

Introduction

1. C'est quoi la botanique ?

C'est la science qui se spécialise dans l'étude des plantes ou les végétaux.

« Une plante ou un végétal : organisme pluricellulaire qui présente une paroi pecto-cellulosique, photosynthétique (autotrophe) ».

2. Historique sur la botanique :

- 2200 AJC: une centaine de plantes étaient cultivées
- 372-287 AJC: Livre « Histoire des plantes »: décrit un système de classification qui distingue entre les herbes, lianes, arbres et arbrisseau : 480 espèces listées.
- 17^{ème} siècle: John Ray a décrit 18 000 espèces et Tournefort a décrit 10 000 plantes en 700 espèces et 22 classes. Les familles sont séparées sur la base des pièces florales (apétales, monopétales, polypétales). Tournefort est le père du concept du **genre**

Jusqu'au 17^{ème} siècle, les plantes ont été nommées par des noms vernaculaires. Cependant, une plantes peut avoir plusieurs noms.

- 18^{ème} siècle: Carl Von Linné: présente un système basé sur des caractères numériques en donnant une grande importance **aux étamines (nombre, disposition et longueur): une classification artificielle**. Linné développa **la nomenclature binomiale**
- **1753**: première flore mondiale publiée avec 40 000 genres.
- Avec l'utilisation des microscopes: la classification naturelle a été adoptée.
- A partir des espèces décrites par Linné et Tournefort, Jussieu et al (1759) créent le concept de **famille** (plantes ayant en commun un certain nombre de caractères. Sur le même principe, d'autres botanistes inventent des divisions supérieures : **ordre, classe, embranchement**.
- 19^{ème} siècle: Lamarck et Darwin ont développé la théorie de l'évolution:
« Les espèces sont considérées comme une forme issue de l'évolution d'espèces parentales; ces espèces peuvent elles-mêmes évoluer vers d'autres espèces sous l'influence des conditions du milieu ou des mutations »
- 1950: Hening a élaboré le concept du **parenté phylogénétique ou clastidique** (du grec ancien *φύλον*, phylon, signifiant « race, tribu, espèce »)
« La preuve d'une parenté phylogénétique entre différents taxons n'est fournie que lorsqu'ils partagent les mêmes caractères dérivés ».
- Les premiers cladogrammes ont été construits à partir **des caractères morphologiques**.
- **Depuis 1985**: le développement de la biologie moléculaire a fait révolutionner **la systématique**. La comparaison des séquences complètes des **ARN 16 S, des ARN 18 S, macromolécules** présentes chez les êtres vivants, a permis à Olsen d'établir le premier arbre du vivant.

La phylogénie moléculaire est née et la **classification** des êtres vivants devient de plus en plus précise.

3. Classification, Taxonomie et Systématique :

3.1. Classification

On appelle classification, le classement des êtres vivants en groupes plus ou moins importants, en utilisant des critères bien choisis (un critère est un caractère que possèdent les êtres vivants et qui peut être utilisé pour les classer). Les disciplines impliquées dans la classification sont : la systématique et la taxonomie.

3.2. Systématique

La systématique cherche à établir une description des espèces et les organiser les unes par rapport aux autres au sein d'une classification en s'intéressant aux relations évolutives entre les espèces.

3.3. Taxonomie

La taxonomie s'occupe de l'attribution des noms (la nomenclature) et de la construction des **systèmes hiérarchiques**.

- **Hiérarchisation taxonomique**

Devant l'immensité du nombre des organismes, il est nécessaire de ranger et de mettre en ordre les taxa (taxon) dans un système hiérarchique.

(Un taxa : est une entité conceptuelle qui est censée regrouper tous les organismes vivants possédant en commun certains caractères taxonomiques bien définis).

Les taxa les plus utilisés sont donnés ci-dessous (exemple de blé dur) :

- **Règne** : Plantae
- **Embranchement** : Liliophyta (Phanérogames)
- **Sous-embranchement** : Angiospermes
- **Classe** : Liliopsida
- **Sous-classe** : Commelinidea
- **Ordre** : Graminales
- **Famille** : Poaceae (Gramineae)
- **Tribu** : Triticeae
- **Genre** : *Triticum*
- **Espèce** : *durum* L.

Les suffixes utilisés pour désigner les groupes régis par le code de nomenclature botanique (De Riviers, 2002) sont les suivants :

Rang du taxon	Algues	Champignons	Embryophytes
Embranchement (Phylum)	-phyta	-mycota	-phyta
Classe	-phyceae	-mycetes	-opsida
Sous-classe	-phycidae	-mycetidae	idae
Ordre	-ales	-ales	-ales
Famille	-aceae	-aceae	-aceae
Sous-famille	-oideae	-oideae	-oideae
Tribu	-eae	-eae	-eae
Sous-tribu	-inea	-inea	-inea

3.4. Règles de nomenclature botanique

La nomination des espèces repose sur le code international de nomenclature botanique. Le dernier code remis à jour a été adopté par le 17^{ème} congrès de botanique de Vienne en 2005. Le nom d'une plante est toujours **un binôme latinisé**. Le nom de genre débute par une Majuscule et s'écrit en *italique* ou est souligné comme par exemple : *Ulva*, *Avena*, *Medicago*, *Lens*.

Le nom d'espèce est écrit en minuscule, en *italique* ou souligné : *lactuca*, *sterilis*, *truncatula*, *culinaris*. Le binôme nomenclatural est suivi du nom (ou du nom abrégé) du premier auteur qui a décrit la plante, par exemple : *Avena sterilis* L. (L. pour Linné), *Lens culinaris* Medik. (Medik. pour Medikus).

3.5. Notion d'espèce

L'espèce est l'unité de base de la classification botanique. Selon Mayr (1984), la définition de l'espèce est un groupe de populations naturelles capables d'intercroisement (inter fécondation). Dans la pratique, l'espèce est considérée comme une unité systématique fondée sur les ressemblances (ensemble de tous les individus d'aspect semblable ayant en commun certains caractères qui les distinguent au sein d'un même genre)

Les plantes d'une même espèce ont des caractères physiologiques identiques qui sont transmissibles héréditairement, elles peuvent évoluer soit par un changement brutal ou mutation qui affecte les gènes ou les chromosomes. Une espèce peut se subdiviser en plusieurs variétés ou races.

4. Classification du monde du vivant et place des végétaux :

4.1. La classification des deux règnes de Linné (1753)

Linné (1753) a divisé les êtres vivants en **animaux** et **végétaux (plantes)**. Il a classé les champignons dans le règne végétal. Les organismes unicellulaires ou protistes se répartissent entre les deux règnes (**Fig. 1**).

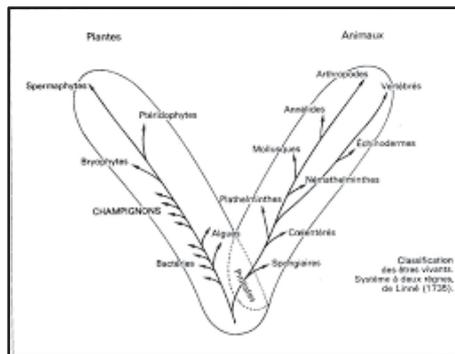


Fig.1 : Schéma de classification de Linné (1753)

4.2. La classification des cinq (5) règnes de Whittaker (1969)

Au 20^{ème} siècle, avec les progrès de la microscopie, on a pu observer et décrire les organismes unicellulaires et jusque vers les années 1950, le monde du vivant est subdivisé en trois règnes : bactéries, végétal, animal. Dans ce système à trois règnes, les algues bleues (bien que procaryotes) sont classées parmi les végétaux.

Whittaker en 1969 a développé la classification du monde du vivant pour aboutir à la constitution des cinq règnes selon la biologie (**Fig. 2**):

- **Les procaryotes** (Monères = Monera, bactéries et archéobactéries)
- **Les protistes** (Protista, eucaryotes unicellulaires)
- **Les champignons** (Fungi, eucaryotes pluricellulaires, hétérotrophes et absorbotrophes)
- **Les végétaux** (Plantae, eucaryotes pluricellulaires, autotrophes)
- **Les animaux** (Animalia, eucaryotes pluricellulaires)

D'après la classification en 5 règnes, au cours de l'évolution cellulaire des organismes s'est produite une coupure fondamentale qui distingue le groupe des eucaryotes et celui des procaryotes.

Les procaryotes sont unicellulaires, et leur matériel génétique n'est pas enfermé dans un noyau. Ils se multiplient par scissiparité. Ils constituent le premier règne.

Tous les autres organismes sont appelés des eucaryotes. Leur matériel génétique est enfermé dans un noyau, ils possèdent des organites cellulaires, la multiplication des cellules a lieu par mitose et ils présentent souvent une reproduction sexuée.

Les eucaryotes peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires. Les eucaryotes unicellulaires sont appelés **des protistes** et constituent le second règne.

Enfin, les eucaryotes pluricellulaires sont divisés en 3 règnes : les champignons, les végétaux et les animaux.

Le règne végétal est traditionnellement subdivisé en deux grands groupes en fonction de l'organisation structurale du végétal :

- **Thallophytes** : ce sont des organismes non vascularisés. Leur appareil végétatif est un organe foliacé peu différencié, parfois ramifié (thalle) dont les cellules ne sont pas organisées en tissus avec absence de tige, feuilles et racines ; les cellules reproductrices (spores et gamètes) sont produites dans des cystes (sporocystes et gamétocystes).
- **Cormophytes ou embryophytes** : ces plantes sont caractérisées par un corne (cormus = rameau ou tronc), c'est-à-dire que leur appareil végétatif repose sur des structures dressées en tiges. Les cellules sont organisées en tissus regroupés en organes (tige, feuilles et racines). Les cellules reproductrices sont produites dans des structures reproductrices pluricellulaires (gamétange et sporange). Parmi les cormophytes, seuls les trachéophytes sont vascularisés (xylème + phloème). Ils regroupent les bryophytes, les ptéridophytes, les pré spermaphytes et les spermaphytes.

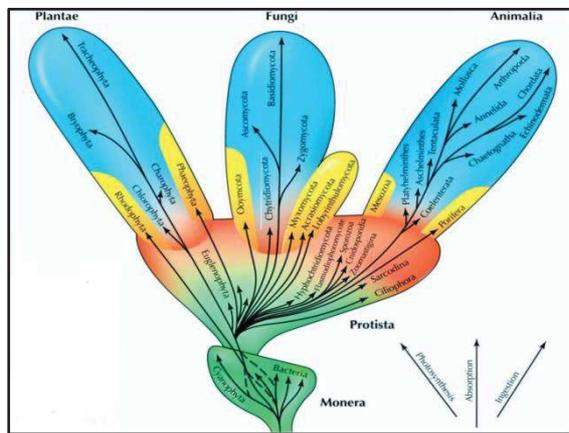


Fig.2 : Schéma de classification de Whittaker (1969)

4.3. La classification actuelle dite « phylogénétique »

Actuellement, sur la base de l'analyse des séquences génétiques codant pour la petite sous-unité des ARN ribosomiques 16S présente chez tous les êtres vivants procaryotes et la petite sous-unité des ARN ribosomiques 18S présente chez tous les êtres vivants eucaryotes, le monde vivant est subdivisé en 3 grands domaines (Fig.3):

- **Bacteria**
- **Archeae**
- **Eucarya**

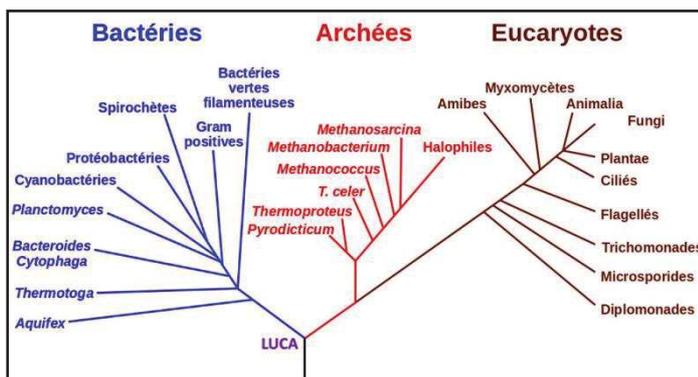


Fig.3: la subdivision du monde vivant en trois grands domaines (Woese *et al.*, 1990) (LUCA : Last Universal Common Ancestor: dernier ancêtre hypothétique commun à tous les êtres vivants).

La classification phylogénétique postule que toutes les espèces proviennent d'un ancêtre commun hypothétique. Elle suppose que l'on regroupe les êtres vivants en fonction de leur lien de parenté

(*phylogénie = qui est proche de qui*). Tout groupe systématique (ou taxon) renferme donc des êtres vivants proches entre eux génétiquement (ce qui n'est pas toujours corrélé avec à une ressemblance phénotypique globale). Les liens de parenté entre deux membres d'un taxon sont toujours plus étroits que les liens de parenté d'un membre quelconque du groupe et un être vivant extérieur du groupe.

Séquence d'ARN de l'espèce A	AGCTGTG C AATG
Séquence d'ARN de l'espèce B	AGCTGTG A AATG
Séquence d'ARN de l'espèce C	AGCTGTG A AATG

Les séquences d'ARN des espèces B et C sont identiques contrairement à la séquence du même ARN chez l'espèce A.

• L'espèce B est donc plus proche de l'espèce C comparativement à l'espèce A.

• **Groupes monophylétiques, para phylétiques et polyphylétiques**

Supposons 5 taxons A, B, C, D et E, reliés entre eux par des relations de parenté représentées sur la figure 1a : 1, 2, 3 et 4 sont des ancêtres éteints. On peut regrouper de différentes façons ces 5 taxons (**fig. 4**):

- Certains regroupements sont constitués d'organismes ayant un ancêtre commun (ici, l'ancêtre 2) et contenant tous les descendants de cet ancêtre commun. Ce sont des groupes monophylétiques. On les définit sur le partage de caractères communs et acquis par cet ancêtre, les synapomorphies. Sur la figure 1b, les groupes **x** (descendants de 2), **A+B** (descendants de 1) et **D+E** (descendants de 3), sont **monophylétiques**.
- D'autres regroupements comprennent des organismes ayant un ancêtre commun mais excluent au moins un sous groupe monophylétique descendant de cet ancêtre. Ce sont des groupes paraphylétiques, comme le groupe **y** sur la figure 1b (il comporte des descendants de l'ancêtre 4, mais pas les descendants de 1, c'est-à-dire A et B). **A+B+C+D** est aussi **paraphylétique**.
- Un troisième type n'est ni mono-, ni para-phylétique, et regroupe plusieurs groupes monophylétiques et/ou des espèces indépendantes. Dans ce cas, à l'inverse des regroupements paraphylétiques, le dernier ancêtre commun à tous les membres n'est pas dans le groupe. Ce sont des groupes **polyphylétiques**, sans ancêtre commun exclusif.

Sur la figure 1b, le groupe **z** est polyphylétique (C descend de 2 et D descend de 3 ; certes, tous deux descendent de 4, mais de nombreuses autres lignées également : A, B et E). **A+D+E** est par exemple aussi polyphylétique.

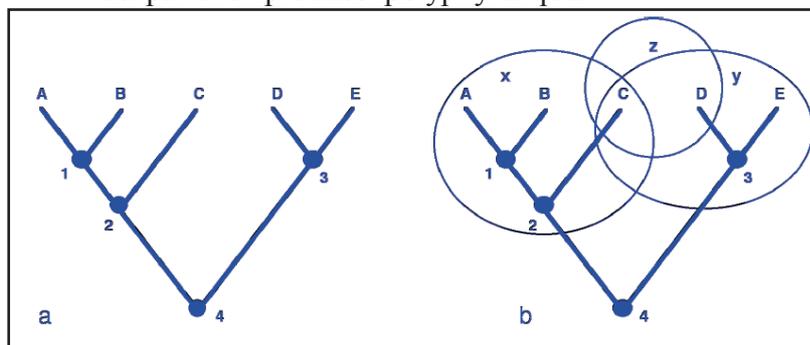


Fig.4 : Arbre fictif (a), avec illustration (b) de groupes monophylétique (x), paraphylétique (y) et polyphylétique (z).

