

Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique
Université de Saida Dr. Tahar Moulay
Faculté des sciences
Département de Biologie



Systematique Microbienne

Mycètes, Algues unicellulaires, et Virus

Ghellai lotfi



Ce polycopié de cours est destiné aux étudiants de la première année Master Sciences Biologiques spécialité « Microbiologie Appliquée ». Il est rédigé en fonction du programme sur lequel les candidats sont susceptibles d'être interrogés.

Sous la direction de
M. Ghellai lotfi
Enseignant Chercheur
Département de Biologie
Faculté des Sciences
Université de Saida

Illustration de couverture :

Aspergillus parasiticus. Boîte de Pétri avec des recombinauts parasexuels déficients en biosynthèse de mélanine conduisant à des spores incolores, et/ou déficients en biosynthèse des aflatoxines provoquant l'accumulation de pigments jaune vif ou orange. *J.F. Peberdy*

Avant Propos

La systématique microbienne correspond à l'étude des microorganismes et des relations susceptibles d'exister entre eux. Cette discipline brasse à la fois l'identification, la classification ou taxinomie, la nomenclature et les analyses liées à l'étude de l'évolution des organismes et leur phylogénie.

La notion « microbe » désigne tout organisme vivant dont l'observation et l'étude de l'organisation cellulaire ne peuvent être faites qu'à l'aide du microscope. Le présent cours, intitulé « Systématique microbienne » regroupe différentes informations d'ordre taxonomique portant particulièrement sur les microorganismes eucaryotes uni et pluricellulaires tels que les mycètes vrais, les pseudo-champignons, et les micro-algues. Les virus qui sont des organismes acaryotes sont aussi inclus dans ce cours.

Le monde microbien est un univers grouillant d'une diversité extravagante. Cette diversité est illustrée par des mécanismes indénombrables. Entre autres, c'est grâce à leur capacité à s'adapter à des environnements aussi variés, leur tolérance, leurs voies métaboliques communes et des conséquences de leurs activités écologiques et transformations géochimiques que ces microorganismes ont existé depuis l'antiquité et survivront probablement à l'éternité.

À ce jour, le nombre reconnu de bactéries, d'archées, de mycètes, de miro-algues et de virus, est très faible comparativement au nombre probable estimé à plusieurs millions. Un fort pourcentage de ces microorganismes reste encore ignoré jusqu'à l'heure actuelle.

Table des Matières

| | |
|--|-----------|
| Chapitre 1 : Introduction au monde des champignons..... | 1 |
| 1. Définitions..... | 1 |
| 2. Origine et place des champignons dans le monde vivant..... | 1 |
| 3. Caractères microbiologiques et physiologiques de base | 1 |
| 3.1. Levures..... | 2 |
| 3.2. Moisissures..... | 3 |
| 4. Taxinomie des mycètes..... | 3 |
| 4.1. Méthodes classiques..... | 3 |
| 4.2. Méthodes moléculaires..... | 4 |
| Chapitre 2 : Systématique des <i>Eumycota</i>..... | 6 |
| 1. Règne des <i>Eumycota</i> (Mycètes vrais) | 6 |
| 1.1. <i>Ascomycota</i> | 6 |
| 1.1.1. Arbre taxinomique des <i>Ascomycota</i> | 7 |
| 1.2. <i>Basidiomycota</i> | 8 |
| 1.2.1. Arbre taxinomique des <i>Basidiomycota</i> | 9 |
| 1.3. <i>Zygomycota</i> | 10 |
| 1.3.1. Arbre taxinomique des <i>Zygomycota</i> | 10 |
| 1.4. <i>Chytridiomycota</i> | 11 |
| 1.4.1. Arbre taxinomique des <i>Chytridiomycota</i> | 12 |
| 1.5. <i>Blastocladiomycota</i> | 12 |
| 1.5.1. Arbre taxinomique des <i>Blastocladiomycota</i> | 12 |
| 1.6. <i>Microsporidia</i> | 13 |
| 1.6.1. Arbre taxinomique des <i>Microsporidia</i> | 13 |
| 1.7. Deuteromycètes..... | 14 |
| 1.7.1. Arbre taxinomique des Deuteromycètes..... | 14 |
| Chapitre 3 : Systématique des Pseudo-champignons | 15 |
| 1. Généralités..... | 15 |
| 2. Classification des pseudo-champignons..... | 15 |
| 2.1. Classification selon l'aspect morphologique..... | 15 |
| 2.2. Classification phylogénique..... | 16 |
| 3. Règne des moisissures visqueuses ou organismes fongiformes..... | 17 |
| 3.1. <i>Myxomycota</i> (<i>Amoebozoa</i>) | 17 |
| 3.2. <i>Plasmodiophoromycota</i> (<i>Rhizaria</i>) | 19 |
| 3.3. <i>Acrasiomycota</i> (<i>Heterolobozoa</i>) | 20 |
| 3.4. <i>Dictyosteliomycota</i> | 21 |
| 4. Règne des <i>Straminipila</i> ou <i>Heterokonta</i> ou <i>Chromista</i> | 22 |
| 4.1. <i>Oomycota</i> | 23 |
| 4.2. <i>Hyphochytridiomycota</i> | 23 |

| | |
|--|----|
| 4.3. <i>Labyrinthulomycota</i> | 23 |
| Chapitre 4 : Systématique des algues unicellulaires | 24 |
| 1. Généralités..... | 24 |
| 2. Habitat..... | 24 |
| 3. Structure..... | 24 |
| 4. Reproduction..... | 25 |
| 5. Culture..... | 26 |
| 6. Type trophique..... | 27 |
| 7. Taxonomie..... | 27 |
| Chapitre 5 : Virus | 28 |
| 1. Le monde viral..... | 28 |
| 2. Définitions..... | 28 |
| 3. Structure..... | 30 |
| 4. Notion de taille..... | 31 |
| 5. Taxonomie..... | 31 |

Chapitre 1 : Introduction au monde des Champignons

1. Définitions

Le monde des Champignons est constitué d'un groupe très hétérogène d'organismes eucaryotes possédant, généralement, un appareil végétatif constitué de filaments (mycélium) ou parfois unicellulaire (levure), se nourrissant par absorption et caractérisés par une paroi cellulaire riche en chitine et β -glucanes. La reproduction est sexuée ou asexuée.

Les champignons sont également appelés Fungi, Fonges, Mycètes, ou encore Mycota.

Classiquement, On distingue trois groupes majeurs de champignons : Les moisissures (microorganismes filamenteux), Les levures (microorganismes unicellulaires) et Les champignons macroscopiques.

Environ 80 000 à 120 000 espèces de Mycètes ont été décrites à ce jour, mais la majorité sont des microorganismes incultivés et les estimations des mycologues de leur nombre total vont de 0,8 à 5 millions.

Par ailleurs, le positionnement exact du terme champignon n'est pas une question simple et n'est aujourd'hui toujours pas totalement résolu.

- Au sens strict « sensu stricto » : les champignons « vrais » ayant un ancêtre commun (monophylétique).
- Au sens large « sensu lato » : champignon est polyphylétique (mal « classé » sur le plan évolutif et présentant plusieurs origines différentes et indépendantes).

2. Origine et place des champignons dans le monde vivant

Selon les études scientifiques la vie est apparue il y a 3,5-3,9 milliard d'années. Les bactéries, les archéobactéries et les cellules eucaryotes se sont différenciées depuis 2,8-3,2 milliard d'années. L'âge des Fungi remonte à 900 million d'années (Berbee et Taylor, 2001). Des structures fossilisées ressemblant à des hyphes ont été découvertes dans les sédiments datant de 1 milliard d'années (Butterfield, 2005).

3. Caractères microbiologiques et physiologiques de base

3.1. Levures

Les levures sont des champignons eucaryotes unicellulaires, non photosynthétiques, immobiles et Le corps végétatif est dit: Thalle. Leur taille peut atteindre jusqu'à 25-30 μm , certaines font un pseudomycélium comme *Brettanomyces* ou un véritable mycélium comme *Candida albicans*.

La paroi des levures est caractérisée par trois polysaccharides: mannanes, glucane et la chitine. Le cytoplasme renferme les organites habituels des organismes supérieurs tels que: mitochondries, appareil de Golgi, Réticulum endoplasmique, ribosomes et vacuoles. La membrane cytoplasmique est riche en stérols (ergostérol et zymostérol) et contient également des protéines et phospholipides.

Généralement, la plupart des levures se multiplient à des températures comprises entre 25°C et 30°C. Par ailleurs, il existe des levures :

- Psychrophiles (Température max 20°C, Température min 5°C) qui se développent dans des sols et eaux de l'Antarctique,
- Thermophiles: (T°max 48-50°C, T°min 20°C) vivent dans le tube digestif des animaux.

Les levures ne sont pas thermorésistantes, sont sensibles à la congélation et la lyophilisation.

La plupart des souches ne peuvent pas se développer à une activité d'eau (aw) moins de 0.90. Certaines sont osmotolérantes (aw 0.70) et même xérotolérantes (aw 0.60).

Les levures sont aérobies strictes ou aéroanaérobies facultatives, certaines préfèrent un métabolisme fermentaire même en présence d'oxygène (*Saccharomyces*, *Brettanomyces*, etc), d'autre préfèrent un métabolisme respiratoire s'il y a de l'O₂ (*Candida*, *Kluyveromyces*, etc)

3.2. Moisissures

Les moisissures sont des champignons eucaryotes pluricellulaires, hétérotrophes vivant en symbiose avec des végétaux, parasitent les végétaux et les animaux, certaines sont des saprophytes poussant sur des déchets organiques ou produits alimentaires.

Les moisissures sont douées de propriétés lytiques : lipolytiques, amilolytiques, protéolytiques, cellulolytiques, pectinolytiques, etc. C'est pour cette raison qu'elles sont considérées comme des agents d'altération. Il existe des phytopathogènes (très néfastes pour la production de matières alimentaires brutes, fruits et légumes), des dermatophytes (appartenant aux genres *Trichophyton*, *Microsporum* et *Epidermophyton*), et des toxigènes sécrétant des mycotoxines. Cependant, certaines moisissures sont de véritables alliés utiles (fromagerie, enzymes, etc.).

4. Taxinomie des mycètes

La signification du terme champignon est équivoque, le positionnement exact de ce terme dans le monde du vivant est encore mal défini.

