

Partie Mycologie

Introduction

Les champignons ou mycètes « Grec=Mycota "mukês" » sont des thallophytes non chlorophylliens. Ils sont caractérisés par leur faible développement, leur organisation générale rudimentaire. Leur thalle, parfois réduit à une *cellule unique*, prend le plus souvent la forme d'un *filament* plus ou moins ramifié sur lequel ou à l'intérieur duquel se différencient les organes reproducteurs: chez les champignons dits "**inférieurs**" tels que les *phycomycètes* et les *zygomycètes*, ce filament, à structure cœnocytique, est un siphon mycélien. L'apparition d'un cloisonnement isolant entre les noyaux aboutit aux hyphes mycéliens *cloisonnés* des champignons dits "**supérieurs**" ou *septomycètes*. Les *myxomycètes* sont caractérisés par leur thalle *amiboïde*, de forme irrégulière et mouvante.

Les mycètes forment un groupe unique d'organismes, par leur comportement et leur organisation cellulaire. Ils ont également une énorme gamme d'activités; comme des *microbes pathogènes* des plantes cultivées, des animaux et des humains, ou comme *organismes de décomposition* et comme *producteurs de métabolites importants*.

En termes de biodiversité, ils sont estimés pour être au moins 1.5 million d'espèces différentes, mais seulement environ 75000 espèces (environ 5 % du total) ont été décrites.

En résumé, les champignons peuvent être définis par les caractéristiques suivantes:

- Eucaryotes.
- Se développent généralement comme des hyphes, avec une croissance apicale, mais parfois comme des levures.
- Hétérotrophes, ils dépendent de nutriments organiques.
- Ont généralement un génome haploïde.
- Ont des parois composées principalement de chitine et de glucanes.
- Absorbent les nutriments solubles à travers la paroi cellulaire et la membrane plasmique.
- Produisent des spores.

1. Structure du thalle des champignons

Le thalle de la plupart des champignons est formé de filaments ramifiés, très grêles, dont l'ensemble constitue un mycélium (Fig.1).

Ces filaments ont généralement une croissance apicale (de l'apex) (Fig.1d). Leur ramification est le plus souvent latérale (Fig 1.e) ou par des bifurcations (dichotomies) (Fig.1f).

Un filament ou hyphe est un tube à paroi rigide et contenant le protoplasme mobile. Il est de longueur indéterminée mais a souvent un diamètre plus ou moins constant (2 à 30µm) selon les espèces et les conditions de croissance (Fig.2).

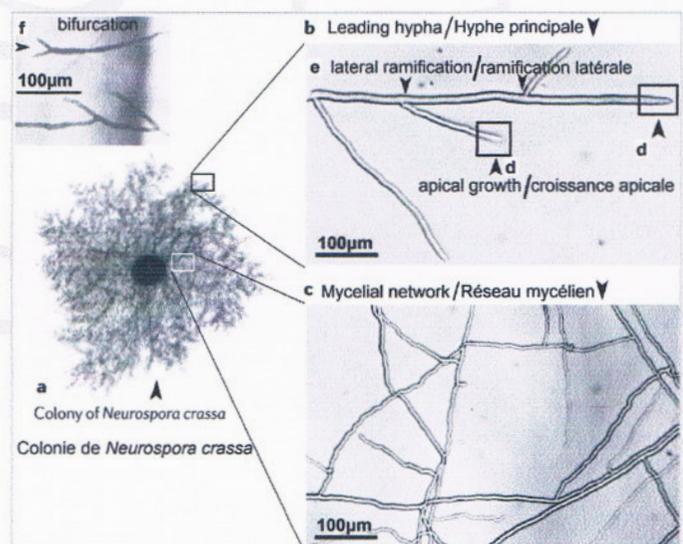


Fig.1 Thalle (mycélium et ramifications hyphales).

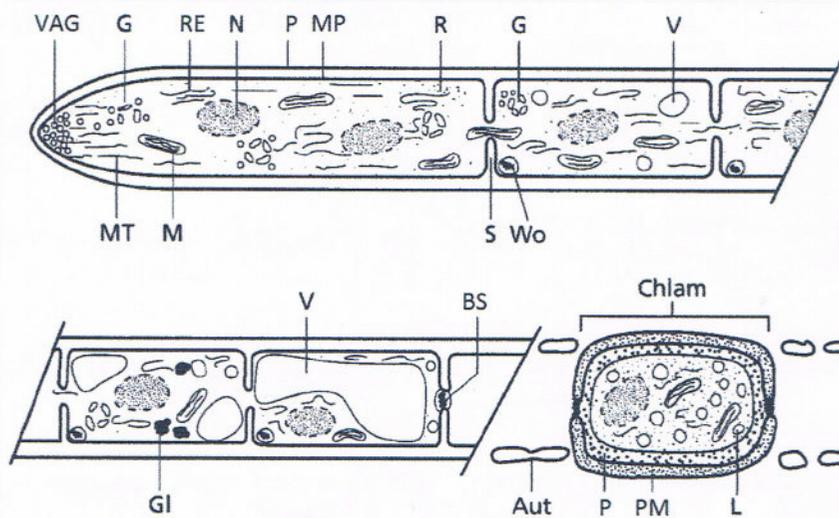


Fig.2 Représentation schématique d'un hyfe fongique, montrant un vieillissement progressif et une vacuolisation derrière le sommet de l'hyfe. Dans les régions les plus anciennes, les parois peuvent se décomposer par autolyse ou les nutriments mycéliens peuvent s'accumuler dans les chlamydospores (spores de repos aux parois épaisses qui servent à la survie en dormance).

Aut = autolyse; GVA = grappe de vésicules apicales; Chlam = Chlamydospore; ER = réticulum endoplasmique; G = équivalent de de l'appareil de Golgi ; Gl = glycogène; L = lipide; M = mitochondrie; MT = microtubules; PM = paroi mélanisée; N = noyau; P = paroi; R = ribosomes; S = septum; BS = bouchon septal; V = vacuole; Wo = Corps de Woronin.

Les **hyphes** de la **plupart des mycètes** sont généralement **cloisonnées** (septées: de septum – pl: septa): composées d'une file de cellules, uni-, bi- ou plurinucléées (Fig

. 3A) séparées par des cloisons transversales. Ce **cloisonnement est absent** chez les *zygomycètes* et les *phycomycètes*: l'hyfe a une structure **siphonnée** ou **coenocytique** (Fig. 3B).

