les actinomycètes sont très particulières. Elles résultent de l'accumulation des hyphes ramifiés et non pas de cellules comme c'est le cas chez les bactéries non filamenteuses. Le diamètre des colonies est variable de 1 à 10 mm.

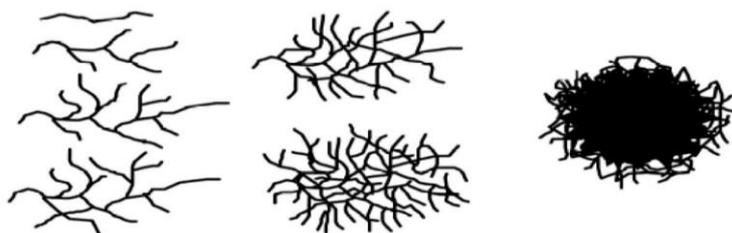


L'aspect des colonies peut être compact, sec, lisse, rugueux à contours lisse ou échancrés. Et elles sont souvent pigmentées (blanc, crème, jaune, violet, rose, gris, etc.



En culture liquide sans agitation, les hyphes formés après la germination des spores montent en surface pour croître en contact de l'air. En milieu liquide avec agitation, il n'y a pas de formation du mycélium aérien ni de spores.

Les *Streptomyces* forment d'abord des filaments libres, qui se ramifient et s'entremêlent pour former des agrégats. Ces derniers, généralement sphériques sont composés d'une masse dense d'hyphes enroulés.



4.6. Le cycle biologique

Tout comme les eucaryotes multicellulaires, les actinomycètes possèdent un cycle de vie complexe, qui est le résultat de trois processus physiologiques majeurs : la germination des spores et la croissance végétative, la différenciation cellulaire puis la mort, leur cycle de vie commence par la germination des spores, ce processus nécessite la présence d'ions calcium (O'Gara *et al.*, 2008).

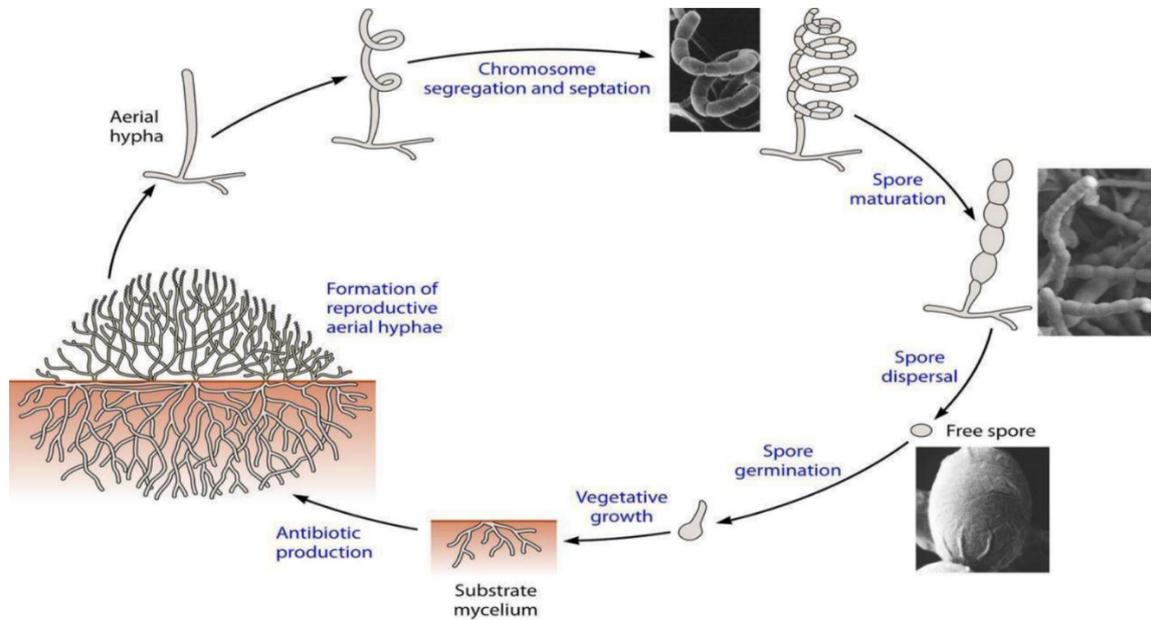


Figure 5 : Cycle de développement du genre *Streptomyces* sur milieu solide (Barka *et al.*, 2016).

4.7. Classification des actinomycètes

Le phylum des actinomycètes est vaste et très complexe. Le Bergey classe les bactéries riches en G+C phylogénétiquement en utilisant les données de l'ARNr 16S. Le phylum des *Actinobacteria* contient les actinomycètes et leurs parents riches en GC, il comprend une classe, 5 sous classe, 9 ordres, qui sont classées dans plus de 55 familles (Goodfellow et Fiedler, 2010). L'Ordre des *Actinomycetales* comprend 14 sous ordres et regroupe à lui seul plus 45 familles et près de 290 genres (Euzéby, 2011).

Tableau 3 : Sous Classe, Ordres et Sous Ordre des Actinomycetales (Goodfellow et Fiedler, 2010).

Classe des <i>Actinobacteria</i>		Sous ordre
5. Sous Classe	9. Ordre	Actinomycineae
Acidimicrobidae	Acidimicrobiales	Micrococcineae
Actinobacteridae	<u>Actinomycetales</u>	Kineosporineae
	Bifidobacteriales	<i>Corynebacterineae</i>
Coriobacteridae	Coriobacteriales	Pseudonocardieae
Rubrobacteridae	Rubrobacterales	<i>Actinopolysporineae</i>
	Solirubrobacterales	Glycomycineae
	Thermoleophilales	Propionobacterineae
Nitriliruptoridae	Nitriliruptorales	<i>Catenulisporineae</i>
	Euzebyales	Streptomycineae
		Frankineae
		Streptosporangineae
		Micromonosporineae
		Jiangellineae

1. Classe des *Actinobacteria*

1.1. Sous Classe : *Actinobacteridae*

1.1.1. Ordre *Actinomycetales*

1- Sous ordre *Actinomycéneae*

Dans le sous ordre des *Actinomycéneae*, il y a **une seule famille** :

- **Famille : *Actinomycétaceae***

De cinq genres : *Actinomyces*, *Actinobaculum*, *Arcanobacterium*, *Mobiluncus* et *Varibaculum*.

Genre : *Actinomyces*

Les membres du genre *Actinomyces* sont des **batonnets non sporulants** de forme **irrégulière**, qui peuvent provoquer des maladies chez les bétails et chez l'homme.

2- Sous ordre *Micrococcineae*

Cet sous ordre comprend **14 familles** et une grande variété de genres. Deux des genres les mieux connus sont *Micrococcus* et *Arthrobacter* sont appartenant de la même **Famille *Micrococcaceae***.

- **Famille : *Micrococcaceae***

Genre : *Micrococcus*

Micrococcus est généralement considéré comme un organisme saprophyte ou commensal. Il peut cependant être un pathogène opportuniste, notamment chez les patients immunodéprimés.

Genres : *Arthrobacter*

Les *Arthrobacter* interviennent dans la biodégradation des hydrocarbures, les tannins, la cellulose. Ils peuvent même dégrader certains herbicides et pesticides.

- **Famille : *Dermatophilaceae***

Genre : *Dermatophylus*

Un troisième genre dans ce sous ordre : *Dermatophylus* peut former des amas de spores mobiles grâce à des touffes de flagelles. Provoque des infections cutanées.

3- Sous ordre *Corynebacterineae*

Cet sous ordre contient sept familles et plusieurs genres bien connus. *Corynebacterium*, *Mycobacterium*, et *Nocardia* sont trois des genres les plus importants (**Pathogène**).

Genre : *Corynebacterium*

Corynebacterium diphtheriae est une bactérie pathogène responsable de la diphtérie, également appelée le bacille de Klebs-Loeffler, car elle a été découverte en 1884 par les bactériologistes

allemands Edwin Klebs (1834-1913) et Friedrich Loeffler (1852-1915). Elle est un organisme **anaérobie facultative** gram positif, caractérisé par des **bâtonnets** (bacilles) **non encapsulés, non sporulés, immobiles**, droits ou incurvés d'une longueur de 1 à 8 μm et d'une largeur de 0,3 à 0,8 μm . Les bâtonnets forment des amas ramifiés en culture.

C'est un microorganisme **strictement parasite** des humains. Il produit une **exotoxine** de nature protéique, responsable des signes de la diphtérie. L'inactivation de cette toxine par un antisérum (anatoxine) est à la base de la vaccination antidiphtérique.

Genre : *Mycobacterium*

Mycobacterium, la **Mycobactérie**, est un genre de bactéries de la famille des *Mycobacteriaceae*. Ce sont des **bacilles aérobies** assez **longs et fins, asporulés et acapsulés**.

Leur paroi présente une structure particulière, riche en cires (acides mycoliques) qui leur permet de retenir les colorants malgré l'action combinée d'acide dilué et d'alcool. Cette paroi leur confère une grande résistance aux antiseptiques, à certains antibiotiques, aux macrophages.

Ils sont dits « bacilles acido-alcool-résistants » ou BAAR. Cette particularité de la paroi est utilisée pour les mettre en évidence lors d'examen microscopique par la coloration de Ziehl-Neelsen.

On distingue les mycobactéries tuberculeuses comprenant les espèces déterminant la tuberculose

- *Mycobacterium tuberculosis* comprenant les espèces déterminant la tuberculose humaine,
- bovine (*Mycobacterium bovis*)
- celle observée le plus souvent en Afrique noire (*Mycobacterium africanum*).

Genre : *Nocardia*

Quelques espèces du genre *Nocardia* peuvent provoquer des infections, notamment :

Nocardia asteroides qui provoque assez rarement des infections pulmonaires pseudo-tuberculeuses surtout chez des individus atteints des maladies pulmonaires chroniques.

Nocardia brasiliensis, *Nocardia madurae* qui provoque abcès sous-cutanés, granulomateux, chroniques

4- Sous ordre *Micromonosporineae*

Les *micromonosporineae* ne contiennent qu'une seule famille, les *micromonosporaceae*.

Parmi les genres, on compte *Micromonospora*, *Dactylosporangium*, *Pilimelia*, *Actinoplanes*.

Genre : *Micromonospora*

Micromonospora est un genre de bactéries dont certaines espèces produisent naturellement de la gentamicine.

Genre : *Actinoplanes*

Ils ont des mycéliums aériens et des spores sphériques et mobiles. Les espèces d'*Actinoplanes* produisent les composés pharmaceutiquement importants valienamine (un précurseur du médicament antidiabétique acarbose et de l'antibiotique validamycine), la teicoplanine et la ramoplanine.

5- Sous ordre *Propionibacterineae*

Ce sous ordre comprend deux familles et 14 genres.

Famille 1 : *Propionibacteriaceae*

Genre : *Propionibacterium*

Le genre *Propionibacterium* contient des bâtonnets pléomorphes, non mobiles, non sporulants, souvent en forme de massue avec une extrémité effilée et l'autre arrondie.

Les bactéries propioniques sont divisées en deux catégories suivant leur habitat :

- Les laitières, isolées dans les produits laitiers

Propionibacterium freudenreichii et *P. acidipropionici* ; elles interviennent dans l'affinage des fromages. Elles ont aussi été isolées dans le lait, des produits alimentaires fermentés (saumure d'olives), dans l'ensilage, dans les sols.

- Les cutanées, commensales, de la flore de la peau et des muqueuses (ex : dans l'intestin).

Propionibacterium acnes est une bactérie bacilliforme, anaérobie et saprophyte de type Gram positif, liée à l'éclosion de l'acné.

Famille 2 : *Nocardioidaceae*

Genre : *Nocardioides*

Nocardioides est un genre bactérien à Gram positif, mésophile et aérobie. La majorité des espèces de ce genre sont isolées du sol.

6- Sous ordre *Streptomycineae*

Le sous ordre des *Streptomycineae* ne comprend qu'une famille les *Streptomycetaceae*, et trois genres dont le plus important est *Streptomyces*.

Genre : *Streptomyces*

Le genre *Streptomyces* désigne des bactéries filamenteuses Gram-positif non pathogènes. Ces bactéries sont principalement retrouvées dans les couches superficielles des sols où leur développement et leur dispersion sont facilités par leur croissance mycélienne et leur capacité de sporulation. Les *Streptomyces* sont des bactéries saprophytes, assurant leur croissance à partir de la dégradation des matières organiques du sol grâce à de nombreuses enzymes hydrolytiques extracellulaires, participant ainsi activement à la formation de l'humus.

Les *Streptomyces* sont des bactéries d'intérêt majeur, tant sur le plan industriel que sur celui de la recherche fondamentale puisqu'elles sont à l'origine de la production de très nombreuses molécules bioactives.

Près des deux tiers des antibiotiques commercialisés sont produits par des *Streptomyces*, des anticancéreux, des immunosuppresseurs, des antifongiques, des herbicides, des insecticides, des antihelminthiques et des molécules anti-diabète ou anti-obésité.

7- Sous ordre *Streptosporangineae*

Cet sous ordre contient trois familles et 16 genres. Certains genres forment des sporanges. Comme *Streptosporangium somaliensis* et *Actinomadura*.

Genre : *Streptosporangium*

Le genre *Streptosporangium* est caractérisé par un **mycélium aérien** produisant des sporanges globuleux (5 à 20 µm de diamètre) sessiles ou porter par des courts sporangiophores (10µm ou moins) et contenant chacun une chaîne spiralee de spore non mobiles rondes ou ovoïdes (1 à 2 µm) ou plus rarement en bâtonnets droits (1 à 2 µm). La paroi de sporange est fine, de sorte que les spores sont visibles au microscope optique, avant même leur libération. Le pourcentage en bases G + C varie entre 69 et 71%.

8- Sous ordre *Frankineae*

Les genres *Frankia* et *Geodermatophilus* sont placés dans le sous ordre des *Frankineae*.

Genre : *Frankia*

Frankia est un genre de bactéries actinomycètes filamenteuses et telluriques, croit en symbiose avec des plantes non légumineuses et fixe l'azote atmosphérique.

9- Sous ordre *Pseudonocardieae*

Cet sous ordre contient 2 familles *Pseudonocardiaceae*, *Actinosynnemataceae*

Genres : *Pseudonocardia*

Pseudonocardia est le genre type de ce groupe. Des membres de ce genre ont été trouvés vivant de manière mutualiste sur la cuticule des fourmis coupeuses de feuilles parce que la bactérie a des propriétés antibiotiques qui protègent contre les champignons.

10- Sous ordre *Actinopolysporineae*

Cet sous ordre ne comprend qu'une seule famille *Actinopolysporaceae*

Genre : *Actinopolyspora*

Actinopolyspora est le seul genre de ce groupe.

11- Sous ordre *Glycomycineae*

Cet sous ordre ne comprend qu'une seule famille *Glycomycetaceae*

Contenant trois genres *Glycomyces*, *Halogycomyces*, *Stackebrandtia*

12- Sous ordre *Catenulisporineae*

Cet sous ordre ne comprend qu'une seule famille *Catenulisporaceae*

Catenulispora est le seul genre de ce groupe

13- Sous ordre *Kineosporineae*

Cet sous ordre ne comprend qu'une seule famille *Kineosporiaceae*

Contenant les genres suivants : *Kineococcus*, *Pseudokineococcus*, *Quadrisphaera*.

14- Sous ordre *Jiangellineae*

Cet sous ordre ne comprend qu'une seule famille *Jiangellaceae*

Les genres *Jiangella*, *Haloactinopolyspora*

1.1.2. Ordre *Bifidobacteriales*

L'ordre *Bifidobacteriales* ne compte qu'une famille, les *Bifidobacteriaceae*, et 10 genres.

Genre : *Bifidobacterium*

Bifidobacterium est probablement le genre le mieux étudié de cet ordre. Ce genre est un des premiers colonisateurs du tractus intestinal des nourrissons.

Ces bactéries sont constituées de bacilles de forme irrégulière, anaérobies stricts, immobiles.

Les bifidobactéries appartiennent à la famille des bactéries lactiques. Elles participent à la fermentation du lait dans le cadre de la fabrication de fromages et de préparations aux yaourts

Chapitre 5 : Les champignons

Champignons = Fungi = mycètes (mukes = champignon).

Les champignons représentent l'un des plus importants groupes d'organismes sur terre et jouent un rôle clé dans un grand nombre d'écosystèmes. Ce sont des organismes eucaryotes unicellulaire (comme pour certaines levures) ou pluricellulaire (mycélium) comme la plupart des micromycètes (Moisissure) ou des macromycètes (Mathiew, 1995).

L'identification des champignons est fondée principalement sur des critères morphologiques liés aux modes de reproduction. Classiquement on distingue chez les champignons, en dehors du bouturage, deux types de reproduction, l'une étant appelée asexuée car la cellule fongique se divise par simple mitose, l'autre appelée sexuée car elle intègre un processus de fusion cytoplasmique, de caryogamie et de méiose. Chez une même espèce, on peut donc observer une multiplication de type sexué issue d'un stade morphologique particulier appelé téléomorphe et une multiplication asexuée issue d'un autre développement appelé stade anamorphe.

Les champignons sont capables de produire d'énormes quantités de spores leur assurant ainsi un pouvoir de dispersion très important, mais peuvent également jouer un rôle dans la survie de l'organisme lorsque les conditions environnementales deviennent défavorables (Davet, 1996).

Les champignons se distinguent des plantes et des algues par l'absence de chloroplastes et des animaux par la présence de parois cellulaires.

5.1. Moisissure

Le terme de "moisissure" désigne tous les champignons microscopiques qui intéressent l'économie et l'environnement humains, de façon bénéfique ou néfaste. Elles sont hétérotrophes car elles ne peuvent pas, comme les plantes vertes, synthétiser la matière organique à partir du gaz carbonique atmosphérique. Elles doivent donc puiser dans le milieu ambiant l'eau, les substances nutritives et les éléments minéraux nécessaires à la synthèse de leur propre matière. Elles les absorbent à travers la paroi de leur appareil végétatif. On dit qu'elles sont absorbotrophes.

5.2. Mode de vie et de nutrition des mycètes

Ces organismes sont dépourvus de chlorophylle et sont tous hétérotrophes (Redecker, 2002). Ils ne peuvent pas faire de photosynthèse, et vivent en général de manière aérobie. Ils stockent le sucre sous forme de glycogène, à la manière des organismes animaux. Ces organismes sont très importants et vivent en relation avec d'autres organismes, selon plusieurs manières :

- **Saprophytes** : ils prélèvent leurs nutriments à partir de matières organiques en décomposition. Ils sont très importants en tant que décomposeurs et recycleurs de matières mortes.
- **Parasites** : leurs nutriments proviennent de la matière vivante.
 - * **mycoses** (chez les animaux),
 - * **maladies fongiques** (chez les végétaux : phytopathogène) : fabrication de mycotoxines.
- **Symbiotes** : ces mycètes obtiennent leurs nutriments grâce à un autre organisme, leur procurant en retour certains bénéfices. Ce type d'association est essentiel pour les végétaux, 90% des plantes seraient en symbiose avec ces champignons. Ces champignons sont appelés **mycorhizes**. D'autres mycètes vivent en relation avec une algue. Ils ne peuvent survivre l'un sans l'autre. Ce sont les **lichens**.

Chez les mycorhizes le champignon fournit les minéraux qu'il tire du sol alors que la plante apporte les éléments organiques qu'elle synthétise. Plus de 95% de tous les végétaux vasculaires possèdent des mycorhizes.

Les cellules des champignons libèrent des enzymes. Celles-ci décomposent les substances complexes comme les protéines, les graisses et les sucres, en substances plus simples qui pénètrent dans les cellules des champignons en compagnie de l'eau, et des sels minéraux.

5.3. Habitat

Les mycètes sont principalement terrestres, parfois aquatiques. Les lichens, associés aux algues, peuvent vivre dans l'un et l'autre. Les mycètes sont souvent résistants. Ils supportent de fortes variations de pression osmotique, de pH et de température (Tortora *et al.*, 2003).

5.4. L'importance

Les mycètes sont importants par leurs effets bénéfiques que nuisibles. Ce sont des agents de décomposition majeurs, qui dégradent les matières organiques complexes en substances simples.

Les mycètes sont la cause principale des maladies des végétaux (oidium, rouille, ergot...)

Les champignons interviennent dans la pathologie humaine de deux façons :

- Des intoxications alimentaires liées à certains champignons toxiques, essentiellement les Amanites, mais également les *Aspergillus* qui sont capables de produire des aflatoxines cancérigènes.
- Des infections appelées mycoses. La plupart sont opportunistes. Les mycoses peuvent être superficielles et locales (ex : teignes), ou au contraire systémiques (ex : cryptococcoses)

Les mycètes ont également de très nombreuses applications positives :

En fromagerie : *Penicillium camembertii*, *Penicillium roquefortii*

Dans les préparations culinaires : Les champignons peuvent faire partie des repas

Dans la fabrication des additifs : additifs alimentaires, acides organiques (Ex : l'acide citrique de Coca Cola est obtenu à partir d'*Aspergillus*).

Dans la fabrication du pain (pâtes), du vin, de la bière, ... : *Saccharomyces*.