Dans le taxon des eubactéries, on distingue de nombreux groupes parmi lesquels figurent les cyanobactéries (groupes de bactéries photosynthétiques).

Les Archeae (organismes unicellulaires sans noyau) sont des extrémophiles et peuvent survivre et pulluler dans les environnements les plus hostiles comme les marais salins, les sources hydrothermales, les glaciers polaires, les rejets acides de certaines mines, etc...

Les Archées se distinguent des eubactéries par certains caractères biochimiques, comme la constitution de la membrane cellulaire qui est constituée d'éther-lipides spécifiques permettant une résistance aux milieux extrêmes ou aussi par le mécanisme de réplication d'ADN.

Les eucaryotes sont subdivisés aux 5 règnes :

- Plantae
- Animalia
- Fungi
- Chromista
- Ptozoa

Les plantes sont à leur tour, subdivisées à :

- Lignée brune (algues brune)
- Lignée verte : divisée en :
 - ✓ Glaucophytes
 - ✓ Rhodobiontes (Algues rouges)
 - ✓ Chlorobiontes (Plantes vertes)

Les chlorobiontes sont subdivisée en chlorophytes (algues vertes) et embrophytes (**Fig. 5**)

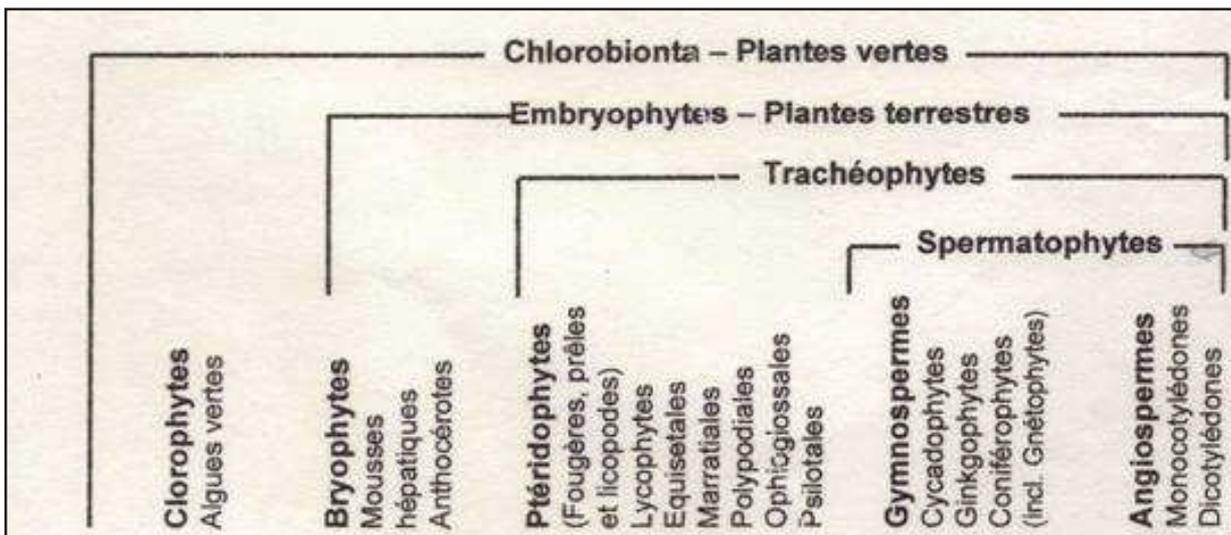


Fig.5 : Schéma simplifié de la classification actuelle des plantes vertes

PREMIERE PARTIE: les thallophytes (Algues et Champignons)

I. Les Algues

Les algues sont des êtres vivants autotrophes photosynthétiques qui contiennent toujours de la chlorophylle **a** et divers autres pigments surnuméraires. Elles peuvent être unicellulaires ou pluricellulaires. Les algues sont des cryptogames (c'est-à-dire des végétaux dont l'appareil reproducteur est caché) et thallophytes (appareil végétatif est un thalle). Leurs habitats sont variés, mais leur cycle de reproduction nécessite absolument de l'eau (pour la reproduction). Leur morphologie est très diversifiée.

La classification des algues est basée également sur :

- L'ultrastructure des plastes
- La présence des pigments : chlorophylles a, b, c et pigments surnuméraires, ainsi que sur :
- La morphologie du thalle
- Le type de réserves et leur localisation
- La reproduction sexuée

I.1. Les Algues procaryotes (Cyanophytes / Cyanobactéries)

Les cyanophytes ou cyanobactéries « algues bleues » c'est un groupe primitif d'algues et les plus anciennes plantes à chlorophylle. Elles renferment 150 genres et 2000 espèces. Ce sont les seules algues procaryotes. Elles possèdent de la **chlorophylle a**. Elles contiennent des **phycobilisomes** (pigments surnuméraires). Elles ne possèdent jamais de flagelles.

Les cyanobactéries sont des organismes formés de cellules ou de filaments microscopiques mais qui se développent souvent simultanément pour former des colonies visibles à l'œil nu (amas ou filaments). Les cyanobactéries ont un intérêt écologique: réduisent le CO₂ en matière organique (séquestration du C), réalisent la photosynthèse (production d'O₂) et fixation de l'azote atmosphérique (bon fertilisant azoté) et intérêt économique: production de protéines, vitamines, acides gras, pigments et compléments alimentaires (cas de la spiruline par exemple).

I.1.1. Caractères cytologiques

Les cellules des cyanobactéries sont entourées d'une gaine mucilagineuse hygrosopique plus ou moins importante, commune à plusieurs cellules. Le rôle de cette gaine mucilagineuse est de doter les cyanobactéries de mouvement par glissement (fig.6).

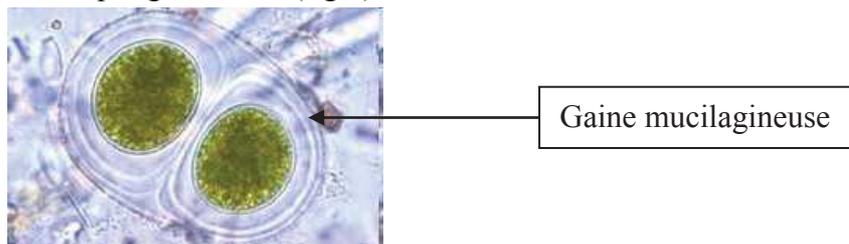


Fig.6 : Cellules de cyanobactéries entourées d'une gaine mucilagineuse (*Chroococcus turgidus*)

La paroi cellulaire est une paroi constituée de quatre couches. Les trois premières, sont composées de glucides, lipides et protéines et la couche interne d'acide muranique. Cette dernière couche est un peptidoglycane complexe ou l'unité glyco protéique élémentaire est constituée d'un dioside sur lequel se fixe un tétra peptide latéral.

L'ultra structure des cyanobactéries indique l'absence de noyau et d'organites cellulaires. Au microscope électronique, on distingue deux zones différenciées (fig. 7):

- **Le centroplasme**: situé dans le centre de la cellule, contient l'ADN, des plasmides circulaires et des réserves.
- **Le chromatoplasme**: une zone périphérique, contient les thylakoïdes (compartiments membranaires) qui assurent la photosynthèse, la respiration et fixation d'azote (certaines espèces)

seulement qui fixent l'azote). Les thylakoïdes portent, en plus des pigments photosynthétiques (chlorophylle a et c), le carotène, la phycocyanine et la phycoérythrine.

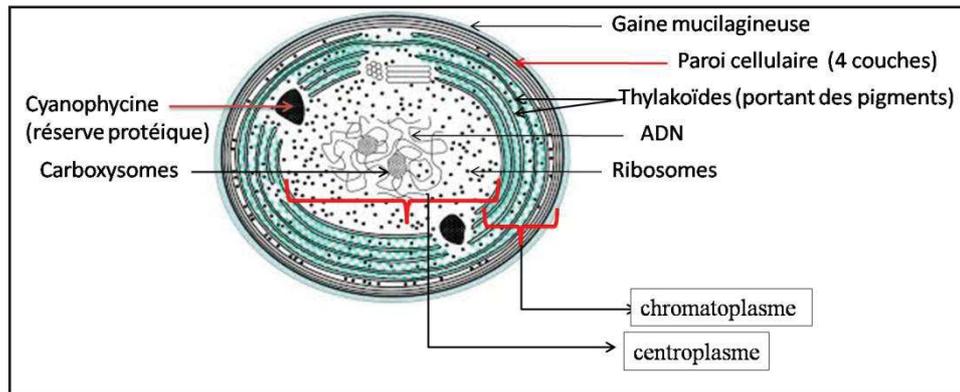


Fig. 7 : Morphologie d'une cellule de cyanobactérie

I.1.2. Morphologie et appareil végétatif des cyanobactéries

Les cyanobactéries vivent soit en unicellulaires (fig.8/a), en colonies non filamenteuses (fig.8/b) ou en colonies filamenteuses (fig.8/c).

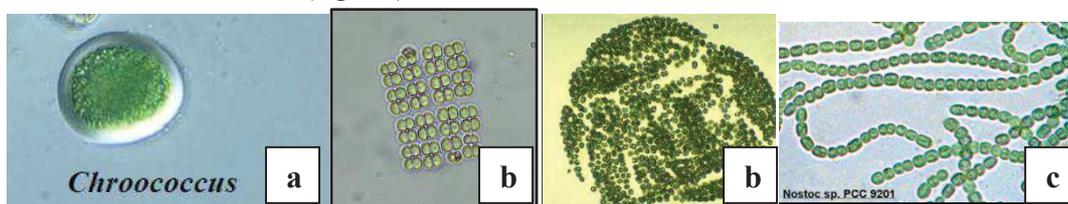


Fig.8 : Différentes formes des cyanobactéries sous microscope

Chez les formes filamenteuses, on appelle trichome la file de cellules et le filament c'est l'ensemble du trichome et de la gaine mucilagineuse entourant le trichome lorsqu'une gaine est formée. L'appareil végétatif est **un thalle archaïque (archéthalle)**.

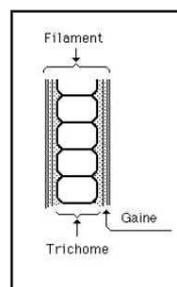


Fig.9 : Filament d'une cyanobactérie

En plus de la cellule végétative décrite ci-dessus, on peut trouver deux formes de cellules (**fig.10**) :

- **L'hétérocyste** : est une cellule transparente, à paroi épaisse, habituellement translucide, qui se rencontre chez certaines cyanobactéries (dites hétérocystées). Il est le site de la fixation d'azote et se forme à partir des cellules végétatives en conditions de manque d'azote. Il est caractérisé par la présence de nodules polaires aux points d'attache aux cellules végétatives. Suivant les espèces on rencontre des hétérocystes intercalaires et/ou terminaux.

Les hétérocystes peuvent être circulaires, ovales, triangulaires, canes ou rectangulaires.

- **Les akinètes** : sont des spores immobiles (absence de flagelle) produites chez les formes hétérocystées. Elles sont résistantes aux conditions défavorables et demeurent viables sur de longues périodes (passage à l'état de vie ralentie ou en dormance), elles se forment lorsque les conditions de l'environnement deviennent défavorables comme par exemple: faible luminosité, températures basses, changement de pH, faible concentration d'éléments nutritifs et déshydratation.

On les distingue par leur grande taille, leur forme, leur pigmentation modifiée, leur paroi épaisse et la présence de nombreux granules cytoplasmiques. Les akinètes peuvent être lisses ou ornementés. Les akinètes peuvent se former n'importe où sur le filament. On observe cependant souvent une localisation préférentielle au voisinage des hétérocystes.

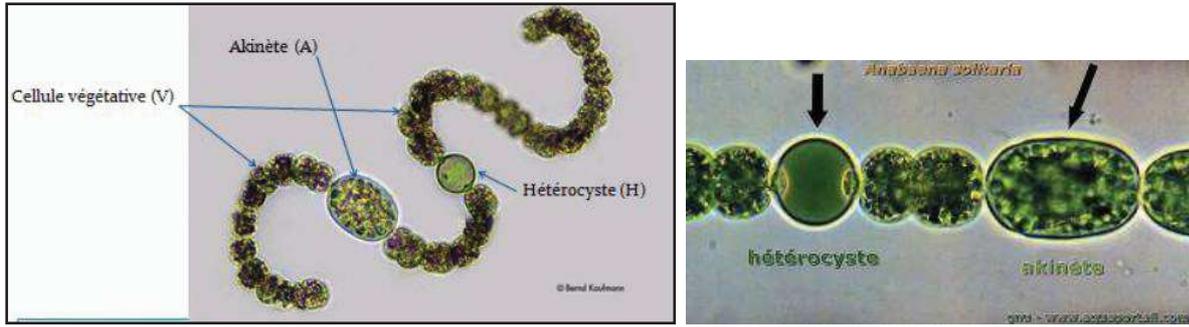


Fig.10 : Cellules végétative, hétérocyste et akinète chez les cyanobactéries filamenteuses (ex : *Nostoc sp.* et *Anabaena sp.*)

A partir de la morphologie générale des cyanobactéries observée par microscopie photonique, on distingue 7 groupes :

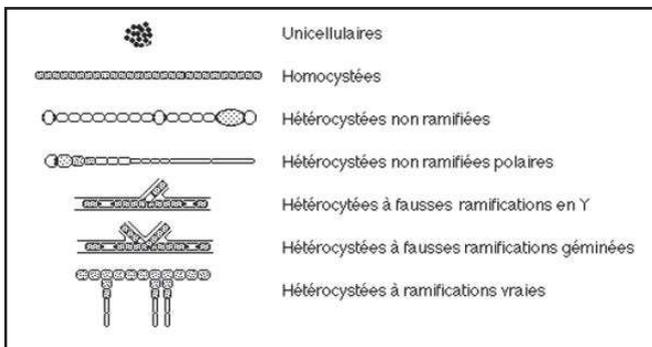


Fig.11 : les différentes formes des cyanobactéries

I.1.3. La reproduction chez les cyanobactéries

Il n'y a pas de reproduction sexuée chez les cyanobactéries. Elles se reproduisent par scissiparité binaire (division végétative) (fig. 12)

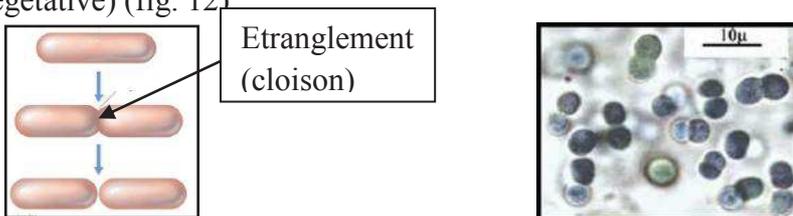


Fig.12 : Scissiparité binaire chez les cyanobactéries

La reproduction peut se faire aussi par des spores unicellulaires (coccospores):

- Endospores : qui se forment à l'intérieur d'une cellule végétative mère dont le cytoplasme se divise et dont la paroi devient l'enveloppe du sporocyste.
- Exospores qui se forment par une succession de divisions transversales qui bourgeonnent en spores ou peuvent restés attachés en chaplet.

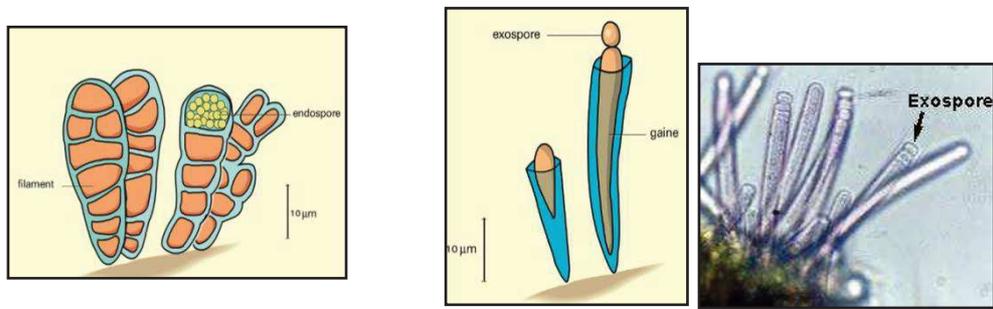


Fig. 13 : les endospores et les exospores chez les cyanobactéries

Ainsi, les fragments de thalles libérés peuvent se développer et former un nouveau thalle. Ces fragments de thalles sont dits : **hormogonies**.