La distinction *fonctionnelle* entre les mycètes **septés** (*Asco-* et *Basidiomycètes*) et les autres **aseptés** n'est pas aussi grande; parce que les **septa** (cloisons) ont des **pores** par lesquels le cytoplasme et même les noyaux peuvent migrer. Les hyphes cloisonnés ne se composent pas donc de cellules mais de **compartiments** reliés ensemble (Fig. 3C).

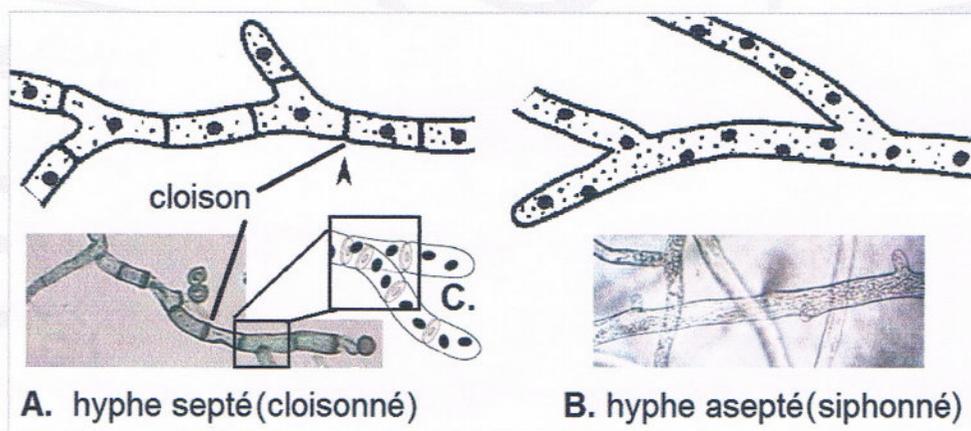


Fig.3 Filaments mycéliens: A) cloisonnés; B) siphonnés

Chez les **levures**, qui sont pour la plupart des *ascomycètes*, le **mycélium est remplacé** par des **globules unicellulaires**, qui se multiplient par **bourgeonnement** (Fig. 4A) ou par **fission** (Fig. 4B) .

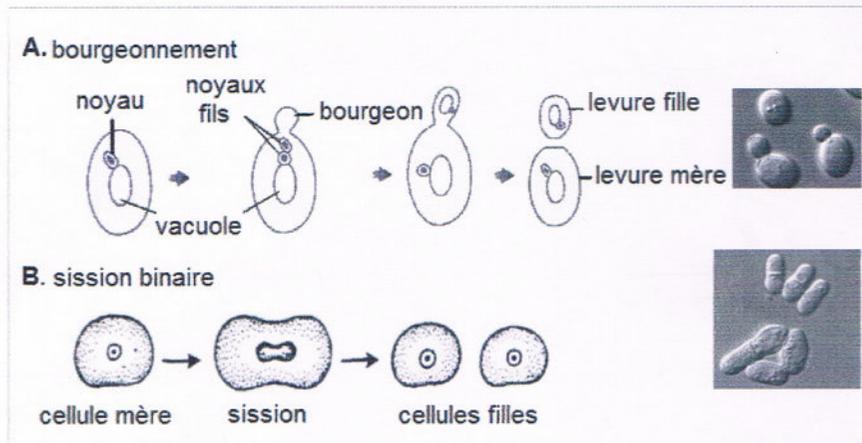


Fig. 4 Reproduction des levures par bourgeoisement et par sission.

Chez les *phycomycètes* les siphons mycéliens naissent d'un centre et que le thalle peut se réduire à celui-ci (Fig. 5A). Chez les *myxomycètes* le **mycélium** est **remplacé** par un **plasmode amiboïde plurinucléé** qui rampe et phagocyte des aliments solides (Fig. 5B).

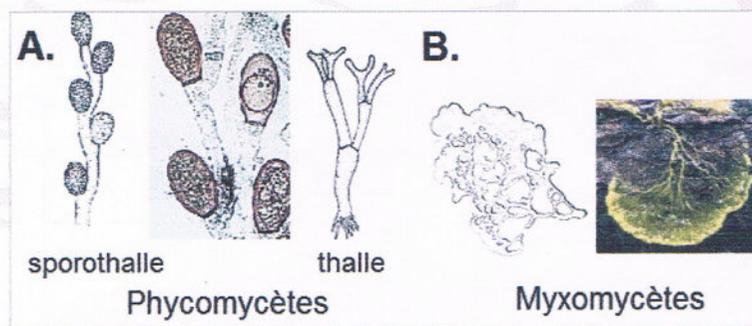


Fig.5 Reproduction des levures par bourgeoisement et par sission.

2. Paroi fongique

Les parois cellulaires fongiques sont en principe celluloso-pectiques ou celluloso-chitineuses. Mais en trouve:

- De la **callose** (colorable par le bleu coton acétique ou lactique), qui donne par hydrolyse du glucose.
- Des **hémicelluloses** dont l'hydrolyse donne des hexoses autres que le glucose, ou des pentoses et du glucose chez certains champignons (*Asprgillus*, Levures).
- Des **amyloïdes**, colorables en bleu (parfois en rouge) par l'iode, comme l'amidon. Leur l'hydrolyse donne du galactose.
- De la **chitine** (colorable au rouge Congo), dont l'hydrolyse donne l'acétyl-glucosamine.

Les *Basidio-* et les *Ascomycètes* sont essentiellement **chitineux**, ou **chitino-callosiques**. Parmi les *Zygomycètes*, les *Mucorales* sont **celluloso-chitineuses**. Certains *Phycomycètes* sont **cellulosiques** ou **celluloso-callosiques** (saprolognales, péronosporales), d'autres sont **chitineuses** (*Blastocladales*).

Outre les glucides, les parois cellulaires des champignons peuvent renfermer des **protides** cornés tels que la **kératine** et des **pigments** tels que la **mélanine**.

La composition chimique de la paroi des cellules fongiques diffère d'un groupe fongique à un autre et même entre les individus du même groupe selon les différentes phases de croissance et les conditions environnementales (Tab.1, Tab.2 et Tab.3).

En général, la paroi fongique est principalement composée de polysaccharides, avec des quantités moindres de protéines et d'autres composants. Deux types principaux de composants peuvent être cités:

- Les polymères structuraux (fibrillaires à molécules à chaîne droite) fournissant une rigidité structurelle.
- Les composants de la matrice qui relient les fibrilles et qui couvrent et incorporent les polymères structuraux.

