

➤ **La classification moderne du vivant**

**Whittaker** (1969) a suggéré la classification du vivant en cinq royaumes, à savoir. Monera, Protista, Fungi, Animalia et Plantae. Le système à trois domaines est une classification biologique introduite par **Carl Woese et al.** en 1990 qui divise les formes de vie cellulaires en domaines archées, bactéries et eucaryotes. La principale différence avec les classifications précédentes est la séparation des archaea des bacteria.

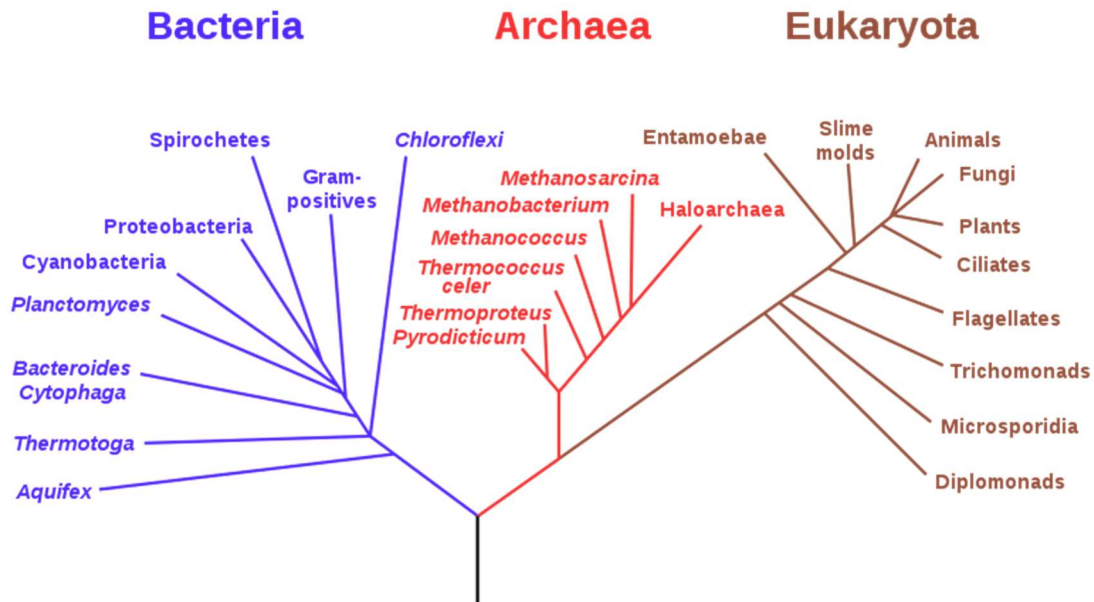


Figure 2.1 : Un arbre phylogénétique des êtres vivants, basé sur des données d'ARN et proposé par Carl Woese (**Carl Woese et al.** 1990), montrant la séparation des bactéries, des archées et des eucaryotes. Les arbres construits avec d'autres gènes sont généralement similaires, bien qu'ils puissent placer certains groupes à ramifications précoces très différemment, grâce à l'attraction des longues branches. Les relations exactes des trois domaines sont encore débattues, tout comme la position de la racine de l'arbre. Il a également été suggéré qu'en raison du transfert latéral de gènes, un arbre peut ne pas être la meilleure représentation des relations génétiques de tous les organismes. Par exemple, certaines preuves génétiques suggèrent que les eucaryotes se sont développés à partir de l'union de certaines bactéries et archées (l'une devenant un organite et l'autre la cellule principale).

Cavalier-Smith et ses collaborateurs ont révisé leur classification en 2015. Dans ce schéma, ils ont introduit deux super-royaumes, les Prokaryota et les Eukaryota, ainsi que sept royaumes. Les Prokaryota comprennent deux royaumes : les Bactéries et les Archaea. (Cela était basé sur le consensus dans la Taxonomic Outline of Bacteria and Archaea, et le Catalogue of Life). Les Eukaryota comprennent cinq royaumes : les Protozoaires, les Chromistes, les Plantes, les Mycètes et les Animaux. Dans cette classification, un protiste est l'un des organismes unicellulaires eucaryotes. On se basera sur cette classification pour le reste du cours.

### **I. Le super-royaume Prokaryota**

Les procaryotes sont des organismes unicellulaires caractérisés par l'absence d'un noyau délimité par une membrane ainsi que par l'absence d'autres organites cellulaires membranaires, tels que les mitochondries ou les chloroplastes. Leur matériel génétique est généralement sous forme d'ADN circulaire, présent dans une région appelée nucléoïde.

Les procaryotes sont les êtres vivants dominants sur Terre, présents depuis peut-être les trois quarts de l'histoire de la Terre et ayant réussi à s'adapter à presque tous les habitats écologiques disponibles. En tant que groupe, ils présentent des capacités métaboliques extrêmement diverses et peuvent utiliser presque n'importe quel composé organique, ainsi que certains composés inorganiques, comme source de nourriture.

Ce super-royaume comprend deux royaumes principaux : **Bacteria** (ou bactéries) et **Archaea** (ou archées). Ils sont omniprésents dans divers environnements, allant des sols aux océans, et jouent des rôles essentiels dans des processus biologiques tels que le cycle des éléments nutritifs et la décomposition de la matière organique.

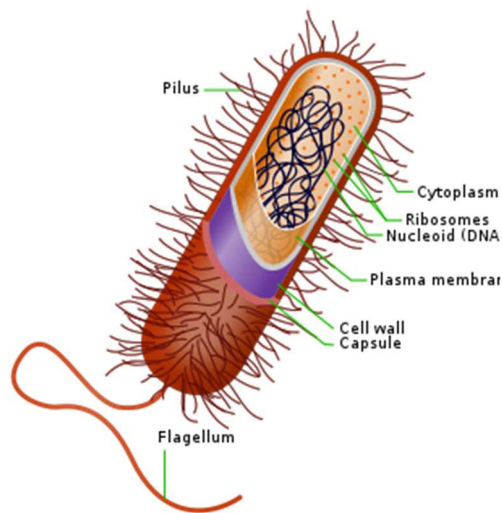


Figure 2.2 : Schéma d'une cellule procaryote type.

*Own work using: Biology 10e Textbook (chapter 4, p. 63) by: Peter Raven, Kenneth Mason, Jonathan Losos, Susan Singer · McGraw-Hill Education.*

### 1. Le royaume Bacteria

Les bactéries, membres d'un groupe d'organismes unicellulaires microscopiques, vivent en nombre immense dans presque tous les environnements de la Terre, des sources hydrothermales en haute mer aux profondeurs souterraines en passant par les tractus digestifs des humains.

Les bactéries ne possèdent pas de noyau membranaire ni d'autres structures internes et sont donc classées parmi les formes de vie unicellulaires appelées procaryotes. Certaines bactéries peuvent causer des maladies chez les humains, les animaux ou les plantes, mais la plupart sont inoffensives et sont des agents écologiques bénéfiques dont les activités métaboliques soutiennent des formes de vie supérieures. D'autres bactéries sont des symbiotes de plantes et d'invertébrés, où elles accomplissent des fonctions importantes pour l'hôte, telles que la fixation de l'azote et la dégradation de la cellulose. Sans les procaryotes, le sol ne serait pas fertile et la matière organique morte se décomposerait beaucoup plus lentement. Certaines bactéries sont largement utilisées dans la préparation d'aliments, de produits chimiques et d'antibiotiques. Les bactéries se distinguent également par la présence de parois cellulaires composées de peptidoglycane, une substance comprenant de l'acide muramique, qui confère une certaine résistance et forme une structure protectrice autour de la membrane cellulaire. Les études sur les relations entre différents groupes de bactéries continuent de fournir de nouvelles informations sur l'origine de la vie sur Terre et les mécanismes de l'évolution.

## 1.2 Les cyanobactéries (Embranchement n'appartenant pas au Règne Végétal)

Les cyanobactéries, également appelées Cyanobacteriota ou Cyanophyta, sont un embranchement de bactéries autotrophes gram-négatives qui peuvent obtenir de l'énergie biologique via la photosynthèse. Le nom "cyanobactéries" fait référence à leur couleur (du grec ancien κύανος (kúanos) signifiant "bleu"), qui forme également la base du nom commun des cyanobactéries, les algues bleu-vert, bien qu'elles ne soient pas scientifiquement classées comme des algues. Elles semblent avoir originellement évolué dans un environnement d'eau douce ou terrestre.

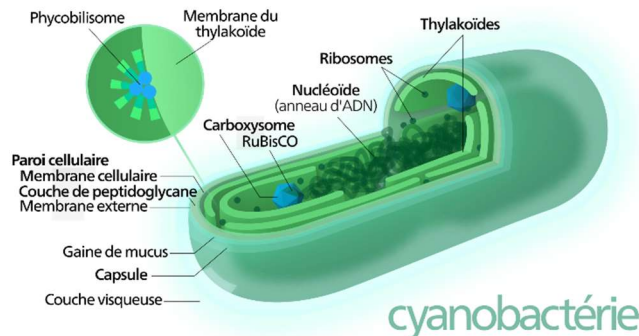


Figure 2.3: Schéma d'une cyanobactérie.  
Kelvinsong — Travail personnel

### 1.2.1 Les cyanobactéries organismes autotrophes

Les cyanobactéries utilisent des pigments photosynthétiques, la chlorophylle a, de et les phycobilines, la chlorophylle c (ayant rarement été trouvée), pour convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique. Contrairement aux procaryotes hétérotrophes, les cyanobactéries possèdent des membranes internes. Ce sont des sacs aplatis appelés thylakoïdes où la photosynthèse est réalisée.

### 1.2.2 Intérêt des cyanobactéries

En plus de leur importance écologique, les cyanobactéries présentent également un intérêt dans divers domaines, notamment en biotechnologie pour la production de biomasse, en agriculture pour la fixation de l'azote atmosphérique, et même en médecine pour la production de substances actives.

#### ☞ Exemple : la spiruline

La spiruline est une cyanobactérie (également connue sous le nom de cyanophycée ou encore algue bleu-vert) appartenant au genre *Arthrospira*. C'est un micro-organisme photosynthétique unicellulaire en forme de spirale, d'où son nom. La spiruline est souvent considérée comme un superaliment en raison de sa composition nutritionnelle riche en protéines, en vitamines, en minéraux et en antioxydants.

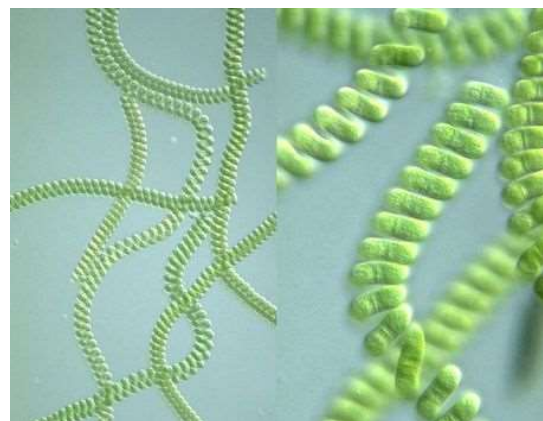


Figure 2.4: Spiruline vue au microscope  
<https://mimosa.com/projects/spiruline-locale-pour-une-spirale-humaine-dans-le-monde> ty

Toutefois, certaines espèces de cyanobactéries peuvent produire des toxines potentiellement dangereuses pour la santé humaine et animale lorsqu'elles prolifèrent dans l'eau, constituant ainsi un risque pour la qualité de l'eau et la sécurité alimentaire.