Les hormogonies : un groupe de cellules qui s'échappent à l'extrémité de la gaine chez certaines cyanobactéries filamenteuses. **Les hormogonies** peuvent aussi être le résultat de la germination des akinètes.

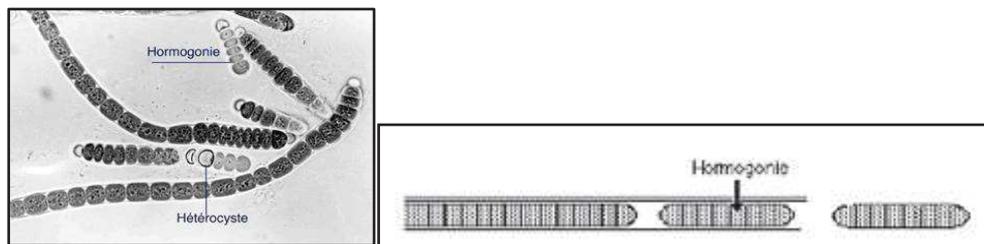


Fig. 14 : les hormogonies

I.1.4. Taxonomie des cyanobactéries

L'embranchement des **Cyanophytes** forme une seule classe les **Cyanophyceae**, elle-même divisée en deux sous classes :

a) Sous classes des Coccogonophycidae

Elle regroupe tous les cyanophytes ayant une forme solitaire, coloniale ou parfois filamenteuse mais sans hormogonies. Ils se multiplient par coccospores. Cette sous classe comprend trois ordres :

Ordre1 : Chroococcales : elle comprend deux familles dont la plus importante **Chroococcaceae** représentée par les genres : **Gleocapsa, Microcystis et Merismopedia**

Ordre2 : Chamaesiphonales: ils se reproduisent par des endospores et des exospores, Il est représenté par les genres suivants : **chamaesiphon et Entophyalis**

Ordre3 : Pleurocapsales : renferment des filaments simples et se reproduisent par des endospores. Parmi les genres représentatifs : **Pleurocapsa**.

b) Sous classes des Hormogonophycidae

Ce sont des cyanophytes ayant généralement des formes filamenteuses : trichomes simples, ramifiés. Dans cette sous classe, on rencontre des espèces à **hétérocystes** et à des **akinètes**. Cette sous classe comprend **deux ordres** :

Ordre1 : Nostocales : Cet ordre comprend **3 familles** :

- **Famille1 : Oscillatoriaceae** : caractérisée par l'absence de ramifications avec absence d'hétérocystes et d'akinètes. On citera comme genres représentatifs : **Oscillatoria**, avec thalle filamenteux simple (trichome), absence d'hétérocystes et akinète.
- **Famille2 : Nostocaceae** : caractérisée par l'absence des ramifications mais présence des cellules spécialisées (hétérocystes et akinètes). Comme genres représentatifs : **Nostoc et Anabaena**
- **Famille3 : Rivulariaceae**

Caractérisée par un trichome effilé, avec présence d'hétérocystes et d'akinètes. Comme genres : **Gleotricha et Calothrix**

Ordre2 : Stigonimatales / Famille: Stigonemataceae

I.2. Les Algues eucaryotes

Les algues eucaryotes (uni ou pluricellulaires) peuvent être vertes, brune ou rouge.

I.2.1. Morphologie de l'appareil végétatif

L'appareil végétatif (thalle) des Phycophytes est de formes très variées, depuis le type unicellulaire jusqu'aux filaments ramifiés. Les thalles sont classés selon leur degré de complexité. On peut ainsi distinguer:

➤ Archéthalle

Ce type de thalle se rencontre chez les formes les plus simples. Il concerne les algues unicellulaires (*Chlamydomonas*, *Euglena*) et certaines algues vertes filamenteuses simples (*Spirogyra*).

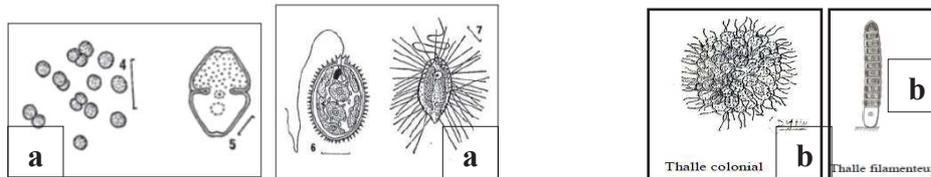


Fig. 15 : Archéthalle unicellulaire (a) et pluricellulaire (b)

➤ Protothalle (nématothalle) :

Ce sont des thalles filamenteux ramifiés. Ils peuvent être **tubulaires** où les cellules se sont associés pour former une structure en tube creux avec une seule couche de cellules (*Enteromorpha*) ou **foliacés** où ils dérivent du thalle filamenteux par juxtaposition de cellules pour former une lame repliée sur elle-même, le thalle est ainsi formé de deux couches de cellules pressées les unes contre les autres (*Ulva*).



Fig.16 : Protothalle (Nématothalle) tubulaire (a) et foliacé (b)

➤ Cladomothalle :

C'est la forme la plus complexe. La diversité extrême de ces thalles permet de rencontrer des formes très proches de celles de certaines cormophytes. On en distingue :

- **Cladome** : Ce sont des thalles présentant des axes à croissance indéfinie et des axes à croissance définie (pleuridies). Les pleuridies prennent naissance au niveau des cellules coxales. Les cladomes peuvent être uni axiaux ou pluri axiaux et peuvent prendre plusieurs aspects et parfois très complexes.
- **Thalle fucoïde** : les algues ayant ces thalles sont toujours de grande taille à l'état adulte et montre une différenciation de 3 parties : fronde, stipe et crampons.

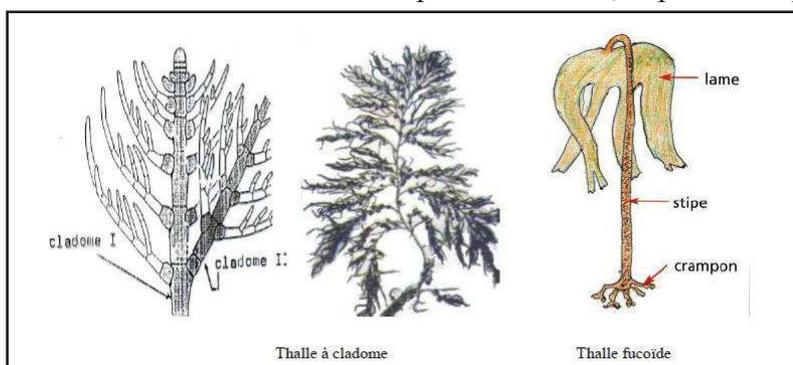


Fig.17: Cladomothalle (cladome et thalle fucoïde)

I.2.2. Cytologie

- **Paroi cellulaire** : Surtout pectocellulosique, mais la cellulose souvent remplacée par d'autres glucides ou dérivés glucidiques et elle n'est pas toujours présente chez algues unicellulaires.
- **Noyau** : comparable à celui des végétaux supérieurs mais en général plus petit.
- **Appareil cinétique**: flagelles chez une partie des algues unicellulaires et des cellules reproductrices (spores, gamètes) chez la plupart des algues pluricellulaires.
- **Plastes**: chez Algues plus primitives, il y a un plaste unique.
Pyrenoïdes : formation de grains de réserves glucidiques (amidon chez algues vertes) et toujours de la chlorophylle a de caroténoïdes.
- **Réserves** : de nature chimique différente selon les classes d'algues et elles se trouvent dans le cytoplasme hors plastes.
 - Algues vertes : Amidon
 - Algues rouges : glucide proche de l'amidon
 - Algues brune : variable mais jamais de l'amidon.

I.2.3. Origine des plastes : Théorie d'endo-symbiose

Les plastes, seraient d'origine endosymbiotique : c'est la théorie **d'endo-symbiose (Fig.18)**

Il est désormais bien démontré que le chloroplaste (compartiment cellulaire dans lequel s'effectue la photosynthèse) des Plantae est dérivé d'une cyanobactérie. Cette bactérie s'est installée dans le cytoplasme de la cellule de l'ancêtre commun à tous les organismes de cette lignée et a établi avec lui une association à bénéfice réciproque (symbiose): protection pour la bactérie (environnement stable) et profit des produits de la photosynthèse pour la cellule hôte. Une telle symbiose, où la coévolution a été poussée au point que 90% du génome de la bactérie est passé dans le noyau de la cellule hôte, est qualifiée d'endo-symbiose.

Cette théorie explique ainsi pourquoi les plantes (Plantae) et les cyanobactéries possèdent le même mécanisme de photosynthèse.

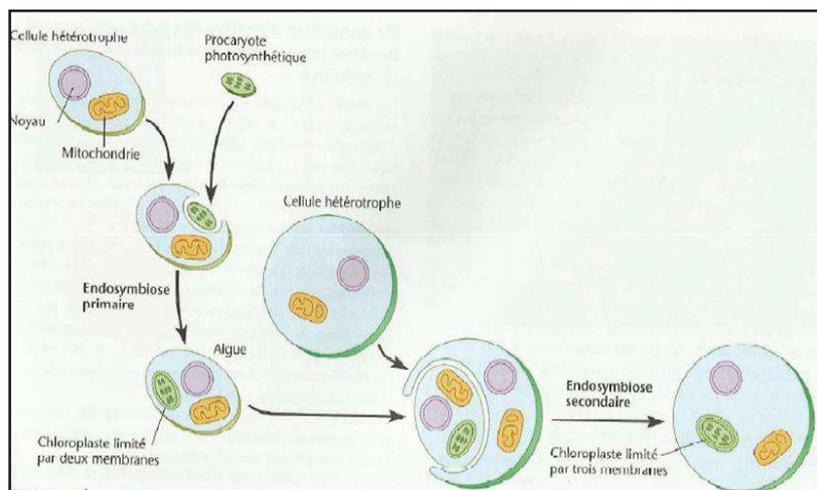


Fig. 18 : Théorie d'endo-symbiose

I.2.4. Reproduction (notion de gamie, de cycle de développement)

I.2.4.1. Reproduction (asexuée et sexuée)

a. Reproduction asexuée

Elle se fait soit par :

- Fragmentation de thalles : chaque fragment régénère un thalle entier.
- Formation des spores à l'intérieur du sporocyste qui redonnent un individu identique avec le même nombre de chromosomes.

b. Reproduction sexuée

La reproduction sexuée chez les phycophytes implique la méiose et la fécondation. Elle fait intervenir la formation de gamètes. La fusion d'un gamète mâle et d'un gamète femelle (= fécondation ou gamie) donne naissance à un œuf (=zygote) diploïde.

Les types de fécondation sont divers :

- **Isogamie** : Fécondation mettant en présence deux gamètes morphologiquement et physiologiquement identiques (*Chlamydomonas*)
- **Anisogamie** : Fécondation mettant en présence deux gamètes morphologiquement et/ou physiologiquement différents (*Ulva lactuca*)
- **Oogamie** : gamète femelle de grande taille immobile (oosphère), et gamètes mâles nombreux petits et mobiles (anthérozoïdes) (*Fucus vesiculatus*)
- **Trichogamie**: le gamète femelle (oosphère) reste dans le gamétophyte donc, émet un poil : le **trichogyne** et le gamète mâle sans flagelle (spermatie) se colle sur le trichogyne.
- **Cystogamie** : Formation d'un pont cytoplasmique (ou pont de conjugaison) entre 2 filaments: gamètes jamais libérés hors du thalle (*Spirogyra*)

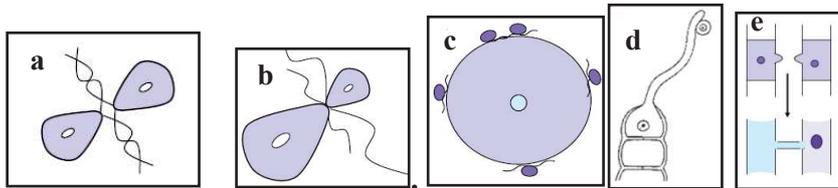


Fig. 19 : Différentes des modes de fécondation chez les Phycophytes

(a : isogamie, b : anisogamie, c : oogamie, d : trichogamie, e : cystogamie)

I.2.4.2. Cycle de développement

Le cycle développement fait intervenir deux notions importantes : La notion **génération** et la notion de **phase nucléaire**.

- **Définition d'une génération** : une génération est une étape du développement d'un organisme débutant par une cellule reproductrice (méiospore ou zygote) et aboutissant, après une activité végétative marquée, à la production d'autres cellules différentes ou non de celle ayant produit la génération envisagée.

On appelle **gamétophyte** ou **sporophyte** la **génération** produisant respectivement des **gamètes** ou des **spores**.

L'alternance des générations se compose de deux parties distinctes :

- **Un gamétophyte (n) qui produit les gamètes mâles et femelles de la plante. Il commence avec la germination de la spore jusqu'à la formation des gamètes par mitose. Le gamétophyte n'est pas toujours haploïde (par exemple chez le *Fucus*).**
 - **Un sporophyte (2n) qui produit les spores (n) après la méiose (spores méiotiques ou tétraspores ou méiospores).** Le sporophyte commence après la fécondation et la formation de zygote diploïde jusqu'à la formation de méiospores par méiose. Cette génération peut prendre le nom de tétrasporophyte ou méiosporophyte.
- **Notion de phase nucléaire** : elle correspond au stock de chromosome. Un individu peut être haploïde à **n** chromosome ou diploïde à **2n** chromosomes.
- Lorsque le cycle de développement est haploïde, on parlera de cycle **haplophasique** ou **haplontique**: qui s'étend de la méiose jusqu'à la fécondation (fusion des gamètes) et formation de zygote.

Lorsque le cycle de développement est diploïde, on parlera de cycle **diplophasique ou diplontique**: qui dure de la fécondation à la méiose

Il existe plusieurs types de cycles définis par l'importance relative des périodes séparant la méiose de la fécondation et la fécondation de la méiose.

- Le cycle **mono génétique**: qui présente une seule génération: le gamétophyte
- Le cycle **di génétique** : qui présente une succession de deux générations alternativement, un gamétophyte (n) issu de la germination d'une méiospore et un sporophyte ($2n$) issu d'un œuf (zygote). Si le gamétophyte est semblable morphologiquement au sporophyte on dit qu'il s'agit d'un cycle digénétique isomorphe. Si le gamétophyte est morphologiquement différent du sporophyte on parle de cycle digénétique hétéromorphe.
- Le cycle **tri génétique** avec trois générations: un gamétophyte et deux sporophytes.

Chez les Algues Rouges on note la présence d'une troisième catégorie d'individus que l'on nomme le carposporophyte. Le carposporophyte est toujours parasite du gamétophyte femelle, il produit des carpospores qui donnent naissance à une génération morphologiquement identique au gamétophyte, mais au lieu de produire des gamètes, il produira des tétraspores qui redonneront à la suite des spores qui une fois germés donneront les gamétophytes.

Sur le plan cytologique: Dans un cycle, la méiose peut avoir lieu à des moments différents par rapport à la gamie (la fécondation), il en résulte trois types de cycles (**Fig.20**):

- **Diplo-haplophasiques** : La méiose a lieu vers le milieu du cycle, elle est donc toujours plus ou moins éloignée de la gamie. Donc on va avoir une alternance entre une haplophase et une diplophase.
- **Haplophasiques** : La méiose se situe juste après la gamie. Dans ce cas seul le zygote est diploïde. La plante n'est représentée dans ce cas que par le gamétophyte qui est haploïde.
- **Diplophasique** : La méiose se déroule immédiatement avant la gamie. La plante est diploïde et seules les cellules issues de la méiose sont haploïdes.