4.1. Méthodes classiques

Les méthodes classiques de la taxinomie sont essentiellement fondées sur certains caractères morphologiques, microscopiques et macroscopiques tels que la composition chimique de la paroi cellulaire (chitine, cellulose...), la croissance de l'hyphe, la présence des pigments, etc.

- ❖ Chez les moisissures, la classification est basée sur des caractères purement morphologiques :
 - la présence de cloisons le long du mycélium : mycélium cloisonné (ou septé, la cloison porte le nom de septum) chez les Septomycètes ; mycélium non cloisonné chez les Zygomycètes (*Mucor*),
 - Aspect macroscopique du thalle
 - Son élévation
 - Sa couleur (face et revers)
 - La morphologie des organes de reproduction asexuée (ou sexuée). Les différentes pièces de ces fructifications portent un nom spécifique : blastospores, thallospores, sporangiospores, arthrospores, chlamydospores (Figure 1).

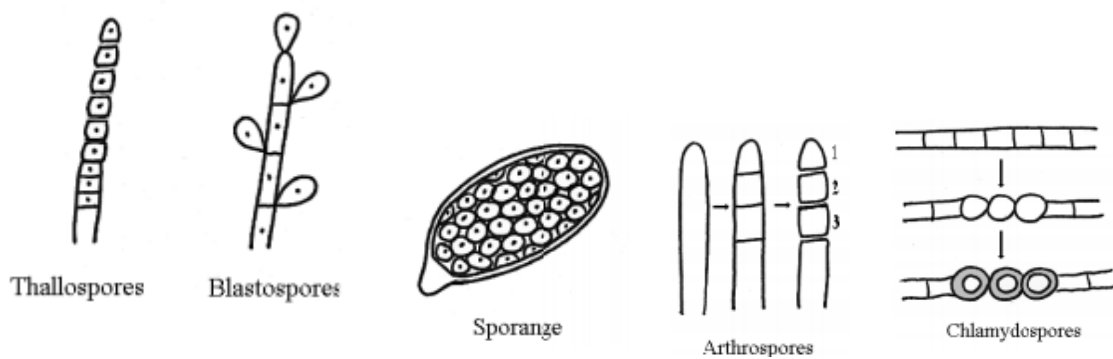


Figure 1. Organes de reproduction chez les moisissures

NB. Les chlamydospores sont des spores de multiplication végétative à paroi épaisse qui leur permet de subsister sur le sol ou dans les débris végétaux en décomposition. Contrairement aux autres spores, les chlamydospores ne possèdent pas de mécanismes de libération permettant leur dissémination à maturité.

❖ La classification des levures est basée au moins au départ sur les caractères morphologiques (filamentation, chlamydosporulation, présence de capsule). Généralement, les colonies ne filamentent pas et sont pour la plupart blanchâtres. Les levures sont classées dans les deux embranchements des *Ascomycètes* et *Basidiomycètes*. Certaines levures qui sont dénuées du cycle sexué de reproduction sont classées dans l'embranchement artificiel des *Deutéromycètes* (*Fungi imperfecti*).

On distingue les levures vraies et les levures imparfaites

- **Levures vraies** : celles produisant des spores, encore appelées levures sporogènes. Ces levures sont soit des hémiascomycètes (levures ascosporegènes) soit des basidiomycètes (levures basidiosporogènes).
- **Levures imparfaites** : encore appelées levures fausses ne produisent pas de spores et appartiennent au Deuteromycètes.

4.2. Méthodes moléculaires

Les méthodes modernes utilisées en systématique des microorganismes eucaryotes sont basées soit directement sur l'étude des séquences d'ADN, soit sur les protéines qui y sont codées, en particulier les enzymes.

- Analyse des isoenzymes : Les isoenzymes correspondent à différentes formes d'une même enzyme, catalysant la même réaction, mais dont les propriétés physico-chimiques (charge électrique, taille, etc.) sont différentes. Les isoenzymes peuvent être d'origine cytosolique ou plastidique.
- La séparation des fragments d'ADN par plusieurs méthodes tels que la RFLP (restriction fragment length polymorphisms), RAPD (random amplified polymorphic DNA)

La technique RFLP repose sur la digestion d'un ADN cible par une ou plusieurs enzymes de restriction spécifiques des sites de restriction portés par l'ADN. Après électrophorèse, les fragments séparés sont hybridés avec un ADN sonde, provenant souvent de banques d'ADN génomique ou complémentaire. Cette sonde peut provenir d'une espèce proche de l'espèce à étudier (sonde hétérologue).

- Les séquences spécifiques de l'ADN universellement présents et remplissant une fonction homologue dans toutes les formes de vie: chez les eucaryotes les séquences les plus ciblées sont ceux codant :
 - l'ARNr 18S et 28S
 - les séquences d'AND non codantes (**ITS**, internal transcribed spacers)
- Autres séquences: codant le cytochrome oxidase (COX), les tubulines ou autres protéines ayant des fonctions stables sont actuellement très utilisées dans un but phylogénique.

Chapitre 2 : Systématique des *Eumycota*

1. Règne des *Eumycota* (Mycètes vrais)

Le sous règne des *Fungi* fait partie du règne des *Eumycota* et comporte les **phylums** suivants : *Ascomycota*, *Basidiomycota*, Deuteromycètes, *Zygomycota* (actuellement répartis entre deux phylums : *Zoopagomycota* et *Mucoromycota*), *Chytridiomycota*, *Blastocladiomycota* et *Microsporida*. Les membres de ce règne sont des eucaryotes uni ou pluricellulaires se caractérisant par :

- la présence d'une paroi cellulaire de type chitineuse,
- la présence des organites intracellulaires habituels,
- l'état unicellulaire, pseudo-mycélium ou un véritable mycélium,
- l'absorption comme mode de nutrition.

1.1. *Ascomycota*

Les *Ascomycota* représentent approximativement 75% de tous les mycètes décrits actuellement. Les membres de ce groupe se caractérisent par la formation d'un asque contenant des ascospores lors de la reproduction sexuée (Figure 2). Le thalle est septé (hyphes cloisonnés). L'arbre phylogénique des Ascomycètes est représenté dans la figure 4.

Cet embranchement regroupe la majorité des champignons dont la reproduction sexuée manque.

Exemples de quelques espèces :

Penicillium chrysogenum

(penicilline)

Aspergillus flavus (aflatoxine)

Saccharomyces cerevisiae

Candida albicans (vaginitis)

Morchella esculenta

(champignon comestible)

