

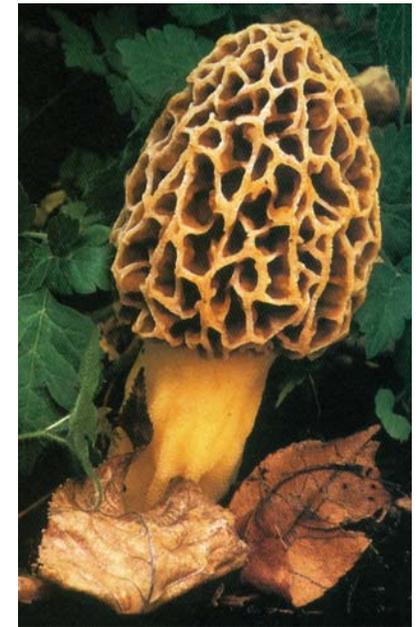
À la découverte des champignons

Cours d'introduction « génétique des champignons »

11 juin 2012

Yves Piché

**Laboratoire de mycologie forestière
IBIS, CEF, Pavillon Charles-Eugène-Marchand
Université Laval**



Les champignons : un modèle génétique



- Eucaryotes haploïdes
- Production d'un grand nombre de spores haploïdes
- Facilement cultivables en laboratoire (boîtes de Petri), cycle sexué complet, prennent peu de place, économique
- Anastomoses, fusion des hyphes et échange

de noyaux



Les levures: un « top » modèle génétique

- pour les mêmes raisons évoquées sans compter division 90 min.
- beaucoup de travaux sur les génotypes et les expressions physiologiques (auxotrophes, mating types)
- premier génome séquencé chez les eucaryotes: 12Mpb
- Obtention des chromosome artificiels (YAC), existence de centaines de mutants, génomique, transcriptomique métabolomique



A microscopic image of a mushroom cell, showing a network of hyphae and spores. The image is framed by a double-line border. The text "Qu'est-ce qu'un champignon?" is overlaid in the center.

Qu'est-ce qu'un champignon?

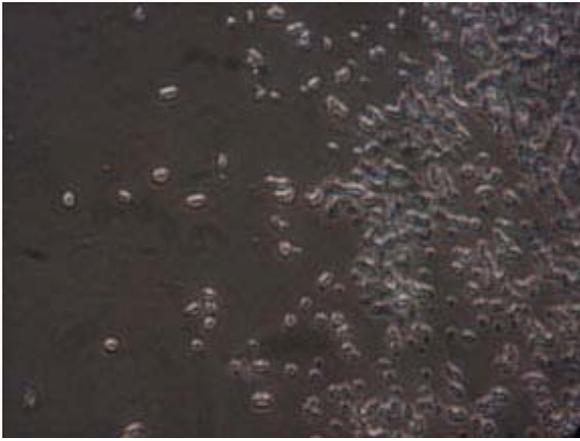
La définition du dictionnaire



«Végétal sans chlorophylle formé d'un pied surmonté d'un chapeau» dont la reproduction s'effectue généralement par des spores »



Les champignons...



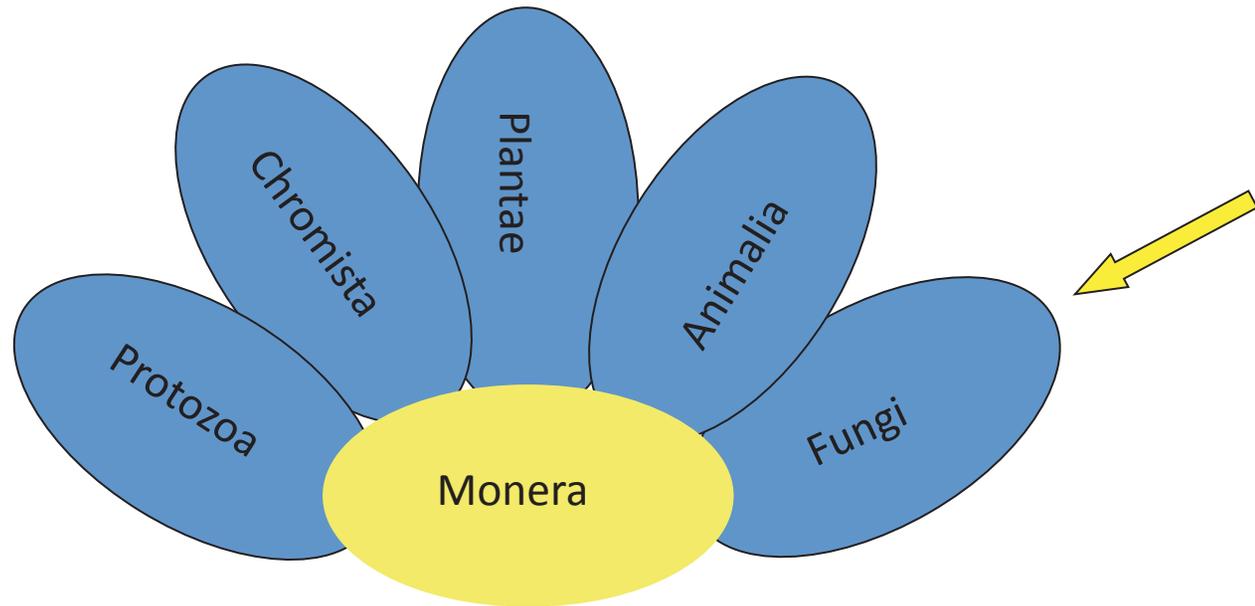
©T.F. Lockwood



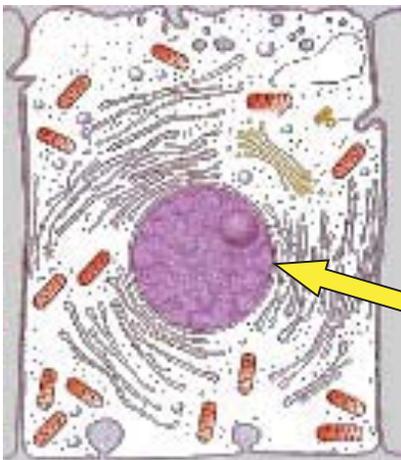
©Fred Stevens

Les Mycètes...

Organismes eucaryotes

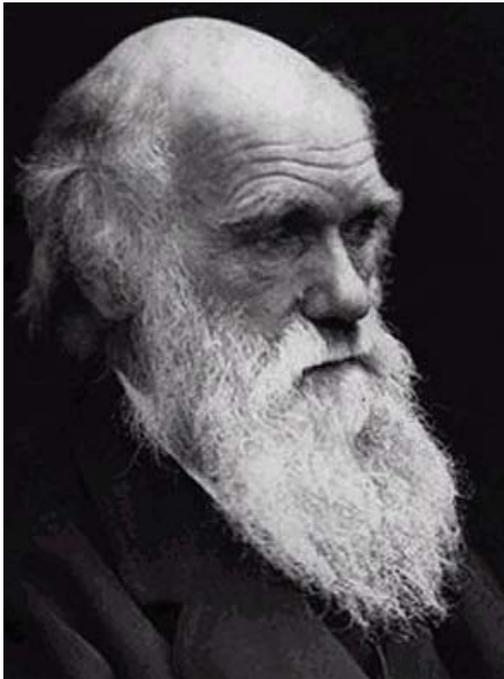


Procaryotes ou monères
(Archéobactéries et Bactéries)

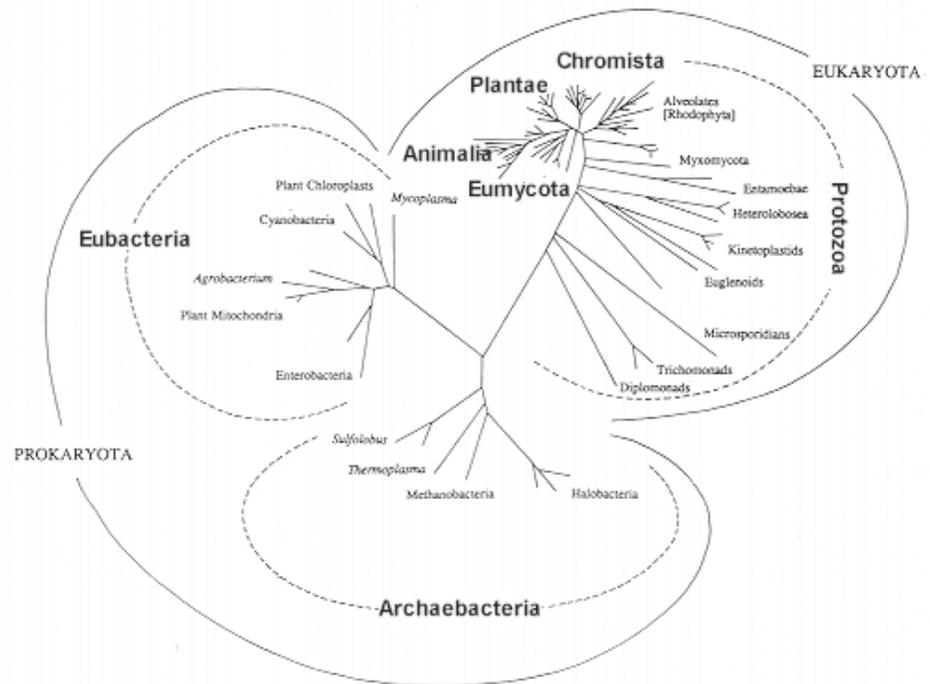


Le noyau de la cellule contenant l'ADN (les chromosomes) est délimité par une membrane nucléaire

Théorie de l'évolution



Charles Darwin
1809-1882



Arbre phyllogénétique de la vie

Lynn Margulis (1938-2011)
University of Massachusetts Amherst



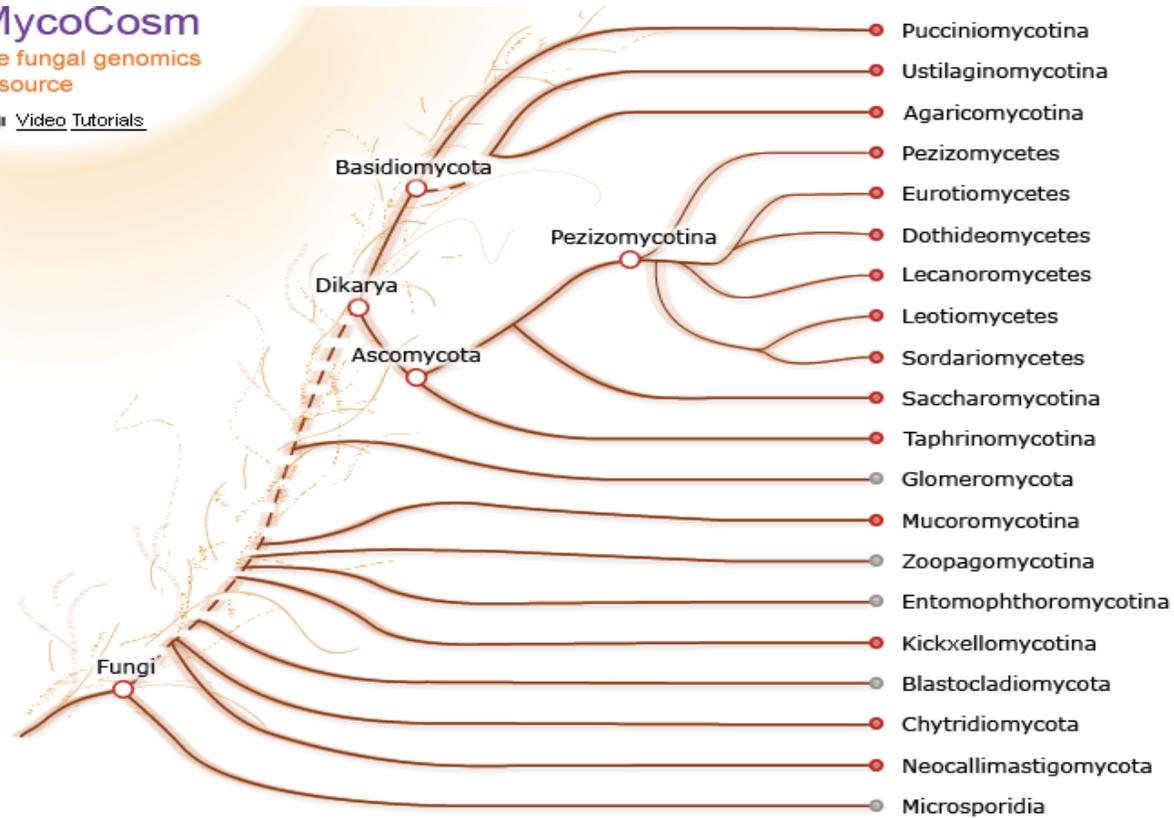
Cyanophora paradoxa



Les Mycètes...

MycoCosm
the fungal genomics
resource

 [Video Tutorials](#)

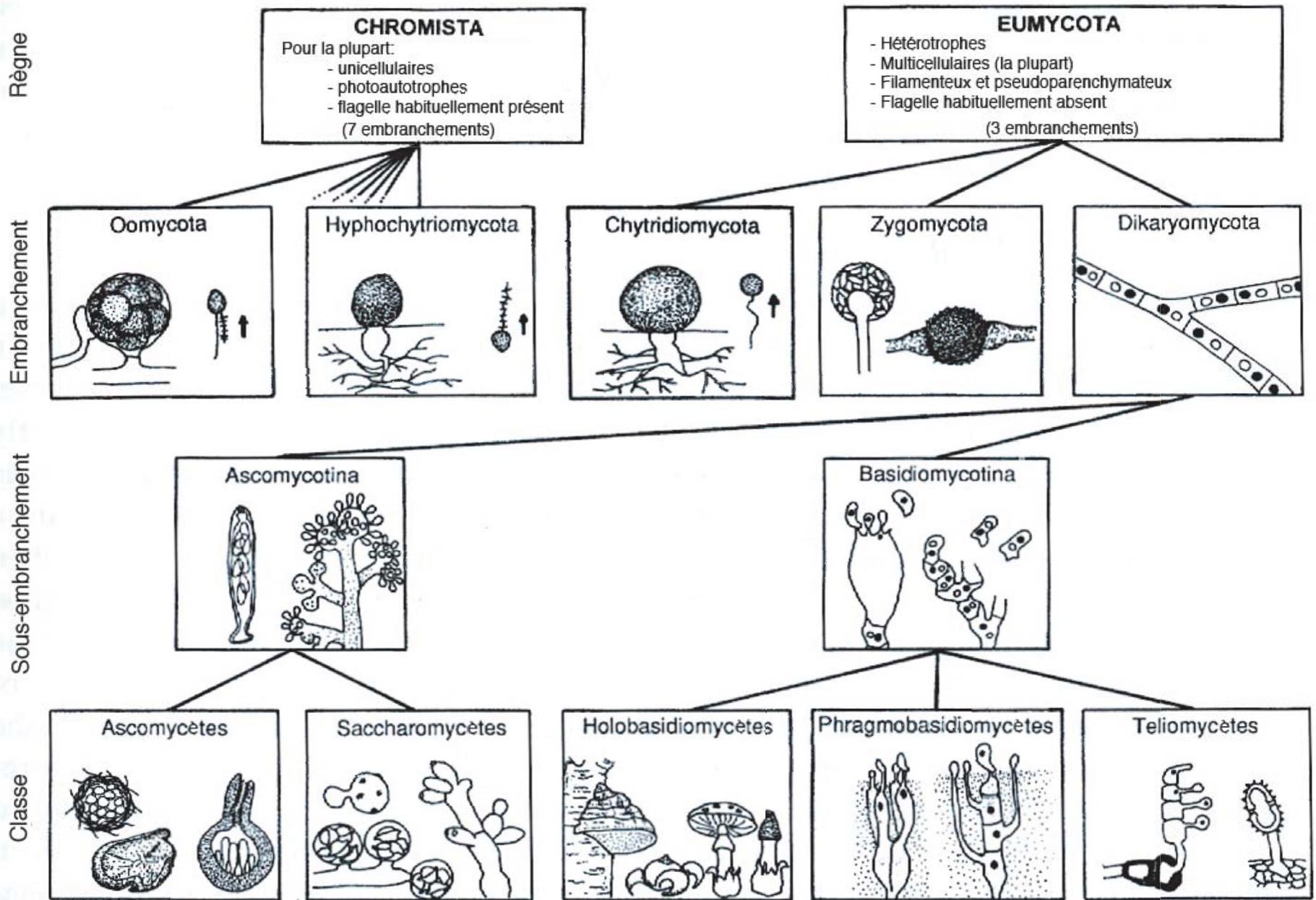




Revisiter les champignons en 2 heures



Abordable et pratique



Selon Kendrick 2000, The fifth kingdom

Nomenclature binominale

Règne	Eumycota/Mycètes
Embranchement	Dicaryomycota
Sous-embranchement	Basidiomycotina
Classe	Holobasidiomycètes
Ordre	Agaricales
Famille	Agaricaceae
Genre	Agaricus
Espèce	Bisporus



Carl Von Linné
(1707-1778)

Champignons supérieurs

Reproduction sexuée

Composés d'hyphes et de spores non flagellées



Embranchement Dikaryomycota



Sous-embranchement

Basidiomycotina (16 000 spp.):

- Champignons communément retrouvés dans les forêts de conifères
- La plupart du temps possèdent un pied et un chapeau



Sous-embranchement

Ascomycotina (42 000 spp.):

- Formes moins typiques
- Comprend la plupart des levures



Champignons microscopiques

Embranchement Zygomycota (700 spp.) :

- Possèdent des hyphes coenocytiques c'est-à-dire, à plusieurs noyaux et non cloisonnées
- Forment des zygospores.



Pseudo-embranchement Deuteromycota (17 000 spp.) :

- Champignons imparfaits phase asexuée (anamorphe) seulement

- Ensemble artificiel



Embranchement Glomeromycota (200 spp.) :

- Les champignons symbiotiques
- Colonisent > 200 000 plantes
- Mycorhiziens arbusculaires



Classification

Protoctista :

Embranchement Chytridiomycota

« Pseudo Champignons »

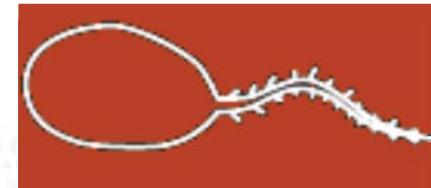


± Chromista:

- En partie aquatiques
- Forment des spores flagellées
- Souvent responsables de maladies

Embranchement Hyphochytriomycota

Embranchement Oomycota (500 spp)



Combien en existe-t-il ?

Entre 250 000 à 1,6 millions d'espèces de champignons dans le monde



± 69 000 spp. sont identifiées



± 2 500 spp. au Québec



± 200 spp. sont comestibles

± 200 spp. sont toxiques



± 10 spp. sont excellentes

5 spp. sont mortelles

Les champignons...

Sont des hétérotrophes : c'est à dire, incapables d'obtenir de l'énergie par photosynthèse

Ils se nourrissent essentiellement par l'absorption des substances organiques et minérales à l'état dissous

Ils utilisent un des trois modes de vie :



saprophyte



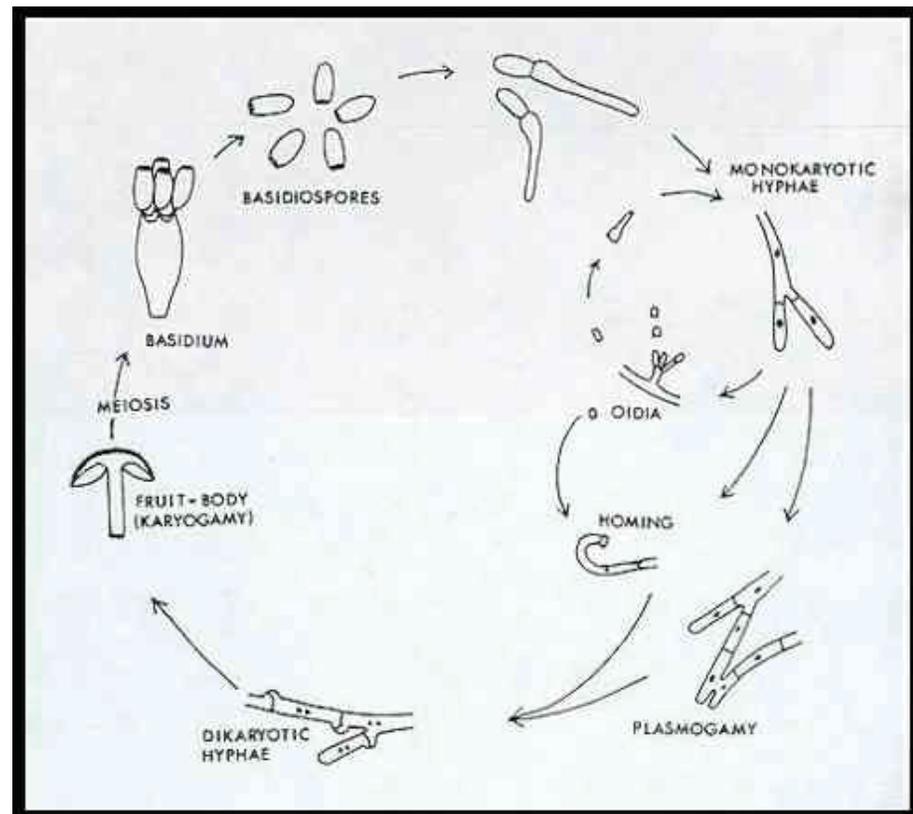
parasite



symbiote

Les Mycètes...

Se reproduisent à l'aide de spores (propagules reproductrices)



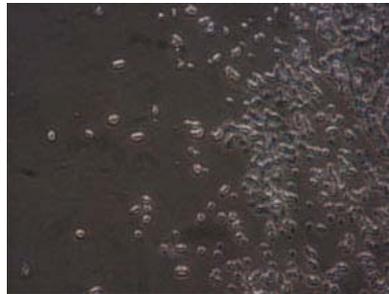
Les Mycètes...

