

COURS DE MYCOLOGIE

Dr. REDOUANE-SALAH S.

Département des Sciences de la Nature et de la Vie. Université de Biskra.

Année universitaire : 2021-2022

Mycologie

Semestre :5

**Unité d'enseignement Fondamentale 1(UEF 1.5) Taxinomie microbienne
(Systématique des procaryotes)**

Matière 2(UEF 1.5.2): Mycologie, Algologie Et Virologie

Crédits : 6

Coefficient : 4

Contenu de la matière :

MYCOLOGIE :

I. caractéristiques générales des champignons (Moisissures et levures)

- **Composition chimique et structure des cellules**
- **Croissance et reproduction**
- **Culture au laboratoire et à grande échelle**

II. Classification des champignons

- **Levures**
- **Chitridomycètes**
- **Oomycètes**
- **Zygomycètes**
- **Ascomycètes**
- **Champignons imparfaits**
- **Basidiomycètes**
 - **Mycorhizes ectotrophes et endotrophes.**

III. Intérêt de l'utilisation des champignons dans : l'alimentation, l'agriculture et la sante publique

A. Agro-Alimentaire

1. Utilisation des moisissures :

- Les principales phases de la croissance des moisissures
- Exemples de cultures sur milieux solide et liquide
- Développement et différenciation
- Production de métabolites (primaires et secondaires)
- Utilisation dans l'élaboration des produits laitiers
- Les champignons comestibles

2. Utilisation des levures :

- Production de bière
- Fermentation panair

B. Industrie Pharmaceutique

Champignons producteurs de métabolites : vitamines, antibiotiques et enzymes

- Origine
- Isolement
- Extraction et purification
- Applications et utilisations thérapeutiques

IV. Aspects pathologiques

A. Chez l'Homme et l'Animal :

- Candidoses
- Dermatophytes

B. Chez le végétal :

- Champignons de stockage
- Mycotoxines

Travaux pratiques /Travaux dirigés :

TD : Caractérisation des champignons

TP : Isolement et caractérisation de quelques levures

TD : Maitrise de quelques techniques d'identification des moisissures

TP : Isolement de quelques moisissures à partir des denrées alimentaires moisiss

TD : La maitrise des microcultures

TP : Caractérisation microscopique des mycètes

Mode d'évaluation :

Examen semestriel 60% et Continu 40% (Contrôle TP + Des rapports ; Contrôle TD + des exposés + interrogations)

Référence :

1. Précis De Mycologie. Mycologie Générale, Mycologie Humaine et Animale. Techniques. Langeron, Ed. Masson.

2. Les Champignons - Mycologie Fondamentale et Appliquée. Jean Louis Guignard. Ed. Masson

Table des matières

Table des matières	Page
Introduction.....	1
Définitions de base.....	2
4. Les micromycètes.....	3
4.1. Les moisissures	3
4.2. Les levures	3
A. Levures.....	4
I. Caractéristiques générales de la levure.....	4
I.1. Caractéristiques générales de la levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	7
I.1.1. Morphologie et métabolisme de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	7
I.1.2. Composition biochimique de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	9
I.1.3. Structure des cellules et leurs compositions chimiques.....	10
I.1.3.1. La paroi.....	10
I.1.3.2. L'espace périplasmique.....	11
I.1.3.3. Membrane cytoplasmique.....	11
I.1.3.4. Le cytoplasme.....	11
I.1.3.5. Le noyau et le réticulum endoplasmique.....	11
I.1.3.6. L'appareil de Golgi.....	12
I.1.3.7. Mitochondries.....	12
I.1.3.8. Les vacuoles.....	12
I.1.3.9. Les plasmides.....	12
I.1.4. Croissance et reproduction.....	13
I.1.4.1. Bourgeonnement.....	14
I.1.4.2. La reproduction sexuée	15
I.1.5. Origine de l'isolement de différentes souches de levure	16
I.1.6. Besoins nutritionnels.....	16
II. Taxonomie de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	18
III. Intérêt de l'utilisation des levure dans l'alimentation, l'agriculture et la sante publique.....	19
III.1. Dans l'industrie agro-alimentaire.....	19
III.2. Dans l'industrie pharmaceutique.....	19
III.3. Dans le domaine de recherche.....	20
III.4. Secteurs de la recherche biomédicale.....	21
IV. Aspects pathologiques	22
A. Chez l'Homme et l'animal.....	22
B. Moisissures.....	23
I. Définition.....	23
II. Structure des moisissures.....	23
II.1. Mycélium cloisonnée ou septé	24

II.1.1. Le rôle des septa	25
II.1.2. Mycélium siphonné, non cloisonnée.....	26
III. Caractéristiques cytologiques.....	27
III.1. Noyaux.....	29
III.2. La paroi fongique.....	29
III.2.1. La structure et la chimie de la paroi fongique.....	29
III.2.2. Rôle de la paroi	32
III.3. Réserves.....	33
III.4. Vacuole.....	33
V. Modes de nutrition	35
VI. Mécanisme de croissance de l'hyphe.....	36
VII. Développement des moisissures.....	37
VII.1. Phase végétative.....	37
VII.2. Phase reproductive: comprend.....	37
VIII. Conditions de développement des moisissures.....	37
VIII.1. Facteurs environnementaux.....	37
a. Oxygène.....	37
b. Dioxyde de carbone.....	37
c. Température.....	37
d. pH	38
e. Humidité	38
f. Lumière.....	38
VIII.2. Facteurs nutritionnels.....	38
a. Besoin en carbone	38
b. Besoin en azote.....	38
c. Besoin en éléments minéraux.....	39
d. Besoin en vitamines et facteurs de croissance.....	39
e. Teneur en eau du substrat	39
IX. La reproduction chez les moisissures	39
IX.1. La reproduction asexuée	39
IX.1.1. Formation de spores asexuées (reproduction asexuée)	40
IX.1.1.1. Arthroconidies ou Arthrospores (reproduction asexuée)	40
IX.1.1.2. Chlamydospores (reproduction asexuée)	40
IX.1.1.3. Sporangiospores (reproduction asexuée)	41
IX.1.1.4. Conidiospores (reproduction asexuée)	41
IX.1.1.5. Blastospores (reproduction asexuée)	42
IX.1.2. Les types de spores.....	42
IX.1.3. Les aspects des spores.....	43

IX.1.3.1. Amérospores	43
IX.1.3.2. Didymospores (Didymos= double): spores bicellulaires (<i>Trichothecium</i>).	43
IX.1.3.3. Phragmospores.....	43
IX.1.3.4. Dictyospores.....	43
IX.1.3.5. Scolécospores.....	43
IX.1.3.6. Hélicospore.....	43
IX.1.3.7. Staurospore	43
IX.2. La reproduction sexuée	44
IX.2.1. Les étapes de la reproduction sexuée.....	45
b. La caryogamie.....	45
c. La méiose qui sera.....	45
IX.2.2. Les différents types de fécondation chez les moisissures.....	45
IX.2.3. Les différents types de spores sexuées chez les moisissures (stade zygote : pores méiotiques)..	49
IX.2.3.1. Asque.....	49
IX.2.3.2. Baside.....	50
IX.2.3.3. Zygosporés.....	50
IX.2.3.4. Oospores.....	50
IX.3. Comparaison entre spores asexuées et spores sexuées	51
IX.4. Les différents cycles de reproduction chez les moisissures.....	51
IX.5. Les différents cycles de reproduction chez les moisissures.....	52
IX.5.1. Cycle monogénétique haplophasique du Mucor.....	52
X. Classification des moisissures.....	53
X.1. Caractéristiques des différents embranchements de moisissures.....	55
XI. Importance des mycètes.....	56
XI.1. Effets bénéfiques.....	56
XI.1.1. Agro-Alimentaire.....	56
XI.1.2. Rôle écologique.....	58
XI.1.3. Industrie Pharmaceutique.....	58
XI.2. Aspects pathologiques.....	59
XI.2.1. Chez l'homme.....	59
XI.2.1.1. Réactions immunologiques.....	59
XI.2.1.2. Les aspergilloses.....	59
XI.2.1.3. Moisissures mycotoxinogènes.....	59
XI.2.2 Chez le végétal.....	61
XI.2.3. Pertes économiques.....	61
XI.2.3.1. Le premier type d'altération.....	61
XI.2.3.2. Le deuxième type d'altération.....	61

Liste des tableaux

Tableau	Page
<i>Tableau 01</i> : Propriétés principales des levures.....	5
<i>Tableau 02</i> : Proportion en % des polysaccharides de la paroi cellulaire de certaines souches de levures.	11
<i>Tableau 03</i> : Eléments essentiels requis pour la croissance et le fonctionnement des cellules des levures.....	17
<i>Tableau 04</i> : <i>Saccharomyces cerevisiae</i> : un organisme modèle de choix.....	20
<i>Tableau 05</i> : Différents domaines d'utilisation industrielle des levures.....	21
<i>Tableau 06</i> : Composition de la paroi selon les groupes systématiques.....	32
<i>Tableau 07</i> : Différence entre les spores sexuées et les spores asexuées.....	51
<i>Tableau 08</i> : Caractéristiques des différents embranchements des moisissures.....	55
<i>Tableau 09</i> : effets identifiés ou suspectés des principales mycotoxines et mécanisme d'action cellulaires et moléculaires identifiés expérimentalement sur l'homme et l'animal (AFSSA, 2006).....	60

Liste des Figures

Figure	Page
Figure 01: Production de pain et de bière en Egypte antique, tombeau de Ramsès III.....	4
Figure 02 : Structure cellulaire des levures	6
Figure 03 : Filamentation des levures. (A) : Pseudomycélium. (B) : Vrai mycélium. Barre=10µm	6
Figure 04 : Morphologie des cellules de levure et des mycéliums.....	7
Figure 05 : Levure de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , illustration 3D.....	8
Figure 06 : Population de levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i> observée au microscope optique (A) et morphologie d'une cellule observée au microscope électronique à balayage (B).....	9
Figure 07: <i>Saccharomyces cerevisiae</i> obtenue par microscope électronique à balayage	9
Figure 08: Représentation schématique de la structure de l'enveloppe cellulaire de la levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	10
Figure 09: <i>Saccharomyces cerevisiae</i> (A) et <i>Candida tropicalis</i> (B) au microscope à électronique à transmission (MET). CW : paroi cellulaire, CM: membrane cytoplasmique, CMI: invagination de la membrane cytoplasmique, V: vacuole, VM: membrane de la vacuole, N: Noyau, Nu: nucléole, NE: enveloppe nucléaire, NP: pore nucléaire, M: mitochondrie, Ves: vésicule, R: ribosome, ER: réticulum endoplasmique	13
Figure 10 : Cycle de vie de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	14
Figure 11: Cycle de vie de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	15
Figure 12: Reproduction sexuée des levures	16
Figure 13: Représentation schématique des différents domaines d'utilisation des levures.....	22
Figure 14: (a) hyphe coenocytique, (b) hyphe septé (c) image au microscope électronique, (d): septum multiperforé	24
Figure 15: Structure de l'hyphe.....	25
Figure 16: Structure cytologique de l'hyphe.....	27
Figure 17: Structure des crêtes mitochondriales.....	28
Figure 18: Schéma de la structure de la paroi fongique.....	30
Figure 19: Polysaccharides majeurs de la paroi fongique.....	31
Figure 20: Moisissures saprophytes.....	33
Figure 21: Zone nécrosées (Moisissures).....	34
Figure 22: Rouille de blé et charbon du maïs.....	34
Figure 23: Formation d'un suçoir intracellulaire.....	35
Figure 24: Croissance apicale des filaments mycéliens.....	36
Figure 25 : Arthrospores.....	40

Figure 26: Chlamydospores.....	40
Figure 27: Sporangiospores.....	41
Figure 28 : Conidiospores.....	41
Figure 29: Blastospores.....	42
Figure 30: Les endospores et les exospores.....	43
Figure 31 : Différents aspects des spores.....	44
Figure 32 : Représentation les étapes de la reproduction sexuée et celles de la reproduction asexuée chez les champignons.....	45
Figure 33: Fécondation en deux étapes, séparée par une phase dicaryotique.....	46
Figure 34 : Différents types de fécondation chez les moisissures.....	47
Figure 35 : Siphonogamie.....	78
Figure 36: Périttogamie.....	49
Figure 37 : Ascospores.....	49
Figure 38 : Ascospores.....	50
Figure 39 : Cycle monogénétique haplophasique.....	52
Figure 40 : Classification du règne fongique.....	53
Figure 41: Evolution des champignons (arbre des différents groupes).....	54
Figure 42: Des champignons bio-pesticides : des champignons attaquant les téguments respiratoires et dont le développement mycélien obstrue les canaux respiratoires.....	58
Figure 43: Champignons et homme: amis-ennemis.....	62

Introduction :

Le présent document, destiné aux étudiants de 3^{ème} année Licence-spécialité : Microbiologie, traite l'un des plus vastes domaines des sciences de la nature et de la vie, **la mycologie.**

Le document aborde successivement deux grands axes :

- 1. les levures**, ou champignons microscopiques unicellulaires et ;
- 2. les moisissures**, ou champignons microscopiques pluricellulaires.

Dans le premier, ont été abordées les principales caractéristiques et propriétés des levures, leur classification actuelle, et enfin leur intérêt dans les différents secteurs.

Dans le second, nous avons détaillé plusieurs aspects relevant des moisissures : caractéristiques principales, mode de reproduction, et leur intérêt biologiques et industriels.

Un des buts pour ce document simple est de rendre cette discipline plus accessible aux étudiants. Pour y parvenir, il a été richement illustré par des figures et tableaux explicatifs.

Définitions de base

La connaissance des termes scientifiques de base est indispensable pour la compréhension de la mycologie. Seront présentées ci-dessous quelques définitions de base.

1. Mycologie : science qui étudie les champignons ou Science consacrée à l'étude des champignons. Elle comprend des étapes fondamentales qui sont : la taxonomie, la systématique et la nomenclature pour aboutir à un canevas général de la classification des champignons.

2. Mycologues : les scientifiques, qui étudient les champignons.

3. Champignons : champignons = mycophytes = mycètes = fungus.

Du grec **MUKES** : Champignon Une contraction de deux mots: **Funus** qui veut dire funérailles et **Ago** qui veut dire produire (pour rappeler les décès produits par les champignons à l'époque Romaine.

Une autre origine est possible **fungus** du grec **spongos** = spongieux, pour rappeler l'aspect spongieux des champignons.

Les champignons se distinguent des plantes et des algues par l'absence de chloroplastes et des animaux par la présence de parois cellulaires. Ce ne sont ni végétaux, ni animaux. Ils forment un règne à part parmi le domaine des eucaryotes.

Les champignons sont **des organismes :**

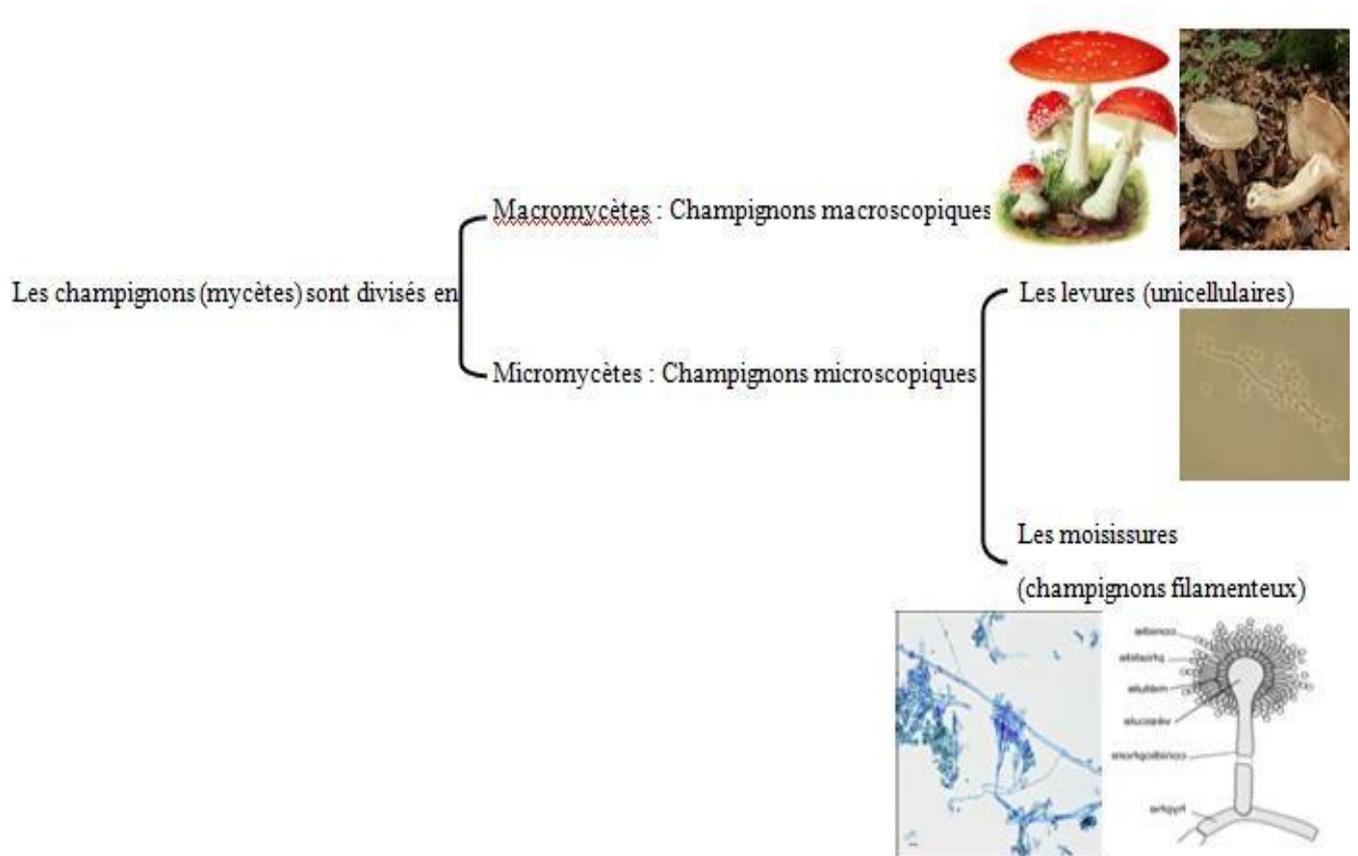
- **Thallophytes :** (Thalle = appareil végétatif organisation cellulaire = qui ne possèdent pas de vrai tissu différencié). Il y a deux types de thalle :

* Thalle unicellulaire (levure),

* Thalle pluricellulaire (mycélium).

- **Eucaryotes** = possédant des noyaux individualisés pourvus d'une membrane nucléaire, de chromosomes, d'un nucléole et d'une mitochondrie.

- **Hétérotrophes :** sans plastides et sans pigments photosynthétiques.



4. Les micromycètes: Les micromycètes sont des champignons microscopiques regroupant les levures et les champignons filamenteux (moisissures).

4.1. Les moisissures sont des champignons microscopiques formant le groupe des hyphomycètes et regroupant des milliers d'espèces. Elles sont formées de nombreux filaments minces et enchevêtrés.

4.2. Les levures ont une taille généralement comprise entre 10 et 50 μm . Leur forme peut être sphérique, ovoïde, allongée, cylindrique... Leur thalle est dit lévuriforme.

A. Levures

Le terme « **levure** » vient du latin « *levare* », faisant référence à la capacité de faire lever le pain en produisant du CO₂ en conditions anaérobiques et de fermenter le sucre. Des représentations graphiques des modes de production de pain et de bière ont été retrouvées sur des tombeaux tels que celui de Ramsès III (Figure 01). Dans les tombes, la présence de restes de miches de pain confirme ces productions il y a plusieurs millénaires.

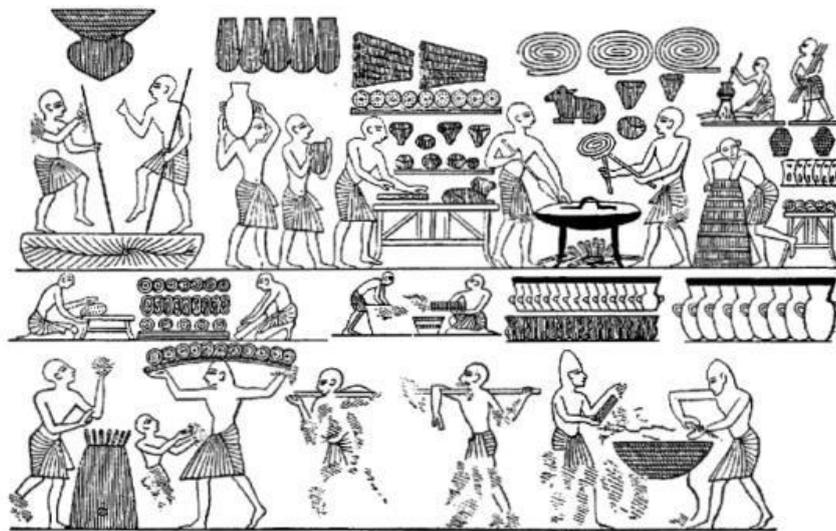


Figure 01: Production de pain et de bière en Egypte antique, tombeau de Ramsès III.

I. Caractéristiques générales de la levure

Les levures sont des champignons microscopiques unicellulaires eucaryotes. Les cellules sont généralement ovoïdes ou sphériques, parfois cylindriques, allongées, apiculées ou de formes plus spécifiques : ogivales (genre *Dekkera*), en forme de bouteille (genre *Pityrosporum* (= *Malassezia*)), triangulaires (*Trigonopsis*) ou en forme de citron (*Hanseniaspora*), (Tableau 01). Néanmoins, de nombreuses espèces sont capables de former un pseudomycélium comme l'espèce *Candida albicans*, voir un véritable mycélium comme l'espèce *Lindnera bimundalis* *Candida ontarioensis* (figure 02, 03 et 04).

Les levures sont de grande taille par rapport aux bactéries ce qui rend possible l'examen direct, Leur taille est d'environ 20 µm en longueur et de 1 à 10 µm en largeur.

Tableau 01: Propriétés principales des levures.