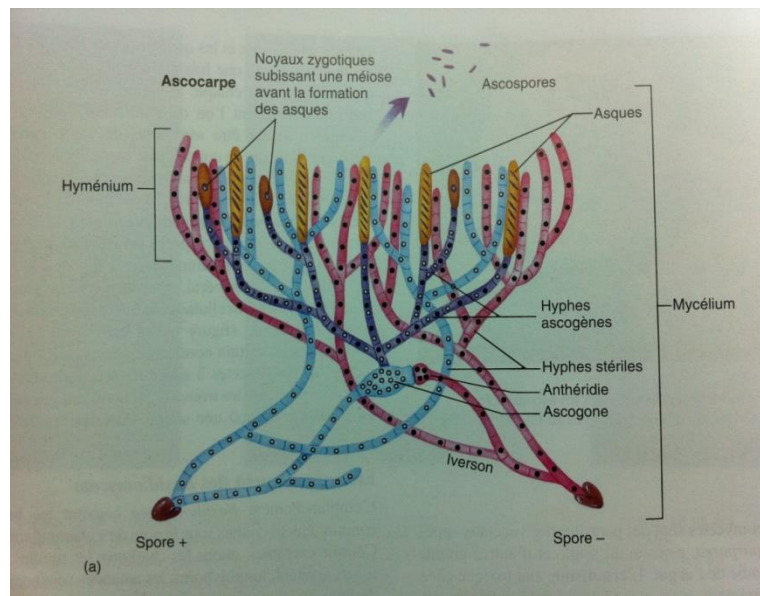


Figure 2. Cycle de reproduction chez les *Ascomycota*

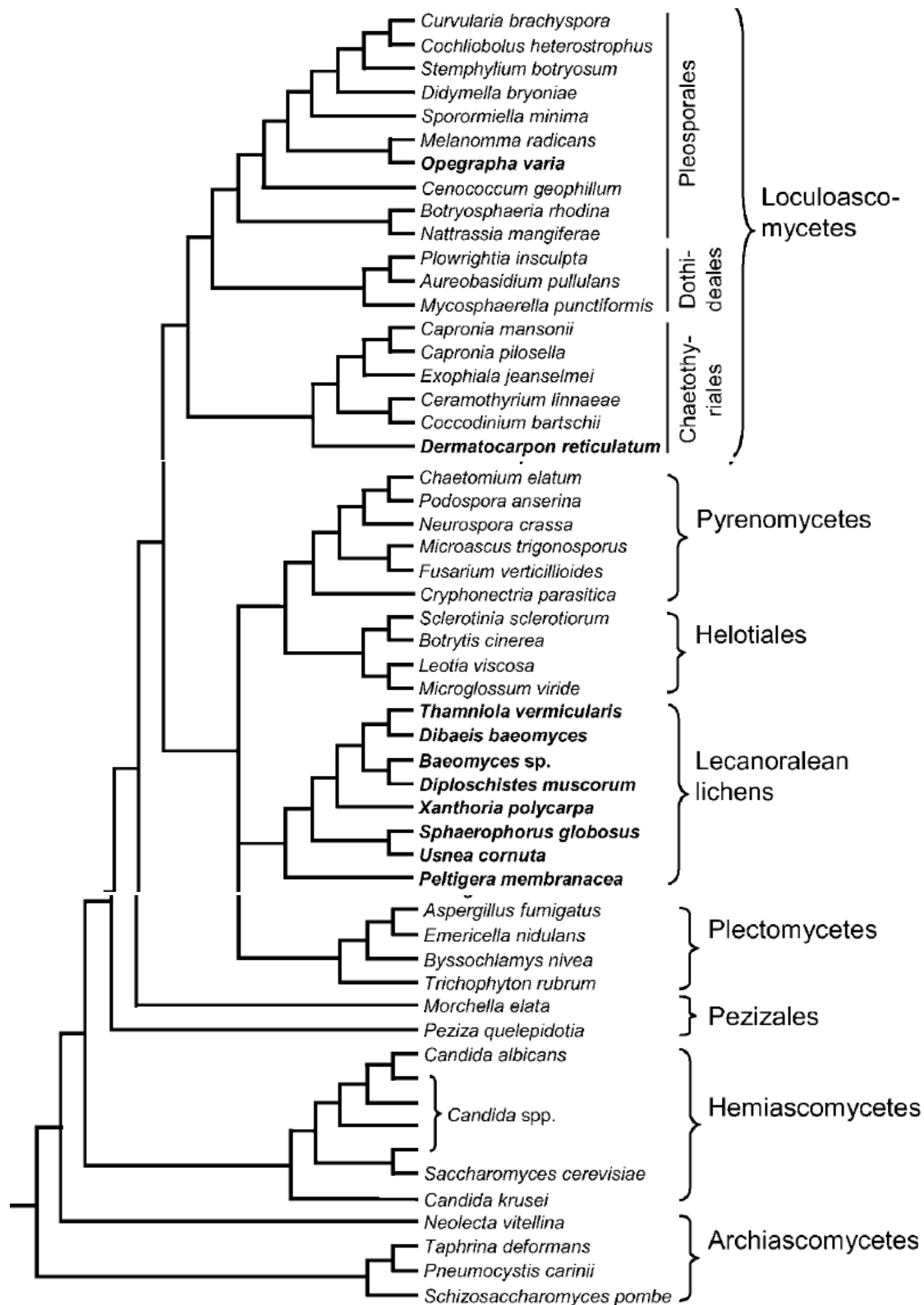


Figure 3. Arbre phylogénique des Ascomycètes basé sur l'analyse du gène de l'ARN polymérase II (Liu et Hall, 2004)

1.2. Basidiomycota

Les *Basidiomycota* représentent environ 37% des mycètes vrais décrits à l'heure actuelle (30,000 espèces décrites ; Kirk et al. 2001). Les espèces faisant partie de cet embranchement se trouvent dans presque tous les écosystèmes terrestres mais également dans les eaux douces et les habitats marins. Le thalle est cloisonné et les basidiospores sont portées par un basidium (Figure 4). Quelques espèces sont asexuées.

Les basidiomycètes attaquent fréquemment le bois des bâtiments mais ils ont un rôle significatif dans le cycle du carbone.

Exemple de quelques genres :

Puccinia

Ustilago

Sporisorium

Cryptococcus

Sporobolomyces

Tremella

Rhodotorula

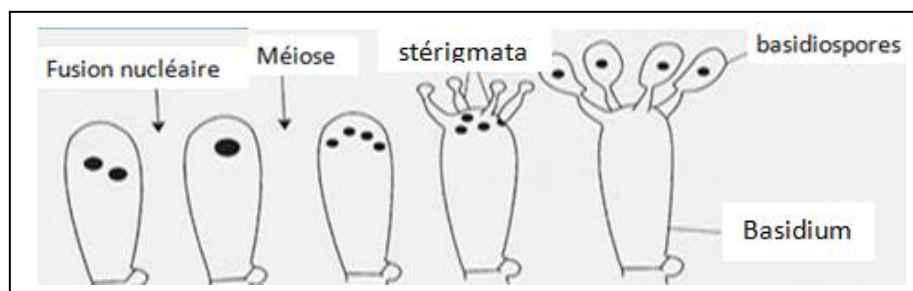


Figure 4. Cycle de reproduction chez les *Basidiomycota*

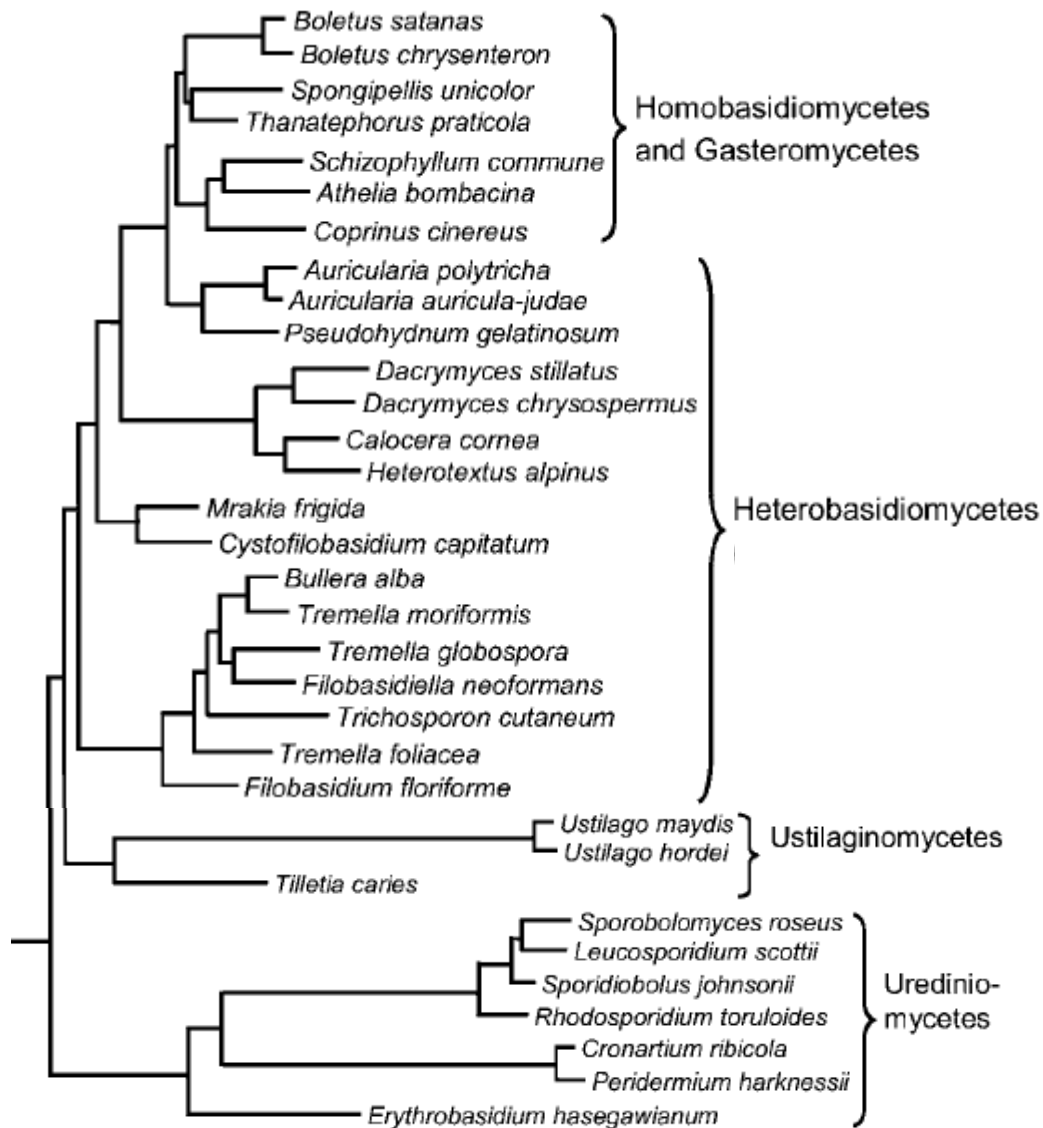


Figure 5. Arbre phylogénique des Basidiomycota basé sur l'analyse du gène de l'ADNr (18S)
Nishida and Sugiyama (1994)

1.3. Zygomycota

Les Zygomycota représentent 1% des mycètes vrais décrits à l'heure actuelle (environ 900 espèces décrites ; Kirk et al. 2001). Se distinguent parmi tous les autres mycètes par la reproduction sexuée via les zygospores (zygotes durs à paroi épaisse) (Figure 6). Le thalle est coenocytique (plusieurs noyaux haploïdes) et les spores asexuées sont contenues dans des sporanges.

Ce groupe de mycètes est probablement le plus diversifié écologiquement. La plupart des espèces vivent sur les matières (végétales et animales) en décomposition dans le sol.

Ces mycètes peuvent adopter les formes de vie suivantes :

Saprophytisme : sur les fruits, sol (*Mucorales*) ;

symbiotisme : avec les arthropodes (*Harpellales*) ;

mutualisme: ectomycorhizae (*Endogonales*);

Certaines espèces sont pathogènes pour les animaux, plantes, amibes, et particulièrement d'autres fungi (tous les *Dimargaritales* et quelques *Zoopagales* sont mycoparasites).

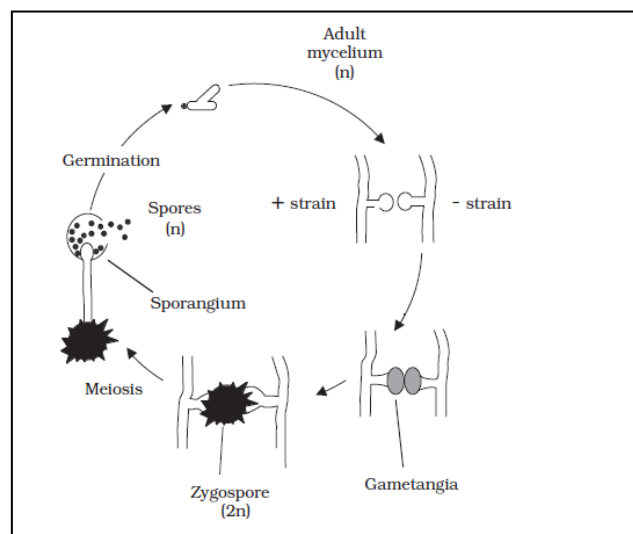
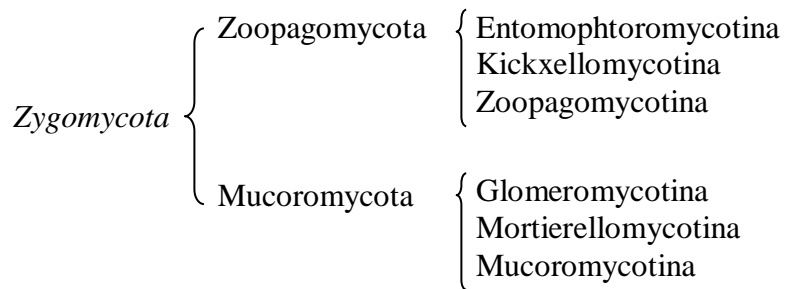


Figure 6. Cycle de reproduction chez les *Zygomycota*

1.3.1. Arbre taxinomique des *Zygomycota*

Selon la classification phylogénique, l'embranchement des *Zygomycota* qui comporte plusieurs lignées évolutives distinctes a été abandonné, les membres de ce groupe sont actuellement répartis entre deux nouveaux embranchements :



1.4. Chytridiomycota

Les *Chytridiomycota* encore appelés chytrides sont les mycètes vrais les plus simples. On pense qu'ils dérivent d'un protozoaire ancestral portant un même type de flagelle.