Fabrication d'éthanol : l'alcool de la bière provient de *Saccharomyces cerevisiae*

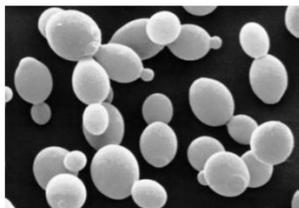
Dans la lutte biologique : *Arthrobotrys superba* des nématodes.

Dans la fabrication des médicaments : Le premier antibiotique, la pénicilline, *Penicillium notatum*.
Céphalosporum pour les céphalosporines.

5.5. La structure (Le Thalle des champignons)

L'organisation cellulaire des champignons est appelée le **thalle**. Chez les champignons microscopiques, le thalle peut être **unicellulaire (levures)** ou **filamenteux (moisissures)**.

1. Thalle unicellulaire (levures)

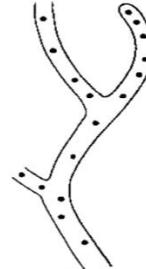


2. Thalle plasmodiale (myxomycètes)



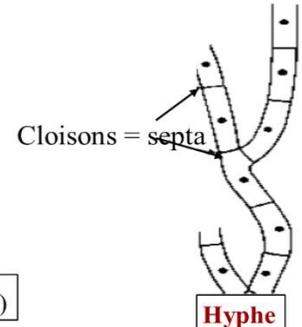
3. Thalle pluricellulaire filamenteux

Filaments non cloisonnés



Siphon (ou Coenocyte)

Filaments cloisonnés



Hyphe

Plasmode : masse cytoplasmique molle, déformable sans paroi squelettique et multinuclée.

Mycélium : Un enchevêtrement de nombreux filaments très fins et ramifiés.

Forme filamenteuse

La grande majorité des champignons se présentent sous **une forme filamenteuse**, caractérisée par une structure tubulaire, ramifiée, et plurinuclée. Le diamètre des hyphes varie considérablement en fonction des conditions de l'environnement, de leur position dans la colonie, et surtout d'une espèce à l'autre, de 3-4 μm à plus de 10 μm .

Selon les groupes de champignons (et plus précisément, selon le degré de synchronisme entre les mitoses et la formation des cloisons), le nombre de noyaux par segments varie de un à plus d'une centaine, et est généralement plus élevé dans les segments apicaux où le champignon est en phase de croissance active. Ainsi, les Basidiomycètes possèdent typiquement un mycélium dicaryotique, avec deux noyaux par segments. Les levures possèdent un noyau par cellule.

1- Non cloisonnée (mycélium siphonné ou coenocytique)

Noyaux qui cohabitent dans le cytoplasme commun : chez les champignons inférieurs = zygomycètes.

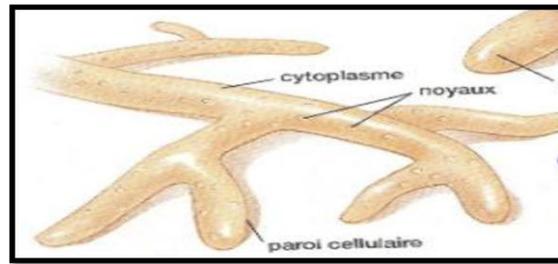


Figure 6 : Hyphe coenocytique (Chabasse *et al.*, 2002).

2- Cloisonnée (mycélium septé) par des cloisons (septa)

Le filament est articulé : chez les champignons supérieurs = asco et basidiomycètes.

En règle générale, les septomycètes ont d'hyphes fins (5 à 7 μm de large) tandis que chez les siphomycètes, les hyphes sont beaucoup plus larges (10 à 15 μm).

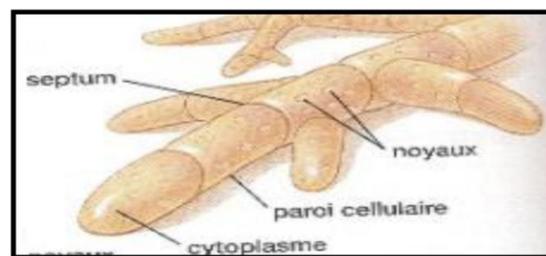


Figure 7 : hyphe cloisonne (Chabasse *et al.*, 2002).

Forme unicellulaire

Le thalle fongique peut aussi être **unicellulaire** comme chez plusieurs *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Zygomycota* et Deutéromycètes vivant comme des levures ou des organismes de type levures et aussi chez certains *Chytridiomycota*. Ces thalles sont formés de cellules qui sont d'habitude uninucléées. Certains de ces champignons unicellulaires sont dimorphiques capables de se développer soit comme mycélium soit comme levure (ou organisme de type levure) en fonction des conditions de croissance.

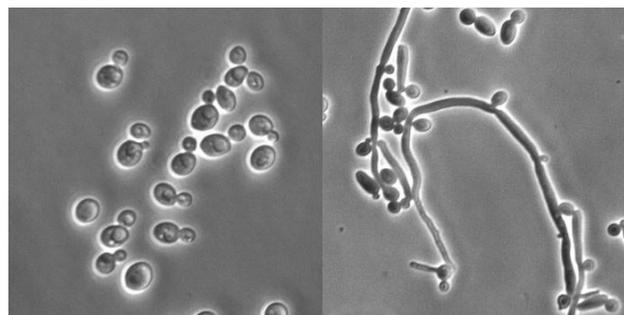


Figure 8 : Dimorphismes chez *Candida albicans*

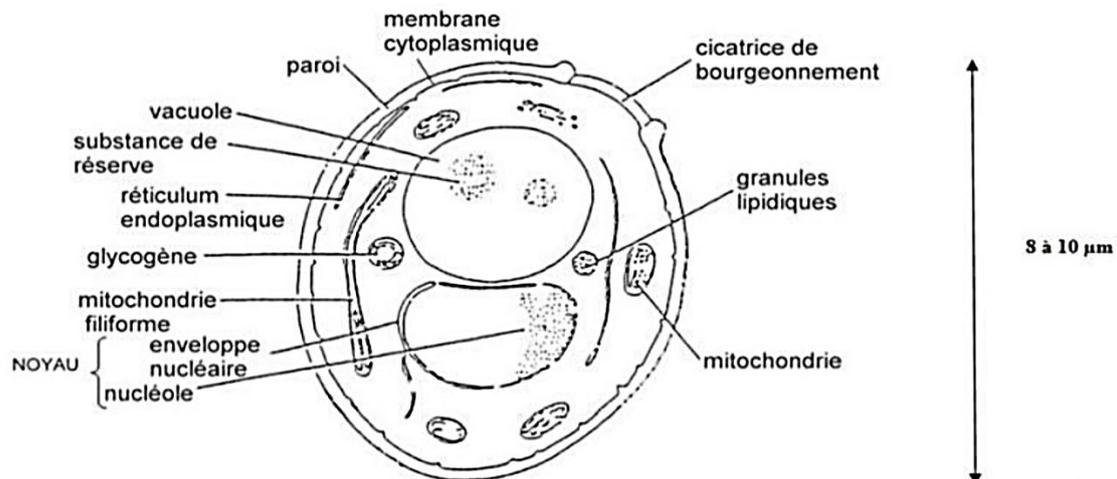


Figure 9 : Ultrastructure de la levure.

➤ Structure de l'hyphe

Les mycètes possèdent un petit noyau. Ils possèdent entre 3 et 40 chromosomes différents. Pendant la mitose, l'enveloppe nucléaire reste intacte, contrairement aux plantes et aux animaux.

Les mitochondries ont des structures qui varient selon les différents règnes de mycètes. Les eumycètes ont des mitochondries à crêtes lamellaires, tandis que les mitochondries d'oomycètes ont des crêtes tubulaires. L'appareil de Golgi des mycètes est très peu développé, et n'est souvent formé que d'un saccule. Dans les cellules plus âgées des vacuoles apparaissent et peuvent envahir la totalité de l'article.

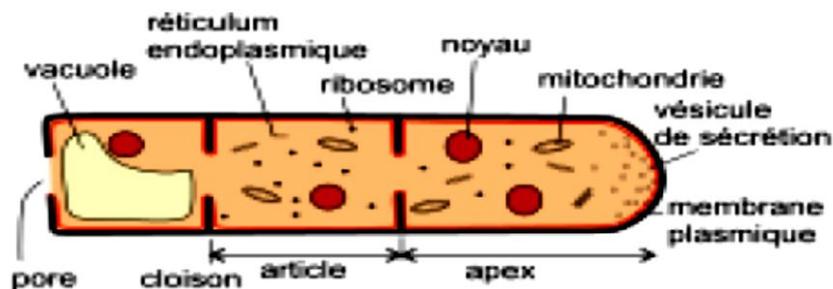


Figure 10 : Structure de l'hyphe,

➤ Composition de la paroi

Les champignons filamenteux possèdent une paroi constituée essentiellement de polysaccharides, de glycoprotéines et de mannoprotéines formant une matrice autour de la paroi (Nwe et Stevens, 2008). Les polysaccharides sont majoritairement la chitine, polymère de molécules de N-acétylglucosamine liées entre elles par une liaison de type β -1,4. Elle joue un rôle dans la rigidité de la paroi cellulaire. Chez certains chytridiomycètes, elle est remplacée par la cellulose et les glucanes, polymères de molécules de D-glucose liées entre elles par des liaisons β .

Ces deux polysaccharides assurent la protection des moisissures vis-à-vis des agressions du milieu extérieur. On peut également parfois trouver dans la paroi de la mélanine en grandes quantités. Elle confère certaines résistances face à la lyse enzymatique, aux contraintes mécaniques, aux ultraviolets et à la dessiccation.

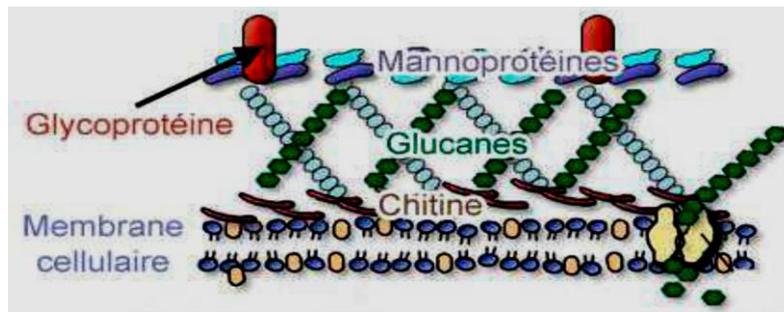


Figure 11 : Schématisation de la structure de la paroi fongique (Nwe et Stevens, 2008).

Mécanisme de croissance de l'hyphe

- Croissance généralement apicale avec un cytoplasme plus dense
- L'apex est structurellement et fonctionnellement très différent du reste de l'hyphe.
- L'épaisseur de la paroi de l'apex est moins importante
- Accumulation de «APICAL VESICULAR CLUSTERS (AVC: amas de vésicule apicales) » = vésicules qui jouent un rôle essentiel dans la croissance.

•Les vésicules contiennent :

- Précurseurs de paroi (ex. N-acétylglucosamine, les sous-unités de la chitine).
- Enzymes lytiques (ex. chitinase, glucanase) pour casser et séparer les composants de la paroi.
- Enzymes de synthèse de la paroi (ex. glycane synthétase et chitine synthétase) pour assembler les nouveaux composants de la paroi et ainsi accroître la taille de la paroi.

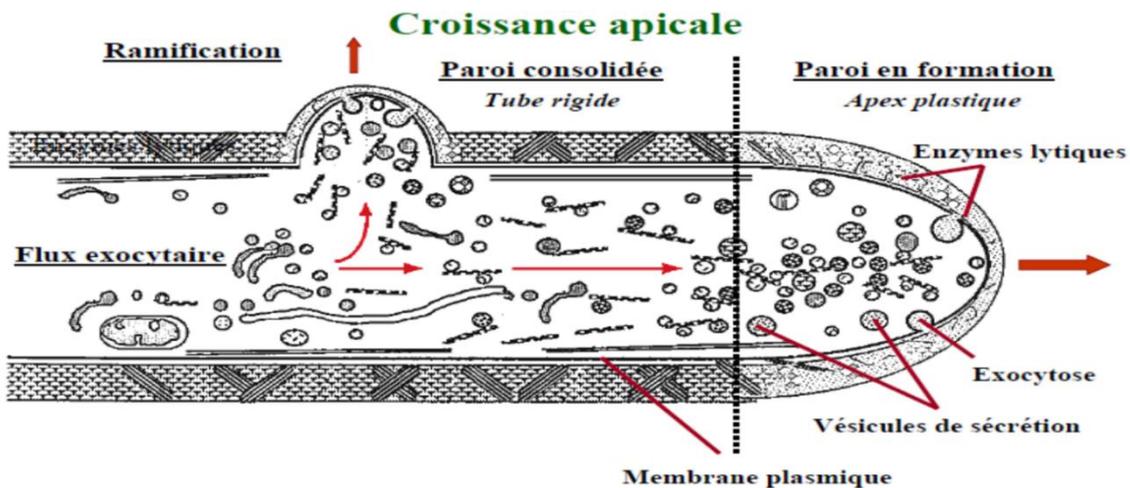


Figure 12 : Croissance et ramification de hyphe fongique

On observe alors un Spitzenkörper, c'est-à-dire un regroupement de vésicules d'exocytose au niveau de l'apex. Ces vésicules permettent à l'apex de croître, en apportant des enzymes de synthèse de la paroi, des enzymes de la lyse pariétale, des activateurs et quelques polymères

5.6. La reproduction chez les champignons

La reproduction des champignons est complexe, reflétant ainsi l'hétérogénéité de leur mode de vie. Elle peut être sexuée ou asexuée, bien que certains champignons alternent entre les deux types de reproduction (Senal *et al.*, 1993).

a) Reproduction asexuée "anamorphe"

La reproduction asexuée chez les champignons peut se faire par bourgeonnement, fission binaire, fragmentation, ou par formation de spores.

❖ Le bourgeonnement et la fission binaire

Le bourgeonnement et la fission binaire sont les formes de reproduction asexuée les plus simples.

Le bourgeonnement est une division inégale du cytoplasme, résultant en une cellule parent et une cellule fille, celle-ci étant plus petite que la cellule parent.

La fission binaire par contre aboutit à deux cellules identiques.

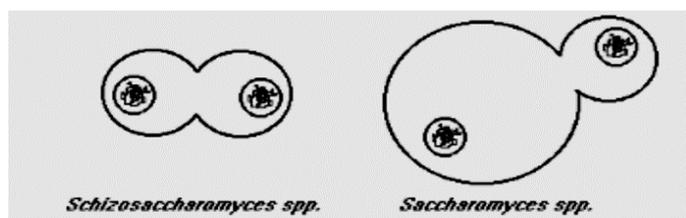


Figure 13 : Illustration de la fission binaire et du bourgeonnement chez les levures.

❖ Le bouturage

Le mécanisme, le plus simple, est celui du bouturage. Dans ce cas, le thalle végétatif se fragmente et les articles libérés, contenant les noyaux, font office de spores. Ils se dispersent et peuvent se fixer sur un substrat favorable. Ce mécanisme reste limité dans la nature, peut-être en raison de la fragilité des articles.

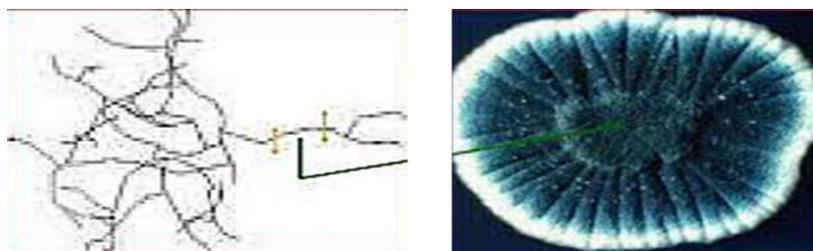


Figure 14 : Illustration du bouturage chez les champignons

❖ La sporulation

La sporulation est la plus importante forme de reproduction asexuée chez les champignons. Elle se fait à travers les spores asexuées, formées au cours de la phase asexuée du cycle de vie des champignons (phase anamorphe).

- ✓ Les spores créées peuvent être **endogènes** ou **exogènes**.

- **Les spores endogènes** (endospores) sont produites à l'intérieur d'un sac fermé (sporange), porté par un filament spécialisé (sporangiophore). Ces spores, que l'on observe par exemple chez les Mucorales, sont libérées par le déchirement de la paroi de sporange à maturité.

- **Les spores exogènes** (conidies), retrouvées chez les Ascomycètes, Basidiomycètes et Deutéromycètes, sont formées par bourgeonnement à partir d'une cellule spécialisée (cellule conidiogène).

✓ Il existe différents modes de sporulation :

Arthrospores : Par rupture d'un hyphe (cas des chytridiomycètes).

Chlamydospores : La paroi s'épaissit et le cytoplasme se condense, c'est une forme de résistante.

Blastospores : Par bourgeonnement (cas des levures).

Sporocystiospores : Ces spores sont endogènes, dans un sporocyste. Elles sont en grand nombre. (cas des zygomycètes).

Conidiospores : Ces spores sont exogènes, à partir d'un phialide. (cas des Basidiomycètes)

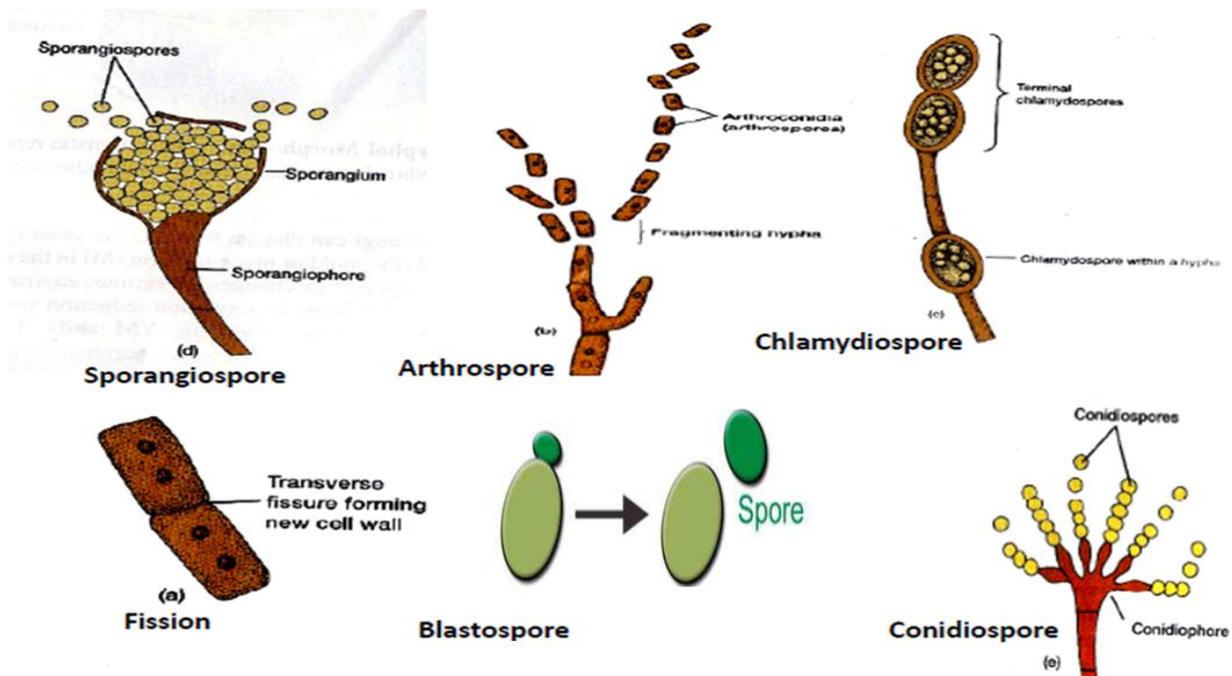


Figure 15 : Différents modes de sporulation chez les champignons (Barnett et Hunter, 1998).

Aspect des spores

D'après la forme et les modalités de septation, on distingue 7 groupes de spores

- 1- **les amérospores** : spores unicellulaires de petite taille (*Penicillium, Aspergillus*)
- 2- **les didymospores** : spores bicellulaires (*Trichothecium*) ;
- 3- **les phragmospores** : spores pluricellulaires à cloisons transversales (*Curvularia*) ;
- 4- **les dictyospores** : spores pluricellulaires à cloisons transversales et longitudinales (*Alternaria*) ;
- 5- **les scolécospores** : spores étroites, effilées, souvent incurvées et cloisonnées transversalement (*Fusarium*).

6- **les hélicospore** : conidie incurvée (plus qu'un demicercle) ou enroulé en 2-3 dimensions (Illosporiosis)

7- **les staurospore** : conidie avec plusieurs branches.