Ne sont pas des végétaux



Font partie d'un règne distinct

Unicellulaires (levures)



Multicellulaires

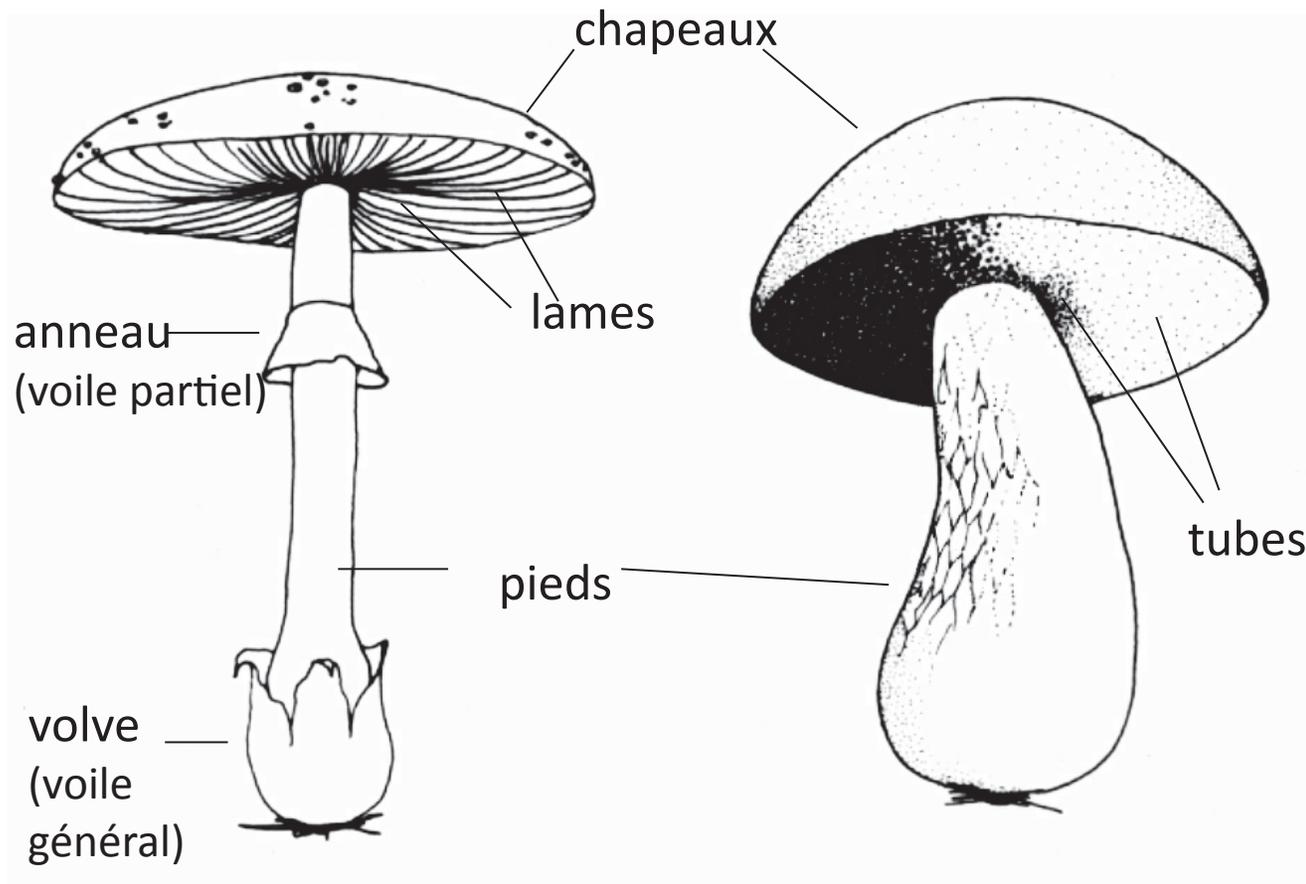


Certaines espèces produisent des fructifications qui sont formées d'un pied surmonté d'un chapeau



Saprophytes, parasites, ou symbiotes, les champignons jouent un rôle essentiel dans le recyclage des éléments nutritifs

Morphologie générale du champignon charnu

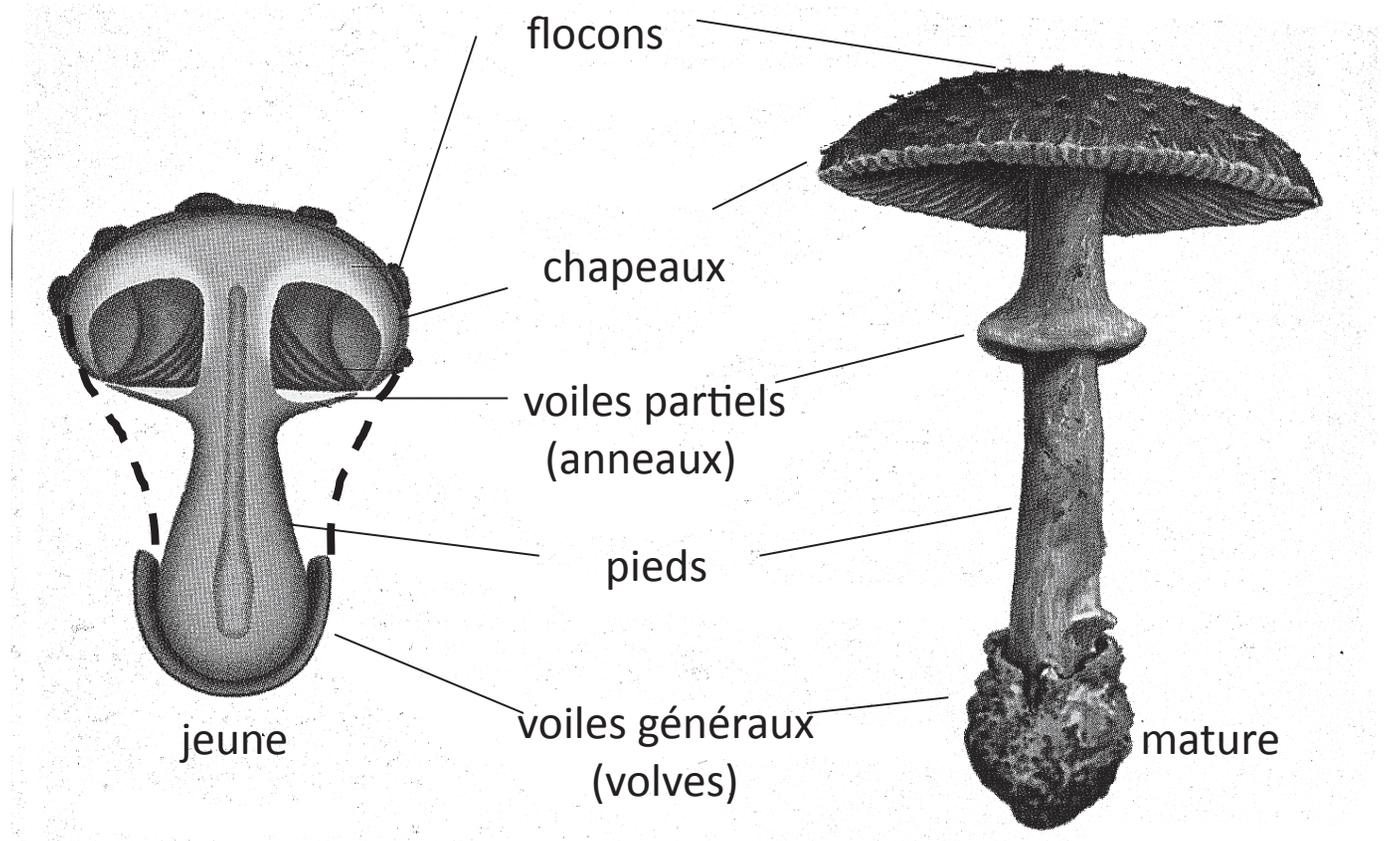


Deux morphologies de champignons souvent rencontrés.

Formation d'un carpophore

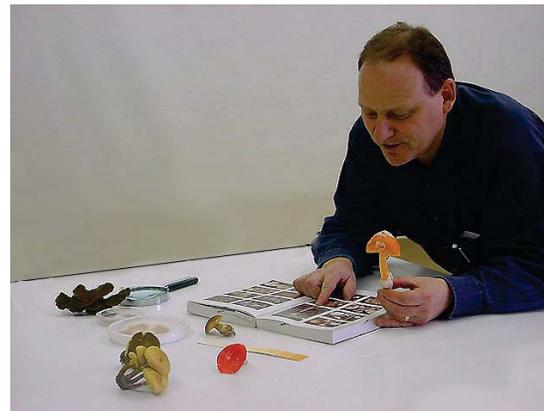
Le jeune spécimen est généralement trapu : chapeau arrondi (fermé) et un pied très court

Pendant que les spores se forment, le pied s'allonge et le chapeau s'ouvre



Un exemple de développement avec deux voiles laissant des vestiges sur le sporophore

L'Amanite de Jackson



Marc Bois





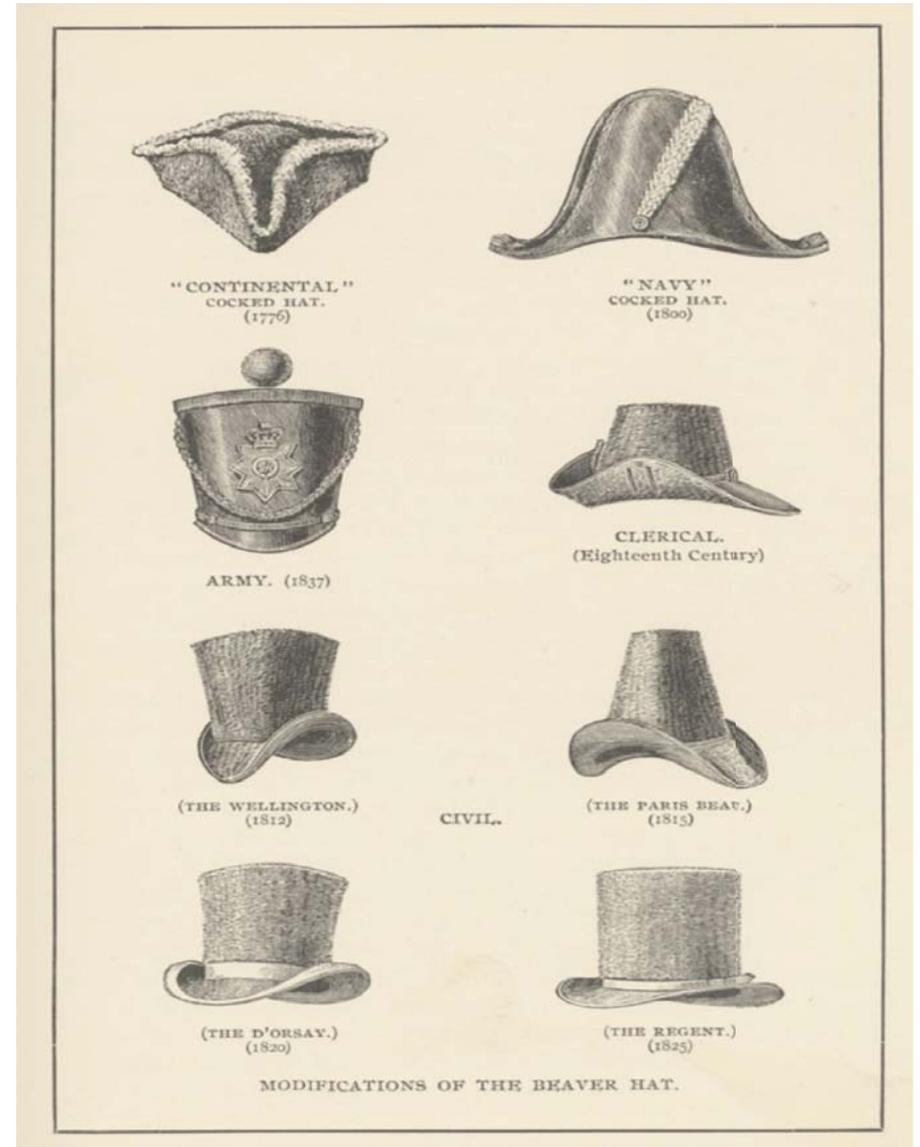
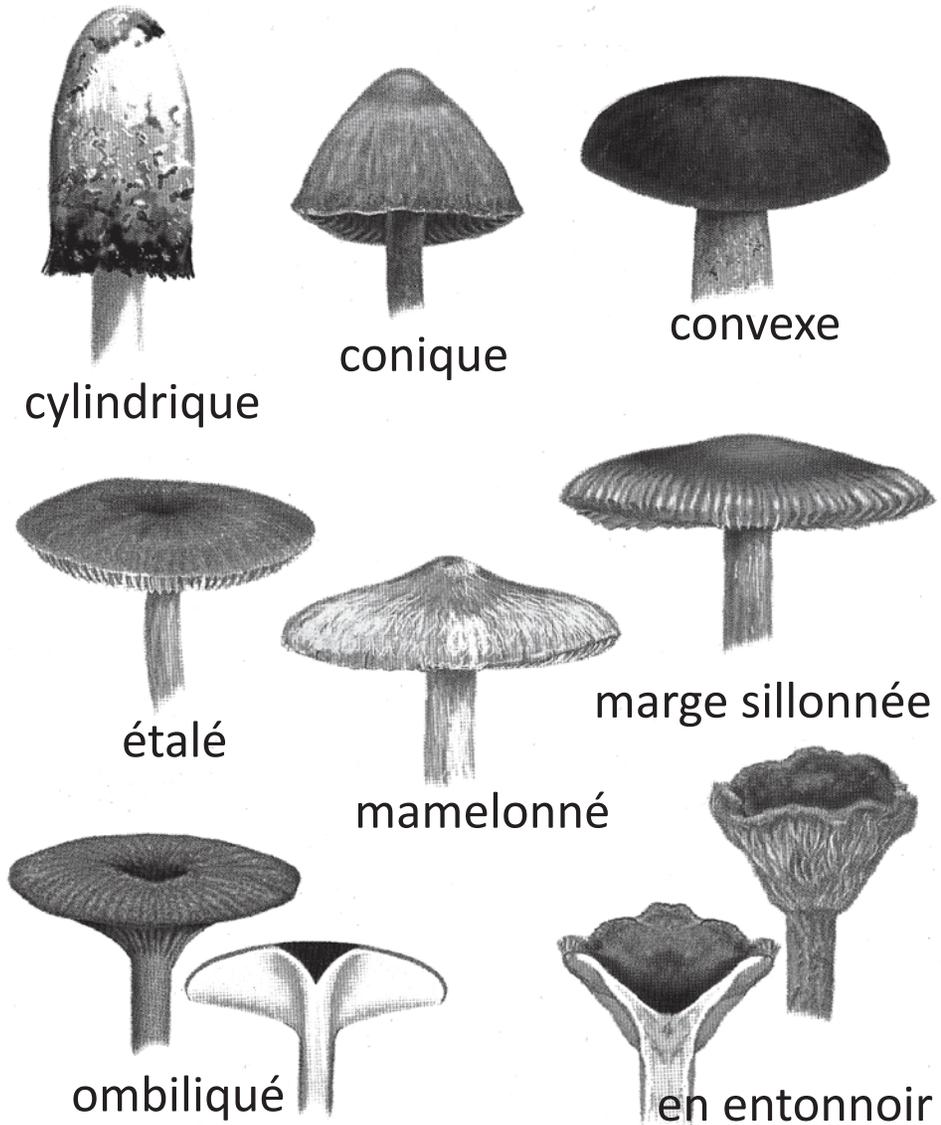




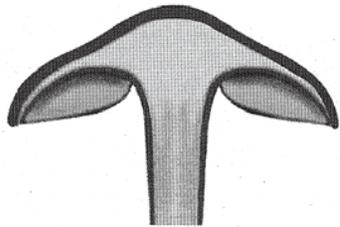




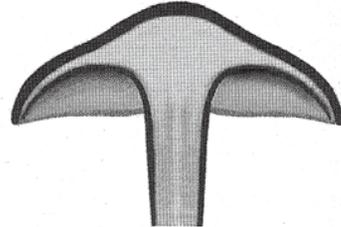
Différents types de chapeaux



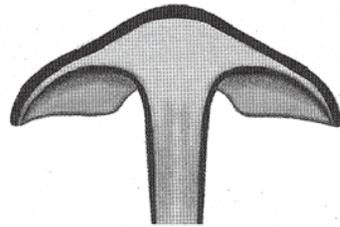
Différents types de lames



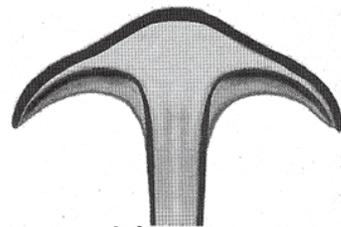
libres



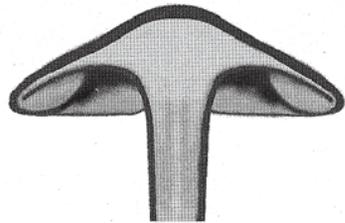
adnées



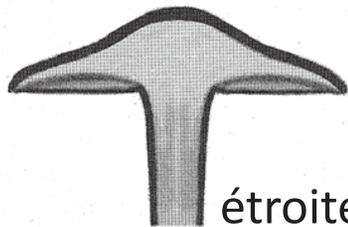
échancrées



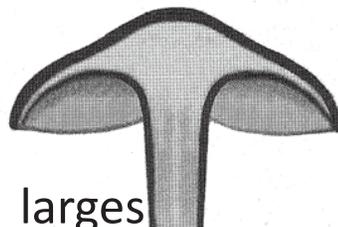
décurrentes



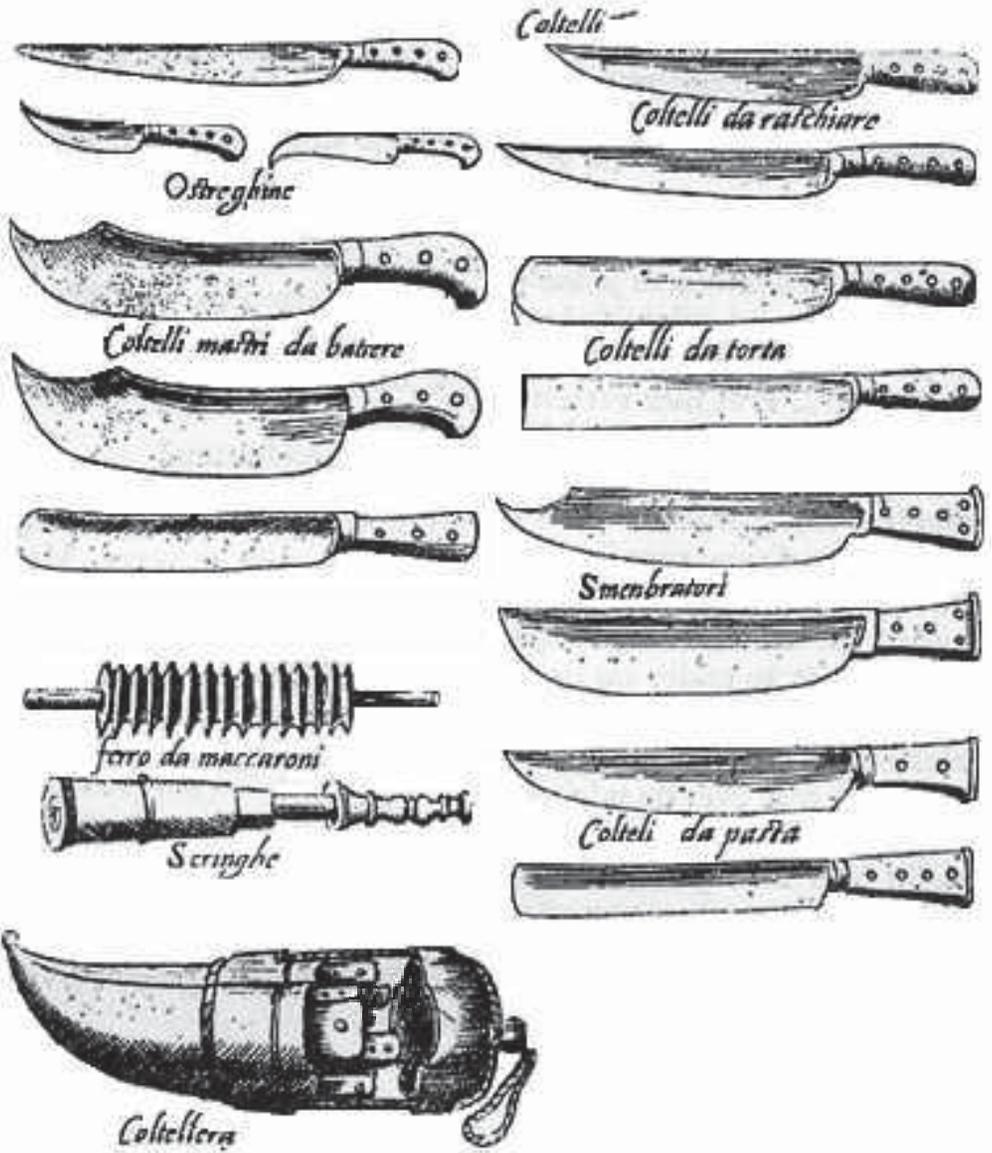
avec lamellules



étroites



larges



Sporées



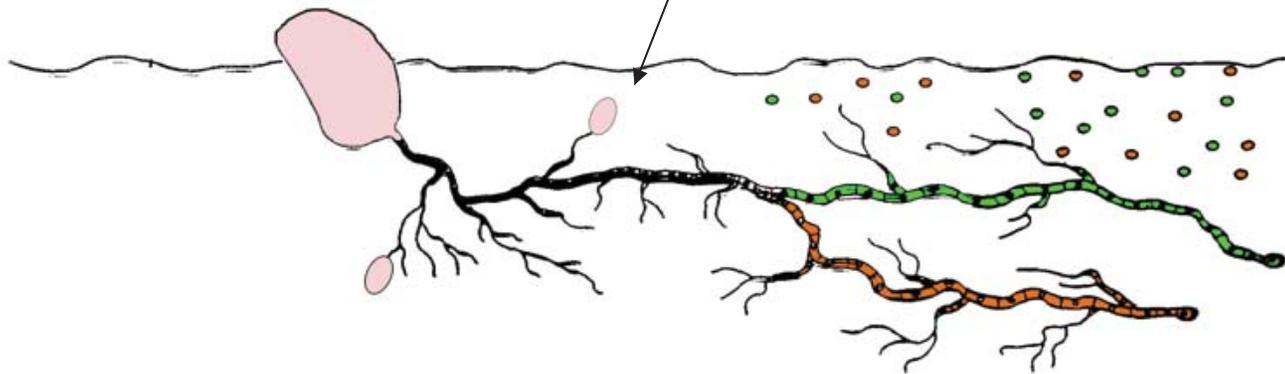
Exemple de germination d'une spore

Spore

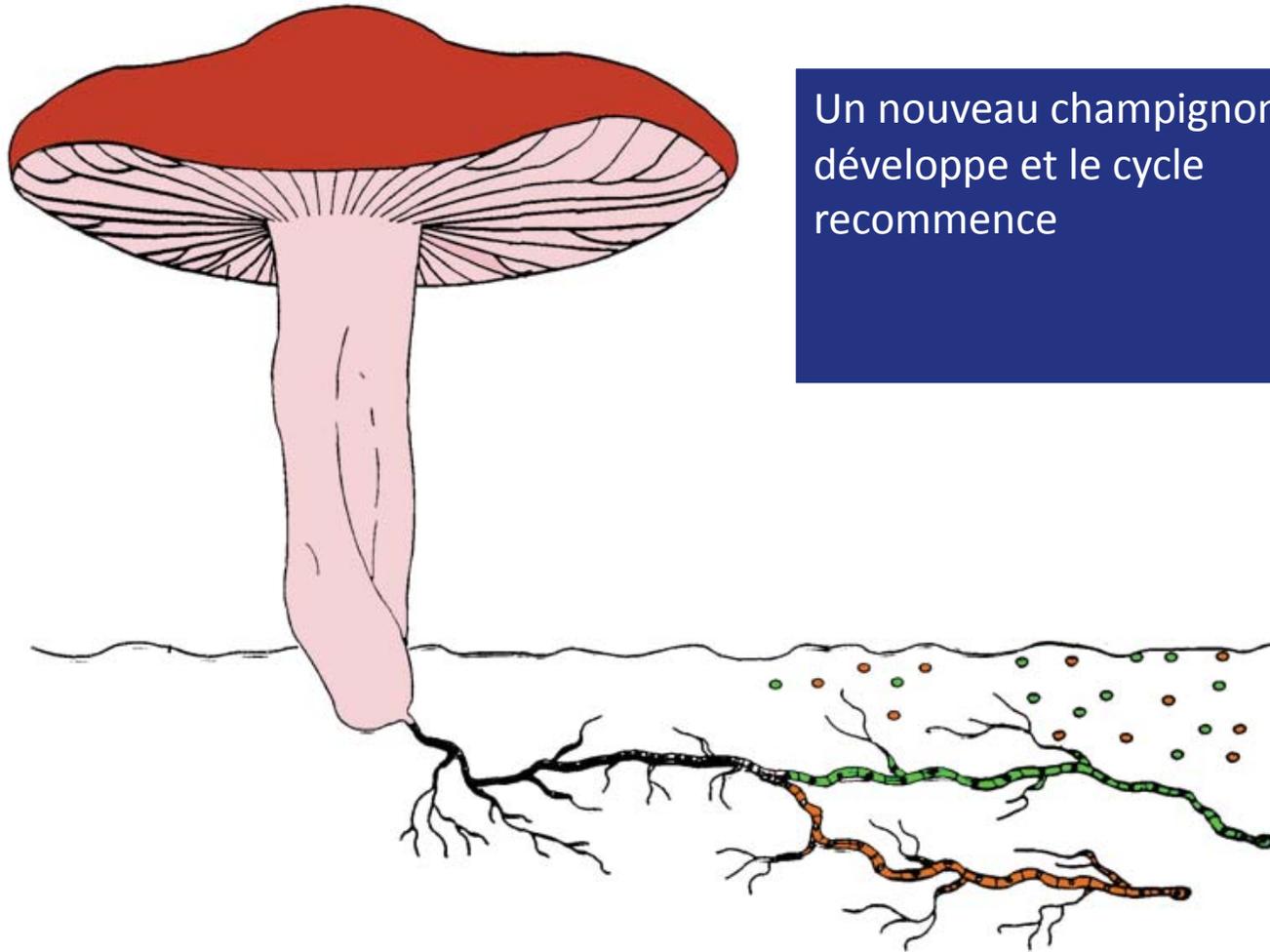


Cycle vital d'un champignon

Le nouveau mycélium forme des «primordium» (bourgeons) de champignons



Cycle vital d'un champignon



Un nouveau champignon se développe et le cycle recommence

La croissance d'une hyphe

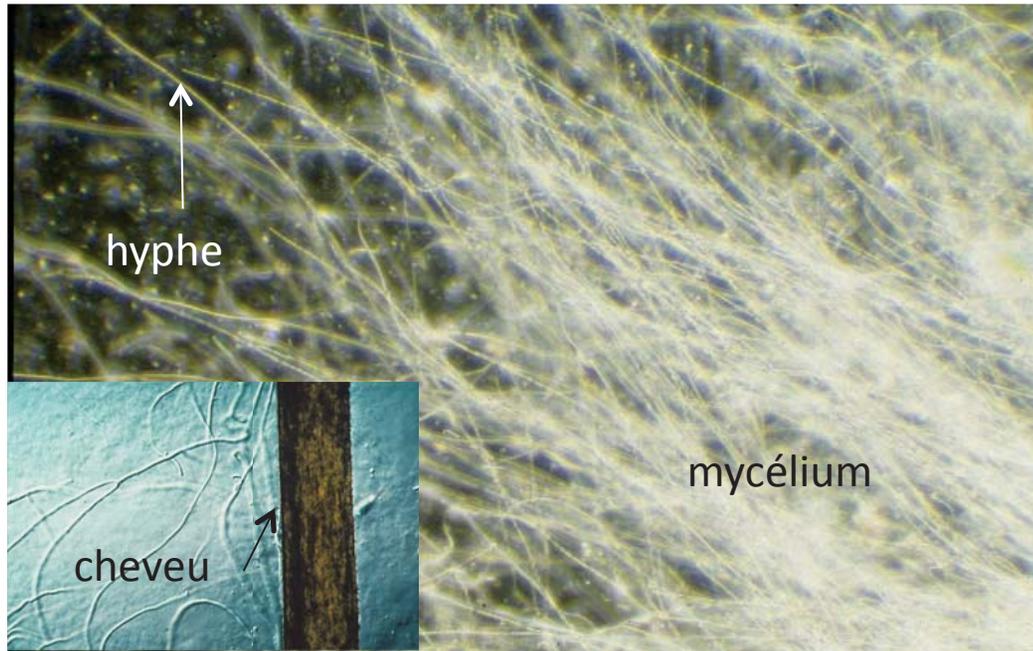
- Élongation de la jeune hyphe par son extrémité et migration du cytoplasme et des noyaux dans la direction de croissance