Tab 1. La composition chimique des parois cellulaires de certains groupes de champignons (poids sec de la fraction totale des parois cellulaires, en pourcentage)

Groupe	Exemple	Chitine	Cellulose	Glucanes	Protéines	Lipides
Oomycètes	<i>Phytophthora</i>	0	25	65	4	2
Chytridiomycètes	<i>Alomyces</i>	58	0	16	10	?
Zygomycètes	<i>Mucor</i>	9*	0	44	6	8
Ascomycètes	<i>Saccharomyces</i>	1	0	60	13	8
	<i>Fusarium</i>	39	0	29	7	6
Basidiomycètes	<i>Schizophyllum</i>	5	0	81	2	?
	<i>Coprinus</i>	33	0	50	10	?

* Principalement chitosane

Tab 2. Principaux glucides de la paroi des cellules fongiques (les nombres expriment le % du poids sec de la paroi).

Glucide	<i>Allomyces</i> (Phyco-)	<i>Phytophthora</i> (Phyco-)	<i>Mucor</i> (zygo-)	<i>Neurospora</i> (asco-)	<i>Saccharomyces</i> (asco-)	<i>Shizophyllum</i> (basidio-)
Chitine	58	Taces	9	11	1	5
Cellulose	0	20	0	0	0	0
Glucose	16	68	0	89	29	81
Mannane	-	1	2	0	31	0
Chitosane	-	-	33	0	-	-

Tab 3. Composition de la paroi du champignon *Mucor rouxii* dans différentes phases du cycle de vie (% du poids sec).

	aspect levuriforme	hyphe	spore
Chitine	8.4	9.4	2.1
Chitosane	27.4	32.7	9.5
Mannose	8.9	1.6	4.8
Glucose	00	00	42.6
Protéine	10.3	6.3	16.1
Mélanine	00	00	10.3
Phosphate	22.1	23.3	2.6
Autres	22.4	26.7	12.0

La microscopie électronique a démontré que la paroi cellulaire est formée de plusieurs couches avec une épaisseur allant de 50nm dans la région de l'apex à 100-150nm dans les régions mûres.

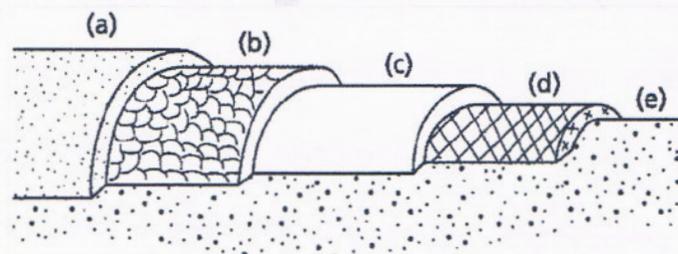


Fig. 5 Diagramme illustrant l'architecture de la paroi dans une région «subapicale mûre» d'un hyphes de *Neurospora crassa* (Hunsley et Burnett, 1970)

- Une couche plus externe de β -1,3-glucanes et de β -1,6-glucanes amorphes.
- Réseau de glycoprotéine incorporé dans la protéine.
- Une couche de protéines plus ou moins discrète.
- Microfibrilles de chitine incorporées dans la protéine.
- Membrane plasmique.

La paroi fongique remplit plusieurs rôles importants:

- Une barrière structurale.
- Responsable de la forme cylindrique des hyphes et la forme globuleuse des levures (manière d'assemblage et de liaison des composants pariétaux).
- Protection contre le lyse osmotique (interface entre le champignon et son environnement).
- Réguler le passage des grosses molécules.
- Les parois contenant des pigments (ex. mélanine) protègent les cellules contre le rayonnement UV.
- Peut contenir des sites de liaison d'enzymes (des saccharides et de petits peptides doivent être dégradés en monomères puis traverser la membrane cellulaire).

3. La membrane plasmique

Comme dans tous les eucaryotes, la membrane plasmique fongique consiste en une bicouche phospholipidique avec des protéines transmembranaires associées. La membrane peut également ancrer certaines enzymes synthétiques de la paroi comme la chitine synthase et la glucane synthase; elles s'ancrent dans la membrane de manière à produire des chaînes polysaccharidiques à partir de la face externe de la membrane. La membrane plasmique a un troisième rôle important, dans la transmission des signaux de l'environnement externe à l'intérieur de la cellule - le processus appelé transduction du signal.

La membrane plasmique fongique contient généralement de l'**ergostérol** comme principal stérol membranaire. Celui-ci est la *cible principale de plusieurs fongicides utilisés* pour lutter contre les champignons phytopathogènes. L'ergostérol est également une cible primaire de plusieurs médicaments antifongiques utilisés pour traiter les mycoses humaines.

4. Système sécrétoire fongique: appareil de Golgi, réticulum endoplasmique et vésicules

Les champignons ont un système sécrétoire composé du réticulum endoplasmique (RE), de l'appareil de Golgi (ou de l'équivalent de Golgi) et des vésicules liées à la membrane. Les protéines, ou glycoprotéines formées à travers l'ensemble des ribosomes, RE et l'appareil de Golgi, sont emballés dans des vésicules qui bourgeonnent de la face de maturation de l'appareil de Golgi et sont transportées vers la membrane plasmique pour la sécrétion (Fig.6).

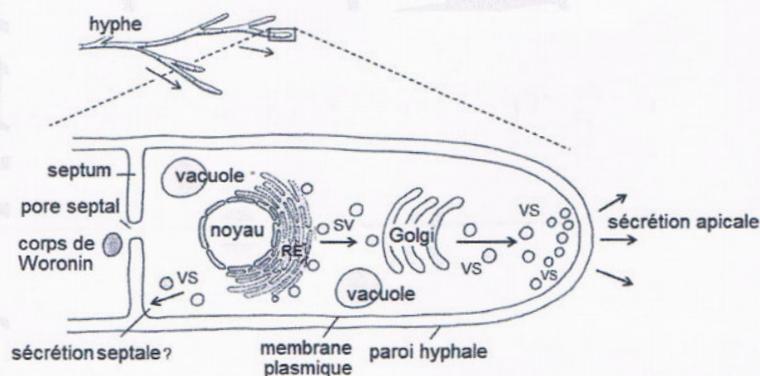


Fig.6 Représentation schématique des voies proposées pour synthèse et sécrétion de protéines (dans la zone apicale ou au niveau des septa) chez *Trichoderma reesei*. (ER: réticulum endoplasmique, VS: vésicules sécrétrices), (Nevalainen & Peterson, 2014).