Propriétés des levures	
Forme	<ul style="list-style-type: none"> • Suivant les espèces : sphériques, ovoïdes, allongées, cylindriques, apiculées, ogivales, en forme de citron..... • Cellules de 20 à 50 µm de longueur et de 1 à 10 µm de largeur.
Croissance	<ul style="list-style-type: none"> • Source de carbone, source d'azote organique, sels minéraux. • Exigent des vitamines.
Métabolisme	<ul style="list-style-type: none"> • Beaucoup de levures ne fermentent pas le sucre. • Nombreuses espèces lipolytiques.
Caractère particulier	<ul style="list-style-type: none"> • Production de pigment jaune ou rouge.
Multiplication végétative et reproduction	<ul style="list-style-type: none"> • Multiplication végétative : par bourgeonnement (mode de reproduction le plus courant). • Reproduction sexuée : en condition défavorables
Température (facteur physicochimique pour la croissance des levures)	<ul style="list-style-type: none"> • En générale de 20 à 25 °C, mais espèce thermophiles, psychrophiles à +1°C ou psychrotrophes.
pH (facteur physicochimique pour la croissance des levures)	<ul style="list-style-type: none"> • Optimum de pH entre 4.5 et 6.5, mais croissance à pH 7.8. • Beaucoup d'espèces pouvant croître à pH 3, voir même à pH 1.5
Aw et pression osmotique (facteur physicochimique pour la croissance des levures)	<ul style="list-style-type: none"> • Aw compris entre 0.62 et 0.93. • Espèces osmophiles

Les levures sont ubiquitaires, capables de vivre dans presque tous les écosystèmes existants (sol, l'eau, l'air, sur les plantes et même à l'intérieur d'organismes vivants), certaines levures ont été isolées à partir d'environnements extrêmes comme l'antarctique. D'autres vivent sur les végétaux riches en sucres directement assimilables, comme les fleurs et les fruits, qui constituent leurs principales sources de carbone.

Actuellement, le nombre d'espèces de levure déjà identifiées n'est estimé qu'à seulement 1% de celles existantes dans la nature.

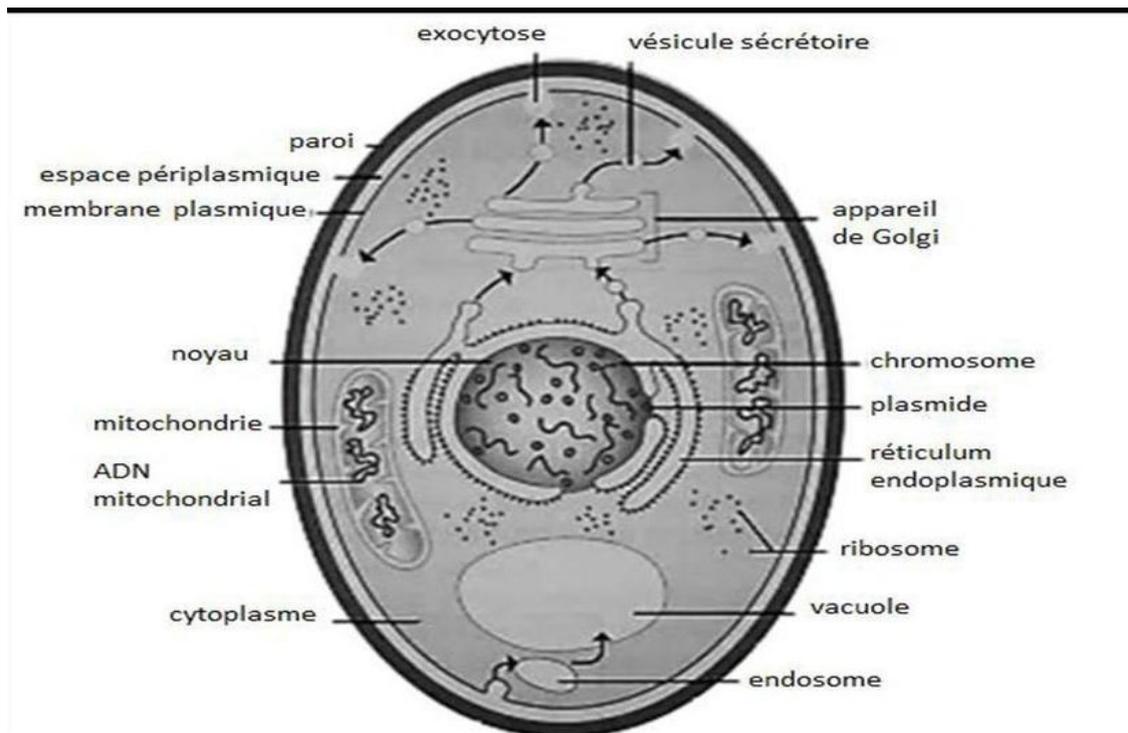


Figure 02 : Structure cellulaire des levures.

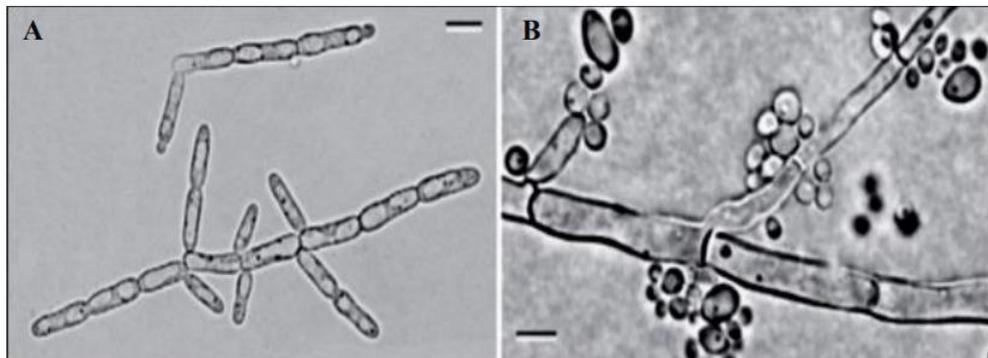


Figure 03 : Filamentation des levures. (A) : Pseudomycélium. (B) : Vrai mycélium. Barre=10µm.

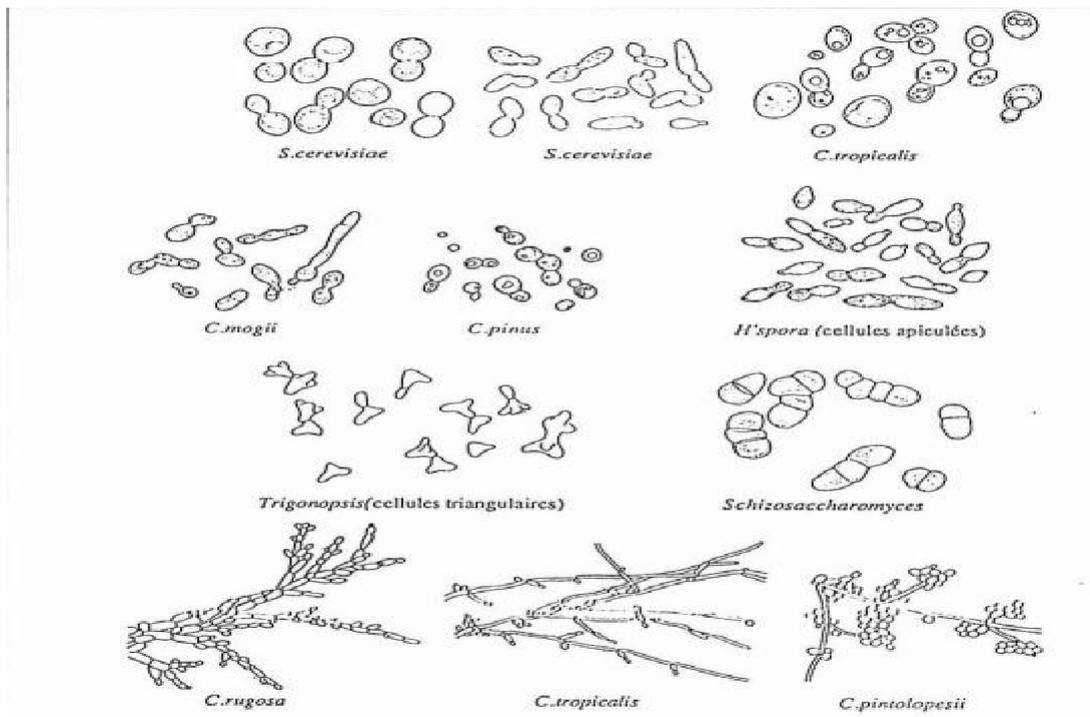


Figure 04 : Morphologie des cellules de levure et des mycéliums.

I.1. Caractéristiques générales de la levure *Saccharomyces cerevisiae*

Il en existe plusieurs espèces de levure. La plus connue s'appelle *Saccharomyces cerevisiae* (du latin « saccharo » : sucre, « myces » : champignon et « cerevisiae » : « bière ou brasserie » en latin). Dans le langage courant, on parle le plus souvent de « levure de bière » ou de « levure de boulangerie » mais elles peuvent également prendre le nom de « levure bourgeon », de par leur mode de reproduction.

I.1.1. Morphologie et métabolisme de *Saccharomyces cerevisiae*

La levure *Saccharomyces cerevisiae* est reconnue par sa forme ovoïde à arrondie (phase stationnaire), (figure 05, 06 et 07). La taille de la levure peut être variable de 1 à 10 μm en fonction de la composition nutritive de son milieu. La figure 4 représente la morphologie de *Saccharomyces cerevisiae* sous microscope.

Saccharomyces cerevisiae est capable de suivre deux voies métaboliques

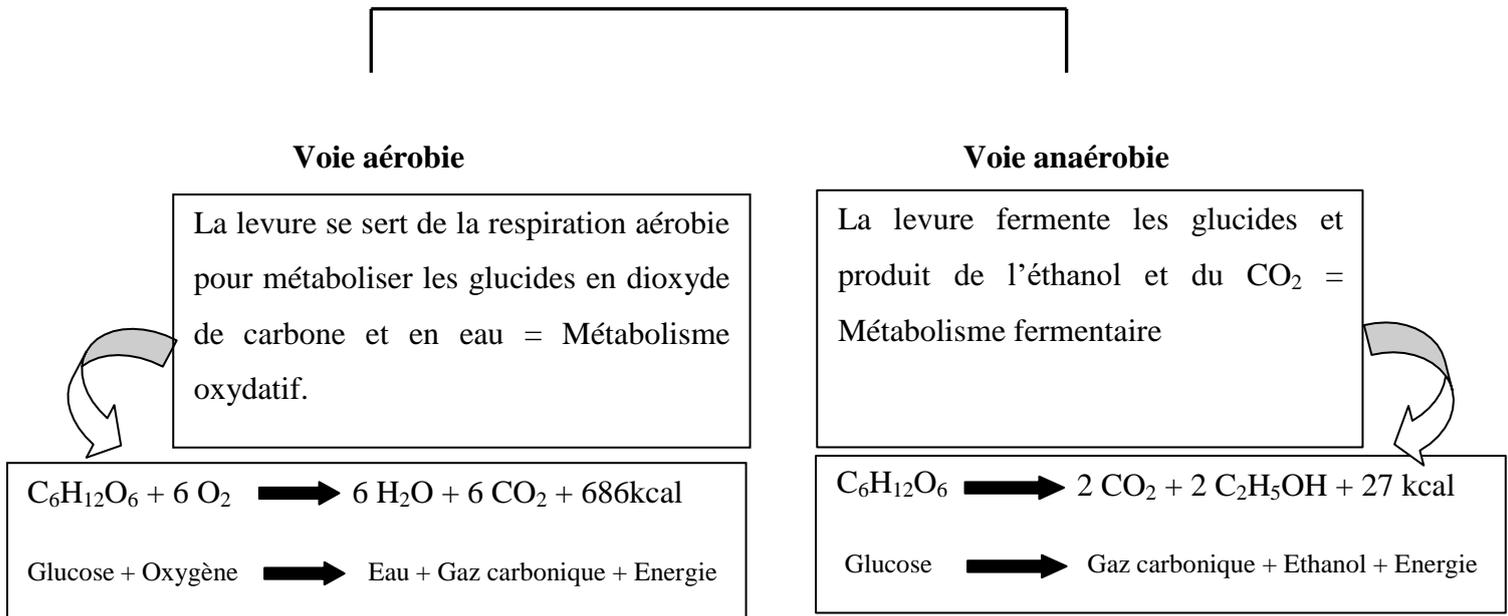


Figure 05 : Levure de *Saccharomyces cerevisiae*, illustration 3D.

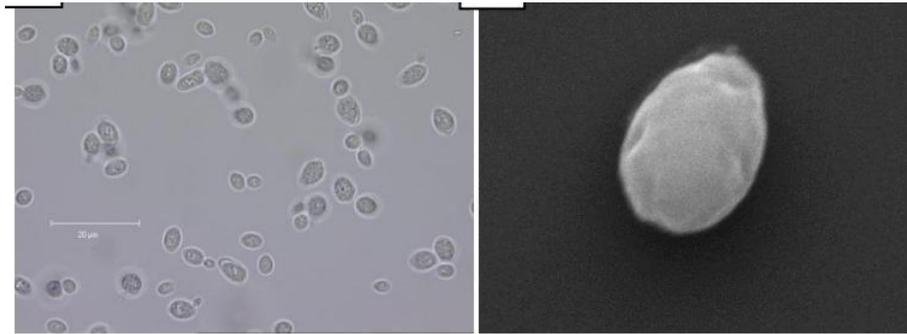


Figure 06 : Population de levure *Saccharomyces cerevisiae* observée au microscope optique (A) et morphologie d'une cellule observée au microscope électronique à balayage (B).

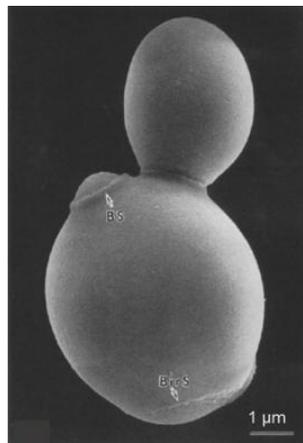


Figure 07: *Saccharomyces cerevisiae* obtenue par microscope électronique à balayage.

1.1.2. Composition biochimique de *Saccharomyces cerevisiae*

La composition biochimique de *S. cerevisiae* repose essentiellement sur les protéines, les lipides, les hydrates de carbone et les acides nucléiques. *S. cerevisiae* utilise plusieurs éléments, en faibles quantités, indispensables à son métabolisme tels que l'azote, le soufre, le phosphore, certains acides aminés, des vitamines et des oligo-éléments affectant ainsi les capacités fermentaires et la croissance de la levure.

I.1.3. Structure des cellules et leurs compositions chimiques

La structure cellulaire de *Saccharomyces cerevisiae* comprend :

I.1.3.1. La paroi : *Saccharomyces cerevisiae*, possède une paroi épaisse qui englobe toute la cellule, en lui conférant sa rigidité et sa forme caractéristique. Cette structure joue un rôle important en maintenant une structure élastique qui assure une protection osmotique et constitue une barrière physique.

Cette paroi se compose (figure 08) :

- d'une couche externe de mannoprotéines, associés à des glucanes
- d'une couche interne de glucanes associés à de la chitine
- d'une membrane cytoplasmique riche en complexes protéiques.

La paroi cellulaire compte pour 15-20% du poids sec de la cellule de levure (Tableau 02).

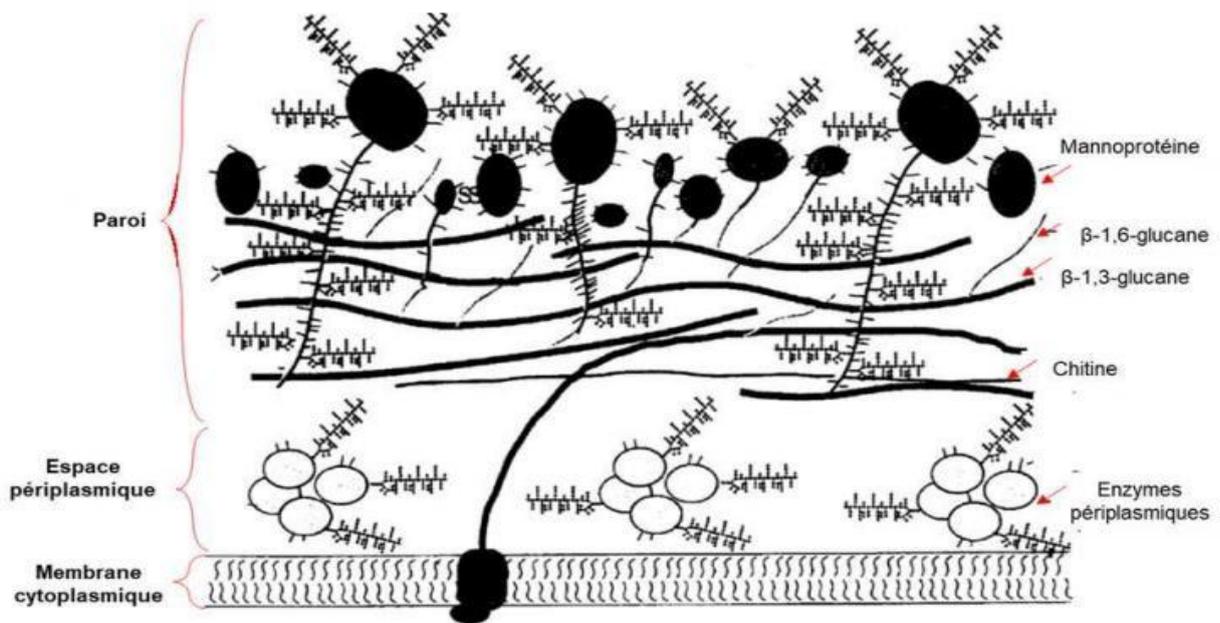


Figure 08: Représentation schématique de la structure de l'enveloppe cellulaire de la levure *Saccharomyces cerevisiae*.

Tableau 02 : Proportion en % des polysaccharides de la paroi cellulaire de certaines souches de levures.

Espèce de levure	Glucanes alcalinosolubles	Glucanes alcalinoinsolubles	Chitine	Mannoprotéines
<i>K.marxianus</i> R157	10.0±4.2	40.6±5.4	4.1±0.4	34.1±4.1
<i>K.marxianus</i> 1586	48.0±3.1	18.5±1.2	1.1±0.1	25.6±3.5
<i>S.cerevisiae</i>	33.5±4.1	37.3±3.0	3.4±0.3	24.4±3.5

I.1.3.2. L'espace périplasmique

C'est l'espace délimité par la membrane plasmique et la couche interne de la paroi et représente le site de localisation cellulaire des enzymes telles que l'invertase, la phosphatase acide, les β -galactosidase et des protéases.

I.1.3.3. Membrane cytoplasmique

Chez *Saccharomyces cerevisiae*, la membrane cytoplasmique referme 45% de lipides (dont 39% de phospholipides et 6% de stérols), 49% de protéines et 6% de glucides et acides nucléiques.

C'est une membrane simple et fragile qui se trouve sous la paroi avec une épaisseur de 7.5 nm, résistante aux pH acides mais altérée par des pH alcalins.

I.1.3.4. Le cytoplasme

Renferme des organites cellulaires tels que les mitochondries, l'appareil de Golgi, des vacuoles et des ribosomes. Il contient aussi des enzymes, surtout celles de la glycolyse et de la fermentation alcoolique, des polysaccharides, des polyphosphates du glycogène et du tréhalose.

I.1.3.5. Le noyau et le réticulum endoplasmique

Saccharomyces cerevisiae possède un seul noyau, entouré d'une enveloppe à deux membranes, la membrane nucléaire interne qui limite le noyau, lui-même et la membrane externe qui est en relation continue avec un système membranaire cytoplasmique important et le en de multiples endroits.

Plusieurs processus métaboliques ont lieu dans le réticulum endoplasmique : synthèse des lipides, détoxification des cellules, entreposage du calcium.

Cours de Mycologie

Le noyau contient le génome de la levure, celui-ci est réparti sur les chromosomes (16 chez *Saccharomyces cerevisiae* haploïde). Chez cette dernière, le génome comporte environ 12.5 millions de paire de bases (Figure 09).

Le noyau est mis en évidence *in vitro* par des colorants tels que la fushine et l'observation au microscope optique.

Le nucléole est un territoire nucléaire spécialisé dans la synthèse des pré-ribosomes, mais n'est pas séparé du nucléoplasme par aucune membrane et n'est donc pas un organe.

I.1.3.6. L'appareil de Golgi

Il est constitué par de nombreux saccules aplatis limités par une membrane monocouche lisse (Figure 09). C'est dans l'appareil de Golgi que s'effectuent de multiples modifications post traductionnelles des protéines en particulier les réactions de glycosylation.

I.1.3.7. Mitochondries

Possède une enveloppe à double membrane. La membrane externe sépare la mitochondrie du cytosol et la membrane interne, dont la surface est considérable, est le siège des protéines transmembranaires catalysant la chaîne respiratoire (Figure 09).

I.1.3.8. Les vacuoles

Le nombre de vacuoles et leur taille est fonction de l'âge des cellules, les vacuoles sont entourées d'une membrane monocouche et sont constituées de phospholipides, stérols et protéines. Les vacuoles sont en outre le lieu de stockage de plus de 90% des acides aminés basique cellulaire (Figure 09).

I.1.3.9. Les plasmides

Le plasmide est un élément extra chromosomique, présent dans presque toutes les souches de *Saccharomyces*, ce plasmide à DNA en double brin est une molécule cyclique de 6 kpb.

Certaines espèces de levures parmi lesquelles des *Saccharomyces* secrètent des protéines toxiques : les killers. Ces protéines tuent les levures sensibles, leur synthèse est codée par des plasmides à RNA présent dans le cytoplasme des souches killer.