## 2. *Les archaea*

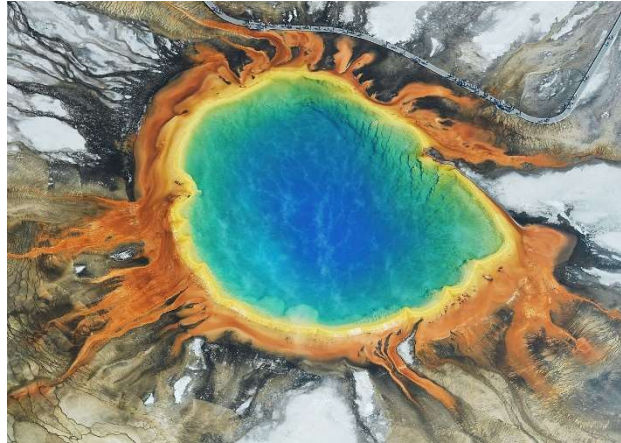


Figure 2.5: Yellowstone National Park, USA. Carsten Steger.

Les Archaea, également appelées archées, sont un domaine distinct de micro-organismes unicellulaires. Ils se distinguent par leur structure cellulaire unique, dépourvue de noyau et d'organites membranaires, les classant ainsi parmi les procaryotes. Initialement classées comme des bactéries, elles sont désormais reconnues comme un groupe distinct. Les archaea se distinguent par leur grande diversité métabolique et leur capacité à survivre dans des environnements extrêmes, tels que les sources chaudes, les lacs salés et les sols acides. Elles utilisent une variété de sources d'énergie, allant des composés organiques aux métaux et même à l'hydrogène. Contrairement à leur apparence similaire aux bactéries, les archées partagent certaines caractéristiques métaboliques avec les eucaryotes, notamment en ce qui concerne la transcription et la traduction. De plus, leur structure lipidique membranaire est unique, caractérisée par l'utilisation d'éthers plutôt que d'esters. L'acide muramique est une composante importante de la paroi cellulaire des bactéries absente chez les archaea. Les archées jouent un rôle crucial dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, participant à des processus tels que la fixation du carbone, le cycle de l'azote et le maintien de la santé de divers microbiotes, y compris ceux présents dans le tube digestif humain.

## II. *Le super-royaume Eukaryota*

### 1. *Royaume des Fungi (Fonges ; Mycètes) - Caractéristiques générales*

Au sens botanique, on désigne les champignons par le terme de mycète (Mycota) parfois fonges (Fungi). Les mycètes sont un groupe d'organismes eucaryotes qui comprend des micro-organismes tels que les levures et les moisissures, ainsi que les champignons plus familiers. La discipline de la biologie consacrée à l'étude des champignons est connue sous le nom de Mycologie (du grec *μύκης* mykes, champignon). Dans le passé, la mycologie était considérée comme une branche de la botanique, bien qu'il soit maintenant connu que les Mycètes sont génétiquement plus étroitement apparentés aux animaux qu'aux plantes.

Au niveau structural, les 'mycètes' sont souvent caractérisés par des structures cellulaires végétatives filamenteuses qu'on appelle hyphes (masc. ou féminin), qui lorsqu'elles sont rassemblées en un ensemble cohérent et visible à l'œil nu, constituent un mycélium. Quand les

filaments sont soudés et/ou enchevêtrés étroitement, on parle de plectenchyme. L'appareil végétatif ne présentant ni feuilles ni racines différenciées, on peut l'appeler thalle

Une caractéristique qui distingue les mycètes d'un autre royaume que les plantes, les bactéries et certains protistes est la présence de chitine dans leurs parois cellulaires. Les mycètes ne photosynthétisent pas comme les plantes, et comme les animaux, sont des hétérotrophes ; ils acquièrent leur nourriture en absorbant des molécules dissoutes, généralement en sécrétant des enzymes digestives dans leur environnement, de ce fait, ils sont les principaux décomposeurs dans les systèmes écologiques. La croissance est leur moyen de mobilité, à l'exception des spores (dont certaines sont flagellées), qui peuvent se déplacer dans l'air ou l'eau.

Le champignon proprement dit est un enchevêtrement de filaments microscopiques, très minces et souvent cachés qu'on appelle le Mycélium.

Les mycètes se reproduisent généralement par la production de spores, qui sont libérées dans l'environnement. La reproduction sexuée implique souvent la fusion d'hyphes pour former un nouvel organisme.

### ***1.1 Complexité de la systématique des Mycètes***

Ces différences et d'autres placent les mycètes dans un groupe unique d'organismes apparentés, appelé les Eumycota (vrais champignons ou Eumycètes), qui partagent un ancêtre commun (c'est-à-dire qu'ils forment un groupe monophylétique), une interprétation également fortement soutenue par la phylogénétique moléculaire. Ce groupe fongique est distinct des Myxomycètes (moisissures visqueuses) et des Oomycètes (moisissures aquatiques) structurellement similaires.

Le royaume des Fungi englobe une énorme diversité de taxons avec des écologies variées, des stratégies de cycle de vie et des morphologies allant des chytrides unicellulaires aquatiques aux grands champignons. Cependant, on en sait peu sur la véritable biodiversité du royaume des mycètes, qui a été estimée entre 2,2 et 3,8 millions d'espèces. Parmi celles-ci, seules environ 148 000 ont été décrites, avec plus de 8 000 espèces connues pour être nuisibles aux plantes et au moins 300 pouvant être pathogènes pour les humains. Depuis les travaux taxonomiques pionniers des XVIIIe et XIXe siècles de Carl Linnaeus, Christiaan Hendrik Persoon et Elias Magnus Fries, les champignons ont été classés selon leur morphologie (par exemple, des caractéristiques telles que la couleur des spores ou les caractéristiques microscopiques) ou leur physiologie. Les avancées en génétique moléculaire ont ouvert la voie à l'incorporation de l'analyse de l'ADN dans la taxonomie, ce qui a parfois remis en question les regroupements historiques basés sur la morphologie et d'autres traits. Les études phylogénétiques publiées au cours de la première décennie du XXIe siècle ont contribué à remodeler la classification au sein du royaume des mycètes, qui est divisé en un sous-royaume, sept phylums et dix sous-phylums.

Plusieurs caractéristiques des mycètes, bien que parfois secondairement perdues chez certains taxons, permettent de regrouper divers organismes au sein de la phylogénie des Eucaryotes. Ces organismes, représentés en orange dans la figure 3.1, incluent à la fois les Oomycètes et les Eumycètes, formant ainsi un groupe polyphylétique. Cependant, l'utilisation du terme "champignon" pour désigner un groupe polyphylétique est sujette à débat. Certains, comme Lecointre et Le Guyader dans leur ouvrage "Classification phylogénétique du vivant, tome 1" (Belin, 2016), réservent le terme "champignons" aux Eumycètes et à leur taxon frère, les Microsporidies, excluant ainsi les Oomycètes.

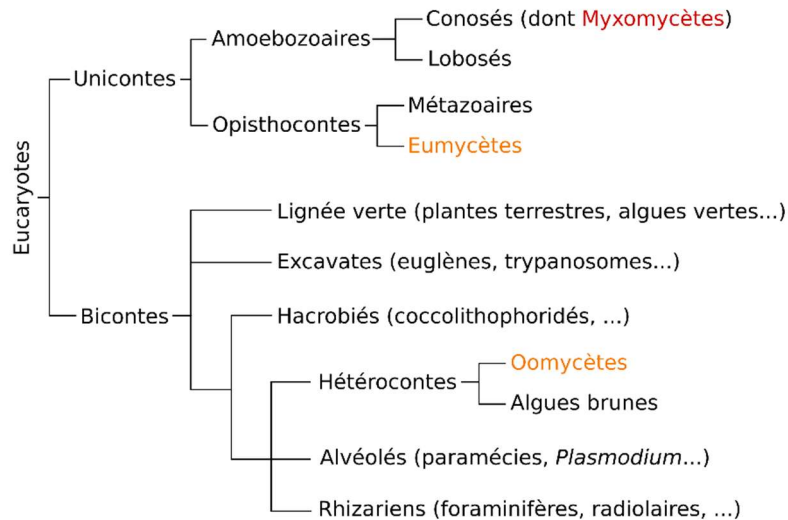


Figure 3.1 - Arbre phylogénétique simplifié des Eucaryotes.

Les groupes en orange sont les groupes rassemblés sous le nom de « champignon » (sens large). D'après Lecointre et Le Guyader (2016).

Dans ce contexte, le terme "champignon" (dans son sens large) est utilisé pour englober toutes les formes de vie filamenteuses et absorbotrophes, y compris les Oomycètes et les Eumycètes. Quant aux "champignons vrais" (dans leur sens strict), désignés également sous le terme d'Eumycètes, ils correspondent aux organismes filamenteux absorbotrophes à paroi chitineuse, incluant la plupart des espèces connues du grand public, telles que les Ascomycètes et les Basidiomycètes. Les Myxomycètes, représentés en rouge dans la figure 3.1, bien qu'étudiés traditionnellement par les mycologues, diffèrent considérablement des Mycètes.

## 1.2 Les Myxomycètes

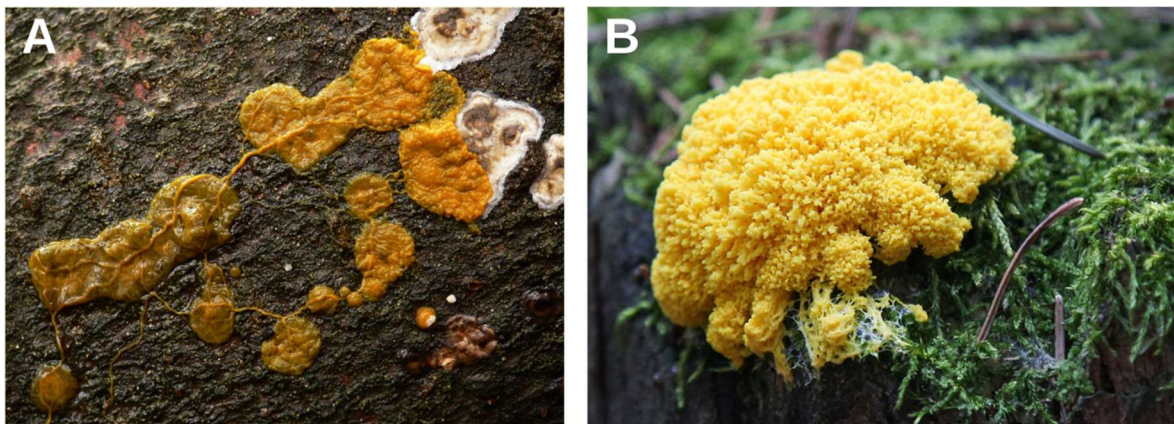


Figure 3.2 - Deux exemples de Myxomycètes

A. Plasmode de *Physarum polycephalum* (photographie par Lebrac, Wikimedia) B. Plasmode de la fleur de tan, *Fuligo septica*. (photographie par Maja Dumat, Wikimedia).