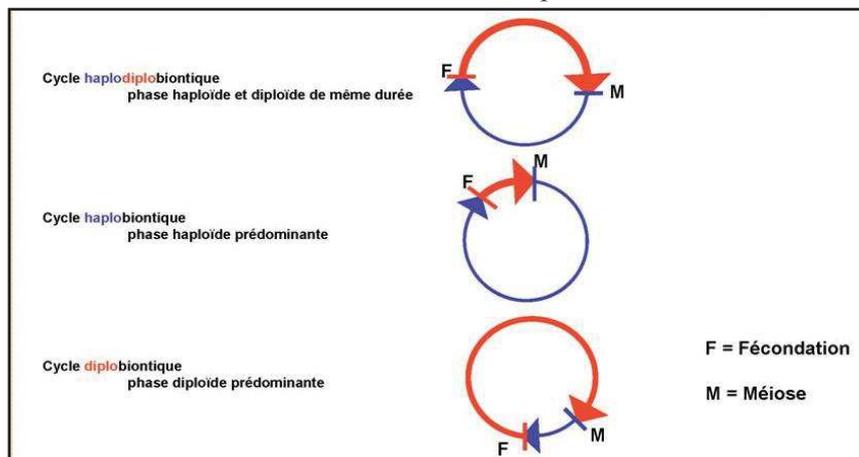


Fig.20 : les différents types de cycle de vie chez les phycophytes

I.2.5. Systématique et particularités des principaux groupes

Voir TD. 1

II. Les champignons

Les Champignons ou *Mycophytes* (*myco* = champignon) sont des **thallophytes** qui se distinguent fondamentalement des algues par l'absence de chlorophylle et de toute ébauche de plastes permettant la photosynthèse.

Les champignons occupent une place particulière dans le monde vivant et font partie des organismes **eucaryotiques** les plus simples. Les premiers champignons seraient apparus au précambrien il y a 600 millions d'années.

Les Champignons sont **hétérotrophes** pour le carbone. Ce sont des végétaux inférieurs, ils sont qualifiés de **cryptogames** (appareil végétatif caché) et ils ne possèdent pas de tissus conducteurs de sève (**avasculaires**). Ces organismes nécessitent beaucoup d'eau pour accomplir leur cycle biologique.

II.1. Problèmes posés par la classification des champignons

L'origine des champignons est ancienne, ils sont connus depuis l'ère primaire et leur filiation est discutée. Longtemps classé avec les végétaux. En 1969, Whittaker les a classés dans un règne à part, celui des *mycota*, sur la base de plusieurs caractères particuliers comme l'absence de chlorophylle et d'amidon.

La biologie moléculaire confirme que leur individualisation s'est produite très tôt au cours de l'évolution. Les formes les plus primitives passent par des stades aquatiques mobiles avec un flagelle (zoospores, gamètes) ce qui suggère une parenté avec des Protistes.

Il y a 2 hypothèses pour l'origine des Mycophytes :

➤ **1^{ère} hypothèse :**

Ils dériveraient tous d'algues eucaryotes ayant perdu leur plastes et leur complexes pigmentaires.

L'origine serait multiple : les champignons seraient un groupe polyphylétique.

➤ **2^{ème} hypothèse :**

Ils dériveraient tous (des plus complexes au plus simples) d'un ancêtre commun :

Un protiste indifférencié parmi les cellules eucaryotes. On parle dans ce cas d'une origine monophylétique et les champignons constitueraient un règne distinct du règne végétal et du règne animal.

II.2. Spécificité du mode de vie des Mycophytes

Les Mycophytes ne pouvant pas photo-synthétiser car étant dépourvus de chlorophylle, les champignons sont hétérotrophes pour le carbone, ils consomment des molécules fabriquées par d'autres organismes. On distingue trois modes de vie :

II.2.1. Les saprophytes : exploitent les substances organiques mortes, dont ils provoquent (avec l'aide de bactéries) la décomposition des débris végétaux (feuilles et fruits tombés, bois morts, herbes sèches...), débris animaux, humus du sol...

II.2.2. Les parasites : utilisent les substances organiques des êtres vivants, qu'ils rendent malades, et même tuent. C'est le cas de champignons phytopathogènes.

II.2.3. Les symbiotes : vivent en symbiose avec d'autres êtres vivants comme :

- **Les mycorhizes** que l'on retrouve essentiellement au niveau des racines des plantes : il s'agit de la symbiose entre les racines de la plante et le mycélium d'un champignon.
- **Les lichens** qui résultent de la symbiose d'une algue unicellulaire verte ou une cyanobactérie et d'un champignon : l'algue assure la nutrition et le champignon va fournir l'eau et les sels minéraux.

II.3. Caractères Cytologiques

Les champignons possèdent des cellules eucaryotes entourées d'une paroi cellulaire formée d'une seule couche de nature principalement **chitineuse**.

Tous les organites de la cellule eucaryote sont présents dans ces cellules à l'exception des plastes.

Au cours du cycle de développement, les noyaux cellulaires peuvent avoir deux phases : une phase diploïde (2n) et une phase haploïde (n).

Le noyau, la plupart du temps, il est de petite taille avec un nombre restreint de chromosomes.

Dans les thalles massifs, il y a 2 noyaux distincts qui n'ont pas fusionnés au moment de la fécondation, qui sont regroupés en paires et qui forment le dicaryon.

Le cytoplasme des champignons renferme généralement des globules lipidiques et du glycogène.

II.4. Organisation de l'appareil végétatif

Le thalle des champignons peut être **unicellulaire** associé en colonies (cas des levures et certaine ascomycètes) ou pluricellulaire constituant des **filaments** très fins (peuvent mesurer plusieurs centimètres de long mais n'ont que quelques microns de diamètre) et ramifiés dont l'ensemble forme un **mycélium**.

Chez les champignons supérieurs, les hyphes s'organisent en pseudo tissu ou **stroma**, pour former une structure de reproduction sexuée, c'est le carpophore.

Le carpophore (littéralement « porte-fruit »): ou autrefois **le sporophore** (littéralement « porte-spores »), appelé aussi **sporocarpe** (« fruit à spores ») est l'appareil reproducteur des champignons dits supérieurs. C'est l'organe de la « fructification » du mycélium des champignons. Il contient les sporocystes (basides et asques) qui se différencient dans l'hyménium et qui produisent des spores, sous diverses formes (basidiospores ou ascospores).

Les filaments peuvent être **cloisonnés** (ils sont dits **hyphes**) ou **non cloisonnés**, ils sont dits **siphon** (**cénocyte**) (Fig.21).

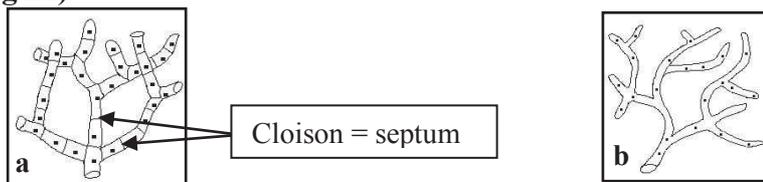


Fig.21 : les filaments chez les mycophytes (a : cloisonné ou septé, b : siphon ou cénocyte)

Cette différence de morphologie au niveau du thalle permet de distinguer :

- Les **septomycètes** (Ascomycètes et les Basidiomycètes) qui possèdent un mycélium cloisonné.
- Les **siphonomycètes** (Trichomycètes, Zygomycètes et Oomycètes) qui possèdent un mycélium siphonné.

Certains champignons peuvent aussi fabriquer des structures de **résistance** comme des **sclérotés** qui sont des faisceaux d'hyphes compacts qui vont permettre au champignon de passer la mauvaise saison. Ces sclérotés donnent naissance directement à des fructifications au retour de la saison propice au développement (Fig.22).



Fig.22 : les sclérotés chez les champignons

II.5. La reproduction et les cycles de développement

Elle se fait par voie sexuée et/ou par voie asexuée.

II.5.1. La reproduction asexuée

La reproduction asexuée se fait :

- Par la fragmentation du mycélium : un fragment se sépare de la masse et devient un nouvel individu.
- Par la production de stolons comme chez *Rhizopus nigricans*.
- Les levures (unicellulaires) se reproduisent de façon asexuée par bourgeonnement. Elles font une copie du noyau et un petit bourgeon commence à se former sur la paroi cellulaire. Ce bourgeon, qui contient le nouveau noyau continue de grandir et forme une nouvelle cellule indépendante.
- Il peut y avoir également multiplication par production de spores. Ce sont des spores directes (mitotiques). Les spores mitotiques sont soit exogènes (conidies) générées en continu par une cellule à l'extrémité du filament appelée phialide ou conidiocyste (*Penicillium*, *Aspergillus*), soit endogènes (endospores produites à l'intérieur d'un sporocyste) (*Rhizopus nigricans*) (**Fig.23**).

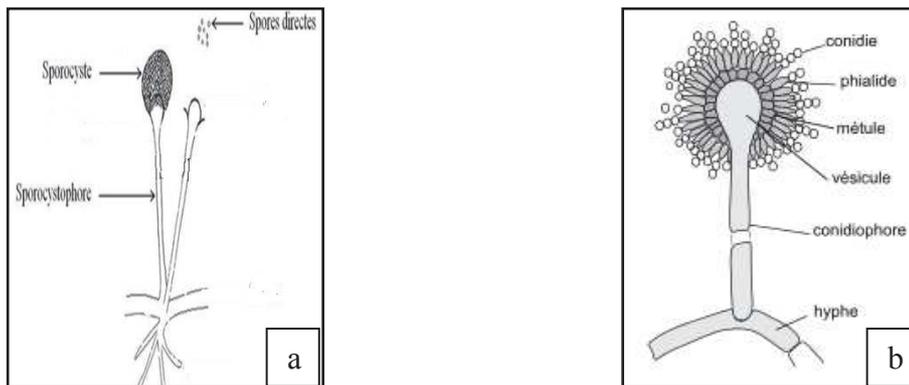


Fig. 23 : les spores directes (mitotiques) chez les champignons (a : endospores, b : exospores)

II.5.2. La reproduction sexuée

Le cycle sexué (la fécondation) des champignons comporte 2 phases :

- a. **Plasmogamie ou cystogamie (fusion des cytoplasmes)** : c'est uniquement le cytoplasme des deux cellules qui fusionne. Il se produit une fusion des cytoplasmes (**plasmogamie**) mais pas des noyaux qui restent individualisés dans la cellule. La **plasmogamie** donne naissance à une structure très particulière, un mycélium myctohaploïde qui représente la première génération sporophytique. De cette première génération sporophytique est issue la seconde génération sporophytique constituée d'un mycélium dicaryotique.
- b. **Caryogamie** : c'est la fusion des deux noyaux donnant un noyau diploïde. Le zygote diploïde qui en résulte va évoluer différemment selon le champignon :
 - Soit il subit une méiose assez rapidement. Il prend alors le nom **de spore de germination**. Le cycle de reproduction est dit **haplobiontique** (*Rhizopus nigricans*)
 - Soit il forme un mycélium diploïde (le sporophyte). Il prend alors le nom de spore de passage. Le cycle de reproduction est dit **haplodiplobiontique**.

Parfois, il y a fusion immédiate de noyaux (caryogamie) et du cytoplasme (plasmogamie), mais plus fréquemment la fusion de noyaux est retardée, entraînant la formation d'une cellule avec deux noyaux haploïdes (stade dicaryotique).

Les zygotes peuvent se transformer **en spores méiotiques (basidiospores, zygosporos, ascospores)** qui servent la dissémination des champignons.

La reproduction sexuée chez les Mycophytes implique la fusion de deux noyaux compatibles. Certains champignons sont autogames : gamète mâles et femelles produites sur le même mycélium (**homothallique**). Tandis que d'autres sont hétérogames qui exigent un croisement entre mycélium différents, mais sexuellement compatibles (**hétérothallique**).

Le cycle de développement des champignons est haplodiplophasique : les spores sont haploïdes (n chromosomes) alors de le carpospore correspond à la phase diploïde ($2n$ chromosomes).

Les trois types de cycles existent chez les champignons :

- **monogénétique haplophasique** : Chytridiomycètes, Oomycètes et Zygomycètes
- **digénétique** : Tous sauf Ascomycètes
- **trigénétique** : Ascomycètes et certains Basidiomycètes.

II.6. Systématique et particularités des principaux groupes de champignons

Actuellement, plus de 120 000 espèces de champignons ont été recensées.

Parmi les principaux groupes des champignons :

➤ Les Myxomycète

➤ **Les champignons inférieurs** : possèdent des cellules reproductrices mobiles et seraient apparentés à certains groupes alliés aux algues brunes.

- Les Chytridiomycètes
- Les Oomycètes

➤ Les Zygomycètes

➤ **Les champignons supérieurs** : ne possèdent pas de cellules reproductrices mobiles (zoïdes) et seraient donc apparentés aux algues rouges.

- Les Ascomycètes
- Les Basidiomycètes

Les Myxomycètes sont des champignons gélatineux. Actuellement ils ne sont plus classés parmi les champignons. Ils appartiennent aux **Protista**.

Les oomycètes : On peut les qualifier de « pseudochampignons »: ils ne font plus partie des champignons. Les analyses phylogénétiques ont montré que les Oomycètes sont plus proches aux algues. Ces «champignons » sont tous plus ou moins microscopiques, ont des spores nageuses, ou zoospores, à un ou deux fouets.

Plusieurs espèces sont des pathogènes majeurs de plantes.

Un groupe auquel appartiennent les **Péronosporaceae**, agents des «**mildious**» de plantes. *Plasmopora viticola* est l'agent du mildiou de la vigne.

La classification phylogénétique des Mycota

Les champignons dits « vrai » ou Eumycota sont subdivisés en (Fig.24):

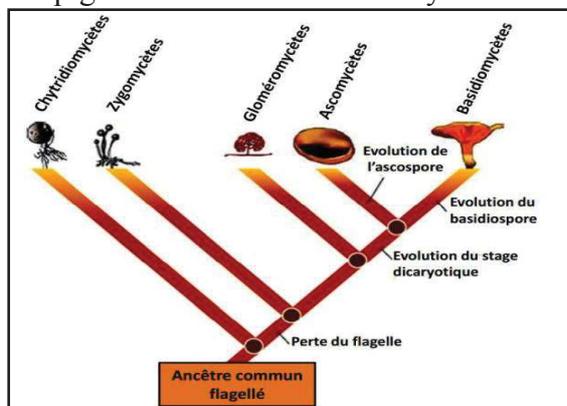


Fig.24 : Classification phylogénétiques des Eumycota

a. Chytridiomycota

Ce sont des organismes cénocytiques (thalle siphonné), conservant éventuellement des cellules flagellées et un centriole (zoospores). Ils correspondent à des espèces aquatiques. On les considère comme un taxon basal (plus ancien) des autres Eumycètes.

b. Zygomycota

C'est un groupe qui renferme 1000 espèces. Ils possèdent des thalles siphonnés (les cellules ne sont pas séparées par des cloisons, avec de nombreux noyaux dans un même siphon).

Ce sont des espèces à spores non flagellées (spores inertes tuniquées), Les spores sont produites au sein du sporocyste et libérées après rupture de la paroi du sporocyste.

Ce sont des champignons symbiotiques (endomycorhiziens), saprophytes (*Rhizopus nigricans*) ou parasites (mycoses).

Ces champignons sont également caractérisés par une abondante reproduction asexuée et une croissance rapide qui leur permettent de coloniser rapidement leur milieu.

La reproduction asexuée se fait par stolons ou par germination des spores (endospores) qui donnent de nouveaux filaments avec un zygosporocyste qui libère les spores (Fig.25). Les spores sont produites au sein du sporocyste et libérées après rupture de la paroi du sporocyste.