Le système sécrétoire est impliqué dans au moins certains aspects de la croissance de l'apex fongique, car les glycoprotéines sont seulement produites dans l'appareil de Golgi et sont transportées dans des vésicules aux sites de croissance de la paroi. Les champignons ont un

équivalent de l'appareil de Golgi qui est ultrastructuellement très différent de l'appareil de Golgi typique - il se compose de chaînes en forme de saucisse, de perles et de boucles.

5. Chitosomes

La plupart des vésicules observées dans les extrémités des hyphes n'ont pas été chimiquement caractérisées, mais certaines plus petites souvent observées dans le sommet de l'hyphe (microvésicules) ressemblent à des particules qui ont été purifiées *in vitro* et sont appelées chitosomes: petits corps sphéroïdaux de 40 à 70 nm de diamètre, chacun entouré d'une "coquille" d'environ 7 nm d'épaisseur. Chaque particule contenant suffisamment de molécules enzymatiques pour produire, après activation protéolytique, une microfibrille de chitine composée de plusieurs chaînes de chitine.

6. Vacuoles

Le système vacuolaire des champignons a plusieurs fonctions, dont le stockage et le recyclage des métabolites cellulaires : des phosphates (par exemple polyphosphate chez les mycorrhizes), du calcium (libéré au cours de signalisation intracellulaire), des enzymes (des protéases pour décomposer les protéines cellulaires et le recyclage des acides aminés). Les vacuoles jouent également un rôle dans la régulation du pH cellulaire. Tous ces rôles physiologiques importants s'ajoutent au rôle potentiel des vacuoles dans l'expansion cellulaire et (éventuellement) dans la propulsion du protoplasme aux extrémités (Fig.7).

Les vacuoles sont souvent bien visibles dans les régions anciennes des hyphes, mais des travaux récents ont montré qu'il existe également un système tubulaire vacuolaire s'étendant dans les cellules de l'apex (Fig.7B). C'est un système extrêmement dynamique, constitué de tubules étroits qui peuvent se dilater et se contracter, à mesure que des éléments gonflés se déplacent le long d'eux de façon péristaltique, transportant les matériaux vers l'avant et vers l'arrière dans les hyphes (Fig.7C). Cela a des implications importantes pour la translocation bidirectionnelle des matériaux au sein d'un seul hyphe, et peut-être surtout pour les systèmes mycorrhiziens.

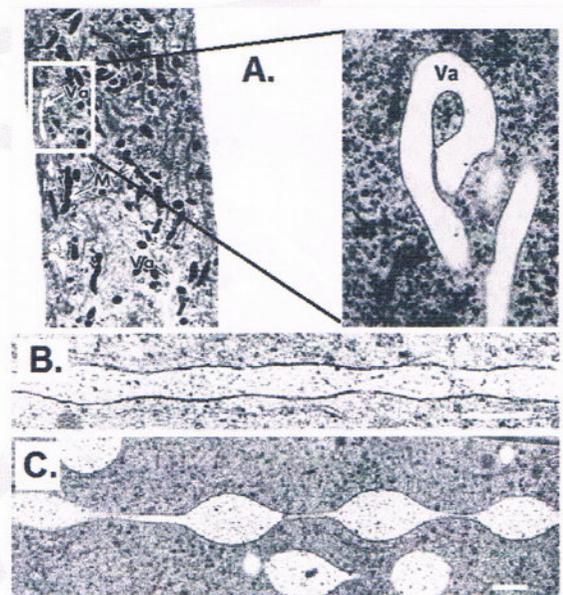


Fig.7 Micrographies électroniques de vacuoles dans un hyphe fongique. A. vacuole localisée (VA). B. vacuole tubulaire parallèle à l'axe de l'hyphe. C. vacuoles dilatées parallèle à l'axe de l'hyphe.

7. Le cytosquelette et les moteurs moléculaires

Le cytosquelette joue un rôle majeur dans l'organisation interne des cellules eucaryotes, fournissant une structure dynamique pour le transport des organelles, pour la diffusion cytoplasmique et pour la séparation des chromosomes pendant la division cellulaire. Parmi les principaux éléments du cytosquelette les microtubules, constitués de polymères de protéines de tubuline, et les microfilaments, constitués de la protéine contractile actine.

Les microtubules sont considérés comme des tubules longs et droits, d'environ 25nm de diamètre, apparaissant seuls ou en rangées parallèles. Ils sont observés principalement dans les régions périphériques de l'hyphe mais peuvent aussi s'étendre jusqu'à la membrane de l'extrémité

apicale. Les microtubules sont également associés aux organelles liées à la membrane indiquant qu'ils sont impliqués dans leurs mouvements.

Les microfilaments d'actine sont beaucoup plus étroits que les microtubules, ayant un diamètre d'environ 5 à 8nm. Ils sont connus pour fonctionner dans la contraction cytoplasmique, lorsque l'actine s'associe à sa protéine motrice, la myosine. Chez la levure *Saccharomyces cerevisiae*, les câbles d'actine jouent un rôle majeur dans la direction des vésicules sécrétoires vers les sites de croissance de la levure. L'actine pourrait jouer un rôle similaire dans la distribution des vésicules apicales aux sites de croissance des parois des extrémités hyphales.

8. Le noyau

Les noyaux fongiques sont généralement petits (1 à 2 μ m) mais ils peuvent exceptionnellement atteindre 20 à 25 μ m de diamètre (exemple *Basidiobolus ranarum*, *Chytridiomycota*). Ils sont entourés d'une membrane nucléaire double avec des pores, comme chez tous les eucaryotes. La membrane nucléaire et le nucléole restent intacts pendant la plupart des stades de la mitose. La préservation de la membrane nucléaire pourrait aider à empêcher la dispersion du contenu nucléaire dans les compartiments de l'hyphe qui contiennent plusieurs noyaux et le protoplasme qui diffuse rapidement. D'autre part les différentes étapes de la division nucléaires ne sont pas identiques à celles des cellules animales et végétales. La grande majorité des champignons sont haploïdes avec des nombres de chromosomes allant de 6 à 20. Par exemple, il existe 6 chromosomes chez *Schizophyllum commune* (Basidiomycota), 7 dans *Neurospora crassa* (Acomycota), 8 dans *Emericella (Aspergillus) nidulans* (Ascomycota), 16 chez *Saccharomyces cerevisiae* (Ascomycota) et 20 chez *Ustilago maydis* (Basidiomycota). Quelques champignons sont naturellement diploïdes (par exemple la levure *Candida albicans* et les Oomycètes). Certains champignons peuvent alterner entre les générations haploïdes et diploïdes - par ex. *S. cerevisiae* et *Allomyces* spp. (Chytridiomycota) - ou existent sous forme de séries polyploïdes (*Allomyces* et plusieurs *Phytophthora* spp.).