Les Myxomycètes (eucaryotes unicellulaires), bien que parfois considérés comme des champignons, s'en distinguent par deux différences majeures : ils se nourrissent par phagocytose et non par absorbotrophie, et ils n'ont pas de mycélium. Le plasmode du Myxomycète se déplace pour chercher sa nourriture. C'est un prédateur sélectif de bactéries, mais il se régale aussi de levures, spores, moisissures et même de petits champignons.

Les myxomycètes appartiennent au groupe des Conosés, au sein des Amoebozoaires (figure 3.1). Le terme amibe désigne des organismes « animal unicellulaire » produisant des pseudopodes et changeant de forme lorsqu'ils se déplacent. Il est donc parfois utilisé pour

qualifier les Myxomycètes, qui forment des masses gélatineuses capables de mouvement. Cependant, il s'agit d'un groupe polyphylétique : le terme « amibe » n'est donc plus utilisé en phylogénie, et la majorité des organismes anciennement appelés ainsi se trouvent aujourd'hui dans le groupe des Lobosés.

Au cours de leur cycle de vie, les Myxomycètes passent par des stades morphologiques variés, en conditions favorables, ils vivent sous la forme d'un plasmode :

☞ **Le plasmode** est une structure vivante correspondant à une gigantesque cellule unique remplie d'une multitude de noyaux. C'est une masse de protoplasme, de matière hyaline, gélatineuse, molle, déformable, qui n'est pas entourée de paroi rigide et qui peut se déplacer en rampant grâce aux mouvements amiboïdes de ses pseudopodes.

Cette cellule plasmodiale forme une masse gélatineuse (Myxomycète vient du grec *muxa*, *mucus*, signifie glaireux, gélatineux, gluant) qui peut se déplacer à la recherche de nourriture et se divise en plusieurs plasmodes si les ressources sont suffisantes (on parle de multiplication végétative).



Figure 3.3: Différents plasmodes (Jaune et blanc)

Le plasmode du myxomycète a une capacité de survie exceptionnelle : s'il est sectionné, il peut se ressouder instantanément, sinon les deux parties forment deux plasmodes indépendants. Si les conditions sont défavorables, par temps de sécheresse ou de gel, le plasmode se rétracte et se replie dans son support ou bien, il forme un sclérote quasi indestructible.

☞ **Le sclérote** est une structure sclérifiée, dure, résultant de la coalescence d'hyphes en un plectenchyme résistant. C'est une forme de résistance des myxomycètes et de certaines espèces de champignons. L'un des rôles des sclérotés est de survivre aux extrêmes environnementaux. À l'extérieur, le sclérote est parfois pourvu d'une couche membraneuse qui empêche la déshydratation.

Lorsqu'il est réhydraté ou humidifié, le plasmode réapparaît et poursuit sa quête de nourriture. Il ne revisite jamais les mêmes endroits car il laisse une trace de mucus qui lui rappelle d'y être déjà passé.

### 1.2.1 La reproduction des myxomycètes

Quand les conditions environnementales lui conviennent, un mystère pour nous, lui seul le sait, après avoir bien mangé, bien grossi, le plasmode entame sa phase de reproduction en se transformant complètement en myxocarpes, son stade immobile. Il va se métamorphoser en

formant des sporocystes qui contiendront les spores destinées à sa pérennité. L'opération est très rapide ; elle ne prend que quelques heures, le plus souvent la nuit. Durant la sporogénèse, une cloison cellulosique va entourer chaque noyau pour former une spore et une réduction chromatique rendra la spore haploïde (n chromosomes).



Figure 3.4: Métamorphose du plasmode de *Badhamia utricularis*

De la spore germera une cellule animale, une myxamibe ou un myxoflagellé qui peut se déplacer et phagocyter des bactéries. Il y aura plusieurs phases successives de mitoses puis au bout d'un certain temps, deux myxamibes ou deux myxoflagellés vont fusionner. Une plasmogamie (fusion des cytoplasmes) suivie d'une caryogamie (fusion des deux noyaux) aboutiront à former une cellule avec un noyau diploïde (2n chromosomes). A ce stade-là, un plasmode se formera, les noyaux subiront des mitoses de manière synchrone au fur et à mesure que le plasmode mangera et grossira. Plus le plasmode aura de noyaux, plus il pourra fabriquer autant de spores.

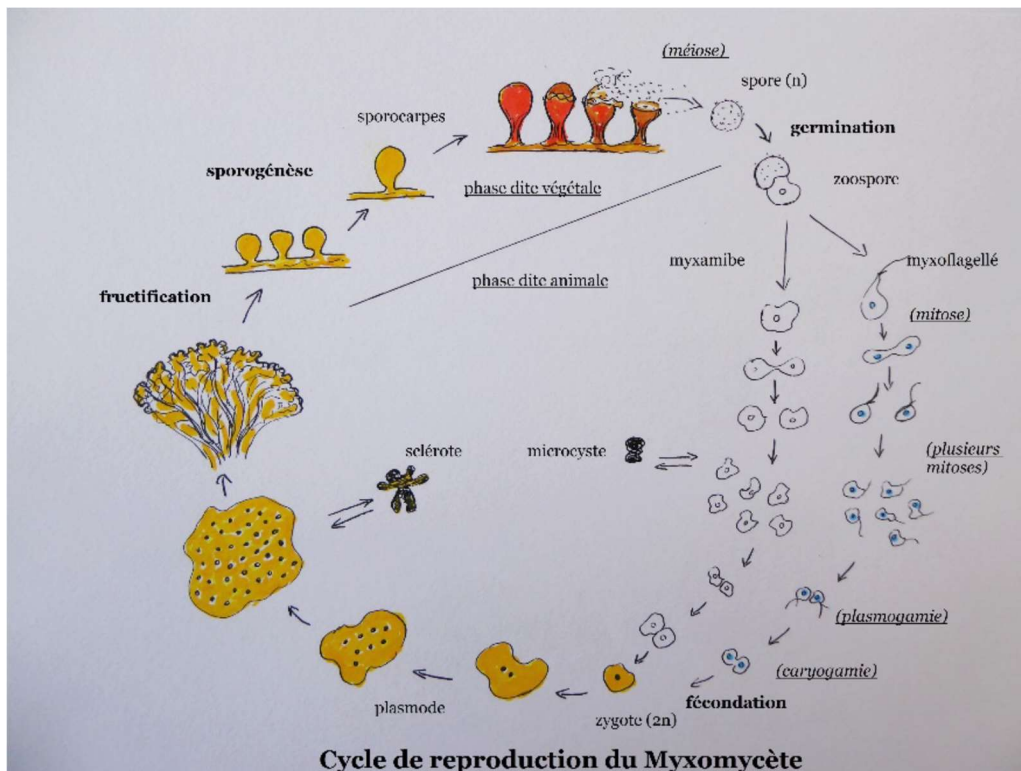


Figure 3.5 : Cycle de reproduction du Myxomycète.



### 1.3 Les Oomycètes

Les Oomycètes, ou Oomycota, forment une lignée phylogénétique distincte de microorganismes eucaryotes ressemblant à des champignons au sein des Hétérocontes (figure x). Leur mycélium est non cloisonné dont la paroi cellulaire contient des glucanes et de la cellulose, ce qui les distingue des champignons vrais (Eumycètes).

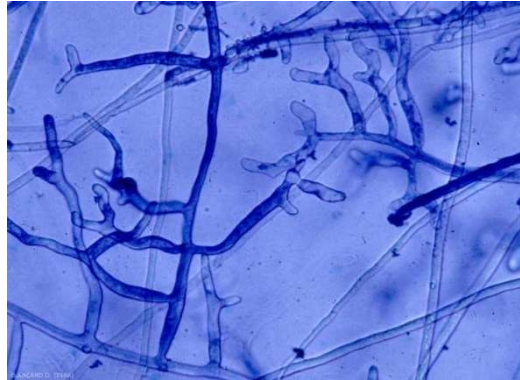


Figure 3.6 : Hyphes non-cloisonné des Oomycètes

Les Oomycètes occupent à la fois des modes de vie saprophytes et pathogènes, et comprennent certains des agents pathogènes les plus redoutables des plantes, provoquant des maladies dévastatrices telles que le mildiou de la pomme de terre et la pourriture subite du chêne.

L'espèce *Phytophthora infestans* (agent pathogène du mildiou), au 19ème siècle, ravagea les champs de pommes de terre d'Irlande, base du régime alimentaire de l'époque. La famine subséquente a tué un million d'Irlandais et provoqué une émigration massive aux États-Unis.

#### 1.3.1 La reproduction chez les oomycètes

La multiplication asexuée dominante est assurée par des cellules nageuses portant deux flagelles, les zoospores (Figure 3.7), produites au sein de sporocystes. Les deux flagelles sont dissemblables : le flagelle postérieur est lisse et l'antérieur est couvert de poils particuliers. Le nom d'Hétérokontes donné aussi au taxon des Stramenopiles vient de cette hétérogénéité des flagelles. Les points d'insertion des flagelles peuvent se rencontrer soit en zone apicale, soit en zone latérale. Les flagelles permettent aux spores de nager dans l'eau ou de se disperser dans le sol. La zoospore peut aussi se débarrasser de ses flagelles et s'enkyster, c'est-à-dire se munir d'une paroi résistante.

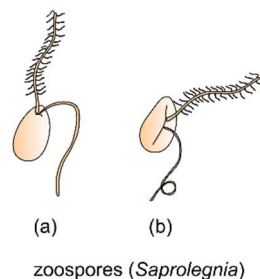


Figure 3.7: *Saprolegnia*, étapes de la reproduction asexuée (a) zoospore auxiliaire (b) zoospore principale d'après Webster, Weber, *Introduction to Fungi*, Cambridge.

La multiplication sexuée se fait directement, sans participation de zoospores, à l'intérieur de sacs produits par l'hyphes, nommés gamétocystes. L'opération se fait entre un gamétocyste mâle, le spermatocyste, et un gamétocyste femelle, l'oogone, par l'intermédiaire de tubes copulateurs qui pénètrent l'oogone. Après production de noyaux haploïdes dans chacun des gamétocystes (par méiose), le tube copulateur (ou siphon) permet une fusion des protoplasmes c'est la

plasmogamie, suivie d'une fusion des noyaux haploïdes c'est la caryogamie au sein de l'oogone. Les gamètes restant à l'intérieur du protoplasme, assurent une grande sécurité à l'étape la plus vulnérable du cycle de reproduction. Les zygotes formés s'appellent des oospores. Ce mode de reproduction sexuée est appelé « oogamie siphonogame ».

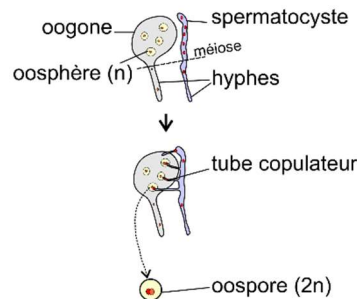


Figure 3.8: Formation d'un tube copulateur entre gamétocystes de types différents et production d'oospores.