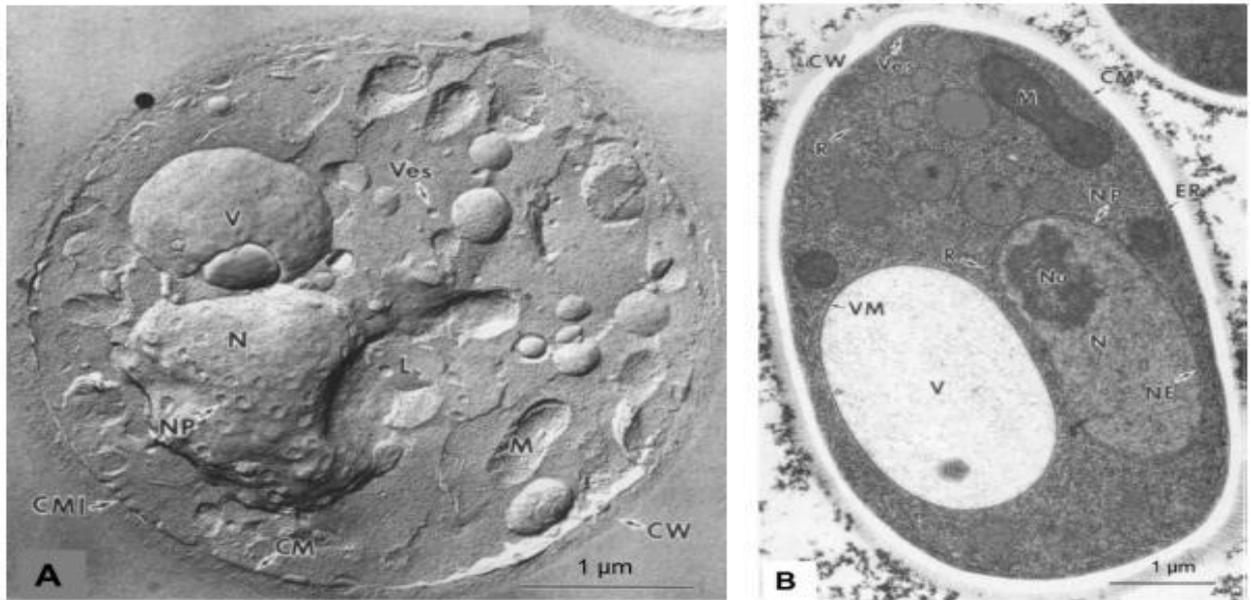


Figure 09: *Saccharomyces cerevisiae*(A) et *Candida tropicalis* (B) au microscope à électronique à transmission (MET). CW : paroi cellulaire, CM: membrane cytoplasmique, CMI: invagination de la membrane cytoplasmique, V: vacuole, VM: membrane de la vacuole, N: Noyau, Nu: nucléole, NE: enveloppe nucléaire, NP: pore nucléaire, M: mitochondrie, Ves: vésicule, R: ribosome, ER: réticulum endoplasmique.

I.1.4. Croissance et reproduction

La reproduction chez *Saccharomyces cerevisiae* se caractérise par la coexistence fréquente des reproductions sexuée et végétative dans le même organisme (Figure 10). La reproduction végétative se déroule généralement par bourgeonnement quand les conditions sont favorables. La présence de nutriments en quantité suffisante favorise la poursuite de la croissance végétative. Cette division cellulaire est asymétrique. Ce sont les conditions du milieu qui déterminent si la cellule, haploïde ou diploïde, poursuit sa prolifération végétative ou accède à un autre stade de son cycle vital.

Les cellules sont haploïdes lorsque les chromosomes qu'elles contiennent sont chacun en un seul exemplaire (n chromosomes). Au contraire, les cellules avec des chromosomes en double exemplaire ($2n$ chromosomes) sont diploïdes.

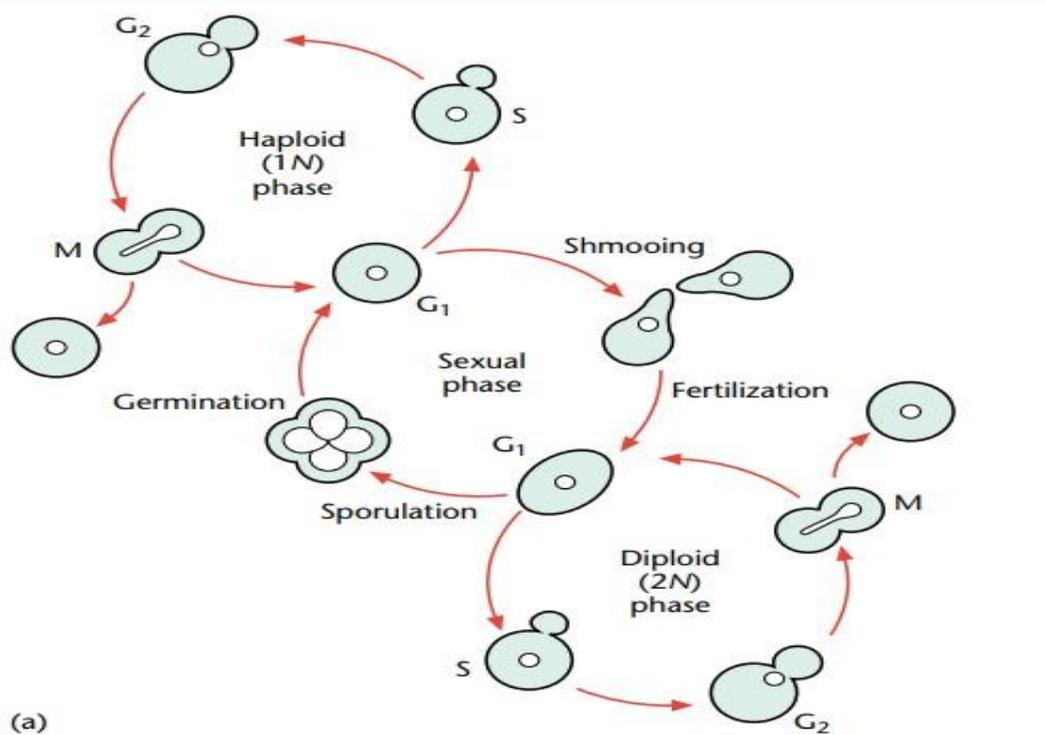


Figure 10 : Cycle de vie de *Saccharomyces cerevisiae*.

I.1.4.1. Bourgeonnement

Lors d'un bourgeonnement (mode holoblastique), le noyau migre en périphérie, s'infiltré dans un point végétatif (bourgeon) et se sépare de la cellule mère en y laissant une cicatrice sous la forme d'un petit cratère, au niveau duquel les échanges avec le milieu extérieur sont inhibés, et d'une cicatrice de naissance sur le bourgeon. En fait, il semble que la cellule ne puisse réaliser plus de 25 bourgeonnements car, au delà, elle meurt par manque d'échanges avec le milieu. La cellule fille ou le bourgeon est plus petit à l'issue de la division, d'où une période de croissance plus longue avant qu'il ne produise lui-même un nouveau bourgeon (Figure 11).

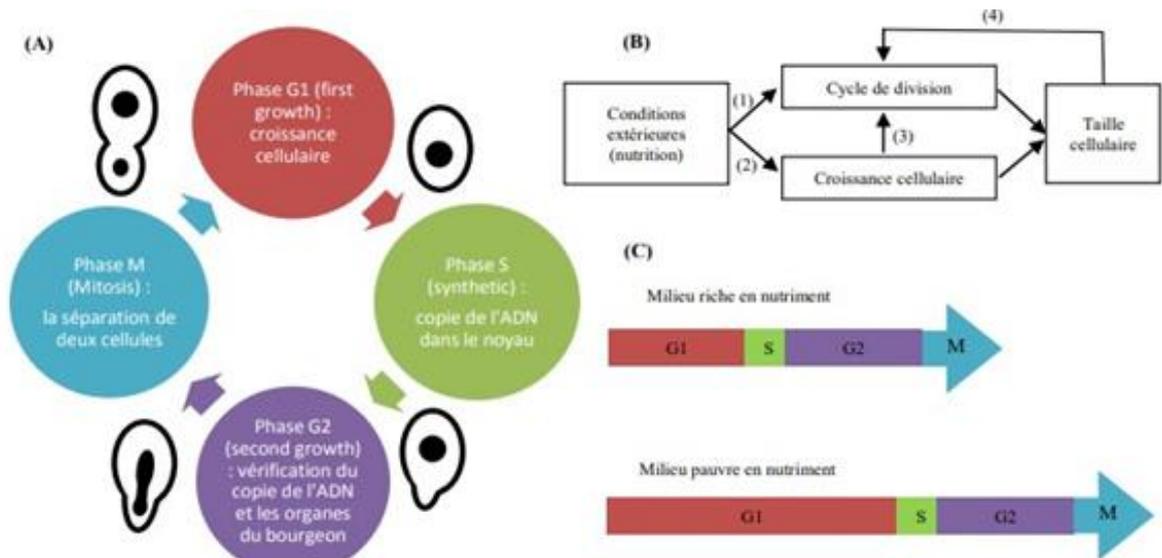


Figure 11: Cycle de vie de *Saccharomyces cerevisiae*.

I.1.4.2. La reproduction sexuée

Dans un milieu défavorable (riche en acétate, pauvre en nutriments, températures extrêmes...), la cellule diploïde de levure va sporuler c'est à dire produire 4 ou 8 cellules haploïdes, nommées «ascospores», qui resteront en vie ralentie. Si les conditions du milieu redeviennent favorables, les spores sont libérées, [les haploïdes (MAT a ou α) émettent des phéromones (facteur a ou α) qui sont détectées par les cellules de type sexuel opposé grâce à des récepteurs spécifiques], vont germer, croître et commencer un nouveau cycle de multiplication végétative sous la forme haploïde ou diploïde (Figure 12).

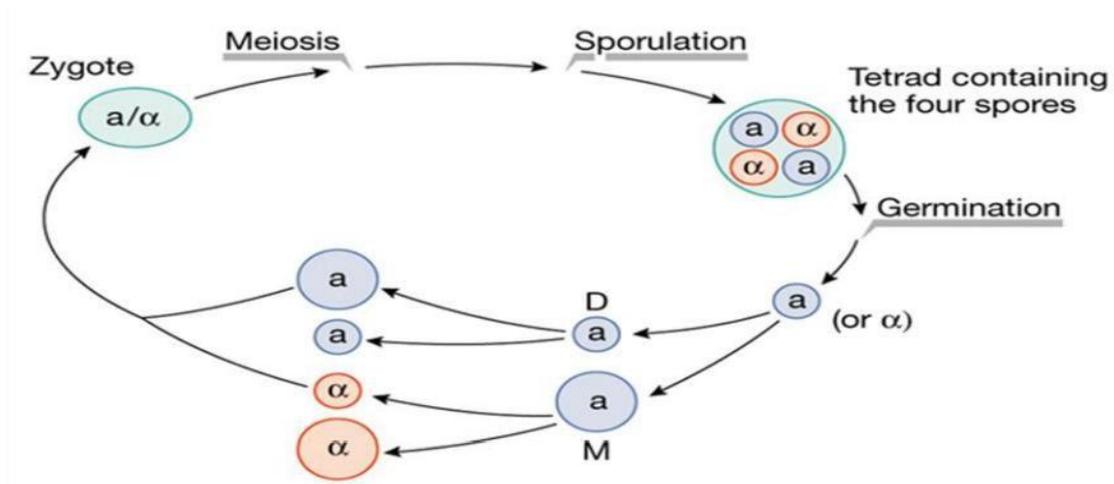


Figure 12: Reproduction sexuée des levures .

I.1.5. Origine de l'isolement de différentes souches de levure

Les souches de l'espèce *Saccharomyces cerevisiae* peuvent être isolées depuis plusieurs origines, telles que le sol, les fruits (raisins), la sève des arbres, etc., et présentent des propriétés physiologiques différentes. Cette diversité indique leur capacité d'adaptation dans les conditions différentes de l'environnement.

I.1.6. Besoins nutritionnels

La croissance est une période d'interactions entre la cellule et l'environnement qui apporte les éléments nécessaires et qui est modifié par le métabolisme des cellules. Le milieu doit apporter ce qui compose la biomasse des levures, c'est à dire : $CH_{1.72} O_{0.44} N_{0.15}$ pour *Saccharomyces cerevisiae* + 10 % de cendres.

Outre les conditions de température (entre 25 °C et 30 °C) et de pH adéquates (de 2,4 à 8,6), les levures requièrent pour leur croissance une source énergétique carbonée et d'autres composés tels que, par ordre d'importance décroissant, l'azote minéral ou organique, le phosphore et le soufre et d'autres minéraux et de vitamines. Les substances nécessaires à la croissance des levures se répartissent entre macronutriments et micronutriments (Tableau 03).

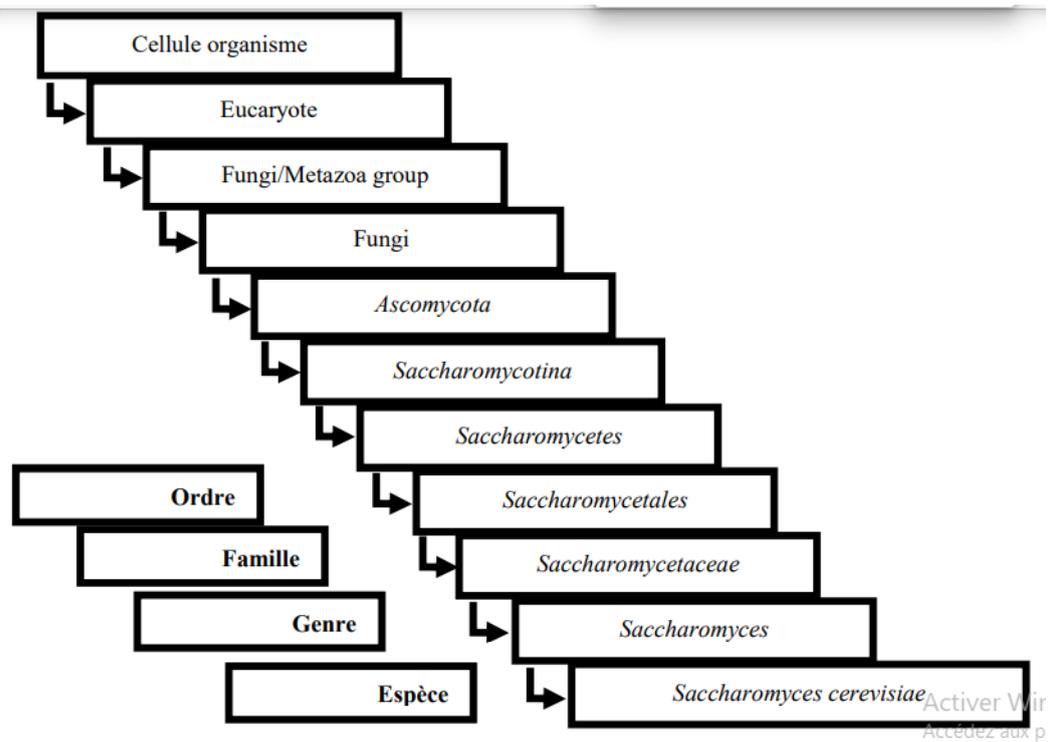
Tableau 03: Eléments essentiels requis pour la croissance et le fonctionnement des cellules des levures.

Elément	Source	Fonction cellulaire
Carbone	Sucres principalement monosaccharides ou disaccharides	Elément structurale en combinaison avec O, H et N ; source d'énergie
Oxygène	Air, O ₂	Oxydant de la chaine respiratoire et autres réactions enzymatiques oxydative ; essentiel à la biosynthèse de l'ergostérol et des acides gras insaturés
Azote	Sels d'ammonium, urée, acides aminés, peptone, extrait de levure	Composants des protéines, des acides nucléiques et de la chitine
Phosphore	phosphates	Acides nucléiques, phospholipides membranaires, transduction d'énergie
Soufre	Sulfates, méthionine	Acides aminés soufrés et vitamines
Hydrogène	Hydrates de carbone, protons de l'environnement acide	Force proton motrice nécessaire pour la nutrition, régulation du pH intracellulaire nécessaire au métabolisme
Potassium	Sels de potassium	Equilibre ioniques, activité enzymatique
Magnésium	Sels de magnésium	Activité enzymatique et structure des organites
Calcium	Sels de calcium	Transduction du signale
Cuivre	Sels de cuivre	Oxydant
Fer	Sels de fer	Cytochromes et protéines hémiques
Manganèse	Sels de manganèse	Activité enzymatique
Zinc	Sels de zinc	Activité enzymatique
Nickel	Sels de nickel	Activité enzymatique (uréase)
Molybdène	Sels de molybdène	Métabolisme du nitrate, vitamine B12

II. Taxonomie de *Saccharomyces cerevisiae*

A l'heure actuelle la levure *Saccharomyces cerevisiae* appartient à :

Hiéarchie taxonomique de la levure *Saccharomyces cerevisiae*



III. Intérêt de l'utilisation des levures dans l'alimentation, l'agriculture et la santé publique

Les levures, suivant les genres et les espèces, peuvent être utiles ou nuisibles à l'homme dans la fabrication des aliments fermentés (produits végétaux, boissons alcoolisées, produits laitiers, produits carnés), dans la production de biomasse protéiques ; certaines levures sont pathogènes pour l'homme ou pour les animaux. Quelques exemples de ces applications sont proposés.

III.1. Dans l'industrie agro-alimentaire

- Fabrication de pâtes levées et de pain (*Saccharomyces cerevisiae*).
- Fabrication de boissons alcoolisées (*Saccharomyces cerevisiae*).
- Fabrication de fromage tel que le cantal, le laguiole (souches de *Candida*, *Torulopsis*, *Kluyveromyces*).
- Production de probiotiques : Les probiotiques sont des concentrés de levures sèches (*Saccharomyces cerevisiae*) utilisés dans l'alimentation animale comme apports de nutriments favorables : les levures libèrent des vitamines, des acides aminés et des peptides qui permettent de renforcer la protection de la flore intestinale, de normaliser le transit et de stimuler l'immunité intestinale renforçant ainsi les défenses naturelles des animaux ; les probiotiques permettent ainsi d'obtenir un meilleur rendement de la production laitière, de réduire significativement les pertes de poids des animaux, d'augmenter significativement le taux de croissance des portées.

III.2. Dans l'industrie pharmaceutique

- Fabrication d'éthanol : C'est un alcool à indice d'octane élevé produit par la fermentation de sucre ou d'amidon prétraité, provenant de grains de blé ou de maïs ; l'ajout de levure entraîne la fermentation des sucres et produit l'éthanol qui est ensuite séparé du mélange par distillation.

III.3. Dans le domaine de recherche

Saccharomyces cerevisiae est l'organisme modèle par excellence utilisé dans le domaine de la recherche depuis de nombreuses années. Cette levure possède effectivement plusieurs caractéristiques qui font d'elle un outil de choix pour l'étude de processus biologiques qui sont communs chez d'autres espèces de levures et chez des organismes plus complexes comme l'être humain. La levure représente aujourd'hui un modèle précieux pour la chémobiologie, en particulier pour les maladies rares et/ou pour lesquelles aucun modèle mammifère n'existe encore]. Le Tableau 04 résume les principaux avantages à utiliser *S. cerevisiae* comme organisme modèle.

Tableau 04: *Saccharomyces cerevisiae* : un organisme modèle de choix.

Caractéristiques	Applications
Microorganisme eucaryote	<ul style="list-style-type: none">• Étude des mécanismes conservés chez les animaux et les humains
Court temps de division	<ul style="list-style-type: none">• Croissance rapide qui permet l'obtention de plusieurs cellules en peu de temps
Système génétique bien défini	<ul style="list-style-type: none">• Création de mutants
Génome entièrement séquencé	<ul style="list-style-type: none">• Source d'information précieuse concernant les gènes et les protéines• A permis la création d'une collection de mutants pour chaque gène
Existence des formes haploïdes et diploïdes	<ul style="list-style-type: none">• Permet les analyses phénotypiques, les études de complémentation et l'analyse des produits de la méiose
Recombinaison homologe	<ul style="list-style-type: none">• Déletion génique (remplacement d'allèles)• Intégration dans le génome• Réparation plasmidique et récupération d'allèles
Transformation par l'ADN versatile et efficace	<ul style="list-style-type: none">• Utilisation facile de plasmides à des fins multiples
Viable en l'absence de gènes impliqués dans de nombreux sentiers métaboliques	<ul style="list-style-type: none">• Permet l'utilisation de gènes marqueurs pour la sélection

III.4. Secteurs de la recherche biomédicale

Des levures, modifiées génétiquement, produisent l'antigène de surface du virus de l'hépatite B utilisé dans le vaccin anti-hépatite. D'autres produisent la sérum- albumine humaine, des hormones, des facteurs de croissance et d'autres protéines thérapeutiques (Tableau 05), (Figure 13).

Tableau 05: Différents domaines d'utilisation industrielle des levures.

Utilisation industrielle des levures	
Boissons alcoolisés	Vin, cidre....etc
Protéines recombinantes	Hormones (insuline) Vaccin anti-viraux (vaccin contre l'hépatite B). Facteur de croissance (facteur de nécrose tumorale). Protéines sanguine (sérum albumine bovine). Interféron (interféron leucocytaire). Anticorps (récepteur aux IgE). Enzyme (lipase gastrique et chymosine).
Alcools industriels	Cosmétique, industrie chimique, industrie pharmaceutique, bioéthanol, glycérol.
Enzymes	Alpha-amylase, gluco-amylase, protéase, invertase, pectinase, lipase, inulinase
Biomasse	Levure de boulangerie, levure-aliment, extrait de levure, pigment alimentaire
Vitamines	Vitamine B, vitamine D

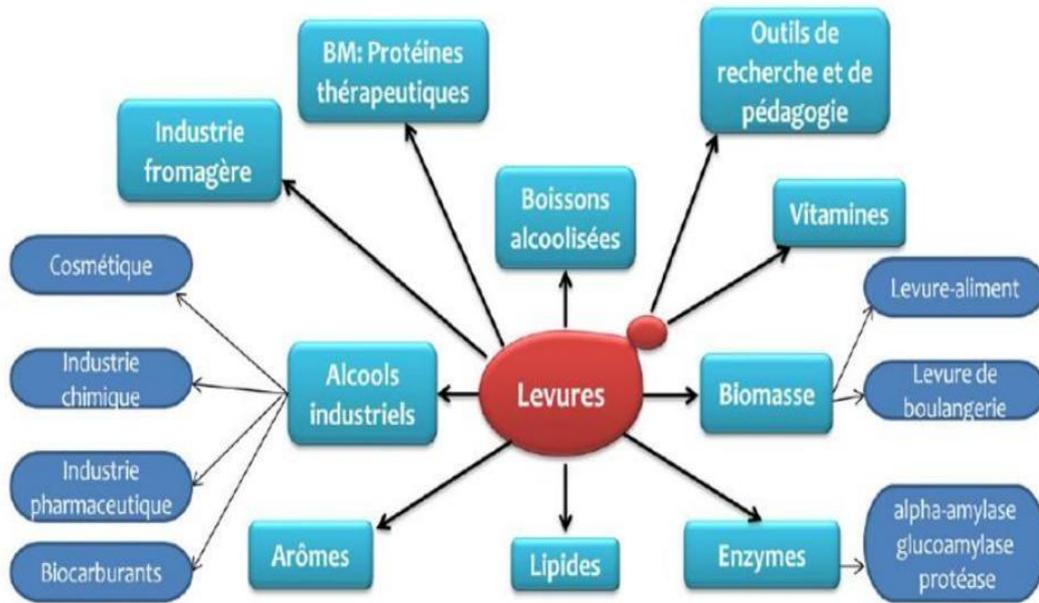


Figure 13: Représentation schématique des différents domaines d'utilisation des levures.