9. Les septa (cloisons)

Les septa (parois transversales) se trouvent à intervalles assez réguliers le long de la plupart des hyphes chez les champignons *Ascomycètes*, *Basidiomycètes* et mitosporaux (*Deutéromycètes*), bien qu'ils soient perforés pour permettre la continuité du protoplasme. Si une partie de l'hyphe est endommagée, un corps de Woronin ou un bouchon de protoplasme coagulé scelle rapidement le pore septal pour localiser les dégâts. Les champignons aseptés sont plus vulnérables aux dommages. L'un des principaux rôles des septa semble être de permettre la différenciation. En bloquant les pores septaux, l'hyphe fongique est transformé en un certain nombre de cellules ou régions indépendantes. Les *Ascomycètes* et les *Deutéromycètes* ont un septum simple avec un pore central relativement grand, allant de 0.05 à 0.5 μ m de diamètre, ce qui permet le passage des organelles cytoplasmiques et même des noyaux (Fig.8). Le développement de ces septa se produit habituellement en quelques minutes. Ils se développent comme un anneau de croissance concentrique à partir des parois latérales de l'hyphe. Les *Basidiomycètes* ont aussi des cloisons simples quand ils se développent comme monocaryons (avec un noyau dans chaque - article - cellule). Mais ils ont souvent un *septum dolipore* (dolium= tonneau) plus complexe lorsque des souches de différents groupes de compatibilité s'accouplent pour former un dicaryon, avec deux noyaux dans chaque compartiment (Fig.9). Le septum dolipore a un canal central étroit (environ 100-150nm de diamètre) délimité par deux brides de glucane amorphe. De part et d'autre de ce septum se trouvent des structures membranaires en forme de parenthèses appelées parenthésomes,

qui ont des pores pour permettre la continuité cytoplasmique mais qui empêchent le passage des organites majeurs.

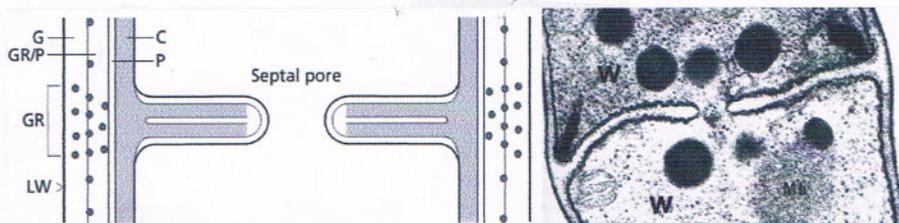


Fig.8 Structure et composition d'un septum (C- chitine, P- protéines, G- glucane , GR/P- Réticulum de glycoprotéine incorporé dans la protéine, GR- réticulum glucoprotéique, LW- Paroi latérale).

W: corps de woronin



Fig.9 Le dolipore des basidiomycètes (G- glucane, P- parenthésome).

P : parenthésome

10. Répartition des organelles dans le compartiment apical

Tous les hyphes fongiques en croissance active présentent une polarité claire dans l'arrangement des organelles du sommet des hyphes vers la base du compartiment apical. L'apex des hyphes contient surtout une grande accumulation de vésicules (à contenus différents et probablement **d'origine golgienne**) liées à la membrane. La coloration cytochimique de certaines vésicules a montré qu'elles contiennent de la **chitine synthase**.

Le rassemblement de vésicules au sommet de l'hyphe est appelée la **grappe vésiculaire apicale** (GVA). Le centre du **GVA** est constitué d'un réseau de **microfilaments d'actine**, avec des microtubules qui traversent cette zone vers l'extrémité de l'hyphe. Le GVA a été appelé **Spitzenkörper** "corps apical", qui disparaît lorsque la croissance est arrêtée et réapparaît lorsque la croissance est reprise. De plus, le Spitzenkörper se fractionne avant la formation d'une ramification, de sorte que deux extrémités sont produites à partir de l'extrémité originale.

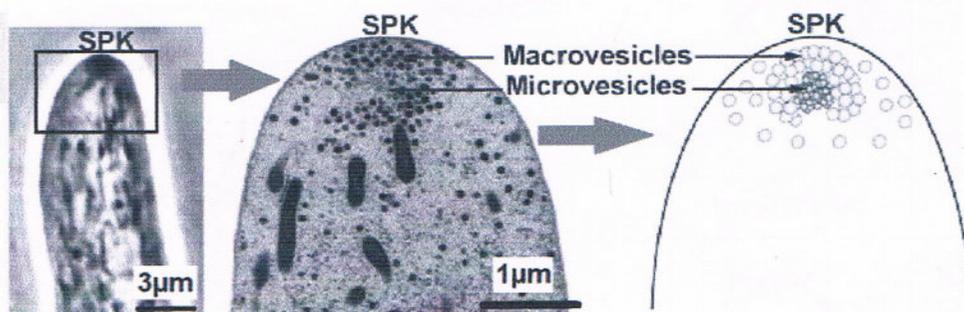


Fig.9 Organisation du dôme (apex) hyphal dans *Neurospora crassa*.(SPK : Spitzenkörper).

Derrière le sommet se trouve une petite zone contenant peu d'organites, puis une zone riche en **mitochondries** (Grâce aux actions de l'ATPase, cette zone génère la force proton-motrice (gradient de H^+ à travers la membrane cellulaire) qui stimule l'absorption des nutriments à l'apex des hyphes. Dans la zone subapicale, on observe un développement croissant d'un système de vacuoles tubulaires ramifiées.

11. La matrice extra-hyphale

Certaines levures peuvent avoir une capsule polysaccharidique distincte, et les hyphes et les levures peuvent être entourées d'une couche plus ou moins diffuse de polysaccharide ou de glycoprotéine, facilement éliminée par lavage ou traitement chimique doux. Ces substances extracellulaires peuvent jouer un rôle important dans les interactions des champignons avec d'autres organismes. Par exemple, la levure *Cryptococcus neoformans* est un pathogène important de l'homme; sa capsule de polysaccharide masque les composants antigéniques de la paroi cellulaire s'échappant ainsi des phagocytes et peut proliférer dans les tissus.