Certains sont saprophytes d'autres parasitent les algues, les mycètes ou encore les plantes terrestres ou aquatiques. La plupart des chytrides sont aquatiques vivant en particulier dans les eaux douces.

Le point commun entre les chytrides est la présence des spores mobiles (Zoospores) ayant un flagelle (Figure 7). Parmi les mycètes, les chytrides sont les seuls à posséder ce type de spores. Dans cette division il existe un sous groupe qui produit la cellulose ce qui est unique au monde fongique.

Certaines espèces ont un thalle mycélien, d'autres sont unicellulaires ou encore coenocytiques.

-*Batrachochytrium dendrobatidi* (agent pathogène pour les batraciens)

-*Synchytrium endobioticum* (parasite de pomme de terre)

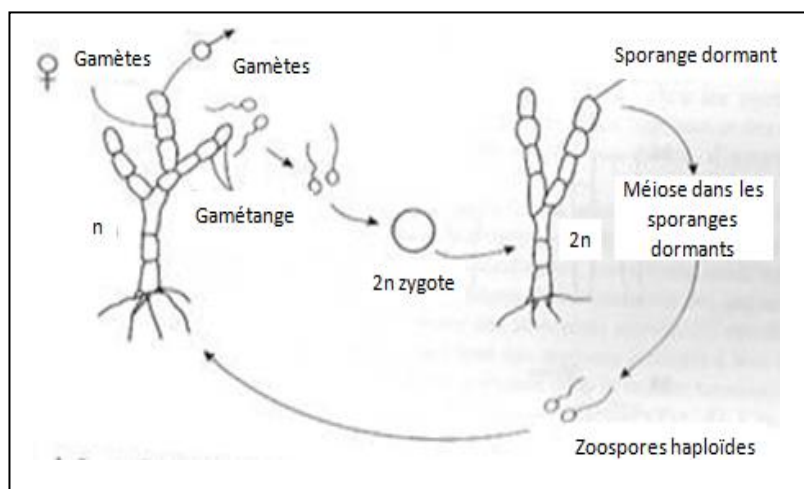


Figure 7. Le cycle biologique du chytrides

1.4.1. Arbre taxinomique des *Chytridiomycota*

L'embranchement des *Chytridiomycota* (polyphylétique) comporte trois classes :

1. *Chytridiomycetes*

2. *Monoblepharidomycetes*

3. *Neocallimastigomycetes* (dépourvus de mitochondries)

1. 5. *Blastocladiomycota*

Les espèces faisant partie de cet embranchement sont terricoles ou aquatiques, souvent détritivores, s'attaquent notamment aux tardigrades, daphnies, larves et diverses plantes aquatiques.

- le genre *Allomyces* est souvent utilisé dans les recherches expérimentales.

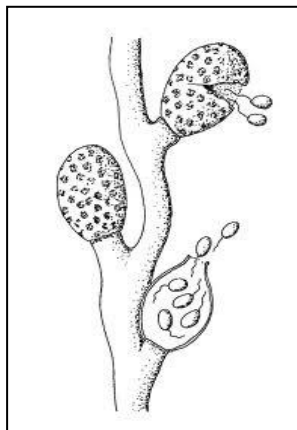


Figure 8. Forme microscopique d'un *Allomyces*

1.5.1. Arbre taxinomique des *Blastocladiomycota*

Actuellement, l'embranchement des *Blastocladiomycota* contient deux classes

Blastocladiomycetes

Physodermatomycetes

I.6. *Microsporidia* (*Microsporidiomycota*)

Les Microsporidies sont en général de forme ovale, leur petite taille explique la dénomination de *Microspora*,

- Le caractère morphologique les définissant est la présence d'un filament ou tubule polaire (figure 9),
- Possèdent un noyau organisé et une enveloppe nucléaire,
- ils ont un ARN ribosomal de type procaryote et n'ont ni mitochondries, ni peroxyosomes, ni de véritable appareil de Golgi, ni flagelles,
- sont toujours parasites et intracellulaires : Ils sont situés directement dans le cytoplasme,
- produisent des spores (1-10µm) extracellulaires résistantes qui sont la forme infectieuse des microsporidies (ces spores sont capables de survivre longtemps dans le milieu extérieur).

Exemples d'espèces responsables de microsporidioses intestinales chez l'Homme:

Enterocytozoon bienersi

Encephalitozoon intestinalis

Vittaforma corneae

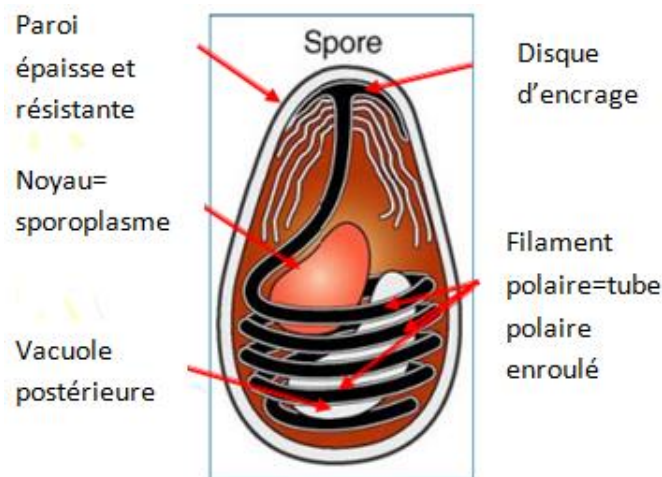


Figure 9. Schéma d'une spore faisant partie du phylum *Microsporidia*

I.6.1. Arbre taxinomique des *Microsporidia*

Au début du siècle dernier, les *Microsporidia* ont été classés parmi les protozoaires. Actuellement, le phylum *Microspora* fait partie du règne *Fungi* ce qui est en accord avec

certaines caractéristiques cellulaires et moléculaires communes entre les microsporidies et champignons :

- formation de spores
- mitose
- noyaux appariés ressemblant aux dicaryons
- paroi riche en chitine

Plus de 3000 espèces de Microsporidies ont été décrites. Elles sont réparties en 144 genres

Le phylum *Microspora* comporte deux sous phylums :

1. *Apsporoblastina*
2. *Pansporoblastina*

1.7. Deuteromycètes

Le *groupe* des Deuteromycètes (ou champignons imparfaits) est considéré comme un ensemble artificiel regroupant toutes les formes asexuées. Les membres de ce groupe ne possèdent pas de reproduction sexuée (inconnue ou rare).

En majorité sont saprophytes ou parasites des plantes ou mycètes, d'autres sont bénéfiques.

1.7.1 Arbre taxinomique des Deuteromycètes

Les Deuteromycètes sont divisés en trois classes :

- Blastomycètes qui regroupent l'ensemble des champignons levuriformes.
- Hyphomycètes qui regroupent tous les champignons filamenteux à thalle septé dont les cellules conidiogènes (productrices de spores ou conidies) sont libres.
- Coelomycètes qui rassemblent les champignons filamenteux dont les cellules conidiogènes sont contenues dans des organes protecteurs appelés pycnides ou acervules

Chapitre 3 : Systématique des Pseudo-champignons

1. Généralités

Le terme de « Pseudo-champignons » désigne l'ensemble des organismes fongiformes ou Protoctistes. Dans la classification actuelle ces organismes ne sont ni Animaux, ni Végétaux, ni Champignons vrais.

Ce groupe a été divisé en deux Règnes: *Protozoa* et *Chromista* (= *Straminipila*),

Les caractéristiques générales de ce groupe sont les suivants :

- Eucaryotes uni ou pluricellulaires simples,
- aspect cellulaires avec une forme végétative amiboïde, ou acellulaire avec une forme végétative plasmodiale,
- mode de nutrition: phagocytose,
- propagation par spores qui germent pour former des cellules amiboïdes ou Flagellées,
- perte de la paroi durant la phase de croissance, une gaine visqueuse autour de son Protoplasme.

2. Classification des pseudo-champignons

Les pseudo-champignons peuvent être classés selon leur aspect morphologique ou selon les données phylogéniques

2.1. Classification selon l'aspect

Les espèces appartenant au groupe des pseudo-champignons sont connus sous le nom de moisissures visqueuses (Slime Moulds) et moisissures aquatiques.

Selon l'aspect morphologique, les moisissures visqueuses comportent trois formes différentes (cellulaire, acellulaire, et plasmodiale) tandis que les moisissures aquatiques se caractérisent par la forme filamenteuse typique des champignons vrais (Figure 10).