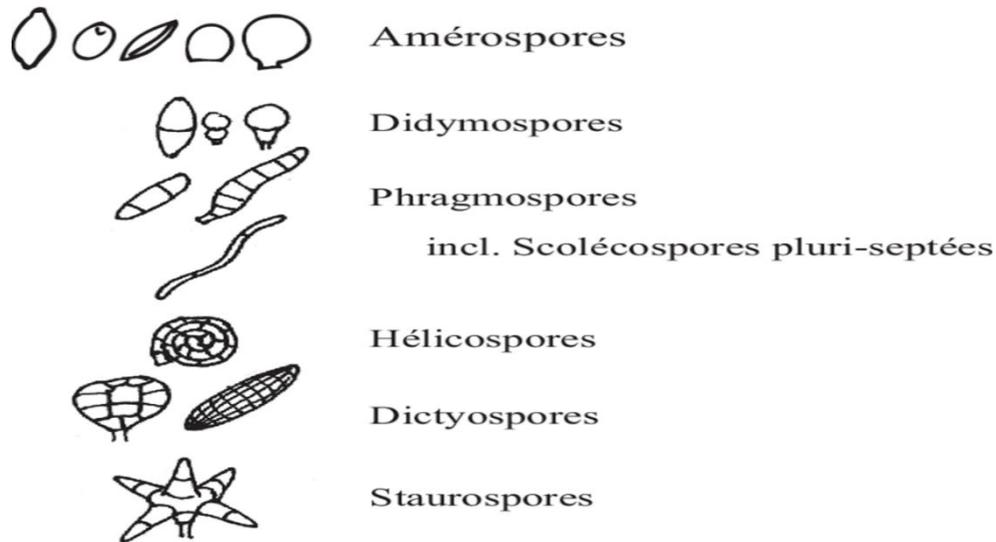


Figure 16 : Les différents aspects des spores fongiques.

b) Reproduction sexuée "téléomorphe"

La reproduction sexuée implique la fusion de deux **cellules haploïdes** à rôle de gamètes, et entraîne la formation d'un **zygote diploïde**. Certaines espèces sont autofertilisantes et produisent des gamètes sexuellement compatibles sur le même mycélium. Chez d'autres espèces, un croisement entre individus différents (notés « + » et « - ») est nécessaire.

Chez les Mycètes, il y a souvent un décalage entre la fusion des cytoplasmes (**plasmogamie**) et la fusion des noyaux (**caryogamie**). Il existe donc un **stade dicaryote**, dans lequel les cellules contiennent **deux noyaux haploïdes séparés**, provenant de chacun des deux parents

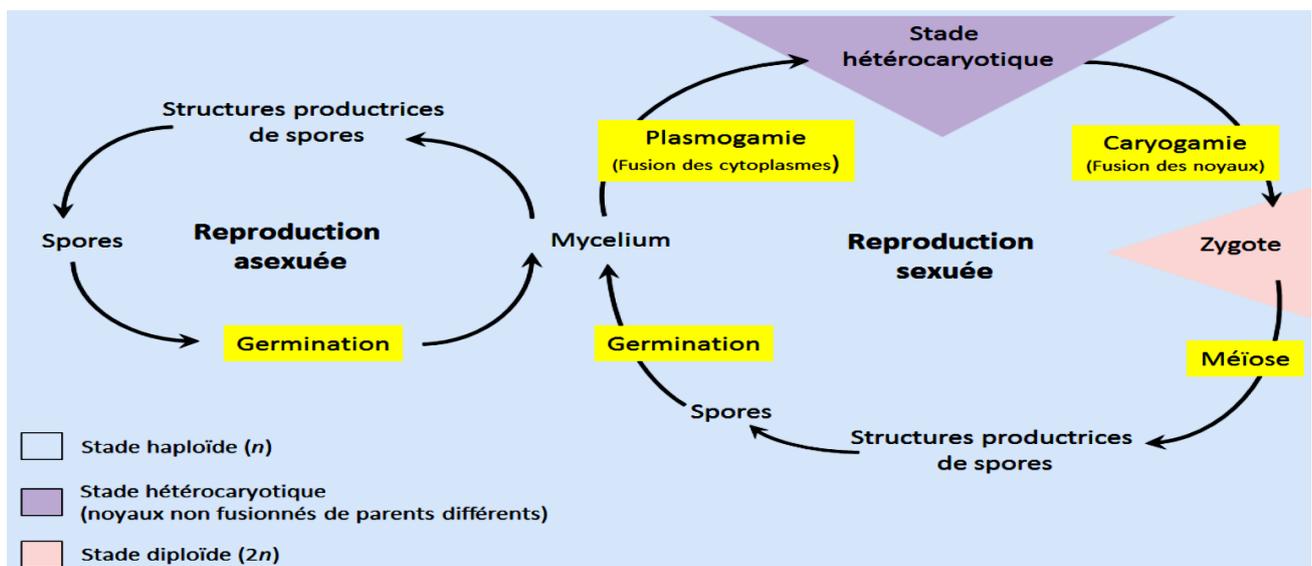
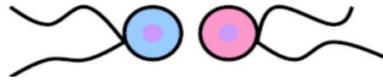


Figure 17 : Reproduction sexuée "téléomorphe" chez les mycètes

La différenciation des gamètes et les différentes gamies

1) La planogamie (cas des chytridiomycètes)

Les **gamétocystes** (mâle et femelle) produisent des gamètes flagellés qui sont émis dans le milieu (souvent aqueux) et qui vont fusionner pour former un **planozygote**.



2) L'oogamie siphonogame (cas des oomycètes)

Les gamétocystes mâles donnent des gamètes flagellés qui vont aller féconder le gamète femelle dans le sporocyste femelle (l'**oogone** dans l'**oocyste**), en perforant l'oocyste avec un siphon copulateur.



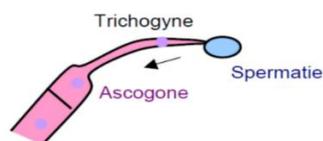
3) la siphonogamie (cas des oomycètes et des ascomycètes)

Le gamétocyste mâle ne donne pas de gamète flagellé. Il doit s'accoler au gamétocyste femelle puis émettre des **siphons copulateurs** qui vont perforer sa paroi.



4) La trichogamie (cas des ascomycètes)

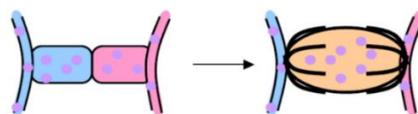
Le gamète mâle est une **spermatie** (non flagellé), émise par un filament. L'organe femelle est un **ascogone** (cellule globuleuse surmontée d'un **trichogyne**). Il va y avoir fusion des parois puis injection du noyau mâle. Pendant le parcours du noyau mâle, ce dernier va se multiplier. Il y aura ensuite appariement sans fusion des noyaux (dicaryon).



5) La cystogamie (cas des zygomycètes)

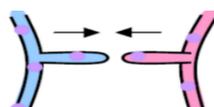
Deux thalles compatibles émettent un diverticule latéral (**progamétocyste**).

Ensuite, apparaît une cloison latérale qui est le gamétocyste et le suspenseur. Il va ensuite y avoir mélange des noyaux puis formation du zygote.



6) La somatogamie (cas des basidiomycètes)

Il va y avoir fusion de deux thalles compatibles et formation de dicaryons.



5.7. Facteurs environnementaux et nutritifs

Les champignons filamenteux ont besoin d'un certain nombre de facteurs nutritifs et environnementaux tels que l'aération, le pH, la disponibilité d'eau, les nutriments et la température pour leur croissance.

La température : La température de croissance des mycètes varie entre 25 et 35°C. En général, 25°C est une température idéale pour le développement des moisissures et 30 à 37°C est l'intervalle adéquat pour la croissance des levures (les levures pathogènes pour l'homme se cultivent préférentiellement à 37°C). Cependant certaines espèces sont psychrophiles, se développant à des températures très basses (<15°C ou même parfois à <0°C) (Tortora *et al.*, 2003).

Le pH : Les mycètes croissent dans des pH variant entre 4,5 et 8,0, mais la majorité des espèces préfère un pH légèrement acide, entre (3 et 7) (Tortora *et al.*, 2003).

L'oxygène : Les mycètes sont aérobies facultatifs et ce même si plusieurs d'entre eux fermentent les glucides. Néanmoins, quelques espèces sont anaérobies et colonisent des habitats particuliers comme le rumen des animaux.

La lumière : Elle n'est pas indispensable pour la croissance végétative des champignons. Cependant, la lumière peut jouer un rôle sur la sporulation : elle favorise la sporogénèse chez certaines espèces.

Aw : La quantité d'eau disponible dans le substrat et l'ambiance environnante sont très importantes pour la croissance des moisissures. Généralement, elles requièrent une activité d'eau (aw) faible par rapport aux bactéries.

Nutriments : Les plus importants sont le Carbone et l'Azote, utilisés sous forme de composés organiques, et des ions minéraux (potassium, phosphore, magnésium, calcium...) en quantités très faibles mais essentielles à la stimulation et l'orientation du développement fongique. Ces éléments nutritifs sont accessibles aux moisissures du fait qu'ils sont disponibles dans la nature.

5.8. Classification des champignons

La classification des champignons est basée principalement sur le type du thalle, le type de reproduction (sexuée et asexuée), l'écologie et la constitution cellulaires (Taylor *et al.*, 2000).

Les levures : Les levures sont des mycètes à thalle unicellulaire. La majorité d'entre elles effectuent une reproduction sexuée par formation d'asques contenant des ascospores. Elles appartiennent alors aux Ascomycètes. Ex : *Saccharomyces*(Figure), *Candida*. Par contre les levures incapables de réaliser la reproduction sexuée, se multiplient toujours par mitose des noyaux (bourgeonnement). Elles appartiennent alors à la classe des champignons imparfaits, dits Deutéromycètes.

Il existe 2 types de spores (a) et (α), elles peuvent fusionner et donner une cellule diploïde transitoire, elle passe par une division méiotique, et on obtient 4 spores.

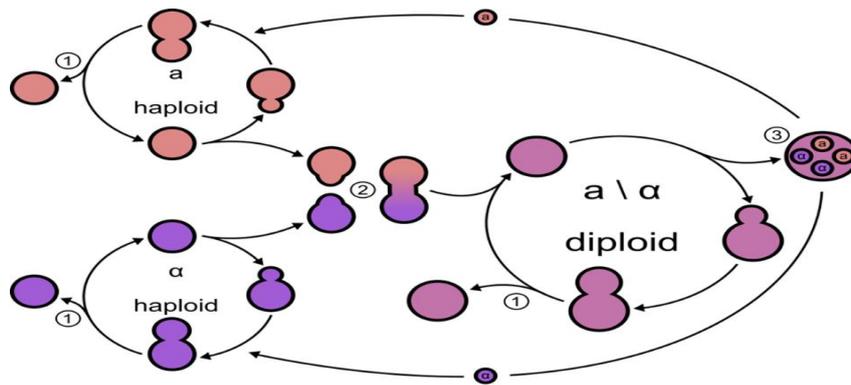


Figure 18 : Cycle de reproduction de *Saccharomyces cerevisiae*.

5.8.1. *Chytridiomycota* ou Chytridiomycètes

Les Chytridiomycètes sont des champignons primitifs, parfois unicellulaires. Ces mycètes sont aquatiques. Ils peuvent vivre en parasites, saprophytes ou symbiotes. Ils ont un thalle primitif (non bien défini) siphonné.

La reproduction sexuée des Chytridiomycètes s’effectue avec des cellules sexuées monoflagellées dites « zoïdes » ou « zoospores sexuées ». La germination de ces cellules donne des thalles avec des « gamétanges » ou « sporanges sexuels » qui produisent à leur tour des zoïdes mâles ou femelles. En fusionnant, ces derniers forment des zygotes diploïdes biflagellés. Le passage à la phase asexuée se fait par des mitoses successives du zygote produisant une multitude de zoospores monoflagellées asexuées. La germination qui s’en suit donne de nouveaux thalles diploïdes munis de sporanges asexués qui forment les zoospores. Le retour vers la phase sexuée s’effectue par une mitose des noyaux des sporanges formant des zoïdes flagellés et le cycle recommence.

Comme exemple des genres appartenant aux Chytridiomycètes, nous avons *Chytridium*, *Monoblepharis* et *Allomyces*.

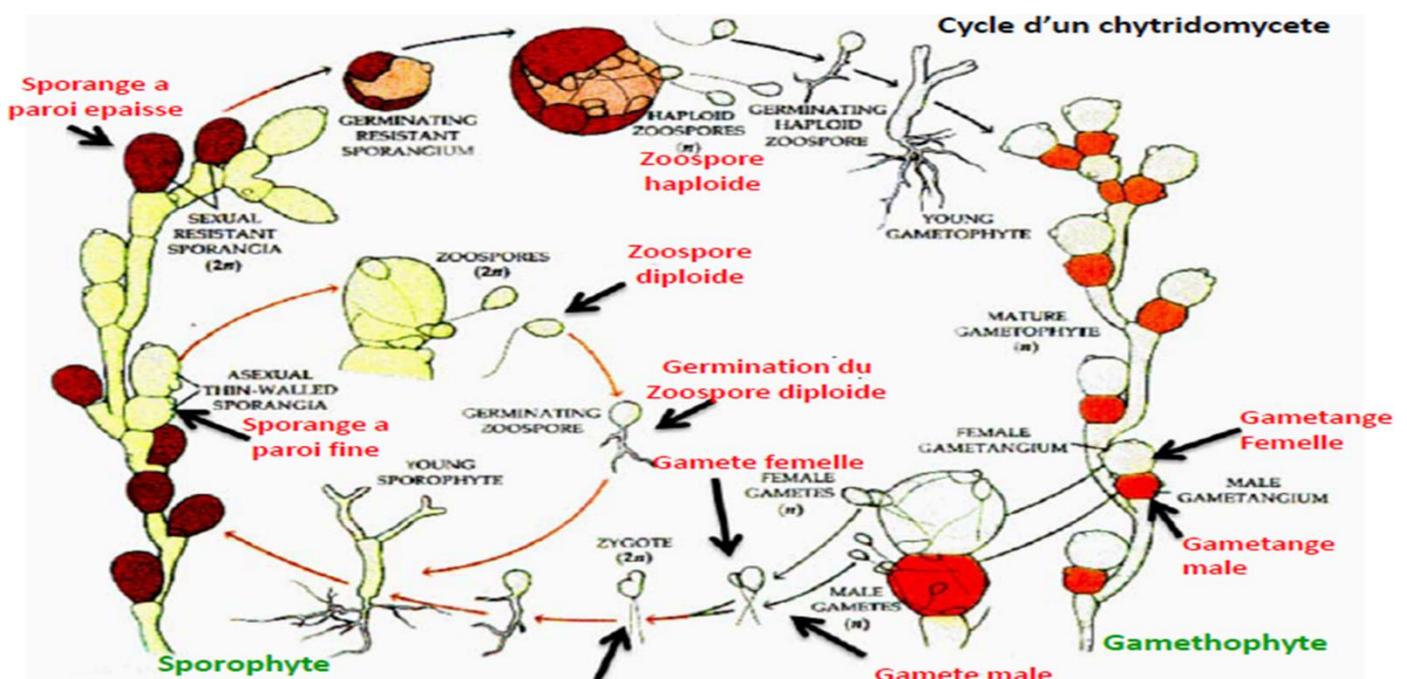


Figure 19 : Cycle de vie d’un Chytridiomycète

5.8.2. Oomycota ou Oomycètes

Ce sont des mycètes parfaits à thalle primitif **siphonné**. Ils vivent en milieu aquatique ou sur les sols très humides. Leur paroi cellulaire se caractérise de celle des autres champignons par l'absence de la chitine. Ils sont constitués de thalles filamenteux rampants qui se fixent aux substrats par des rhizoïdes.

Les Oomycètes effectuent la reproduction asexuée avec des zoospores démunies de paroi cellulaire et mobiles par deux flagelles dissemblables : l'un lisse, l'autre « poilu » ou « Velu » ; elles sont dites « planospores »

La reproduction sexuée est réalisée par la fusion d'un gamétange mâle « spermatocyste » avec un gamétange femelle « oogone » donnant une oospore. La fécondation s'effectue à l'intérieur de cette dernière sans libération des gamètes. Les spores formées alors sont diploïdes et sont libérées sous forme de zoospores biflagellées. Après germination, chaque zoospore donne un thalle siphonné diploïde muni de sporocystes asexués. Si les conditions deviennent défavorables, les noyaux de ces derniers subissent une méiose et forment à nouveau des spermatocystes et des oogones ; et le cycle recommence

Les Oomycètes comprennent les *Saprolegniales* qui vivent dans les eaux douces (Ex : *Saprolegnia*, *Achlya*) et les *Péronosporales*, parasites des plantes qui causent les mildious et les rouilles blanches (Ex : *Peronospora*, *Plasmopara*, *Pythium*).

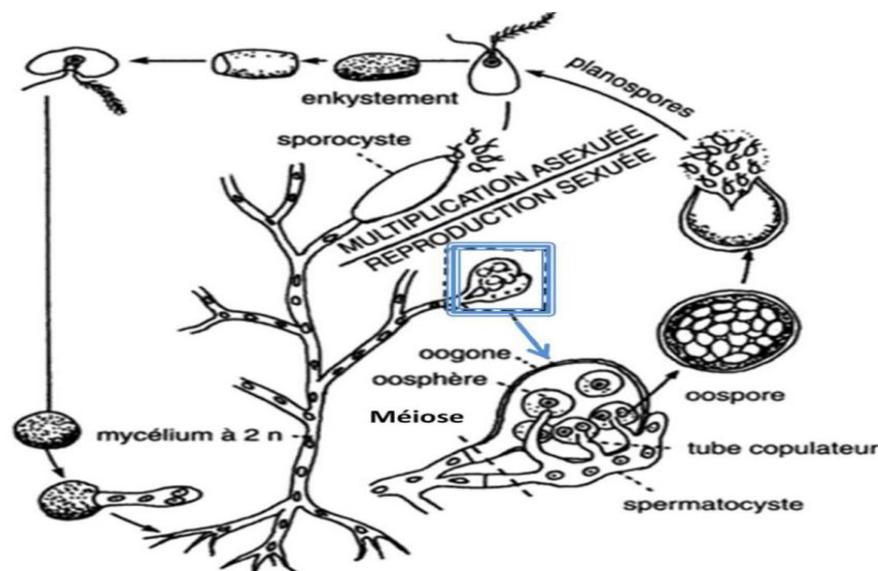


Figure 20 : Cycle de reproduction des Oomycètes.

5.8.3. Ascomycota ou Ascomycètes

Les Ascomycètes sont des champignons parfaits. Contrairement aux deux premières divisions, le thalle ici est bien défini : il est septé. Ces mycètes effectuent la reproduction sexuée en formant des asques contenant des ascospores en nombre pair (2, 4, 8, 16, 32, etc.). La libération des ascospores se

fait par ouverture de la partie supérieure des asques. De ce fait, elles sont qualifiées de spores «internes exogènes»

Les Ascomycètes comprennent des champignons développés, des moisissures et des levures ayant tous en commun la capacité à produire des asques.

Les levures sont des **Ascomycètes particuliers**, qui ne présentent plus de mycélium. Elles sont constituées de cellules isolées se reproduisant par **bourgeonnement**. A l'état naturel, elles se développent sur la peau des fruits.

Les asques sont réunis dans une structure appelée « ascocarpe ». Selon la forme, nous en avons trois types :

Le cleistothèce : c'est un ascocarpe de forme globuleuse et close. Ex : *Eurotium*.

Le périthèce : il est sous forme de bouteille ayant un pore ou ostiole qui permet la sortie des ascospores. Ex : *Chaetomium*.

L'apothécie : il a la forme d'une coupe portant les asques à sa partie supérieure. Ex : *Morchella* et *Tuber*

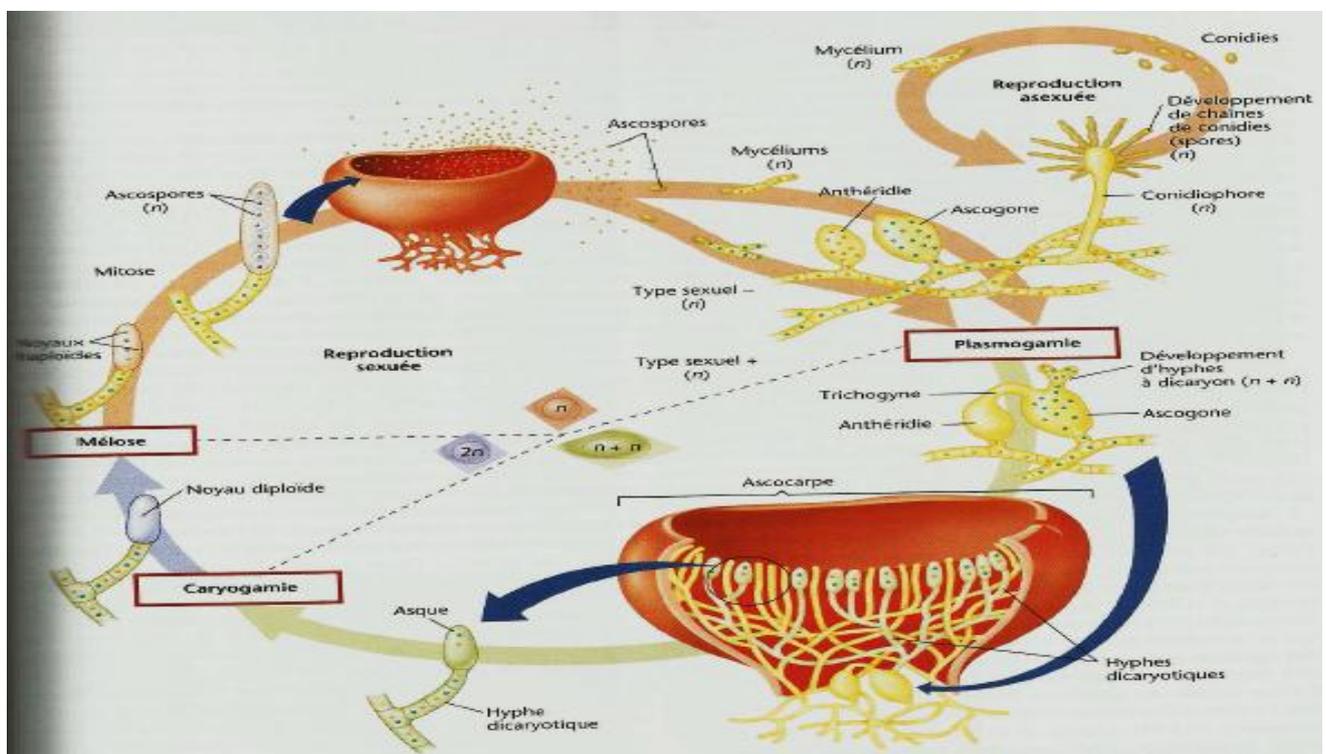
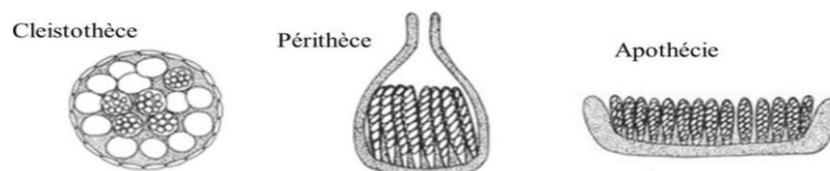


Figure 21 : Cycle de vie d'un Ascomycète

5.8.4. *Basidiomycota* ou Basidiomycètes

Les Basidiomycètes sont des champignons parfaits et supérieurs. Ils ont un thalle septé développé et effectuent la reproduction sexuée en formant des basides qui donnent des basidiospores portées par des stérigmates (petits pédoncules). Après la méiose effectuée dans la baside, les stérigmates permettent le passage des noyaux haploïdes vers les basidiospores formées directement à l'extérieur. Une fois mûres, ces dernières sont libérées par rupture des stérigmates. Par opposition aux ascospores, les basidiospores sont dites spores «externes».