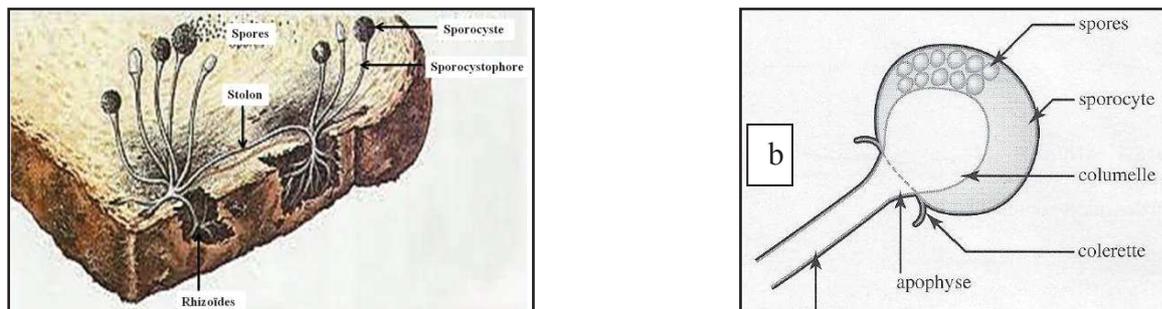


Fig.25 : Reproduction asexuée chez *Rhizopus nigricans* (b : détail de sporocyste)

La reproduction sexuée (**formation d'une zygospore**) se fait par **cystogamie** ou **conjugaison** des gamétocystes. Il y a formation d'un zygote qui s'enkyste. Le cycle est **monogénétique haplophasique** et présentant une **zygospore** issue de l'enkystement d'un zygote subissant immédiatement la méiose (cycle entièrement haplophasique) (Fig.26).

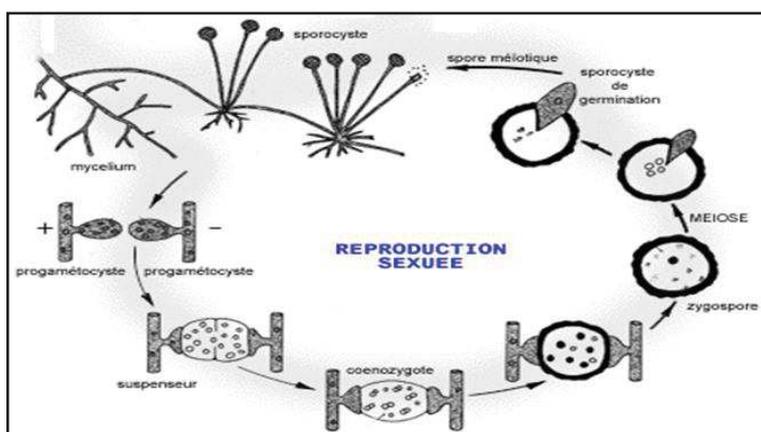


Fig.26 : Reproduction sexuée chez *Rhizopus nigricans*

c. Glomeromycota

C'est un taxon qui n'a été séparé des Zygomycètes que récemment (2001). Ce sont des **champignons** microscopiques, ce sont **des mycorhiziens obligatoires** qui jouent un rôle capital dans les groupements végétaux. Ils forment les endomycorhizes vésiculo-arbusculaires, les plus répandues dans la nature, symbiontes de plus de 80% des végétaux vasculaires.

On ne leur connaît pas de reproduction sexuée. Ils se conservent et se multiplient par voie asexuée au moyen de grosses spores enkystées.

d. Ascomycota

Constituent un groupe très vaste avec près de 40 000 espèces et très important sur le plan économique. *Penicillium* est utilisé en pharmacologie, *Saccharomyces* en agroalimentaire, les morilles et les truffes sont comestibles. Certains Ascomycètes sont parasites des plantes provoquant des maladies. C'est le cas de l'oïdium parasite de la vigne.

Le mycélium des Ascomyta est **cloisonné**. L'organisation des hyphes en pseudo tissu ou stroma, pour former une structure de reproduction sexuée, c'est le **carpophore**. Certains Ascomycètes forment des carpophores visibles à l'œil nu. Les carpophores chez les ascomycètes prennent le nom d'**ascocarpe** qui peut être une **apothécie** ou un **périthèce**. Les Ascomycètes sont caractérisés par des spores formées à l'intérieur de cellules mères sous forme de sacs appelées **asques** (Fig. 27). De ce fait, les spores sont nommées **ascospores** qui seront rejetées par ouverture de l'asque. Entre les asques sont disposées des **paraphyses** stériles.

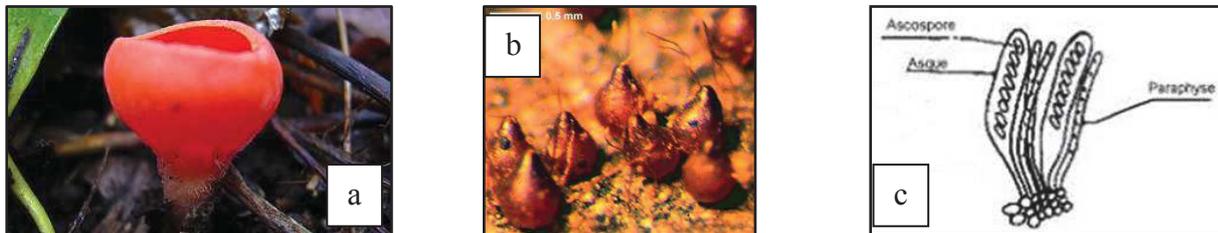


Fig. 27 : l'ascocarpe chez les ascomycètes (a : apothécie, b : périthèce, c : asques avec ascospores et paraphyses)

Les levures sont des Ascomycètes particuliers, qui ne présentent plus de mycélium. Elles sont constituées de cellules isolées se reproduisant par bourgeonnement (Fig. 28).

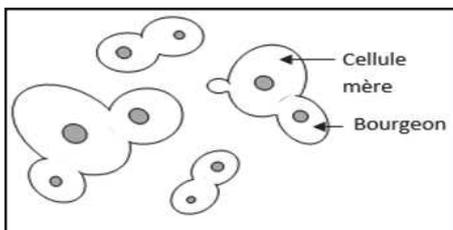


Fig. 28 : Bourgeonnement chez les levures (*Saccharomyces*)

Plus de la moitié des espèces d'ascomycètes s'associent aux algues par symbiose pour former des lichens, aux racines des végétaux pour former les mycorhizes.

La reproduction asexuée des ascomycètes se fait par des conidiospores ou conidies qui germent pour donner de nouveaux hyphes cloisonnés qui vont développer des conidiophores et des conidies et ainsi de suite (Fig. 29).

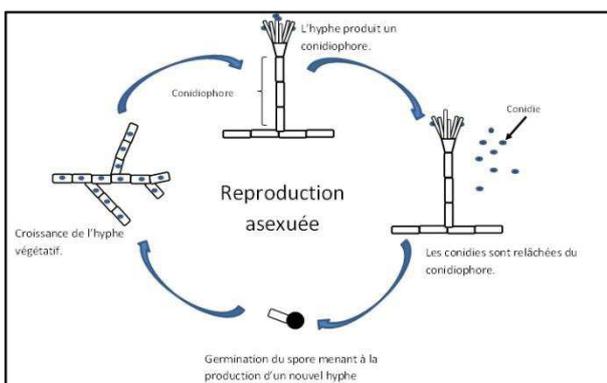
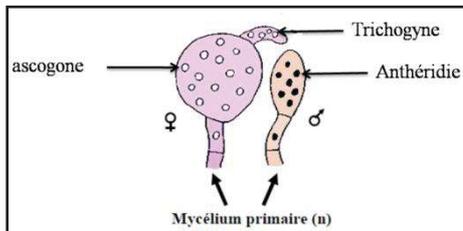


Fig. 29 : La reproduction asexuée par des conidiospores chez les Ascomycètes

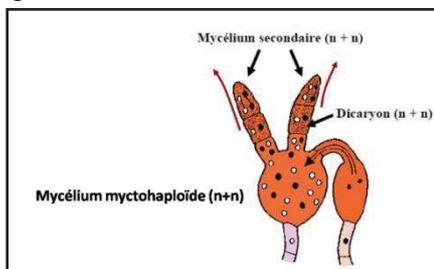
Le cycle de reproduction sexuée des Ascomycètes est trigénétique haplodicaryodiplophasique (3 générations : haploïde, dicaryotique et diploïde).

La reproduction sexuée se fait selon les étapes suivantes (Exemple des Pezizes) :

1. La première génération gamétophytique est représentée par un mycélium primaire haploïde. Sur un mycélium primaire se forme le gamétocyste mâle (anthéridie) et sur un autre mycélium primaire se forme un gamétocyste femelle (ascogone). Les deux mycéliums primaires de sexes opposés s'entrelacent.
2. Le transfert des noyaux mâles dans l'ascogone se fait par l'intermédiaire d'un filament émis par celui-ci : le trichogyne, établissant une communication entre l'ascogone et le gamétocyste mâle.



3. Dans l'ascogone fécondé, les noyaux mâles et femelles se rapprochent par paires, mais sans cependant se fusionner, il y a une fusion entre les deux cytoplasmes sans une fusion des noyaux, c'est une **plasmogamie**. La plasmogamie donne naissance à une structure très particulière, un mycélium myctohaploïde (contient un ascogone avec une copie des noyaux mâles et femelles) qui représente la deuxième génération qui est sporophytique.
4. De cette génération sporophytique est issue la seconde génération sporophytique constituée d'un mycélium dicaryotique secondaire dicaryotique ($n+n$) qui est un hyphes cloisonnés avec des cellules dicaryotiques.



5. Les hyphes dicaryotiques vont donner à leurs extrémités des asques (sporocystes) allongés dicaryotiques.
6. Les noyaux dans l'asque-mère fusionnent (**caryogamie**) pour former un noyau diploïde. Ce noyau entre ensuite en méiose pour former quatre noyaux haploïdes.
7. Chaque noyau haploïde entre en mitose. Il en résulte huit noyaux haploïdes (ascospores)
8. Les asques sont organisés dans l'hyménium du sporocarpe.
9. Les spores sont expulsées par un opercule s'ouvrant au sommet de l'asque.
10. La germination des ascospores donne naissance à de nouveaux mycéliums haploïdes qui restent stériles. Il leur faut rencontrer un autre filament primaire porteur d'un sexe opposé et le cycle se recommence.

La reproduction sexuée chez les Pezizes est représentée dans la figure 30.

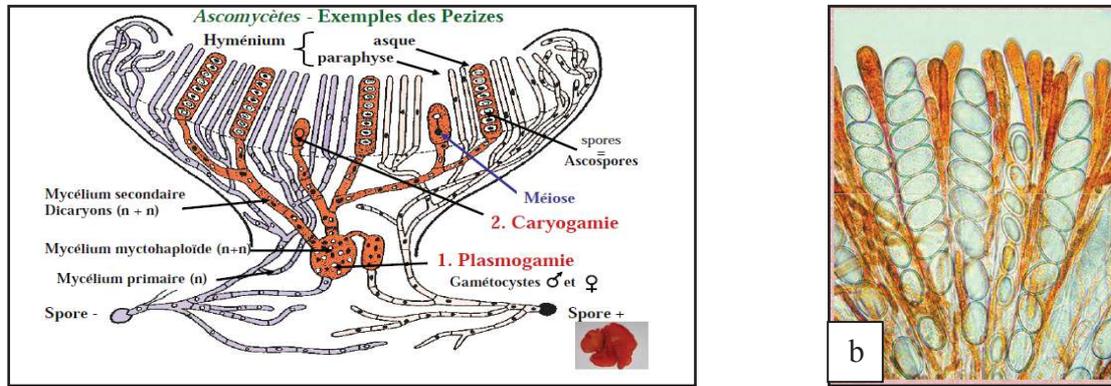


Fig. 30 : La reproduction sexuée chez les Pezizes (Ascomycète) (b : asques avec ascospores et paraphyses).

e. Basidiomycota

C'est un groupe renfermant environ 25.000 espèces. Ce sont des champignons supérieurs. Cependant, quelques uns sont microscopiques : phytopathogènes (cas de *Puccinia*).

Leur thalle est cloisonné (septé). L'organisation des hyphes en pseudo tissu ou **stroma**, pour former une structure de reproduction sexuée, c'est le carpophore. La classification est fondée sur le type de développement du carpophore (chapeau et pied). On les appelle souvent champignons à chapeaux (**Fig .31**).

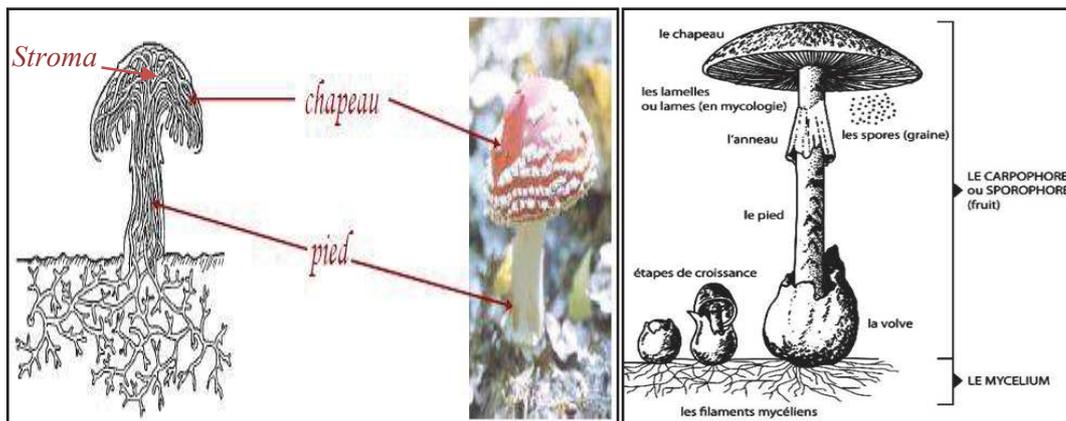


Fig. 31 : le carpophore des Basidiomycètes

Les Basidiomycètes sont des champignons à **basides**. Ils sont caractérisés par des spores formées à l'extrémité de cellules spécialisées : **les basides**.

L'hyménium des basidiomycètes est constitué de la partie inférieure du chapeau et est composé de plusieurs basides (ce sont des sacs de forme sphérique qui se développent à l'extrémité de certains hyphes généralement situés sous le chapeau) terminés par des basidiospores et entre ces basides, sont disposées des cystides stériles (**Fig .32**).

Les basidiomycètes se caractérisent par des basides qui contrairement aux asques ne renferment pas les cellules sexuelles jusqu'à maturité. La fusion des noyaux haploïdes et la méiose se déroulent dans la baside. La méiose transforme le noyau diploïde en quatre noyaux haploïdes. Ces derniers sortent de la baside grâce à des filaments (**stérigmates**) où ils poursuivent leur maturité et intègrent chacun une basidiospore. Sur chaque baside, on va avoir la production de 4 spores (**basidiospores**) (**Fig .32**).

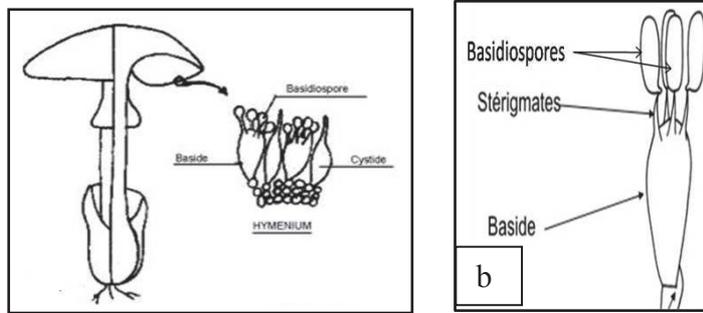


Fig. 32 : L'hyménium des Basidiomycètes (b : détail de basidiospore)

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

La reproduction sexuée se fait suivant les étapes suivantes (C'est un cycle digénétique haplodiplophasique) (Fig. 33):

- Des mycéliums haploïdes de types sexuels différents fusionnent (Plasmogamie).
- Il en résulte un mycélium dicaryote (à deux noyaux) qui se développe plus vite et refoule les hyphes parentaux.
- Certains facteurs environnementaux, comme la pluie ou les changements de température, conduisent le mycélium dicaryote à se développer et à former des masses compactes qui deviennent des basidiocarpes (un champignon avec son chapeau).
- Sous le chapeau (hyménium), il se développe des basides où se fait la fusion des deux noyaux (**Caryogamie**). La caryogamie donne naissance à des noyaux diploïdes
- Après la caryogamie, les noyaux diploïdes subissent la méiose (formation de 4 noyaux haploïdes).
- Les noyaux migrent vers l'extrémité des basides qui produit ensuite quatre appendices qui laissent chacun pénétrer un noyau haploïde.
- Les noyaux continuent leur maturité à l'extérieur. Il en résulte 4 spores exogènes (basidiospores).
- À maturité, les basidiospores sont éjectées, tombent du chapeau et sont dispersées par le vent. Les basidiospores haploïdes germent dans un environnement adéquat et deviennent des mycéliums haploïdes et le cycle se recommence.