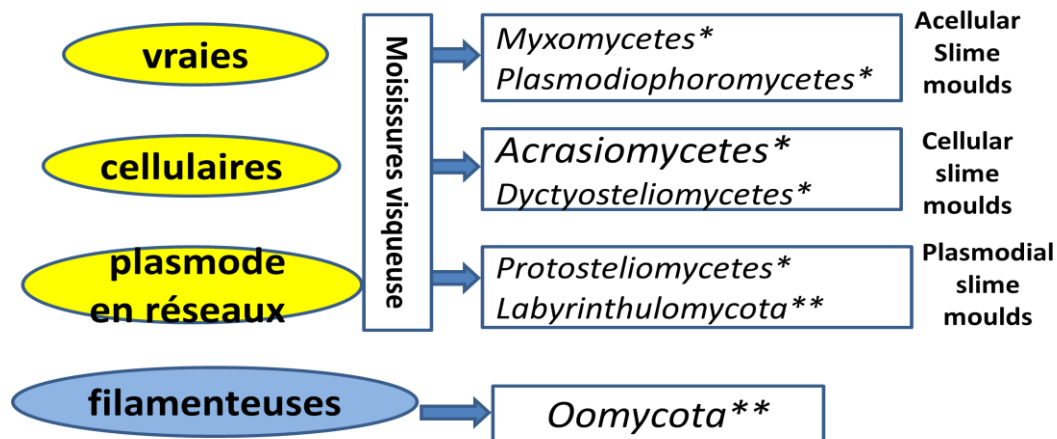
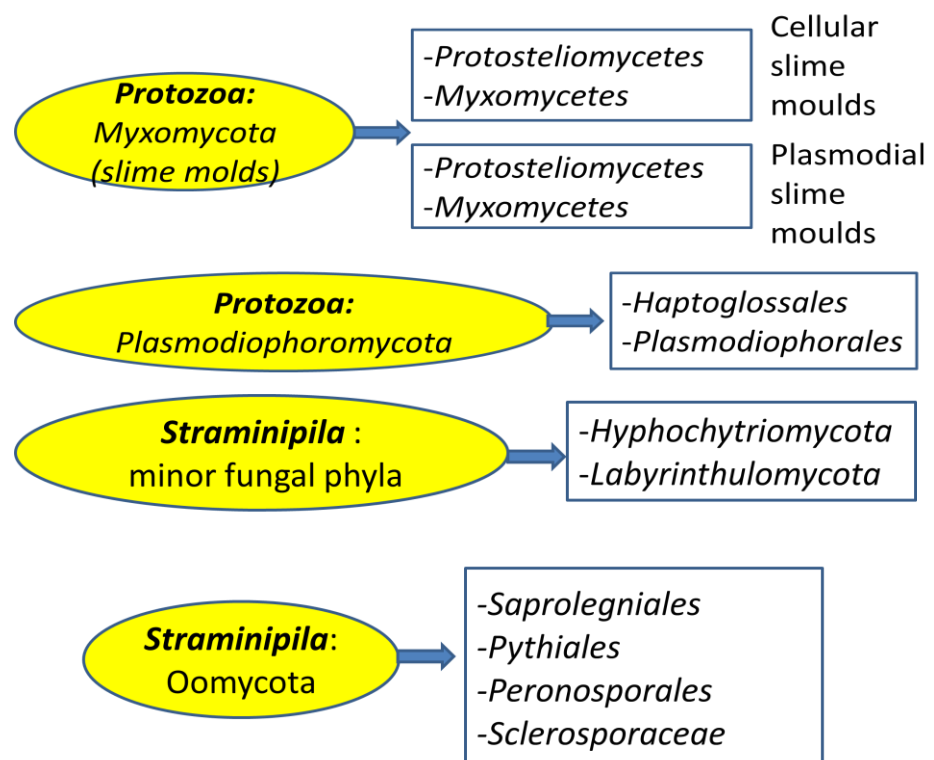


Figure 10. Classification des pseudo-champignons selon l'aspect morphologique

2.2. Classification phylogénétique

Selon la classification phylogénétique, les pseudo-champignons ont été répartis en deux règnes: *Protozoa* et *Chromista* (= *Straminipila*) (Figure 11).

Figure 11.
Classification
phylogénique
des pseudo-
champignons



3. Règne des moisissures visqueuses

Selon les connaissances scientifiques acquises à l'heure actuelle par la phylogénie et la biologie moléculaire, les membres de ce règne appelés communément fongiformes ou moisissures visqueuses, ne sont pas considérés comme des mycètes vrais mais ressemblent superficiellement à ceux-ci ; c'est pour cette raison que ces organismes suscitent encore l'intérêt des mycologistes. Les organismes fongiformes étaient autrefois classés dans le règne des *Fungi*, ils sont maintenant répartis dans plusieurs autres règnes. Actuellement, sont considérés comme des *Protoctistes*, ces eucaryotes ne sont ni des animaux, ni des végétaux, ni des champignons vrais.

3.1. *Myxomycota* (*Amoebozoa*)

Les *Myxomycota* sont aussi appelés Moisissures Visqueuses « Slime Molds »

Myxo signifie muqueux ou gluant, mycète est synonyme de champignon.

Les *Myxomycota* sont dépourvus de paroi cellulaire donc ce sont des organismes acellulaires ayant une forme plasmodiale. Généralement, ces microorganismes se trouvent dans la nature sous forme d'une masse coulante de protoplasme rampant de façon amiboïde sur les souches en putréfaction, feuilles mortes et autres matières organiques humides.

La phase végétative des *Myxomycota* est morphologiquement similaire à ceux des amibes, à cette étape on parle de **mixamibe**.

Les spores sont haploïdes mononuclées entourées d'une paroi de type cellulose, après germination la spore s'ouvre en laissant apparaître une mixamibe (une cellule haploïde dépourvue de paroi cellulaire avec un seul noyau) qui se nourrit par phagocytose et se déplace par mouvements amiboïdes, se reproduisent asexuellement par mitose (**Figure 12**).

-Si les conditions sont favorables, la mixamibe se différencie en formant des cellules munies de deux flagelles.

-Si les conditions deviennent défavorables, les cellules flagellées ou le protoplasme du mixamibe, s'entoure d'une fine paroi cellulosique en formant un **microcyst**.

La reproduction sexuée peut survenir, les cellules flagellées de différentes populations sont nécessaires pour former un zygote, plusieurs divisions mitotiques y surviennent aboutissant à la formation d'un **plasmode** (constitué par une cellule unique non segmentée avec un cytoplasme dans lequel baignent de nombreux noyaux diploïdes).

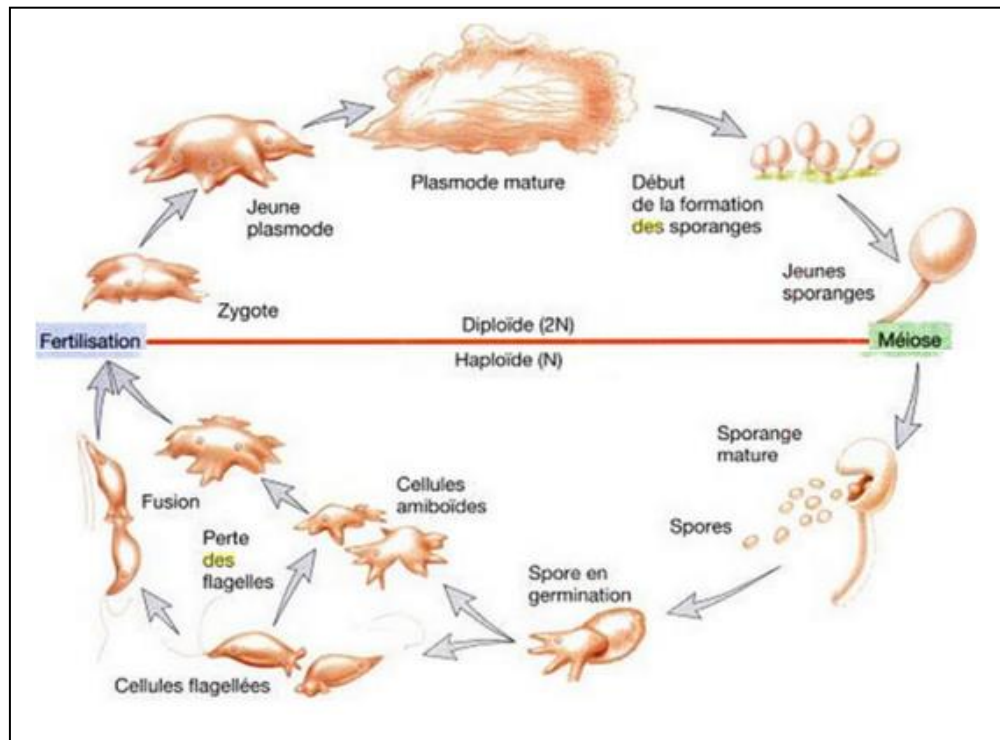


Figure 12. Cycle biologique d'un Myxomycète

- **Taxonomie des *Myxomycota***

Les *Myxomycota* étaient anciennement classés dans le règne des *Fungi*. Selon les taxonomistes, les *Myxomycota* ne sont pas des champignons vrais. Ils sont considérés abusivement comme des organismes mi-champignons mi-animaux car les membres de cette division se caractérisent par les points suivants:

- produisent des spores possédant une paroi contenant la cellulose,
- se nourrissent par phagocytose,
- ne forment pas de mycélium,
- représentent la limite entre le monde animal et le monde fongique.

Les Myxomycètes sont divisés en 6 ordres:

Ceratiomyxales (maintenant exclu)

Trichiales (3 familles et 14 genres)

Liceales (5 familles et 8 genres)

Echinosteliales (2 familles et 3 genres)

Physarales (3 familles et 20 genres)

Stemonitales (1 famille et 16 genres)

Physarum polycephalum (Figure 13A) et *Fuligo septica* (Figure 13B), ces deux espèces sont très employées comme modèle biologique dans les laboratoires de recherche.

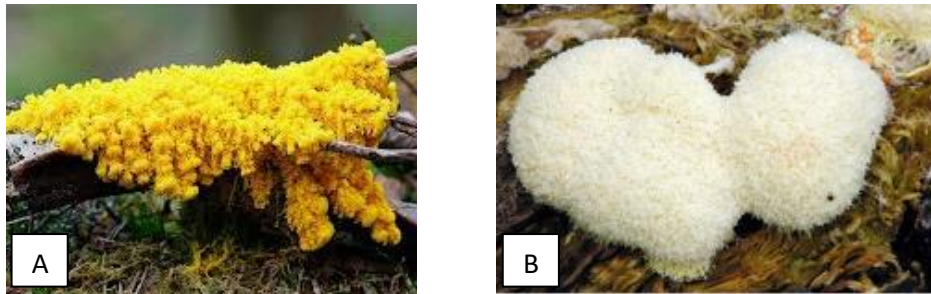


Figure 13. A/Plasmode de *P. polycephalum* sur une écorce d'un arbre B/*Fuligo septica*

3.2. *Plasmodiophoromycota* (*Rhizaria*)

- Les *Plasmodiophoromycota* sont des endoparasites obligatoires de plantes vasculaires, d'algues et champignons, mais peuvent survivre sous forme de spores dans le sol, plusieurs années. Ils se transmettent de plante à plante par l'intermédiaire de zoospores à paroi épaisse (biflagellées à longueur inégale). Ils attaquent les racines, les pousses et les tubercules en causant un accroissement et une multiplication anormale des cellules hôtes.

Les plasmodes multinucléés sans paroi, incapables de faire la phagocytose, sont produits pendant les deux stades suivants :

1. plasmode primaire ou sporangique produisant des zoosporanges à paroi mince,
2. plasmode secondaire ou sporogénique produisant des spores de conservation à paroi épaisse résistantes à la sécheresse.