12. Les agrégations de filaments mycéliens

Les hyphes peuvent être associés par une matrice intercellulaire de nature mucilagineuse formant de faux tissus ressemblant aux tissus végétaux (plantes supérieures): les hyphes se développent indépendamment les uns des autres et les cellules d'un filament ne peuvent se diviser que dans un seul plan. Selon le degré de complexité des structures formées, on peut distinguer plusieurs formes d'associations:

- Les stromas:** ce sont des masses régulières de filaments végétatifs dans lesquelles les spores ou fructifications sont produites (Fig.10).
- Les sclérotés:** ce sont des organes formés par l'agglomération partielle ou totale des hyphes de mycélium. Ils sont différenciés en une couche externe protectrice ou les filaments sont parfois pigmentés (mélanine), et une masse centrale où les filaments sont incolores mais riches en réserves (glucides dans les parois et glycogènes, protéines et lipides cytoplasmiques). Ces organes sont des formes de résistance aux conditions défavorables chez certains champignons de sol (Fig.11).. En outre, ils permettent la propagation chez des champignons parasites (ergot du seigle, de blé...).

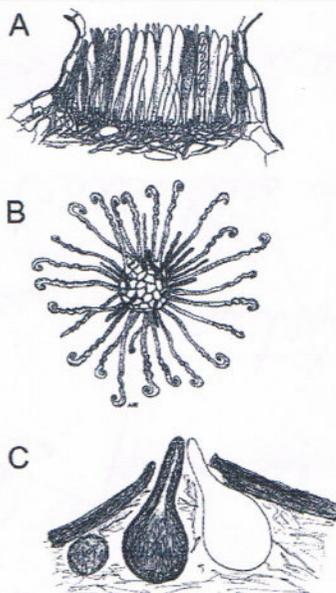


Fig.10 Structure stromatiques d'Ascomycètes ;
A- Apothecium, B- Cleistothecium,
C- Perithecium

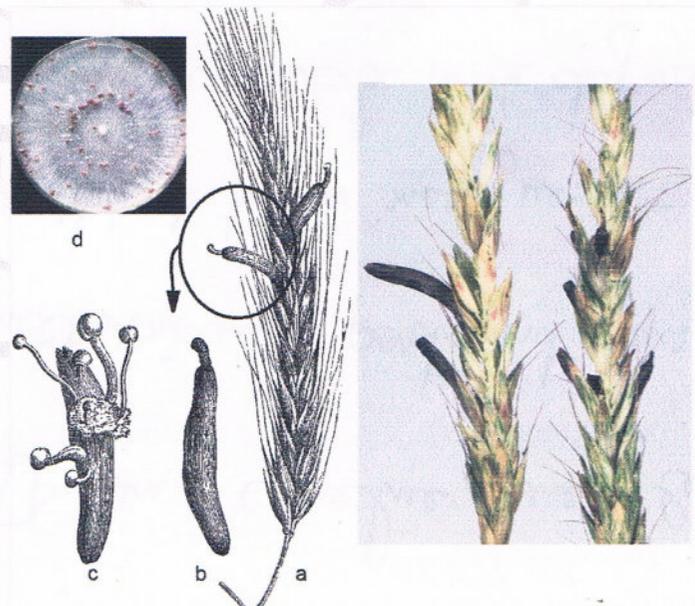


Fig.11 Sclérote du champignon *Claviceps purpurea* (a- sur épis, b- libre, c-germination). Ascomycètes (ergot du seigle). d- sclérotés sur milieu en boîte.

- c) **Cordons et rhizomorphes:** ce sont des agrégations d'hyphes parallèles. Ces structures peuvent se ramifier et s'étendre sur des distances considérables.
- d) **Les fructifications:** encore appelées carpophores, elles portent les spores au-dessus du sol. Ce sont des structures rigides souvent différenciées en pied et chapeau chez les Basidiomycètes.

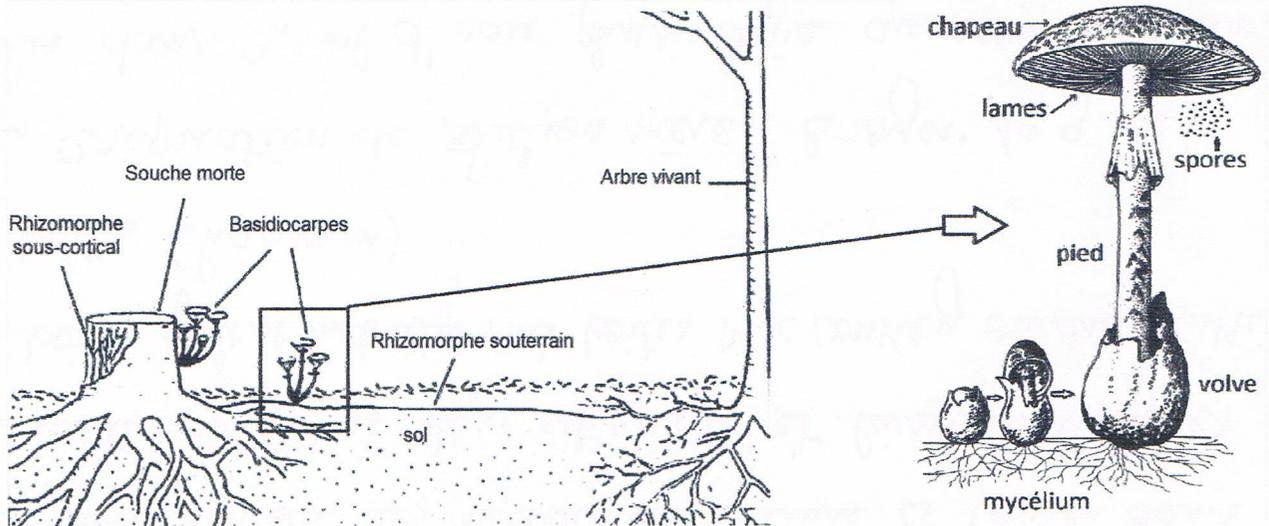


Fig.12 Cordons, rhizomorphes et basidiocarpes.

13. Croissance

La croissance débute dans la plupart des cas par la fixation d'une spore sur un substrat. La reprise des fonctions vitales permet le gonflement cellulaire, la rupture de la paroi et la sortie d'un tube germinatif qui forme le nouvel organisme (Fig.13).

La croissance des hyphes est strictement apicale. Elle met en jeu la lyse de la paroi apicale et une synthèse de nouveau matériel pariétal. Elle est plus rapide lorsque le champignon est placé dans un environnement favorable (T° , nutriments etc...) '40 $\mu\text{m}/\text{min}$ chez *N. crassa*'.