IV. Aspects pathologiques

A. Chez l'Homme et l'animal

Des levures peuvent être pathogènes pour l'homme et pour les animaux en causant des candidose ; en voici trois exemples :

- Les *Candida* avec plus de 10 espèces dont *Candida albicans*, agent d'une mycose de la peau ou des muqueuses (muguet buccal, vulvovaginite, etc) et autres affections.
- Le *Cryptococcus neoformans*, saprophyte dans la nature (fiente d'oiseau), agent d'infections opportunistes à manifestations variées (pulmonaire, méningo-encéphalites.....), fréquentes chez les malades du SIDA.
- Le *Rhodotorula rubra*, ubiquiste (sol, air, eaux), présente dans les aliments, en général saprophyte chez l'homme, pouvant parfois être à l'origine de septicémies, méningites, etc.

B. Moisissures

I. Définition

Les moisissures sont des champignons filamenteux, uni ou multicellulaires. Ces micro-organismes sont largement répandus dans la nature, et peuvent être observés à divers endroits (atmosphère, sol, eau, végétaux et déchets organiques, etc.), et tout particulièrement sur les denrées alimentaires entreposées, stockées depuis un certain temps (pain rassis, fromage ou fruits).

Le terme de "moisissure" n'a pas réellement de signification systématique et ne représente pas un groupe botanique bien défini. Il désigne l'ensemble des champignons microscopiques qui ont de l'importance dans l'industrie humaine et dans l'environnement, de façon bénéfique ou néfaste.

II. Structure des moisissures

Les moisissures (Micromycètes) ne correspondent pas à un groupe systématique homogène, mais se situent dans diverses familles de champignons microscopiques. Leur structure de base est le *thalle filamenteux* qui constitue l'appareil végétatif de ces micro-organismes. Il a la forme de mycélium, constitué d'un amas de filaments enchevêtrés et ramifiés dans tous les sens lors de la croissance, appelé *hyphe*. Ces derniers peuvent être non cloisonnés (hyphes cénocytiques) dans le cas des *Phycomycètes*, ou cloisonnés (hyphes septés) chez les *Septomycètes* (cf. Figure 14).

Remarque : Un mycélium peut donner naissance à plusieurs milliers, voire plusieurs millions de spores dont l'ensemble, appelé sporée, se présente souvent sous un aspect poudreux et coloré.

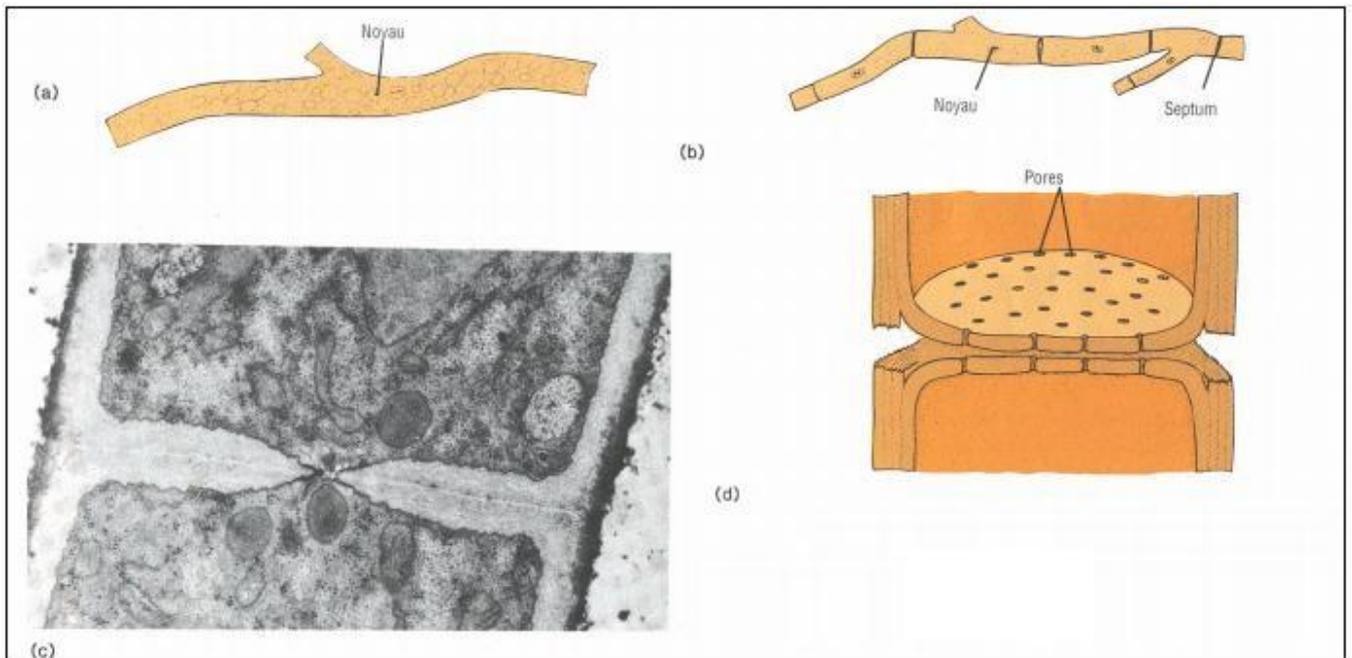


Figure 14: (a) hyphe coenocytique, (b) hyphe septé (c) image au microscope électronique, (d): septum multiperforé .

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

II.1. Mycélium cloisonnée ou septé

Chez la plupart des moisissures, les hyphes sont divisés par les cloisons ou septa (septum singuliers), on les appelle alors hyphes segmentés ou septés;

Dans ce cas, des perforations assurent la communication entre les cellules via des pores qui traversent les cloisons et permettent le passage cellulaire de cytoplasme, organites et noyaux (Figure 15).

Le filament est articulé (divisé en articles) : chez les champignons supérieurs = asco et basidiomycètes.

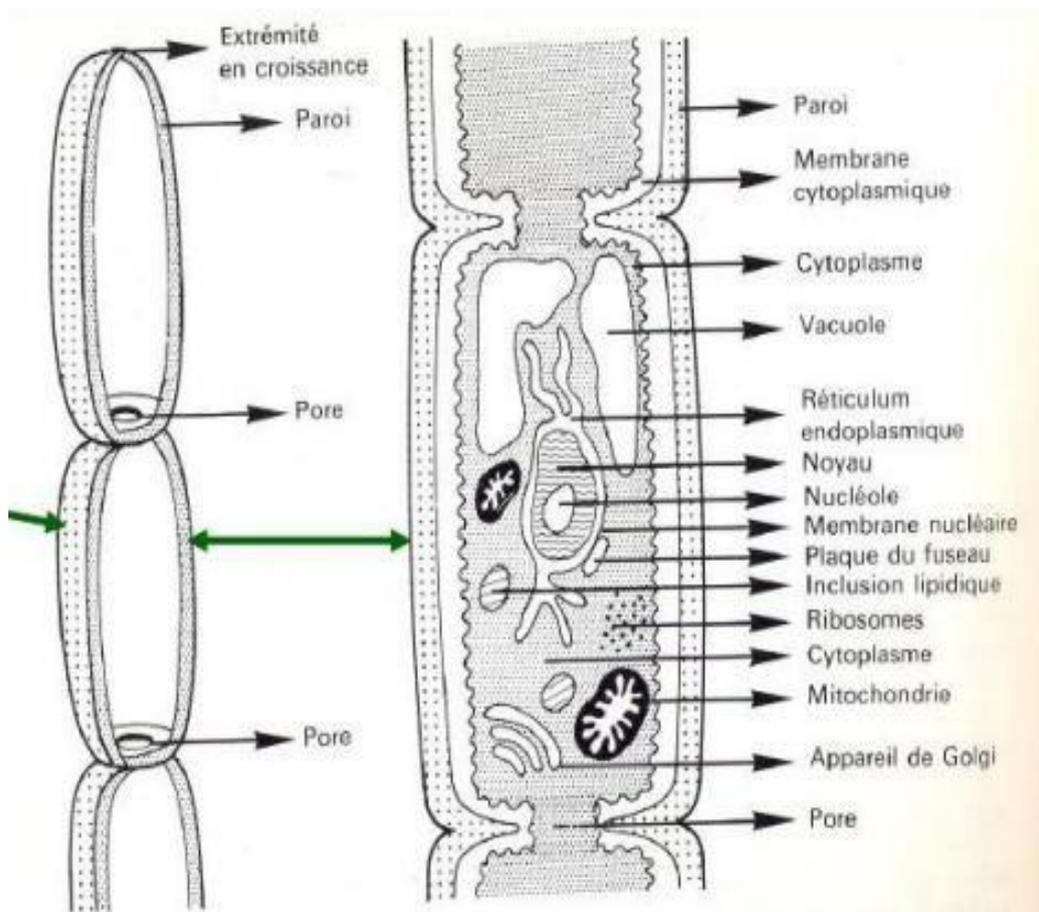


Figure 15: Structure de l'hyphe.

II.1.1. Le rôle des septa

Les septa ont plusieurs fonctions :

- Ils servent à renforcer et stabiliser ces longs tubes que sont les hyphes.

➔ **Support structurel.**

- Ils servent aussi de protection au mycélium. En cas de brisure d'un hyphe, ils se ferment et isolent l'article brisé du reste de l'hyphe, protégeant celle-ci du milieu extérieur.

➔ **Défense.**

- Enfin, en isolant les articles du reste de l'hyphe, ils permettent la différenciation et la spécialisation des articles et leur transformation en hyphes modifiées.

➔ **Facilite la différenciation.**

II.1.2. Mycélium siphonné, non cloisonnée

Dans quelques classes de mycètes, les hyphes ne contiennent pas de cloisons (non cloisonnée=mycélium siphonné) et ont l'aspect de longues cellules continues à noyaux multiples ou plurinucléé (Noyaux qui cohabitent dans le cytoplasme commun) ; ils sont appelés cénocytes.

Exp chez les champignons inférieurs = zygomycètes.

Donc, deux types de champignons avec :



III. Caractéristiques cytologiques

Les cellules de moisissures sont tubulaires, formant des filaments. Les mycètes possèdent un petit noyau. Ils possèdent entre 3 et 40 chromosomes différents. Pendant la mitose, l'enveloppe nucléaire reste intacte, contrairement aux plantes et aux animaux. **Les mitochondries** ont des structures qui varient selon les différents règnes de mycètes. **Les eumycètes** ont des mitochondries à crêtes lamellaires, tandis que les mitochondries d'**oomycètes** ont des **crêtes tubulaires (Figure 17)**. L'appareil de Golgi des mycètes est très peu développé, et n'est souvent formé que d'un saccule. Dans les cellules plus âgées des vacuoles apparaissent et peuvent envahir la totalité de l'article (Figure 16).

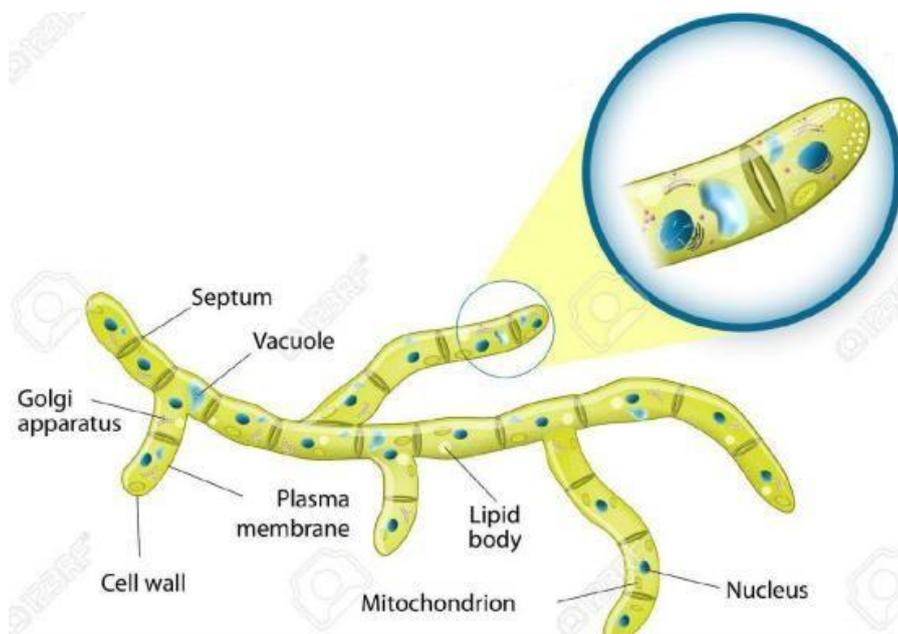
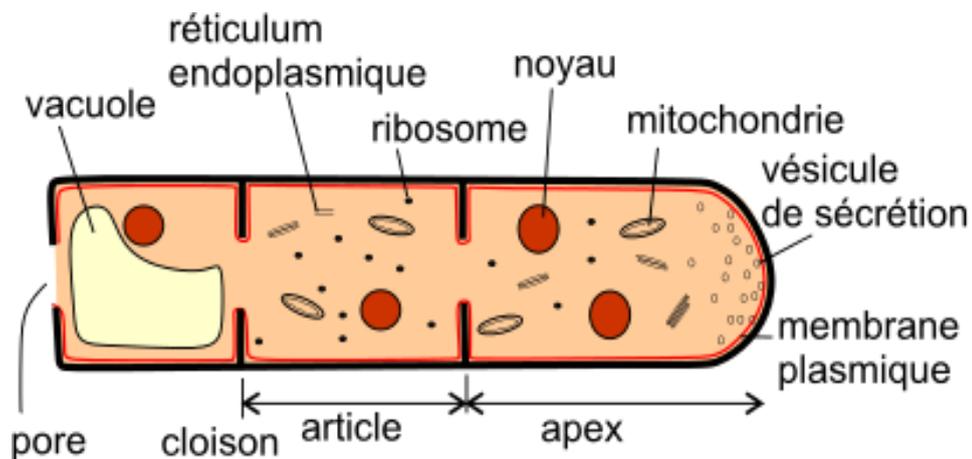


Figure 16: Structure cytotologique de l'hyphe.

Remarque

▪ **Oomycètes** : Organismes aquatiques non photosynthétiques (eucaryotes filamenteux).

Ressemblances morphologiques aux champignons. Les analyses phylogénétiques ont montré que les Oomycètes appartiennent en réalité aux Straménopiles, c'est-à-dire qu'ils sont proches des algues brunes = pseudochampignons

Les Oomycètes ne sont plus classés parmi les champignons actuellement :

- sur base phylogénique
- absence de chitine
- présence de cellulose !

▪ **Eumycètes** : les champignons vrais ou *Fungi*. (sens strict), organismes filamenteux absorbotrophes à paroi chitineuse.

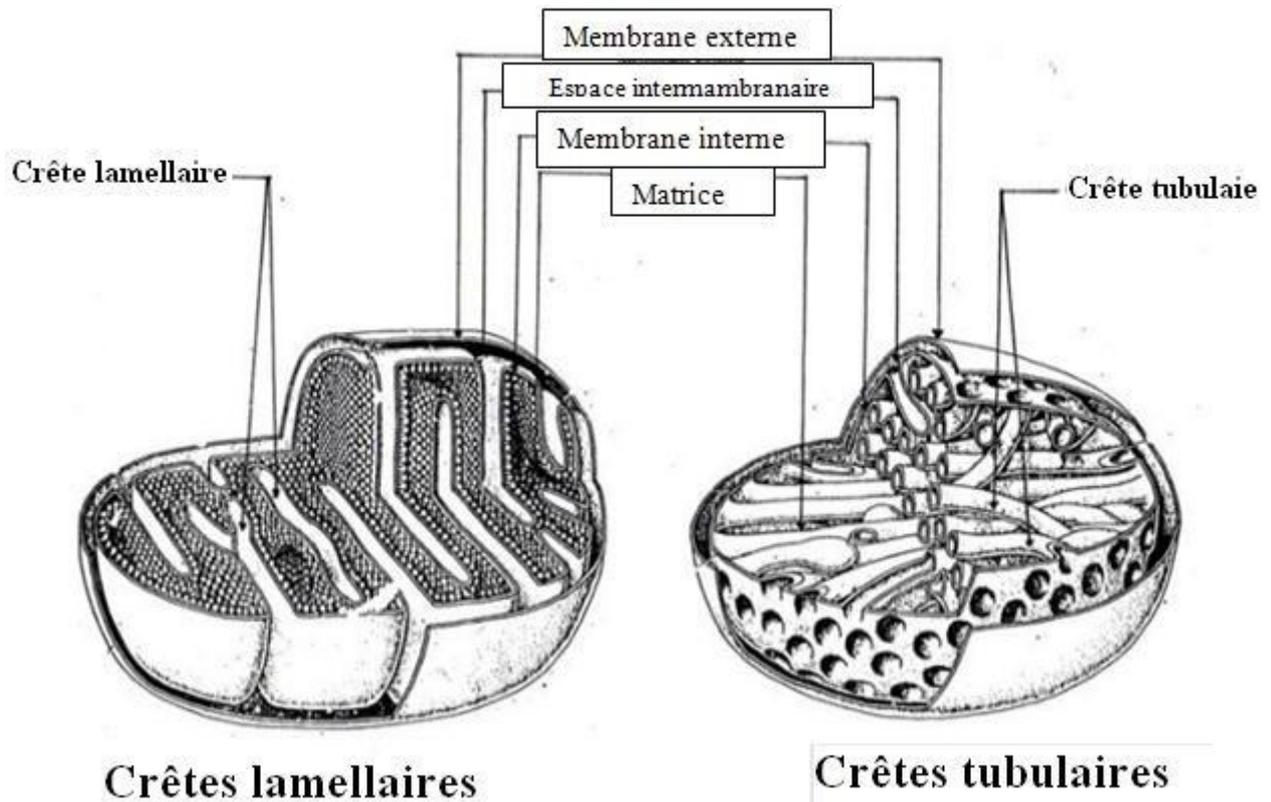
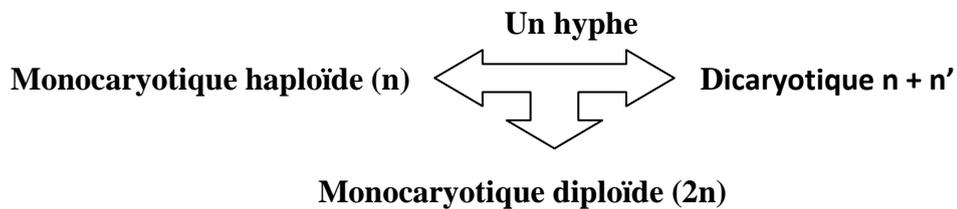


Figure 17: Structure des crêtes mitochondriales.

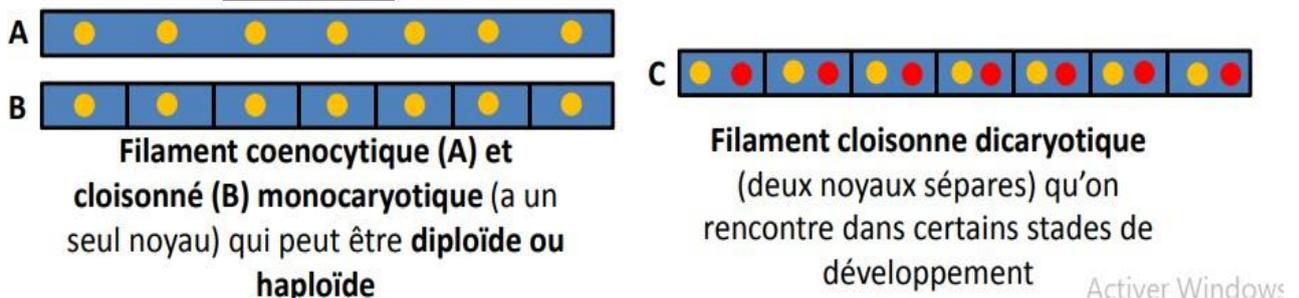
III.1. Noyaux

Trois types d'organisations nucléaires sont rencontrés à divers stades du cycle de développement. Ainsi, les Basidiomycètes possèdent typiquement un mycélium **dicaryotique**, avec deux noyaux par segments. Les levures possèdent un noyau par cellule.



Noyau:

Différents types d'organisations nucléaires sont rencontrés à divers stades du cycle de développement: **haploïde, diploïde et dicaryotique.**



III.2. La paroi fongique

III.2.1. La structure et la chimie de la paroi fongique

La paroi est une peptidopolysidique épaisse. Elle mesure de 150 à 230 nm et est composée de :

- 10 à 20% de protéines.
- 80% de polysaccharides antigéniques :

➤ de la **chitine** (polycondensat linéaire de β -D-1-4- N Acétyl-glucosamine), **majoritairement** ce qui les rapprochent d'avantage des animaux (comme chez les crustacées et la cuticule des insectes), **chitine** (polymère d'un dérivé aminé du glucose, constituant également l'exosquelette des insectes), (Figures 18, 19).