Figure 14. La gale poudreuse de la pomme de terre
Spongospora subterranea

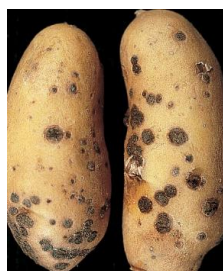


Figure 15. Hernie de chou
Plasmodiophora brassicae



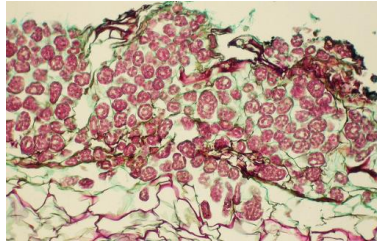


Figure 16. Spores de *Plasmodiophoromycète* à l'intérieur du tissu végétal

- **Taxonomie**

Actuellement le phylum des *Plasmodiophoromycota* comporte :

- une seule classe : *Plasmodiophoromycètes* (les plamodiophorides)
- un seul ordre : *Plasmodiophorales*
- 12 genres
- 51 espèces

3.3. Acrasiomycota

Le terme *Acrasiomycota* est utilisé car ce groupe était classé dans le règne des Fungi ('-mycota').

Les *Acrasiomycota* sont des pseudo-champignons cellulaires dont le stade végétatif est défini par des cellules individuelles de type amiboïde, se nourrissant de bactéries et levures par phagocytose. Les Acrasiomycètes sont hétérotrophes existant soit à l'état uni ou pluricellulaire (pseudoplasmode).

Quand les conditions deviennent défavorables dans le milieu environnant, les cellules peuvent s'agréger pour former un amas multicellulaire de forme indéfinie (pseudoplasmode), dont les cellules restent individuelles mais fonctionnent comme un groupe.

Le pseudoplasmode se déplace comme une limace sur les supports colonisés. Il peut s'organiser en sporocarpe, à cette étape une différenciation cellulaire a lieu. Certaines cellules après avoir été desséchées, forment alors le pédicelle du sporocarpe, tandis que les autres cellules rampent par-dessus ces cellules mortes, se regroupent en une masse ovoïde et se différencient en spores résistantes. Les spores sont disséminées par le vent pour envahir d'autres milieux.

Le cycle de vie d'un acraside est schématisé dans la figure 17.

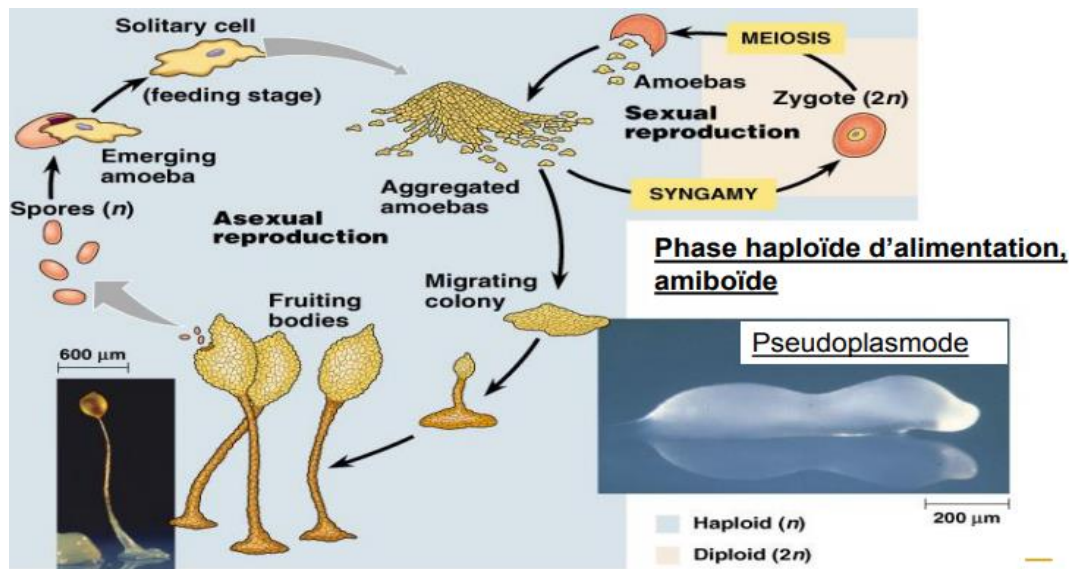


Figure 17. Cycle de vie d'un Acraside

3.4. *Dictyosteliomycota*

Les *Dictyomycota* sont considérés comme des moisissures visqueuses cellulaires ('cellular slime molds').

Les membres de ce groupe sont si petits qu'ils sont pratiquement impossibles à observer directement dans leur milieu naturel.

Le cycle de vie des dictiostélides (Figure 18) se déroule exactement comme a été décrit dans le cas des *Acrasiomycota*.

Dictyostelium discoideum (Figure 19) a été utilisé comme organisme modèle en biologie moléculaire et en génétique, et est étudié comme un exemple de communication cellulaire, de différenciation et de mort cellulaire programmée.

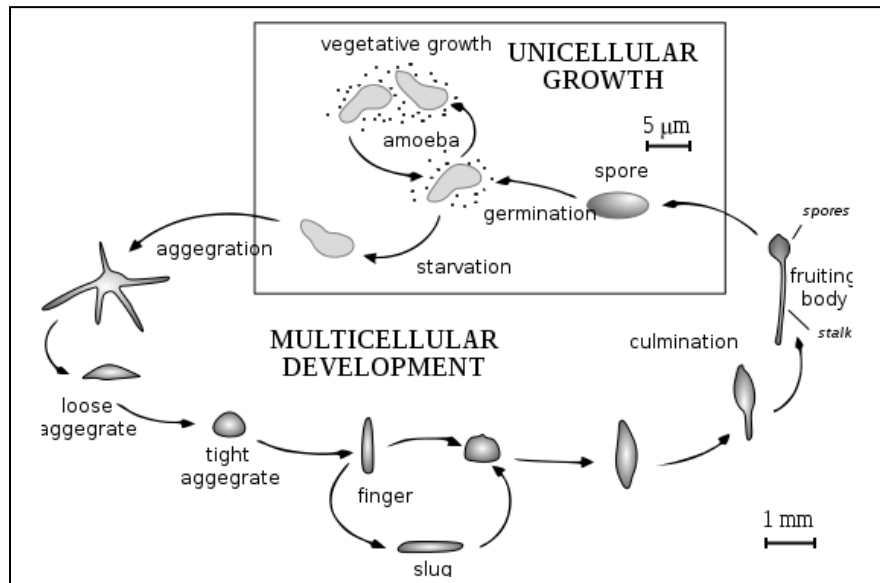


Figure 18. Cycle de vie d'un dictyostélide



Figure 19. *Dictyostelium discoideum*

4. Règne des *Stramenopila* (*Heterokonta* ou *Chromista*)

Straménopiles (*Stramenopila* : « organismes plumeux »).

Hétérokontes (*Heterokonta* : « organismes à deux flagelles différents »).

Les straménopiles sont des eucaryotes très divers, probablement polyphylétique, et sont classés parmi les *Chromista*.

Les membres de ce groupe se caractérisent par l'existence, au cours de leur cycle, d'une cellule biflagellée avec deux flagelles différents : un flagelle lisse et un flagelle plumeux.

4.1. Oomycota (moisissures aquatiques)

Les Oomycota ('champignon à œuf') sont des microorganismes hétérotrophes possédant un thalle comme celui des champignons vrais et les cellules filamenteuses sont cénocytiques ramifiées (hyphes) mais la paroi cellulaire est de type cellulosique (par opposition aux eumycètes : paroi chitineuse). Beaucoup d'espèces sont aquatiques, Ils sont saprophytes et se développent en masse cotonneuse sur des algues mortes ou des petits animaux. La plupart des espèces terrestres sont principalement des parasites de plantes vasculaires.

Les *Oomycota* ont longtemps été classés parmi les champignons, ce n'est que vers 1990 qu'ils ont été classés à part du règne des *Fungi*.

Les *Oomycota* produisent des zoospores biflagellées.

Certaines espèces sont phytopathogènes :

Phytophthora infestans responsable du mildiou de la pomme de terre.

Plasmopara viticola responsable du mildiou de la vigne.

D'autres sont pathogènes :

Saprolegnia parasite les ouïes des poissons

4.2. Hyphochytridiomycota

Ces organismes produisent au cours de leur cycle une zoospore uni-flagellée (par perte de deuxième flagelle). Ils étaient autrefois classés parmi les Chytridiomycètes. Mais l'analyse de leur ADN montre qu'ils sont proches des Oomycota.

4.3. Labyrinthulomycota

Les membres de cet embranchement forment un réseau ectoplasmique de filaments ou de tubes, dont les cellules se servent pour absorber des éléments nutritifs et le long desquels elles glissent.

La plupart sont marins, généralement parasites d'algues ou décomposent la matière végétale morte. D'autres sont des parasites d'invertébrés marins.

Les cellules labyrinthulides renfermées dans les tubes, possèdent un noyau unique en forme d'œuf, et se déplacent le long du réseau amorphe.

Chapitre 4 : Algues microscopiques

1. Généralités

On désigne par le terme d'algues, les embranchements de Protoctistes comprenant une majorité d'espèces phototrophes. L'appareil végétatif des algues est un thalle présentant un niveau peu développé de différenciation cellulaire et, en principe, dépourvu d'organes spécialisés.

Les microalgues dénommées également microphytes, sont définies comme étant des organismes uni ou pluricellulaires indifférenciés. Ces algues microscopiques sont les seuls protistes eucaryotes autotrophes, dotés de chloroplastes et pratiquant la photosynthèse.

Les cyanobactéries (bactéries) et les microalgues constituent le phytoplancton qui produit plus de la moitié de l'oxygène terrestre et consomme la moitié du CO₂.

Les microalgues ont de nombreuses applications dans des domaines variés, la production d'énergie, la nutrition humaine et animale, et le traitement des rejets et les eaux usées.

Les membres de ce groupe sont sensibles à certains polluants (cuivre, hydrocarbures) c'est pourquoi ils sont employés comme bioindicateurs de pollution.

Dans ce document nous abordons seulement les algues unicellulaires.