La croissance implique:

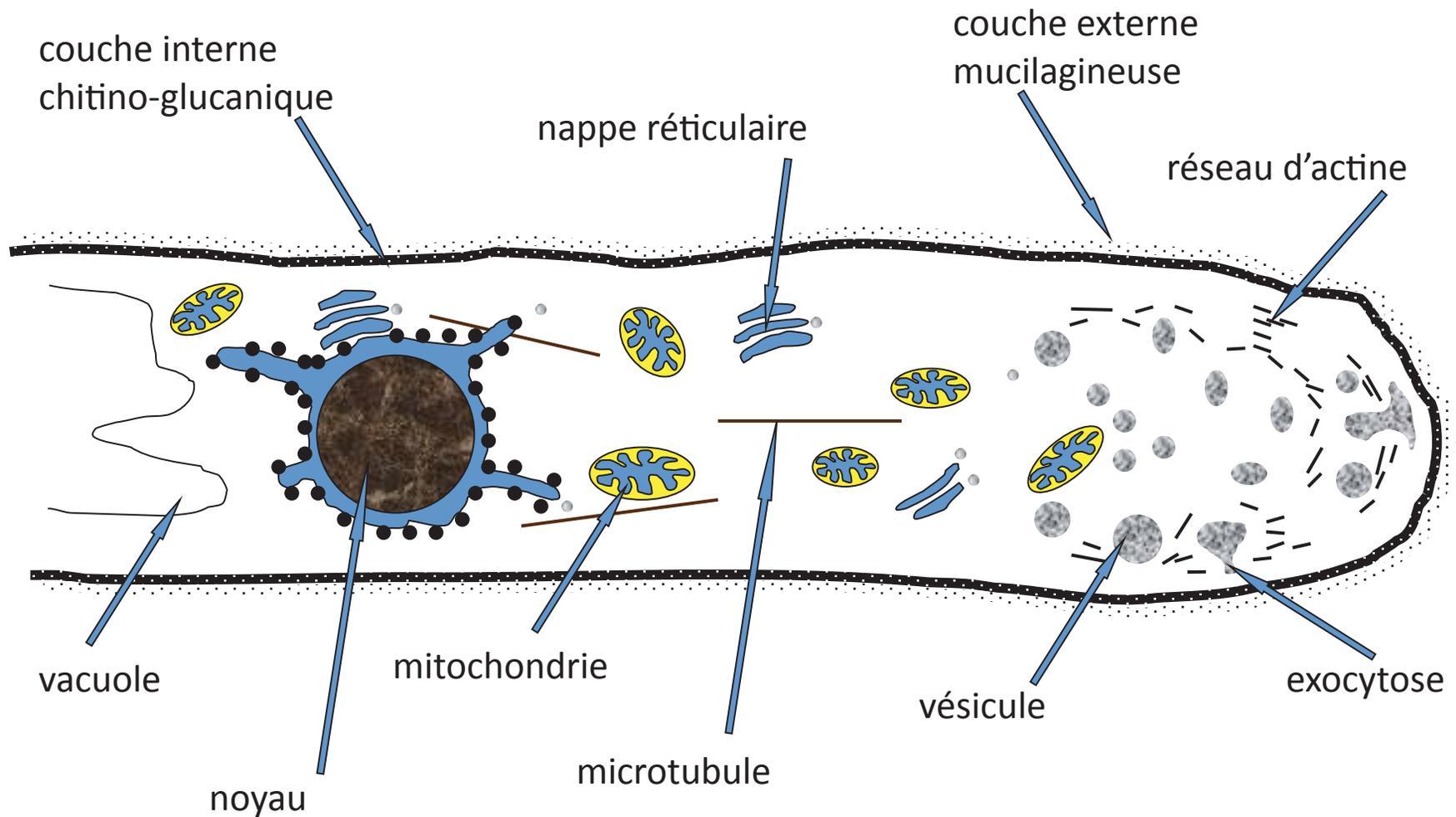
- Une augmentation du volume
- Une augmentation du poids sec

La ramification

La ramification est un phénomène nécessaire à l'exploration du substrat. Il existe donc des mécanismes de contrôle.



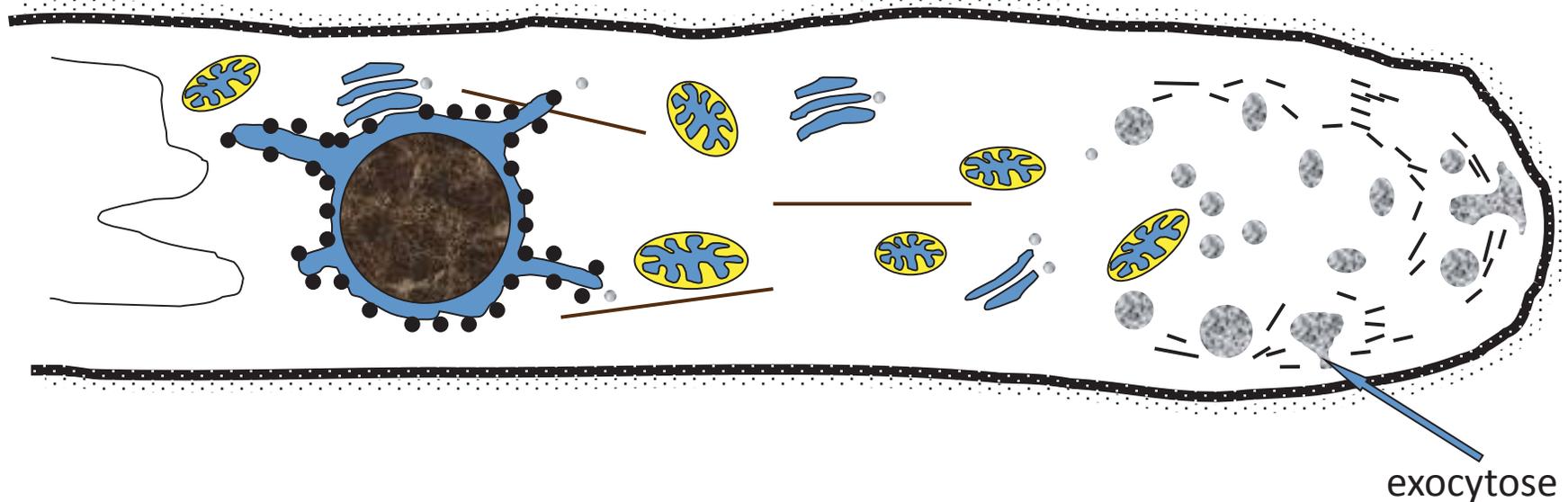
L'apex d'une hyphe en période de croissance active



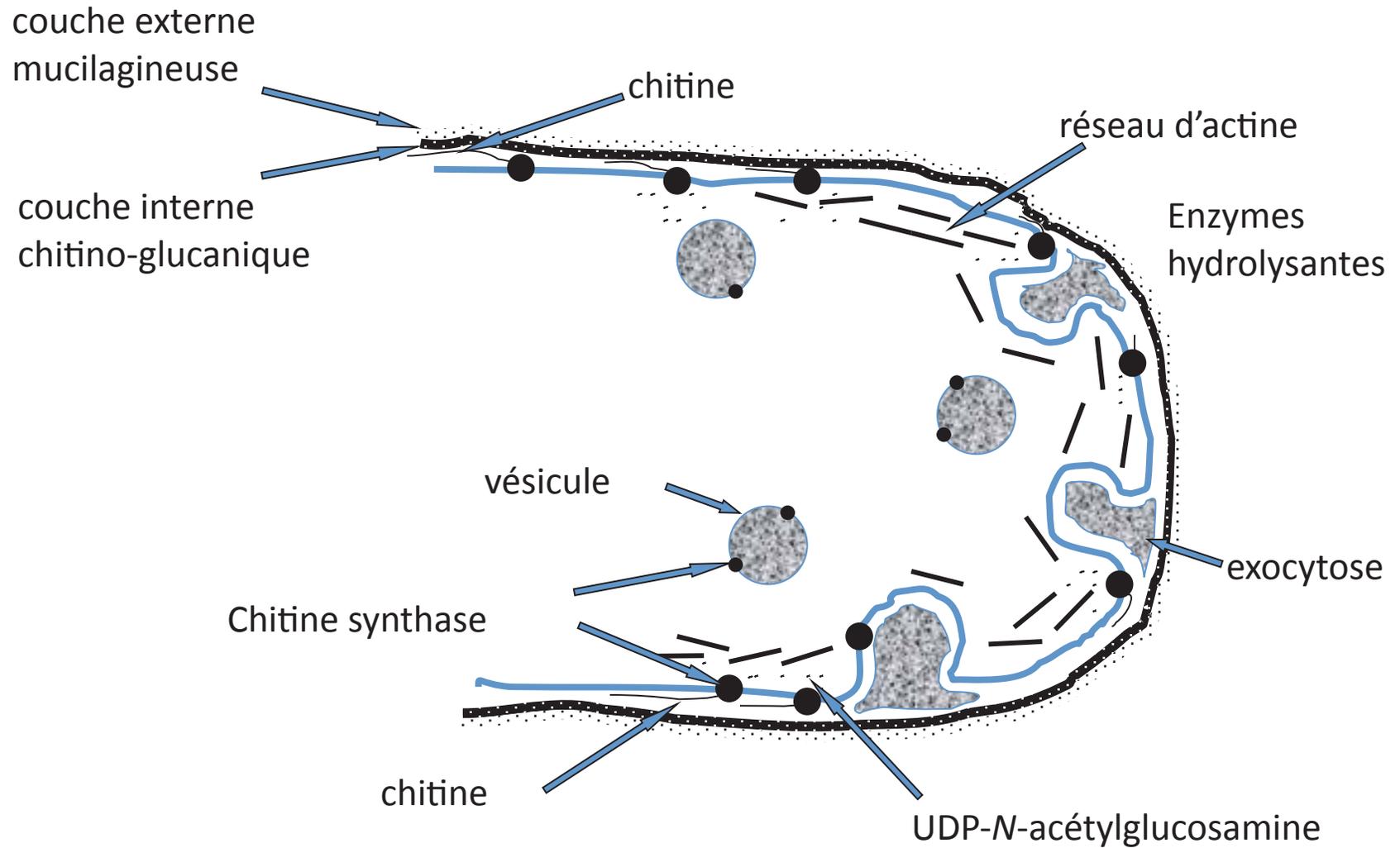
Exocytose

Cette structure viscoélastique permet :

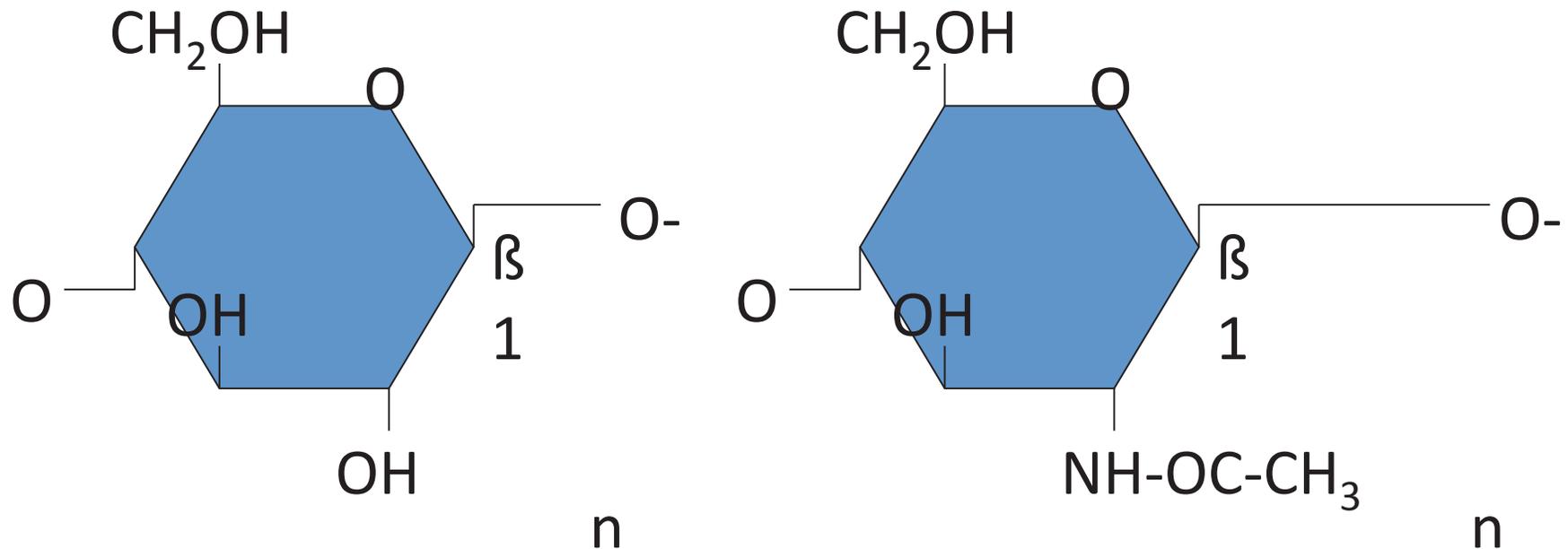
- L'extension de la paroi par un apport de chitine synthase et de glucanes provenant de vésicules d'exocytose au niveau de la membrane plasmique
- Toujours par exocytose, il y a la sortie d'enzymes hydrolysantes



Chitine



Cellulose et chitine



L'azote est un élément limitant pour les végétaux mais pas pour les champignons qui vivent en saprophyte, parasite ou en symbiote, c'est-à-dire sur des substrats riches en azote

Chitine

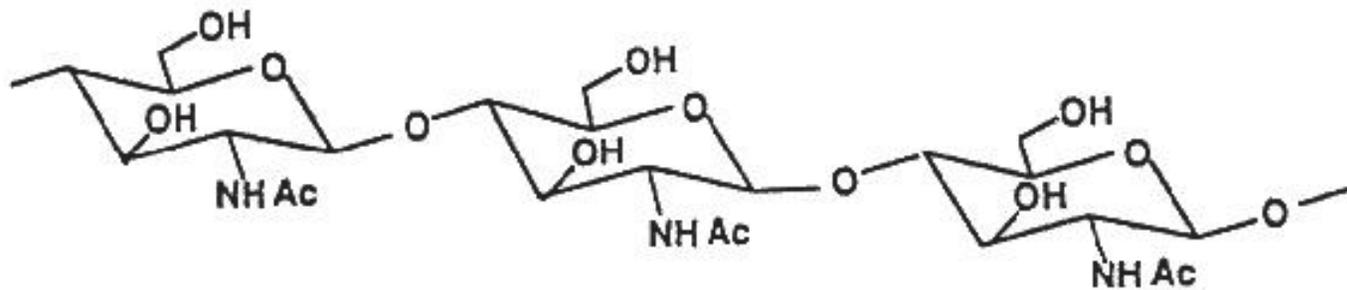
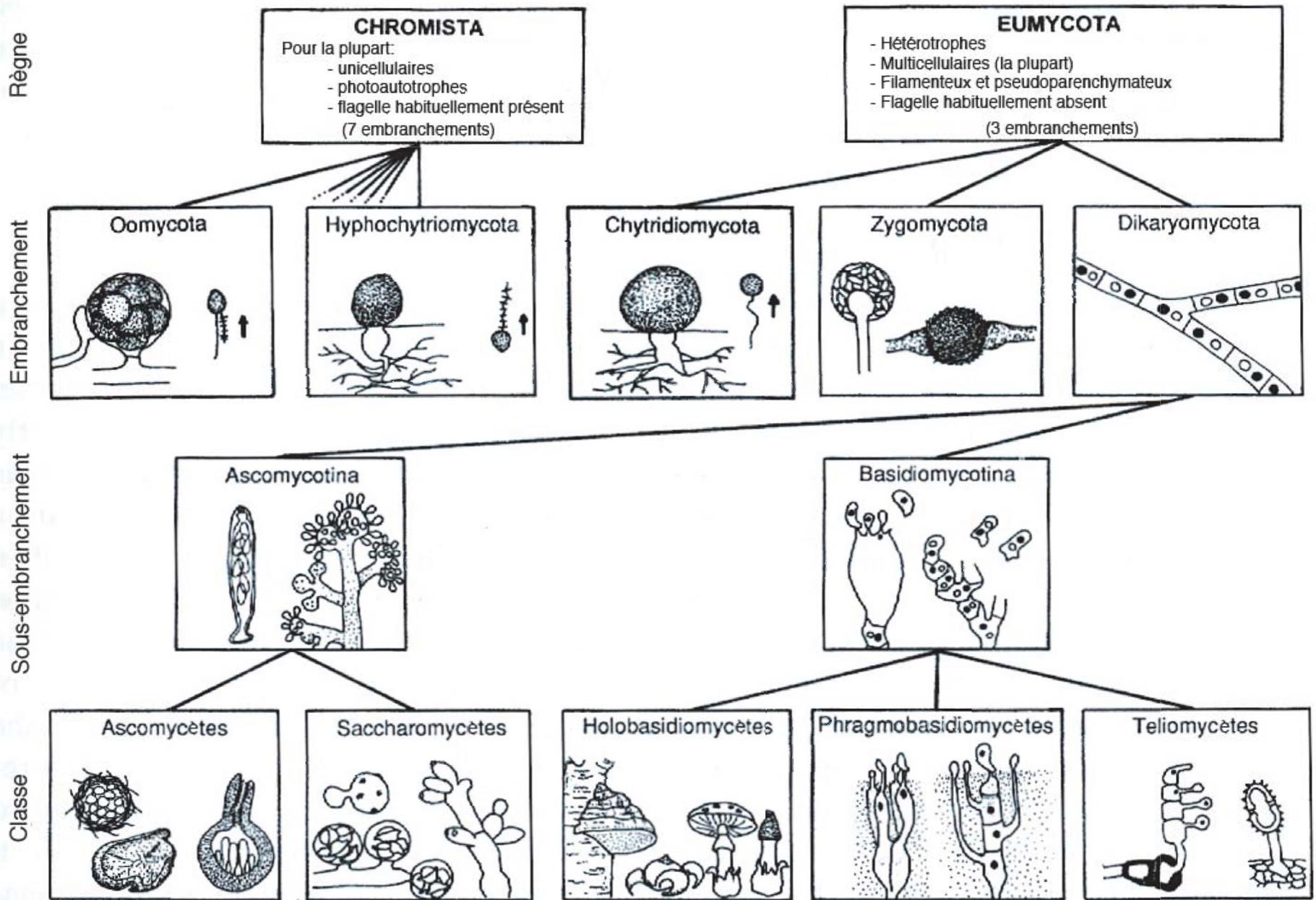


Fig.1 :La Chitine

La chitine est un polymère de N-acétyl-glucosamine dont les sous-unités sont liées entre elles par des ponts β -(1,4) glycosidiques (Shahabuddin et Kaslow, 1993).

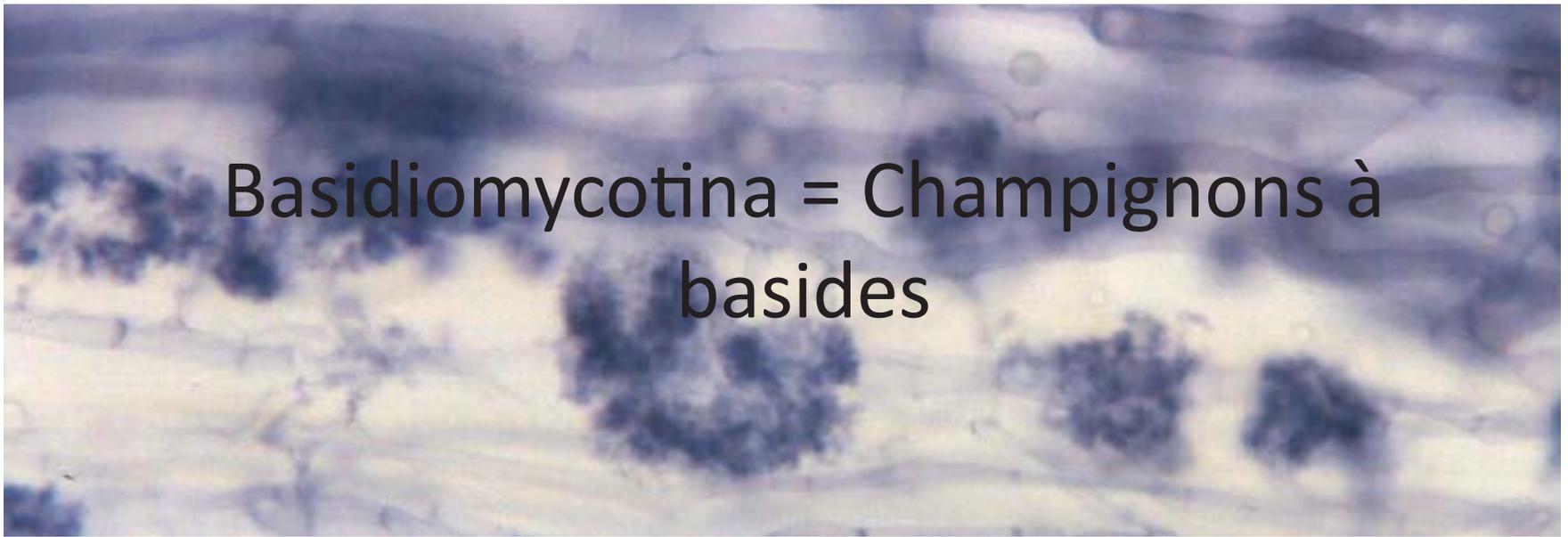
Les champignons : un modèle génétique

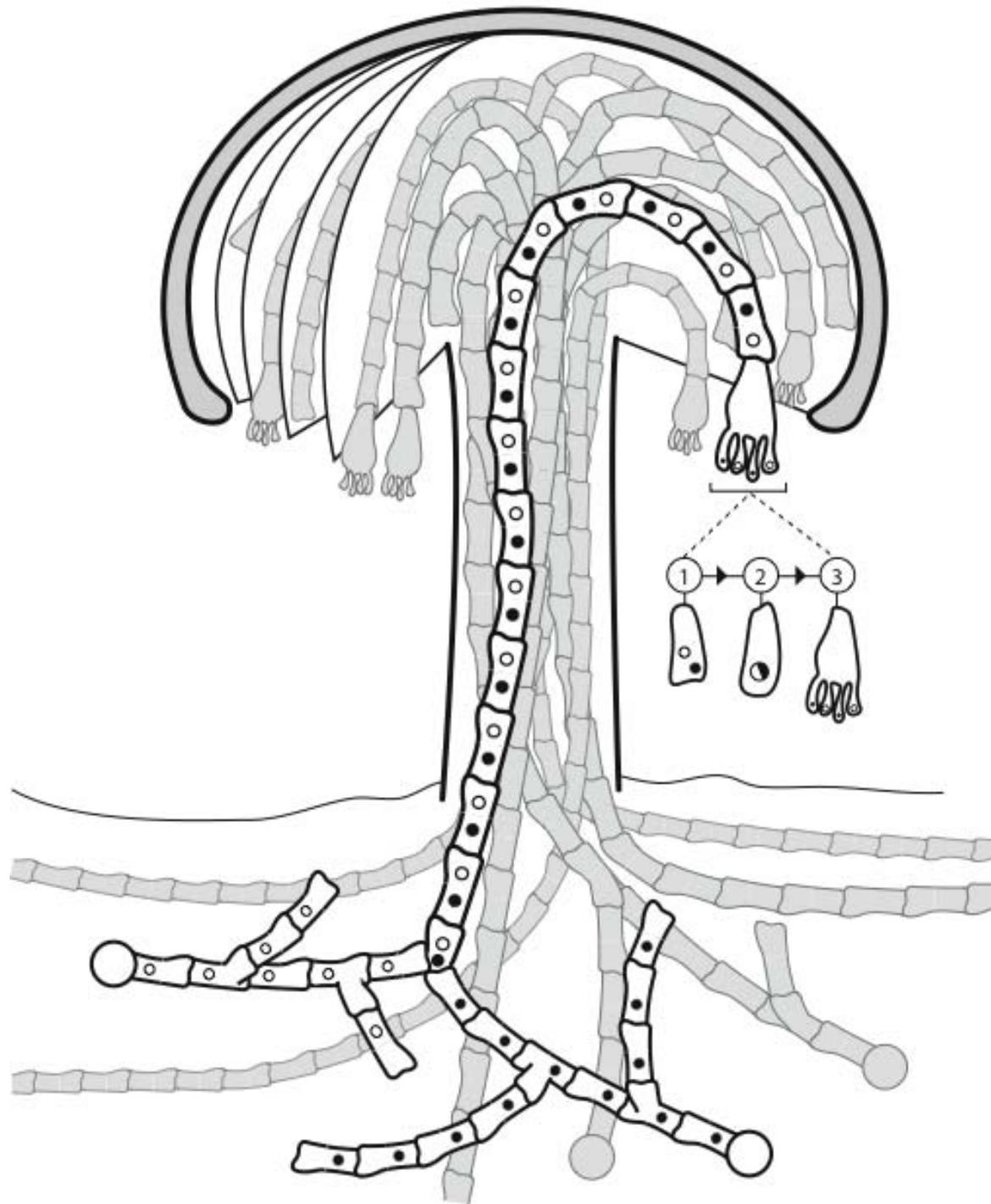
- Eucaryotes haploïdes
- Production d'un grand nombre de spores haploïdes
- Facilement cultivables en laboratoire, croissance rapide, prennent peu de place
- Anastomoses, fusion des hyphes et échange de noyaux