Cours de Mycologie

- de la cellulose (polycondensat linéaire de β -D-1-4- glucose) des mannanes (est un polysaccharide composé principalement de monomères de mannose) ou des glucanes (est un polysaccharide (polymère d'oses) composé exclusivement de monomères de glucose).
- parfois de la mélanine (champignons noirs).

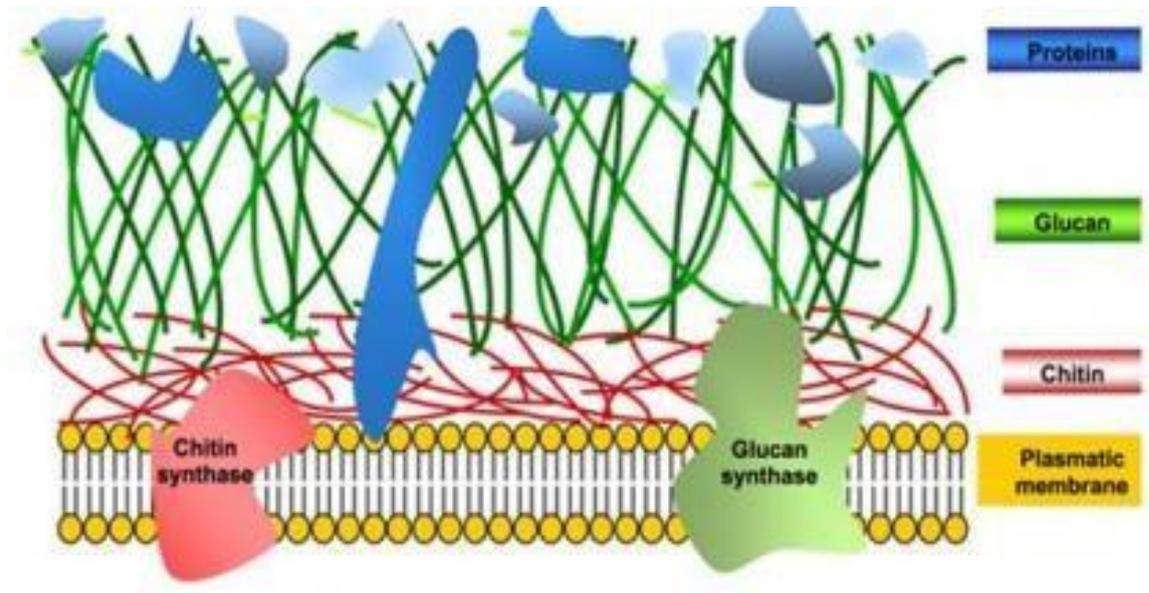


Figure 18: Schéma de la structure de la paroi fongique.

Remarque : Un β -glucane est un polysaccharide entièrement constitué de D-glucose liés par des liaisons bêta.

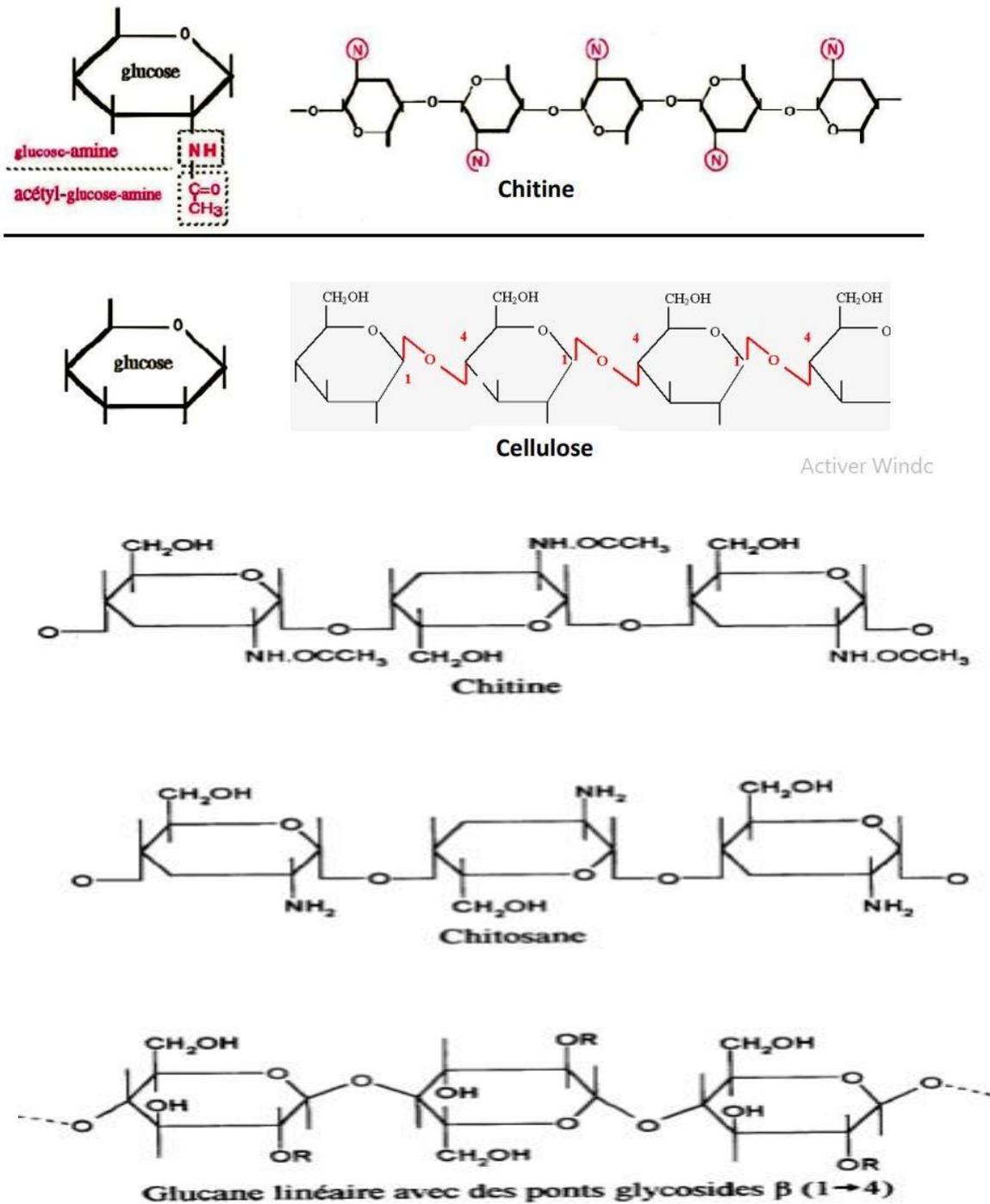


Figure 19: Polysaccharides majeurs de la paroi fongique.

Cours de Mycologie

La composition chimique de la paroi est variable selon les groupes : mannanes, glucanes, chitine, chitosane, protéines, phospholipides, les champignons possèdent une membrane riche en stérols (ergostérol principalement), (Tableau 6).

Tableau 06 : Composition de la paroi selon les groupes systématiques.

Groupe	Composants
Basidiomycota	Chitine β -(1-3), β -(1-6) glucane
Ascomycota	Chitine β -(1-3), β -(1-6) glucane
Zygomycota	Chitine Chitosane
Chytridiomycota	Chitine Glucane

Remarque: La chitosane consiste en une forme de chitine faiblement ou non acétylé, formant un polymère essentiellement de β -1,4- glucosamine.

III.2.2. Rôle de la paroi

- La paroi délimite sans exception toutes les cellules fongiques.
 - *C'est la zone de contact entre les champignons et le milieu extérieur.
 - *Les nutriments sont absorbés à travers cette paroi.
 - *Nécessaire à la vie du champignon. Elle représente 20 à 30 % du poids sec du mycélium. Elle a une taille qui varie en fonction de l'endroit : plus fine à l'extrémité.
 - *Elle confère une rigidité et forme hyphe (la chitine) => permet de rentrer en force. Certains champignons rentrent uniquement grâce à la force physique (cas des champignons phytopathogènes sans utiliser les enzymes lytiques).
 - *Elle a un rôle de protection contre les variations de pression osmotique et permet le maintien d'une pression osmotique intra cellulaire stable ; contre les agents; contre les radiations solaires.
- Les deux polysaccharides assurent la protection des moisissures vis-à-vis des agressions du milieu extérieur (la chitine et les glucanes).
- La chitine joue un rôle dans la rigidité de la paroi cellulaire,

Cours de Mycologie

- Les glycoprotéines jouent un rôle dans l'adhérence et les mannoprotéines forment une matrice autour de la paroi.

III.3. Réserves

Les réserves chez les champignons sont sous forme de **glycogène** (comme dans les hépatocytes humains) ou de gouttelettes lipidiques.

III.4. Vacuole

La vacuole constitue un important stock enzymatique.

IV. Modes de vie

D'un point de vue métabolique les champignons sont des chimiohétérotrophes, c.à.d qu'ils utilisent du carbone organique comme source d'énergie. L'hétérotrophie a imposé aux champignons plusieurs modes de vie:

On distingue **trois modes de vie** :

A/ Certains sont **saprophytes** et se nourrissent de matières organiques mortes ; ce sont des détritivores qui dégradent des substrats très variés. Ils participent à l'élaboration de l'humus et des sols. Exp : champignons des milieux sucrés et amylacés (de la nature amidon), (Saccharomycètes, levures, etc), (Figure 20).

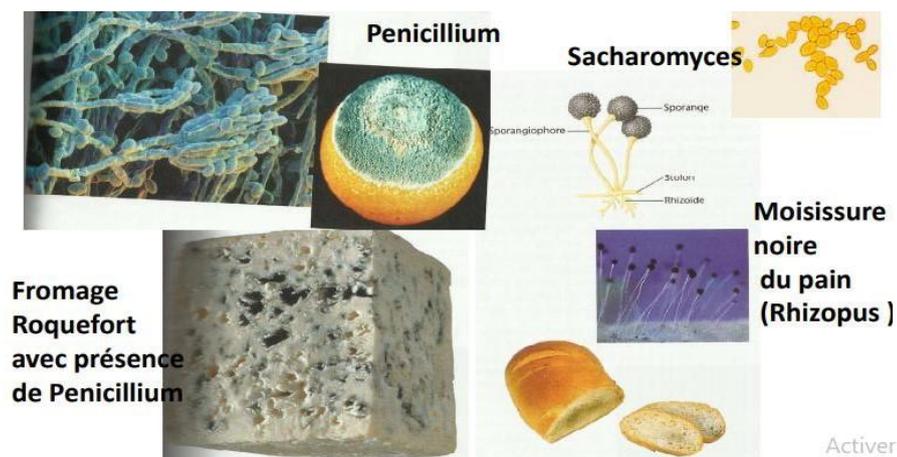


Figure 20: Moisissures saprophytes.

Cours de Mycologie

B/ Les **parasites** s'accroissent aux dépens d'autres cellules vivantes. Ils causent des dégâts considérables notamment aux plantes cultivées (Figure 21).

-Peuvent être pathogènes dangereux pour l'homme, les animaux et surtout les plantes.

-Provoquent des maladies graves (mycoses) qui apparaissent surtout chez les plantes cultivées (monocultures),

-Quelques exemples de mycoses : mildiou, ergot, charbon, caries, rouilles, fusariose, cercosporiose, moniliose, candidose, dermatophytoses (es : teignes, arthroderma).

-D'autres sont des parasites facultatifs, vivent sur des matières organiques morte ou vivantes, ex : *Phytophthora infestans* (mildiou de la pomme de terre).

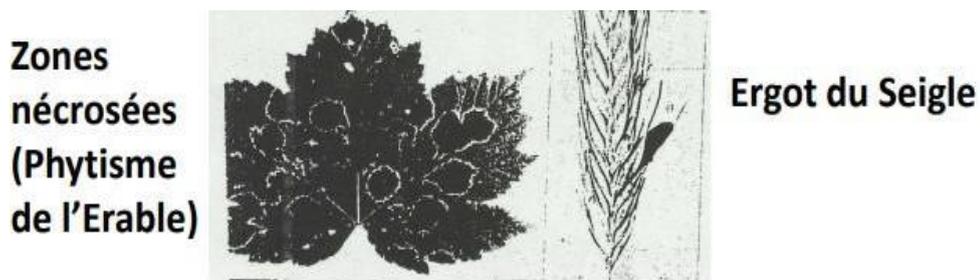


Figure 21: Zone nécrosées (Moisissures).

- Les parasites obligatoires sont moins nombreux et plus spécifiques (Figure 22), ex :

* *Ustilago maydis* (charbon de maïs).

* *Puccinia graminis* (rouille de blé).



Puccinia graminis (rouille de blé)



Ustilago maydis (charbon du maïs)

Figure 22: Rouille de blé et charbon du maïs.

C/ Une dernière catégorie est **symbiotique**, c'est-à-dire qu'elle établit avec une autre espèce un équilibre à bénéfices réciproques :

Cours de Mycologie

*avec les insectes (Coléoptères xylophages, Fourmis, termites...).

*avec les algues ; formant les lichens.

*avec les racines des plantes supérieures : formation de mycorhizes,

ex : -mycorhizes ectotrophes

- mycorhizes endotrophes

- avec les Orchidées.

- avec les arbres forestiers : le plus souvent des Basidiomycètes (Bolets avec les Pins), parfois des Ascomycètes (Truffe et le chêne)

V. Modes de nutrition

Les champignons se nourrissent par **absorption** des molécules organiques (sont des **absorbotrophes**). Ils dégradent la matière organique à l'extérieur de leurs cellules grâce à leurs enzymes lytiques. La matière dégradée, en ces composantes unitaires, est ensuite absorbée pour être utilisée par la cellule fongique (Figure 23).

- Sécrétion d'enzymes et absorption des molécules simples surtout dans les extrémités en croissance.
- Fixation (rhizoïdes) et organes de succion chez les parasites.

Ils peuvent également se nourrir par phagocytose.

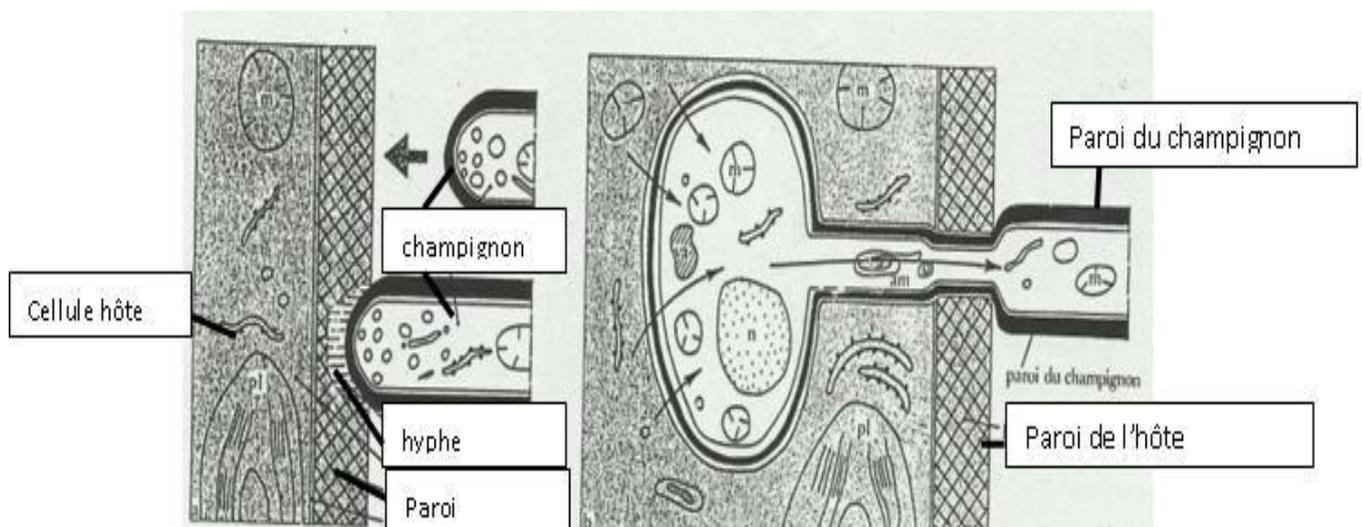


Figure 23: Formation d'un suçoir intracellulaire.

Les acides aminés peuvent pénétrer dans la cellule sans transformation, alors que des molécules complexes comme l'amidon, la cellulose ou les protéines nécessitent une digestion enzymatique préalable. Cette digestion s'effectue par production d'enzymes ou d'acides par les moisissures permettant ainsi une altération du substrat.

VI. Mécanisme de croissance de l'hyphe

Le développement des champignons se fait par croissance apicale et élongation des filaments, à partir de leurs extrémités (au niveau de l'**apex**), (Figure 24), dans toutes les directions et de façon identique.

L'apex est structurellement et fonctionnellement très différent du reste de l'hyphe. Il se caractérise par :

- Un cytoplasme plus dense ;
- L'épaisseur de la paroi est moins importante ;
- Accumulation des vésicules appelées « AVC=Apical Vesicular Clusters » (Spitzenkorper), qui jouent un rôle essentiel dans la croissance.

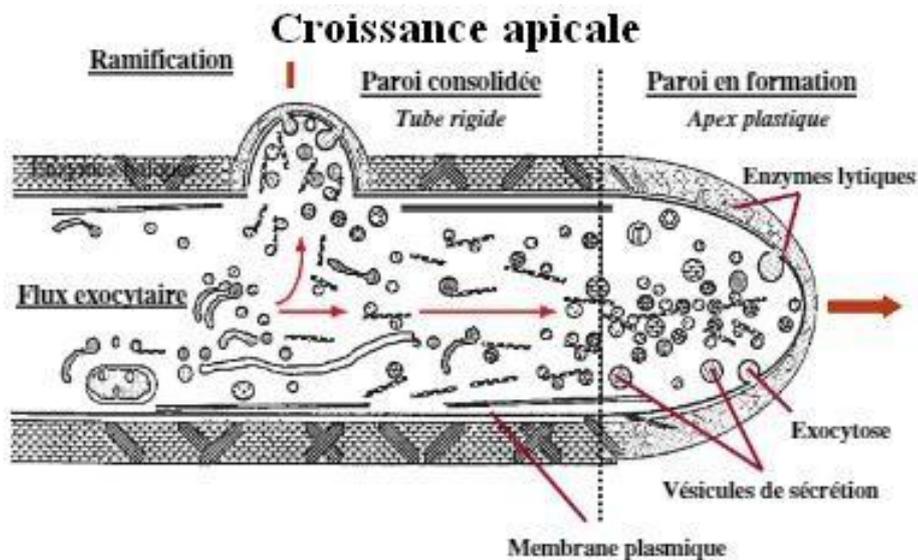


Figure 24: Croissance apicale des filaments mycéliens.

VII. Développement des moisissures

Le développement des moisissures s'effectue en deux phases :

VII.1. Phase végétative: correspond à

- **La phase de croissance:** l'appareil végétatif colonise le substrat par extension et ramification des hyphes.
- **La phase de nutrition:** les hyphes absorbent à travers leur paroi, l'eau ainsi que les éléments nutritifs.

VII.2. Phase reproductive: comprend

- **La reproduction asexuée:** correspondant à la forme anamorphe, ou multiplication végétative.
- **La reproduction sexuée:** correspond à la phase téléomorphe.

VIII. Conditions de développement des moisissures

VIII.1. Facteurs environnementaux

a. Oxygène

Les moisissures sont des organismes aérobies, mais les exigences en oxygène des différentes formes d'une même espèce sont différentes. Cela n'empêche pas l'existence de certaines espèces qui peuvent se développer en anaérobiose.

b. Dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est un élément essentiel intervenant dans d'importantes réactions métaboliques des moisissures. Cependant, certaines espèces sont intoxiquées par des concentrations élevées de dioxyde de carbone, alors que d'autres ne peuvent se développer qu'en présence d'une forte concentration de cet élément.

c. Température

La végétation maximale des moisissures est produite entre 20 et 30°C, mais la plupart des mycètes tolèrent, généralement, une température de 5 à 40°C ; elles sont dites donc **mésophiles**.

Les espèces **psychrotolérantes** sont capables de se développer à des températures basses et mêmes négatives. Les espèces de moisissures incapables de pousser au dessus de 20°C, sont dites

psychrophiles. À l'opposé, les espèces **thermotolérantes** poussent à des températures allant jusqu'à 50°C. Celles qui ne poussent pas à moins de 20°C, sont dites **thermophiles**.

d. pH

Les moisissures se développent mieux en milieu légèrement acide (croissance optimale à des pH entre 4 et 6), mais elles peuvent tolérer des pH très acides (pH = 1). Par ailleurs, le métabolisme des moisissures modifie le pH, soit par l'utilisation des anions ou des cations du milieu, soit en produisant des acides organiques ou de l'ammoniac.

e. Humidité

Les mycètes ont besoin de l'eau pour extraire les nutriments et sont donc restreints à des environnements assez humides, comme les tissus d'un hôte, les sols et les substances humides.

f. Lumière

La lumière influence la croissance des moisissures, soit par destruction photochimique des constituants du milieu, soit en agissant directement sur le métabolisme fongique par la stimulation de la biosynthèse de divers pigments.

VIII.2. Facteurs nutritionnels

a. Besoin en carbone

Les mycètes utilisent des substances organiques comme sources de carbone et d'énergie. La grande partie du carbone de l'environnement est sous forme de polymères complexes tels que la cellulose, la chitine et la lignine. Ces polymères doivent être hydrolysés par des enzymes hydrolytiques, libérées par les mycètes, pour avoir une forme soluble et diffusable (la paroi cellulaire rigide empêche l'endocytose).

b. Besoin en azote

Les moisissures ne peuvent pas fixer l'azote gazeux. Cependant, la plupart des espèces peuvent assimiler facilement, aussi bien l'azote ammoniacal que l'azote nitrique. Certaines sources d'azote organique peuvent aussi être utilisées sous formes d'acides aminés, par absorption directe à travers la membrane. Les peptides et les protéines ne sont utilisables qu'après leur dégradation par des protéases fongiques en acides aminés absorbables.

c. Besoin en éléments minéraux

Les moisissures ont un requis spécifique en éléments traces tels que le Soufre, le Phosphore, le Magnésium, le Fer, le Cuivre, le Manganèse, le Zinc, le Molybdène, le Potassium, le Sodium et le Calcium, qui sont convertis en divers composés après réduction.