2. Habitat

Les microalgues occupent la plupart des niches écologiques, surtout les environnements aquatiques. Ces microorganismes colonisent également les sols, les roches, les arbres ou encore les édifices architecturaux. D'autres se développent dans les eaux de fonte de la glace ou la neige, et dans les déserts arides et semi-arides.

3. Structure

Une microalgues mesure de quelques microns à plusieurs centaines de microns. Le cytoplasme est entouré par une membrane plasmique (figure 21). Les thalles sont unicellulaires, coloniaux (cœnobes) ou filamenteux non ramifiés avec absence de communications cytoplasmiques entre les cellules.

Les flagelles sont présents en permanence chez certaines cellules, chez d'autres espèces ils sont absents ou présents seulement sur les spores.

Pour la plupart des microalgues, la paroi cellulaire est sensiblement similaire aux structures pariétales des plantes supérieures offrant des structures polysaccharidiques et protéiques plus ou moins complexes. Certaines microalgues présentent une diversité remarquable de structures pariétales

- Les Diatomées, se distinguent par une paroi composée de : silice (polymère amorphe de SiO_2) et cellulose,
- Chez les Euglénophycées, à la place de la paroi on trouve une pellicule souple, striée, constituée de bandelettes protéiniques hélicoïdales.
- d'autre groupes, en plus de la cellulose, ils possèdent des structures complexes composées de carbonate de calcium (CaCO_3) et de silice.

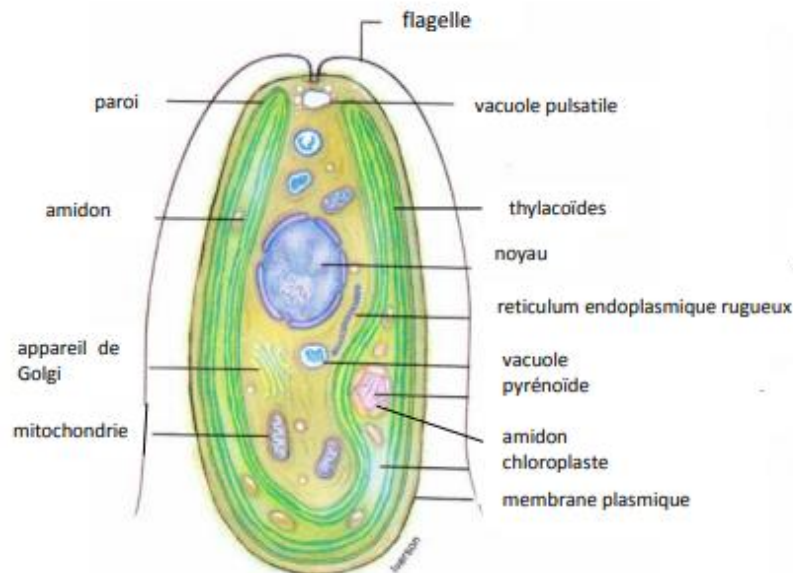


Figure 20. Structure cellulaire d'une microalgue (Prescott et al., 1995).

4. Reproduction

La reproduction des microalgues s'effectue par :

- Reproduction asexuée ou multiplication végétative

Une cellule mère se divise en deux cellules filles génétiquement identiques.

- Reproduction sexuée

Cette phase du cycle de vie, est généralement déclenchée par des conditions environnementales particulières souvent multifactorielles.

La reproduction se fait par fusion des gamètes mâle et femelle pour produire un zygote diploïde (figure 21).

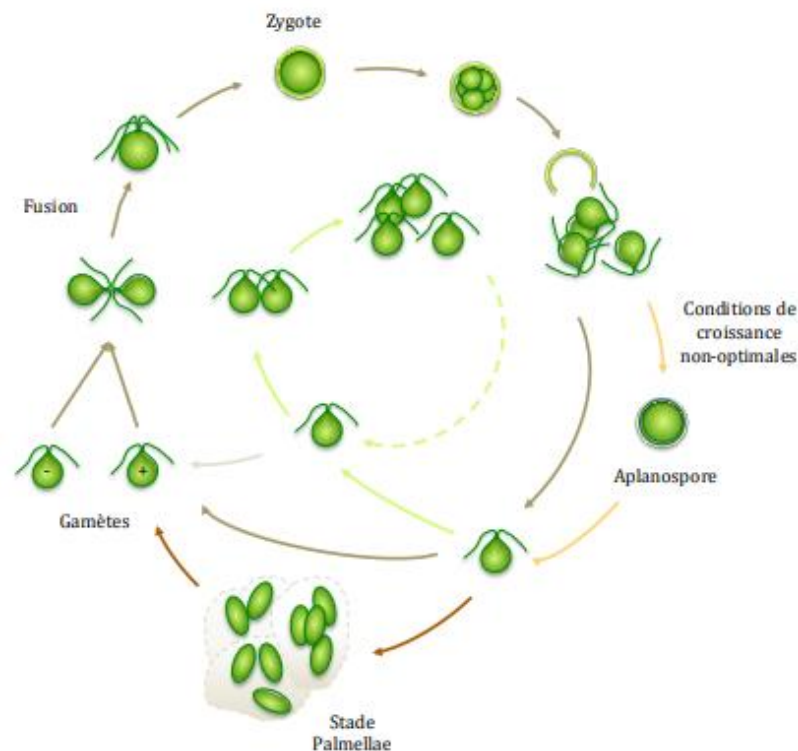


Figure 21. Cycle de reproduction d'une microalgue

Aplanospore : cellule à paroi rigide et dépourvue de flagelles, forme de résistance (cyste) de l'espèce

5. Culture

Les microalgues sont cultivées en milieu extérieur, dans des 'raceways', ou en milieu fermé, dans des photobioréacteurs (figure 23). Les besoins nutritifs des microalgues sont similaires à ceux des plantes supérieures, le carbone, l'azote, et phosphore. Cette composition est relativement constante dans le milieu naturel. Le milieu de culture devra satisfaire les besoins en éléments majeurs (ou macroéléments) C,H,N,O,P,S et en micro-éléments encore appelés éléments traces.

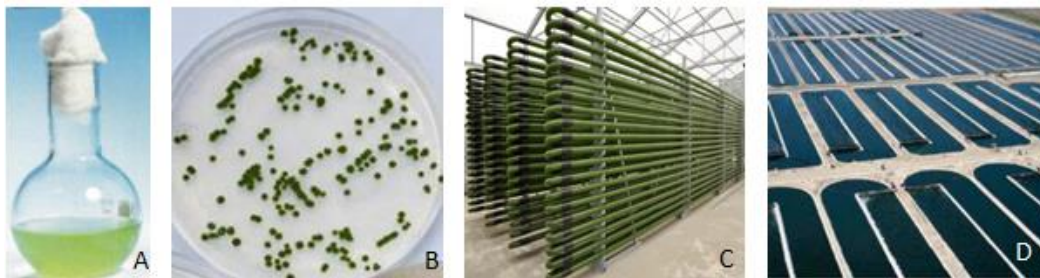


Figure 22. Culture des microalgues A/Culture de 6 jours en milieu liquide, B/Colonies sur milieu gélosé, C/Photobioréacteur, D/procédé « raceway »

6. Type trophique

La plupart des microalgues utilisent un métabolisme exclusivement photoautotrophe, d'autres présentent un métabolisme hétérotrophe voire mixotrophe, simultanément ou séquentiellement.

- photoautotrophe (utilisation de lumière comme source d'énergie et du carbone inorganique),
- hétérotrophe (utilisation du carbone organique en absence de lumière),
- mixotrophe (métabolismes photoautotrophe et hétérotrophe conjugués).

7. Taxonomie

Les microalgues constituent un groupe extrêmement hétérogène rassemblé autour d'une cohérence physiologique : la photosynthèse oxygénique.

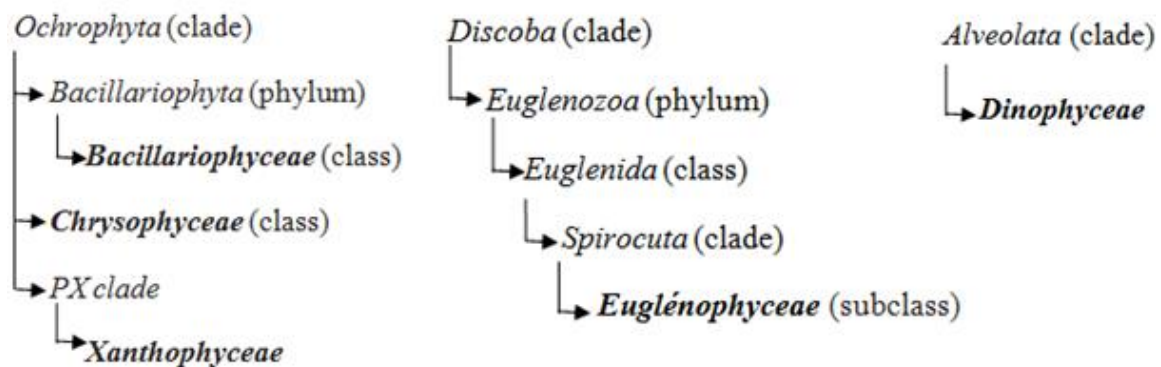
Ces microorganismes se différencient par la nature de leurs pigments, leur paroi, et le nombre et la position des flagelles.

Les microalgues sont représentées par cinq classes:

- Chrysophycées (200 genres, 1000 espèces)
- Diatomées ou Bacillariophycées
- Dinophycées (Dinoflagellés ou Péridiniens)
- Euglénophycées
- Xanthophycées

L'embranchement des Chrysophycophytes ou Chrysophytes comprends les classes suivantes : Chrysophycées Bacillariophycées et Xanthophycées

Selon la classification NCBI :



Chapitre 5 : Virus

1. Le monde viral

Les virus ont eu un impact énorme sur les organismes vivant sur terre depuis la plus haute antiquité. Bien que la nature des virus fût ignorée, nos ancêtres étaient habitués aux maladies telles que la rage, la rougeole et la variole, etc.

La première expérience mettant en évidence un agent ultrafiltrable (capable de traverser les filtres, habituellement imperméables aux bactéries), fut la transmission de la mosaïque du tabac par Ivanowsky (1892). Cet agent infectieux fut appelé « ultravirus » ou « virus filtrant » ; plus tard au cours du 19^{ème} siècle tous les agents nocifs ont été groupé sous le nom de virus (du latin virus : poison ou venin).