Les basides sont rassemblées dans une structure dite « basidiocarpe » et communément appelée «chapeau». La surface interne du basidiocarpe est dite « hyménium », elle est formée de fines lamelles portant les basides. Le basidiocarpe est porté par le « carpophore » ou « basidiocarpophore », communément appelé « pied ». Ce dernier se termine par une partie végétative souterraine formée de rhizoïdes et de filaments septés.

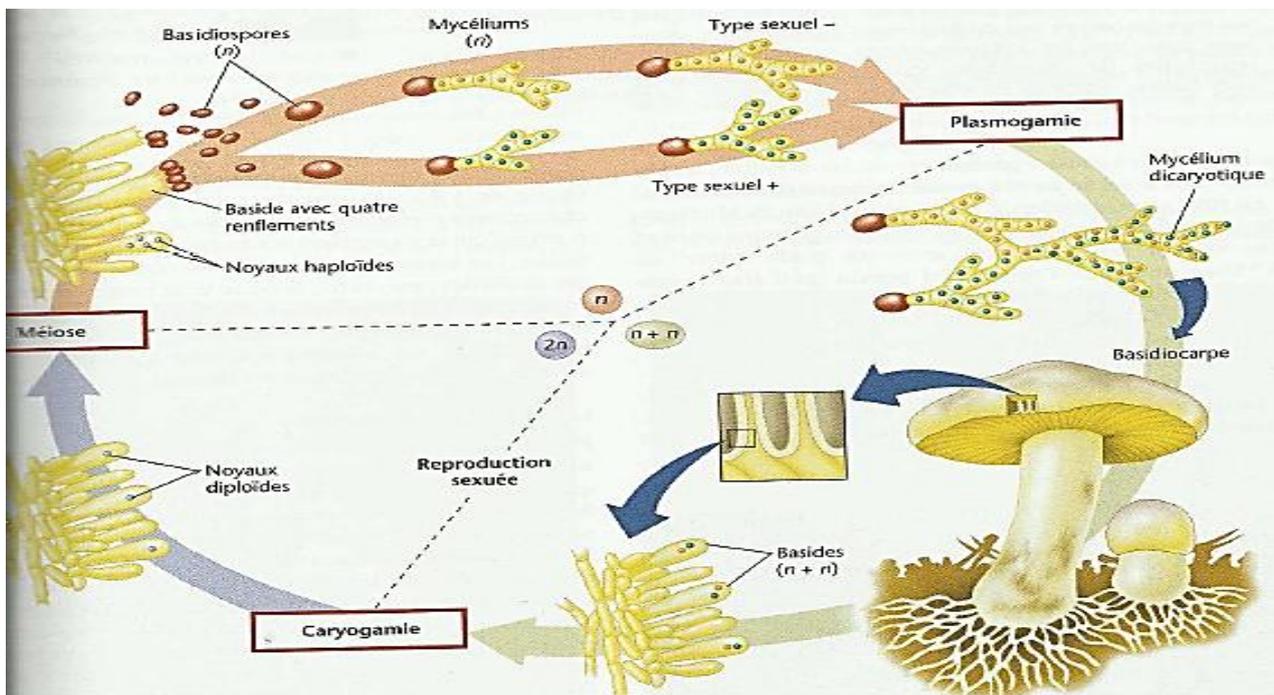


Figure 22 : Cycle de vie d'un Basidiomycète

5.8.5. *Zygomycota* ou Zygomycètes

Comme tous les vrais champignons, produit des parois cellulaires contenant de la chitine. Sont des champignons microscopiques à mycélium siphonné, de diamètre irrégulier, pourvu de nombreux noyaux non séparés par des cloisons. Essentiellement saprophytes, ils se présentent sous forme de moisissures (Bouchet *et al.*, 1999). La reproduction sexuée aboutit à la formation de zygospores d'où le nom « Zygomycètes » donné à cette division (Chabasse, 2008).

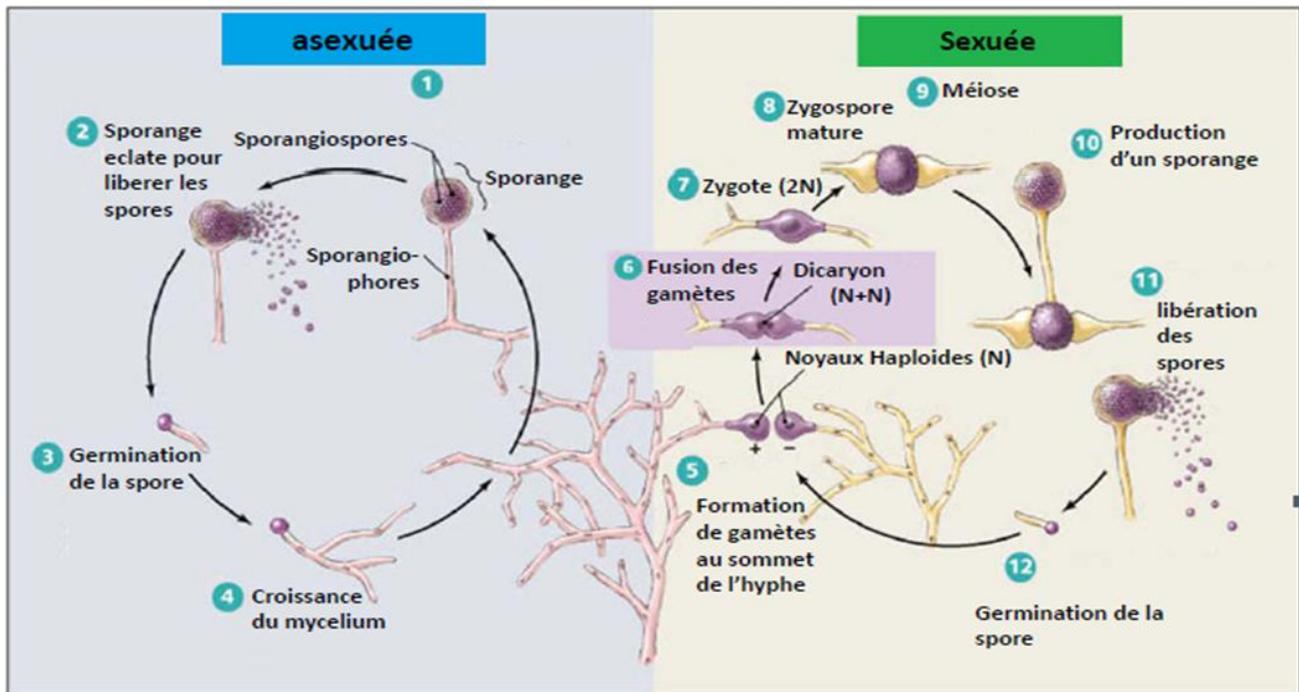


Figure 23 : Cycle de vie d'un Zygomycète

Les Zygomycètes forment un mycélium souvent envahissant, fixé au substrat avec des rhizoïdes et surmonté d'un grand nombre d'organes reproducteurs. Le thalle de ces mycètes se compose donc de quatre parties :

- **Les sporocystes ou gamétocystes** : Ils représentent les organes reproducteurs. Ils sont souvent munis d'une « columelle » ou « vésicule centrale ».
- **Les sporophores** : Ce sont des filaments souvent dressés qui portent les sporocystes. Ils peuvent être enflés à leur extrémité formant des « apophyses », comme ils peuvent avoir une septe sous les organes reproducteurs. Ils sont soit ramifiés ou non ramifiés.
- **Le « stolon » ou le « manchon »** : C'est un mycélium large, long, siphonné, non ou peu ramifié qui porte les sporophores.
- **Les rhizoïdes** : Ils permettent la fixation du thalle sur le substrat et l'absorption des nutriments.

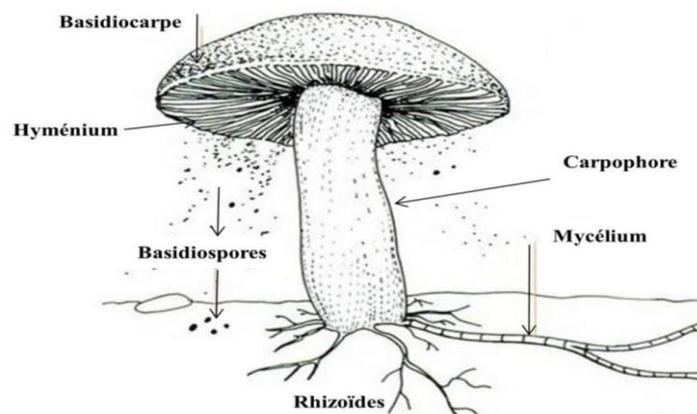


Figure 24 : Morphologie d'un Basidiomycète.

La division des *Zygomycota* comprend une classe importante, celle des *Zycomycotina* et une seconde classe : les *Trichomycotina*.

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

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

* **Les Entomophthorales** : Ils produisent des spores « exogènes ». En effet, 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. Ex : *Entomophthora*, *Entomophaga*, *Pandora*.

5.8.6. Deuteromycota

Appelé aussi ***Fungi imperfecti* (champignon imparfait)**. Ce groupe comprend tous les champignons qui ne produisent ni ascospores, ni basidiospores et qui se multiplient au moyen de conidies. Ils sont unicellulaires (levures) ou à thalle filamenteux septé (Botton *et al.*, 1990).

En effet, les Deutéromycètes **n'ont pas de forme sexuée** connue et cette absence oblige à les classer à part en ne tenant compte que de leur stade **anamorphe**. Cet ensemble regroupe le plus grand nombre d'**espèces médicales**.

Classiquement on distingue **trois classes** :

- **Blastomycètes** : Ou micromycètes, cette classe regroupe les levures asexuées formant ou pas des pseudo- mycéliums, ils se multiplient par simple bourgeonnement. tel que les **levures de bière**
- **Coelomycètes** : Ce sont des champignons filamenteux qui possèdent des structures de protection, pour leur conidiogenèse asexuée, appelées des « **pycnides** » ou des « **acervules** ». Ex : *Phoma*.
- **Hyphomycètes** : Ils représentent la classe la plus importante. Ils regroupent les mycéliums qui forment les conidies sur des hyphes (ex : *Blastomyces*), sur des conidiophores (ex : *Fusarium*) ou sur des phialides (ex : *Aspergillus*, *Penicillium*) (Figure). Cette classe comprend aussi des filaments stériles « *Mycelia sterilia* » qui ont une croissance végétative et ne forment aucune cellule de reproduction.

On y distingue principalement l'ordre des ***Moniliales***. Cet ordre se divise en **deux principales familles** selon la couleur des filaments et des spores asexués :

❖ ***Moniliaceae* (Hyphomycètes clairs ou hyalins)**. Les conidiophores généralement isolés sont de **couleur claire** et dispersés sur le substrat.

Ex : *Penicillium*, *Aspergillus*.

- ❖ **Dermatiaceae (Hyphomycètes foncés ou noirs)**, Les conidiophores généralement isolés sont de couleur sombre et dispersés sur le substrat.

Ex : *Alternaria*, *Cladosporium*

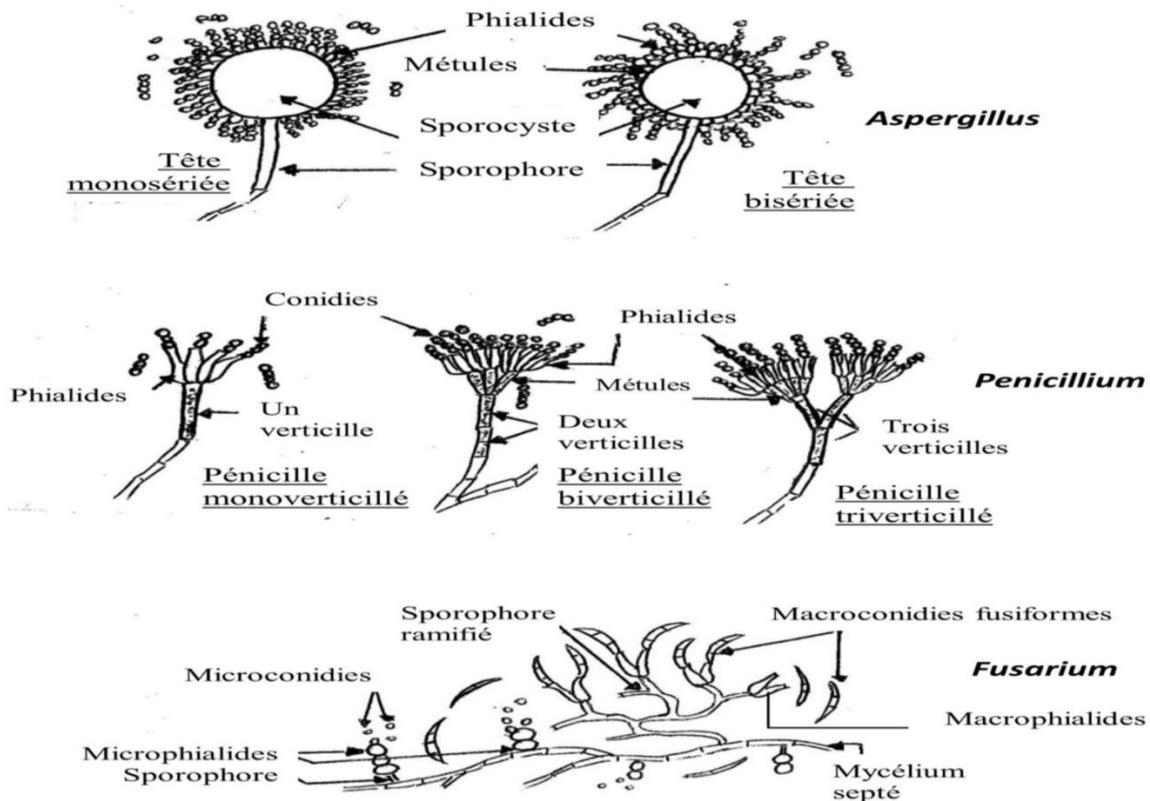


Figure 25 : Schémas de quelques Deutéromycètes.

. Les Mycorrhizes

Les Mycorrhizes sont des champignons qui vivent en symbiose avec les racines des plantes. La symbiose est bénéfique aussi bien pour le champignon que pour la plante. En effet, la plante effectue la photosynthèse et permet ainsi au mycète d'absorber la matière organique nécessaire à sa croissance et son développement. D'un autre côté, le mycète offre à la plante les avantages suivants :

- Il enrichit sa nutrition minérale en lui fournissant les minéraux absorbés du sol, notamment l'azote et le phosphore
- Il protège la plante contre la toxicité des polluants, notamment les métaux lourds (ex : plomb, cadmium, nickel, mercure) et les substances radioactives (ex : le césium radioactif).
- En protégeant la plante contre les polluants, il favorise l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs par les racines
- Il protège les racines contre les infections microbiennes en produisant des substances de défense comme les antibiotiques et les mycotoxines
- Il favorise la croissance des plantes par l'élaboration des phytohormones (ex : l'auxine, les gibbérélines, la cytokynine).

Chapitre 6 : Les algues

Les algues sont des organismes chlorophylliens (photosynthétiques) se développant dans l'eau ou dans des milieux très humides. Bien que surtout abondantes dans les eaux des mers, des lacs, des mares, des eaux courantes et des eaux thermales, on en trouve également sur les rochers humides et sur la terre (Floc'h, 2010). Exceptionnellement, elles peuvent être endophytes de tissus animaux ou végétaux. L'air, la lumière et des sels dissous sont, en plus de l'eau, nécessaires à leur développement. Elles sont considérées parmi les organismes végétaux les plus anciens sur ce monde (Cabioc, 1992).

Les algues constituent en réalité un vaste ensemble hétérogène d'embranchements très distincts les uns des autres et n'ayant entre eux que peu de caractères communs. La distinction entre ces différents embranchements d'algues est faite d'après des caractères d'ordre cytologique et biochimique ainsi que des différences de structure et de mode de reproduction.

6.1. Ultrastructure des Algues

L'étude des structures cellulaires algales a progressé de façon considérable grâce à l'utilisation du microscope électronique. La connaissance de ces structures a permis entre autres de découvrir les relations existant entre les différents groupes d'algues.

Les algues dont la taille moyenne n'excède pas quelques dizaines de microns sont appelées **microalgues**. Elles sont souvent constituées d'une seule cellule et sont parfois mobiles. Ces microalgues composent le phytoplancton ou plancton végétal.

Les algues de grande taille, pluricellulaires, appelées également **macroalgues**, prennent des formes diverses selon les espèces : filament, lame, courroie... Certaines ont une architecture plus complexe avec des parties distinctes (Floc'h, 2010 ; Garon-Lardiere, 2004).

Chez les algues, l'ensemble des tissus appelé thalle est composé de 3 parties :

- ❖ un système de fixation sous forme de **disque** ou de **crampon**
- ❖ un pédoncule plus ou moins long appelé **stipe**
- ❖ une lame ou **fronde** plus ou moins découpée formant des filaments, lanières... (Floc'h, 2010 ; Garon-Lardiere, 2004)

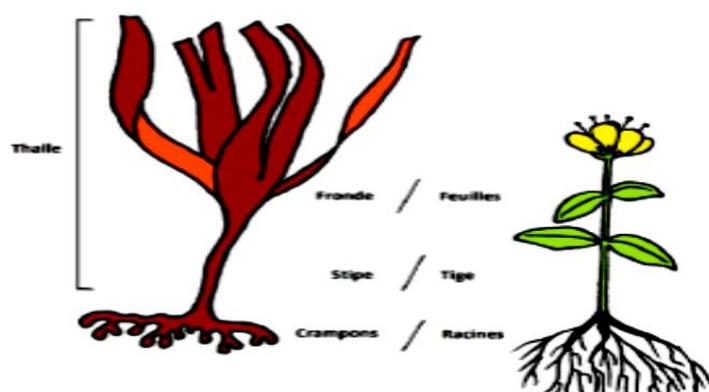


Figure 26 : Comparaison entre la morphologie d'une algue et d'une plante

6.1.1. Paroi cellulaire

De nature glucidique (cellulose et composés pectiques), elle entoure la matière vivante de la cellule (Garon-Lardiere, 2004). Elle peut être absente chez certaines algues flagellées qui ne possèdent qu'une enveloppe mince formée par la pellicule externe du cytoplasme. Malgré la nature cytoplasmique de cette pellicule, celle-ci montre parfois des ornements disposés en réseau ou en spirale (par exemple chez les Euglénophycées du genre *Phacus*).

La paroi glucidique est généralement formée de plusieurs couches, la couche externe est parfois visqueuse. La paroi peut s'imprégner de substances minérales : silice hydratée chez les Diatomophycées, carbonate de calcium chez diverses Chlorophytes ; des ornements en forme d'écailles ou plus complexes peuvent apparaître chez certaines Chrysophytes (écailles chez *Synura* par exemple).

6.1.2. Noyau

Il occupe en général le centre de la cellule et comprend un nucléole. Il est parfois suspendu au centre de la cellule par des travées cytoplasmiques, comme chez *Spirogyra* ou chez les Diatomées naviculoïdes.