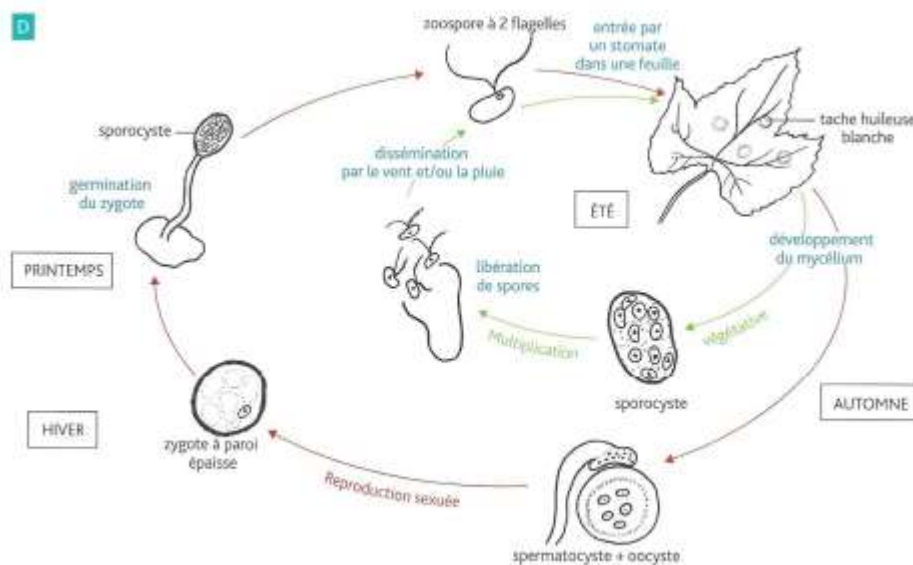


Figure 3.9: Le Mildiou de la Vigne et autres Mildious.

D'après BOUTIN et al. (2015).

### 1.4 Les Eumycètes

Les Eumycètes, ou Eumycota, forment un clade monophylétique regroupant la majorité des champignons traditionnels. Ce terme, signifiant "champignons vrais", est utilisé pour distinguer ces organismes des autres groupes exclus du règne fongique, tels que les Myxomycètes et certains Phycomycètes.

Les Eumycètes représentent l'essentiel du règne des Fungi dans sa définition moderne. Ce règne inclut également les Microsporidies, des parasites intracellulaires qui, historiquement, étaient classés comme des protozoaires plutôt que des champignons. Ensemble, les Eumycètes et les Microsporidies forment le taxon frère des Métazoaires, englobant les animaux. Ces deux groupes constituent le clade des Opisthocontes (Figure 3.1).

Bien que près de 100 000 espèces d'Eumycètes soient connues, on estime qu'il en existe jusqu'à environ 1,5 million, témoignant de la vaste diversité de ce groupe fascinant.

Les mycologues distinguent, suivant l'aspect du thalle (thalle unicellulaire, thalle filamenteux à filaments non-cloisonnés ou coenocytiques, à filaments cloisonnés ou septés, le mode de reproduction sexuée et le type de spore :

- 1) Ascomycètes.
- 2) Basidiomycètes.
- 3) Chytridiomycètes.
- 4) Zygomycètes.
- 5) Gloméromycètes.

#### 1.4.1 Les Ascomycètes

Les Ascomycètes constituent la division Ascomycota, la plus importante, au sein du règne Fungi. Ce sont des champignons à mycéliums qui produisent des ascospores endogènes. Il y a environ 64 000 espèces. Ils peuvent être unicellulaires et thallophytes. La reproduction peut être de deux types : asexuée, par spores exogènes (conidies ou conidiospores) et sexuée, par spore endogène (ascospores). Certaines espèces ont été isolées à partir d'endroits extrêmes, à l'intérieur des rochers sur les plaines glacées de l'Antarctique en mer profonde.

La caractéristique distinctive de ce groupe fongique est l'"asque" (du grec ancien ἀσκός (askós) signifiant "sac, outre"), une structure sexuelle microscopique dans laquelle des spores non mobiles, appelées ascospores, se forment. Cependant, certaines espèces d'Ascomycota sont asexuées et ne forment donc pas d'asque ou d'ascospores. Des exemples familiers de sac fungi comprennent les morilles, les truffes, les levures de boulangerie, les "doigts de mort", et les champignons en forme de coupe.

Les symbiotes fongiques dans la majorité des lichens, tels que *Cladonia*, appartiennent aux Ascomycota.

#### ☞ *Systematique*

Ascomycota est un groupe monophylétique (contenant tous les descendants d'un ancêtre commun). Auparavant classés dans les Deuteromycota aux côtés d'espèces asexuées d'autres taxons fongiques, les ascomycètes asexués (ou anamorphes) sont maintenant identifiés et classés en fonction de similitudes morphologiques ou physiologiques avec les taxons porteurs d'asques, et par des analyses phylogénétiques de séquences d'ADN.

#### ☞ *Ecologie*

Les ascomycètes sont d'une importance particulière pour les humains en tant que sources de composés d'importance médicinale tels que les antibiotiques, ainsi que pour la fermentation du pain, des boissons alcoolisées et du fromage. Des exemples d'ascomycètes incluent les espèces de *Penicillium* sur les fromages et celles produisant des antibiotiques pour traiter les maladies infectieuses bactériennes.

De nombreux ascomycètes sont des agents pathogènes, tant des animaux, des humains et des plantes. Des exemples d'ascomycètes pouvant provoquer des infections chez l'homme incluent *Candida albicans*, *Aspergillus niger* et plusieurs dizaines d'espèces provoquant des infections cutanées. Les nombreux ascomycètes pathogènes des plantes comprennent la tavelure du pommier, la pyriculariose du riz, les champignons de l'ergot, le nœud noir et l'oïdium. Les membres du genre *Cordyceps* spp. sont des champignons entomopathogènes, ce qui signifie qu'ils parasitent et tuent les insectes. D'autres ascomycètes entomopathogènes ont été utilisés avec succès dans la lutte biologique contre les ravageurs, comme *Beauveria*.

Plusieurs espèces d'ascomycètes sont des organismes modèles biologiques en recherche en laboratoire. Le plus célèbre est *Neurospora crassa*, plusieurs espèces de levures, et les espèces d'*Aspergillus*, qui sont utilisées dans de nombreuses études de génétique et de biologie cellulaire.

#### 1.4.1.1 La reproduction chez les Ascomycètes

La reproduction des Ascomycètes fait intervenir des mécanismes très variables selon les espèces. Elle peut être sexuée ou asexuée.

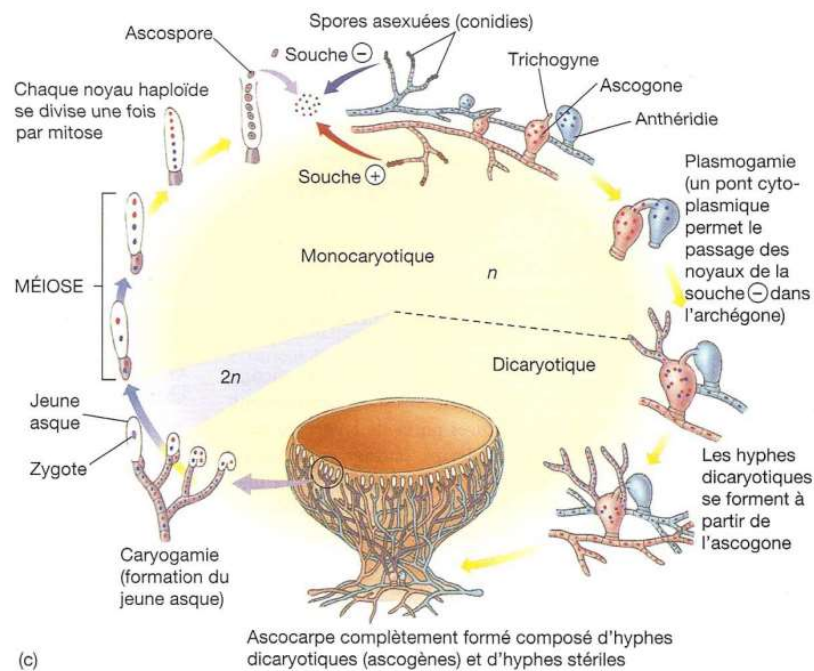


Figure 3.10: Cycle de reproduction d'un ascomycète.

#### ☞ La multiplication sexuée

Les hyphes sont cloisonnés (présence de septa entre les cellules).

Le cycle est monogénétique haplophasique. On note l'alternance entre trois temps :

Une période haploïde monocaryotique qui intervient juste après la fécondation

(*caryogamie*) ; les cellules sont haploïdes et ne présente qu'un noyau :

- Le zygote diploïde subit immédiatement la méiose à l'intérieur d'une structure limitée par une paroi qu'on appelle un asque. On obtient 4 spores.
- Les asques sont regroupés en *apothécies*.
- Ces quatre spores subissent chacune une mitose, d'où l'obtention de huit spores haploïdes ou ascospores.
- La paroi de l'asque mature se déchire et libère ses ascospores qui développent des hyphes cloisonnés sexués (notés + et -) formant un mycélium.

- Localement, des groupements plurinucléés se constituent (gamétocystes) ; le gamétocyste « femelle » (souche +) produit des petits poils permettant la fusion avec le gamétoyte mâle (souche –) (trichogynes), ce qui permet la migration des noyaux – dans le gamétocyste +.