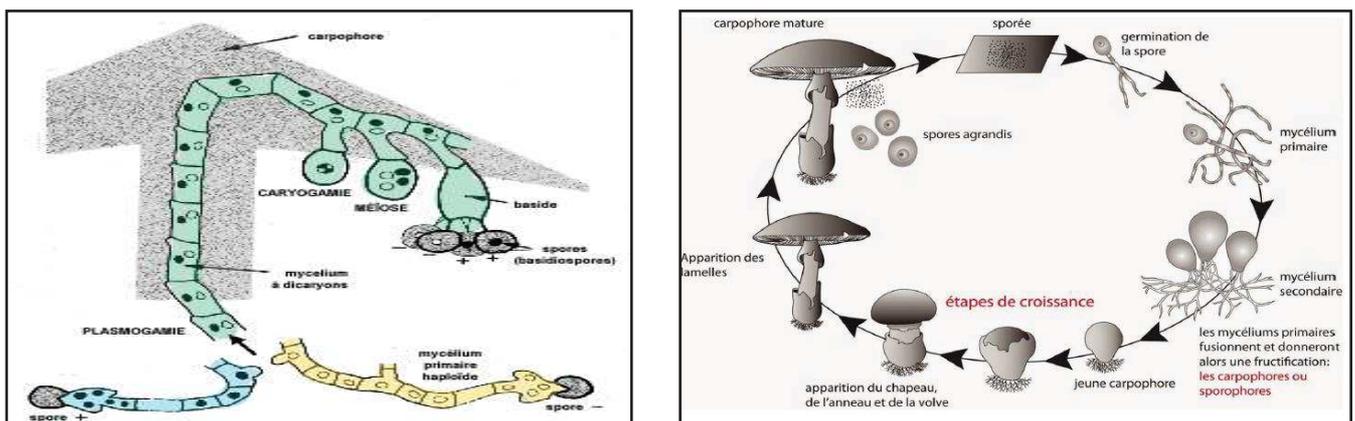


Fig. 33 : La reproduction sexuée chez les Basidiomycètes

III.les Lichens : Une association particulière algue-champignon

Les lichens par définition : c'est une association symbiotique réciproque entre un partenaire fongique et une population d'algues ou de cyanobactéries unicellulaires ou filamenteuses. Environ 20.000, le nombre d'espèces de lichens présentes dans le monde, moins de la moitié sont des espèces macroscopiques, bien visibles à l'œil nu.

Actuellement on les considère comme Champignon lichénique adapté à la vie symbiotique avec une prédominance des constituants fongiques dans la morphologie et la reproduction des lichens.

Ils sont dépourvus de tiges, de feuilles, de racines et de vaisseaux conduisant de la sève, donc Ils s'appartiennent au groupe végétal des **thallophytes non vasculaires**.

Les lichens ou champignons lichénisés sont des organismes composés à croissance très lente, résultant d'une association durable, stable et reproductible (symbiose) entre un champignon appelé **mycobionte** (du grec mykes« champignon » et bios « vie ») et un partenaire photosymbiotique (algue) nommée **photobionte** (photo« lumière » et bios« vie »)

- **Le photobionte** synthétise des glucides qui sont absorbés par le mycobionte. Le photobionte est soit une Nostocale dans 10% des cas (Cyanobactérie, procaryote) ou une Chlorococcales dans 85% des cas (Chlorophyceae, Eucaryote). La matière organique est synthétisée par l'algue (qui se développe au sein du mycélium aérien).
- **Le mycobionte** livre l'eau et les sels minéraux au photobionte et assure sa protection contre la dessiccation. Le champignon est le plus souvent un Ascomycète (Septomycètes) et plus rarement un Basidiomycète du groupe des polypores.

La symbiose apparaît donc comme l'association de partenaires avec bénéfices réciproques. Il y a transfert de nourriture photosynthétisée vers le champignon et, en échange, transfert de l'eau, de substances dissoutes et de certaines substances organiques vers l'algue. Dans une association symbiotique, chaque organisme apporte à l'autre ce qu'il n'a pas.

III.1. Spécificités des Lichens

L'organisme lichénique (association champignon-algue) présente des propriétés que ne possèdent ni l'un ni l'autre de ses constituants ; parmi lesquels:

- **La reviviscence** : Les lichens ont la capacité de résister à de très fortes dessiccations. Certains lichens peuvent vivre avec une teneur en eau de 2% .Ils possèdent la possibilité de se réhydrater. La capacité de passer rapidement, réversiblement et répétitivement de l'état hydraté et actif à l'état sec.
- **Un pouvoir lithogène** : qui leur permet de s'installer en pionnier sur des substrats difficiles.
- **La résistance aux températures extrêmes** : La résistance aux basses températures qui entraîne la richesse en lichens des montagnes et des régions nordiques. L'assimilation peut encore être active à -40 °C.

III.2. Morphologie du thalle des lichens

Les thalles des lichens sont très variés morphologiquement, ils sont beaucoup moins en ce qui concerne leur structure microscopique.

Dans les lichens, les hyphes du champignon représentent plus de 90% de l'ensemble de la biomasse. C'est le champignon qui construit la morphologie générale du thalle.

L'appareil végétatif d'un lichen est un **thalle**. **Deux principaux types de lichens se distinguent selon l'aspect du thalle : les thalles gélatineux et les thalles secs (Fig. 34).**

- **Thalles gélatineux** : Dans les thalles gélatineux, les filaments du champignon se ramifient dans la masse gélatineuse des Cyanobactéries (*Nostoc*, par exemple). A l'état sec, ils sont noirs, coriaces et friables. En présence d'eau, ils gonflent pour donner une masse gélatineuse (ex. *Collema pulposum*).

- **Thalles secs** : Les thalles secs sont beaucoup plus fréquents que les thalles gélatineux. Les cellules vertes de l'algue sont emprisonnées dans les hyphes du champignon. Le thalle se présente sous forme d'écailles, de croûtes, de filaments, de lanières ou de lobes.



Fig. 34 : le thalle gélatineux (a) et les thalles secs des lichens (b, c)

Les différences dans l'aspect du thalle permettent la classification des lichens en plusieurs groupes morphologiques, ils peuvent être classés en (**Fig. 35**):

1. **Thalles lépreux** : association de granules constitués chacun d'un peloton d'hyphes associées à quelques cellules d'algues (exemples : *Lepraria*, *Chrysothrix candelaris*).
2. Les thalles **encroûtant ou crustacés** qui peuvent s'étaler en croûte peu épaisse adhérant fortement au substrat (exemple : *Lecanora*).
3. Les thalles **foliacés** ont le thalle en forme de limbe foliaire plus ou moins lobé, attaché au substrat par des filaments appelés rhizines. Ils sont facilement séparables de leur support (exemples : *Parmelia*, *Xanthoria*).
4. Les lichens **fruticuleux** ont un thalle en forme arborescente plus ou moins ramifiée et à section ronde ou aplatie (exemples : *Usnea*, *Ramalina*). Ils sont fixés à un support en un seul endroit par une base étroite.
5. Les lichens **squamuleux** sont composés d'écailles ou de lobes plus ou moins adhérents au substrat, mais pouvant facilement s'en détacher (exemple : *Psora decipiens*).
6. **Thalles composites ou complexes** : ils présentent un thalle primaire foliacé squamuleux, plus ou moins adhérent au substrat, et un thalle secondaire dressé, plus ou moins ramifié, développé dans un second temps sur le thalle primaire (exemples : *Cladonia* et *Stereocaulon*).

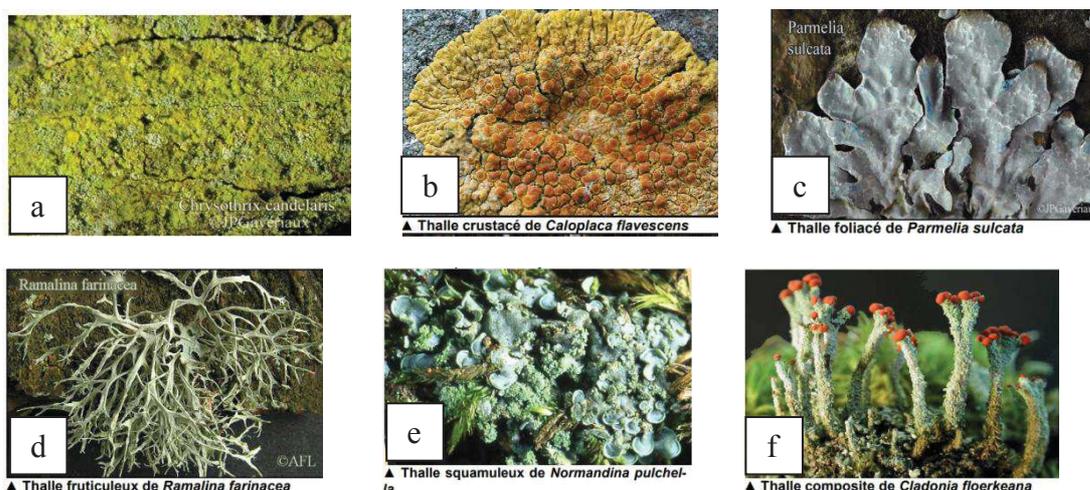


Fig. 35 : les différents aspects de thalles des lichens (a : lépreux, b : crustacé, c : foliacé, d : fruticuleux, e : squamuleux, f : composite).

III.3. Structure Anatomique

La structure des thalles de lichens peut se faire de deux façons (**Fig. 36**):

- **Le lichen homéomère:** présente un thalle homogène dont les cellules du photobionte sont réparties uniformément dans le thalle (cas des genres *Leptogium* et *Collema*). Les hyphes et les gonidies sont mélangés dans les mêmes proportions dans toute l'épaisseur du thalle.
- **Le lichen hétéromère:** présente sur sa section transversale plusieurs couches, dont les cellules du photobionte sont regroupées dans une couche assimilatrice (couche algale).

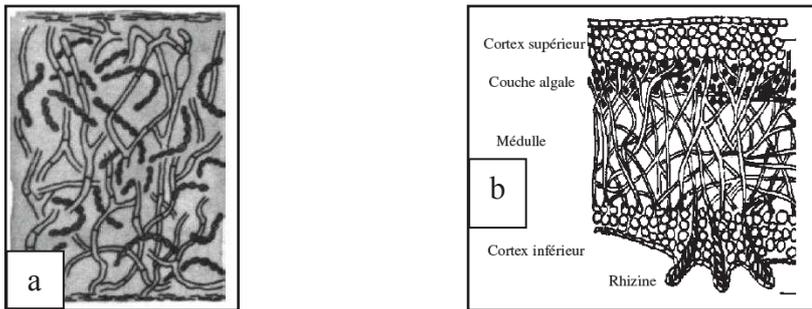


Fig. 36 : les structures de thalles des lichens (**a** : homéomère, **b** : hétéromère)

La structure d'un lichen hétéromère est typiquement formée :

- D'un **cortex supérieur** constitué d'un synenchyme (tissu compact formé par les hyphes resserrés du champignon) ;
- D'une **couche assimilatrice : couche algale** constituée des cellules du photobionte réparties dans le prosenchyme (tissu fibreux formé par les hyphes bien séparés du champignon) ;
- D'un **médulle**, prosenchyme très lâche sans photobionte ;
- D'un **cortex inférieur** lui aussi constitué d'un synenchyme. A la base de cette couche, on trouve les **Rhizines** (organes de fixation des thalles foliacés, simple ou ramifié, formé d'un faisceau d'hyphes soudées et recouvertes d'une gaine gélatineuse facilitant l'adhésion au substrat).

III.4. Diversité chez les lichens

Les lichens présentent une grande diversité, tant en nombre d'espèces qu'au niveau de leur morphologie. Ils sont des organismes qui colonisent de très nombreux milieux et sur les substrats les plus variés (arbres, rochers, sols couverts de mousses, etc.). Leurs formes et leurs couleurs sont très variés allant du gris au vert mais également au jaune orangé. Ils sont constitués d'un thalle qui est une structure sans racine ni tige ni feuille.

Selon la nature du substrat on parle de :

- **Lichens corticoles** : vivant sur les écorces des troncs et des branches des arbres dans les forêts (parfois sur feuilles : lichens folicoles ; sur bois nu : lignicoles).
- **Lichens saxicoles** : vivant sur les rochers calcaires, siliceux nus, siliceux moussus, siliceux immergés, vieux murs, toits, avec des variations dans les groupements en fonction de la luminosité (certains sont héliophiles, d'autres sciaphiles).
- **Lichens terricoles et humicoles** : qui poussent dans des pelouses, landes, bois clairs. Un certain nombre d'entre eux vivent en saprophytes aux dépens de la matière organique présente dans le sol.

DEUXIEME PARTIE: Les cormophytes ou Embryophytes

Le «Cormus» (tige en latin et «phuton» : plante en grec) est un appareil végétatif comportant une tige feuillée. Anatomiquement, le cormus présente différents types cellulaires qui peuvent être associés en tissus, ensemble de cellules spécialisées dans une même fonction.

Les Cormophytes sont l'ensemble des plantes qui possèdent une tige portant des feuilles ou des frondes ou autrement dit ce sont des plantes qui possèdent des organes (tiges, feuilles, racines) différenciés qui sont la majorité des plantes terrestres (Embryophytes : bryophytes, ptéridophytes, spermaphytes).

I. Les Bryophytes

Appartenant au règne des plantes, les bryophytes sont le groupe le plus primitif et simple des cormophytes car elles ne contiennent ni les tissus vasculaires (xylème et phloème), ni de vraies racines (mais seulement **des rhizoïdes filamenteux qui ont un rôle de fixation**).

Ce sont des végétaux chlorophylliens, faisant la transition évolutive entre les algues (toutes à thalle) et les végétaux vasculaires ou supérieurs, tels que les ptéridophytes (fougères et prêles) et les plantes à graines.

Ce sont des cryptogames, se reproduisant grâce à des spores libérées et disséminées par le vent et possédant un cycle à deux générations séparées. Les Bryophytes sont des végétaux à organisation relativement simple, de petite taille, terrestres mais se développant dans les endroits humides. L'absorption de l'eau et des substances dissoutes se fait par toute la surface de la tige et des feuilles ; ce qui entraîne un dessèchement rapide. Cependant les Bryophytes sont caractérisés par une résistance à un dessèchement temporaire « reviviscence ».

I.1. Appareil reproducteur (gamétanges)

Il y a production sur l'appareil végétatif (gamétophyte) des organes reproducteurs soit sur le même individu soit sur des individus différents. Les gamètes sont produits dans **un gamétange (Fig. 37)**.

(Un **gamétange** : une structure végétale qui produit et qui contient des gamètes. Les gamétanges se rencontrent uniquement chez les Cormophytes).

Le gamétange est constitué d'une ou plusieurs assises cellulaires stériles (tissu stérile) protégeant les cellules mères des spores (tissu fertile). Le gamétange mâle est une **anthéridie** (c'est un sac ovoïde pédicellé) ; les gamètes sont **biflagellés**. L'anthéridie se développe à partir d'une cellule superficielle. A l'issue de son développement, les cellules spermatogènes sont enfermées dans une enveloppe mucilagineuse hydrophyle. A maturité, l'anthéridie éclate à son sommet et libère des anthérozoïdes biflagellés de forme spiralée typique qui nagent activement dans la pellicule d'eau recouvrant la mousse.