Chez les genres à cellules à plusieurs noyaux (chez les-Rhodophytes principalement), les noyaux sont en général situés dans le cytoplasme entre les vacuoles et les plastes. En général, la structure ne diffère pas de celle du noyau des cellules de plantes supérieures, mais il est plus petit.

6.1.3. Plastes

Participe à la synthèse des formes de réserve comme l'amidon. Ils sont porteurs de la chlorophylle et des pigments accessoires. Ils sont de formes très variées mais caractéristiques et constantes pour chaque espèce.

- Le **Pyrénoïde** un type de plastes chez les Chlorophytes responsable de la production de grains d'amidon.

6.1.4. Flagelles

Chez les zoospores et se forment au cours de la multiplication de certaines algues et les cellules végétatives ; ainsi chez certaines micro algues mobiles ex : *Chlamydomonas*.

6.1.5. Vacuole pulsatile

Organite d'osmo-régulation, notamment important pour les espèces qui vivent en eau douce, elle permet l'évacuation active de l'eau (de l'intérieur de la cellule vers l'extérieur).

6.1.6. Le Stigma

Tache oculaire : élément photosensible, qui permet les réponses phototactiques. Orientation de déplacement par rapport à la lumière.

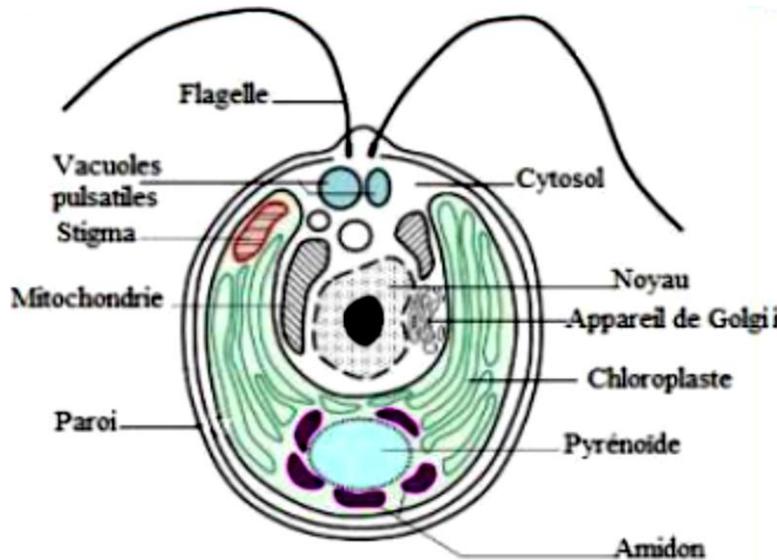


Figure 27 : Algue verte unicellulaire biflagellée (*Chlamydomonas*)

6.2. La morphologie des algues

Les algues se présentent sous un nombre de formes très variées, depuis le type unicellulaire jusqu'aux filaments ramifiés. On peut ainsi distinguer :

6.2.1. Les formes unicellulaires

1. Le type rhizopodiale

Les formes rhizopodiales n'ont pas de parois cellulaires rigides et émettent des pseudopodes comme les amibes ; Certaines espèces peuvent émettre des pseudopodes pour capturer et ingérer de petites proies.

2. Type coccoïde

Les cellules immobiles sont entourées d'une membrane fermée et bien définie : on trouve des formes simples sphériques ou subsphériques, *Chlorella* chez les Chlorophycées par exemple. D'autres formes sont moins simples (triangulaires, discoïdes, quadrangulaires, allongées), pour aboutir à des cellules beaucoup plus compliquées : ainsi les Diatomées (Chrysophytes) sont constituées par une cellule circulaire ou allongée en deux valves s'emboitant l'une dans l'autre.

3. Type flagellé ou monadoïde

Les cellules en général solitaires et mobiles possèdent 1, 2, rarement 3 (2 fouets égaux et un appendice flagelliforme) ou 4 fouets.

Ex 1 : *Chlamydomonas* : Algue verte unicellulaire à 2 flagelles,

Ex 2 : l'Euglène : *Euglena euglena* : algue verte à un flagelle locomoteur.

6.2.2. Les formes coloniales

On peut distinguer deux sortes de colonies : les colonies mucilagineuses et les cénobes.

1. Les colonies Mucilagineuse

Les mucilages sont des substances végétales, constituées de polysaccharides, qui gonflent au contact de l'eau en prenant une consistance visqueuse, parfois collante, semblable à la gélatine.

Les colonies mucilagineuses sont constituées de cellules groupées sans forme définie dans une gelée englobant l'ensemble ; ce type de groupement est assez fréquent chez les Cyanophytes (*Microcystis*, *Aphanothece*) et chez les Chlorophytes (*Tetraspora*, *Kirchneriella*, *Dictyosphaerium*). Il existe des colonies constituées de cellules flagellées (*Eudorina*, *Pandorina*, *Volvox*) et qui sont mobiles ; les cellules sont incluses dans une enveloppe gélatineuse traversée par les flagelles qui battent librement à l'extérieur.

2. Les Cénobe

Ce sont des colonies immobiles ayant toujours une structure régulière. Ce type de forme est fréquent chez les Chlorophytes, Parfois les cellules marginales n'ont pas le même aspect que celles de l'intérieur (*Pediastrum*, *Scenedesmus*). Des méats peuvent exister entre les cellules (*Hydrodictyon*, certaines espèces de *Scenedesmus*).

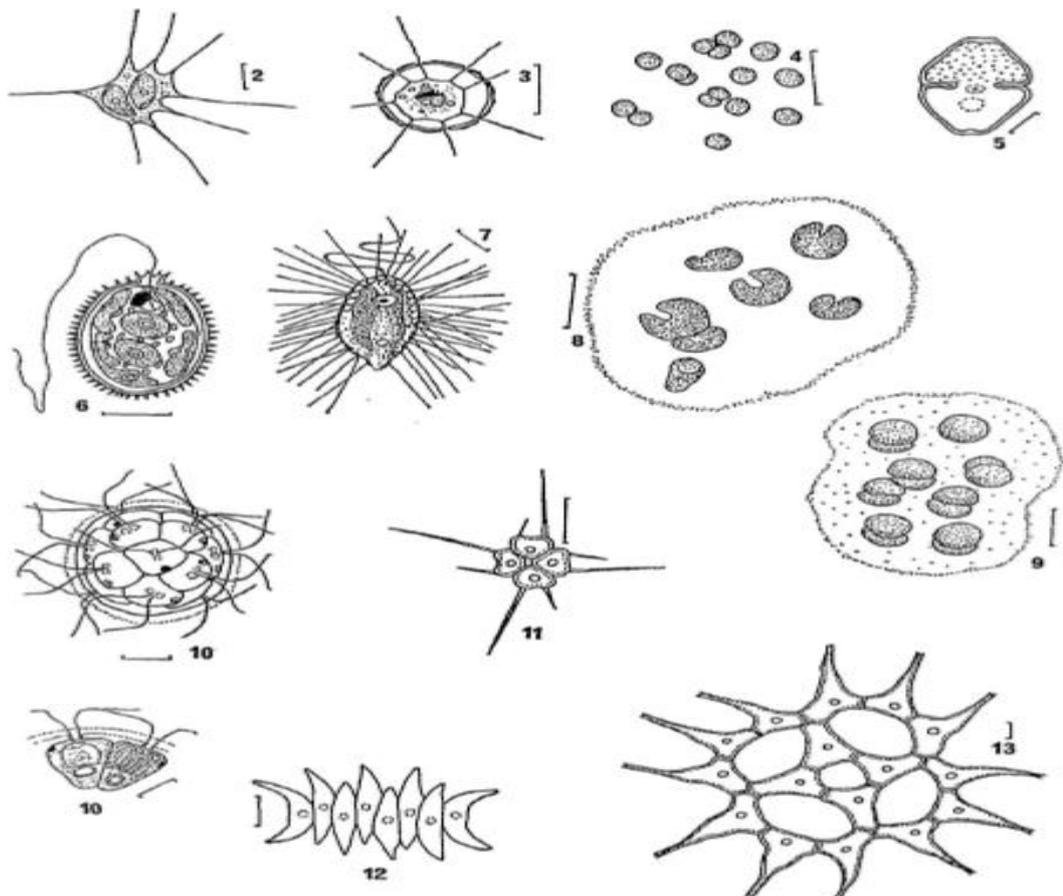


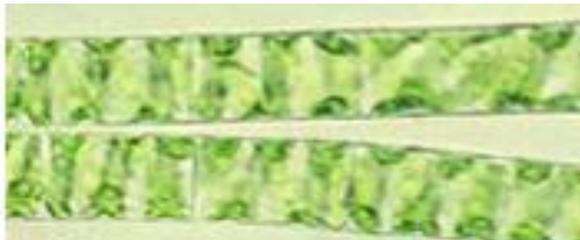
Figure 28 : 2 et 3 : Type rhizopodial, 4 et 5 : Type coccoïde, 6 et 7 : Type flagelle, 8 et 10 : colonies mucilagineuses (colonie entière et détail de deux cellules), 11 et 13 : cénobes

6.2.3. Les formes filamenteuses

- **Thalles filamenteux** : la structure filamenteuse est une construction pluricellulaire simple, fréquente chez les algues.

Ex: *Spyrogira*

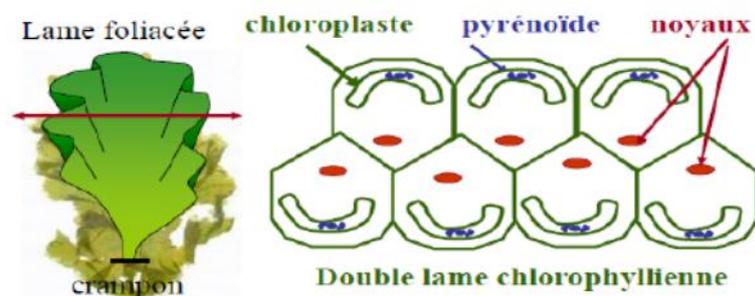
- Algue verte (Chlorophycée) d'eau douce
- Pas de ramification avec des chloroplastes en forme d'hélice = «rubané»



- **Thalles foliacés**

Ex: *Ulva lactuca*

- Algue verte -marine « La laitue de mer »
- Elargissement du thalle «en éventail» par mitoses transverses et longitudinales
- Thalle adulte = large lame formée de 2 assises de cellules (Botany, 2001)



- **Thalles en tube**

Ex : *Enteromorpha*

- Algue verte
- Tube creux formé d'une seule couche de cellules
- 2 assises de cellules (comme *Ulva lactuca*) qui s'écartent



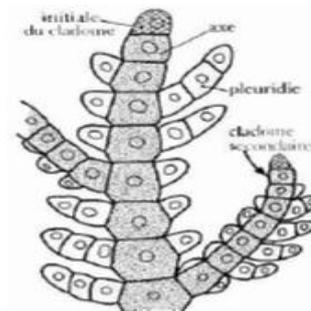
•Thalles cladomiens

Ex: *Sphocelaria* / *Plumaria*

Plus complexe, le thalle est constitué de plusieurs catégories d'axes à fonction déterminée. Le cladome est une organisation structurale comprenant un axe dressé à croissance indéfinie et des ramifications latérales à croissance définie : les pleuridies.

Si on tue la cellule apicale

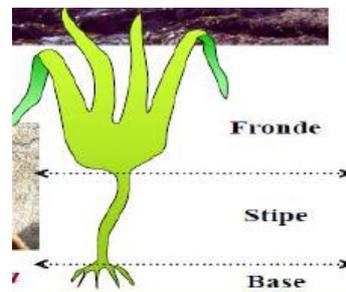
-les pleuridies près de la cellule apicale (en cours d'élongation) n'arrêtent pas leur croissance-
les pleuridies ayant arrêté leur croissance la reprennent et se ramifient



•Thalles fucoides

Ex : *Laminaria*

Sont toujours de grande taille à l'état adulte et montrent une différenciation en trois parties : une base importante, un stipe cylindrique ou plus ou moins aplati, une fronde de forme variée.

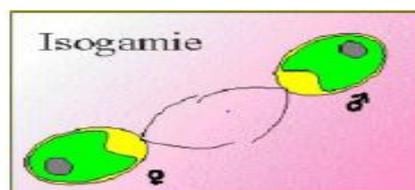


6.3. La reproduction des algues

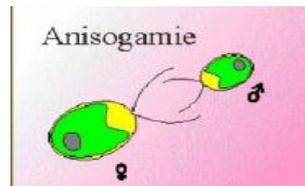
6.3.1. Reproduction sexuée

Il y a plusieurs formes de la reproduction sexuée chez les algues

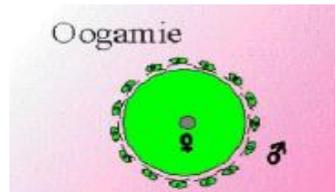
Isogamie fécondation mettant en présence deux gamètes morphologiquement et physiologiquement identiques



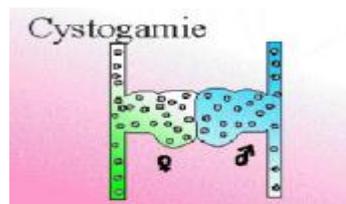
Anisogamie fécondation mettant en présence deux gamètes morphologiquement et/ou physiologiquement différents



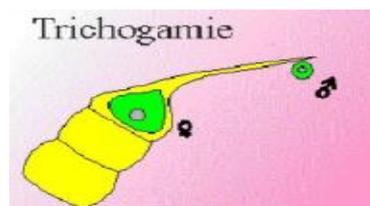
Oogamie 1 gamète petit, mobile, produit en grand nombre 1 gamète gros, immobile, chargé en réserve



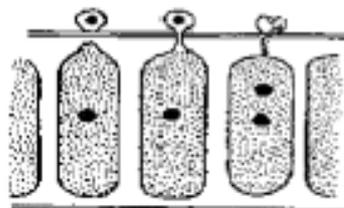
Cystogamie Formation d'un pont cytogamique (ou pont de conjugaison) entre 2 filaments gamètes jamais libérés hors du thalle



Trichogamie le gamète femelle reste dans le gamétophyte, émet un poil le trichogyne le gamète mâle sans flagelle, se colle sur le trichogyne.



Aplanogamie Lorsque les 2 gamètes sont immobiles et que leur rencontre se fait passivement (grâce à des courants d'eau). Il existe une papille sur gamète femelle pour faciliter la fécondation.



L'isogamie, anisogamie et oogamie sont dites Planogamie où au moins un des gamètes qui est mobile. La planogamie et l'aplanogamie sont des formes bien adaptées au milieu aqueux.

6.3.2. Reproduction asexuée

La reproduction peut être asexuée par mitose : bipartition pour les unicellulaires, bourgeonnement ou fragmentation pour les autres : la partie du thalle qui se détache, se fixe et se développe pour donner un nouvel individu.

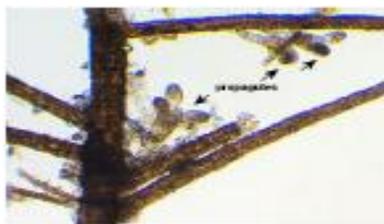
Toutes les algues bénéficient, en principe, de cette possibilité végétative.

A. Multiplication végétative par Fragmentation du thalle

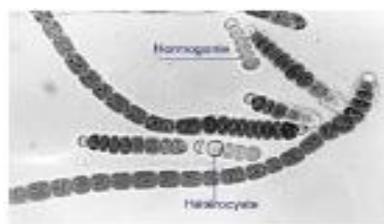
Ex1. Chez les Algues rouges du genre *Asparagopsis*, les Algues vertes du genre *Caulerpa* ou des Algues brunes des genres *Ascophyllum*, *Fucus* ou *Sargassum* : une partie du thalle se brise, est emportée par les courants et les vagues et redonnera un nouvel individu. C'est un véritable bouturage.

Ex2. Chez les Algues vertes du genre *Valonia* : formation des thalles-fils par bourgeonnement

Ex3. Chez les Algues brunes du genre *Sphacelaria*, il y a formation de propagules : apparition d'un massif de cellules sur le thalle capables après séparation de l'algue-mère de donner naissance à un nouvel individu.



Remarque : Chez des Cyanobactéries filamenteuses ("Algues bleues") certaines cellules se segmentent, donnent de petits fragments pluricellulaires appelés hormogonies qui se détachent (véritables boutures) et permettront la naissance d'un nouveau thalle.



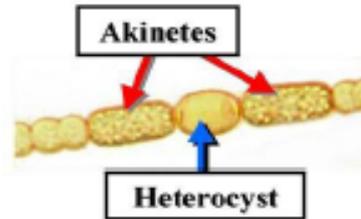
B. Formation de cellules spécialisées ou spores.

B.1. Formation de spores

Une partie du thalle (eucarpie) ou la totalité du thalle (holocarpie) donne des cellules fertiles ou cystes appelées sporocystes (ou sporanges) qui contiennent les cellules-mères des spores. Les spores libérées par ouverture des organes précédents, sont dispersées, tombent sur un substrat et après germination donnent naissance à un nouvel individu. Certaines spores sont immobiles les aplanospores d'autres sont mobiles les zoospores

B.2. Formation de spores résistantes.

Certaines cellules du thalle "s'enkystent" donnent des spores capables de mener une vie ralentie quand les conditions sont défavorables puis de germer si ces conditions redeviennent favorables ; ces spores résistantes sont appelées aKinètes.



6.4. Classification des algues

La classification des algues est basée sur sept critères principaux :

- morphologie des cellules ou thalles (quand pluricellulaires);
- morphologie et chimie de la paroi;
- nombre et type d'insertion des flagelles;
- type de chlorophylle et présence de pigments accessoires;
- l'habitat;
- les structures reproductrices;
- le cycle biologique.

6.4.1. Les Cyanophytes

Dénommées aussi Algues bleues ou Schizophytes ou encore Myxophytes, ne possèdent pas de noyau à membrane définie (ce sont des Procaryotes, à l'inverse des autres groupes qui sont des Eucaryotes). Les pigments présents dans la cellule sont nombreux : chlorophylle verte a et c, phycocyanine bleu-vert, phycoérythrine rouge et pigments d'accompagnement, β carotène et xanthophylles jaunes. Certaines espèces ne possèdent que de la chlorophylle.

Ces pigments ne sont pas portés par des plastes mais sont diffus dans le cytoplasme et donnent aux cellules une coloration homogène. Le mélange de ces pigments dans le cytoplasme donne en général la teinte bleu-vert caractéristique des Cyanophycées mais on rencontre aussi des teintes vertes noirâtres, brunâtres, rouges, bleues ou même violettes.

Les Cyanophytes ne possèdent pas de formes flagellées. C'est un groupe d'algues très abondant dans les eaux douces africaines.

6.4.2. Les Chlorophytes

Sont les algues vertes, comme tous les groupes vivants des eucaryotes à noyau bien individualisé ; elles possèdent des plastes d'un vert franc contenant de la chlorophylle a et b associée

à de l' α et β carotène et des xanthophylles identiques à celles des plantes supérieures. Les formes nageuses possèdent en général deux ou quatre flagelles de même taille.

6.4.3. Les Euglénophytes

Sont des algues unicellulaires et flagellées, le plus souvent mobiles, avec des plastes verts contenant de la chlorophylle a et b associée à du α carotène et des xanthophylles. Certaines espèces prennent une teinte rouge qui masque la teinte verte des plastes. Les euglénophytes sont à la fois proches des algues brunes et des protozoaires. À la mauvaise saison ou si la lumière est trop faible, l'euglène se nourrit par phagocytose comme un protozoaire.

Si les conditions deviennent très difficiles, certaines euglènes perdent leurs flagelles, se chargent de réserves, s'arrondissent et s'entourent d'une enveloppe protectrice qui leur permet d'attendre de meilleures conditions.

Parmi les genres les mieux étudiés, citons : *Euglena*, pigmenté, pratiquant la photosynthèse ; *Astasia*, incolore, absorbant des substances dissoutes ou *Peranema*, incolore, se nourrissant par phagocytose.

6.4.4. Les Chrysophytes

Sont caractérisées par des chromatophores bruns, jaunes ou vert-jaunâtres. Elles ne possèdent jamais d'amidon. Il existe de nombreuses formes flagellées possédant pour la plupart deux fouets inégaux. Ce groupe se divise en cinq classes :

1. Les Chrysophycées

A plastes jaunes ou bruns renfermant des chlorophylles a et c, du carotène et diverses xanthophylles, sont des organismes unicellulaires ou coloniaux, rarement filamenteux. Elles forment souvent des logettes ou kystes siliceux plus ou moins sphériques (Cabioc'h *et al.*, 1992).

2. Les Xanthophycées

Possèdent des plastes vert-jaune ou vert à peine jaunâtre ou les chlorophylles a et c sont associées à plusieurs xanthophylles et du α carotène, les pigments bruns étant absents. Leur teinte est souvent très proche de celle des Chlorophytes mais l'absence d'amidon permet de séparer facilement ces deux groupes.

3. Les Diatomées ou Diatomophycées

Sont des algues unicellulaires ou coloniales, quelquefois filamenteuses, à plastes bruns ou jaunes contenant de la chlorophylle a et d du α carotène et plusieurs xanthophylles. Elles sont caractérisées par leurs parois cellulaires imprégnées de silice formant une logette bivalve appelée frustule.