L'origine et l'évolution des virus sont entourées de mystère, c'est une question complexe et hautement spéculative en partie à cause du manque de spécimens fossiles.

Les virus doivent être considérés « à part » comme le précise Lwoff, « les virus sont les virus », ils possèdent des propriétés distinctes de celles des bactéries et à fortiori beaucoup plus éloignées encore de celles des cellules animales et végétales. Ce ne sont pas des cellules mais plutôt des éléments génétiques mobiles à la limite entre le moléculaire et le vivant.

Les progrès récents faits dans la compréhension de la structure et la multiplication virale ont permis d'émettre certaines hypothèses sur les origines des virus. Actuellement deux d'entre elles ont la faveur des virologues :

- Certains virus enveloppés parmi les plus complexes, comme les Poxvirus et Herpesvirus proviennent de petites cellules, probablement procaryotes qui auraient parasité d'autres cellules plus grandes et plus complexes.
- Suivant la seconde hypothèse, les virus représenteraient des acides nucléiques cellulaires devenus indépendants et capables de sortir de la cellule.

2. Définitions

C'est en 1953 que Lwoff a donné une définition de la particule virale ou virion (l'état extracellulaire) qui est maintenant universellement adoptée :

1. Le virion ne possède qu'un seul type d'acide nucléique, soit l'ADN soit l'ARN. Les deux molécules ne coexistent pas dans la particule virale. L'information génétique est portée sous forme soit ADN soit ARN, ce qui constitue le génome viral.

Certains virus ont au cours de leur réplication un intermédiaire de leur génome sous une forme différente :

- Les rétrovirus sont rétrotranscrits en ADN dans la cellule hôte et c'est de cet ADN « proviral » que seront formés les nouveaux brins génomiques d'ARN.
- les hepadnaviridae (virus de l'hépatite B, virus de plantes, etc.) sont des virus à ADN qui passeront par un intermédiaire ARN pour former les nouveaux d'ADN.

2. le virion se reproduit à partir de son seul acide nucléique. Il n'y a pas de scissiparité comme chez les bactéries et il n'y a pas de mitose comme chez les cellules eucaryotes.

3. le virion manifeste un parasitisme absolu. Il ne peut se reproduire qu'au sein d'une cellule hôte vivante.

Les virus ne possèdent ni ribosomes ni système enzymatique ou énergétique leur permettant d'assurer leur propre autoréplication.

Au cours de l'interaction entre la particule virale et la cellule hôte, deux éventualités peuvent survenir :

- ✓ La multiplication virale peut aboutir à la mort de la cellule hôte : lyse cellulaire.
- ✓ Des lésions cellulaires non létales : la persistance virale.

4. Les virus sont spécifiques de cellules et d'organismes

Tous les organismes vivants sont susceptibles d'être infectés par les virus, mais ce ne sont pas les mêmes virus qui infectent les différents organismes. Ainsi, les virus des plantes n'infectent pas généralement les animaux, et les virus d'une espèce de plante n'infectent pas nécessairement d'autres espèces de plantes. Cette barrière d'espèce n'est pas absolue et on voit que par exemple certains animaux peuvent partager des virus avec les humains et entre eux. A l'intérieur d'un organisme, les virus sont sélectifs de certains types de cellules. Cette spécificité est due en grande partie aux récepteurs spécifiques de surface des cellules qui permettent la fixation et l'entrée des virus.

En résumé, les virus diffèrent des cellules au moins par :

- organisation simple et acellulaire,

- absence d'ADN et d'ARN ensemble dans le même virion,
- sont tous des parasites intracellulaires obligatoires et ne peuvent pas se multiplier et se diviser indépendamment des cellules vivantes ;

3. Structure

Toute particule virale est constituée d'au moins deux éléments constants et obligatoires : le génome et la **capside** parfois appelée **capsomère**.

L'ensemble formé par la capsid et l'acide nucléique viral est appelé **nucléocapside**.

Certains virus sont entourés d'une enveloppe de nature lipidique, parfois appelée **peplos** (manteau) : on parle alors de virus « enveloppés » par opposition aux virus nus.

- **Génome**

Un virus est habituellement constitué d'un génome composé d'un ou plusieurs brins d'ADN ou ARN, sous forme linéaire ou circulaire. On distingue des ARN et ADN simple brin ou double brin.

- **Capsid**

C'est une coque de nature protéique qui entoure et protège le génome. Elle est constituée d'une ou de plusieurs protéines particulières au virus. Ces protéines de la capsid sont capables de polymériser par auto-assemblage pour former ces structures complexes que sont les capsides virales.

La nucléocapsid peut présenter des symétries architecturales suivantes :

- Symétrie cubique
- Symétrie hélicoïdale
- Symétrie complexe

- **Enveloppe virale**

Tous les virus à symétrie hélicoïdale sont entourés d'une enveloppe composée à la fois de lipides et protéines.

Les lipides sont semblables à ceux de la membrane plasmique de la cellule infectée par le virus. Ceci du fait que beaucoup de virus acquièrent leur enveloppe par le processus de bourgeonnement.

Les protéines sont propres aux virus, elles ont des propriétés antigéniques importantes, elles jouent un rôle dans la reconnaissance cellulaire, la maturation et la libération des particules virales.

4. Notion de taille

La capacité des virus à traverser les filtres imperméables aux bactéries, est la caractéristique principale à laquelle on doit leur découverte.

Chez les virus la taille n'est pas un critère absolu :

- *Mimivirus* ^(a) ayant un diamètre supérieur à 0,7µm, découvert en 2003,
- *Megavirus chiliensis* ^(b) découvert en 2011,
- *Pandoravirus salinus* et *P. dulcis* ^(c) (famille des *Pandoraviridae*), diamètre supérieur à 0,5µm, découverts en 2013,
- *Pithovirus sibericum* ^(d) longueur 1,5µm, diamètre 0,5µm, découvert en 2014.

A partir des années 2000, il y a eu des découvertes de virus aussi gros que les bactéries et dotés de caractéristiques qui les distinguent nettement des virus ordinaires, notamment un génome de grande taille contenant plusieurs centaines de gènes. Ces virus géants ont ouvert un nouveau domaine de recherche aux biologistes, dont les idées sur la frontière entre les virus et le vivant, ainsi que sur l'origine des virus, se voient remises en question.

La ressemblance entre *Pandoravirus* et *Pithovirus* cache des différences majeures. Ce dernier possède un matériel génétique plutôt réduit pour sa taille : à peine 500 gènes contre cinq fois plus pour *Pandoravirus* qui dispose le plus grand génome du monde viral. *Pithovirus* est encore actif après 32 000 ans ! Ce virus a été découvert en Sibérie à 30m de profondeur dans une couche de sol datant du Pléistocène supérieur.

(a) La Scola B, Audic S et al. (2003)

(b) Arslan D, Legendre M et al (2011)

(c) Philippe N et al (2013)

(d) Legendre M et al (2014)

5. Taxonomie

La classification actuelle des virus est beaucoup moins satisfaisante que celle des bactéries et des microorganismes eucaryotes. Ceci est dû en partie au manque des connaissances sur l'origine et l'évolution des virus.

Depuis son 1^{er} rapport en 1971, le comité international sur la taxonomie des virus a développé un système de classification et divise maintenant les virus en :

- 3 ordres
- 56 familles
- 9 sous-familles
- Environ 233 espèces et 1550 espèces

Les virus sont divisés en différents groupes taxinomiques sur la base de :

- la nature de l'hôte : toutes les cellules vivantes
- les caractéristiques de l'acide nucléique : ADN ou ARN, simple ou double brin, masse moléculaire, segmentation et nombre de fragments
- la symétrie de la capside : hélicoïdale, cubique et mixte ou binaire.
- La présence d'une enveloppe
- Le diamètre du virion
- Les propriétés immunologiques
- Le nombre de gènes et la carte génomique
- Les maladies engendrés et/ou les caractères cliniques particuliers, le mode de transmission
- La stratégie de replication virale (noyau ou cytoplasme)

Classification de Baltimore

Cette classification a été proposée initialement par David Baltimore, lauréat du prix Nobel de médecine en 1975.

Classification par type de génome :

Virus à ADN :

Groupe I. virus à ADN double brin

Groupe II. virus à ADN simple brin

Virus à ARN :

Groupe III. virus à ARN double brin

Groupe IV. virus à ARN simple brin à polarité positive (virus + ou de type ARNm)

Groupe V. virus à ARN simple brin à polarité négative

Virus à ADN ou à ARN à transcription inverse :

Groupe VI. rétrovirus à ARN simple brin

Groupe VII. rétrovirus à ADN double brin

NB. Il a été mis en évidence, à partir de 1971, l'existence d'agents infectieux décrits surtout chez les végétaux, limités à ARN de très petite taille que l'on a appelé **viroïdes**. Il a été proposé de diviser les virus en deux sous groupe :

- Les virus conventionnels ou **euivirus**
- Les virus non conventionnels ou **viroïdes**

Un viroïde est un agent infectieux plus simple que le virus. Courte chaîne d'ARN responsable de certaines maladies de plantes.

Références

- Berbee, M. L. & Taylor, J. W. (2001). Fungal molecular evolution: gene trees and geologic time. In *The Mycota VIIB: Systematics and Evolution*, ed. D. J. McLaughlin, E. G. McLaughlin & P. A. Lemke. Berlin: Springer-Verlag, pp. 229_245.
- Butterfield, N. J. (2005). Probable Proterozoic fungi. *Paleobiology*, 31, 165_182.
- John Webster and Roland W.S Weber (2007). *Introduction to Fungi* third edition.
- Liu, Y. J. & Hall, B. D. (2004). Body plan evolution of *Ascomycetes*, as inferred from an RNA polymerase II phylogeny. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 101, 4507_4512.
- McLaughlin et al., (2001). *The Mycota : Volumes VIIA and VIIB*.
- Nishida, H. & Sugiyama, J. (1994). Archiascomycetes: detection of a major new lineage within the *Ascomycota*. *Mycoscience*, 35, 361_366.
- Prescott, Harley, Klein (1995). *Microbiologie*, Ed. De Boeck Université p 474, 537.
- Perry JJ, Staley JT, Lory S (2004). *Microbiologie, Cours et questions de révision. DUNOD*, Paris. ISBN 210007234X.