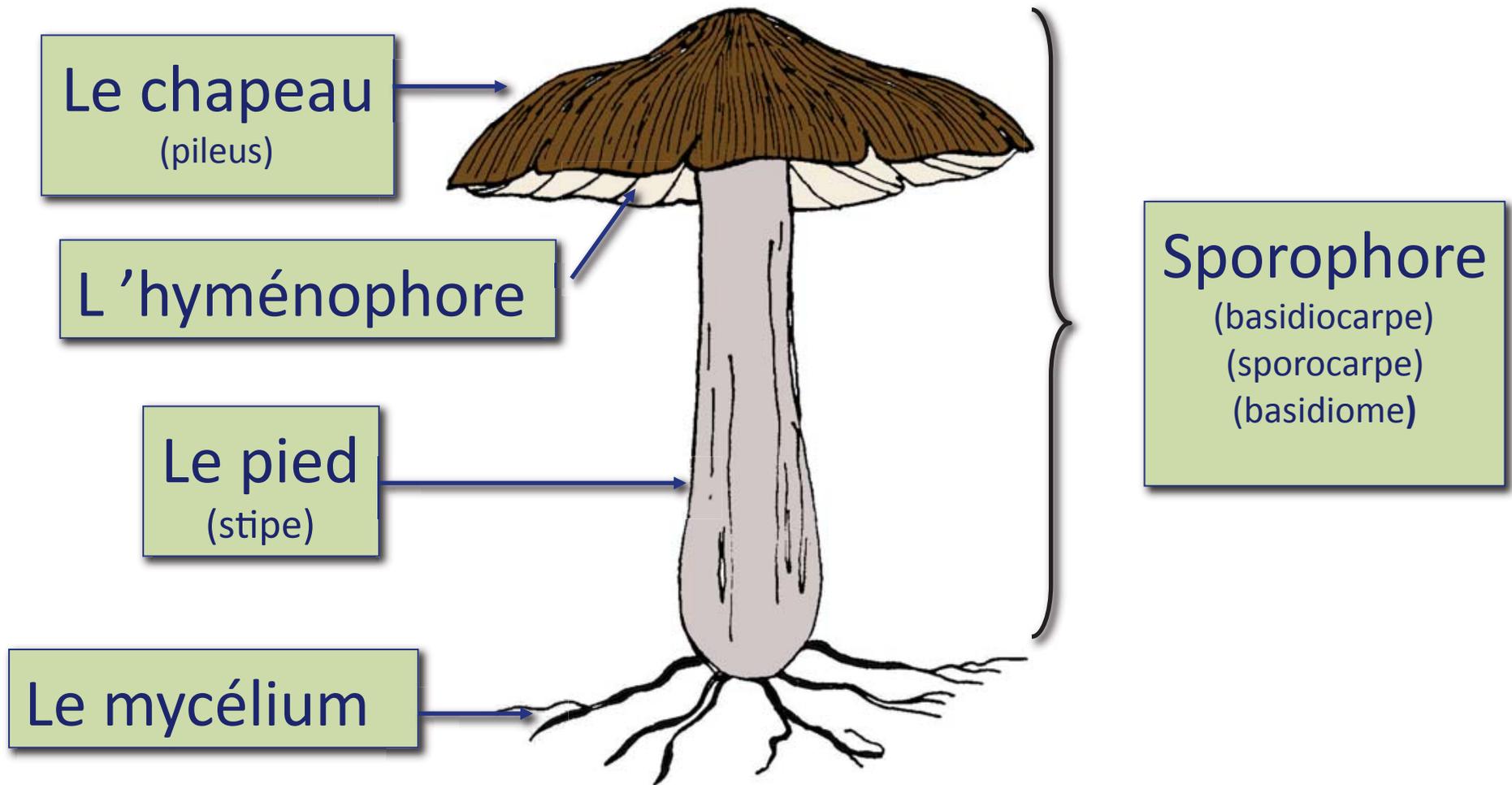
Selon Kendrick 2000, The fifth kingdom

Basidiomycotina = Champignons à
basides



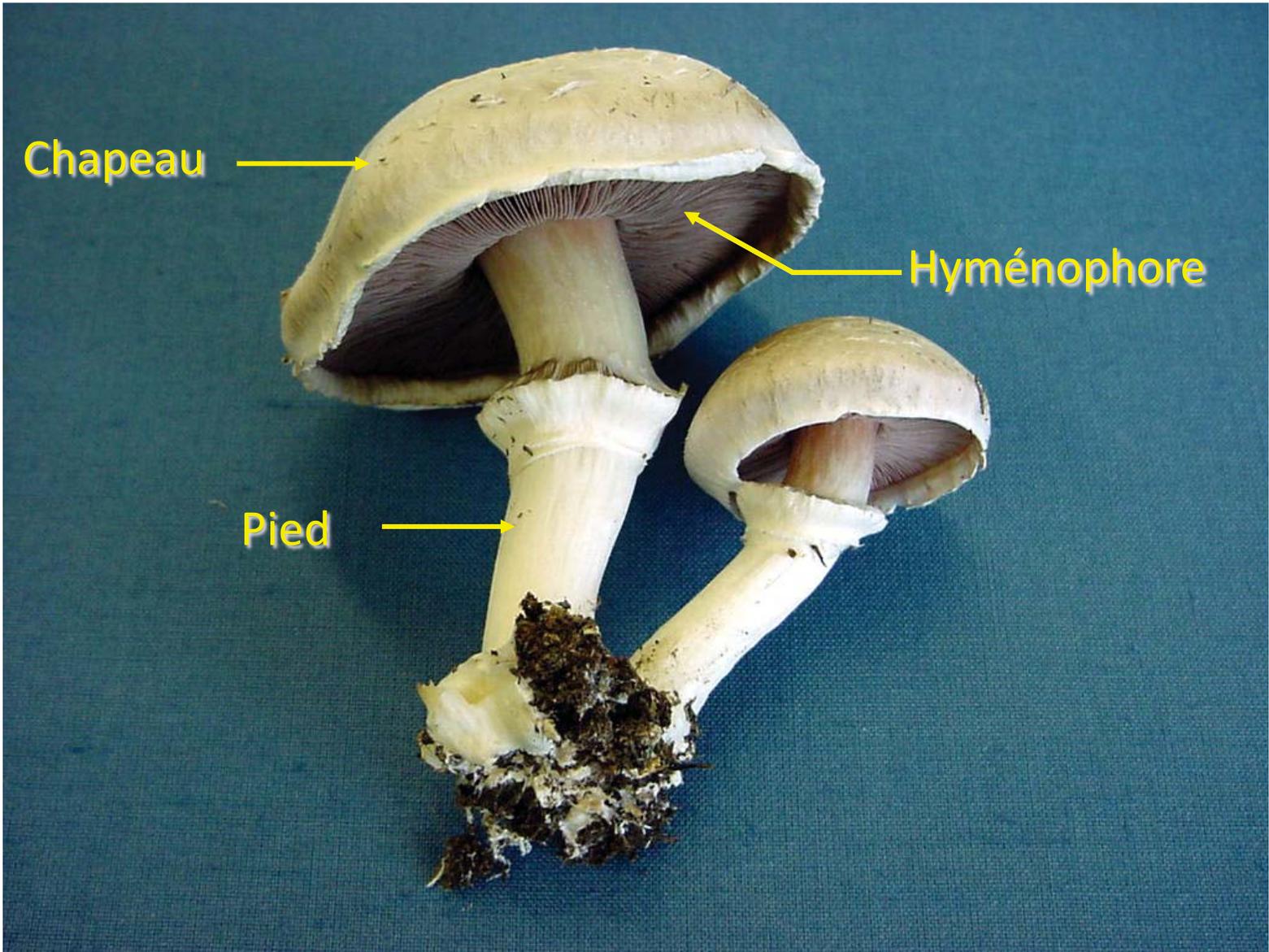


Un champignon typique



Qu'est-ce qu'un hyménophore ?

Partie fertile où les cellules mères produisent les spores.



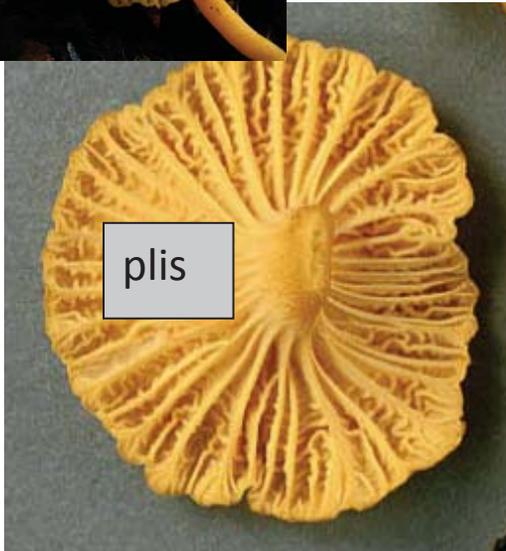
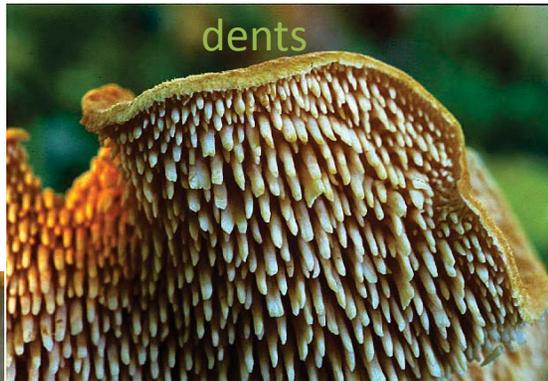
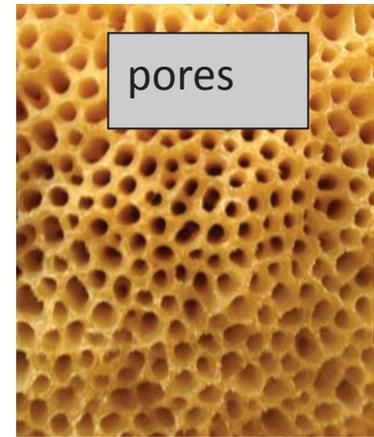
Chapeau

Hyménophore

Pied

Divers types d'hyménozoaires

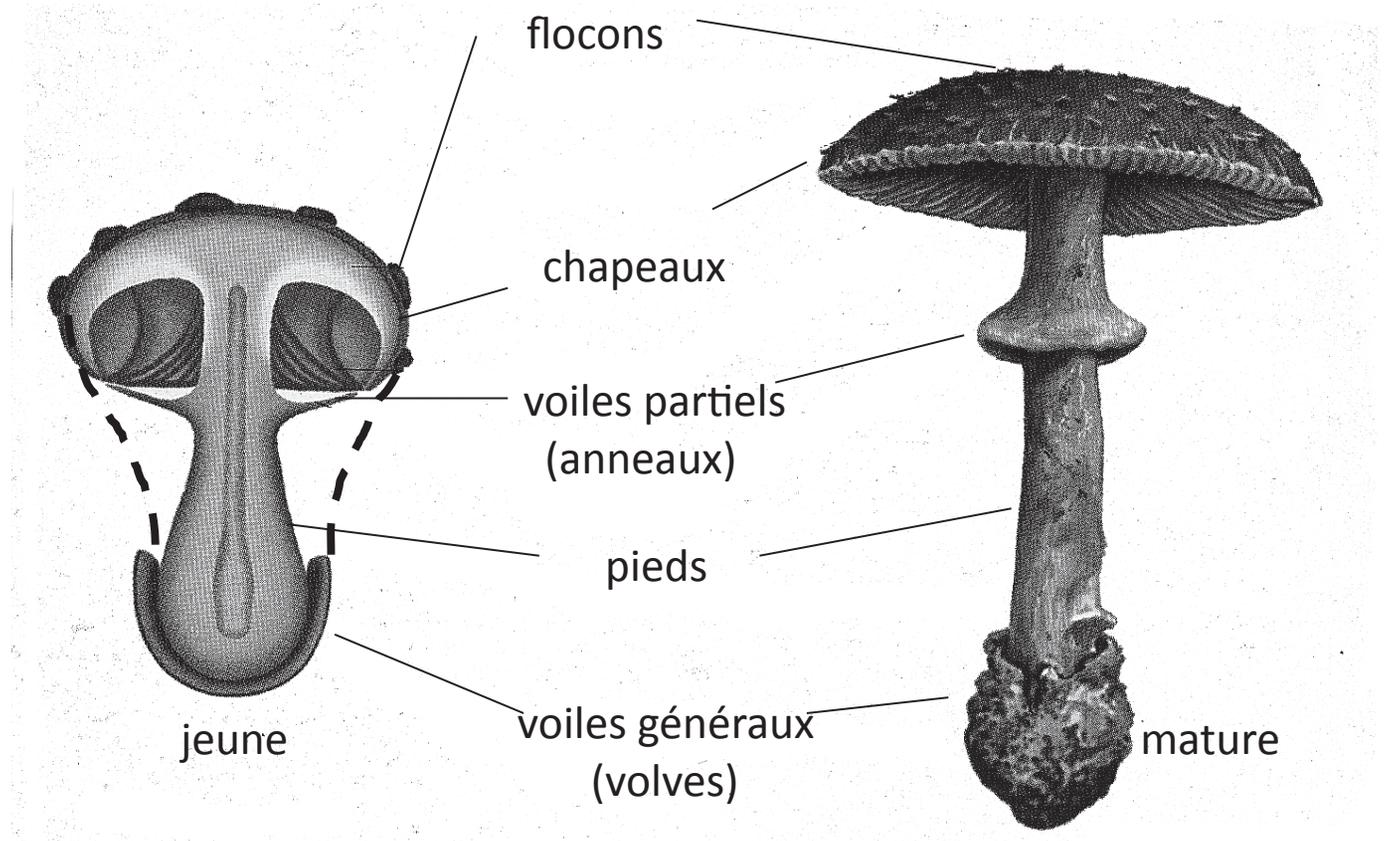
- En forme de lames ou de feuillets
- En forme de plis
- En forme de dents
- En forme de pores
- Surface lisse
- Gélatineux
- Vesse-de-loup
- Aucune



Formation d'un carpophore

Le jeune spécimen est généralement trapu : chapeau arrondi (fermé) et un pied très court

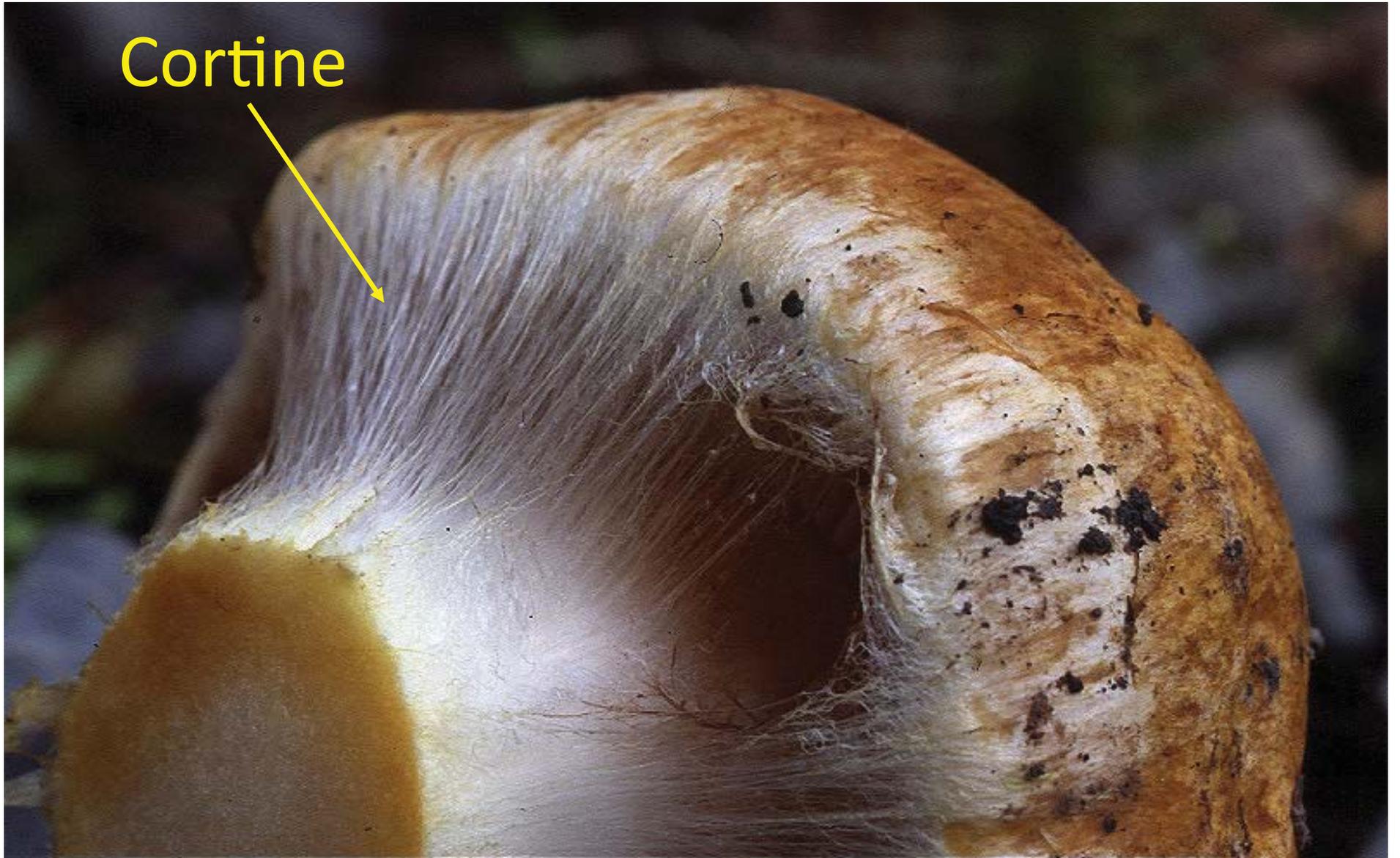
Pendant que les spores se forment, le pied s'allonge et le chapeau s'ouvre





Déchirement du voile partiel
Agaricus sp.





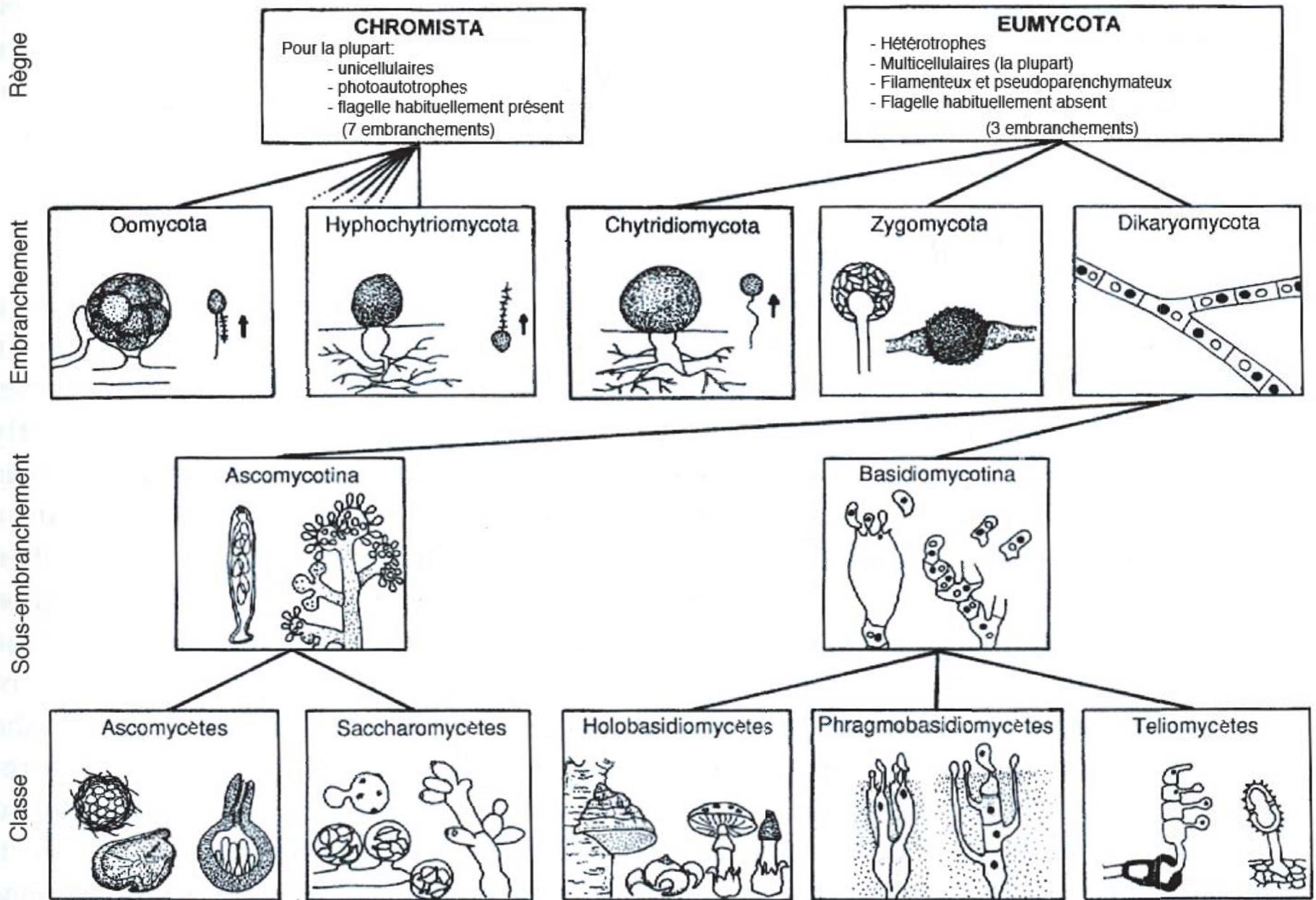
Cortine

Cortinaire

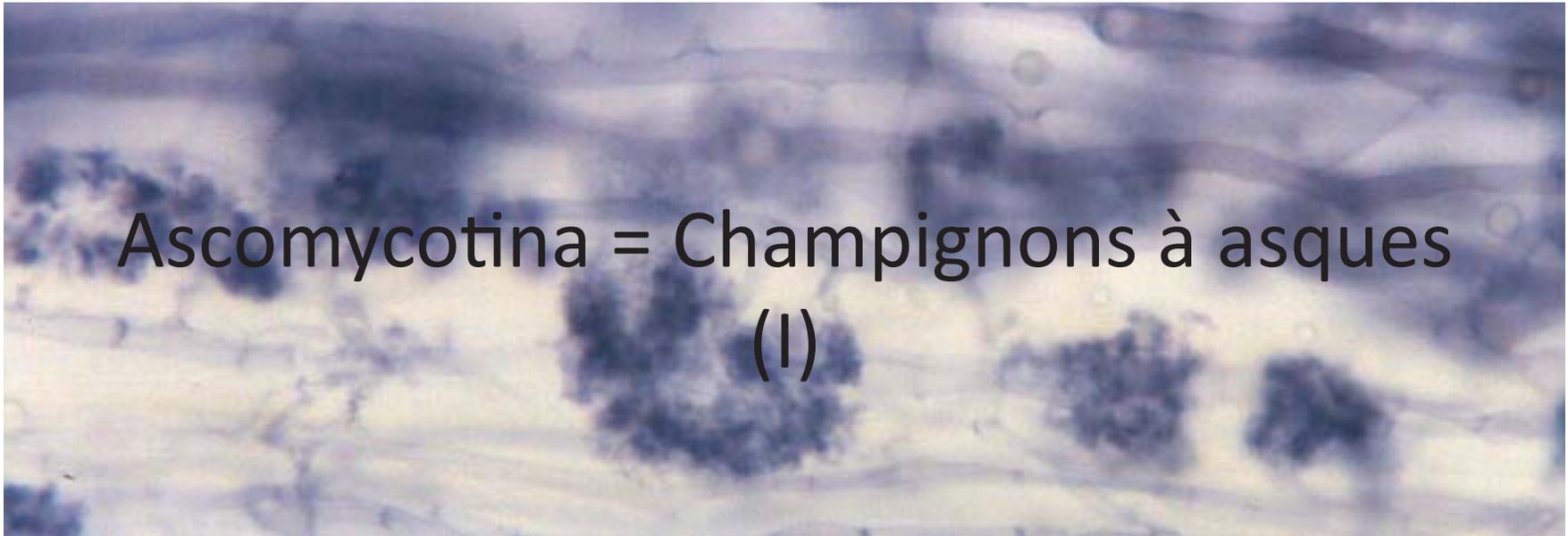
Caractères généraux des Basidiomycotina

- Champignons communément retrouvés dans les forêts de conifères
- Champignons avec habituellement un pied et un chapeau
- Forment des basides et des basidiospores externes
- Hyphes dicaryotiques et cloisonnées, généralement accompagnées d'anses d'anastomose
- Dolipore ou la communication entre les compartiments de l'hyphe.