Lorsque les diatomées meurent, leur contenu cellulaire se décompose et il ne reste plus que cette paroi externe qui sédimente et qui forme une roche que l'on appelle la diatomite ou terre de diatomées. La terre de diatomées ou Diatomite est utilisée comme additif dans les huiles décolorantes et désodorisantes et les engrais. Elle est également employée en tant que filtre pour les piscines, comme isolant thermique (briques réfractaires) et phonique et comme additif à la peinture pour augmenter la visibilité nocturne des signaux indicateurs et des plaques d'immatriculation.

4. Les Phéophycées

Sont des algues brunes toujours filamenteuses ou thalloïdes, jamais unicellulaires. Elles sont surtout marines et ne sont représentées en eaux douces que par cinq genres et cinq à six espèces fortes rares. Elles possèdent des plastes bruns contenant des chlorophylles a et c, du β carotène et des xanthophylles (surtout de la fucoxanthine et de la diatoxanthine). Elles ne produisent jamais d'amidon (Lee, 1989 ; Garon-Lardiere, 2004).

5. Les Raphidophycées

Sont toujours des formes unicellulaires, solitaires, nageant à l'aide de deux flagelles de taille inégale. Leurs pigments sont constitués par de la chlorophylle c, du β carotène et trois xanthophylles. Cette classe ne comprend qu'une vingtaine d'espèces d'eau douce.

6.4.5. Les Rhodophytes

Ou les algues rouges, taxon frère des algues vertes. Elles sont principalement marines et pour la plupart pluricellulaires. Leur présence dans les eaux douces se limite à une trentaine de genres peu fréquents. Elles présentent de la chlorophylle a et d et des pigments comme les α et β carotènes, les phycoérythrine, phycoyanine. On note aussi la présence d'un amidon floridien (semi liquide) appelé rhodamylon (Cabioc'h *et al.*, 1992). . En eau douce (De Reviere, 2003), la couleur des Rhodophytes est bleu-vert, rouge-violacé, très souvent vert sale ou vert noirâtre. Il n'existe pas de formes flagellées.

6.4.6. Les Pyrrhophytes

Ou dinoflagellés, sont des plastes bruns, plus rarement rouges ou bleu-vert contenant des chlorophylles a et c, du carotène. Les formes unicellulaires biflagellées sont très nombreuses. Elles font partie du phytoplancton et sont responsables du phénomène des eaux rouges. Certains dinoflagellés ne possèdent pas de pigments photosynthétiques. Les réserves sont constituées par de l'amidon.

Chapitre 7 : Les protozoaires

Les protozoaires sont des êtres vivants unicellulaires microscopiques, se sont également des cellules eucaryotes. Les protozoaires sont les ancêtres des animaux, Chaque protozoaire est une cellule très spécialisée capable de remplir toutes les fonctions vitales. Les protozoaires doivent se déplacer, digérer, respirer, éliminer leurs déchets par excrétion et se reproduire pour survivre. Leur cellule unique est donc beaucoup plus complexe que les cellules retrouvées chez les métazoaires.

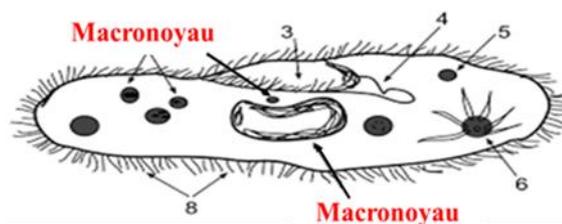
Les cellules protozoaires se constituent d'un noyau, de vacuoles, de mitochondrie, d'un réseau de membranes et d'une flagelle pour leur permettent de se déplacer.

Les protozoaires ont une taille comprise entre 1 et 600µm. Les plus petits sont les sporozoaires ainsi que certains parasites intracellulaires. Les plus grands sont les amibes qui peuvent atteindre jusqu'à 5mm.

7.1. Cellule protozoaire

Les protozoaires possèdent tous les constituants classiques de la cellule eucaryote (organites spécifiques) :

- Membrane lipoprotéique mince : plasmalemme.
- Membrane lipoprotéique parfois doublée d'une enveloppe superficielle. Cette membrane a un rôle de protection contre les agressions et la déshydratation.
- L'appareil de Golgi (synthèse de membrane).
- Le noyau. On trouve toutefois des protozoaires avec constamment deux noyaux : les ciliés (exemple : paramécies) qui possèdent un macronucléus et un micronucléus.



- Le macronoyau est dit « polyploïde » ($x n$), il est impliqué dans tout ce qui est métabolisme plus régénération = matériel génétique actif.
- Le micronoyau est « diploïde » ($2n$), il est impliqué dans le phénomène de recombinaison génétique = reproduction.

Il y a beaucoup de vacuoles, notamment :

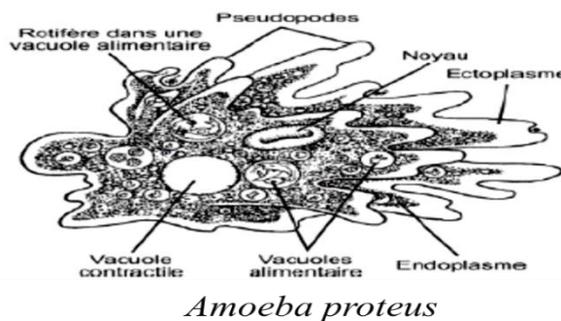
- la vacuole pulsatile qui gère les mouvements osmotiques.
- Vacuoles phagocytaires (plus cytosomes).
- Vacuoles sécrétoires (produites par Golgi, possèdent des enzymes).

Pour les protozoaires anaérobies, il existe des vésicules dites « hydrogénosome » où se fait le transfert de l'oxygène.

7.2. La locomotion

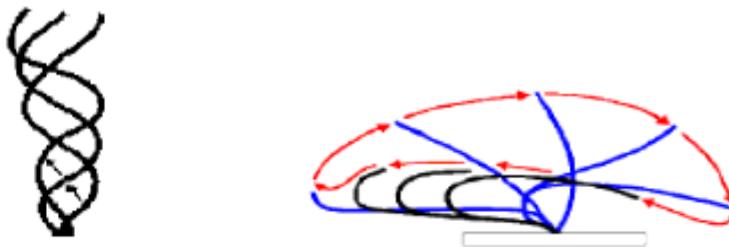
Le mouvement orienté permet la recherche de nourriture, d'un abri, d'un nouvel habitat, d'un partenaire sexuel. On trouve trois types d'appareils locomoteurs.

- **Les pseudopodes** sont des extensions cytoplasmiques temporaires pour la locomotion et la capture des proies. En général, des pseudopodes se rétractent pendant que d'autres se forment. Les pseudopodes sont le principal moyen de locomotion des amibes. Le mouvement caractéristique produit par les pseudopodes est appelé **mouvement amiboïde**.



- **Les cils et flagelles**

Les **cils** et **flagelles** sont permanents, en position fixe. Selon les cas, on les trouve sur toute la surface du corps ou localisés. Ils ne sont efficaces qu'en milieu fluide.

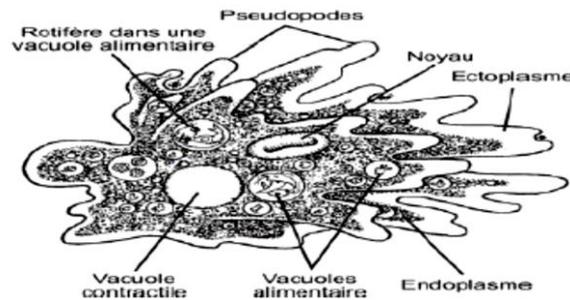


Les Protozoaires sont généralement cosmopolites et peuplent les milieux les plus divers : eaux douces stagnantes ou courantes, eaux saumâtres, salées et super-salées, tourbière et sphaignes (dans la mince couche d'eau qui entoure la plante) et même la terre humide, voire sèche. Malgré la simplicité de leur organisation, la structure protozoaire est réussie car la vie protozoaire est présentée sous tous les climats et dans tous les habitats. On peut les trouver :

- A l'état libre (en milieu aqueux ou humide).
- Comme parasite (maladie).
- Comme symbiote.

7.3. Les principaux types de protozoaires. Il y a plus de 30000 espèces de protozoaires. Mais on peut en distinguer trois en particulier :

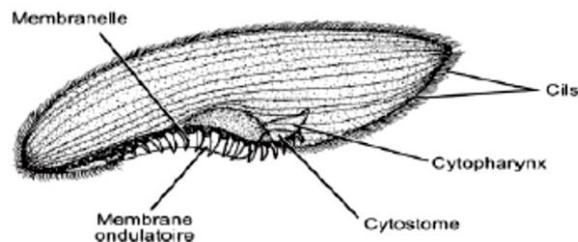
7.3.1. Les protozoaires sans cil ni fouet. Ils sont capables d'émettre des pseudopodes qui sont des prolongements qui leur permettent de capturer certains organismes microscopiques et de se déplacer. Cette espèce est appelée **amibe**.



Amoeba proteus

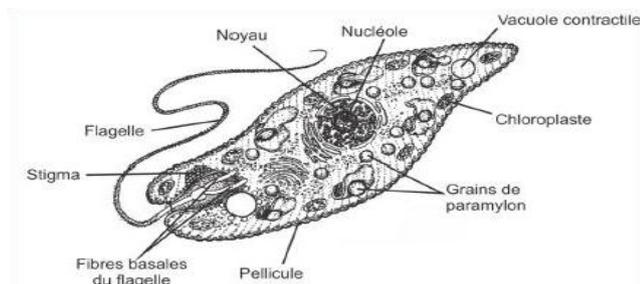
6.3.2. Les ciliés qui sont recouverts de cils.

- **Les cils buccaux** : ils entraînent les aliments vers la bouche.
- **Les cils somatiques** : ils servent à la locomotion.



Blepharisma

7.3.3. Les flagellés comportant des fouets.



Euglena

7.4. Nutrition et comportement de survie

Au sujet de la nutrition il existe deux grands types :

Holozoïque : la nutrition se fait par un phénomène de phagocytose donc le protozoaire avale des éléments particuliers comme des bactéries. Il existe chez certains ciliés, une vésicule de phagocytose particulière destinée à la digestion, c'est le « cytosome ».

Saprozoïque : il y a ingestion de nutriments qui ont simplement traversés la membrane plasmique. par osmose (dans le milieu biologique, (sang : forme parasite).

« Enkystement »

Nombreux protozoaires peuvent passer par une phase de « enkystement » ; ils se différencient en un « kyste » qui ressemble beaucoup à la spore bactérienne. C à d qu'il s'agit d'une cellule « dormante », possédant une paroi (rare chez les protozoaires) et activité métabolique faible. Le kyste a trois fonctions principales :

- forme de protection lors de changement défavorables de l'environnement (carences alimentaires, faible oxygène, variation de pH, diminution de l'humidité, ...).
- kyste reproductif (réorganisation génétique)
- pour les espèces parasites, le kyste permet de passer d'un hôte à un autre.

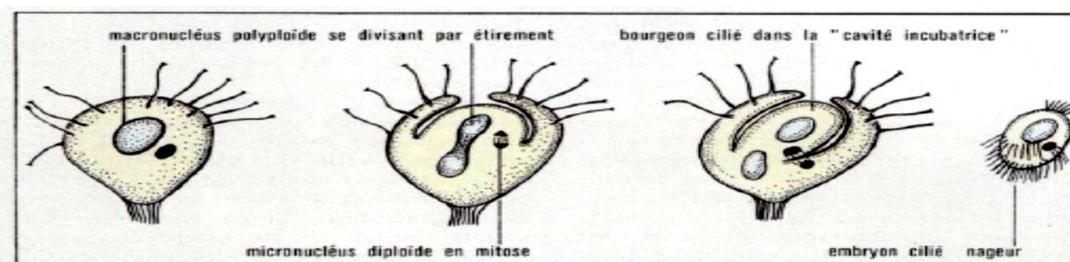
Le dekystement n'a besoin d'aucune manifestation particulière ; cela apparait quand le milieu redeviens favorable. Chez les formes parasites, la forme du microorganisme que l'on obtient après le dekystement, s'appelle le « trophozoite ».

7.5. La reproduction chez les protozoaires

Le mode principal de reproduction chez les Protozoaires est la reproduction asexuée, mais la reproduction sexuée est également commune. La reproduction asexuée est avantageuse car elle est énergétiquement plus économique.

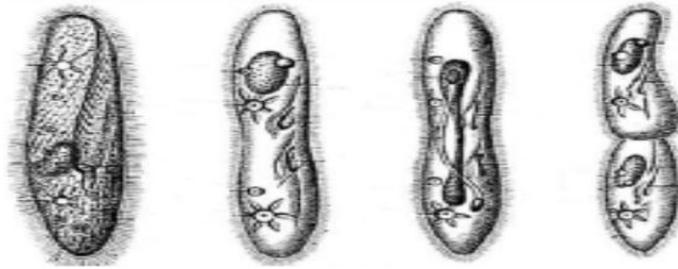
7.5.1. La reproduction asexuée peut être

1) un bourgeonnement au cours duquel une extension de l'organisme se sépare et produit un nouvel individu ; Il y a apparition à la surface cellulaire d'un bourgeon exogène, suivie d'une division nucléaire, capable de constituer un individu complet qui se détache de l'individu souche. C'est une fission binaire inégale.



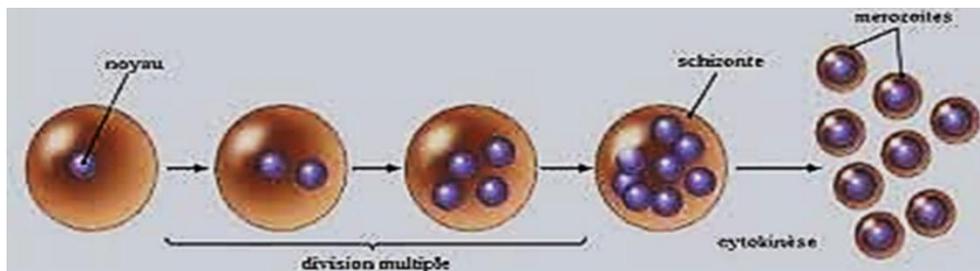
2) une fission binaire, au cours de laquelle l'individu se sépare littéralement en deux pour produire deux individus identiques et de même taille ; La cellule se divise en deux. C'est le type le plus courant (les protozoaires présentent deux à trois fissions binaires par jour). La fission peut être non orientée

(comme chez les amibes [animaux sans forme précise]), longitudinale chez les flagellés (*Trypanosoma*) ou transversale chez les Paramécies (ciliés).



Paramécie : division binaire

3) une fission multiple où le parent multinucléé se divise en plusieurs cellules de taille semblable. Il y a une division répétée du noyau puis des divisions du cytoplasme qui forment autant d'individus qu'il y a de noyaux.



7.5.2. La reproduction sexuée

Les protozoaires à reproduction sexuée sont peu nombreux. Cette reproduction implique généralement la formation de gamètes par méiose (gamétogénèse), mâles et femelles appelées gamétocytes qui peuvent se réunir à l'extérieur (syngamie) ou à l'intérieur (autogamie) de l'organisme parent. Mais, chez les Ciliés, il existe un mécanisme spécial d'échange de matériel génétique qui ne fait pas intervenir des gamètes : c'est la conjugaison. Les Ciliés ont des noyaux dimorphes : un macronoyau polyploïde qui contrôle le fonctionnement cellulaire et un ou plusieurs micronoyaux qui sont impliqués dans la reproduction sexuée. Deux cellules compatibles entrent en contact, fusionnent et s'échangent un noyau haploïde, le micronoyau, qui fusionne avec celui de la cellule réceptrice. Les deux cellules se séparent en étant toutes deux fécondées et leur division par méiose produit d'autres micronoyaux haploïdes, et ce sont ces micronoyaux haploïdes qui vont donner des cellules filles.



Paramécie en conjugaison

7.5. La classification des Protozoaires

La classification des protozoaires a subi de nombreux remaniements ces dernières années. La principale discrimination se fait en fonction de l'appareil locomoteur. On trouve 5 embranchements :

7.5.1. Embranchement des Flagellés (Mastigophora)

Protozoaires munis, pendant au moins une partie de leur cycle, d'un ou de plusieurs flagelles locomoteurs. Ils se multiplient généralement par plasmotomie longitudinale. La reproduction sexuée est rare chez les flagellés.

Selon leur affinité, on divise les flagellés en 2 groupes distincts :

1. **Les phytoflagellés (*Phytomastigophorea*)** : Organismes libres possédant typiquement des chloroplastes.
2. **Les Zooflagellés (*Zoomastigophorea*)** : Organismes à symétrie axiale. Ils peuvent être libres, vivant en symbiose ou sévissant en parasites redoutables.

Espèces types (ordre des *Trypanosomides*, Famille des *Trypanosomatides*)

1. Genre *Trypanosoma* :

Corps fusiforme avec 1 seul flagelle insère sur le blépharoplaste. Flagelle relie au corps par une membrane ondulante et n'est libre qu'à l'extrémité antérieure. Parasites vivant dans le sang ou le liquide céphalo-rachidien de divers vertébrés auxquels ils sont inoculés par des invertébrés piqueurs hématophages (sangsues, insectes) provoquant des **Trypanosomioses**.

Trypanosoma brucei

Trypanosoma brucei est une espèce de parasite protozoaire faisant partie du genre *Trypanosoma* responsable de la trypanosomiase africaine, appelée aussi maladie du sommeil. Il s'agit d'un organisme unicellulaire eucaryote qui change plusieurs fois de morphologie au cours de son cycle de vie mais qui conserve les caractéristiques principales d'une cellule eucaryote (Terzic, 2019).

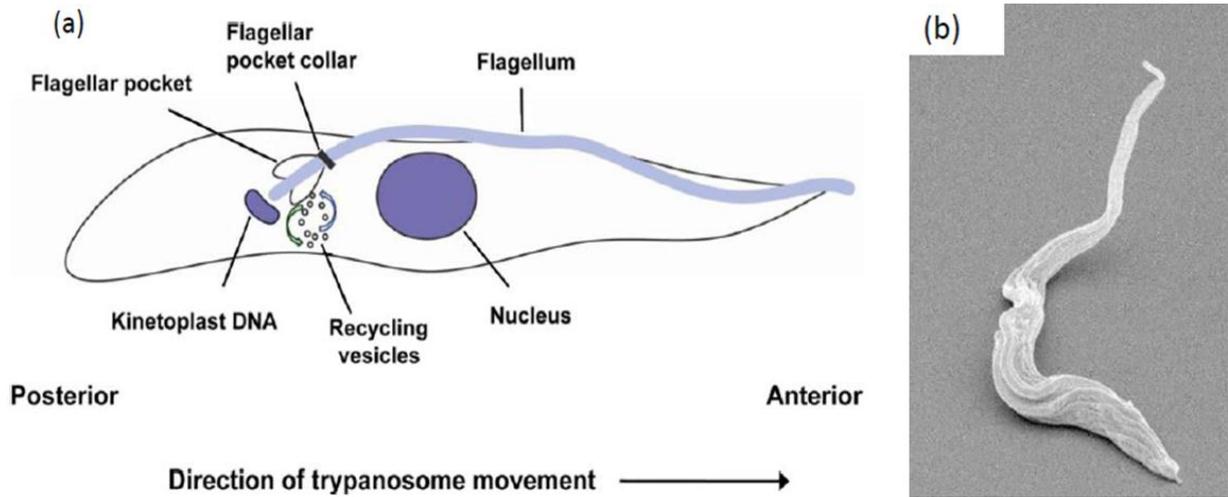


Figure 29 : (a) Schéma général (Rudenko, 2011) et (b) vue aux rayons X (Redecke *et al.*, 2013) de *Trypanosoma brucei*

Le cycle de vie de *Trypanosoma brucei*

La survie de *Trypanosoma brucei* dépend de deux hôtes, un hôte intermédiaire et vecteur, représenté par la mouche tsé-tsé ou glossine, et un hôte définitif, le mammifère. Le cycle de vie d'un tel parasite comporte deux cycles (Figure 3) où chaque stade est gouverné par un programme d'expression de gènes spécifiques et marqué par des différenciations cellulaires et métaboliques.