La caractéristique la plus remarquable de la croissance apicale est le rassemblement de nombreuses vésicules au niveau de l'apex. Ces vésicules disparaissent lorsque la croissance est arrêtée (même observation pour le bourgeonnement des levures). Outre les vésicules, on a remarqué la présence de vésicules plus petites constituant une masse dense, chez des Basidio- et Ascomycètes, probablement originaires du réticulum endoplasmique, le Spitzenkörper (SPK). La plupart des organites cellulaires (dictyosomes, mitochondries, nappes de RE, gouttelettes lipidiques) se répartissent dans la zone subapicale (Fig.14).

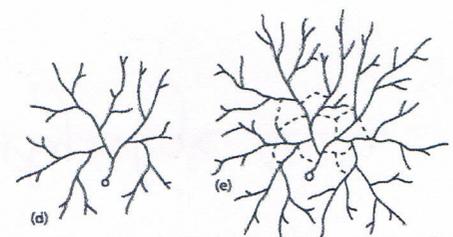
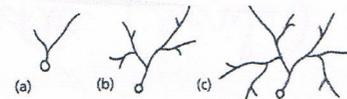


Fig. 13 Étapes du développement d'une colonie fongique à partir d'une spore en germination.

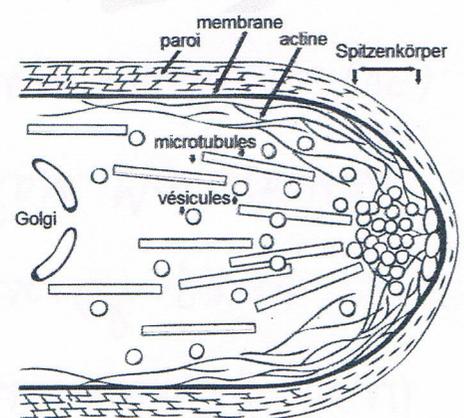


Fig. 14 Organisation de l'apex hyphal en état de croissance.

Les vésicules sont essentiellement d'origine Golgienne (dictyosomes ou nappes réticulaires chez certains champignons).

La croissance apicale du filament implique que la paroi soit malléable (moins rigide). A l'apex, la chitine est très facilement détruite par l'enzyme spécifique, la chitinase. Les **microfilaments d'actine** sont impliqués dans le phénomène de croissance par la formation d'un **réseau** située sous la membrane plasmique et dont le rôle est :

- Stabilisation de la forme de l'extrémité (contre la pression vacuolaire sur la paroi en voie de remaniement).
- Canalise la migration des vésicules vers l'apex.
- Sa propriété de contraction peut contribuer au déplacement du cytoplasme poussé par la pression vacuolaire vers l'apex.

La mise en place de la paroi définitive est réalisée en 02 étapes:

- Dépôt au sommet du dôme, par les vésicules dites chitosomes comportant des chitines synthétases, dans le périplasma, de la chitine ou un prépolymère de chitine.
- Association des polymères dans les régions plus latérales, cristallisation et établissement de liaisons.

De l'apex vers la base les propriétés mécaniques de la paroi changent, la paroi passe progressivement d'un état visco-élastique à un état rigide.

Les ramifications s'établissent au niveau d'une paroi déjà rigidifiée. Des enzymes hydrolytiques sont impliquées. Si les vésicules porteuses d'enzymes sont trop nombreuses pour être toutes utilisées à l'apex (milieu très nutritif par exemple), l'hyphe se ramifie. Un phénomène de concurrence trophique existe entre l'axe principal et les ramifications primaires puis secondaires ou tertiaires (Fig.15).

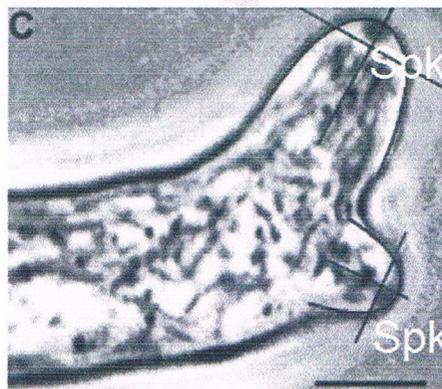


Fig. 15 Morphologie de l'hyphe à l'apex et localisation de Spk lors de la ramification apicale chez un mutant d'*A. niger* (Reynaga-Peña et al., 1997).

La formation du septum est indépendante des mitoses. Les septums sont différents des parois latérales car, seule la partie interne riche en chitine, participe à leur formation et les microfibrilles présentent une orientation concentrique par rapport au pore. Chez les basidiomycètes des nappes de réticulum sont associées à l'anneau (dolipore). Ces pores interviennent indirectement dans la croissance de l'hyphe; ils fournissent un support rigide permettant à la pression de turgescence vacuolaire de s'exercer vers l'apex (sens d'élongation).

14. Reproduction des champignons

Les champignons peuvent se multiplier par voie végétative, et se reproduire à l'aide, soit de spores (formées dans des sporocystes), soit de gamètes (mâles ou femelles formés dans des gamétocystes) que leur union ou gamie donne un zygote.

14.1. Les spores des champignons

On distingue, chez les champignons, des **spores directes** (formées sans méiose) et des **spores méiotiques** (formées avec réduction chromatique).

14.1.1 Les spores méiotiques formées avec méiose, elles sont toujours haploïdes. Les plus remarquables de ce type de spores sont celles des Ascomycètes et des Basidiomycètes (Fig.16).

14.1.2 Les spores directes permettent la multiplication directe, asexuée et hors cycle (haploïde ou diploïde). Ces diverses spores sont

- Chez les phycomycètes, des zoospores flagellées formées dans des sporocystes. (sporanges) (Fig.17A).
- Chez les zygomycètes, des spores non mobiles, tuniqueées (Fig.17B).
- Chez les Asco- et Basidiomycètes, des spores conidiennes (conidies ou conidiospores) tuniqueées et non motiles (Fig.18). Ces spores sont produites par des cellules conidiogènes appelées phialides (petit vase).

14.2. Cas particuliers

- Dans le sporocyste la sporulation et parfois remplacée par un cloisonnement en cellules sporales, qui peuvent ensuite jouer le rôle de spores. (Fig. 18A). **ex.** le genre *Syncephalis* et *Piptocephalis* de l'ordre des Mucorales des Zygomycètes
- Dans le sporocyste, la sporulation est totalement supprimée: chaque sporocyste devient tout entier un sporocyste sporal «une simple spore» (Fig. 19B). **ex.** le mildiou; *Plasmopara viticola* de l'ordre péronosporales des Phycomycètes.