Le gamétange femelle est **un archégone** en forme de bouteille, il est constitué d'un col et d'un ventre où il y a l'oosphère.

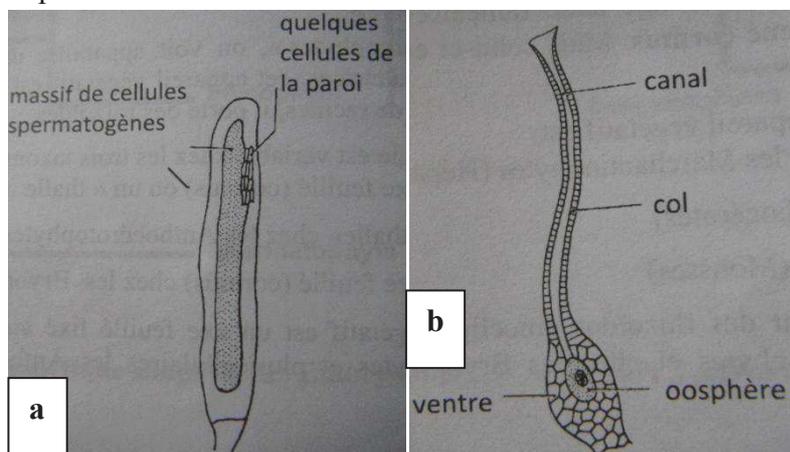


Fig. 37 : Gamétanges chez les bryophytes (a : anthéridie ; b : archégone)

Les organes de reproduction (archégonés et anthéridies) se développent entre les paraphyses au sommet des tiges à l'intérieur d'un involucre de feuilles (**Fig. 38**).

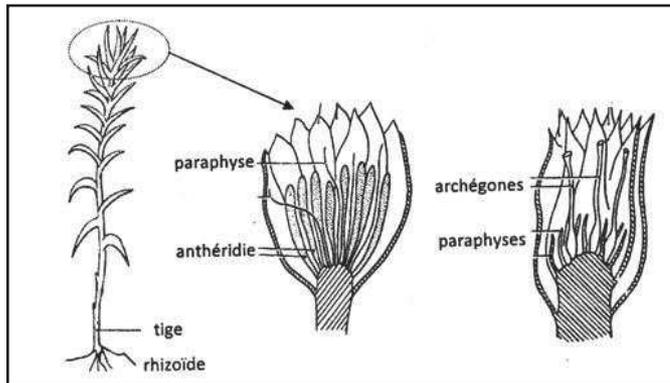


Fig. 38 : Organes de reproduction de *Polytrichum*

I.2. Reproduction et cycle de développement des Bryophytes

A. Reproduction sexuée

L'élément de dissémination de l'espèce est **une spore haploïde**. La génération haploïde issue de la spore, porte les organes reproducteurs sexués : c'est le **gamétophyte**. La génération diploïde résulte de la fécondation et produit par méiose les spores : c'est le **sporophyte**, appelé ici sporogone. Ce dernier se développe en parasite sur le gamétophyte et n'est jamais autonome. C'est un cycle de reproduction digénétique hétéromorphe haplo-diplophasique à haplophase dominante (gamétophyte) (**Fig. 39**).

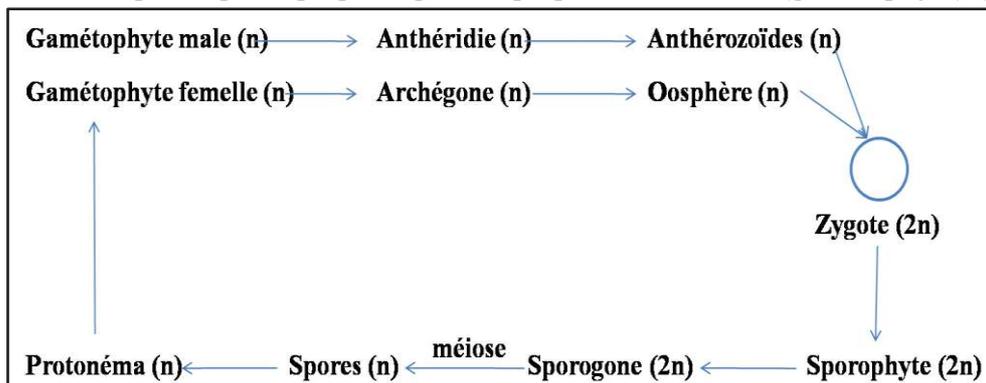


Fig. 39 : Cycle de développement des Bryophyta

Le **gamétophyte** (la plante feuillée) porte les organes sexuels : anthéridies et/ou archégoné. Il donne après fécondation un zygote qui se développe dans l'archégoné en un sporophyte particulier. Ce dernier est constitué d'un sporange appelé sporogone ou capsule qui produit des spores. Les capsules operculées de spores très visibles portées par une longue tige : la soie. Les spores sont contenues dans un organe clos, le **sporange** et elles sont inertes. Ces spores germent pour donner un protonéma sur lequel se développe le gamétophyte.

La **reproduction sexuée se déroule donc sans fleurs, avec une fécondation encore** aquatique et des gamètes mâles nageurs (caractère ancestral pour les végétaux). La fécondation chez les Bryophytes est de type **zoïdogamie** (un processus selon lequel le gamète mâle mobile atteint, et féconde, le gamète femelle en se déplaçant dans un liquide sécrété par certaines parties des appareils reproducteurs).

L'œuf ainsi formé se développe rapidement en un embryon qui évolue en un **sporophyte (Fig. 40)**:

- La partie inférieure du sporophyte s'enfonce dans le sommet de la tige feuillée et forme un **suçoir permettant l'absorption de l'eau et des substances minérales** ;

- La partie moyenne constitue la **soie** ;
- La partie supérieure porte le sporangie ou **capsule appelé sporogone**.

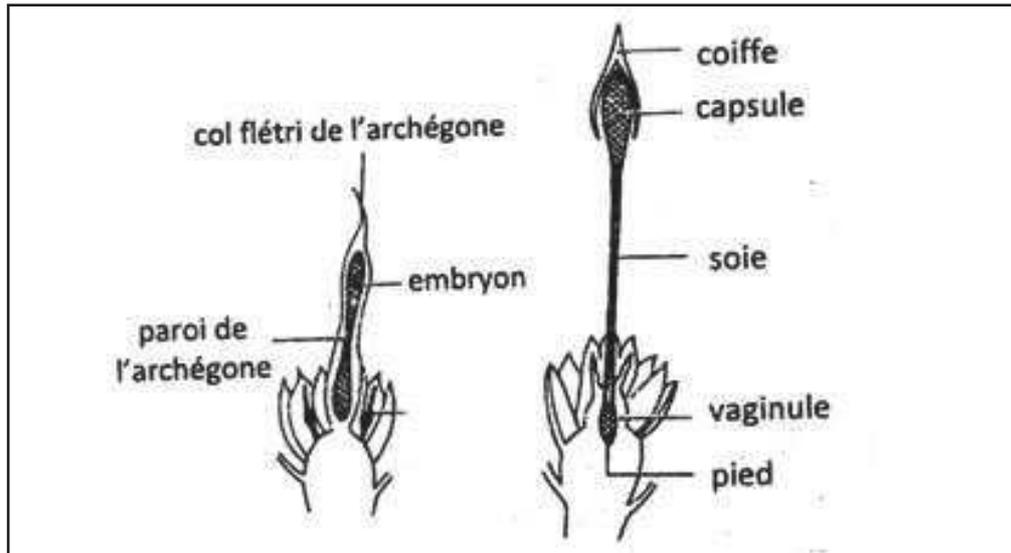


Fig. 40 : Evolution du sporophyte

Parmi les caractères généraux du cycle de développement des Bryophytes (**Fig. 41**):

- **La fécondation est aquatique** : le déplacement des anthérozoïdes ciliés jusqu'à l'oosphère nécessite la présence d'eau, ce qui lie les bryophytes aux lieux humides. La fécondation ne peut s'effectuer qu'en présence d'eau. Le spermatozoïde nage dans l'eau pour se rapprocher de l'archégonie. Les Bryophytes sont des plantes terrestres mais elles ont gardé la fécondation aquatique.
- La phase diploïde (sporophyte) est courte par rapport au gamétophyte, réduite au sporogone ;
- Le gamétophyte est représenté par des organes végétatifs peu différenciés à n chromosomes.
- Les deux gamètes sont de morphologie très différente. L'oosphère est immobile et volumineuse, le spermatozoïde est petit et flagellé donc mobile. On parle dans ce cas d'**oogamie**.
- Les parois des organes reproducteurs, anthéridie et archégonie, sont constituées par une couche de cellules. Il s'agit bien de gamétanges, qu'il faut opposer aux gamétocystes des Thallophytes.
- Le gamétange femelle a une structure originale : c'est un archégonie. De ce fait on utilise souvent comme synonyme à Cormophytes le terme d'**Archégoniates**.
- Le gamétophyte (plante feuillée) porte les organes sexuels : anthéridies et/ou archégonies. Il donne après fécondation un zygote qui se développe dans l'archégonie en un sporophyte particulier. Ce dernier est constitué d'un sporangie appelé sporogone ou capsule qui produit des spores. Ces spores germent pour donner un protonéma sur lequel se développe le gamétophyte.

B. Reproduction asexuée (végétative)

Les Bryophytes peuvent aussi se multiplier par voie végétative (sans fécondation).

Chez les bryophytes, la multiplication végétative est un mode de reproduction qui favorise une occupation rapide des sols nus ou remaniés. Elle s'effectue de diverses manières. La spore en germant donne un ensemble cellulaire filamenteux ou thalloïde appelé protonéma, ce qui correspond à un individu. La fragmentation du protonéma assure ainsi un bouturage naturel.

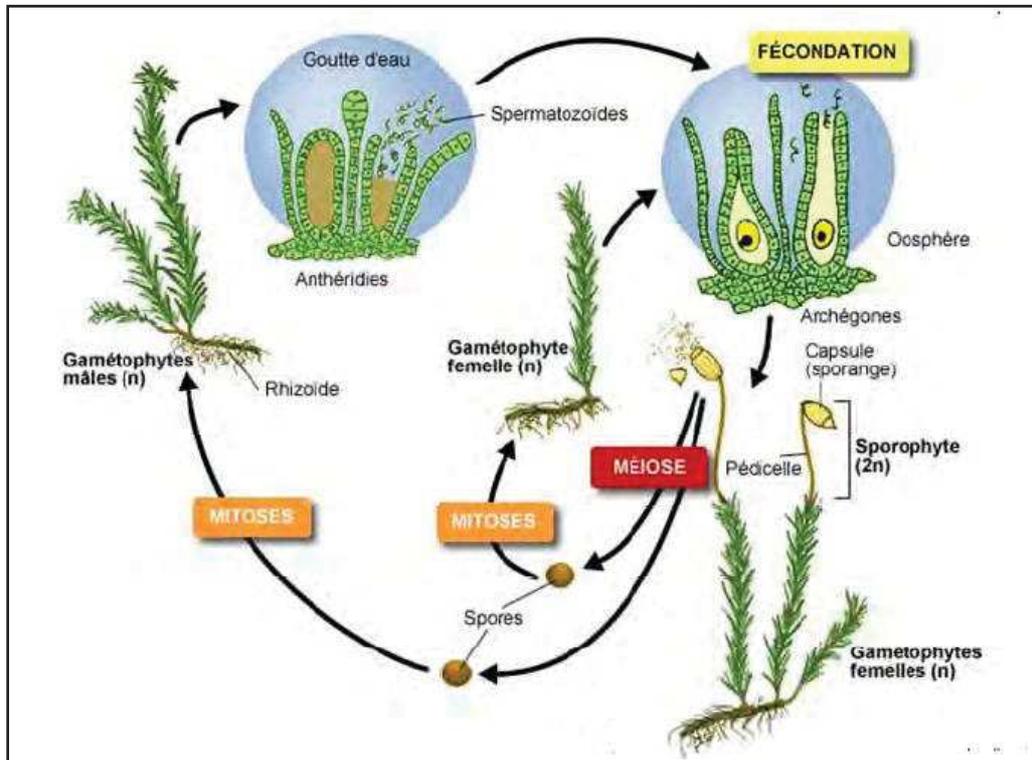


Fig. 41 : Cycle de développement des Bryophytes

N.B : L'aspect des Bryophytes est varié mais, quelles que soient leurs formes, toutes naissent, croissent et se reproduisent suivant le même processus.

I.3. Classification des bryophytes

Il y a environ 25 000 espèces de Bryophytes dans le Monde divisées en 3 sous-embranchements (Fig. 42) :

- Marchantiophyta : les Hépatiques (6000 à 8000 espèces)
- Anthocerophyta : les Anthocérotes (100 espèces)
- Bryophyta : Mousses (15 200 espèces) et Sphaignes (150 espèces)

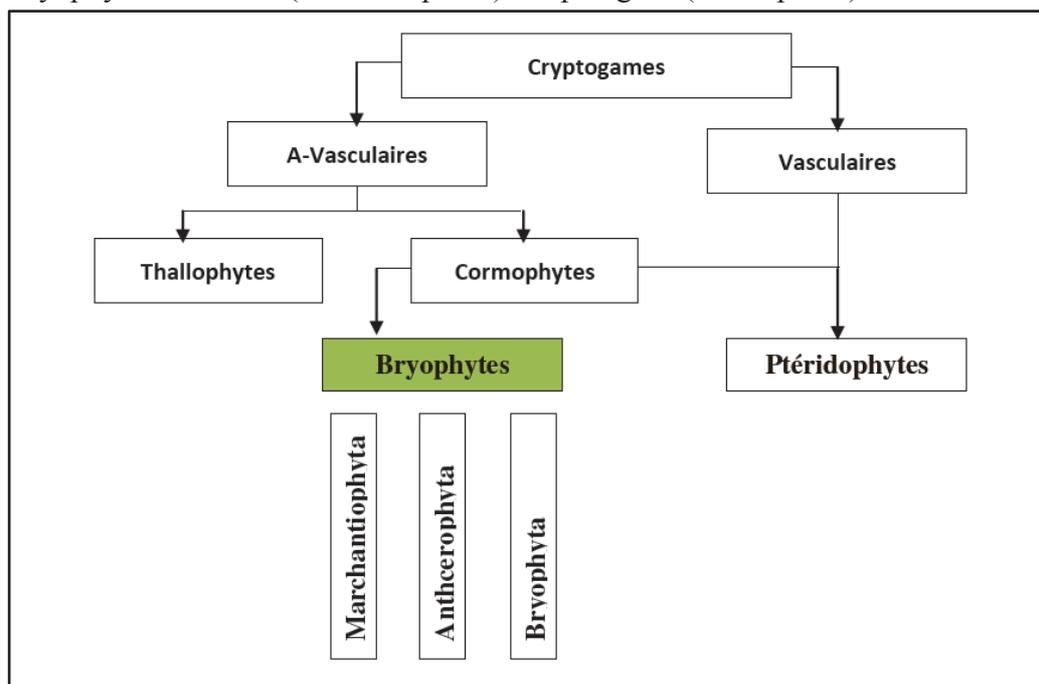


Fig. 42 : Position systématique des Bryophytes

➤ Marchantiophytes

Les Marchantiophyta (Hépatiques), sont de petites plantes sans racines ni système vasculaire (cormus thaloïde). L'appareil végétatif est variable (**Fig. 43**), il se présente sous la forme d'une lame foliacée chlorophyllienne ou « thalle » plus ou moins différencié ou bien d'une tige feuillée de quelques centimètres posée sur le sol fixée par des rhizoïdes. Cette lame thaloïde se ramifie dichotomiquement et possède des pseudo-nervures. Elle est à haut degré de différenciation, elle présente des chambres assimilatrices pour la photosynthèse. Les feuilles peuvent être extrêmement petites ; elles sont issues du fonctionnement de la cellule apicale mais elles n'ont pas de bourgeon à leur aisselle ; elles ne correspondent donc pas à vraies feuilles. Elles présentent souvent un aplatissement dorsiventral bien marqué entraînant une symétrie bilatérale. Il n'y a pas de stomates.