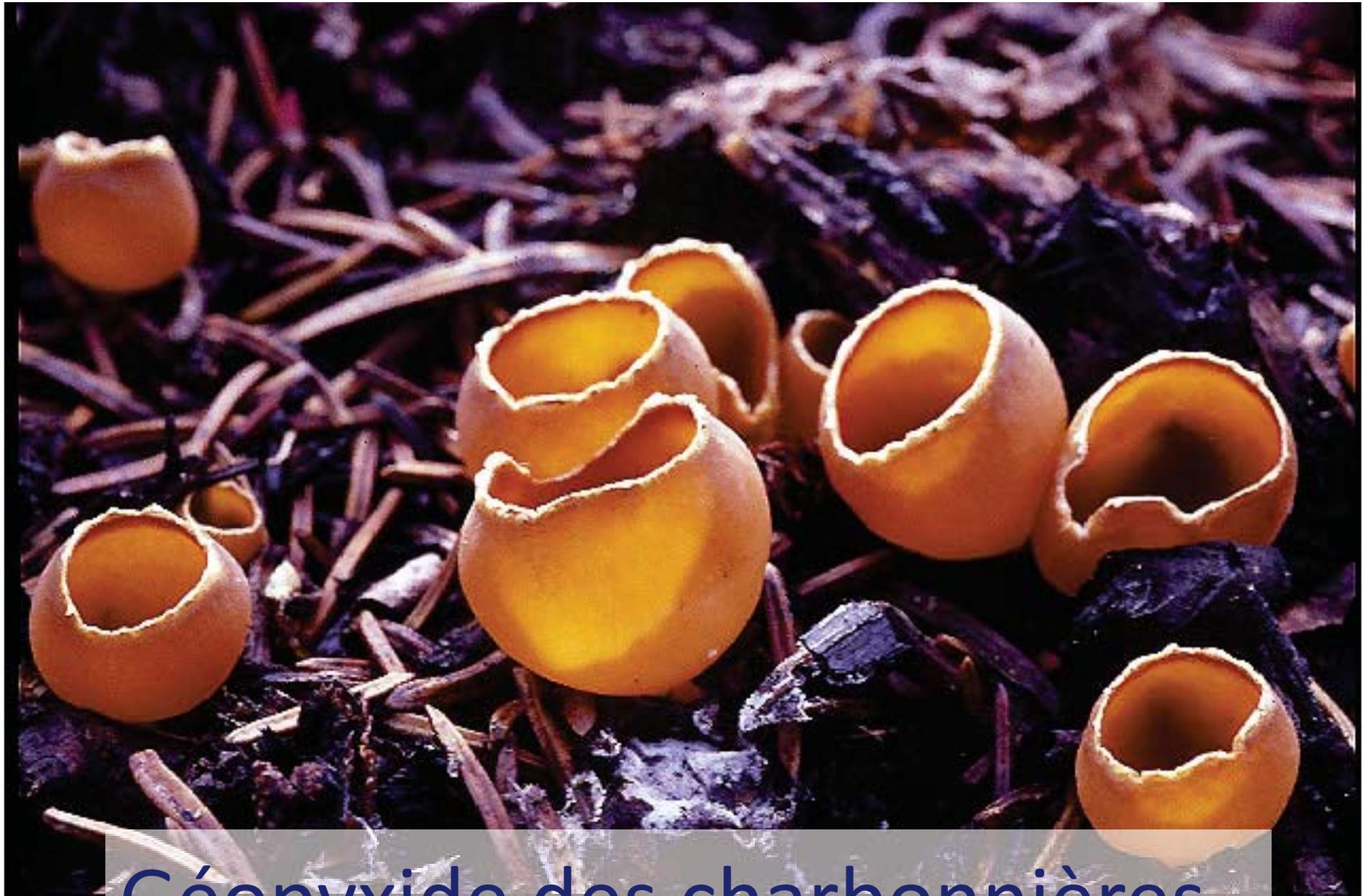




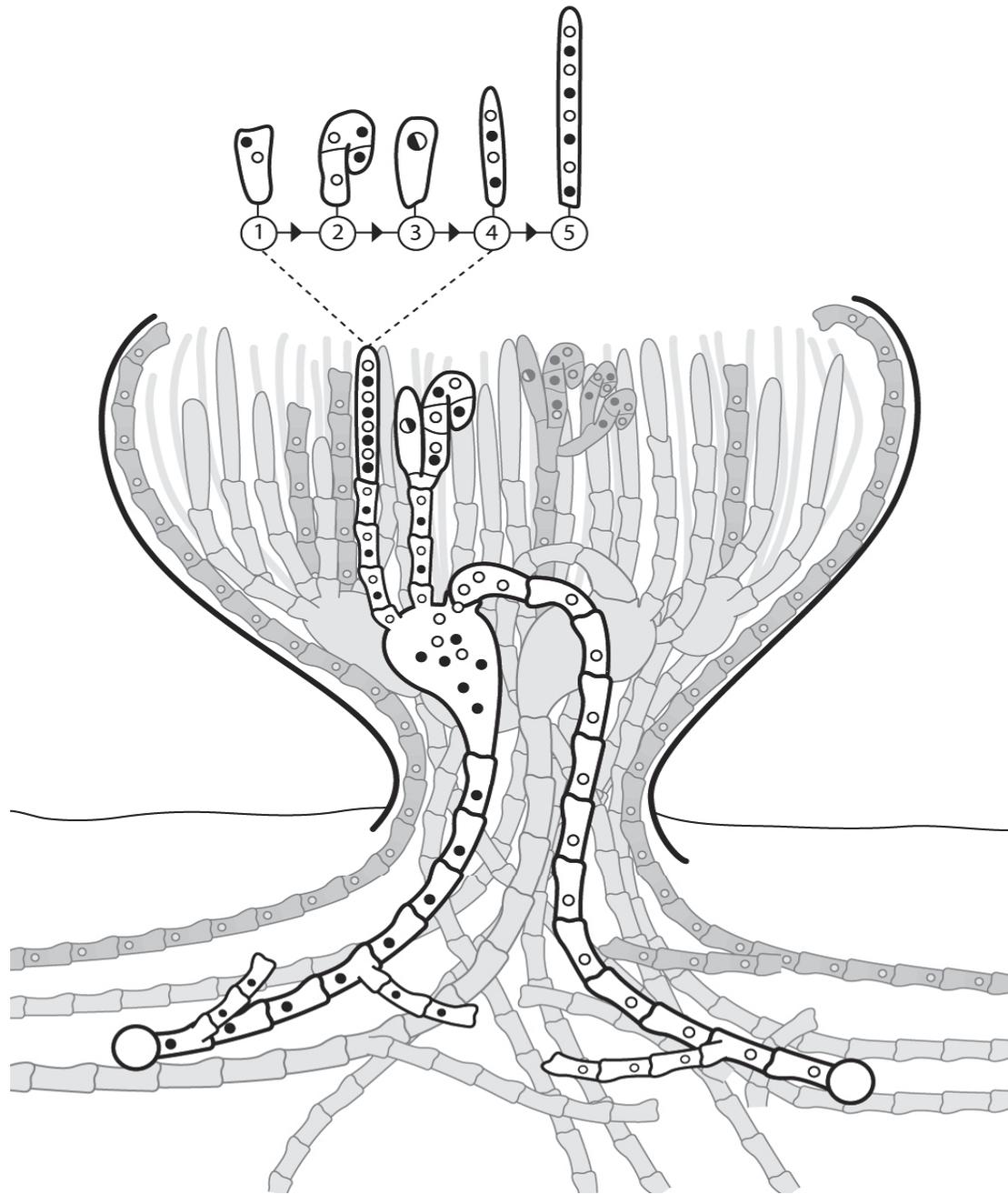
Selon Kendrick 2000, The fifth kingdom

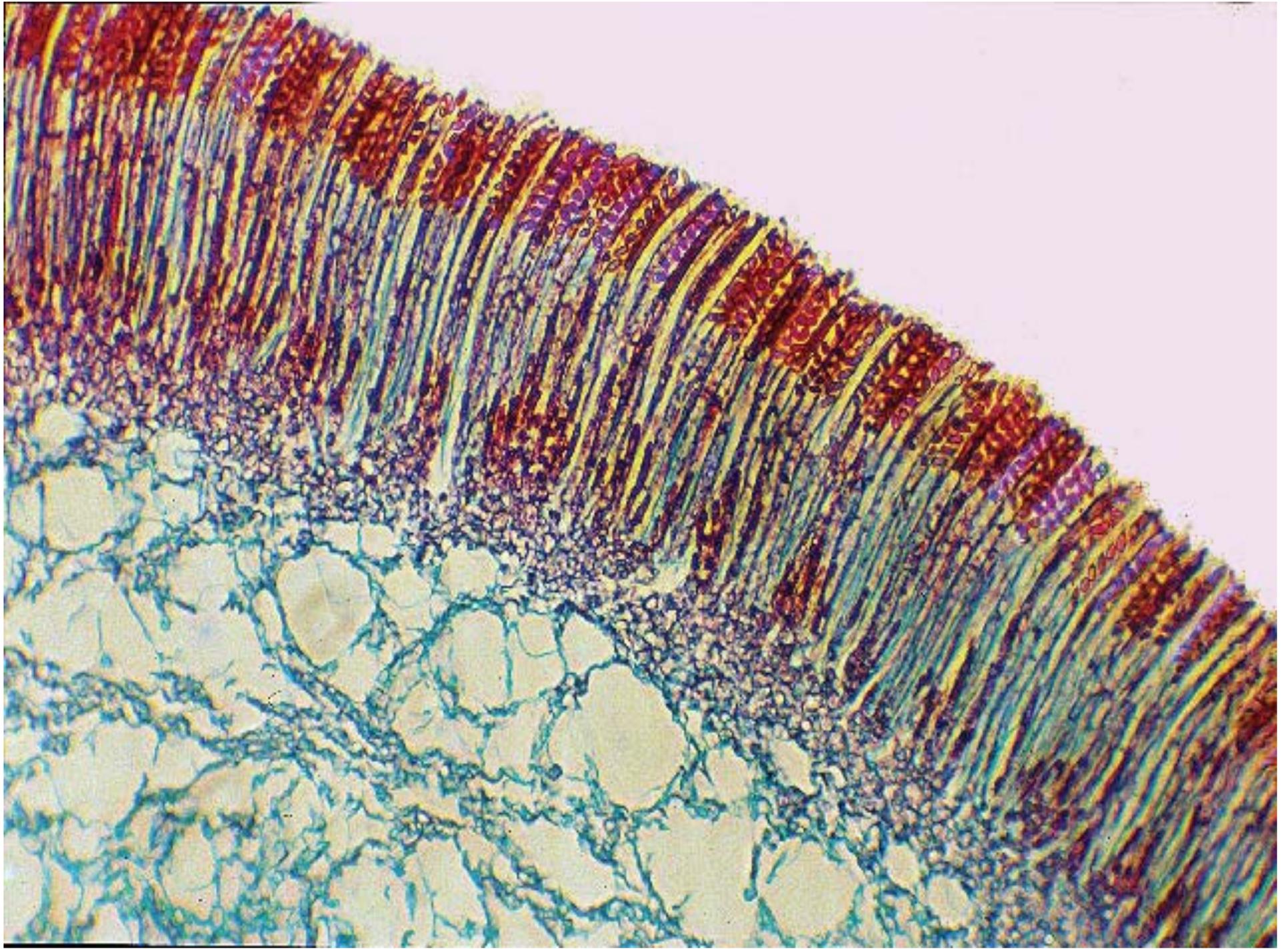
A microscopic image showing a network of hyphae, likely from an Ascomycotina. The hyphae are thin, elongated, and branched, with some showing internal structures. The background is a light, yellowish-tan color, and the hyphae are stained a darker, brownish-purple. The text is overlaid on the image.

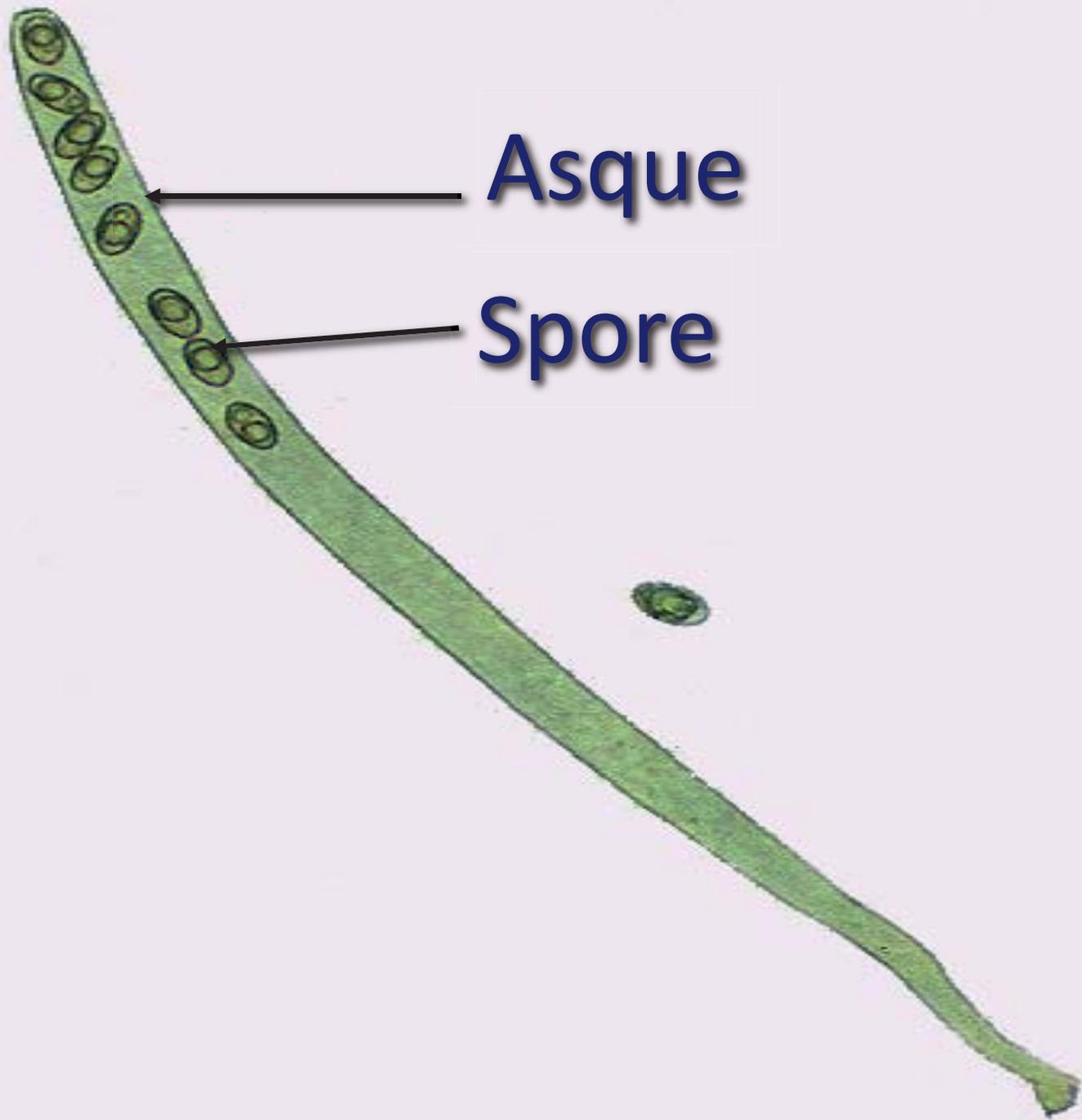
Ascomycotina = Champignons à asques
(I)



Géopyxide des charbonnières







Asque

Spore



Morille noire

Tuber sp. = Truffe



Différents types d'ascocarpes



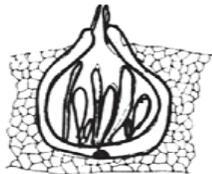
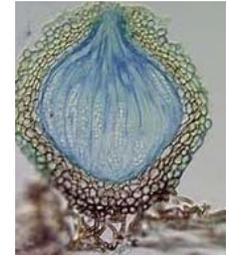
Cléistothèce : Sphère close avec hyphes stériles et asques sans ordre. Ex. *Uncinula necator* (l'oïdium de la vigne)



Périthèce sans ostiole : Sphère close contenant les asques bien ordonnés.



Périthèce ostiolé : Fructification en forme de bouteille avec ouverture au sommet. Ex. *Neurospora crassa*



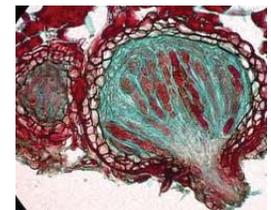
Périthèce inclus dans un stroma (masse mycélienne)
Ex. *Claviceps purpurea* (la maladie de l'ergot du seigle)



Apothécie : En forme d'assiette ; l'hyménium est rangé en palissade. Ex. Pézize, Helvelle et Morille



Ascostroma : Asques dans une cavité non délimitée par une paroi. Ex. *Venturia inaequalis* (Tavelure du pommier)

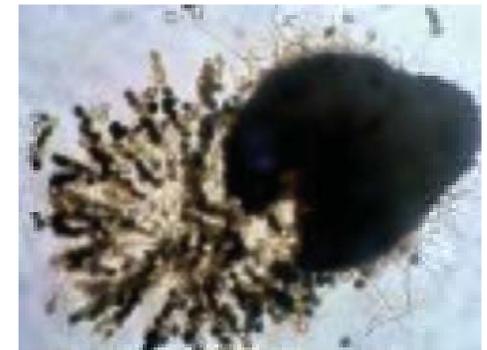
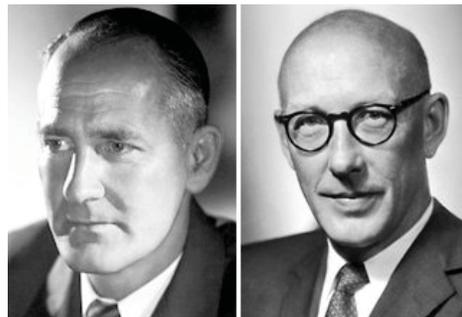


Sordariales : Famille des Sordariaceae

Série des unituniqués inoperculés

- \pm ? spp. au Québec
- 0.5 mm
- *Neurospora, Sordaria, Podospora*
- Saprophytes sur humus ou fumier
- Périthèces nus et libres
- Spores appendiculées qui se fixent sur les herbes

- Pas comestible



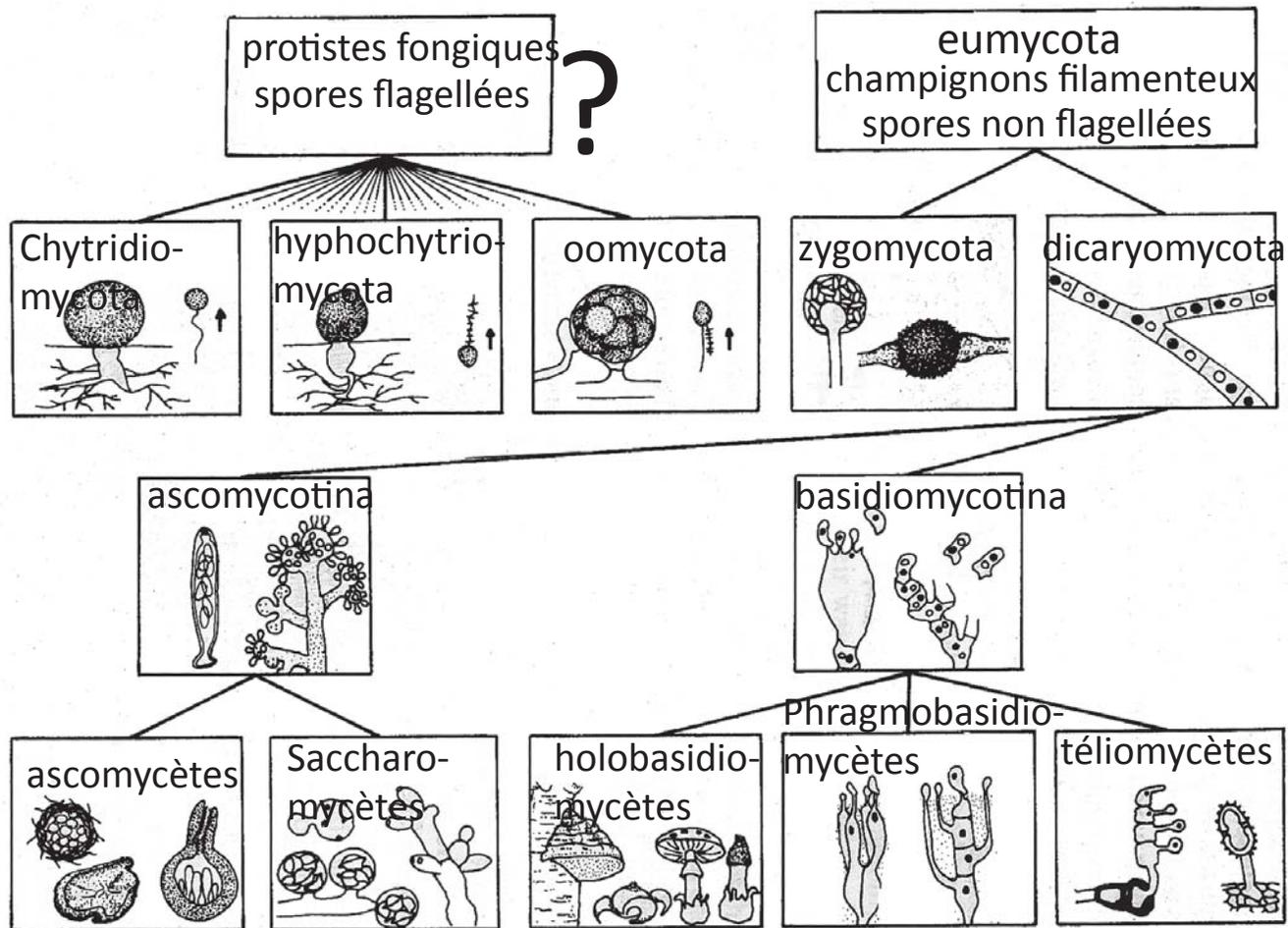
Mycologie Générale BIO-1300

Cours 5

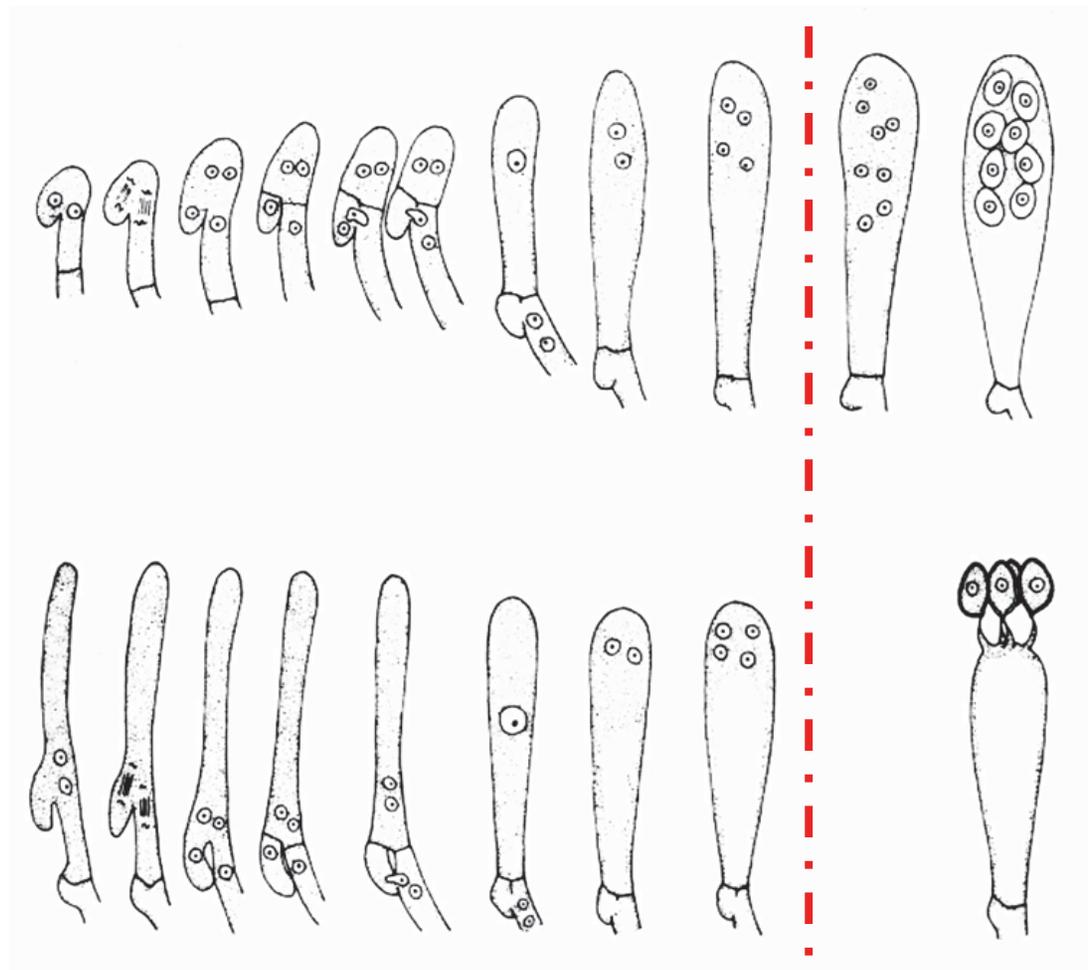
A microscopic image showing a network of fungal hyphae. The hyphae are thin, elongated, and interconnected, forming a mesh-like structure. The color is a mix of light blue and yellowish-tan, suggesting a specific staining technique. The text is overlaid on this image.