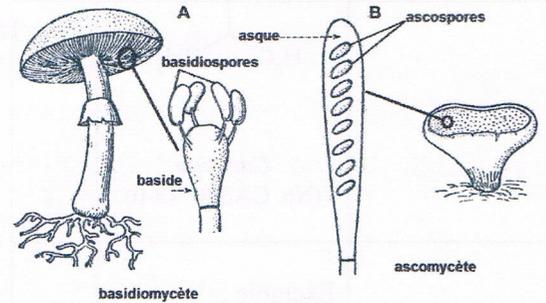


Fig. 16 Spores méiotiques ; A-basidiospores et B-ascospores.

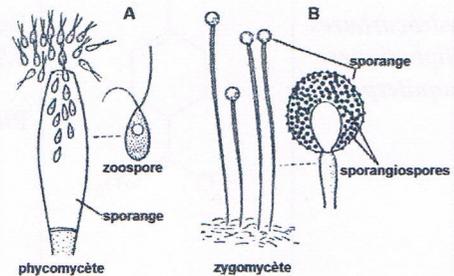


Fig. 17 Spores directes ; A- zoospores et B- sporangiospores.

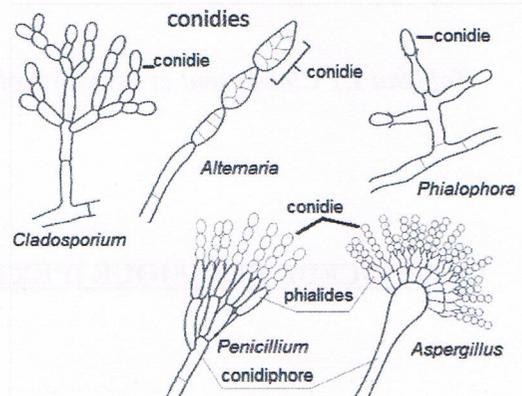


Fig. 17 Spores conidiennes

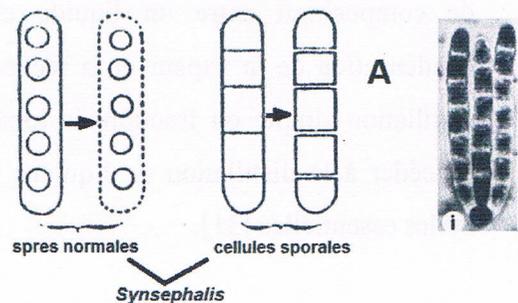


Fig. 18 merospore de *Syncephalis*.

- La germination de spores donne naissance à des spores secondaires au lieu de donner un mycélium (Fig. 19C). ex. le diplanetisme ou polyplanetisme chez des genres de l'ordre sprotégnales des Phycomycètes 'Saprolegnia'.

14.3. Les gamètes, la gamie et cycle sexué des champignons

Des champignons produisent des gamétocystes dans lesquels se distinguent les gamètes.

- Chez les phycomycètes on rencontre
 - a) La **planogamie isogame** où les gamètes mâles et femelles sont semblables et flagellés (Fig. 20a).
 - b) La **planogamie anisogame** où les gamètes des deux sexes sont flagellés mais les mâles sont plus petits que les femelles (Fig. 20b).
 - c) L'**oogamie typique** où gamètes femelles volumineux; oosphères, produits dans des oocystes (oogones), fécondés par des gamètes mâles ou spermatozoïdes, plus petits flagellés, produit dans des **spermatocystes** (Fig.20c).

- Chez certaines espèces la différenciation des gamètes dans les gamétocystes est plus ou moins supprimée (Fig. 21a).
- Chez certains Champignons les mécanismes sexuels sont très particuliers.
- Chez les ascomycètes et après la fécondation de l'ascogone, les noyaux mâles ne fusionnent pas avec les noyaux femelles. Il y a formation d'un appareil sporophytique à dicaryons (Fig. 21b).

- Chez certains phycomycètes (Chytridiales) la planogamie est devenue thallogamie.
- Chez les Zygo, Ascomycètes et Basidiomycètes, il y a souvent hétérothallisme.

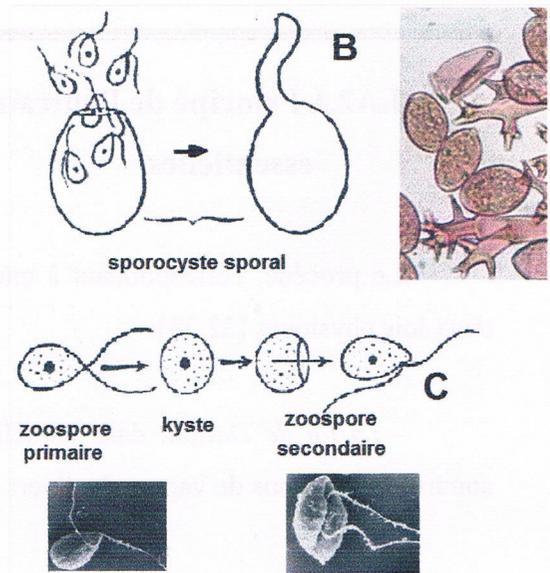


Fig. 19 diplanetisme (zoospore primaire puis secondaire).

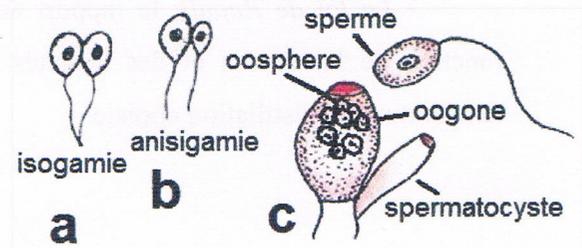


Fig. 20 Planogamie (a, b) ; oogamie typique (c)

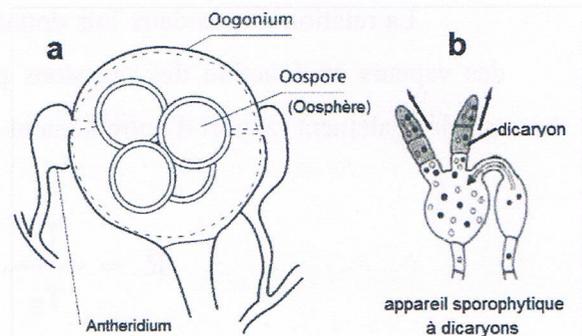


Fig. 21 Oogamie siphonogame (a); plasmogamie chez des Ascomycetes