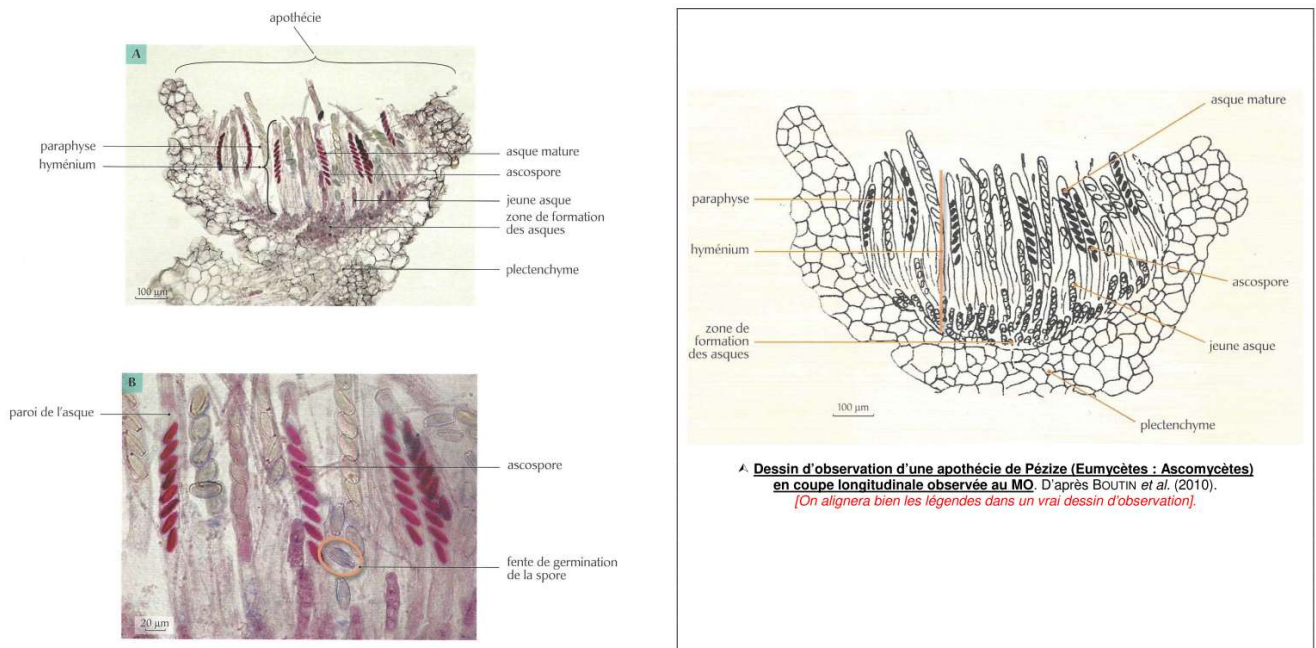


Figure 3.11: Apothécie. D'après BOUTIN et al. (2010)

- Une période haploïde dicaryotique : les cellules sont haploïdes présentent deux noyaux ; il y a en effet formation d'hyphes cloisonnées et bi-nucléées qui sont à l'origine des fructifications qu'on appelle ascocarpe ; il en existe deux types principaux : en forme de bouteille (*périthèce*) ou en forme de coupole évasée (*apothécie*) (figure).
- Une période diploïde réduite au zygote : celui-ci se forme dans les asques par caryogamie (fusion des noyaux). C'est la diplophase, ici réduite au zygote.



Figure 3.12 (Images Wikipédia) : *Bulgaria inquinans* ascocarpe en apothécie (à droite). *Morchella conica* ascocarpe en périthèce (à gauche).

☞ **La multiplication asexuée** (ou végétative) est prédominante chez les Ascomycètes. Elle est responsable de l'expansion rapide de ces champignons. Elle est réalisée par des conidiospores ou conidies (figure) provenant du bourgeonnement de cellules plus ou moins spécialisées appelés cellules conidiogènes. Les cellules conidiogènes sont généralement groupées à l'extrémité de pédoncules ou conidiophores, ce qui facilite la dispersion des conidies par le vent, l'eau ou des animaux.

### 1.4.2 Les Lichens (font partie des ascomycètes)

Les lichens sont des associations autoportantes spectaculairement réussies entre un champignon (le partenaire fongique, le "*mycobionte*") et une ou plusieurs algues vertes ou cyanobactéries (le partenaire photosynthétique, le "*photobionte*"), ainsi que d'autres organismes microscopiques (surtout des bactéries). Ils constituent une symbiose mutuellement bénéfique, stable et écologiquement obligatoire où le partenaire fongique forme la structure extérieure (l'"exhbitant") et enveloppe mais ne pénètre pas les partenaires photosynthétiques inclus, les bactéries spécialisées non photosynthétiques, et parfois d'autres champignons. Ils sont souvent considérés comme des écosystèmes plutôt que des organismes.

#### 1.4.2.1 Ecologie

Les lichens jouent un rôle important dans le cycle des nutriments et agissent en tant que producteurs dont se nourrissent de nombreux consommateurs trophiques supérieurs, tels que les animaux, les gastéropodes, les nématodes, les acariens et les collemboles. Les lichens ont des propriétés différentes de celles de leurs organismes constitutifs. Ils se présentent sous de nombreuses couleurs, tailles et formes, et ressemblent parfois à des plantes, mais ils ne sont pas des plantes. Ils peuvent avoir de petites branches sans feuilles (fruticuleuse), des structures plates semblables à des feuilles (foliose), croître en forme de croûte, adhérant étroitement à une surface (substrat) comme un épais revêtement de peinture (crustose), avoir une apparence poudreuse (leprose), ou d'autres formes de croissance.

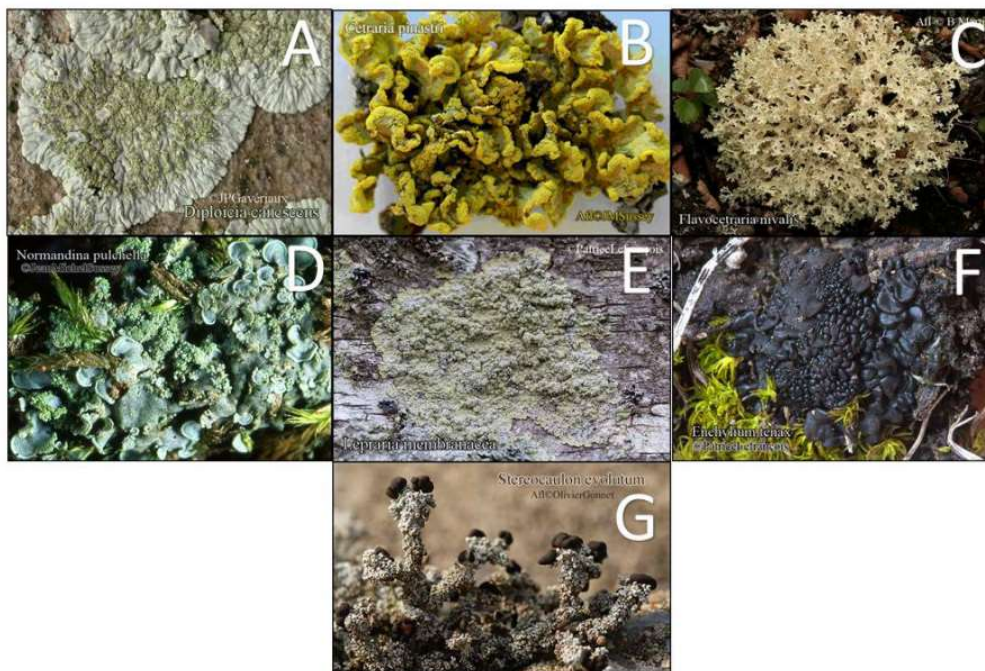


Figure 3.13: Illustration des principaux types morphologiques de Lichens. a – thalle crustacé de *Diploicia canescens* ; b – thalle foliacé de *Vulpicida pinastri* ; c – thalle fruticuleux de *Flavocetraria nivalis* ; d – thalle squamuleux de *Normandina pulchella* ; e – thalle lépreux de *Lepraria membranacea* ; f – thalle gélatineux d'*Enchylium tenax* ; g – thalle complexe de *Stereocaulon evolutum*. (Image Pierre Le Pogam-Alluard - 2016, Analyses des lichens par spectrométrie de masse : déréplication et histolocalisation.

Un macrolichén est un lichen qui est soit buissonnant soit feuillu ; tous les autres lichens sont appelés microlichens. Ici, "macro" et "micro" ne se réfèrent pas à la taille, mais à la forme de croissance. Les noms courants des lichens peuvent contenir le mot mousse (par exemple,

"mousse de renne", "mousse d'Islande"), et les lichens peuvent ressembler superficiellement à des mousses et pousser avec elles, mais ils ne sont pas étroitement liés aux mousses ou à toute plante. Les lichens n'ont pas de racines qui absorbent l'eau et les nutriments comme le font les plantes, mais comme les plantes, ils produisent leur propre nutrition par photosynthèse. Lorsqu'ils poussent sur les plantes, ils ne vivent pas en parasites, mais utilisent plutôt la surface de la plante comme substrat.

Les lichens se trouvent du niveau de la mer aux altitudes alpines élevées, dans de nombreuses conditions environnementales, et peuvent pousser sur presque toutes les surfaces. Ils sont abondants sur l'écorce, les feuilles, les mousses ou autres lichens et pendent des branches "vivant dans l'air" (épiphytes) dans les forêts tropicales et dans les bois tempérés. Ils poussent sur la roche, les murs, les toits, les surfaces de sol exposées, le caoutchouc, les os, et dans le sol en tant que partie des croûtes biologiques du sol. Divers lichens se sont adaptés pour survivre dans certains des environnements les plus extrêmes de la Terre : la toundra arctique, les déserts chauds et secs, les côtes rocheuses, et les terrils toxiques. Ils peuvent même vivre à l'intérieur de la roche solide, en croissant entre les grains (endolithiques).

On estime que 6 à 8 % de la surface terrestre de la Terre est couverte de lichens. On connaît environ 20 000 espèces. Certains lichens ont perdu la capacité de se reproduire sexuellement, mais continuent de se spécialiser. Ils peuvent être considérés comme des écosystèmes miniatures relativement autonomes, où les champignons, les algues ou les cyanobactéries ont le potentiel d'interagir avec d'autres microorganismes dans un système fonctionnel qui peut évoluer en un organisme composite encore plus complexe. Les lichens peuvent vivre longtemps, certains étant considérés comme parmi les plus anciens êtres vivants. Ils sont parmi les premiers êtres vivants à pousser sur de la roche fraîche exposée après un événement tel qu'un glissement de terrain. La longue durée de vie et le taux de croissance lent et régulier de certaines espèces peuvent être utilisés pour dater des événements (lichénométrie). Les lichens sont une espèce clé dans de nombreux écosystèmes et bénéficient aux arbres et aux oiseaux.

#### 1.4.2.2 La reproduction des lichens

Semblable à celui des ascomycètes, les lichens ont plusieurs modes de reproduction : reproduction végétative ou reproduction asexuée, et reproduction sexuée.

☞ **La reproduction végétative** se fait par simple fragmentation du thalle (phénomène du bouturage) ou à l'aide d'organes spécialisés qui s'en détachent :

- des isidies, protubérances de formes variées sur le cortex supérieur, contenant les deux symbiotes densément associés ;
- des soralies, fissures du thalle permettant l'apparition de sorédies (amas de cellules algales entourées d'hyphes) ;
- des sorédies (sans formation de soralies) ;
- des pycnides (conceptacles à spores).

☞ **La reproduction asexuée** est assurée par le mycobionte seul qui produit des conidies à l'extrémité des hyphes toujours enfoncés dans le thalle.

La reproduction sexuée, assurée aussi par le mycobionte, forme deux types d'organes spécialisés, les apothécies (forme de cupules à la surface du cortex) ou les périthèces (forme d'outres plus ou moins enfoncées dans le thalle) qui libèrent des spores par rupture du sommet de l'asque selon des mécanismes spécifiques ou par désintégration de la paroi (souvent du

type diable en boîte sous l'action de la pression osmotique qui augmente, ce qui déchire l'exoascus et fait jaillir l'endoascus comme un ressort). Les apothécies présentent une grande diversité de taille, de couleur et de localisation sur le thalle.

Ces organes forment un ensemble de caractères très utilisés pour la détermination des espèces.