Comparaison entre *Ascomycotina* et
Basidiomycotina

Basidiomycotina & Ascomycotina



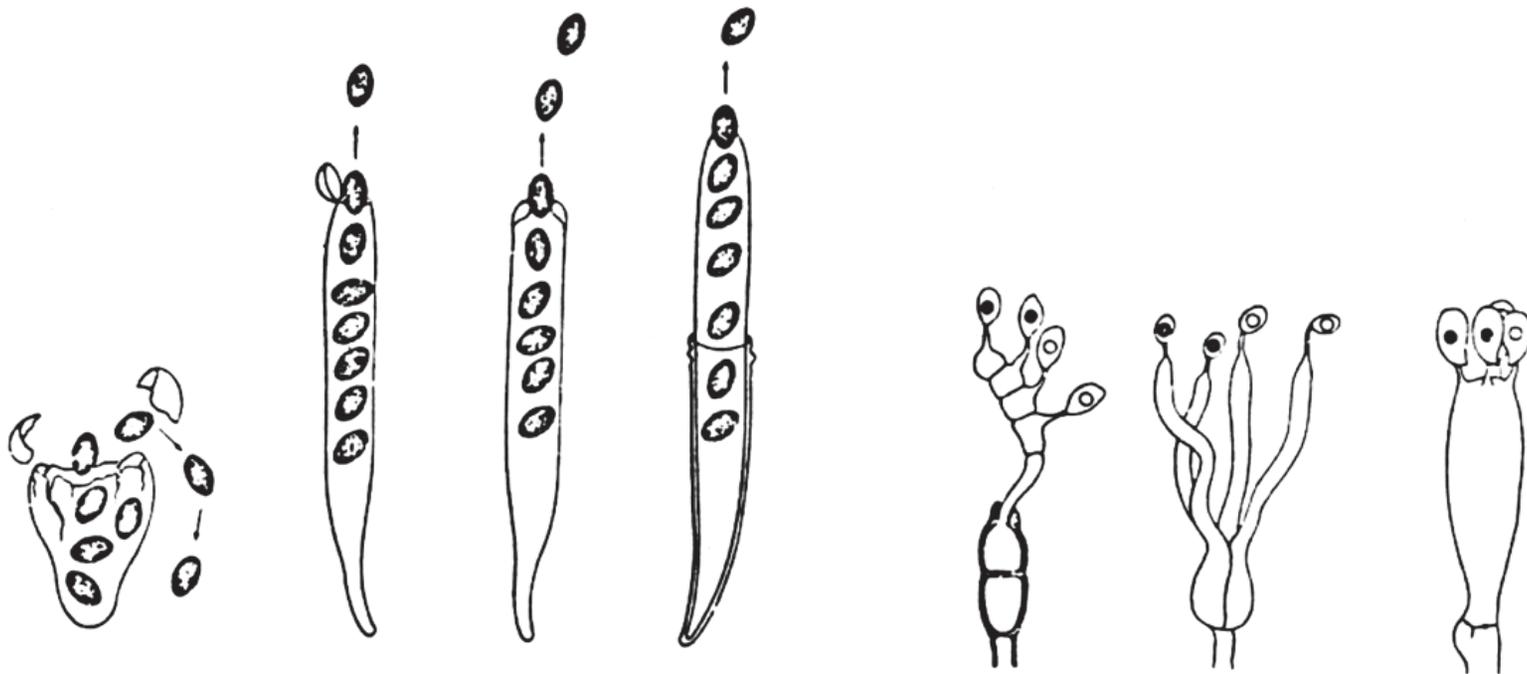
Comparaison entre le développement d'asques et de basides



asques

basides

Comparaison des différents asques et basides

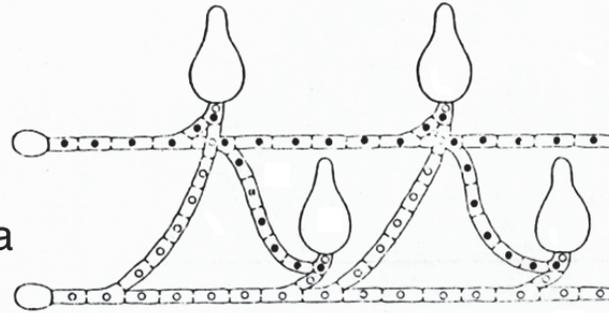


asques

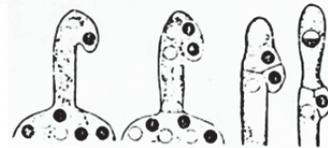
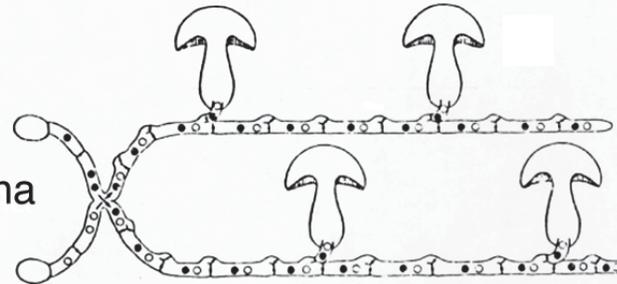
basides

Formation de la phase dicaryotique

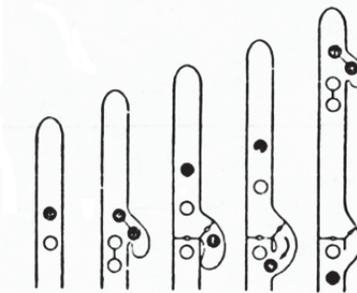
ascomycotina



basidiomycotina

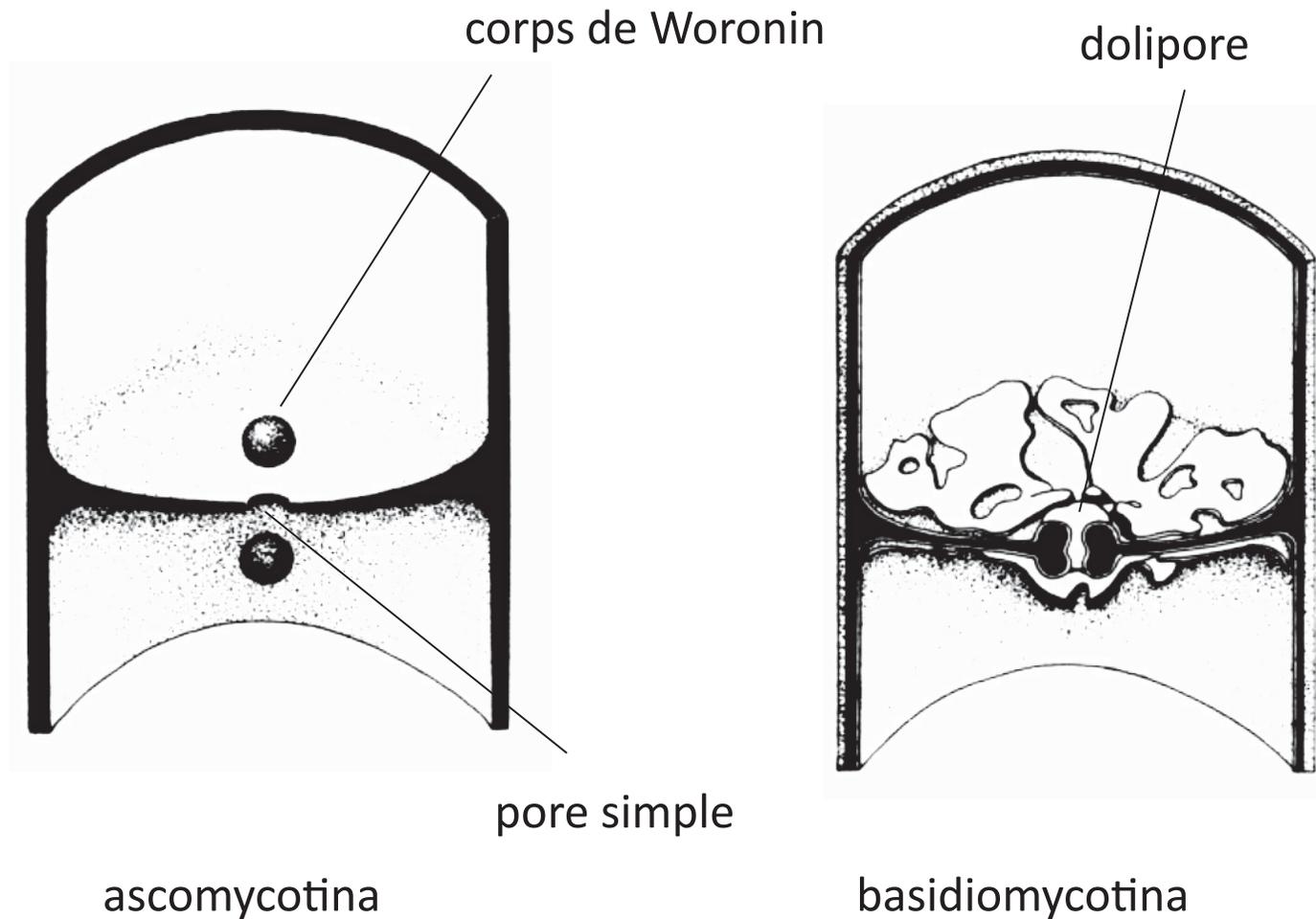


ascomycotina



basidiomycotina

Communication entre les compartiments d'hyphes



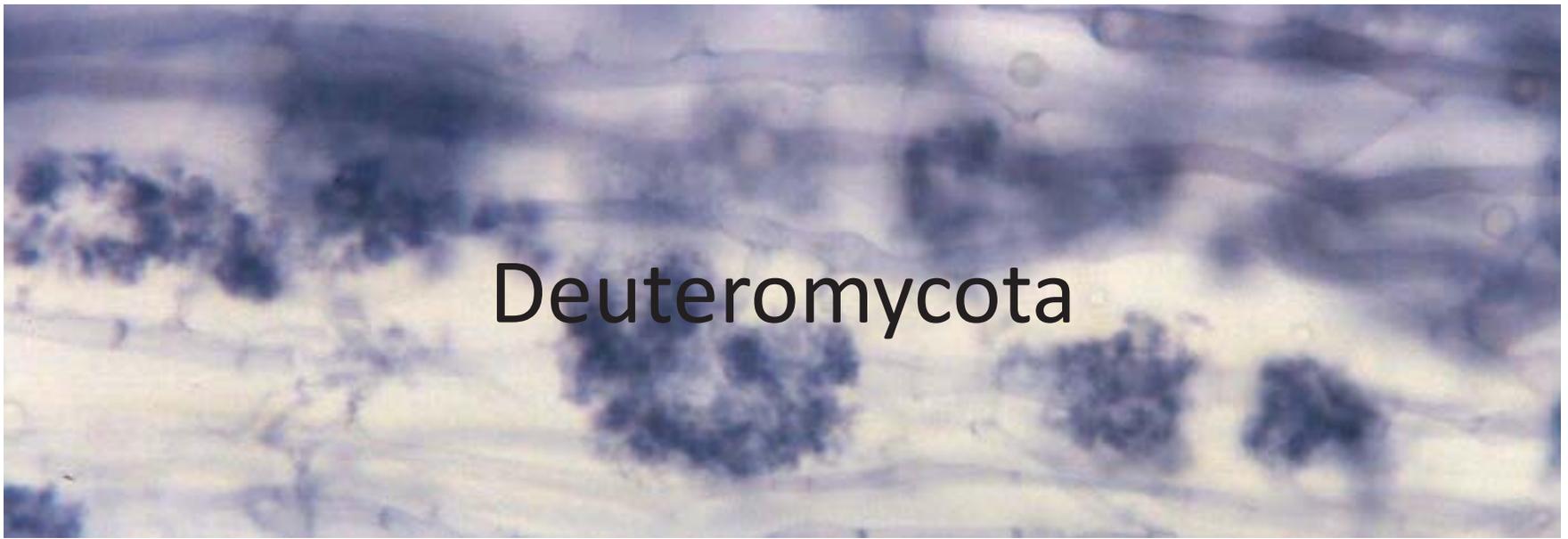
Résumé

	<u>basidiomycotina</u>	<u>ascomycotina</u>
<u>Cellule-mère</u>	baside	asque
<u>Spores</u>	basidiospores externes	ascospores internes
<u>Nombre de spores par cellule-mère</u>	4 basidiospores	8 ascospores
<u>Phase dicaryotique</u>	très précoce	limitée à l'hyphe ascogène

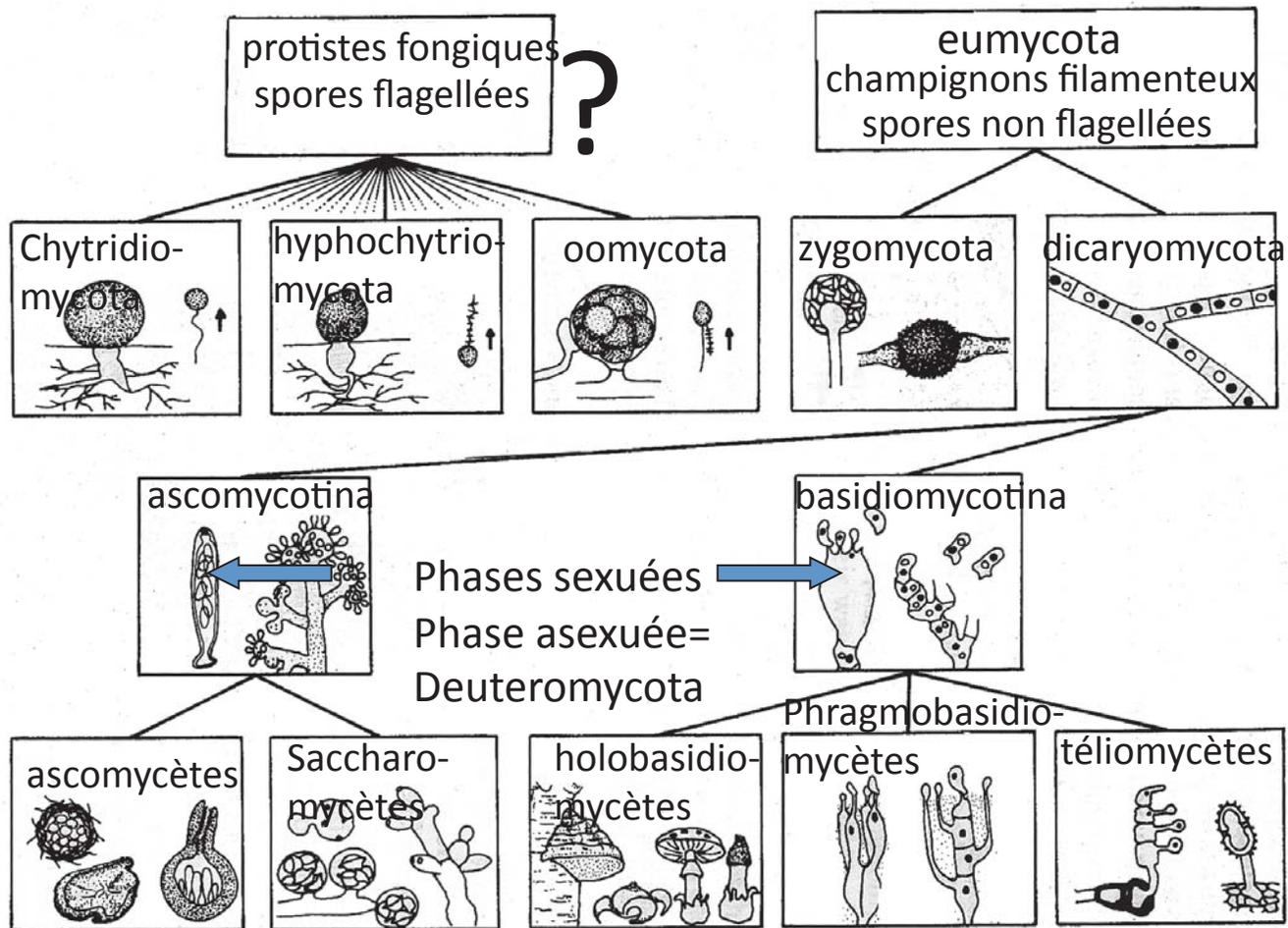
Résumé

	<u>basidiomycotina</u>	<u>ascomycotina</u>
<u>Présence d'anses d'anastomose</u>	oui (en général)	non, il se forme plutôt des crochets
<u>Paroi des cellules-mères et des spores</u>	chitine (monomère de N-acétylglucosamine)	chitine (monomère de N-acétylglucosamine)
<u>Communication intercellulaire</u>	dolipore	pore simple

Deuteromycota



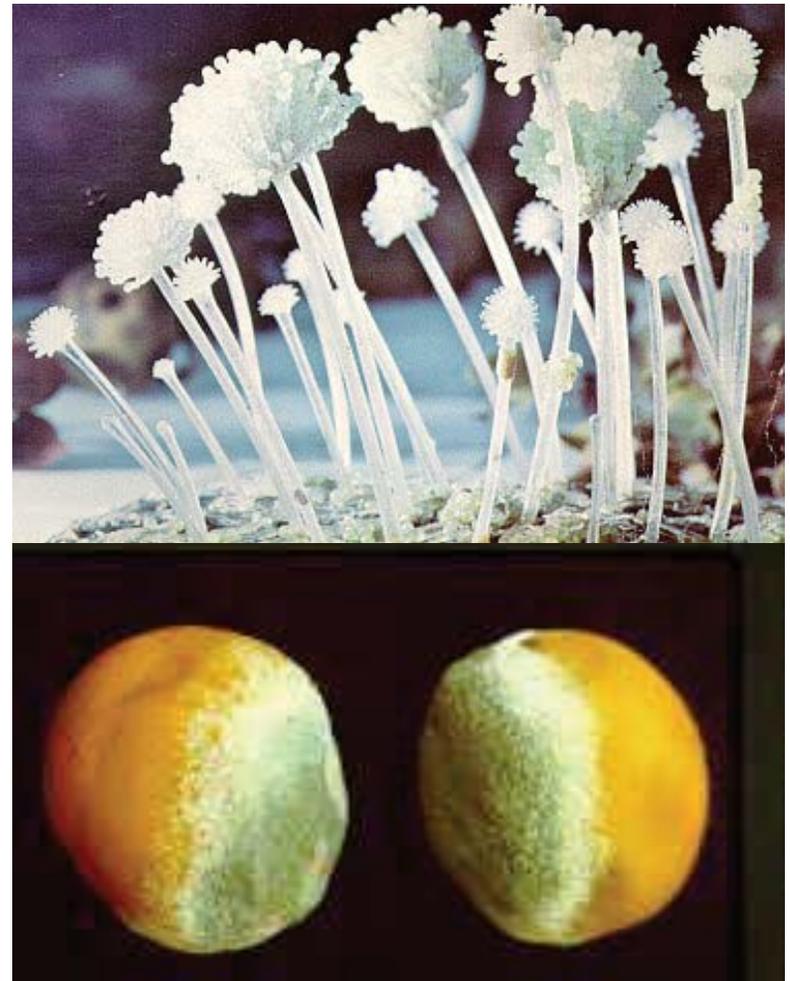
Classification des mycètes



Champignons imparfaits

Basé sur :

- La présence de conidies
- La coloration des conidies
- Les caractéristiques des conidiophores



Mycètes imparfaits

Mycètes imparfaits = *Fungi imperfecti* = Deutéromycètes

- Un groupe de mycètes à mycélium habituellement septé dont on ne connaît pas la phase sexuée

Il n'y a jamais d'asques ni de basides et on ne peut pas dire s'il sont des Ascomycètes ou des Basidiomycètes

- Cet ensemble contient au moins 2 400 genres et 20 000 espèces

Le deuxième groupe en importance numérique après les Ascomycètes

- Un ensemble polyphylétique et purement artificiel sans valeur hiérarchique dans la systématique

Pourquoi conservons-nous cette division ?

Parce que :

- Cet ensemble contient au moins 20 000 espèces
- Un grand nombre de mycètes ne présentent jamais de stade sexué
- Plusieurs mycètes réalisent leurs activités parasitaires ou saprophytiques uniquement à l'état végétatif

Parfois, on retrouve la forme sexuée mais l'apparition de structures sexuées exige des conditions particulières et est souvent brève et tardive

Pourquoi l'absence de reproduction sexuée ?

Plusieurs raisons :

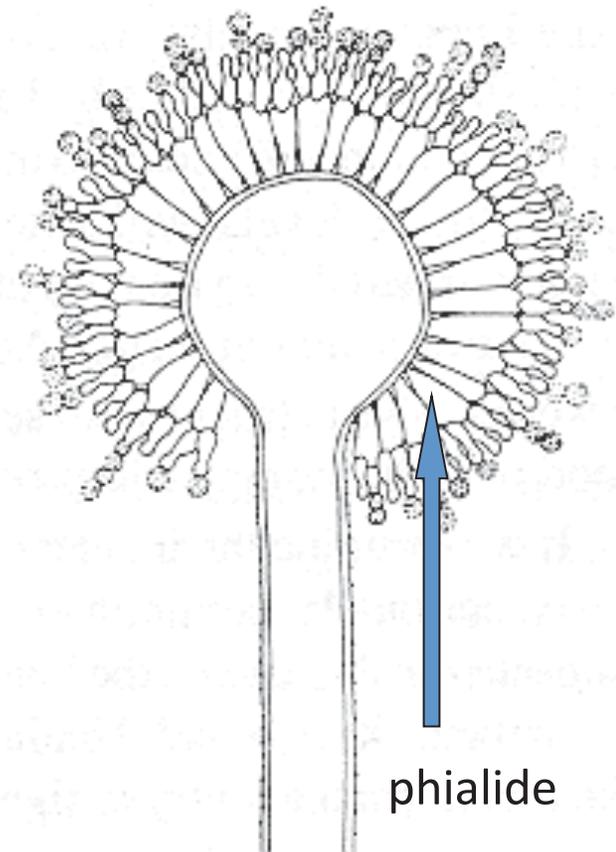
- La reproduction sexuée existe, mais elle ne se manifeste que dans certaines régions ou dans des conditions de culture déterminées

Ex. *Uncinula necator*, l'agent de l'oïdium de la vigne

- Forme haploïde d'un mycète hétérothalique pour laquelle il n'existe pas de forme mycélienne de signe opposé
- Une tendance naturelle au cours de l'évolution, compensée par des mécanismes de multiplication asexuée

Reproduction chez les mycètes imparfaits

- Seule la reproduction asexuée est présente
- Lorsqu'elle est présente, elle se fait grâce à la production de mitospores = conidies (du grec *konis*, poussière)
- Les conidies sont portées au sommet d'hyphes nommées conidiophores
- La morphologie des conidies est souvent à la base de la classification des Deutéromycètes