Ces traces d'éléments sont nécessaires à la plupart des espèces fongiques pour la production des cytochromes, des pigments, d'acides organiques, etc.

d. Besoin en vitamines et facteurs de croissance

Beaucoup de moisissures exigent diverses vitamines pour leur croissance, à de très faibles concentrations (10^{-5} à 10^{-12} Molaire). Les besoins les plus communs concernent la thiamine (B_1) et la biotine (B_8), intervenants comme Co-enzymes lors des réactions de carboxylations.

Les facteurs de croissance sont des composées indispensables à la nutrition et à la croissance de certains micro-organismes tels que les stérols, les acides gras, les purines et les pyrimidines, nécessaires en quantité relativement importante. À titre d'exemple, les stérols jouent un rôle majeur dans la composition des membranes fongiques et leur perméabilité.

e. Teneur en eau du substrat

La teneur en eau du substrat est un facteur déterminant le développement des moisissures. L'activité de l'eau (A_w) exprime la teneur en eau libre du substrat, et qui est disponible pour la croissance des moisissures. Si elle est maintenue en dessous de 0,65, aucun développement fongique ne sera observé.

IX. La reproduction chez les moisissures

La reproduction est complexe, elle peut être:

- Asexuée **➡** Conidies ANAMORPHE
- Sexuée **➡** TELEOMORPHE (permet la classification des champignons).
- Sexuée + Asexuée (alternance) **➡** HOLOMORPHE.

IX.1. La reproduction asexuée

Se fait sans fusion de gamètes (un mode de reproduction commun à presque tous les champignons).

Cette forme de reproduction asexuée est appelée la sporulation.

En présence de conditions favorables à la sporulation, le mycélium donne naissance à des structures plus spécialisées, qui produisent des spores asexuées (**conidies**).

IX.1.1. Formation de spores asexuées (reproduction asexuée)

Les spores asexuées sont produites chez un champignon par une mitose suivie d'une division cellulaire. Il existe plusieurs types de spores asexuées, chacun portant un nom :

IX.1.1.1. Arthroconidies ou Arthrospores (reproduction asexuée)

Un hyphe se fragmente (par clivage de la paroi cellulaire ou du septum) pour former des cellules qui se comportent comme des spores. Elles sont appelées arthroconidies ou arthrospores (Figure 25).

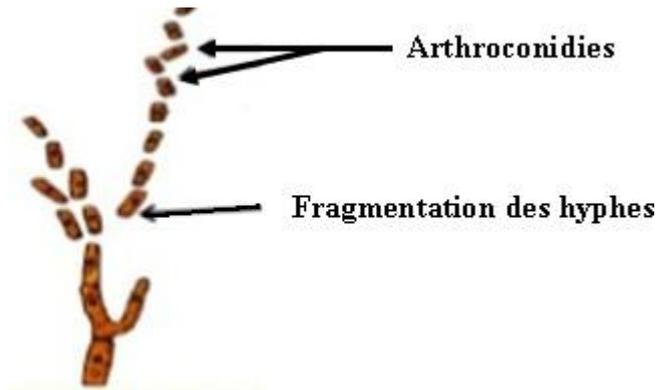


Figure 25 : Arthrospores.

IX.1.1.2. Chlamydozspores (reproduction asexuée)

Si les cellules sont enveloppées d'une paroi épaisse avant séparation, elles sont appelées Chlamydozspores. Ce sont des éléments de résistance, formés à partir du filament mycélien ou à son extrémité, ayant une paroi épaisse. Contrairement aux autres spores, les chlamydozspores ne possèdent pas de mécanismes de libération permettant leur dissémination à maturité (Figure 26).

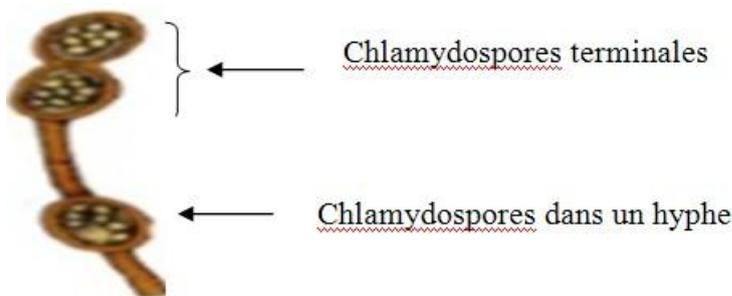


Figure 26 : Chlamydozspores.

IX.1.1.3. Sporangiospores (reproduction asexuée)

Si les spores se forment dans un sac à l'extrémité de l'hyphe (sporange), elles sont appelées **sporangiospores** (Figure 27).

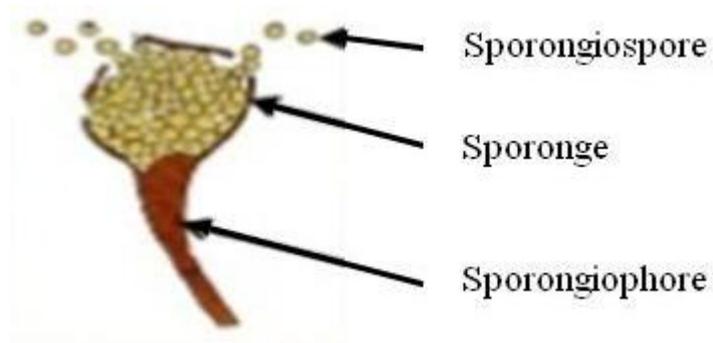


Figure 27 : Sporangiospores.

IX.1.1.4. Conidiospores (reproduction asexuée)

* Si les spores ne sont pas enfermées dans un sac mais sont produites sur les extrémités ou les cotés de l'hyphe, elles sont dénommées : **Conidiospores** (Figure 28).

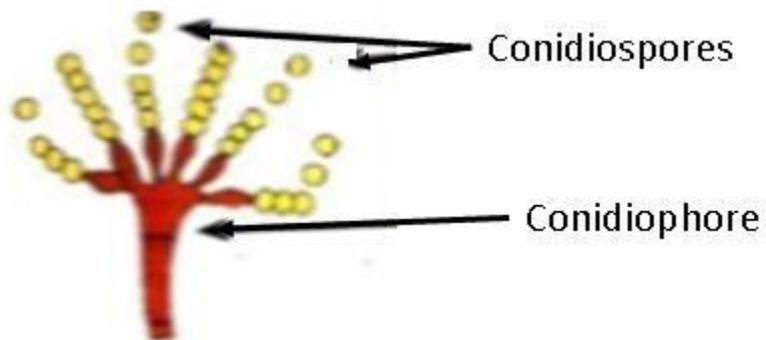


Figure 28 : Conidiospores.

IX.1.1.5. Blastospores (reproduction asexuée)

* Les spores produites par bourgeonnement d'une cellule mère végétative sont appelées **Blastospores** (Figure 29).

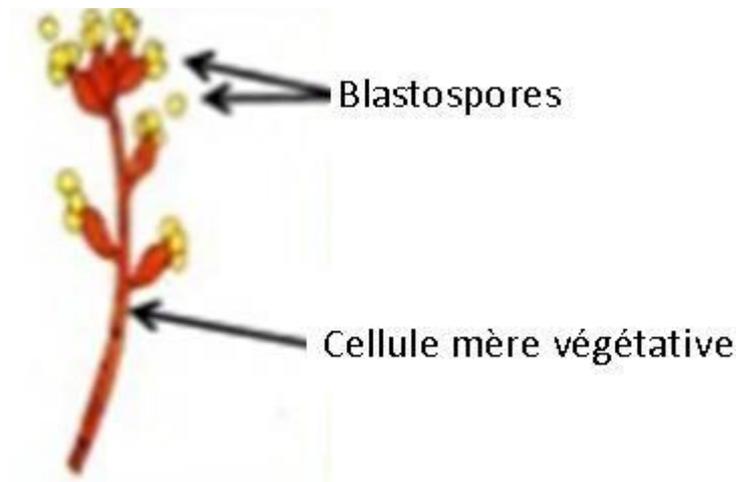
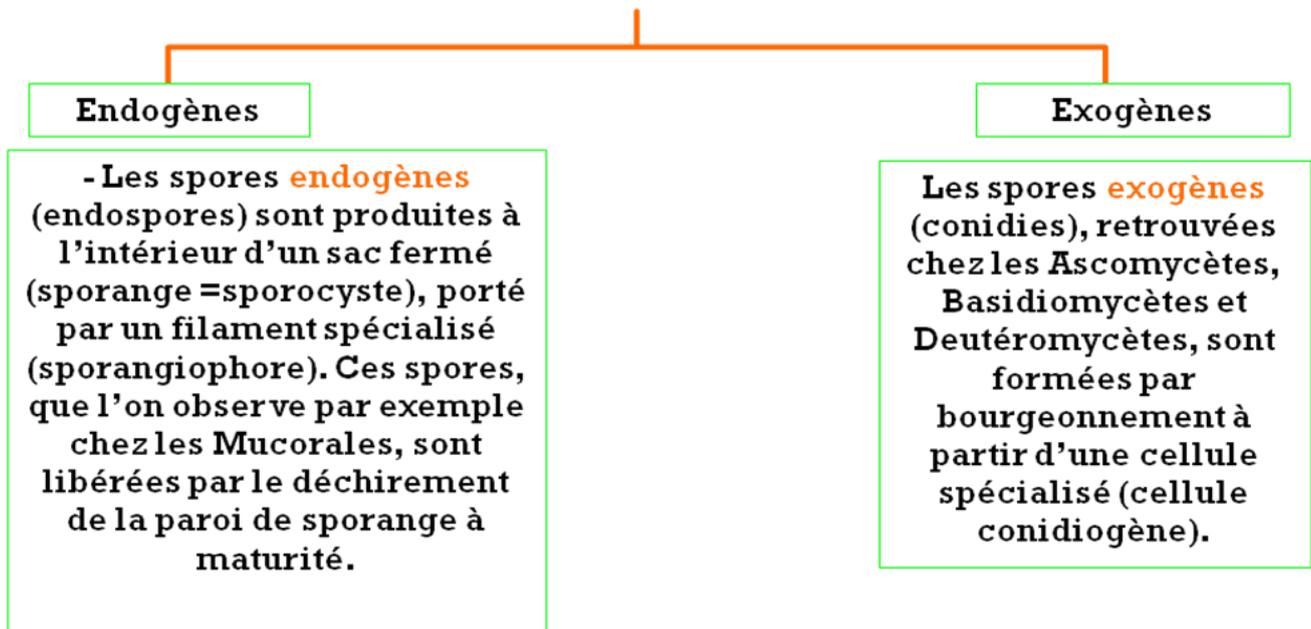


Figure 29 : Blastospores.

IX.1.2. Les types de spores

Les spores qui sont le produit de la reproduction asexuée peuvent être (Figure 30):



Remarque : L'examen des spores et de leur organisation est une étape importante de l'identification fongique.

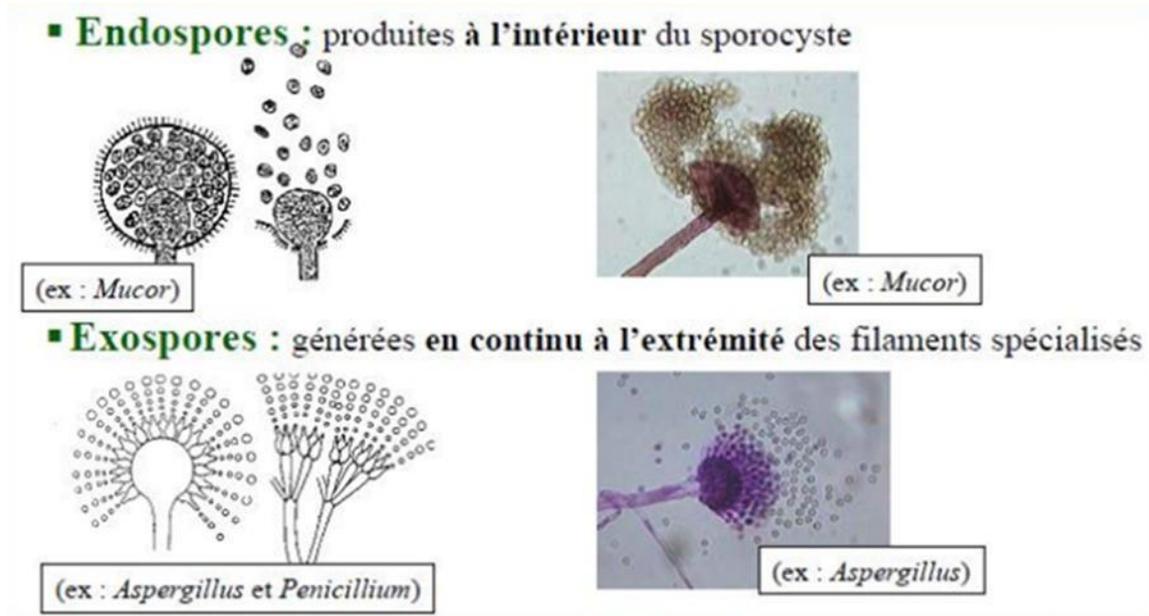


Figure 30: Les endospores et les exospores.

IX.1.3. Les aspects des spores

D'après la forme et les modalités de septation, on distingue 7 groupes de spores (Figure 31)

IX.1.3.1. Amérospores : spores unicellulaires de petite taille (*Penicillium, Aspergillus*)

IX.1.3.2. Didymospores (Didymos= double): spores bicellulaires (*Trichothecium*).

IX.1.3.3. Phragmospores : spores pluricellulaires à cloisons transversales (*Curvularia*)

IX.1.3.4. Dictyospores : spores pluricellulaires à cloisons transversales et longitudinales (*Alternaria*)

IX.1.3.5. Scoléospores : spores étroites, effilées, souvent incurvées et cloisonnées transversalement (*Fusarium*)

IX.1.3.6. Hélicospore : conidie incurvée (plus qu'un demi—cercle) ou enroulé en 2-3 dimensions (*Illosporiopsis*).

IX.1.3.7. Staurospore : conidie avec plusieurs branches.

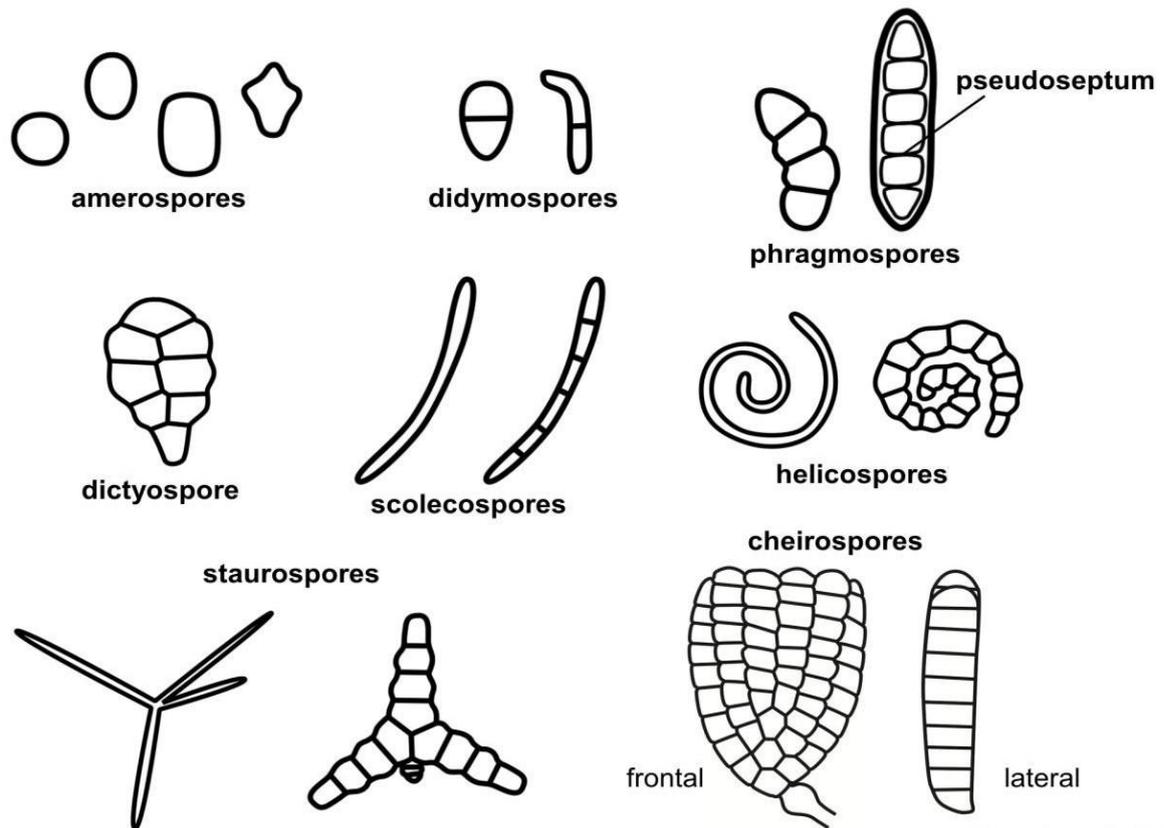


Figure 31 : Différents aspects des spores.

IX.2. La reproduction sexuée

Implique l'union de noyaux compatibles.

- Les espèces fongiques **homothalliques** sont **autofertilisantes** =autogames et produisent des gamètes sexuellement compatibles sur le même mycélium (gamètes mâles et femelles produites sur le même mycélium).
- Les espèces **hétérothalliques** =**hétérogames** requièrent un croisement entre des myéliums différentes mais compatibles sexuellement.

Il a été soutenu pour longtemps que la reproduction sexuée devait se faire entre des mycéliums de types sexué opposé « **mating type ou MAT** ». Mais un cas de croisement de même sexe a été une épidémie par la levure *Cryptococcus gatti* au Canada.

IX.2.1. Les étapes de la reproduction sexuée

La reproduction sexuée est basée sur la succession de 3 événements ou de 3 étapes

a. La plasmogamie ou cytogamie

Qui réunit dans un même thalle deux noyaux compatibles (à noter que deux thalles fusionnent, non pas parce qu'ils sont de sexe différent, mais parce qu'ils sont dotés d'une compatibilité génétique : on désigne les thalles complémentaires par + et - ou A et a (Figure 32).

b. La caryogamie

Correspond à la conjugaison de noyaux haploïdes pour donner un noyau diploïde (Figure 32).

c. La méiose qui sera

Suivi d'une mitose est une division réductrice ou méiose, qui conduit à des noyaux à nouveau haploïdes (Figure 32).

Remarque: avant de fusionner, les noyaux vont cohabiter durant une phase (dicaryophase) plus ou moins longue (le couple de noyaux compatibles prend le nom de dicaryon).

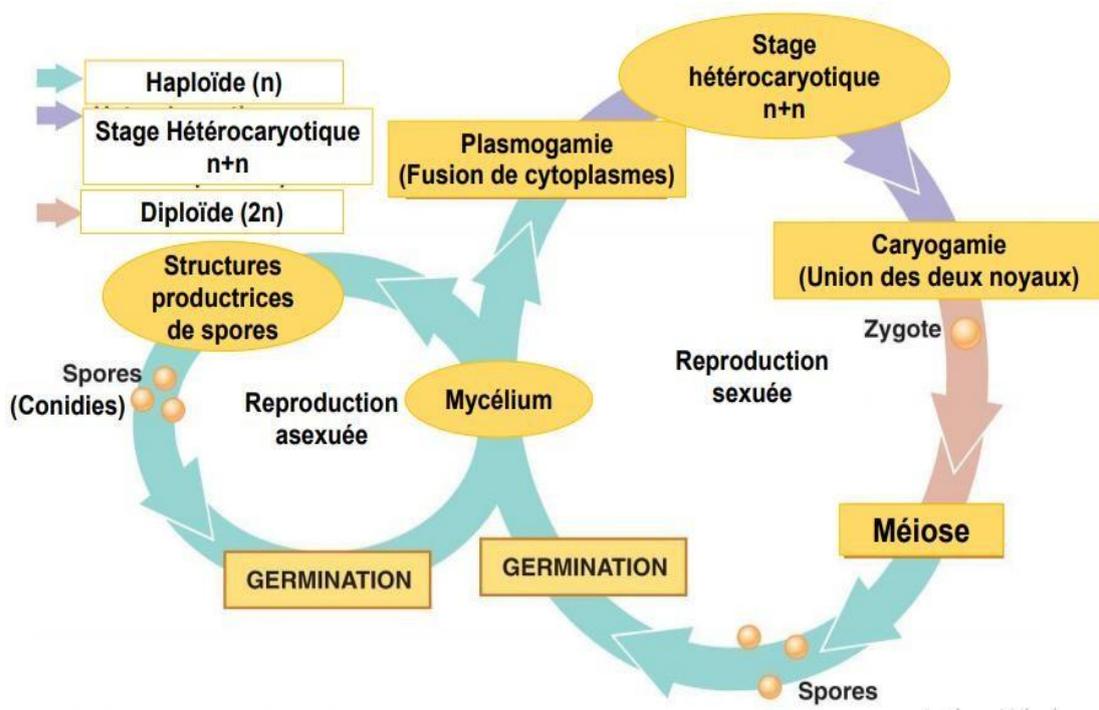


Figure 32 : Représentation les étapes de la reproduction sexuée et celles de la reproduction asexuée chez les champignons.

Chez les champignons supérieurs : ascomycètes et basidiomycètes les deux noyaux haploïdes ne fusionnent pas avant un certains temps (plusieurs mois) et forment un dicaryon (la fécondation est incomplète se fait en 2 étapes, il se complète juste avant la méiose et la formation des méiospores (Figure 33).