### 1.4.3 Les Basidiomycètes

Basidiomycota est l'une des deux grandes divisions qui, avec les Ascomycota, constituent le sous-royaume Dikarya (souvent appelé "les champignons supérieurs") dans le règne Fungi. Les membres sont connus sous le nom de basidiomycètes. Plus spécifiquement, Basidiomycota inclut ces groupes : agarics, puffballs, stinkhorns, bracket fungi, d'autres polypores, jelly fungi, boletes, chanterelles, earth stars, smuts, bunts, rusts, mirror yeasts, et Cryptococcus, la levure pathogène pour l'homme.

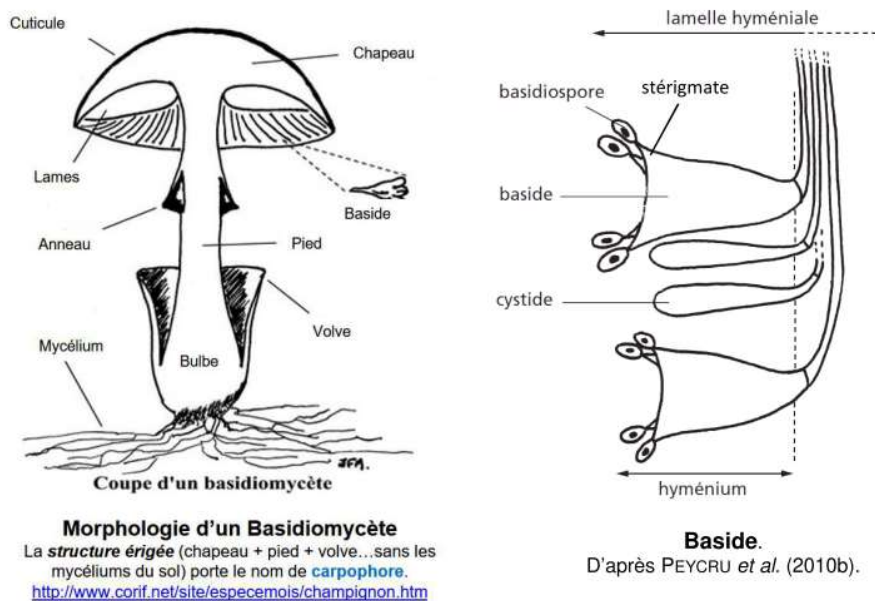


Figure 3.14: Organisation d'un Basidiomycète. D'après PEYCRU *et al.* (2010)

Les Basidiomycota sont des champignons filamenteux composés d'hyphes (à l'exception des basidiomycètes-levures) et se reproduisent sexuellement via la formation de cellules terminales spécialisées en forme de massue appelées basides qui portent normalement des méiospores externes (généralement quatre). Ces spores spécialisées sont appelées basidiospores. Cependant, certains Basidiomycota sont des reproducteurs asexuels obligatoires. Les Basidiomycota qui se reproduisent de manière asexuée peuvent généralement être reconnus comme membres de cette division par une similitude globale avec d'autres, par la formation d'une caractéristique anatomique distinctive (la connexion à pince), les composants de la paroi cellulaire, et définitivement par une analyse moléculaire phylogénétique des données de séquence d'ADN.

#### 1.4.3.1 Ecologie

Ce sont, en général, des organismes relativement peu compétitifs : aussi se réfugient-ils souvent dans ces sortes de « niches » que constituent le parasitisme, la symbiose ou la lignivorie, autant de modes de vie qui leur procurent des substrats dans lesquels ils ne se heurtent pas à la concurrence des Ascomycètes (ou de leurs formes imparfaites) et des Bactéries. La vie parasitaire est pratiquement de règle chez ceux des Basidiomycètes qui n'édifient pas de



basidiocarpes agrégés volumineux (Urédinales, Ustilaginales, Exobasidiales). Les représentants des autres groupes sont, au contraire, plutôt saprophytiques ou symbiotiques.

Les espèces lignivores ont un comportement saprophytique, même lorsqu'elles se développent chez des arbres encore vivants : elles ne dégradent en réalité que des tissus morts (bois de cœur) et, en règle générale, seulement les parois cellulaires. Les autres saprophytes vivent le plus souvent aux dépens de débris végétaux peu décomposés, riches en éléments ligno-cellulosiques : les Basidiomycètes sont les seuls organismes capables de réaliser les premières étapes de leur dégradation.

### 1.4.3.2 La reproduction chez les Basidiomycètes

#### ☞ La reproduction sexuée

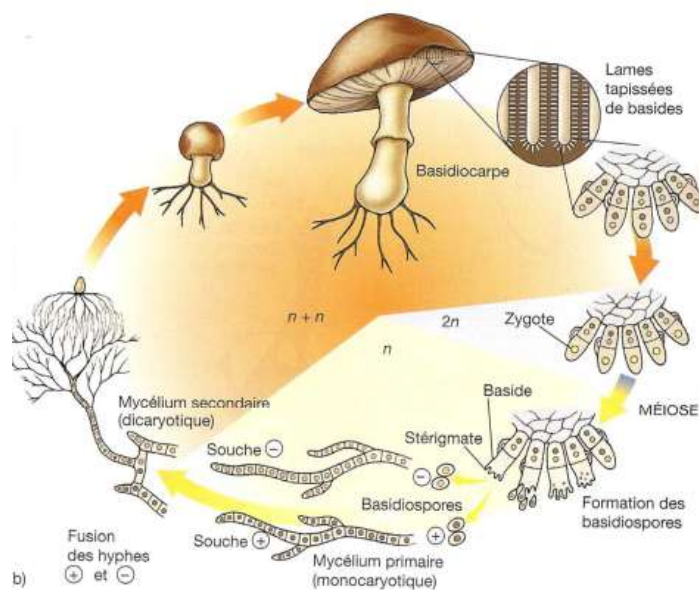


Figure 3.15: Un Basidiomycète et son cycle de reproduction. D'après RAVEN et al. (2007).

- Il existe deux types de thalles haploïdes (notés + et -) qui s'attirent mutuellement. Ces thalles sont composés d'hyphes cloisonnées haploïdes monocaryotiques formant le mycélium primaire.
- Leur rencontre aboutit à une fusion des cytoplasmes (plasmogamie) sans fécondation. On obtient un mycélium secondaire qui est haploïde dicaryotique.
- À partir de ce mycélium, se développe une fructification nommée le carpophore. À la périphérie des lames du chapeau, il a formation de basides où il y a caryogamie (= fusion des noyaux qui donne un zygote diploïde) immédiatement suivie de la méiose qui produit ainsi des basidiospores haploïdes initialement attachées à la baside par des stérigmates.
- Ces spores pourront ensuite germer dans le sol et former un nouveau mycélium primaire.

#### 1) La reproduction asexuée

Des spores asexuées (appelées conidies) se forment à partir des filaments mycéliens par simple multiplication cellulaire. La reproduction asexuée joue cependant un rôle plus secondaire que chez les Ascomycètes.

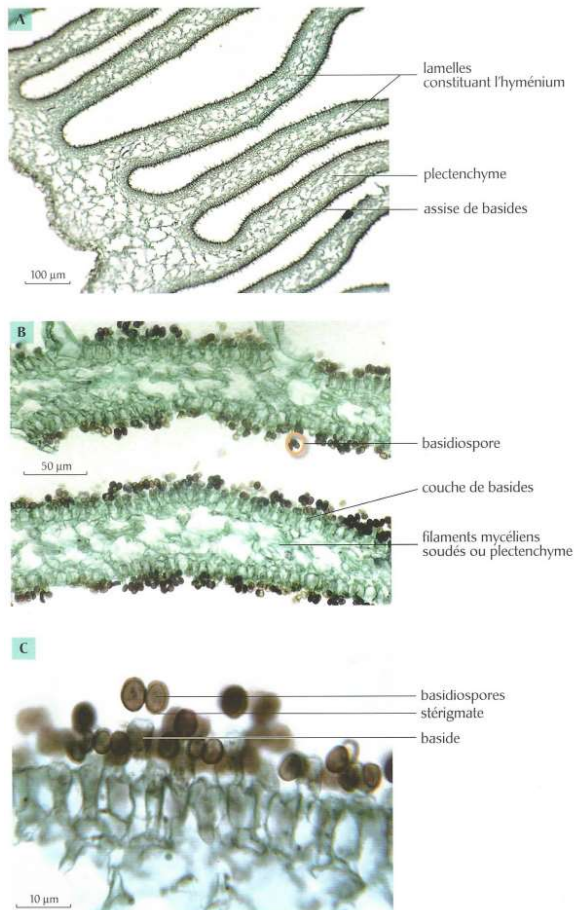


Figure 3.16: Observation d'une coupe de Coprin (MO). D'après BOUTIN et al. (2010).

#### 1.4.4 Les glomeromycota

Les glomeromycota, souvent appelés glomérormycètes, car ils ne comprennent qu'une seule classe, les Glomérormycètes sont une classe de champignons de la division des Glomeromycota. Ce sont des champignons exclusivement endomycorhiziens vivant en symbiose avec les racines d'un grand nombre de plantes. Ces champignons symbiotiques étaient autrefois classés dans l'ordre des Glomales parmi les Zygomycètes. Il y a environ 230 espèces décrites à ce jour.

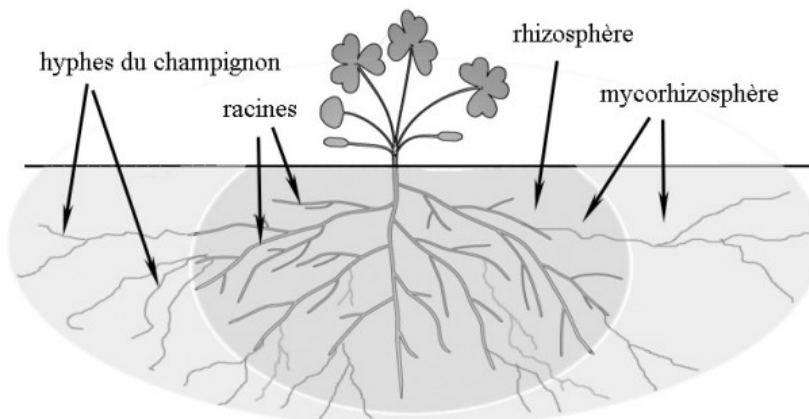


Figure 3.16: Importance des glomeromycota pour les plantes

Les hyphes augmentent de façon considérable le volume de sol exploitable.

Les Glomeromycota permettent (entre autres) à plus de 80% des plantes herbacées (et des arbres en régions tropicales) de s'approvisionner en eau et en éléments minéraux (phosphore en particulier), puisés dans le sol grâce à des mycorhizes particulières, les VAM – abréviation de

Vesicular-Arbuscular Mycorrhizas - mycorhizes à vésicules et arbuscules -parfois encore appelées endomycorhizes vésiculo-arbusculaires, par opposition aux ectomycorhizes engendrées par les lactaires, russules, bolets ou cortinaires dans les écosystèmes forestiers tempérés et arctiques.