Conidies

Amérospores



Didymospores



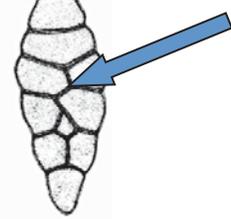
hyalodidymées

phaeodidymées

Phragmospores



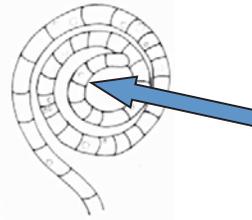
Dictyospores



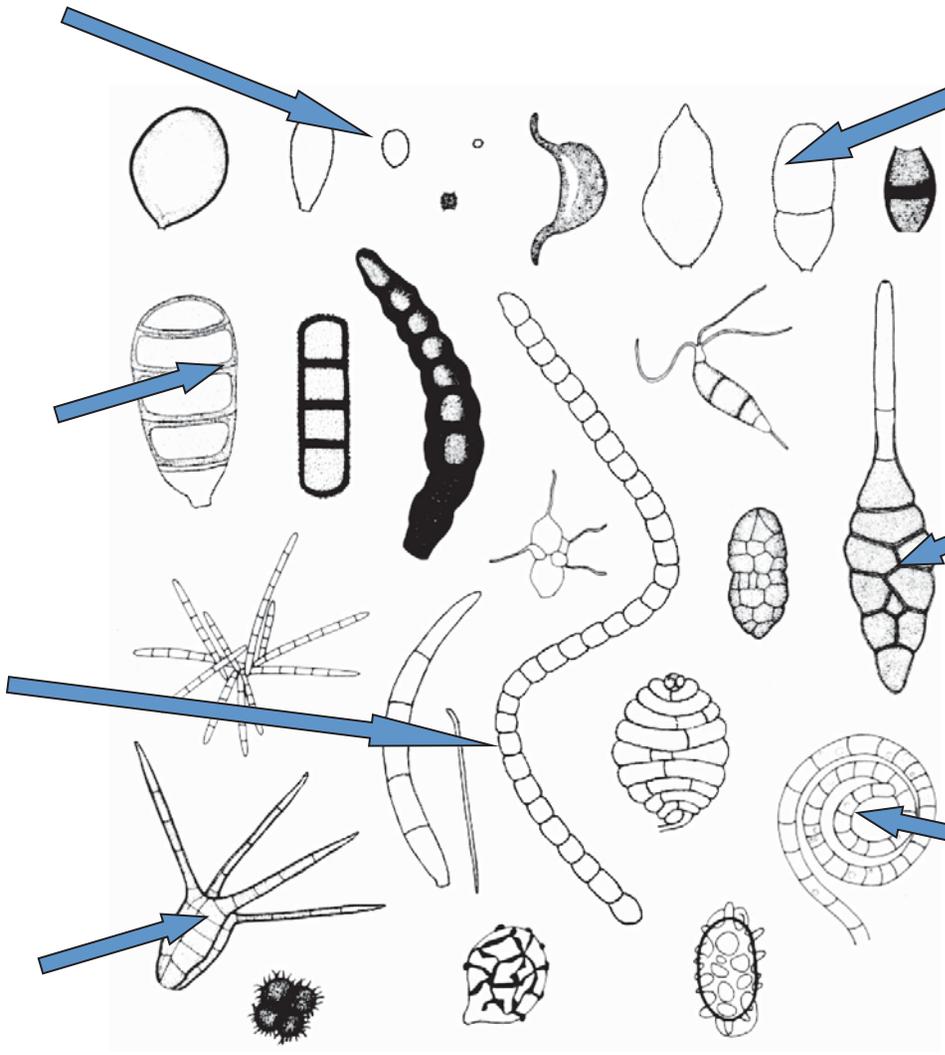
Scolecospores



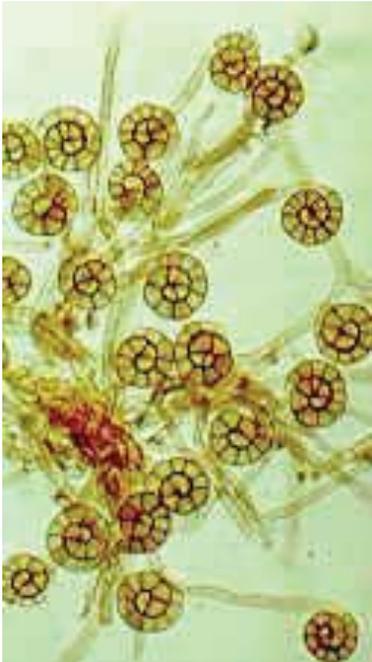
Hélicospores



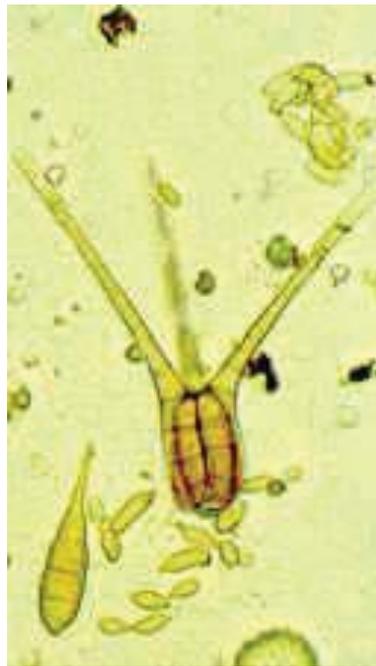
Staurospores



Conidies



Hélicospores



Staurospores



Phragmospores



Dictyospores



Didymospores

Deux systèmes de classification

1) Le système de Saccardo (1899)

Basé sur :

- La présence de conidies
- La coloration des conidies
- Les caractéristiques des conidiophores

Simple et facile à comprendre, mais basé sur des critères instables qui regroupent des mycètes probablement peu apparentés



Deux systèmes de classification

II) Le système de Kananaskis/Alberta (1969)

Basé sur : conidiogénèse)





Le cas des levures

This is a microscopic image of yeast cells, likely *Saccharomyces cerevisiae*, stained with methylene blue. The image shows several chains of yeast cells, with some cells in the process of budding. The cells are roughly spherical and arranged in linear patterns. The staining highlights the cell walls and the internal structures of the yeast. The background is a light, slightly textured blue.

Les levures

- Les levures sont des mycètes microscopiques (2 à 7 μ m)
- 22 genres, 600 spp.
- Les levures se trouvent en abondance dans :
 - Les substances sucrées
 - Le lait
 - L'air
 - Le sol

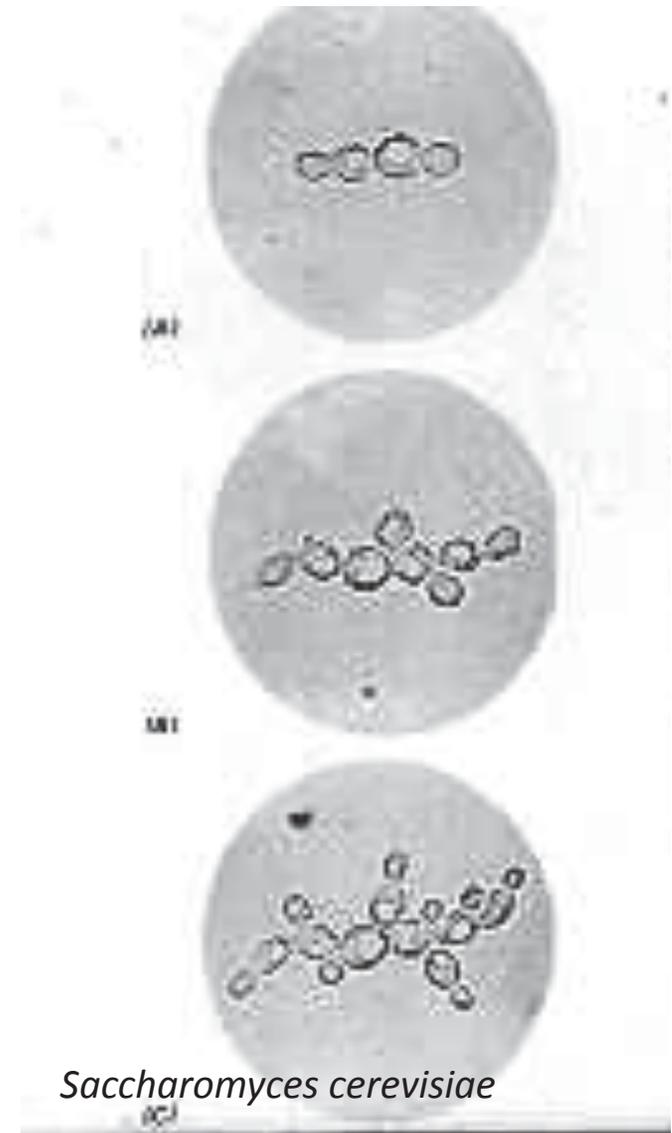


Les levures

Caractéristiques générales

- Elles sont unicellulaires (rondes, ovoïdes ou en forme de bouteille)
- Elles se reproduisent par bourgeonnement ou fission (blastoconidies, une levure est essentiellement une conidie)

Anamorphe (sans méiose)

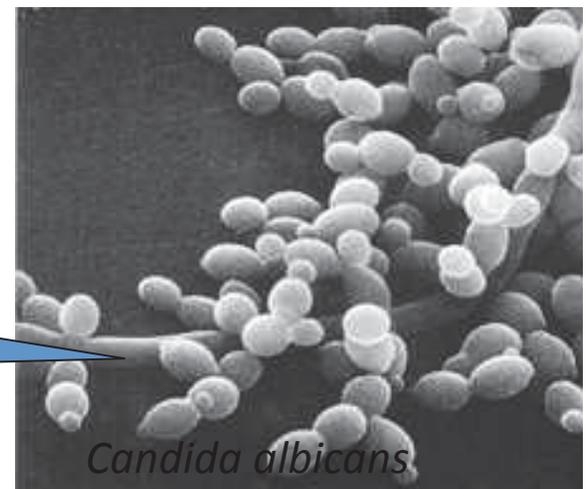
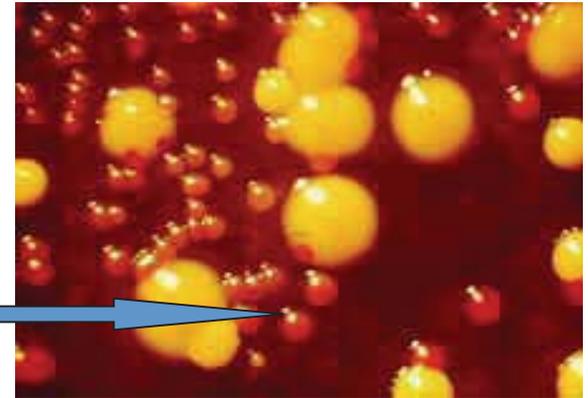


Les levures

Caractéristiques générales

Dimorphiques

- Normalement, elles ne produisent pas d'hyphes
- Néanmoins certaines levures prennent une forme filamenteuse sous certaines conditions



Levures : Polyphylétiques

Les levures ne forment pas un groupe naturel

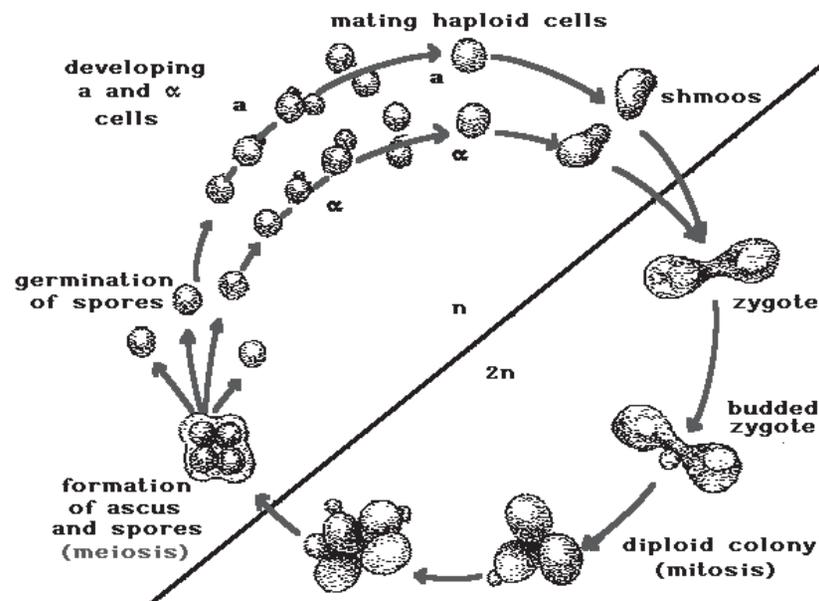
Le terme levure est utilisé pour grouper ensemble les mycètes unicellulaires qui se multiplient typiquement par bourgeonnement

Levures : Polyphylétiques

Caractéristiques générales

Certaines levures forment des structures permettant de les classer dans les dicaryomycota :

- Méiospores endogènes \approx Ascospores
- Anses d'anastomose et Méiospores exogènes \approx Basidiospores



Levures : Polyphylétiques

Ascomycotina

- *Torulopsis/Saccharomyces*
- *Candida/Saccharomycopsis*
- *Blastomyces/Ajellomyces*

Basidiomycotina

- *Cryptococcus/Filobasidiella*
- *Rhodotorula/Rhodospiridium*

Deuteromycota

- *Malassezia/?*

Classification des levures

La détermination d'une espèce de levure est fondamentale en médecine, en agronomie, dans les industries agroalimentaires, en environnement...

La taxonomie des levures est basée sur :

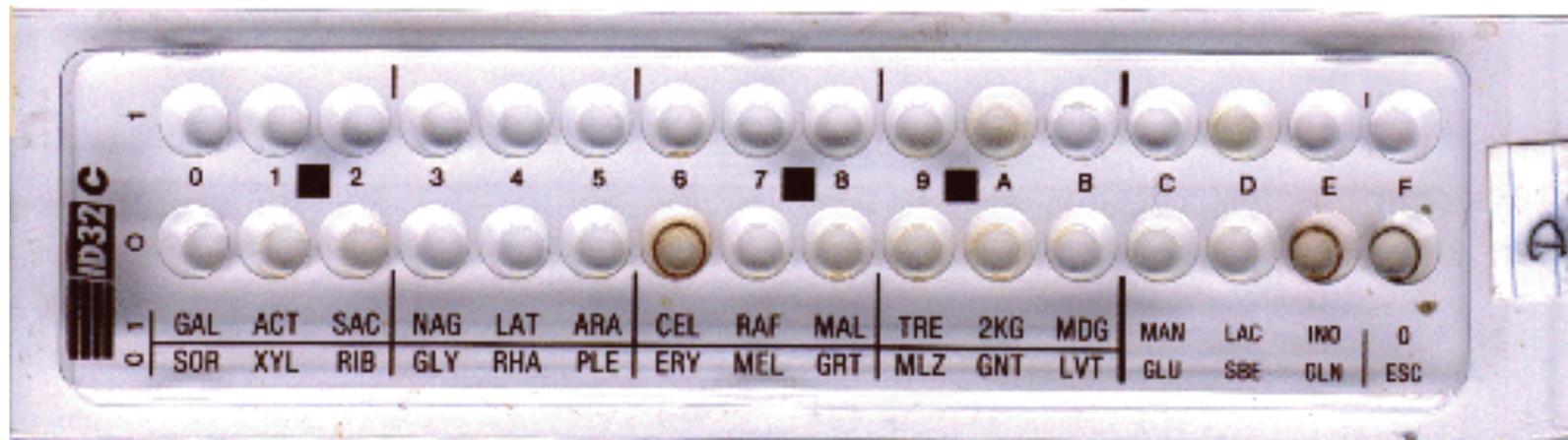
- I) Des tests physiologiques
- II) Des signatures moléculaires



Des tests physiologiques

1) Assimilation de différents sucres

p. ex. : Les galaries API 32C



- Ces plaquettes sont prévues pour la reconnaissance des levures qui sont le plus souvent pathogènes
- Seulement 64 espèces dans la base de données

Des tests physiologiques

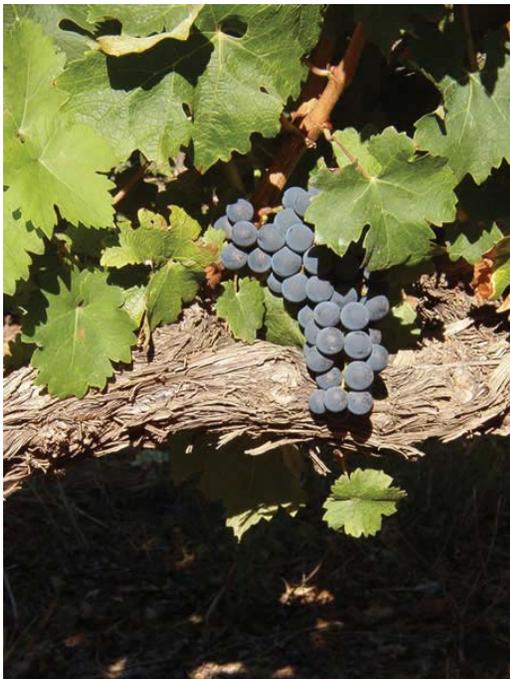
1) Assimilation de différents sucres

	Glucose	Maltose	Saccharose	Galactose	Inositol	Xylose	Raffinose
<i>Candida albicans</i>	+	+	v	+		+	
<i>Cryptococcus neoformans</i>	+	+	+	+	+	+	v
<i>Rhodotorula glutinis</i>	+	+	+	v		+	+
<i>Torulopsis glabrata</i>	+						
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	+	+	+	+			+

Bonne à excellente identification si l'indice est ≥ 90.0 , si non...

Des tests physiologiques

2) Capacité à fermenter (p. ex. : céréales ou raisins)



Candida : activité fermentative

Cryptococcus : aucune activité fermentative

Rhodotorula : aucune activité fermentative

Torulopsis : activité fermentative

Saccharomyces : activité fermentative

Des tests physiologiques

3) Besoin en azote (p. ex. : NO_3/NH_4)

Candida albicans : Nitrate -

Cryptococcus neoformans : Nitrate -

Rhodotorula glutinis : Nitrate +

Torulopsis glabrata : Nitrate -

Saccharomyces cerevisiae : Nitrate -

Des tests physiologiques

4) Besoin en vitamines

5) Résistance aux antibiotiques

6) Croissance à 37 °C

Les souches de levures pathogènes pour l'Homme peuvent croître à 37 °C, les souches saprophytes sont incapables

Des tests d'ADN

Signatures moléculaires (p. ex. : séquence d'ADN, ITS)

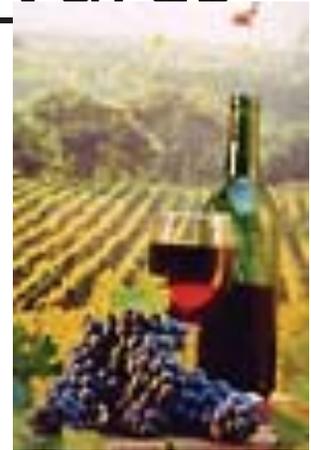
Importance économique des levures

Propriétés bénéfiques

Agent naturel des fermentations alcooliques

- *Saccharomyces ellipsoideus* et *Saccharomyces pasteurianus* interviennent dans la vinification
- *Saccharomyces cerevisiae* intervient dans le brassage de la bière
- *Saccharomyces apiculatus* dans la production de cidre

N.B. *Mycoderma aceti* sert à la fabrication du vinaigre



Importance économique des levures

Propriétés bénéfiques

Fermentation et production de CO₂

- Dans la panification, les levures (p. ex. : *Saccharomyces minor*) incorporées à la pâte assurent un dégagement de CO₂
- Des levures, en association avec diverses bactéries interviennent dans la production de produits à base de lait fermenté (p. ex. : kéfir du Caucase, leben d'Afrique du Nord et le mayzoom en Arménie)
- Diverses levures (p. ex. : *Saccharomyces*, *Hansenula* et *Pichia*) sont employées dans la production du cacao, du thé et du café: Kombucha thé noir fermenté



Importance économique des levures

Propriétés bénéfiques

La production de P.O.U. (Protéine d'Organisme Unicellulaire)

Diverses levures (p. ex. : *Saccharomyces*, *Candida*, *Torula* et *Hansenula*) sont utilisées pour obtenir des protéines à partir de :

- dérivés du pétrole (p. ex. : paraffines, les gazoles paraffiniques, le méthane, le méthanol)
- sous-produits comme le petit lait (lactosérum)
- résidus des industries sucrières (p. ex. : les mélasses de betteraves et de canne à sucre)
- résidus des usines de pâte à papier (riches en pentoses)

Importance économique des levures

Propriétés bénéfiques

D'autres

- Production de thiamine (vitamine B₁)
et de riboflavine (vitamine B₂)



- Les genres *Saccharomyces* et *Candida* sont utilisés pour produire d'enzymes comme les invertases qui permettent l'hydrolyse du saccharose en glucose et fructose

Importance économique des levures

Propriétés néfastes

- Septicémies , Infections pulmonaires

- Méningite

Ex. Cryptococcosis

- Mycoses

Ex. Mycose cutanée

- Endocardite

Cas de *Candida albicans*

Naturellement trouvé sur la peau, sur des muqueuses buccales et vaginales, et dans la voie alimentaire

- Peu de microorganismes peuvent causer autant de manifestations cliniques que les infections à *Candida albicans*

Forme arrondie

Levuriforme

Forme filamenteuse

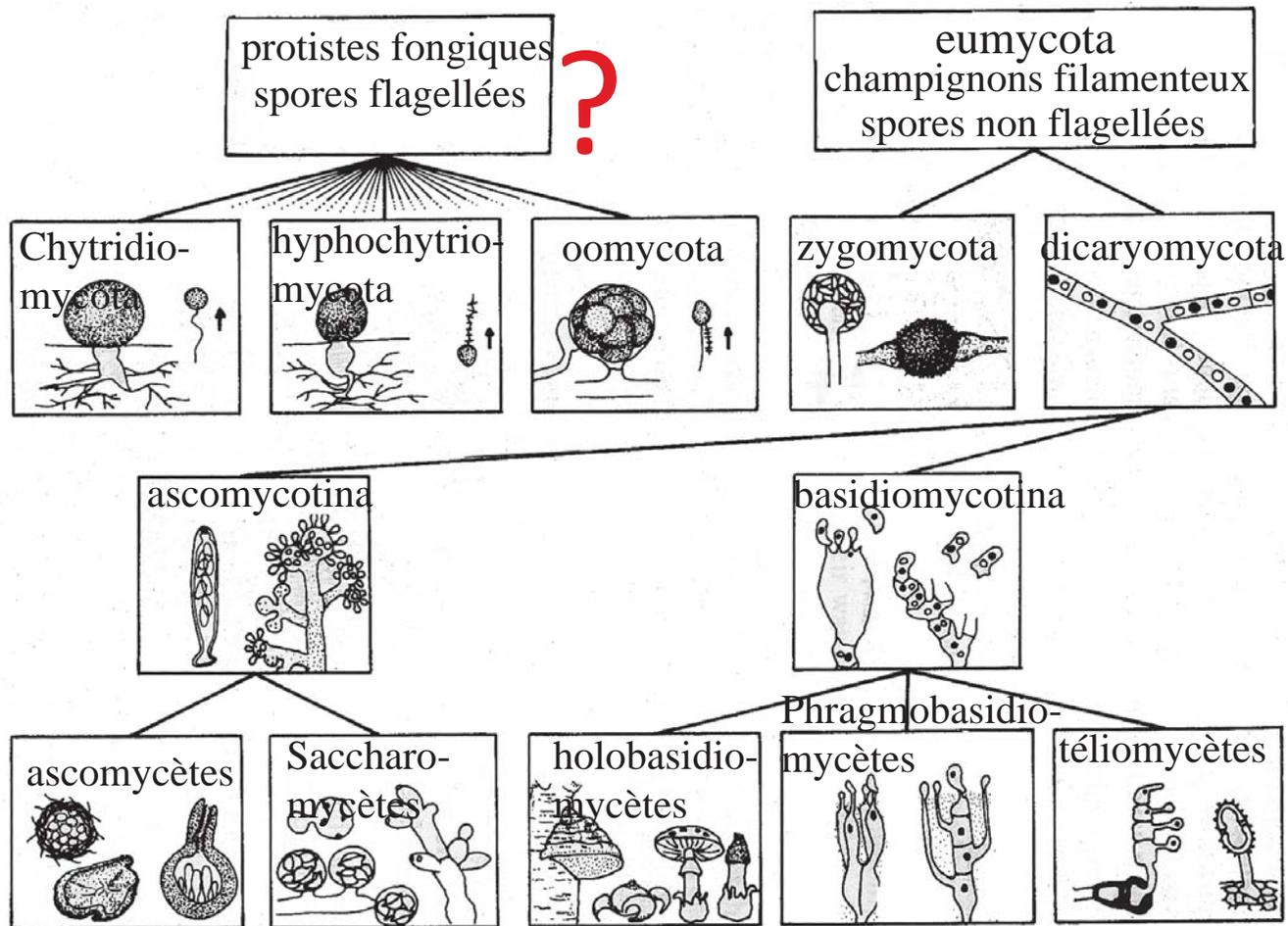
Agent pathogène



Zygomycota

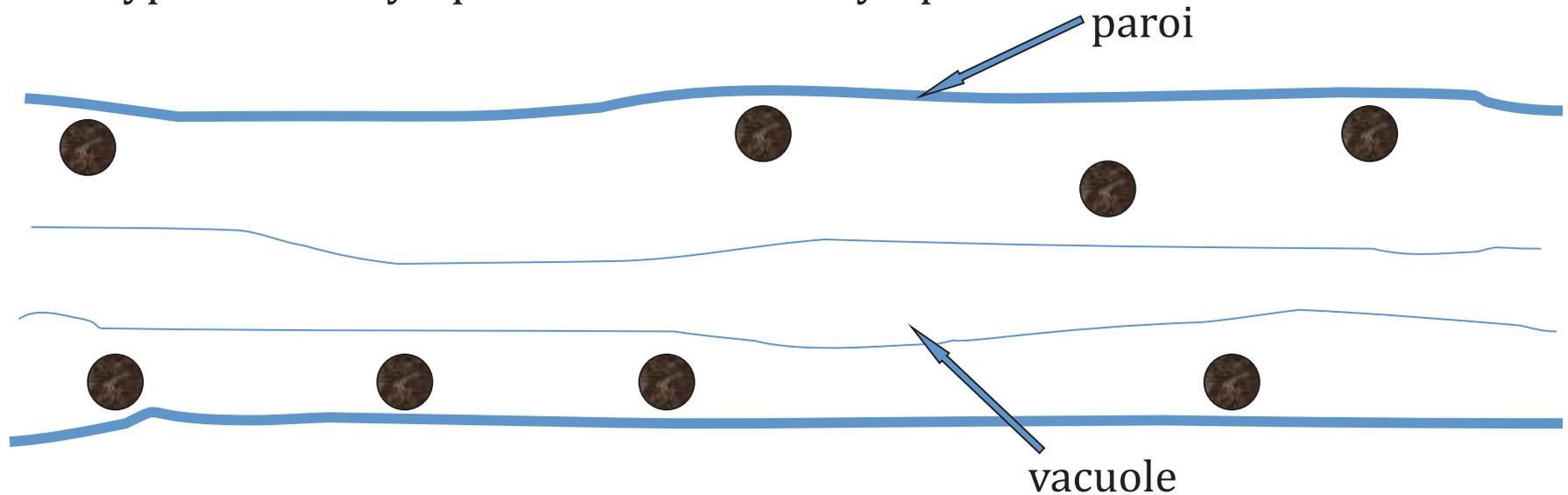


Classification : Zygomycota



Caractéristiques générales

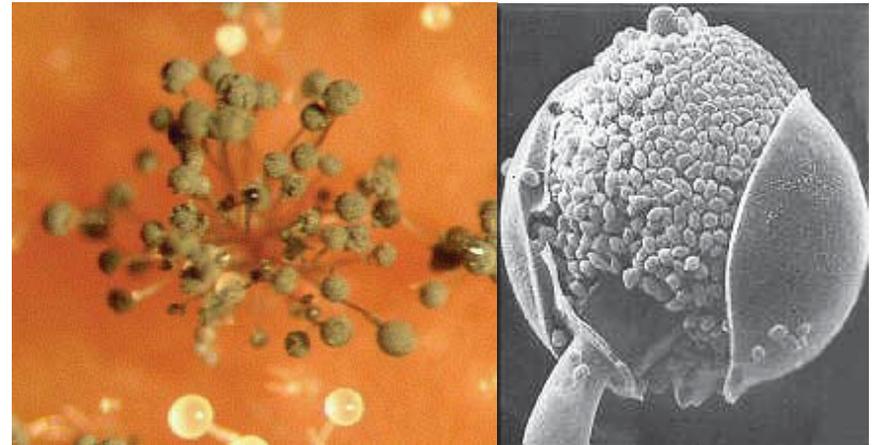
- Terrestre
- Hyphes coenocytiques:: continuité du cytoplasme