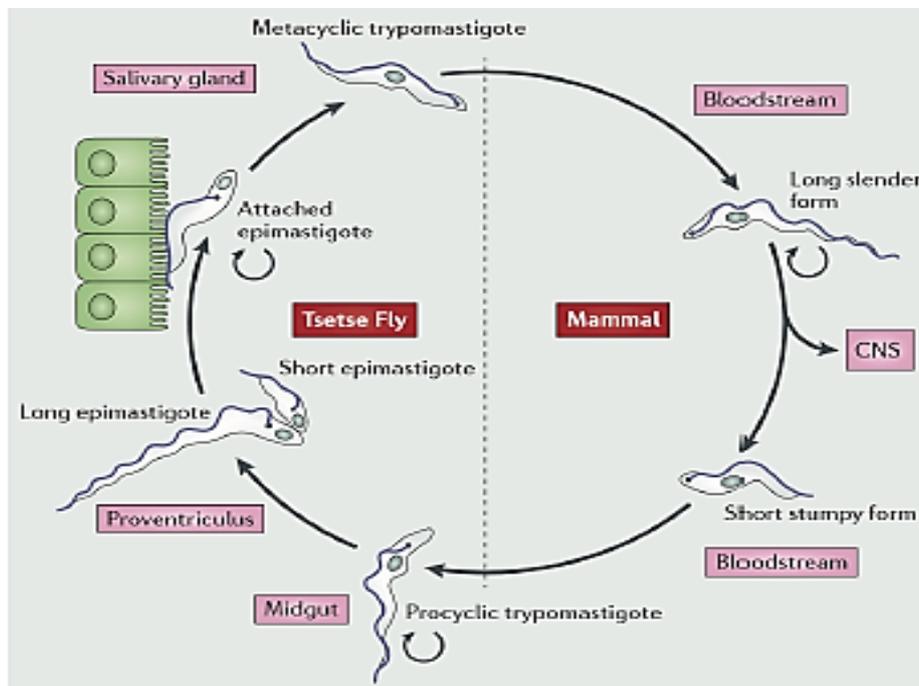


Figure 30 : Cycle de vie de *Trypanosoma brucei* (Langousis *et al.*, 2014)

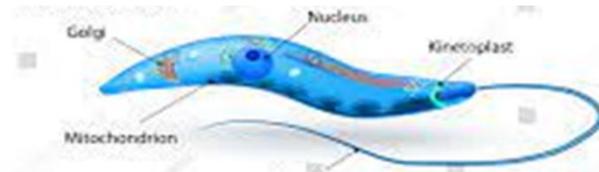
Genre *Leishmania* :

Parasites hétéroxènes transmis par un diptère piqueur (Phlébotome) provoquant des **Leishmanioses**. (Ashford, 2000). Se présente sous deux formes :

La forme ***Leishmania*** (dans les cellules sanguines de l'hôte définitif, sans flagelle)

La forme ***Leptomonas*** (dans le tube digestif du phlébotome, forme exocellulaire flagellée)

Exp: ***Leishmania tropica*** : agent de la **leishmaniose cutanée**, transmis par la pique de ***Phlebotomus papatasi***.



Leishmania tropica

. Cycle de vie et morphologie

Le parasite *Leishmania* a un cycle de vie dimorphique qui nécessite deux hôtes, l'insecte phlébotome et un mammifère (Fig. 2). Il se présente chez leurs hôtes successifs sous deux stades morphologiques principaux : les promastigotes et les amastigotes.

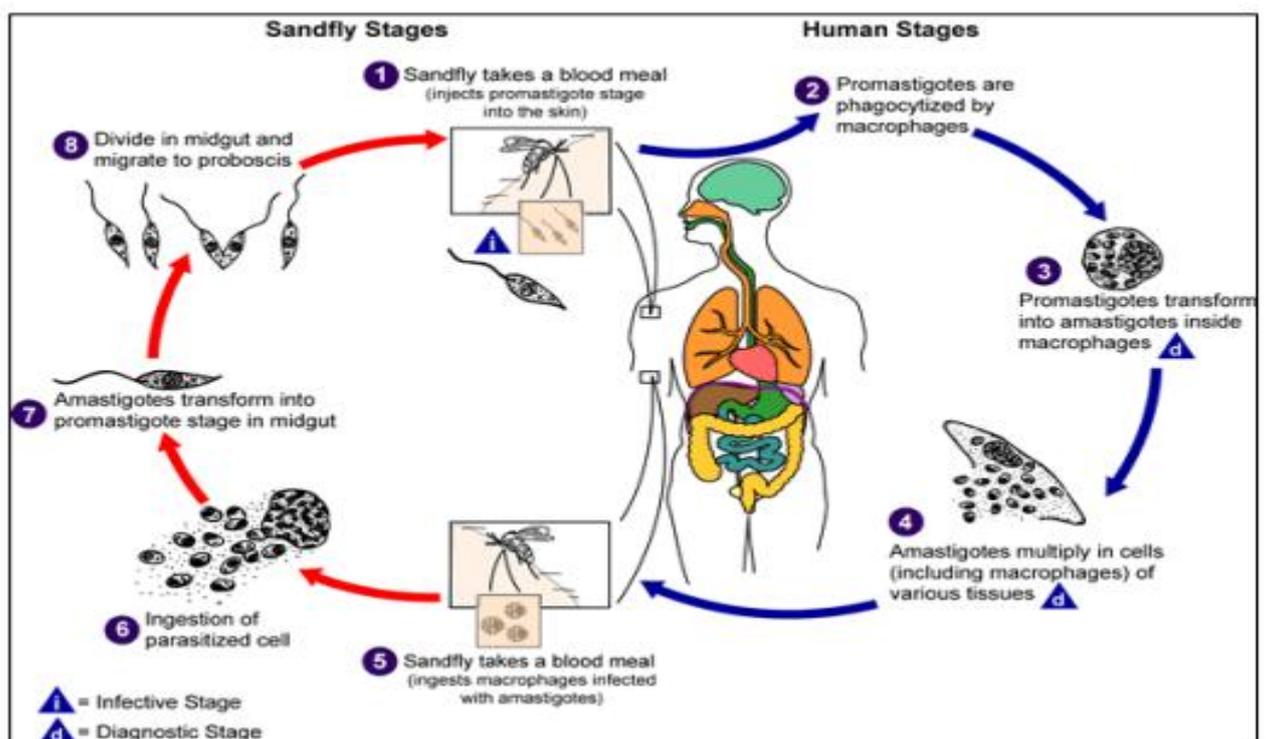


Figure 31 : Cycle de vie du parasite *Leishmania* (www.dpd.cdc.gov/dpdx)

Genre *Trichomonas* :

Présence de **3 à 6 flagelles**, parasites monoxènes cavitaire de l'homme et de plusieurs vertèbres. Les principales espèces connues :

Trichomonas intestinalis : vit dans le coecum et le colon où il se nourrit de bactéries, rôle pathogène contesté.

Trichomonas vaginalis : cause des vaginites chez la femme et des uretrites chez l'homme.



Trichomonas vaginalis

7.5.2. Embranchement des Rhizopodes

Protozoaires ayant l'aptitude à émettre des **pseudopodes locomoteurs et préhensiles**.

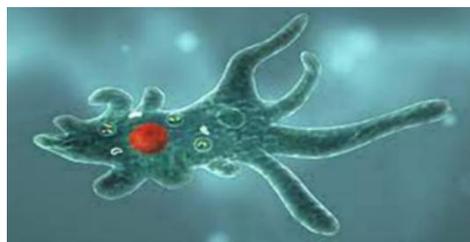
Selon le milieu où elles se trouvent, certaines espèces se présentent sous l'**état flagellé** ou à l'**état amiboïde**.

La classification des Rhizopodes se base sur la présence ou l'absence d'une coquille externe et sur la morphologie des pseudopodes.

Especies types (Classe des *Amibiens*, ordre des *Gymnamoebiens*)

Amoeba proteus* ou *Chaos diffluens

(**Amibe protéée** ou grande amibe d'eau douce) protozoaire d'eau douce de grande taille (**500 microns de long**). Multiplication par **division binaire**. Se nourrit d'autres protozoaires, d'algues et de petits métazoaires.



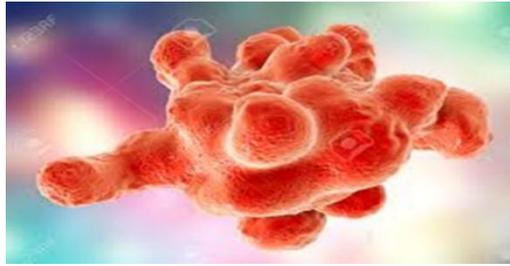
Amoeba proteus

Entamoeba histolytica

Amibe **pathogène** vivant dans l'intestin de l'homme et provoque la dysenterie amibienne (hémorragies et abcès).

On la rencontre sous 2 formes :

- **la forme végétative** dans l'intestin de l'homme (forme hématophage).
- **la forme kystique** dans la nature (forme de résistance).

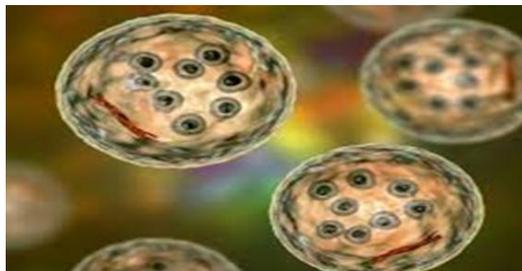


Entamoeba histolytica

Entamoeba coli

Commune dans le **gros intestin** de l'homme ou elle se nourrit de **débris alimentaires**, de **parasites** et de **leurs kystes** (bactéries, levures flagellés) mais jamais de sang.

Elle est considérée comme un auxiliaire utile.



Entamoeba coli

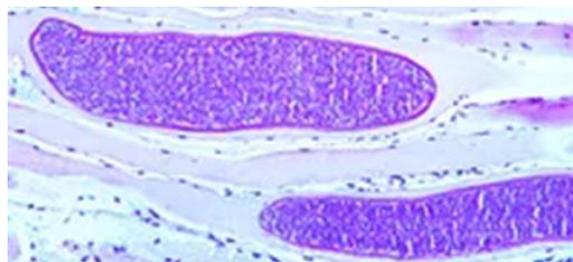
7.5.3. Embranchement des Sporozoaires

- Absence de flagelles, de pseudopodes et de cils
- Cycle de développement complexe
- Multiplication asexuée de type multiple (= **schizogonie multiple**)
- Ils se nourrissent par absorption des substances dissoutes dans l'organisme hôte.
- Ils émettent des **spores flagellées** pendant leur cycle reproducteur.
- Ils sont généralement des **parasites** transmis par un vecteur (moustique).

Espèces types

Sarcocystis tenella

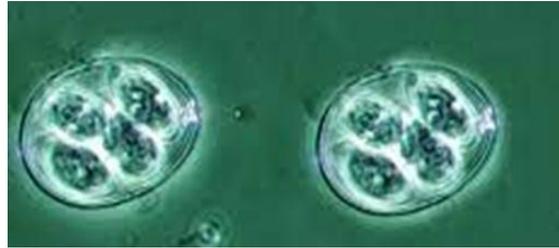
Parasite chez tous les moutons formant des kystes dans l'**oesophage**, le **diaphragme** et le **cœur**.



Sarcocystis tenella

Eimeria perforans

Parasite de l'intestin grêle du lapin et détermine la Coccidiose intestinale appelée maladie du gros ventre.



Eimeria perforans

Plasmodium falciparum

Est une espèce de protozoaire parasite, de l'embranchement des apicomplexes ou sporozoaires et du genre *Plasmodium*, responsable des cas les plus fréquents et les plus mortels de paludisme (la fièvre tierce maligne). Comme pour *Trypanosoma brucei*, il s'agit d'un organisme eucaryote unicellulaire et polymorphe (Terzic, 2019).

Plasmodium vivax : rarement mortel et constitue l'origine la plus fréquente de fièvres tierces bénignes (accès de fièvre tous les trois jours) dont les crises sont récurrentes ;

Plasmodium ovale : provoque également le paludisme tierce, il est endémique des régions de l'Afrique de l'Ouest, des Philippines, de l'Indonésie orientale et de la Papouasie-Nouvelle-Guinée ;

Plasmodium malariae, rencontré sur toute la planète, il est le seul responsable des fièvres quatraines (tous les quatre jours). Les infections sont bénignes mais peuvent durer parfois toute une vie ;

Plasmodium knowlesi : connu chez le singe, il a récemment été découvert chez l'Homme en Malaisie. Mal diagnostiqué, il était confondu avec *P. malariae* (Terzic, 2019).

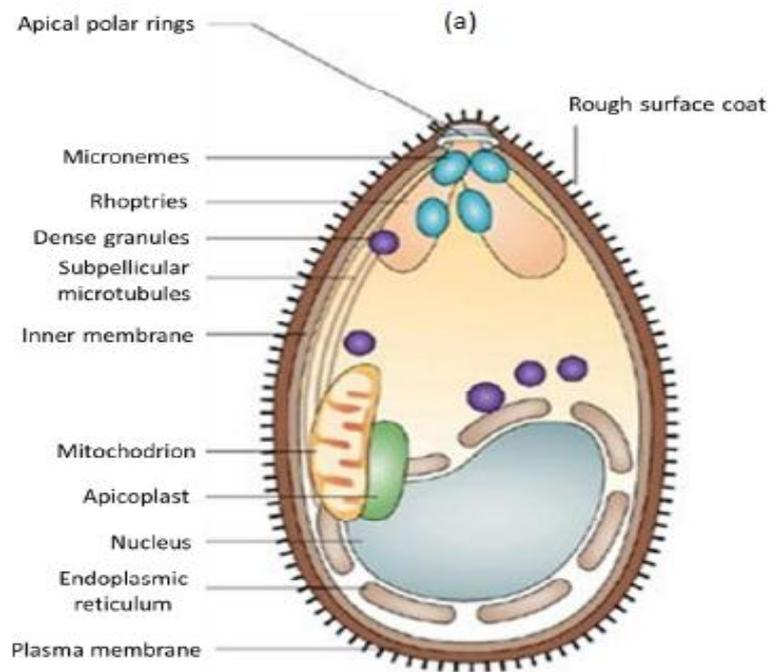


Figure 32 : Schéma général de *Plasmodium falciparum* au stade mérozoïtes (Baum *et al.*, 2006).

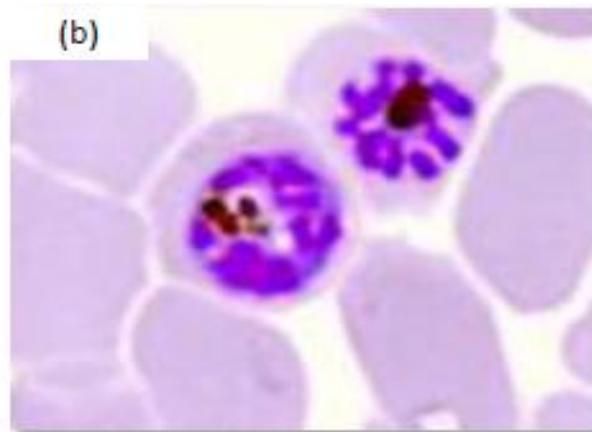


Figure 33 : Vue au microscope d'érythrocytes infectés par *Plasmodium falciparum*.

Le cycle de vie de *Plasmodium falciparum*

Le cycle de vie de *Plasmodium falciparum* est assez complexe et se divise en deux cycles principaux nécessitant chacun un hôte spécifique : l'Homme et l'anophèle femelle.

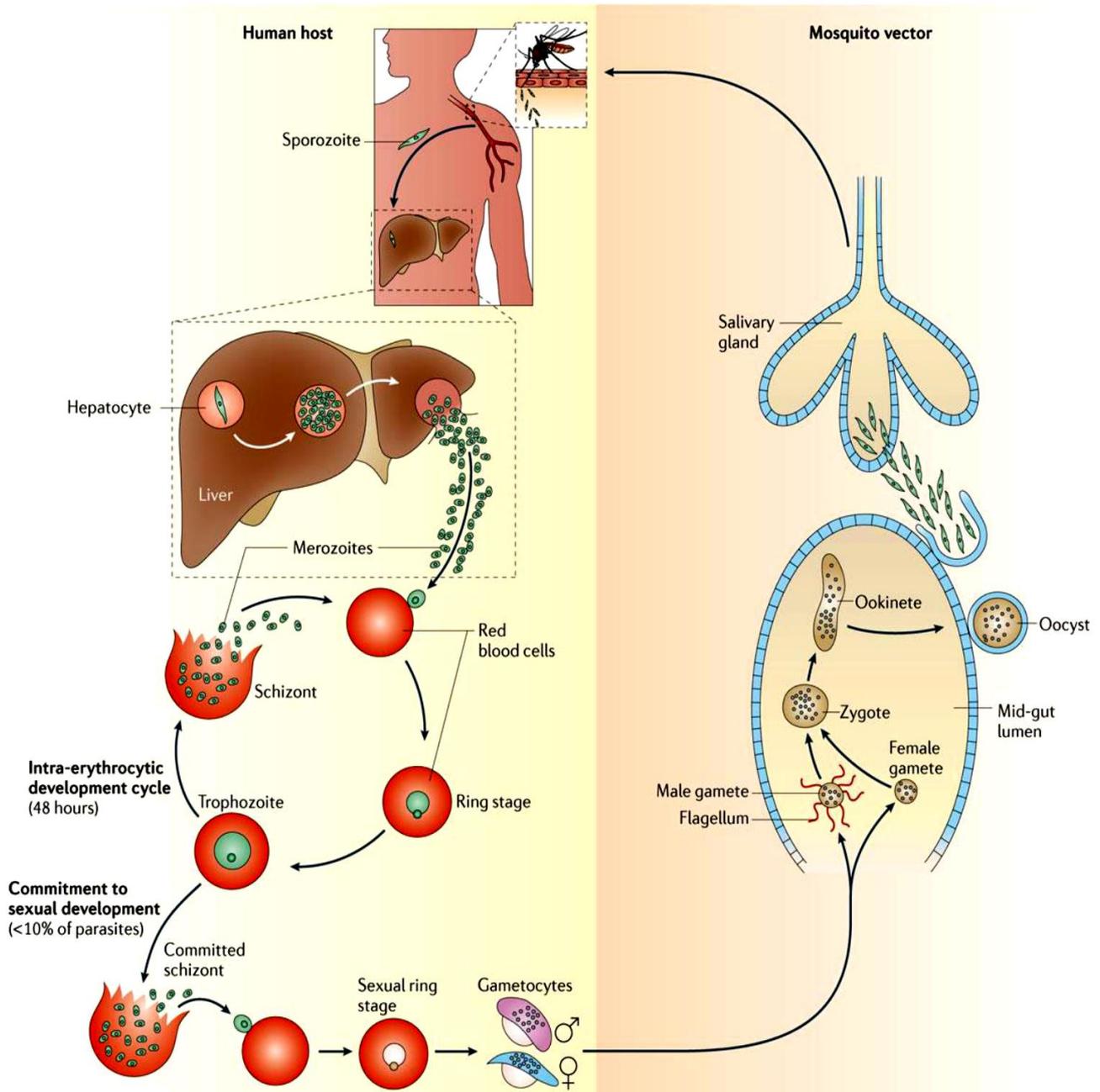


Figure 34 : Cycle de vie de *Plasmodium falciparum* (Josling *et al.*, 2015).

7.5.4. Embranchement Cnidosporides

Protozoaires parasites de l'intestin et des muscles des invertébrés et des poissons. Leur cycle de développement commence par un germe amiboïde (sporoplasme) qui s'accroît pour donner de grands sacs plurinucléés contenant des spores complexes à l'origine de tumeurs chez l'hôte. (Autrefois assimilés aux sporozoaires).

Classification et espèces types : On distingue principalement 3 classes :

1. Classe des Myxosporides

(*Myxa* = mucosité) parasites de poissons (Cyprinides) ou ils forment des kystes sous forme de taches blanches sur le corps. Spores complexe.

Myxobolus sp.

Parasite de *Barbus* (Barbeau) et *Leuciscus* (*Gardon*) qui s'infestent en absorbant des spores mures. Le développement de ces spores conduit à la formation de nombreuses tumeurs au niveau des muscles (5 à 6 cm de diamètre).

2. Classe des Actinosporides

Parasites d'invertébrés. Spores complexes avec filaments enroulés.

3. Classe des Microsporides

Parasites intracellulaires obligatoires de la majorité des groupes animaux. Spore unicellulaire très petits

Nosema bombycis : Agent de la Pébrine (*Pebræ* = poivre) qui infeste tous les tissus et même les œufs du ver à soie (transmission héréditaire).

Nosema apis : Agent de la dysenterie de l'abeille.

7.5.5. Embranchement des Ciliés (Infusoires)

• Définition : **Cilio** = **Cil Phoros** = qui porte ; Cils vibratiles ou organelles ciliaires

Protozoaires de grande taille présentent des cils à la surface de la cellule. Ils ont 2 noyaux.

Ils présentent divers modes de vie : libre (*Paramecie*) ; fixé par un pédoncule ; symbiote ; parasites (peu nombreux).

Ils vivent dans les eaux douces, saumâtres ou salées.

Leur systématique est fondée sur les caractères des cils et leur disposition.