#### **1.4.4.1 Systématique**

Les études phylogénétiques récentes ont conduit à la création d'un phylum bien individualisé, celui des Glomeromycota, clade monophylétique dans lequel une espèce, *Geosiphon pyriforme*, présente une symbiose de type différent en s'associant, non pas avec des photosymbiotes eucaryotes mais avec des photosymbiotes procaryotes, des cyanobactéries (*Nostoc*). Dans les Glomeromycota on distingue actuellement quatre ordres, les Glomerales (autrefois appelées Glomales), les Diversisporales, les Paraglomerales, et les Archaeosporales (exGeosiphonales), parmi lesquelles se trouve la famille des Geosiphonaceae, monospécifique, contenant le *Geosiphon* (autrefois considéré comme étant une espèce lichénisée).

#### **1.4.4.2 Cycle de vie des glomeromycota**

##### **a) Développement des hyphes dans le sol**

Les premières hyphes ont deux origines possibles, elles sont issues de la germination d'une spore ou proviennent de racines mycorhizées qui se trouvent déjà dans le sol. Les hyphes issues de la germination de spores ont une durée de vie très limitée, elles dépérissent si elles ne rencontrent pas rapidement une racine compatible ; ce champignon est en effet un biotrophe obligatoire, il ne peut pas se développer sans son hôte. Les hyphes d'origine racinaire sont des filaments résultant de l'activité d'une mycorhization antérieure qui développe son réseau mycélien dans le but de rechercher des éléments nutritifs ou de partir à la conquête d'autres racines. Ces hyphes ne sont pas cloisonnées, elles ont une structure cœnocytique, les noyaux sont dans un même cytoplasme commun ; en fonction de leur activité principale, on peut distinguer plusieurs types d'hyphes extra-racinaires :

- Les hyphes d'absorption, très ramifiées et minces, elles prélèvent les molécules du sol.
- Les hyphes conductrices ayant un diamètre plus important et un cytoplasme peu abondant.
- Les hyphes d'infection qui peuvent coloniser de nouvelles racines.
- Les hyphes sporogènes qui donneront naissance aux spores.

##### **b) Rencontre avec la racine**

Lorsqu'une racine rencontre au cours de sa croissance, les hyphes du sol, issues d'une germination récente (ou en survie suite à une diminution de leur activité métabolique), les hyphes sont comme attirées, elles viennent se placer le long de la racine, des contacts s'établissent, de petits gonflements apparaissent ; ils correspondent à des appressoria à partir desquels les hyphes vont pénétrer dans la partie externe de la racine en passant entre les cellules de l'épiderme et du cortex ; les hyphes vont alors pouvoir se développer, se ramifier, coloniser la racine.

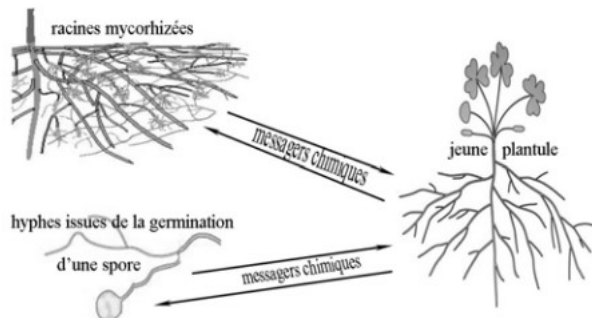


Figure 3.17: Interaction avec la racine d'une plante (D'après un schéma trouvé sur le site : <http://mycorrhizas.info/resource.html#photos>)

Cette communication entre l'hyphe et la racine est possible via la libération de substances chimiques par la plante, les plus courantes étant les molécules de *strigolactone* (le 5-deoxy-strigol) qui stimulent l'activité des mitochondries du champignon qui reprend son activité métabolique.

### c) La prolifération intra-racinaire et la formation des arbuscules

Lorsque l'appressorium se forme, l'hyphe cherche à se déplacer dans les espaces intercellulaires disponibles, avec deux modes de propagation distingués : la propagation linéaire le long des espaces intercellulaires longitudinaux et la propagation en enroulement lorsque l'espace est limité. Après quelques jours, les hyphes se ramifient en donnant naissance à des structures de plus en plus fines, formant ce qui ressemble à un petit arbre appelé arbuscule. L'arbuscule pénètre dans les cellules végétales, entraînant une déformation de la cellule hôte, mais sans pénétrer dans son cytoplasme. Cela crée une grande zone de contact entre l'hyphe et la cellule végétale, facilitant les échanges de nutriments.

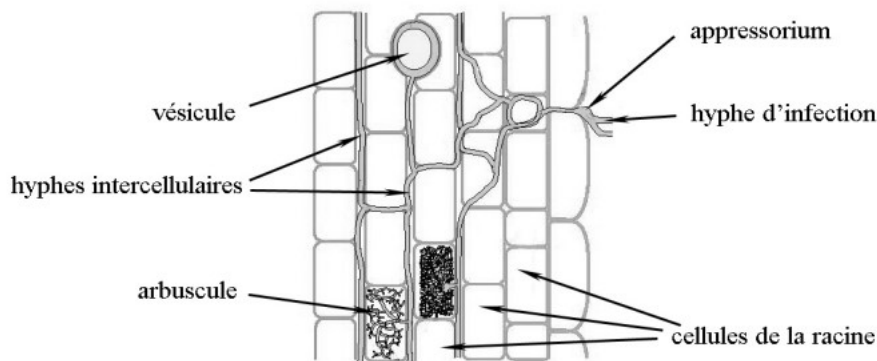


Figure 3.18: Prolifération des hyphes, formation des arbuscules et des vésicules. (D'après un schéma trouvé sur le site : <http://mycorrhizas.info/resource.html#photos>)

Les arbuscules sont éphémères, vivant généralement quelques jours, mais peuvent survivre plus longtemps dans certaines conditions. Finalement, ils sont absorbés par la cellule racinaire, fournissant à la plante de l'eau, des sels minéraux et d'autres nutriments essentiels.

### d) La formation des vésicules

Après le développement des arbuscules, des hyphes commencent à se renfler à certains endroits de leur parcours ou à leur extrémité pour donner des espaces de stockage qui permettront la mise en réserve de diverses substances : lipides (corps gras), tri-acylglycérol (TAG). Ces structures appelées vésicules peuvent être inter- ou intracellulaires, elles contiennent de

nombreux noyaux et leur paroi est souvent mince mais peut être épaisse, dans le cortex des racines âgées (absentes toutefois chez les Gigasporinae).

#### e) *Reproduction*

Le suivi génétique accompagné de marqueurs moléculaires n'a pas révélé de recombinaisons génétiques chez ces champignons, suggérant qu'ils sont dépourvus de reproduction sexuée et se reproduisent par des spores asexuées, appelées mitospores. Ces mitospores se forment lorsque l'association symbiotique entre le champignon et la plante hôte décline ou lorsque le champignon utilise les nutriments stockés dans les racines.

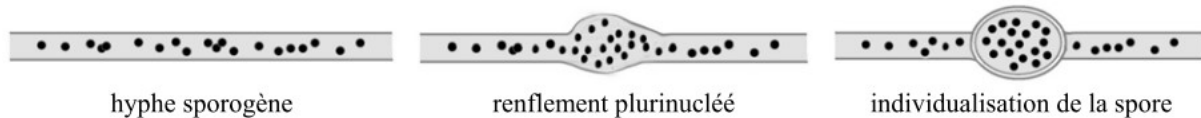


Figure 3.19: Formation des spores asexuées

Les hyphes sporogènes, des hyphes spécifiques, produisent des renflements contenant du cytoplasme, de nombreux noyaux et des réserves, qui se transforment en mitosporanges enveloppés d'une paroi épaisse. Les mitospores peuvent être libres ou regroupées en structures appelées mitosporomes. Ces spores sont de grandes tailles et contiennent de nombreux noyaux. Elles servent à la dissémination de l'espèce et peuvent également agir comme des structures de stockage ou de repos dans le cycle biologique. Les mitospores contiennent également divers microorganismes, dont le rôle précis dans la rhizosphère reste encore à préciser.

#### 1.4.4.3 *Intérêt de la symbiose*

Le champignon mycorhizien dépend de la plante hôte pour obtenir des glucides, car il ne peut pas les produire lui-même. La plante fournit principalement des hexoses, tels que le glucose, qui sont utilisés par le champignon pour produire de l'énergie, construire ses structures cellulaires et stocker des réserves.

En retour, la plante peut produire des molécules complexes qui favorisent la croissance des hyphes fongiques. Pour la plante hôte, la présence de champignons mycorhiziens augmente le volume de sol exploitable par ses racines, créant ainsi une mycorhizosphère qui permet d'extraire de l'eau et des éléments nutritifs sur une plus grande surface (figure ). Cela peut être particulièrement bénéfique dans des environnements difficiles, comme les déserts, où les hyphes fongiques peuvent aller chercher de l'eau en profondeur.

#### 1.4.5 *Les zygomycètes*

Les Zygomycètes sont une division polyphylétique de champignons, qui formait traditionnellement la division des Zygomycota. Ils doivent leur nom à leur mode de reproduction sexuée, qui se fait par cystogamie avec formation de zygospores. Très discrets et de taille le plus souvent microscopique, ce sont des champignons à spores dépourvues de flagelles, dans lesquels les cellules ne sont pas séparées par des cloisons, leurs hyphes étant cœnocytiques ou siphonnés, avec de nombreux noyaux dans un même siphon. Ces champignons sont également caractérisés par une abondante reproduction asexuée et une croissance rapide qui leur permettent de coloniser rapidement leur milieu.

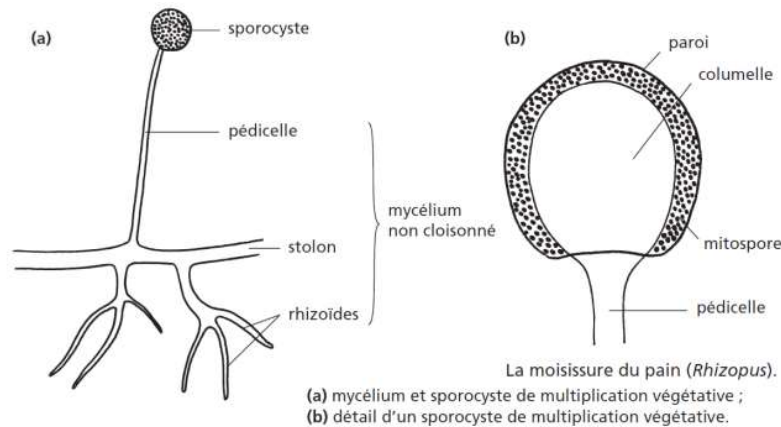


Figure 3.20: Appareil végétatif d'une Mucorale. D'après PEYCRU et al. (2010)

Les études de phylogénétique moléculaire du début du 20<sup>ème</sup> siècle ont conduit à abandonner ce taxon qui était composé de plusieurs lignées évolutives distinctes. Ses membres ont été répartis entre deux groupes principaux, considérés depuis 2018 comme des sous-règnes à part entière, *les Mucoromyceta* et *les Zoopagomyceta*. La position des Basidiobolomycètes dans cette classification révisée est controversée, mais ils pourraient constituer une troisième branche distincte, *les Basidiobolomyceta*.