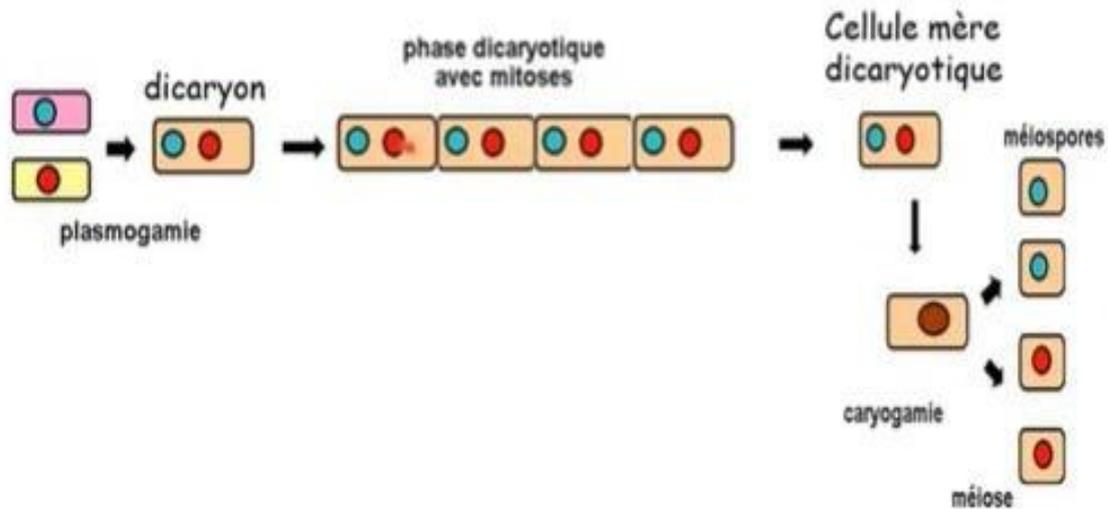


Figure 33: Fécondation en deux étapes, séparée par une phase dicaryotique.

IX.2.2. Les différents types de fécondation chez les moisissures

- A.** On parle de **planogamie isogame** lorsque deux gamètes nageurs de même taille fusionnent (Figure A34).
- B.** On parle de **planogamie anisogame** lorsqu'un gamète mâle nageur de petite taille fusionne avec un gamète femelle nageur de taille plus importante (Figure B34);
- C.** On parle d'**oogamie** ou **zoïdogamie** lorsqu'un gamète mâle nageur de petite taille fusionne avec un gros gamète femelle inerte (Figure C34);
- D.** On parle de **siphonogamie** lorsqu'un tube copulateur amène le gamète mâle - souvent réduit à un simple noyau fécondant - jusqu'au gamète femelle (Figure D34, 35);
- E.** On parle de **trichogamie** lorsque le petit gamète mâle inerte est capté par le trichogyne qui surmonte le gamète femelle; sans fusion des protoplasmes (contact gémetocystique), (Figure C34)
- F.** On parle de **cystogamie** lorsque le contenu entier d'un gamétocyste mâle se déverse par l'intermédiaire d'un tube de conjugaison dans un gamétocyste femelle; pour donner un zygote, qui se développe en spore de résistance (conjugaison gamétocystique), (Figure F34).

G. La **périttogamie** est la fusion d'une cellule uninuclée quelconque avec une autre cellule uninuclée quelconque (Figure G34, 36).

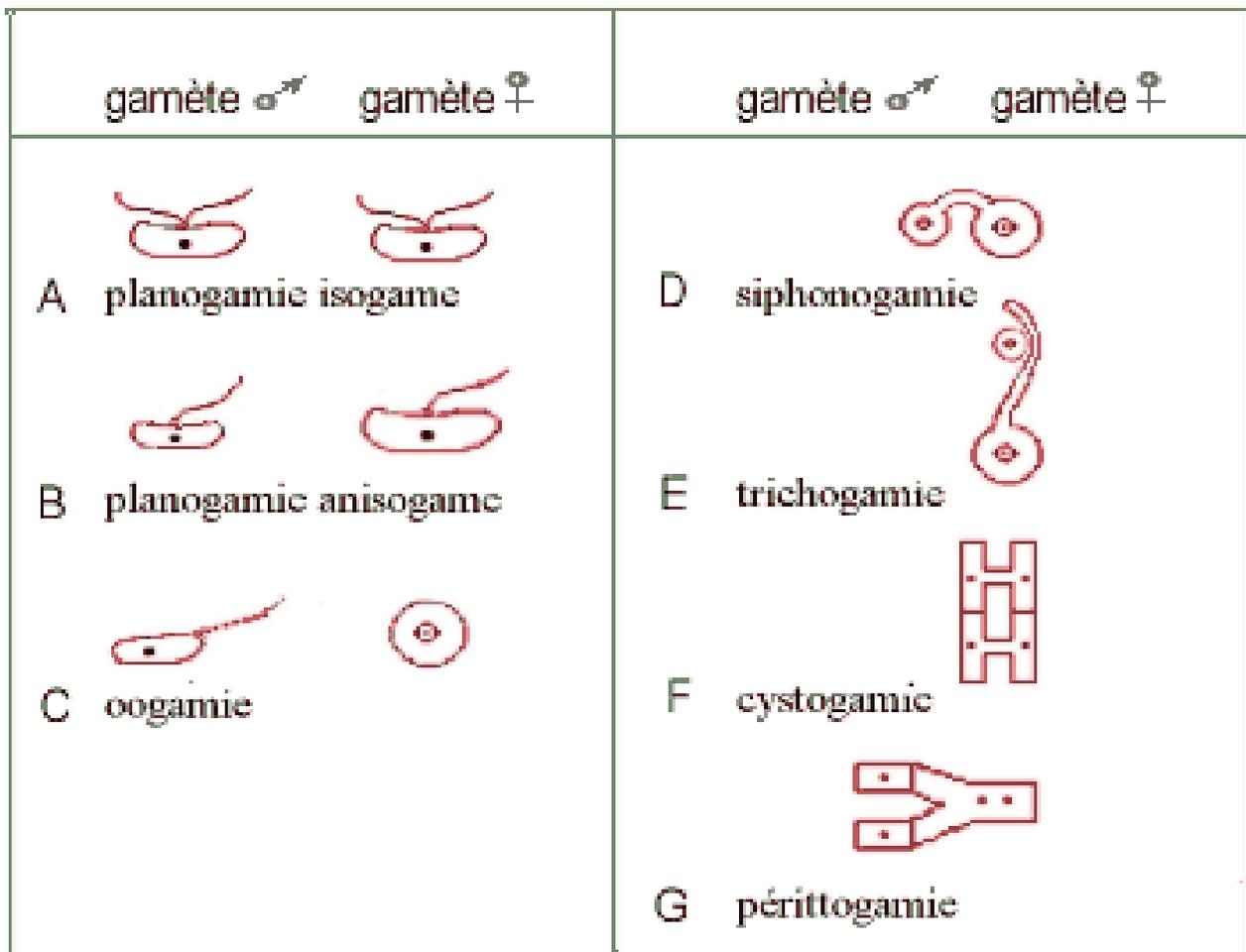


Figure 34 : Différents types de fécondation chez les moisissures.

Isogame

Anisogame

Oogamie ou zoïdogamie

Planogamie ou planogamétie:

C'est la fusion de deux gamètes dont l'un ou les deux sont mobiles

Siphonogamie

Trichogamie

Cystogamie

Périttogamie

Aplanogamie :

Lorsque les 2 gamètes sont immobiles

Siphonogamie

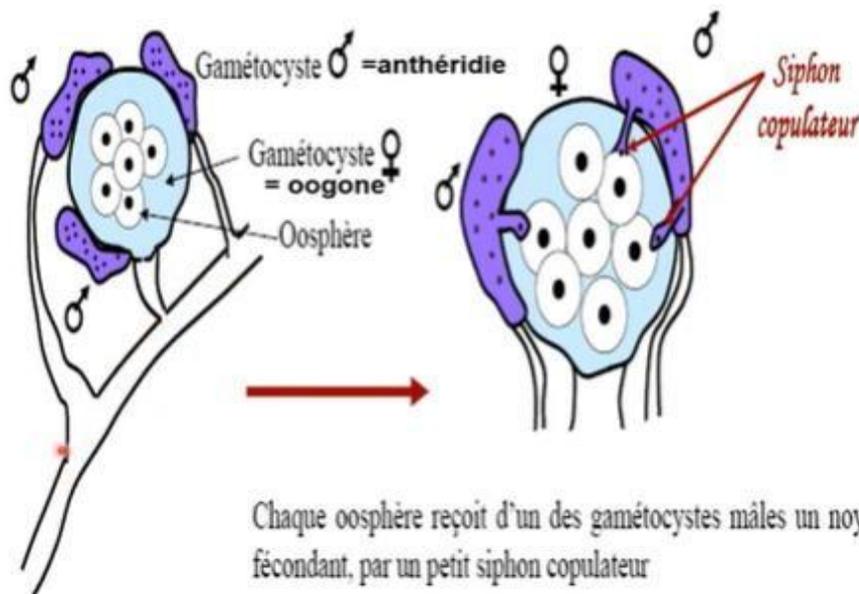


Figure 35 : Siphonogamie.

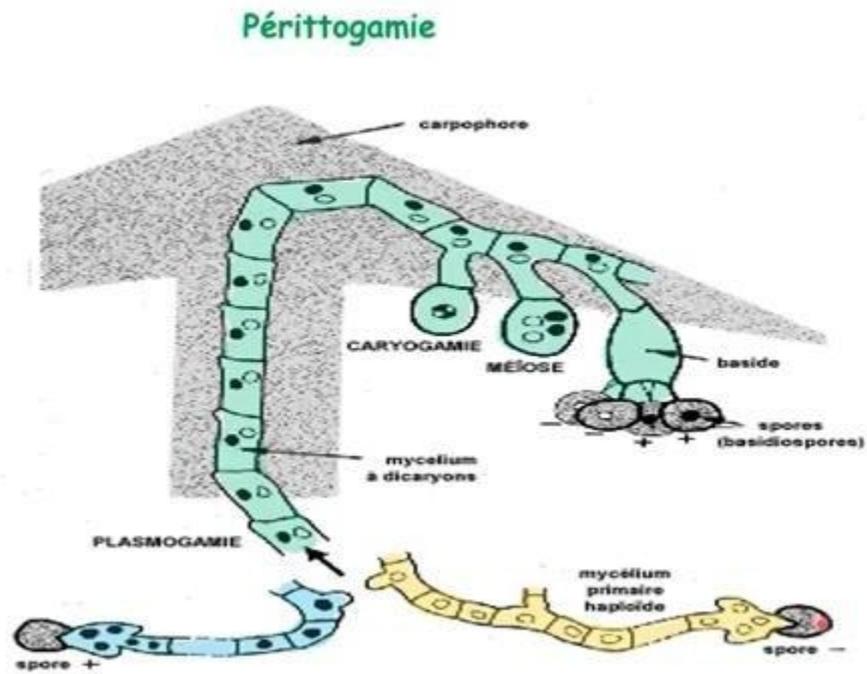


Figure 36: Périttogamie.

IX.2.3. Les différents types de spores sexuées chez les moisissures (stade zygote : spores méiotiques)

IX.2.3.1. Asque: est une cellule reproductrice, caractérisée des ascomycètes, sorte de sac dans lequel se forment quatre à huit spores haploïdes (ascospores, endospores), (Figure 37).

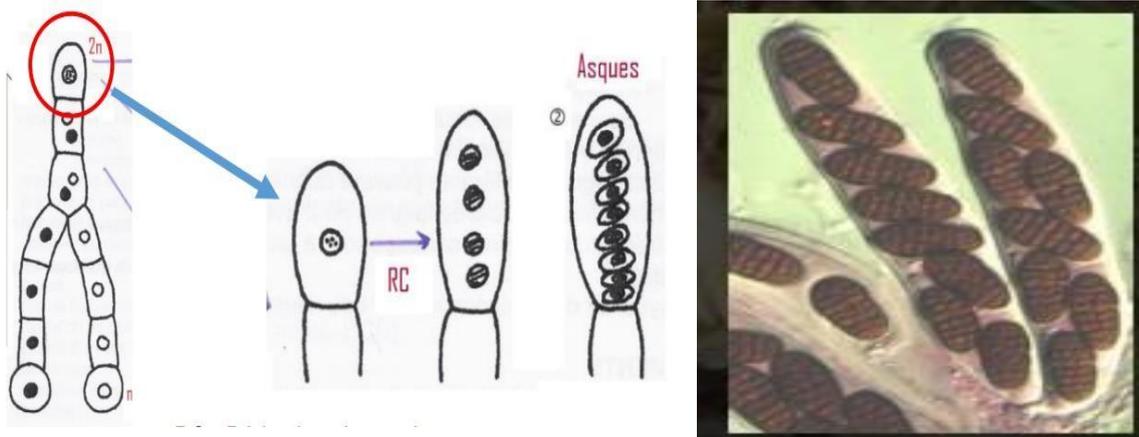


Figure 37 : Ascospores.

IX.2.3.2. Baside: est une cellule reproductrice spécialisée, qui caractérise les basidiomycètes. Cette dernière est terminée par un nombre variable de pointes, portant chacune une spore nommée basidiospore.

Basidiospore: spores sexuées formées par bourgeonnement à l'apex des cellules allongées (exospores). Ce type de reproduction sexuée est caractéristique aux Basidiomycètes.



Figure 38 : Ascospores.

IX.2.3.3. Zygosporés: Spores sexuées formées par la fusion de deux cellules (hyphes) semblables appelées gamétanges. Les 2 filaments peuvent être issus du même thalle (homothallique) ou de 2 thalles différents (hétérothallique). Ce type de spore est caractéristique des champignons de la division Zygomycota.

IX.2.3.4. Oospores: chez les Phycomycètes et les Oomycètes.

IX.3. Comparaison entre spores asexuées et spores sexuées

Le **tableau 07**, résume la différence entre les spores sexuées et les spores asexuées.

Tableau 07 : Différence entre les spores sexuées et les spores asexuées.

Spores asexuée	Spores sexuée
-Formes des spores très variables. -Assurent la dispersion. - Petite taille. -Sans substance de réserves. -Sans dormance	- Nombre limité de forme. -Assurent la survie et la conservation de l'espèce. -Produites en petit nombre. -grande taille. -Avec substance de réserves. -Dormance

IX.4. Les différents cycles de reproduction chez les moisissures

Chez les champignons, il existe 3 types de cycles de reproductions :

Ø **Monogénétique** : on le retrouve chez les *chitridiomycètes*, *oomycètes* et *zygomycètes*.

Ø **Digénétique** : on le retrouve chez tous sauf les *ascomycètes*.

Ø **Trigénétique** : retrouvé chez les *ascomycètes* et certains *basidiomycètes*.

IX.5. Les différents cycles de reproduction chez les moisissures

IX.5.1. Cycle monogénétique haplophasique du *Mucor*

- ❖ La reproduction sexuée se fait par cystogamie : les progamétocystes grandissent et se divisent chacun en deux segments, le suspenseur et la gamétocyste plurinucléé.
- ❖ Les gamétocystes fusionnent pour former un coenozygote contenant plusieurs noyaux diploïdes.
- ❖ La paroi du coenozygote s'épaissit, pour former une structure résistante aux conditions défavorables du milieu extérieur.
- ❖ Lorsque les conditions redeviennent favorables, un sporocyste se développe. Les noyaux subissent la méiose pour former des spores méiotiques qui après dissémination se développeront pour former de nouveaux mycéliums (dissémination des spores par formation d'un "sporocyste de germination").

Multiplication végétative (en haut du schéma) et Cycle monogénétique haplophasique du *Mucor* (en bas du schéma), (Figure 39).

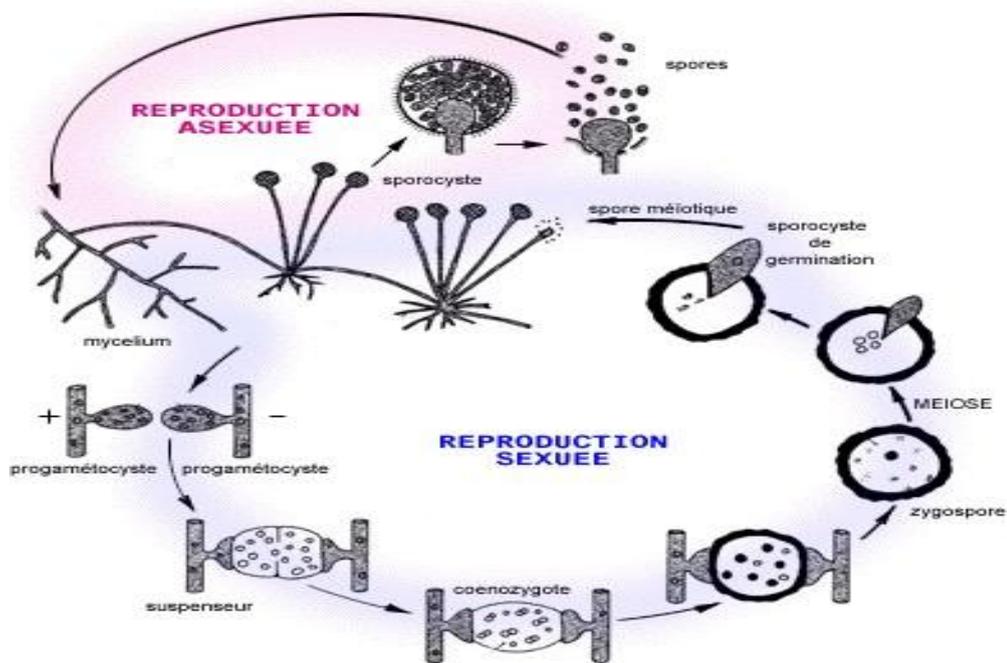


Figure 39 : Cycle monogénétique haplophasique.

X. Classification des moisissures

La classification des champignons est d'abord basée sur un mode de reproduction sexuée ou phase téléomorphe. Ce critère définit quatre des cinq groupes principaux :

Les chytridiomycètes,

Les zygomycètes,

Les basidiomycètes

Les ascomycètes.

Le cinquième groupe est appelé les **Deutéromycètes** ou **Fungi imperfecti**. Ces organismes sont alors classés d'après le mode de production des spores asexuées ou conidies.

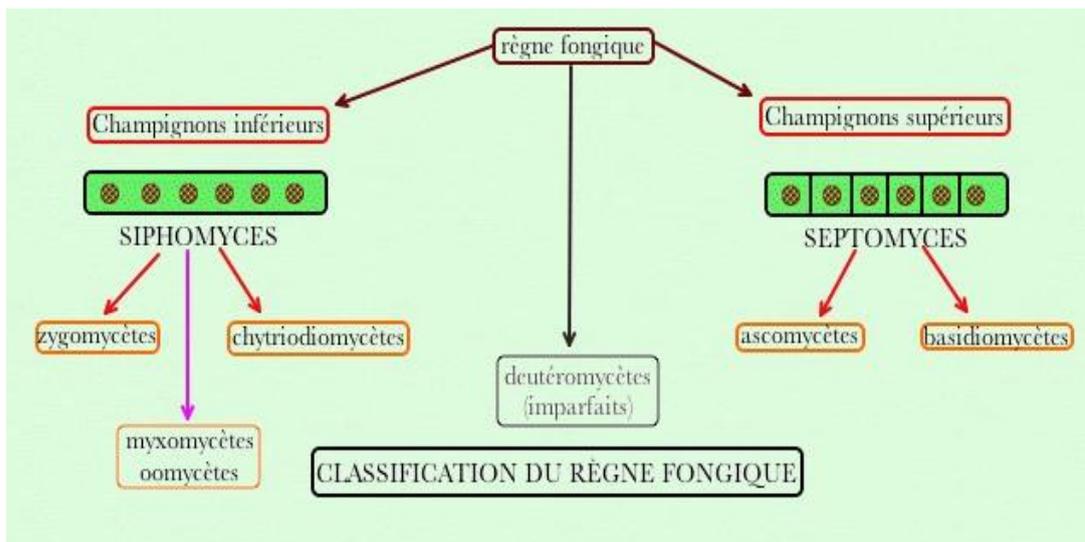


Figure 40 : Classification du règne fongique.

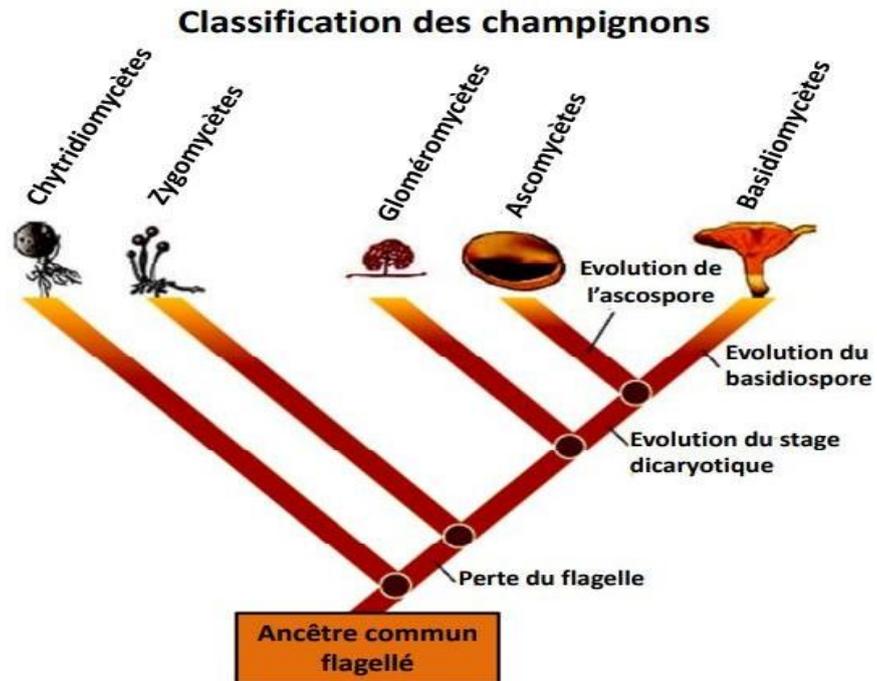


Figure 41: Evolution des champignons (arbre des différents groupes).

X.1. Caractéristiques des différents embranchements de moisissures

Le tableau 08, résume certaines caractéristiques des différents embranchements des moisissures

Tableau 08 : Caractéristiques des différents embranchements des moisissures.