Paramecium caudatum

Références bibliographiques

- Adams, D. G., & Duggan, P. S. (1999). Tansley Review No. 107. Heterocyst and akinete differentiation in cyanobacteria. *New Phytologist*, 144(1), 3-33.
- Anderson, Iain, Markus Göker, Matt Nolan, Susan Lucas, Nancy Hammon, Shweta Deshpande, Jan-Fang Cheng, et al. 2011. Complete Genome Sequence of the Hyperthermophilic Chemolithoautotroph *Pyrolobus fumarii* Type Strain (1A). *Standards in Genomic Sciences* 4(3) (July 1): 381–92.
- Ashford R.W. 2000. The leishmaniasis as emerging and reemerging zoonoses, *International Journal for Parasitology*. 30 (12–13), 1269-1281.
- Bapteste, E, C Brochier, Y Boucher. 2005. Higher-level classification of the Archaea: evolution of methanogenesis and methanogens. *Archaea* 1:353-363.
- Barinov A, Bolotin A, Langella P, Maguin E, Van De Guchte (2011). Genomics of the genus *Lactobacillus*. In « Lactic Acid Bacteria and Bifidobacteria: Current Progress in Advanced Research » Sonomoto and Yokota/ Caister Academic Press éd. Norfolk. United kingdom. pp. 3-32.
- Barka E., Vatsa P., Sanchez L., Gaveau-Vaillant N., Jacquard C., Klent HP., Clément C., Ouhdouche Y and Wezel GP van .2016. Taxonomy, physiology and natural products of Actinobacteria. *Microbial Mol Biolrev* 80 : 1 – 43 .
- Barnett HL and Hunter BB (1998) *Illustrated Genera of Imperfect Fungi*, 4th edn. APS Press, St. Paul, Minnesota USA (218 pp)
- Barns, S M, C F Delwiche, J D Palmer, and N R Pace. 1996. Perspectives on Archaeal Diversity, Thermophily and Monophyly from Environmental rRNA Sequences. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 93 (17) (August 20): 9188–93.
- Baum, J.; Papenfuss, A. T.; Baum, B.; Speed, T. P.; Cowman, A. F. *Nat. Rev. Microbiol.* 2006, 4, 621-628.
- Botany. 2001. *Algae: Native Ulva Rigida C Agardh 1823* : University of Hawaii at Manoa.
- Botton B., Breton A., Fèvre M. et al., 1990 – *Moisissures utiles et nuisibles. Importance industrielle*. Ed. Masson. 512 p.
- Bouchet P., Guignard J.L., Villard J., 1999 – *Les champignons. Mycologie fondamentale et appliquée*. Ed. Masson. 194 p.
- Brochier-Armanet, Céline, Bastien Boussau, Simonetta Gribaldo, and Patrick Forterre. 2008. Mesophilic Crenarchaeota: Proposal for a Third Archaeal Phylum, the Thaumarchaeota. *Nature Reviews. Microbiology* 6 (3) (March): 245–52.
- Broughton, W.J. 2003. *Roses by other names: taxonomy of the Rhizobiaceae*. *J. Bacteriol.* 185 : 2975–2979.
- Cabioc’h J. FJY, Le Toquin A., Boudouresque C.F., Meinesz A., Verlaque M. . 1992. *Guide des algues des mers d’Europe : Manche/Atlantique*. 1:272.
- Chabasse D. (2008). *Classification des champignons d’intérêt médical*. *Encyl Méd Chir (Editions scientifiques et Médicales Elsevier SAS, PARIS), Maladies infectieuses*, 8-088-B-10,9p.
- Cato, E. P., W. L. George, and S. M. Finegold. 1986. Genus *Clostridium*. Prazmowski 1880, 23AL, p. 1141-1200. In P. H. A. Sneath, N. S. Mair, M. E. Sharpe, and J. G. Holt (ed.), *Bergey's manual of systematic bacteriology*, vol. 2. Williams & Wilkins, Baltimore.

- Cavalier-Smith, T. 2002. The neomuran origin of archaeobacteria, the negibacterial root of the universal tree and bacterial megaclassification. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 52 : 7–76.
- Cavicchioli, Ricardo. 2006. Cold-adapted Archaea. *Nature Reviews. Microbiology* 4 (5) (May): 331–43.
- Chen, Lanming, Kim Bru, Marie Skovgaard, Peter Redder, Qunxin She, Elfar Torarinsson, Bo Greve, et al. 2005. The Genome of *Sulfolobus Acidocaldarius*, a Model Organism of the Crenarchaeota. 187 (14): 4992–4999.
- Corrieu G, Luquet FM (2008). The taxonomy of lactic acid bacteria. In: « Bactéries lactiques, de la génétique aux ferments ». TEC&DOC/ Lavoisier éd. Paris. France. pp 19-106.
- Crossman, L. C., Chen, H., Cerdeño-Tárraga, A. M., Brooks, K., Quail, M. A., Pineiro, S. A., et al. (2013). A small predatory core genome in the divergent marine *Bacteriovorax marinus* SJ and the terrestrial *Bdellovibrio bacteriovorus*. *ISME J.* 7, 148–160.
- Davet P. 1996. Vie microbienne du sol et production végétales, (edn) INRA. Paris.
- De Reviere, B., 2003. Biologie et phylogénie des algues, cours tome 2, Edition Belin n° 003512-01. France. 253pp.
- De Vos P, Garrity GM, Jones D, Krieg NR, Ludwig W, Rainey FA, Schleifer KH, Whitman WB (2009). Genus *Lactobacillus*, *Bacillus* and *Listeria*. In : « Bergey's manual of systematic bacteriology - The Firmicutes » Vol 3. Springer éd., New York. pp.19-511.
- DeLong, E F. 1992. Archaea in Coastal Marine Environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 89 (12) (June 15): 5685–9.
- Demain A.L. (1999). – Pharmaceutically active secondary metabolites of microorganisms. Mini-review. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 52, 455-463.
- Dopson, Mark, Craig Baker-austin, Andrew Hind, John P Bowman, Philip L Bond, and A P P L E Nviron M *icrobiol.* 2004. —Characterization of *Ferroplasma* Isolates and *Ferroplasma Acidarmanus* Sp . Nov ., Extreme Acidophiles from Acid Mine Drainage and Industrial Bioremediation Environments *70* (4): 2079–2088.
- Dvorak A., Johnston A. (1999). *Actinomycetes and Streptomyces*. New York. 23p.
- Euzéby J.P. (2011). - List of Bacterial Names with Standing in Nomenclature: a Folder Available on the Internet. Genera: *Nocardiosis*, *Streptomyces*, *Saccharomonospora*, *Actinoalloteichus*. (<http://www.bacterio.cicct.fr/>).
- Floc'h J. Y. LV. 2010. Les secrets des algues. :168.
- Flores, E. & Herrero, A. 2010. Compartmentalized function through cell differentiation in filamentous cyanobacteria. *Nature reviews. Microbiology.* 8:39–50.
- Fuhrman, J a, K McCallum, and a a Davis. 1992. Novel Major Archaeobacterial Group from Marine Plankton. *Nature* 356 (6365) (March 12): 148–9.
- Garon-Lardiere, S., 2004. Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge *Asparagopsis armata* (Bonne maisoniales). Thèse de doctorat en chimie. Fac. Sci. Université de Bretagne occidentale, France. 332p.
- Garrity, G. M., J. Leventhal, and T. G. Lilburn. 2005. Taxonomic Outline of the Prokaryotes. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, Second Edition, Release 6.0.* ed. Springer-Verlag, New York.

Goodfellow M. and Fiedler H.P. (2010). - A guide to successful bioprospecting: informed by actinobacterial systematic. *Antonie Leeuwenhoek.*, 98, 119-142.

Grosse-Herrenthey, A., T. Maier, F. Gessler, R. Schaumann, H. Bohnel, M. Kostrzewa, and M. Kruger. 2008. Challenging the problem of clostridial identification with matrix-assisted laser desorption and ionization-time-of-flight mass spectrometry (MALDI-TOF MS). *Anaerobe* 14:242-249.

Harold, R., Stanier, RY 1955. Les genres *Leucothrix* et *Thiothrix* . *Examens bactériologiques* 19 : 49–58.

Holt J.G., Krieg N.R., Sneath P.H.A., Staley J.T. and Williams S.T. (1994). - *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*, Ninth Edition. Williams and Wilkins editors, Baltimore, p. 787.

Huber, Harald, Michael J Hohn, Reinhard Rachel, Tanja Fuchs, Verena C Wimmer, and Karl O Stetter. 2002. A New Phylum of Archaea Represented by a Nanosized Hyperthermophilic Symbiont. *Nature* 417 (6884) (May 2): 63–7.

Huisman, J., Codd, G.A., Paerl, H.W., Ibelings, B.W., Verspagen, J.M.H. & Visser, P.M. 2018. Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*. 16:471–83.

Ishida, T., Watanabe, M. M., Sugiyama, J., & Yokota, A. (2001). Evidence for polyphyletic origin of the members of the orders of Oscillatoriales and Pleurocapsales as determined by 16S rDNA analysis. *FEMS Microbiology Letters*, 201(1), 79.

Josling, G. A.; Llinás, M. *Nat. Rev. Microbiol.* 2015, 13, 573-587.

Komárek, J., Kastovsky, J., Mares, J., & Johansen, J. R. (2014). Taxonomic classification of cyanoprokaryotes (cyanobacterial genera) 2014, using a polyphasic approach. *Preslia*, 86(4), 295-335.

Langousis, G.; Hill, K. L. *Nat. Rev. Microbiol.* 2014, 12, 505–518.

Leveau, J.Y. et Bouix, M. (1993). Les levures. Dans : *Microbiologie industrielle, les micro-organismes d'intérêt industriel*. Eds. Tech. et Doc. Lavoisier. Paris, pp : 2-39.

Lechevalier M.P., Prauser H., Labeda D.P. and Ruan J.S. (1986). – Two new genera of nocardioform actinomycetes: *Amycolata* gen. nov. and *Amycolatopsis* gen. nov. *Int. J. Syst. Bacteriol.*, 36, 29-37.

Lee R.E., 1989. *Phycology*. Cambridge, UK : Cambridge University Press. 645 p.

Liu, Yuchen, and William B Whitman. 2008. Metabolic, Phylogenetic, and Ecological Diversity of the Methanogenic Archaea. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1125 (March): 171–89.

Ludwig, W., K. H. Schleifer, and W. B. Whitman. 2009. Revised Road Map to Phylum Firmicutes. *Bergey's Outline* 3:1-32.

Mardanov, Andrey V, Nikolai V Ravin, Vitali a Svetlitchnyi, Alexey V Beletsky, Margarita L Miroshnichenko, Elizaveta a Bonch-Osmolovskaya, and Konstantin G Skryabin. 2009. Metabolic Versatility and Indigenous Origin of the Archaeon *Thermococcus Sibiricus*, Isolated from a Siberian Oil Reservoir, as Revealed by Genome Analysis. *Applied and Environmental Microbiology* 75 (13) (July): 4580–8.

Mathiew R. 1995. *Biologie Campbell*, (edn) ISBN Canada.

McGregor, G. B. (2013). Freshwater Cyanobacteria of North-Eastern Australia: 2. Chroococcales. *133(1)*, 1-130.

Mégraud, F. and Broutet, N. (2000) Epidemiology, acquisition and transmission of *Helicobacter pylori*. *Rev Prat*, 50, 1414-1417.

- Meyer, F. and E. B. Shaw (1920). "A Comparison of the Morphologic, Cultural and Biochemical Characteristics of *B. Abortus* and *B. Melitensis*: Studies on the Genus *Brucella* Nov. Gen. I " *J Infect Dis* 27(3): 173-184.
- Mihajlovski, Agnès, Monique Alric, and Jean-François Brugère. 2008. —A Putative New Order of Methanogenic Archaea Inhabiting the Human Gut, as Revealed by Molecular Analyses of the *mcrA* Gene. *Research in Microbiology* 159 (7-8): 516–21.
- Mobini-Dehkordi M and Fahime A.J. 2012. Application of alpha-amylase in biotechnology. *Journal of Biology and today's world* : 39-50.
- Mukhtar S., Zaheer A., Aiysha D., Abdulla Malik K and Mehnaz S. 2017. Actinomycetes: A Source of Industrially Important Enzymes. *J Proteomics Bioinform* 10: 316-319.
- Murray, R. G. E. 1984. The higher taxa, or, a place for everything...?, p. 31-34. In N.R. KRIEG and J. G. HOLT (ed.), *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, vol. 1. Williams & Wilkins Co, Baltimore.
- NHS. 2007. Identification of *Staphylococcus* species, *Micrococcus* species and *Rothia* species. Standards Unit, Evaluations and Standards Laboratory 2.1:1-17.
- Nunoura, Takuro, Hisako Hirayama, Hideto Takami, Hanako Oida, Shinro Nishi, Shigeru Shimamura, Yohey Suzuki, et al. 2005. Genetic and Functional Properties of Uncultivated Thermophilic Crenarchaeotes from a Subsurface Gold Mine as Revealed by Analysis of Genome Fragments. *Environmental Microbiology* 7 (12) (December): 1967–84.
- Nunoura, Takuro, Yoshihiro Takaki, Jungo Kakuta, Shinro Nishi, Junichi Sugahara, Hiromi Kazama, Gab-Joo Chee, et al. 2011. Insights into the Evolution of Archaea and Eukaryotic Protein Modifier Systems Revealed by the Genome of a Novel Archaeal Group. *Nucleic Acids Research* 39 (8) (April): 3204–23.
- Nwe, N. and W. F. Stevens. 2008. Production of chitin and chitosan and their applications in the medical and biological sector. In *Recent Research in Biomedical Aspects of Chitin and Chitosan*, ed. H. Tamura, pp. 161–176. Research Signpost, Trivandrum, Kerala, India.
- Offre, Pierre, Anja Spang, and Christa Schleper. 2013. Archaea in Biogeochemical Cycles. *Annual Review of Microbiology* 67 (1) (November): 130628184403000.
- O'Gara F., Dowling D. N., Boesten B. 2008. *Molecular Ecology of Rhizosphere Microorganisms: Biotechnology and the Release of GMOs*. John Wiley & Sons: Weinheim. Pp: 192.
- Paul, Kristina, James O Nonoh, Lena Mikulski, and Andreas Brune. 2012. Methanoplasmatales, 'Thermoplasmatales-related Archaea in Termite Guts and Other Environments, Are the Seventh Order of Methanogens. *Applied and Environmental Microbiology* 78 (23) (December): 8245–53.
- Perevalova, Anna a, Salima Kh Bidzhieva, Ilya V Kublanov, Kai-Uwe Hinrichs, Xiaolei L Liu, Andrey V Mardanov, Alexander V Lebedinsky, and Elizaveta a Bonch-Osmolovskaya. 2010. *Fervidicoccus Fontis* Gen. Nov., Sp. Nov., an Anaerobic, Thermophilic Crenarchaeote from Terrestrial Hot Springs, and Proposal of *Fervidicoccaceae* Fam. Nov. and *Fervidicoccales* Ord. Nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 60 (Pt 9) (September): 2082–8.
- Prokofeva, M I, N a Kostrikina, T V Kolganova, T P Tourova, a M Lysenko, a V Lebedinsky, and E a Bonch-Osmolovskaya. 2009. Isolation of the Anaerobic Thermoacidophilic Crenarchaeote *Acidilobus Saccharovorans* Sp. Nov. and Proposal of *Acidilobales* Ord. Nov., Including *Acidilobaceae* Fam. Nov. and *Caldisphaeraceae* Fam. Nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 59 (Pt 12) (December): 3116–22.

Redecke, L.; *et al.*, Science 2013, 339, 227–230.

Redecker D. (2002). New views on fungal evolution based on DNA markers and the fossil. *Research in Microbiology*. 153: 125-130.

Rhouma A, Boubaker A, Ferchichi A (2004). Efficacy of the non pathogenic *Agrobacterium* strains K84 and K1026 against crown gall in Tunisia. *Phytopathologia Mediterranea*, 43: 167-176.

Roh, Seong Woon, Young-Do Nam, Seong-Hyeuk Nam, Sang-Haeng Choi, Hong-Seog Park, and Jin-Woo Bae. 2010. Complete Genome Sequence of *Halalkalicoccus Jeotgali* B3(T), an Extremely Halophilic Archaeon. *Journal of Bacteriology* 192 (17) (September): 4528–9.

Rudenko, G. *Essays Biochem.* 2011, 51, 47–62.

Schopf, J. W. (2002). The Fossil Record: Tracing the Roots of the Cyanobacterial Lineage. In B. Whitton & M. Potts (Eds.), *The Ecology of Cyanobacteria* (pp. 13-35): Springer Netherlands.

Senal J., Fraselle J., Impens R., Kummert J., Lepoivre Ph., Meulmans M., Seilleur P., Vandevéken J., et Viseur J. 1993. *Traité de pathologie végétale*. Gembloux. Belgique.

Siebers, Bettina, Melanie Zaparty, Guenter Raddatz, Britta Tjaden, Sonja-Verena Albers, Steve D Bell, Fabian Blombach, et al. 2011. —The Complete Genome Sequence of *Thermoproteus Tenax*: a Physiologically Versatile Member of the Crenarchaeota. *PloS One* 6 (10) (January): e24222.

Skinner, F.A. and Quesnel, L.B. (1978). *Streptococci*. Symposium N° 7, The Society for Applied Bacteriology, Academic Press. London.

Schallmeyer M, Singh A & Ward OP (2004) Developments in the use of *Bacillus* species for industrial production. *Can. J. Microbiol.* 50: 1–17.

Sonenshein AL, Hoch JA & Losick R (2002) *Bacillus subtilis* and Its Closest Relatives : from genes to cells Washington DC: American Society for Microbiology Press

Stackebrandt, E. 2004. The phylogeny and classification of anaerobic bacteria, p. 15- 19.

Taylor, J.W., Jacobson, D. J., Kroken, S., Kasuga, T., Geiser, D. M., Hibbet, D. S., Fisher, M. C. (2000). Phylogenetic species recognition and species concepts in fungi. *Fungal genetics and biology*, 31(1) : 21-32.

Tenaillon, O., D. Skurnik, B. Picard, and E. Denamur. 2010. The population genetics of commensal *Escherichia coli* . *Nature Reviews Microbiology*. 8 (3):207-217.

Terzic Vida. 2019. Utilisation de la chimie « click » pour visualiser la pénétration de principes actifs dans les protozoaires parasites. UNIVERSITE PARIS-SACLAY. Université Paris-Saclay, p 259.

Thepault, A. (2018). Capacité de différents outils de typage moléculaire pour tracer *Campylobacter jejuni* et identifier l'origine de contamination en cas de campylobactériose. Thèse de doctorat. Microbiologie, virologie, parasitologie. Université de RENNES 1. p249.

Tortora G. J., Funke B.R., Case C L. (2003), « Introduction à la microbiologie ».ERPI

Tsujibo, H., Okami, Y., Tanno, H., Inamori, Y. 2003. Cloning, sequence and expression of a chitinase gene from a marine bacterium, *Alteromonas* sp. strain O-7. *Journal of Bacteriology*: 175-181.

Varon E.. Epidemiology of acute bacterial meningitis in adult patients in France. *Médecine et maladies infectieuses* 39 (2009) 432–444

Von Jan, Mathias, Alla Lapidus, Tijana Glavina Del Rio, Alex Copeland, Hope Tice, Jan-Fang Cheng, Susan Lucas, et al. 2010. Complete Genome Sequence of *Archaeoglobus Profundus* Type Strain (AV18). *Standards in Genomic Sciences* 2 (3) (January): 327–46.

Vonothini G., Murugan M., Sivakumar K., and Sudha S. 2008. Optimization of protease production by an actinomycete Strain, PS-18A isolated from an estuarine shrimp pond. *Agriculture and Forestry Journal* 7(18) :3225-3230.

Waters, Elizabeth, Michael J Hohn, Ivan Ahel, David E Graham, Mark D Adams, Mary Barnstead, Karen Y Beeson, et al. 2003. The Genome of *Nanoarchaeum Equitans*: Insights into Early Archaeal Evolution and Derived Parasitism. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100 (22) (October 28): 12984–8.

Watve M.G., Tickoo R., Jog M.M. and Bhole B.D. (2001). - How many antibiotics are produced by the genus *Streptomyces* ? *Arch. Microbiol.*, 176, 386-390.

Whitton, B. A. (2011). Cyanobacteria (Cyanophyta). In D. M. John, B. A. Whitton & A. J. Brook (Eds.), *The freshwater algal flora of the British Isles. An identification guide to freshwater and terrestrial algae* (Second ed., pp. 31-158). Cambridge: Cambridge University Press.

Wiegel, J., R. Tanner, and F. A. Rainey. 2006. Chapter 1.2.20. An Introduction to the Family Clostridiaceae, p. 654–678, *The Prokaryotes*, vol. 4. Springer, New York.

Woese, C R, L J Magrum, and G E Fox. 1978. Archaeobacteria. *Journal of Molecular Evolution* 11 (3) (August 2): 245–51.

Woese, C.R., Stackebrandt, E., Weisburg, W.G., Paster, B.J., Madigan, M.T., Fowler, V.J., Hahn, C.M., Blanz, P., Gupta, R., Nealson, K.H., et Fox, G.E. 1984. The phylogeny of purple bacteria: the alpha subdivision. *Syst. Appl. Microbiol.* 5 : 315–326.

Wolf, M., T. Muller, T. Dandekar, and J. D. Pollack. 2004. Phylogeny of Firmicutes with special reference to *Mycoplasma* (Mollicutes) as inferred from phosphoglycerate kinase amino acid sequence data. *Int J Syst Evol Microbiol* 54:871-875.

Woese, C. R., O. Kandler, and M. L. Wheelis. 1990. Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proc Natl Acad Sci U S A* 87:4576-4579.

Yang, D. and Woese, C.R. (1989). Phylogenetic structure of the *Leuconostocs*: an interesting case of rapidly evolving organism. *Systematic and Applied Microbiology*, 12. Pp 145-149.

Zemanick ET, Sagel SD, Harris JK 2011. The airway microbiome in cystic fibrosis and implications for treatment. *Current Opinion Pediatrics*, 23(3), 319-324.

Zvyagintseva, I.S., and A.L. Tarasov. 1988. Extreme Halophilic Bacteria from Saline Soils. *Microbiology* v. 56(5) p (March 1).