#### 1.4.5.1 Ecologie

Environ 1060 espèces sont connues. Ils sont principalement terrestres, vivant dans le sol ou sur des matières végétales ou animales en décomposition. Certains sont des parasites de plantes, d'insectes et de petits animaux, tandis que d'autres forment des relations symbiotiques avec les plantes.

Les zygomycètes jouent un rôle important dans les écosystèmes en participant activement au processus de décomposition de la matière organique morte.

Certains zygomycètes sont des parasites de plantes, d'animaux ou d'autres champignons, causant des maladies chez leurs hôtes.

D'autres zygomycètes sont des symbiotes, formant des associations bénéfiques avec les plantes, notamment dans les mycorhizes.

#### 1.4.5.2 La reproduction chez les zygomycètes

##### ☞ Reproduction sexuée et végétative

Il existe deux types de thalles haploïdes (notés + et –) qui s'attirent mutuellement. Ces thalles se présentent comme des siphons (hyphes non cloisonnées).

- f) Leur rencontre aboutit à la production de gamétocystes au sein desquels sont produits des gamètes.
- g) Il y a ensuite fécondation par fusion des gamétocystes + et – (cystogamie), ce qui aboutit à un coenozygocyste (= zygosporocyste) où les noyaux fusionnent deux à deux (caryogamie), mais un seul noyau diploïde (zygote) persiste ; celui-ci subit la méiose immédiatement (retour immédiat à l'haploïdie >> le cycle est monogénétique haplophasique) et un seul des noyaux haploïdes subsiste, devenant une méiospore.
- h) Cette méiospore germe et produit un zygosporocyste renfermant des zygosporocystes produites par mitoses.

- i) Ces spores germent et produisent les hyphes de la Moisissure, pouvant se multiplier végétativement sans reproduction sexuée, formant de mitospores.

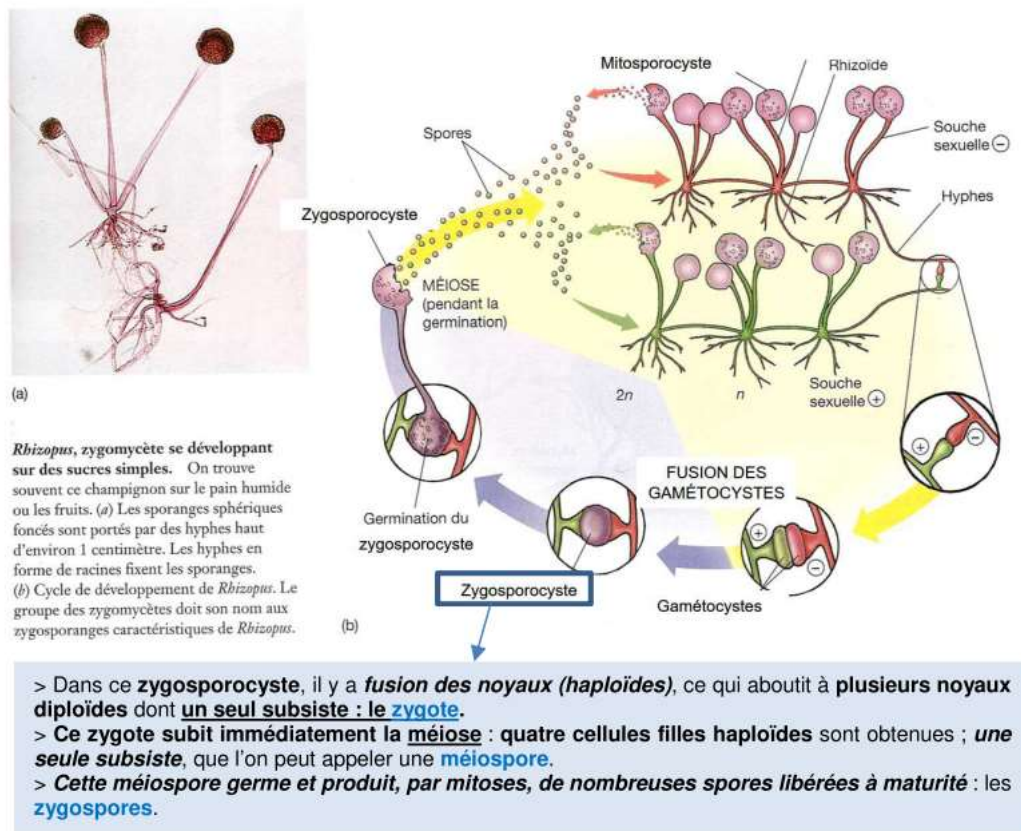


Figure 3.21: Une Mucorale et son cycle de reproduction. D'après RAVEN et al. (2007).

### 1.4.6 Les Chytridiomycètes

Les chytridiomycètes, également appelés chytrides, sont un groupe de mycètes microscopiques appartenant au phylum Chytridiomycota. Ils sont saprophytes ou parasites, présentant des caractères considérés comme ancestraux (les plus anciens fossiles des mycètes). Les chytridiomycètes sont généralement aquatiques ou terrestres, se trouvant dans des environnements humides tels que les sols, les eaux douces, les marécages, les milieux aquatiques et même dans le tractus digestif de certains animaux.

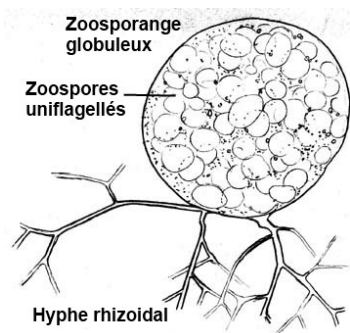


Figure 3.22: Structure d'un Chytridiomycète, *Chytridium confervae*  
[https://www.researchgate.net/publication/281035050\\_978-3-8417-9776-6](https://www.researchgate.net/publication/281035050_978-3-8417-9776-6)

☞ **Morphologie** - Les chytridiomycètes se distinguent des autres champignons par la présence de zoospores mobiles, généralement munies d'un flagelle, à un stade de leur cycle de vie. Ils peuvent avoir des structures variées, allant des formes unicellulaires aux structures

multicellulaires. Certains sont unicellulaires, d'autres coenocytiques alors que d'autres encore produisent un mycélium comme le font d'autres champignons.

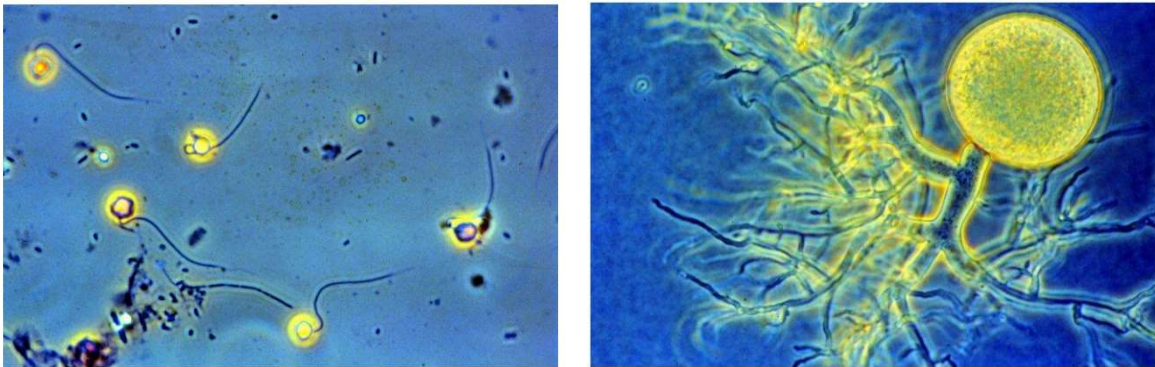


Figure 3.23: Structure d'un Chytridiomycète, Observation microscopique (Zoospores monoflagellés à gauche; Rhizomycélium à droite) ([https://courses.minia.edu.eg/Attach/16225BT%20333%20\(3\)%202017.pdf](https://courses.minia.edu.eg/Attach/16225BT%20333%20(3)%202017.pdf))

### 1.4.6.1 La reproduction chez les Chytridiomycètes

Leur cycle de vie comprend des phases sexuées et asexuées.

#### ☞ *Reproduction asexuée*

La reproduction asexuée se produit par la formation de zoospores uniflagellées postérieurement, qui produisent des sporanges globuleux, cylindriques, en forme de flacon ou irrégulièrement lobés. Le flagelle unique est de type fouet. En trouvant un substratum, la zoospore rétracte son flagelle et germe en émettant un tube germinatif, la germination étant ainsi monopolaire.

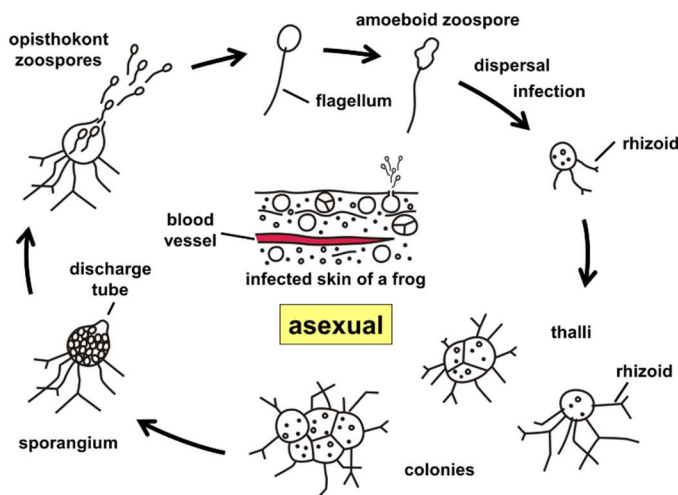


Figure 3.24: Reproduction asexuée *Batrachochytrium dendrobatidis*

© M. Piepenbring, CC BY-SA

☞ *La reproduction sexuée* chez les chytrides primitifs se fait par isogamie (gamètes de même taille et de même forme). Les isogamètes ont une morphologie similaire à celle de la zoospore. Il est généralement admis que le zygote résultant forme une spore de repos, qui sert de moyen de survie dans des conditions défavorables.

La reproduction sexuée est courante et bien connue chez les membres des Monoblepharidomycetes. Typiquement, ces chytrides pratiquent une version de l'oogamie : le mâle est mobile et la femelle est stationnaire. C'est la première occurrence d'oogamie



dans le règne Fungi. En bref, les monoblephs forment des oogonies, qui donnent naissance aux œufs, et des anthéridies, qui donnent naissance aux gamètes mâles. Une fois fécondé, le zygote devient soit une oospore enkystée ou mobile, qui devient finalement une spore de repos qui germera plus tard et donnera naissance à de nouveaux zoosporanges.

#### **1.4.6.2 Ecologie**

Les chytridiomycètes jouent un rôle crucial dans les écosystèmes en tant que décomposeurs, en dégradant la matière organique morte, en recyclant les éléments nutritifs et en participant aux réseaux trophiques.

Certains chytridiomycètes sont des parasites connus de plantes, d'algues, de champignons, d'animaux aquatiques et même d'amphibiens. Certains membres de ce groupe sont responsables de maladies chez les amphibiens, comme *Batrachochytrium dendrobatidis* (Figure 3.24), qui a été associé au déclin et à l'extinction de nombreuses populations d'amphibiens à travers le monde.