- Haploïdes

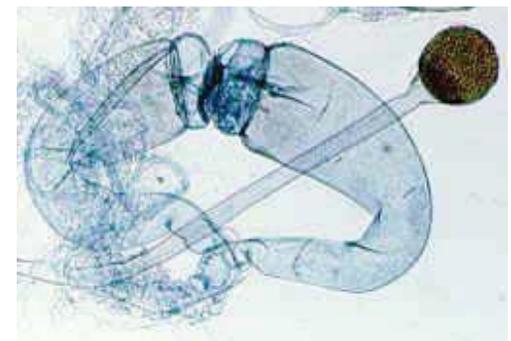
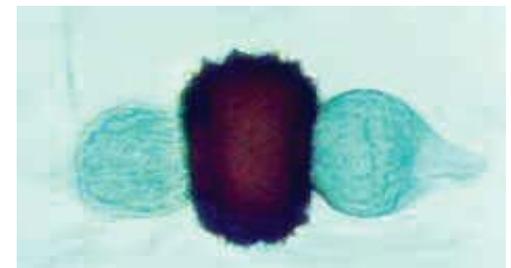
Caractéristiques générales

- Forment sporocystes/
sporange avec spores
non flagellées et lisses
Anamorphe

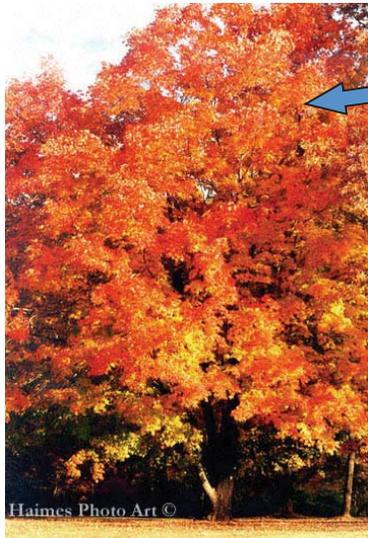


- Forment des zygospores par
reproduction sexuée
Téléomorphe

- La forme asexuée est souvent retrouvée
en même temps que la forme sexuée
contrairement aux Ascomycotina

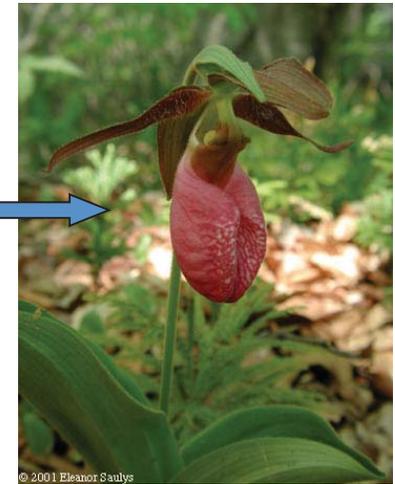


Différents groupes de mycorhizes



← Endomycorhizes à arbuscules

Mycorhizes des Orchidacées →



Ectomycorhizes →



Ectendomycorhizes

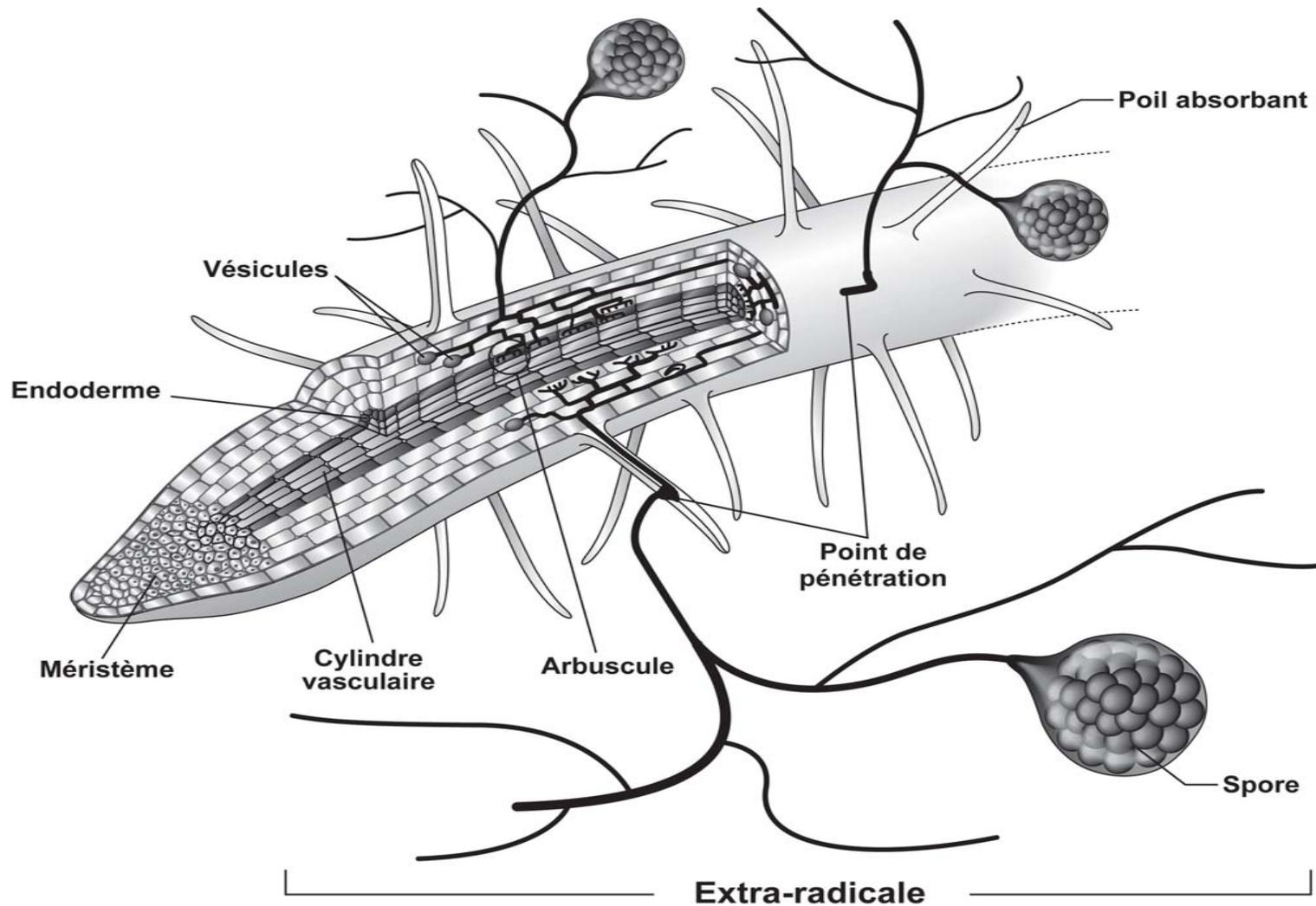
Mycorhizes arbutoïdes



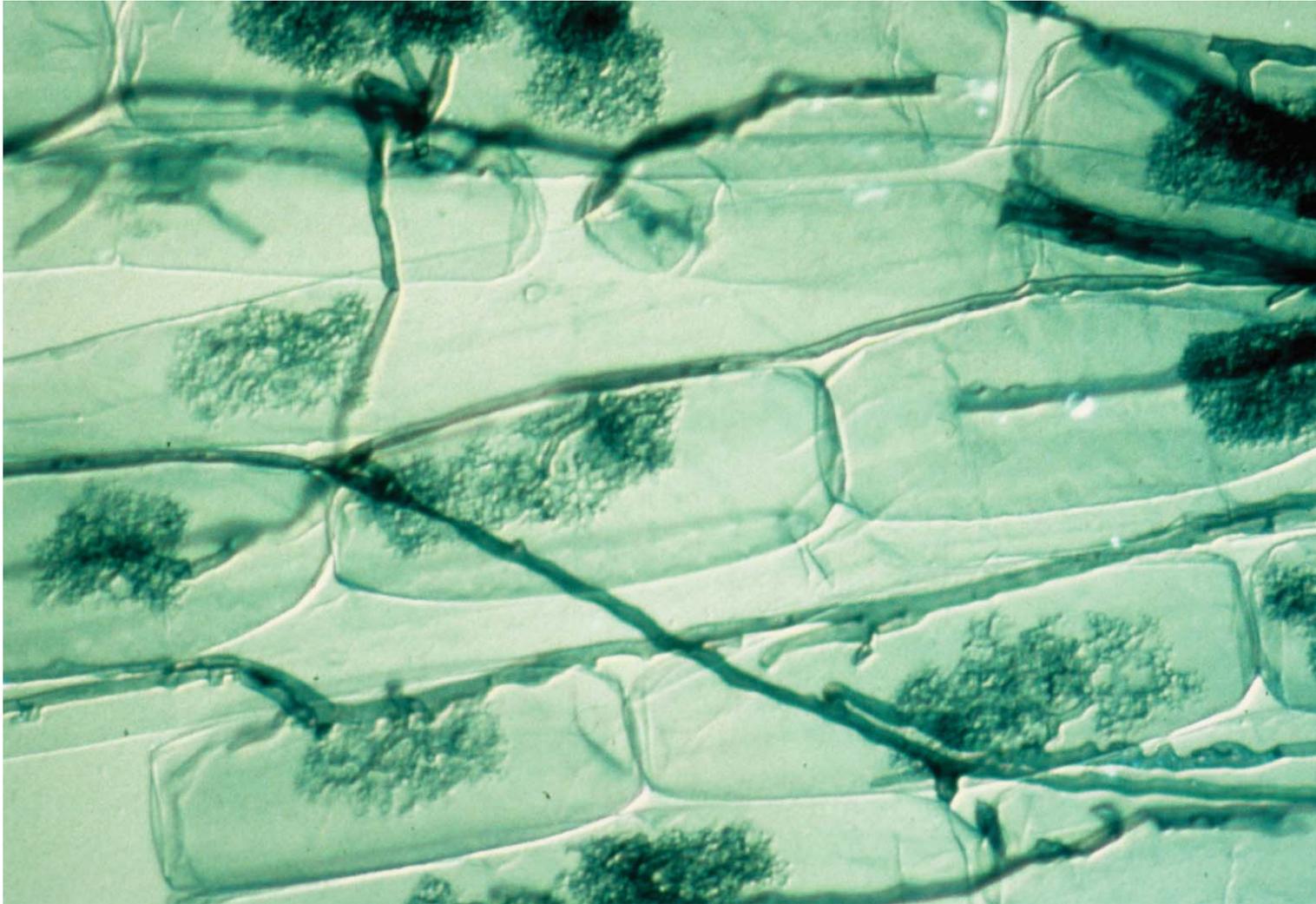
Mycorhizes monotropoïdes
Mycorhizes éricoïdes



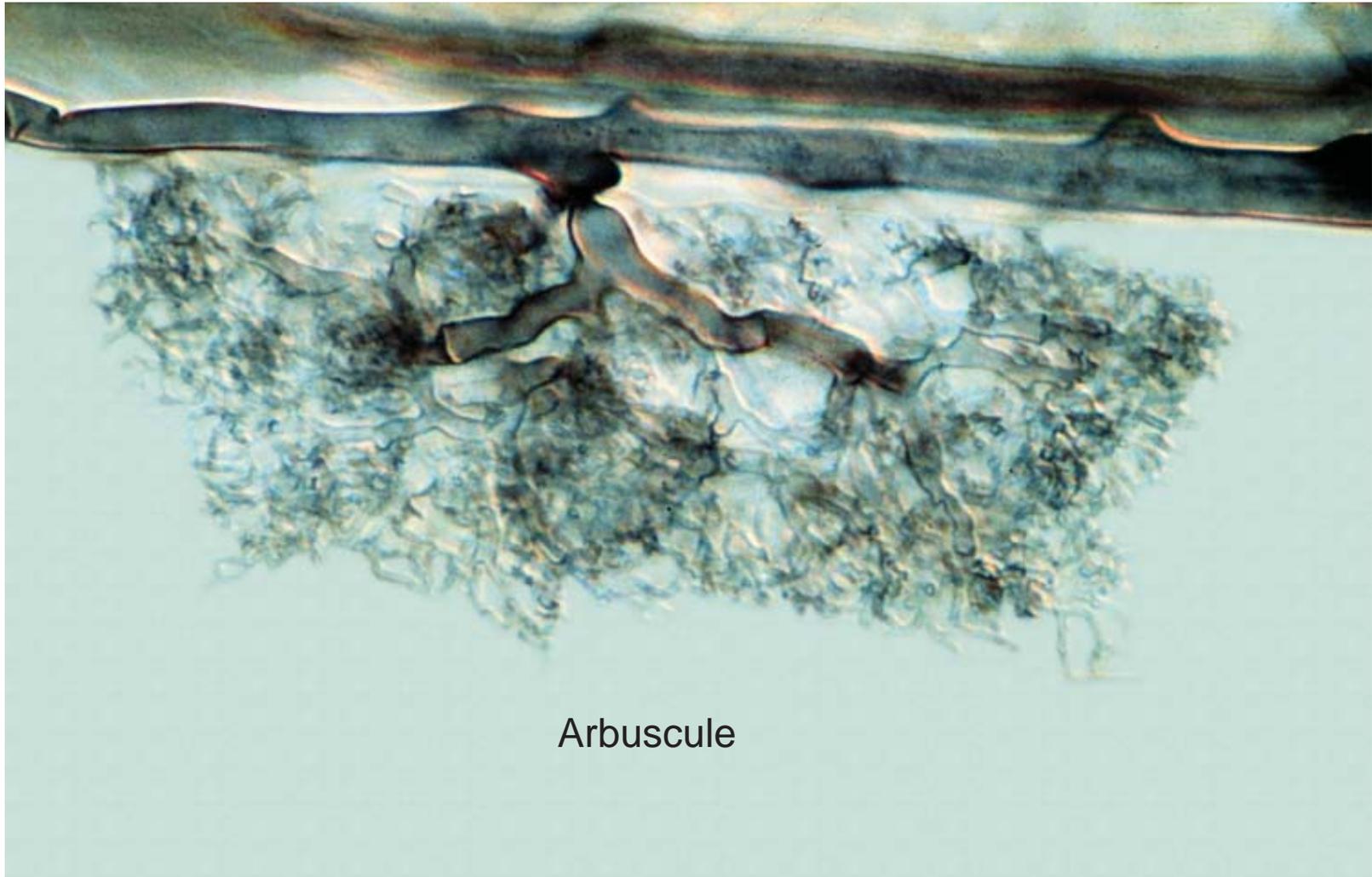
Les mycorhizes arbusculaires morphologie



Les mycorhizes arbusculaires anatomie



Les mycorhizes arbusculaires anatomie



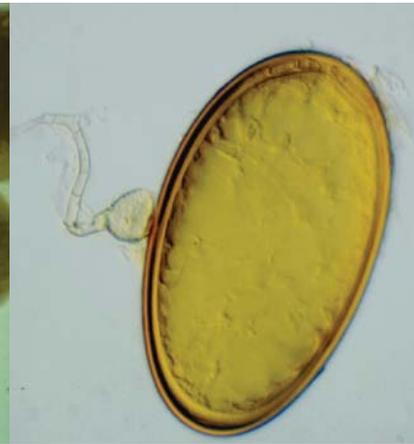
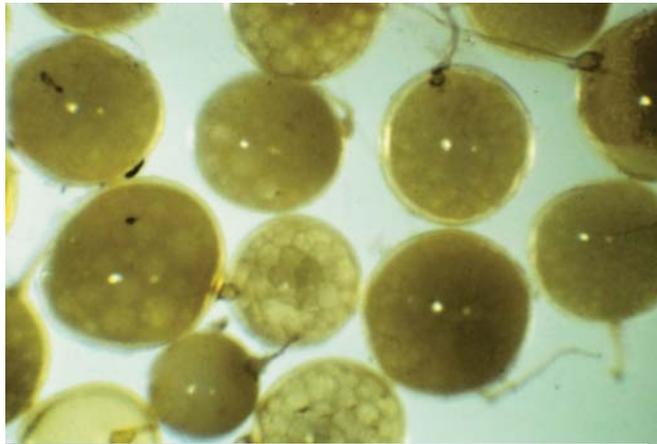
Les mycorhizes

Chaque partenaire optimise son développement grâce à cette association :

- au dessus du sol, les plantes terrestres optimisent leur métabolisme en augmentant considérablement les surfaces exposées à la lumière

- sous la surface du sol, les mycorhizes sont l'analogie des feuilles. Elles augmentent considérablement les surfaces en contact avec le sol et augmentent ainsi le volume de sol exploré

Les mycorhizes arbusculaires les spores



Systematique

- Systematique morphologique
- Systematique moléculaire



quelles solutions ?

- Gènes ribosomiaux: trop variables
- Gènes codants (*actine*, *β -tubuline*, *EF-1 α* , *V-H⁺-ATPase*): succès limités (introns mobiles), sections trop courtes ou mauvais usage
- Malgré cela.....

5 gènes codants

- *Facteur d'élongation (EF)-1 α* (765 pb)
- *V-H⁺-ATPase (VHA5) vacuolaire* (1468 pb)
- *F-H⁺-ATPase (FOF1 ATP synthase sous-unité β)*
(gène nucléaire à protéine mitochondriale)
(621 pb)
- *Glucosamine synthase Gln1* (909 pb)
- *Porteur transmembranaire de Phosphore inorganique PT* (852 pb)

Phosphate transférase

TABLE 2. Relative similarities between a fragment of 852bp of the gene encoding an inorganic phosphate transporter of arbuscular mycorrhizal fungi of the genus *Glomus*. Letters in bold show percentage identities within morpho-species. Nucleotides on the lower left triangle and amino acids on the upper right triangle.

n°species/ species/ strain	% identity with species n°																								
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.
1. <i>G. irregulare</i> A1 DAOM240477		100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.3	96.5	95.8	89.4	89.4	91.2	88.7	88.7	88.7	88.7	87.7	68.3	68.3	68.3	67.9
2. <i>Glomus</i> sp. A1 DAOM197198	100		100	100	100	100	100	100	100	100	99.3	96.5	95.8	89.4	89.4	91.2	88.7	88.7	88.7	88.7	87.7	68.3	68.3	68.3	67.9
3. <i>Glomus</i> sp. A1 DAOM234180	100	100		100	100	100	100	100	100	100	99.3	96.5	95.8	89.4	89.4	91.2	88.7	88.7	88.7	88.7	87.7	68.3	68.3	68.3	67.9
4. <i>Glomus</i> sp. A1 DAOM234181	100	100	100		100	100	100	100	100	100	99.3	96.5	95.8	89.4	89.4	91.2	88.7	88.7	88.7	88.7	87.7	68.3	68.3	68.3	67.9
5. <i>Glomus</i> sp. A1 DAOM240201	100	100	100	100		100	100	100	100	100	99.3	96.5	95.8	89.4	89.4	91.2	88.7	88.7	88.7	88.7	87.7	68.3	68.3	68.3	67.9
6. <i>Glomus</i> sp. DAOM240448	100	100	100	100	100		100	100	100	100	99.3	96.5	95.8	89.4	89.4	91.2	88.7	88.7	88.7	88.7	87.7	68.3	68.3	68.3	67.9
7. <i>Glomus</i> sp. DAOM240434	100	100	100	100	100	100		100	100	100	99.3	96.5	95.8	89.4	89.4	91.2	88.7	88.7	88.7	88.7	87.7	68.3	68.3	68.3	67.9
8. <i>Glomus</i> sp. DAOM240721	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9		100	100	99.3	96.5	95.8	89.4	89.4	91.2	88.7	88.7	88.7	88.7	87.7	68.3	68.3	68.3	67.9
9. <i>Glomus</i> sp. DAOM240720	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.4		100	99.3	96.5	95.8	89.4	89.4	91.2	88.7	88.7	88.7	88.7	87.7	68.3	68.3	68.3	67.9
10. <i>Glomus</i> sp. DAOM229457	99.3	99.3	99.3	99.3	99.3	99.3	99.3	99.2	99.8		99.3	96.5	95.8	89.4	89.4	91.2	88.7	88.7	88.7	88.7	87.7	68.3	68.3	68.3	67.9
11. <i>Glomus</i> sp. DAOM240159	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	98.9	98.8	98.6		96.8	96.5	89.1	88.7	91.2	88.7	88.7	88.7	88.7	87.0	68.0	68.0	68.0	68.3
12. <i>G. aggregatum</i> DAOM240163	96.6	96.6	96.6	96.6	96.6	96.6	96.6	96.5	96.4	96.1	97.0		96.1	87.0	88.0	90.8	88.0	88.0	88.0	88.0	85.6	68.0	68.0	68.0	68.6
13. <i>G. diaphanum</i> DAOM229456	96.1	96.1	96.1	96.1	96.1	96.1	96.1	96.1	95.9	95.6	96.6	96.6		86.6	87.3	89.1	87.0	87.0	87.0	87.0	84.8	68.3	68.3	68.3	68.6
14. <i>G. intraradices</i> DAOM225240	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.7	87.7	87.7	87.3	85.7	85.8		88.4	87.0	87.7	87.7	87.7	87.7	87.7	68.3	68.3	68.3	68.6
15. <i>G. clarum</i> DAOM234281	87.0	87.0	87.0	87.0	87.0	87.0	87.0	87.1	86.5	86.4	86.4	85.7	85.7	88.4		92.0	87.7	87.7	87.7	87.7	88.7	71.1	71.1	71.1	68.6
16. <i>G. custos</i> DAOM236361	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.6	89.5	89.3	89.7	89.1	88.5	87.6	88.4		89.8	89.8	89.8	89.8	90.1	69.0	69.0	69.0	70.1
17. <i>Glomus</i> sp. DAOM212150	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.9	87.7	87.6	87.5	87.0	86.3	87.2	86.9	91.1		100	100	100	88.7	68.3	68.3	68.3	68.3
18. <i>Glomus</i> sp. DAOM240160	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.9	87.7	87.6	87.5	87.0	86.3	87.2	86.9	91.1	100		100	100	88.7	68.3	68.3	68.3	68.3
19. <i>Glomus</i> sp. DAOM211637	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.9	87.7	87.6	87.5	87.0	86.3	87.2	86.9	91.1	100	100		100	88.7	68.3	68.3	68.3	68.3
20. <i>Glomus</i> sp. DAOM240410	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.1	87.8	87.7	87.6	87.1	86.4	87.4	87.0	91.2	99.9	99.9	99.9		88.7	68.3	68.3	68.3	68.3
21. <i>G. proliferum</i> DAOM226389	86.7	86.7	86.7	86.7	86.7	86.7	86.7	86.7	86.6	86.5	86.6	86.0	85.7	89.5	87.8	89.5	88.4	88.4	88.4	88.5		70.1	70.1	70.1	69.7
22. <i>G. mosseae</i> DAOM220901	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.0	72.9	72.4	72.5	72.0	72.9	73.4	73.2	72.5	72.5	72.5	72.6	74.0		100	100	91.4
23. <i>G. mosseae</i> DAOM240162	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.0	72.9	72.4	72.5	72.0	72.9	73.4	73.2	72.5	72.5	72.5	72.6	74.0	100		100	91.4
24. <i>G. mosseae</i> DAOM240255	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.1	73.0	72.9	72.4	72.5	72.0	72.9	73.4	73.2	72.5	72.5	72.5	72.6	74.0	100	100		91.4
25. <i>G. coronatum</i> DAOM240476	72.9	72.9	72.9	72.9	72.9	72.9	72.9	72.9	72.7	72.6	72.7	72.7	72.1	72.4	73.3	73.1	71.9	71.9	71.9	72.1	73.6	94.5	94.5	94.5	

Conclusion