Sous Embranchement	Nature d'hyphe	Reproduction sexuée	Reproduction asexuée	Particularité/ exemple
Chytridiomycotina (790 espèces)	coenocytique	Fusion d'un gamète haploïde avec un œuf immobile.	Zoospores haploïdes, mobile par un flagelle	aquatiques; *champignons primitifs, *Ancêtres de tous les autres champignons. *aussi bien parasites que saprophytes (zoonoses chez les amphibiens).
Zygomycotina (1060 espèces)	coenocytique	Zygosporos	Spore non mobile	<i>Mucorales</i> : <i>Mucor</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Absidia</i>
Ascomycotina (Plus de 48000 espèces)	cloisonné,	Ascospores	Conidies	<i>Saccharomyces</i> , <i>Kluyveromyces</i> , <i>Neurospora</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>A. nidulans</i> Incriminés en pathologie humaine et/ou animale.
Basidiomycotina (environ 30.000 espèces)	cloisonné	Basidiosporos	Bourgeonnement Conidies Fragmentation	*nombreux champignons macroscopiques : <i>Agaricus bisporus</i> , <i>Coprinus</i> , <i>Amanites...</i>
Deutéromycotina (environ 15.000 espèces)	Septé	Absente (ou inconnue)	organes conidiens spores asexuées ou par simple fragmentation du mycélium	un problème contrariant pour les taxinomistes. <i>Candida</i> , <i>Cryptococcus</i> , <i>Rhodothorula</i> , <i>Brettanomyces</i> ; <i>Geotrichum</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>A. niger</i> . responsables d'un grand nombre de maladies des végétaux et humaines.
Glomeromycotina	Généralement coenocytique, rarement septé	Absente ou inconnue	Grosse spore enkystée	*Séparé des zygomycètes que en 2001 *Mycorhiziens obligatoires. *Vivant en symbiose avec les racines d'un grand nombre de plantes

Remarque : En attendant que la plupart des Deutéromycètes puissent trouver leur équivalent parmi les trois phylums précédents, le maintien de cette division s'avère actuellement aussi nécessaire que complémentaire.

XI. Importance des mycètes

Les mycètes sont importants par leurs



XI.1. Effets bénéfiques

XI.1.1. Agro-Alimentaire

- **En fromagerie (Composés aromatiques):** certaines moisissures sont utilisées pour la production de fromage comme le roquefort (*Penicillium roqueforti*) ou le camembert (*Penicillium camemberti*).

P. roquefortii des fromages bleus qui grâce à des enzymes protéolytiques du lait (hydrolyse les protéines dont la caséine donne la texture au fromage) et lipolytiques (hydrolyse les lipides et permettent le développement des arômes au fromage) modifie considérablement le goût du fromage originel. Il est ajouté au départ et l'aération du fromage par piqûre suffit à assurer son développement.

-Le roquefort et les fromages bleus doivent leur couleur aux spores de *Penicillium roqueforti*

Cours de Mycologie

P. camembertii qui utilise l'acide lactique et donc désacidifie et libère des enzymes intervenant dans la fabrication d'arômes.

-Le feutrage blanc à la surface des camemberts est dû à *Penicillium camemberti*

➤ **Dans la fabrication des additifs :** Elles peuvent également servir à la synthèse d'acides organiques comme l'acide citrique ou l'acide gluconique (*Aspergillus niger*, *P. citrinum*). Ces deux types d'acides sont utilisés comme additifs alimentaires.

➤ **La synthèse d'enzymes:**

- **Amylases:** conversion de l'amidon en glucose (*Aspergillus niger* et *A. oryzae*).
- **Invertases:** Hydrolyse du saccharose en glucose et fructose •Très utilisé en confiserie (*Saccharomyces*, *Alternaria*, *Penicillium*).
- **Pectinases:** Clarification des jus de fruit (*Rhizopus*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Botrytis*).
- **Cellulases:** *Trichoderma sp.* dégradent des polysaccharides complexes sont utilisés par DENIM (marque française fabrication jeans) pour donner le caractère blanchi des jeans DENIM lavé à la pierre •Utilisé dans l'alimentation pour bétail pour augmenter la digestibilité de l'hémicellulose de l'orge et d'autres céréales.
- **Laccases :**Dégradation de la lignine •Industrie du papier, des colorants.
- **Pseudoprésure:** la coagulation du lait (*Mucorales*).
- **Hydrolyse du lactose (lactose d'*Aspergillus*).**
- **Antioxydant:** comme la glucose oxydase comme additif des mayonnaises et des œufs en poudre (*Aspergillus niger*).
- **Galactosidase:** produite par *Aspergillus niger* est utilisée pour produire du lait sans galactose.
- **Ligninases: sont utilisées dans l'industrie du papier pour blanchir.**
 - **En charcuterie:** Les moisissures interviennent soit comme contaminants soit pour donner en charcuterie l'aspect blanc extérieur du saucisson. Des bactéries lactiques sont aussi utilisées.

XI.1.2. Rôle écologique

- **Dans la lutte biologique:** Un certain nombre de champignons sont utilisés pour tuer des insectes ou vers nuisibles; *Beauveria bassiana* peut parasiter les insectes, *Arthrobotrys superba* les nématodes. Pour protéger les plantes des microorganismes pathogènes.
- **Bio-pesticides :** molécules actives vis-à-vis des parasites de plantes et animaux Objectif: réduire les intrants chimiques (pesticides) – accroître la durabilité des systèmes agricoles
- **Dépollution et recyclage:** ce sont des décomposeurs de la matière organique du sol (recyclage des nutriments à l'état du CO₂, N₂, N₂O, ions minéraux).

Capables de décomposer plusieurs substances: digestion du pétrole, digestion des plastiques, du bois, des déchets (dégradation des déchets).



Figure 42: Des champignons bio-pesticides : des champignons attaquant les téguments respiratoires et dont le développement mycélien obstrue les canaux respiratoires.

XI.1.3. Industrie Pharmaceutique

Certaines moisissures sont utilisées pour la synthèse de médicaments, notamment d'antibiotiques telles

- La **pénicilline** (*Penicillium chrysogenum*), (*Penicillium notatum*) antibiotique antibactérien.
- Les **céphalosporines** (*Cephalosporium acremonium*), antibiotique antibactérien.

Cours de Mycologie

- **Griséofulvine** (antibiotique antifongique actif contre les dermatophytes) (*Penicillium griseofulvum* = largement répandue dans le sol et les matières en décomposition).
- **Echinocandines** (antibiotique antifongique), (*Glarea lozoyensis* = moisissure du sol isolé d'une rivière, Lozoya - Espagne).
- Cyclosporine très important immunosuppresseur utilisé pour les greffes.

XI.2. Aspects pathologiques

XI.2.1. Chez l'homme

XI.2.1.1. Réactions immunologiques: Allergie de type I : rhinite, conjonctivite, asthme. Allergie de type III : alvéolites allergiques extrinsèques, pneumopathies aiguës ou subaiguës, maladie dite du poumon de fermier.

- Il a été montré que jusqu'à 10% de la population réagirait positivement aux tests d'extraits de moisissures, et pourrait atteindre 27.4% chez les personnes souffrants d'asthme.

XI.2.1.2. Les aspergilloses : Dues à des champignons du genre *Aspergillus* (*A. fumigatus*, *A. flavus*, *A. nidulans*, *A. versicolor*, *A. niger*, *A. terreus*).

- peuvent envahir les organes internes, (les poumons), ex: Aspergillose invasive (*Aspergillus fumigatus*).

XI.2.1.3. Moisissures mycotoxinogènes

Cinq genres de champignons, dits **toxinogènes**, ont la capacité de produire des **mycotoxines** (Tableau 09), si les conditions écologiques leurs sont favorables. Il s'agit des genres : *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Alternaria* et *Claviceps*. Ces moisissures et leurs mycotoxines secrétées sont susceptibles de contaminer l'aliment, du champ jusqu'à l'assiette des consommateurs.

Certaines mycotoxines ont une toxicité aiguë très marquée (exposition unique à une forte dose), Les effets chroniques (exposition répétée à de faibles, voire de très faibles doses) sont les plus redoutés en raison des habitudes alimentaires et du pouvoir de rémanence de ces toxines.

Tableau 09 : effets identifiés ou suspectés des principales mycotoxines et mécanisme d'action cellulaires et moléculaires identifiés expérimentalement sur l'homme et l'animal (AFSSA, 2006).

Toxine	Effets	Mécanisme d'actions cellulaires et moléculaires
Aflatoxine B1 + M1	<ul style="list-style-type: none"> - Hépatotoxicité. - Génotoxicité. - Cancérogénicité. - Immunomodulation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Formation d'adduit à l'ADN. - Peroxydation lipidique. - Bioactivation par cytochromes P450. - Conjugaison aux Glutathion S-transférases.
Ochratoxine A	<ul style="list-style-type: none"> - Néphrotoxicité. - Génotoxicité. - Immunomodulation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Impact sur la synthèse des protéines. - Inhibition de la production d'ATP. - Détoxification par les peptidases.
Patuline	<ul style="list-style-type: none"> - Neurotoxicité. - Mutagenèse <i>in vitro</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inhibition indirecte d'enzymes.
Trichothécènes (Toxine T-2, DON)	<ul style="list-style-type: none"> - Hématotoxicité. - Immunomodulation. - Toxicité cutanée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Induction de l'apoptose sur progéniteur hématopoïétique et cellules immunitaires. - Impact sur la synthèse des protéines. - Altération des immunoglobulines.
Zéaralène	<ul style="list-style-type: none"> - Fertilité et Reproduction. 	<ul style="list-style-type: none"> - Liaison aux récepteurs oestrogéniques. - Bioactivation par des réductases. - Conjugaison aux glucuronyltransférases.
Fumonisine B1	<ul style="list-style-type: none"> - Lésion du système nerveux central. - Hépatotoxicité. - Génotoxicité. - Immunomodulation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inhibition de la synthèse de céramide - Altération du rapport sphinganine/sphingosine. - Altération du cycle cellulaire.

Cours de Mycologie

XI.2.2 Chez le végétal :

Champignons phytopathogènes:

Mildiou: nom générique d'une série de maladies cryptogamiques communes chez de nombreuses plantes. Ex: *Phytophthora infestans* attaque la pomme de terre, et fut responsable entre 1845 et 1849 de la Grande Famine en Irlande.

- Céréales = vecteurs potentiels mycotoxines: 25% de la production mondiale est contaminée par les mycotoxines (FAO).
- Fusarioses peuvent provoquer selon les années et les régions jusqu'à 100% de pertes de rendement des cultures.

XI.2.3. Pertes économiques:

Les moisissures peuvent être à l'origine d'importantes dégradations des propriétés physicochimiques entraînant une altération de la qualité des denrées alimentaires.

XI.2.3.1. Le premier type d'altération

L'altération de la qualité des aliments concerne la qualité dite « marchande ». La prolifération des moisissures, qu'elles soient pathogènes ou non, entraîne des modifications défavorables des caractéristiques diététiques et organoleptiques, tels l'aspect, la texture, l'odeur et la saveur des aliments, avec des conséquences économiques importantes dans l'industrie agroalimentaire.

XI.2.3.2. Le deuxième type d'altération

L'altération de la qualité dite « sanitaire ». La prolifération des moisissures pathogènes entraîne une diminution de l'innocuité des aliments et représentent un risque pour la santé du consommateur.

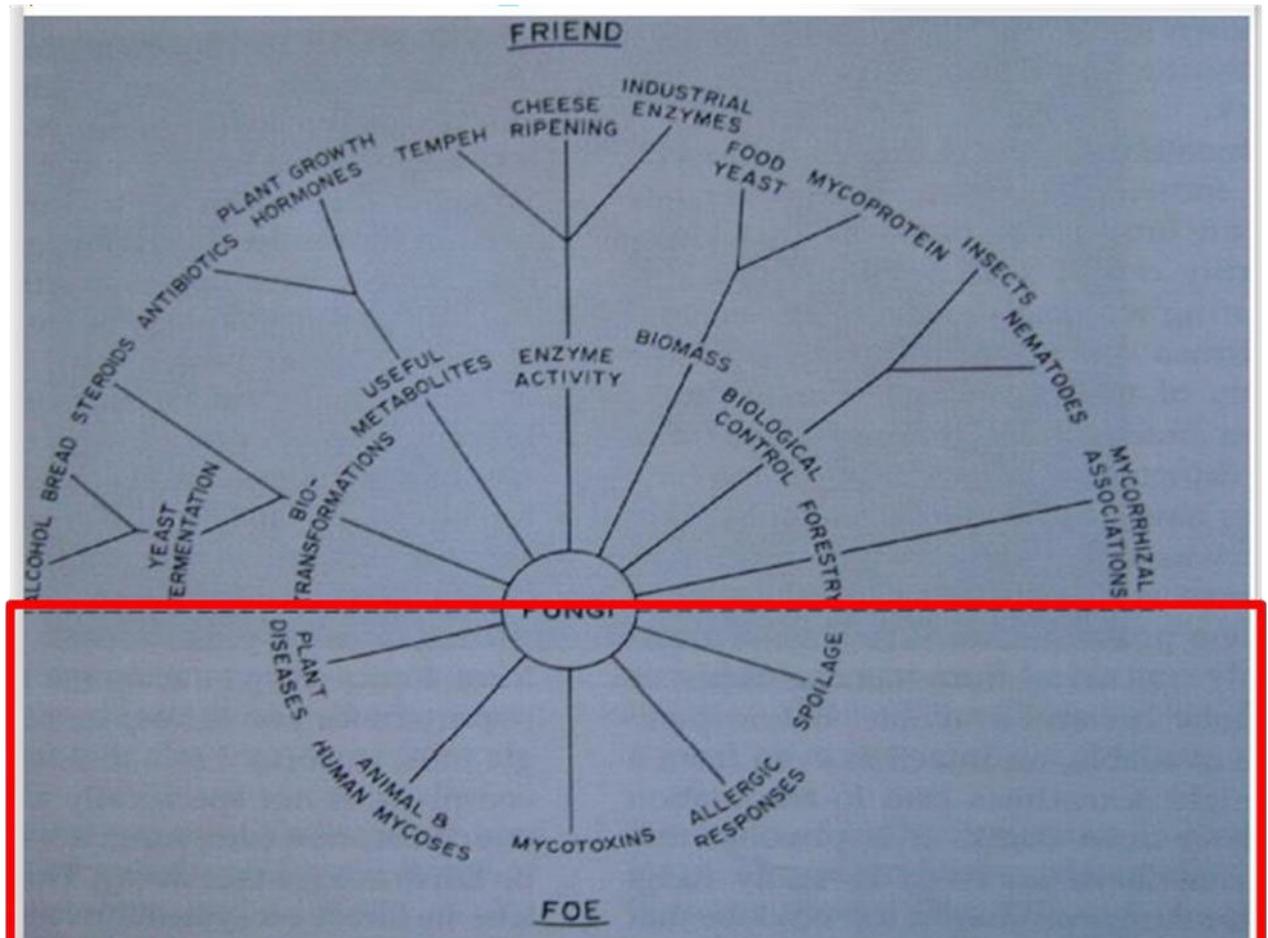


Figure 43: Champignons et homme: amis-ennemis.

Références bibliographiques :

- [1]. **Alayoubi, R. 2019.** Production de bioéthanol à partir d'hydrolysats enzymatiques de substrats (ligno) cellulosiques prétraités par des liquides ioniques. Thèse de Doctorat. Spécialité Biochimie et Génie Cellulaire. Université de Picardie Jules Verne.
- [2]. **Benallaoua, S., Bellal, M. 1995.** L'enveloppe des levures : paroi et membrane cytoplasmique (structure et composition chimique, fonctions, biosynthèse et méthodes d'études). Office des publications universitaires.1995 ISBN : 9961.0.0139.7
- [3]. **Branger, A., Richer, M.M., Roustel, S. 2007.** *Alimentation, sécurité et contrôles microbiologiques*. Educagri Editions.
- [4]. **Charlotte, U. 2015.** Diversité des espèces de levures dans des levains naturels français produits à partir de farine issue de l'Agriculture Biologique : une étude pilote pour analyser les pratiques boulangères et les patterns des communautés microbiennes. Ecologie, Environnement. Université Paris Sud - Paris XI, 2015. Français. ffNNT : 2015PA112007ff. fftel-01249573f. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01249573/document>
- [5]. **Delarras, C. 2007.** Microbiologie pratique pour le laboratoire d'analyses ou de contrôle sanitaire : Aliments. Produits cosmétiques. Eaux. Produits pharmaceutiques. Ouvrage de 476 p. LAVOISIER TEC & DOC.
- [6]. **De Larras, C. 2014.** *Pratique en microbiologie de laboratoire? Recherche de bactéries et de levures-moisissures*. Lavoisier.
- [7]. **Gagnon-Arsenault, I. 2010.** Etude de la fonction et des mécanismes de maturation de l'aspartyl peptidase yps1 chez la levure *Saccharomyces cerevisiae*. Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de doctorat en biochimie pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.). Département de biochimie et de microbiologie faculté des sciences et de génie université Laval Québec.
- [8]. **Haingomalalarisoa, L.B. 2016.** Biotechnologies isolement et identification des levures sauvages de six fruits tropicaux : *Persea americana*, *Syzygium jambos*, *Dyopsis lutescens*, *Mangifera indica* variété *Ruby* et *Valencia*, *Citrus sinensis* récoltés dans deux régions de madagascar (*Atsinanana* et *Boeny*). Faculté des sciences domaine : sciences et technologies mention : biochimie fondamentale et appliquée.
- [9]. **Hencké, S. 2000.** Utilisation alimentaire des levures. Diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie. Faculté de pharmacie. Université Henri Poincaré - NANCY I.
http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCDPHA_T_2000_HENCKE_STEPHANIE.pdf

- [10]. **Joshua, C.M. 2003.** Yeast as a Model Genetic Organism. University of California at Davis, Davis, California, USA Sean M Burgess, University of California at Davis, Davis, California, USA. Chapter · March 2003 DOI: 10.1038/npg.els.0000821.
- [11]. **Labrani, F.Z.K. 2015.** Activité « Killer » chez des levures isolées des sols du Nord-Est Algérien : Purification, caractérisation et effet sur les souches de levures indésirables. Thèse de doctorat en sciences. Université des Frères Mentouri Constantine. PP 3 12. Soutenue le : 28/10/2015à Constantine 2014/2015. <https://bu.umc.edu.dz/theses/biologie/LAB6794.pdf>
- [12]. **Laouar, A. 2020.** Caractérisation physicochimique et microbiologique de deux variétés de dattes " Hmira ,Feggous" et production de bioéthanol à partir de rebuts de dattes " Hmira". Année universitaire : 2019-2020. Université Tahri Mohamed Béchar Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie Département de Biologie Laboratoire de Valorisation des Ressources Végétales Sécurité Alimentaire.
- [13]. **Loudiki, M. 2022.** Cours de Biologie végétale (Botanique):Biologie des Cyanobactéries et des ThallophytesBiologie des Cyanobactéries et des Thallophytes. Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad. Consulté en Mars 2022. <https://www.docsity.com/fr/biologie-de-cyanobacteries-et-des-thallophytes/8269869/>
- [14]. **Madigan, M. 2007.** Brock biologie des micro-organismes.
- [15]. **Mohammad, S. 2013.** Etude et caractérisation de l'état «Viable mais Non Cultivable Institut Universitaire de la Vigne et du Vin Etude et caractérisation de l'état «Viable mais Non Cultivable. THÈSE Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Bourgogne Discipline : Sciences de l'alimentation.
- [16]. **Nguyen, T.D. 2016.** Protection de la levure *Saccharomyces cerevisiae* par un système biopolymérique multicouche : effet sur son activité métabolique en réponse aux conditions de l'environnement. Microbiologie et Parasitologie. Université de Bourgogne, 2016. Français. ffNNT : 2016DIJOS020ff. ffe1 01510068f.
- [17]. **Perry, J. J. 2004.** Microbiologie.
- [18]. **Prescott, L.M., Willey, J.M., Sherwood, L.M., Woolverton, C.J. 2018.** *Microbiologie*. De Boeck Supérieur.
- [19]. **Rezki-Bekki, M.A. 2014.** Production de métabolites par les levures : caractérisation et identification des arômes et des alcools. Thèse de doctorat en biotechnologie. Université d'Oran.
- [20]. **Sahel, N., Moussaoui, A. 2015.** Qualité mycologique et mycotoxicologie de couscous et Hrouar artisanaux. Éditions universitaires européennes.
- [21]. **Solari, A.J. 2002.** Primitive forms of meiosis: The possible evolution of meiosis. Centro

de Investigaciones en Reproducción, Facultad de Medicina (UBA), Buenos Aires (1121), ARGENTINA. <https://www.researchgate.net/publication/11316512>

[22]. **Stéphane, B., Colas, P., Blondel, M. 2020.** Modèles alternatifs : La levure modèle et outil aussi pour la recherche thérapeutique. <https://doi.org/10.1051/medsci/2020077>.

[23]. **Thuriaux, P. 2004.** Les organismes modèles la levure. Collection Belin Sup Biologie - Date de parution : 07/10/2004

Sites web :

[1].

https://www.castlemalting.com/Presentations/Brochure_Fermentis_Tips_and_Tricks_FR_new.pdf

[2]. <https://fr.dreamstime.com/levure-saccharomyces-cerevisiae-image132762041>

[3]. <https://microbenotes.com/differences-between-yeasts-and-molds/>

[4]. Les microorganismes eucaryotes Chap.3 les protozoaires Dr. GHORRI Sana
<https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/bapp/2019/microorganismes%20eucaryotes.pdf>

[5]. Morphologie et Physiologie des Mycètes LBIO 1213.

Morphologie et Physiologie des Mycètes LBIO 1213

[6]. [http://staff.univ-](http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/noumeur_sararaouia/files/chap_1generalites_sur_les_champignons_mycologie_medicale.pdf)

[batna2.dz/sites/default/files/noumeur_sararaouia/files/chap_1generalites_sur_les_champignons_mycologie_medicale.pdf](http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/noumeur_sararaouia/files/chap_1generalites_sur_les_champignons_mycologie_medicale.pdf).