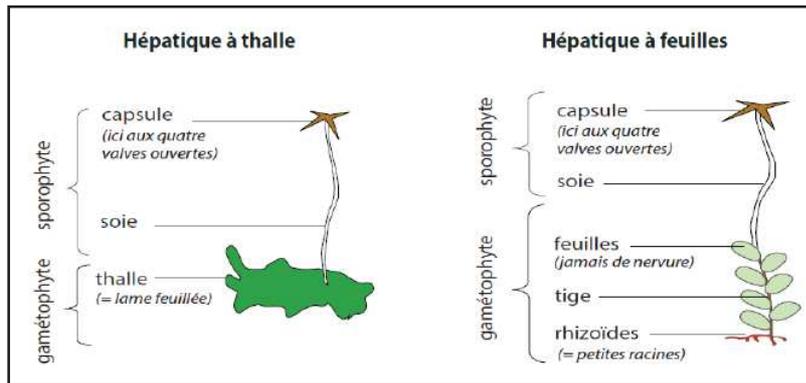


Fig. 43 : Aspect morphologique des Marchantiophytes

➤ Anthocérotophytes

Les Anthocérophytes sont des organismes thalloïdes à symétrie dorsi-ventrale, de petite taille et abondant dans les zones tropicales. Le gamétophyte a une forme thalloïde pourvu de pyrenoïdes dans les chloroplastes, aplati qui porte des rhizoïdes pluricellulaires sur sa face inférieure. Elles possèdent des stomates aussi bien sur le gamétophyte que sur le sporophyte; l'archégone, très protégé, est inclus dans les tissus du gamétophyte; le sporophyte est capable d'une certaine croissance en hauteur grâce à un méristème basal (**Fig. 44**).

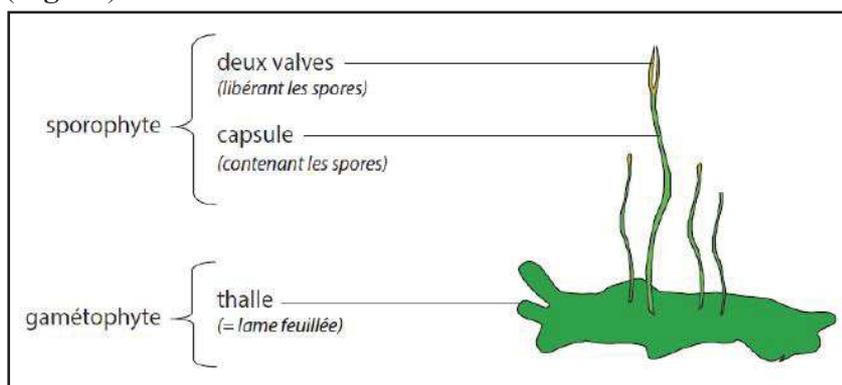


Fig. 44 : Aspect morphologique des Anthocérotophytes

➤ Bryophytes s. str.

Bryophyta (Mousses et les Sphaignes) sont des végétaux de petite taille. Ils constituent un ensemble très vaste qui se développe sur tous les substrats (**Fig. 45**).

Chez les Bryophyta (**Mousses et les Sphaignes**), la plante prend l'aspect d'une tige feuillée (cormus) portant des feuilles simples, disposées de façon hélicoïdale, les feuilles ne portent pas de bourgeon à leur aisselle. Les cellules sont peu différenciées et non organisées en véritable tissu spécialisée. L'axe feuillé

est à symétrie radiale. Le sporophyte est constitué d'un pied inclus dans le gamétophyte, d'une soie et d'une capsule avec columelle renfermant les spores.

La « tige » est un simple cordon revêtu d'un épiderme faiblement cutinisé. Des cellules allongées, les hydroïdes spécialisées dans le transport de l'eau et les leptoïdes dans celui des molécules issues de la photosynthèse, apparaissent seulement chez certaines Mousses tropicales et les Sphaignes. Les « feuilles » présentent des pseudo-nervures chlorophylliennes et sont de simples émergences de la tige constituées d'une seule assise de cellules chlorophylliennes, excepté dans la région médiane où deux ou trois épaisseurs de cellules simulent une nervure. La tige est fixée au sol par une touffe de rhizoïdes (filament pluricellulaires aux cloisons transversales obliques).

Les Bryophyta présentent des caractéristiques propres :

- le sporophyte est chlorophyllien ;
- la déhiscence de la capsule se fait par un opercule ou des valves
- et les rhizoïdes sont pluricellulaires.

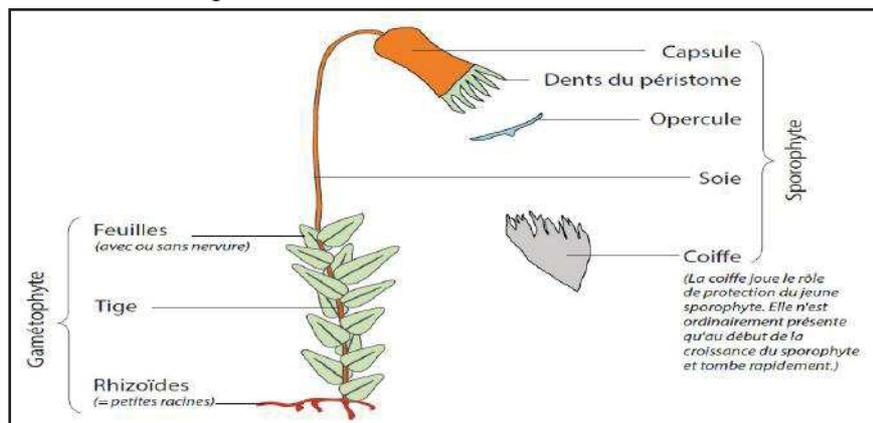


Fig. 45 : Aspect morphologique des Bryophyta

II. Les Ptéridophytes

Les Ptéridophytes sont des végétaux chlorophylliens **pourvus de tiges, feuilles et vraies racines** (Cormophytes) et d'un appareil conducteur (système vasculaire). Ils sont ainsi les premières plantes vasculaires ou **«Trachéophytes»**, elles possèdent de véritables vaisseaux (phloème et xylème avec éléments lignifiés typiques : les trachéides à ponctuations scalariformes).

Comme les Bryophytes, les Ptéridophytes sont des **cryptogames** car se reproduisent par **spores**. Ils ne portent pas de fleurs, et par suite ne peuvent pas se reproduire par des graines et les appareils reproducteurs restent peu apparents donc, les Ptéridophytes sont des **Cryptogames Vasculaires**.

Par comparaison avec les Bryophytes, les Ptéridophytes montrent un appareil végétatif plus différencié et adapté à la vie aérienne. Ces plantes sont généralement herbacées qui vivent dans les biotopes humides et ombragés des forêts et peuvent alors devenir arborescents (fougères arborescentes) ou épiphytes.

Les représentants actuels des Ptéridophytes constituent quatre classes (**Fig. 46**):

- les Psilophytes.
- les Lycophytes (lycopodes, sélaginelles),
- les Sphénophytes (prêles),
- les Filicophytes (Fougères proprement dites)

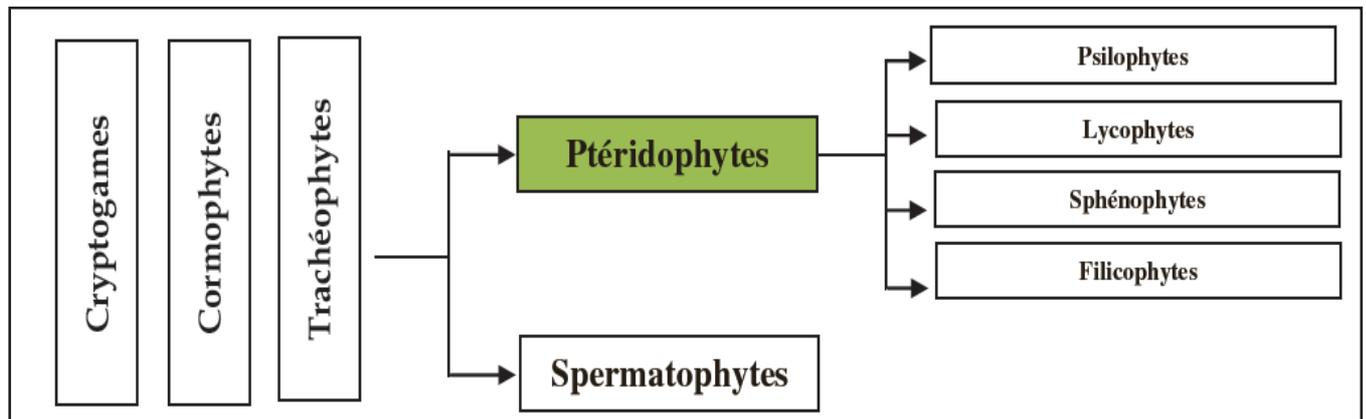


Fig. 46 : Position systématique des Ptéridophytes

II.1. Caractères morphologiques

II.1.1. Appareil végétatif

Les ptéridophytes sont généralement de petites plantes, vivaces par une tige souterraine horizontale ou rhizome.

L'appareil végétatif est constitué :

- d'un rhizome** : large tige souterraine à croissance horizontale, riche en réserves et ramifiée ;
- de racines adventives**, tout le long du rhizome ;
- A partir du rhizome se détachent des axes dressés, ramifiés de façon dichotomique : c'est la division en deux des tiges : cas des Sélaginelles, Lycopodes (**Fig. 47a**), les feuilles sont de taille réduite (microphylls) et pourvues d'une seule nervure ou verticillée : cas des Prêles (**Fig 47b**), de grandes feuilles (mégaphyls ou frondes) chez les Fougères (**Fig. 47c**).

Les Psilophyta n'ont pas de racines ni feuilles mais possèdent des formations ligneuses (**Fig. 47d**).

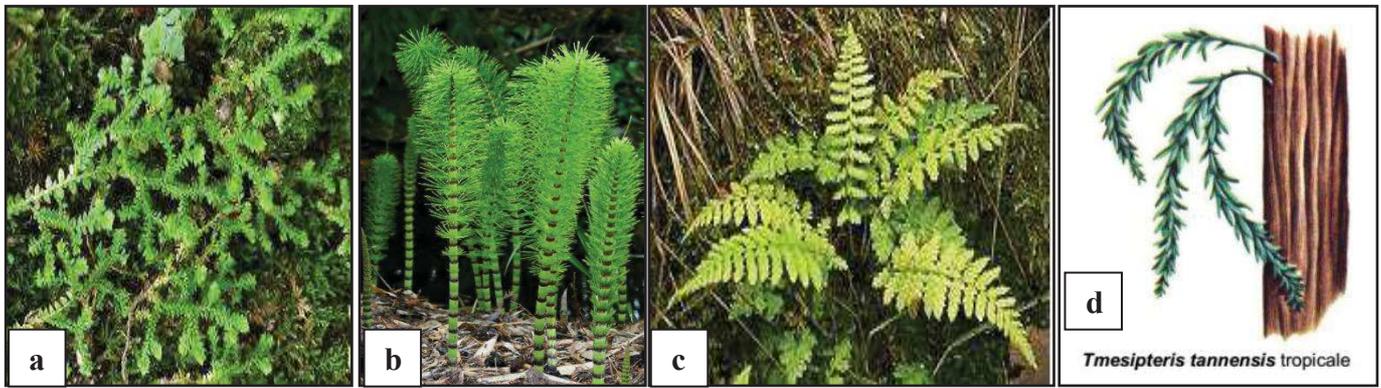


Fig. 47 : La morphologie des Ptéridophytes (a : Sélaginelle; b : Prêle; c : Filicophyte; d : Psilophyte)

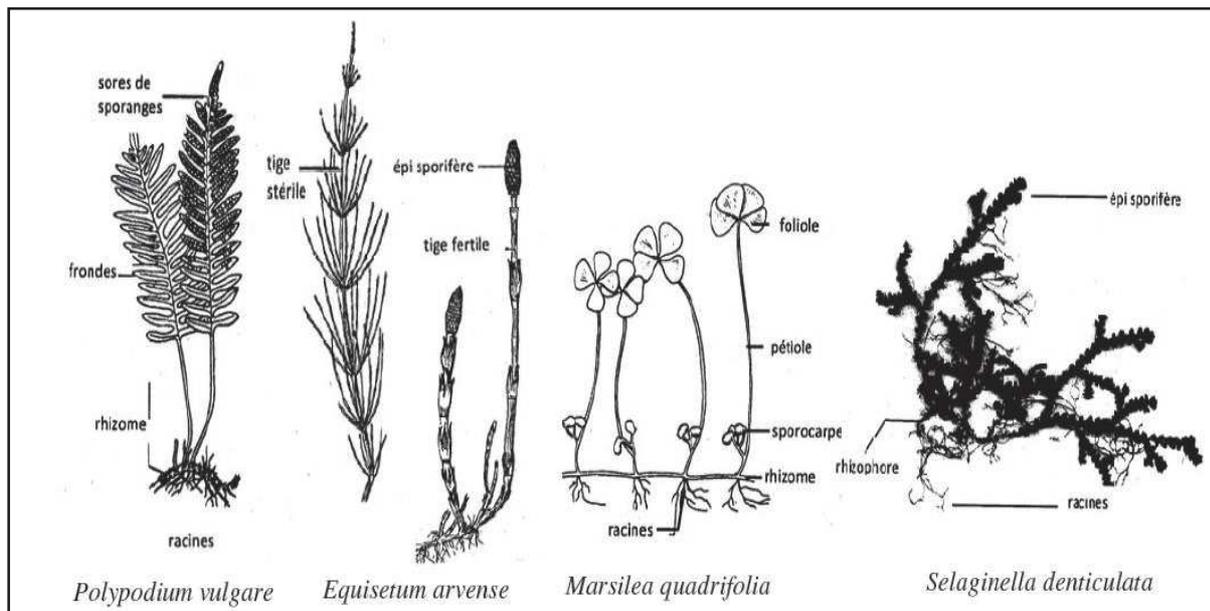


Fig. 48 : quelques espèces de Ptéridophytes et leurs morphologies

II.1.2. Appareil reproducteur (Prothalle ou gamétophytes : mâle et femelle)

Les ptéridophytes se caractérisent par une génération gamétophytique très courte. Elle porte le nom de **Prothalle**.

Les spores germent, dès qu'elles ont atteint le sol et forment des **prothalles discrets, fugaces** et aériens. Ils sont composés de lobes laciniés qui leur confèrent une forme très irrégulière. Ces prothalles ont l'aspect d'une lame cordiforme de quelques millimètres de long chez les fougères (Fig. 49), ou de minuscules tubercules chez les lycopodiales.

Les prothalles sont munis de rhizoïdes, mais dépourvus d'organes (feuilles, tiges et racines) et de tissus conducteurs. Les prothalles

Au bout d'un mois environ, les **gamétanges naissent d'une cellule superficielle qui grossit et se développe** vers l'intérieur en se cloisonnant.

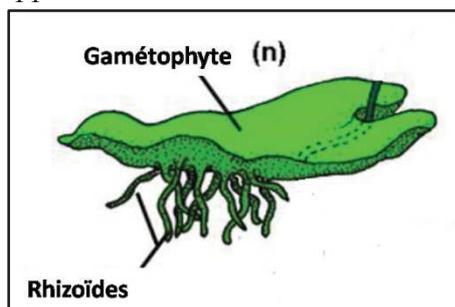


Fig. 49 : le gamétophyte chez les fougères

Sur la face inférieure du prothalle apparaissent les gamétanges mâles et femelles (Fig. 50). Il s'agit :

- des **anthéridies qui sont de petites sphères disposées à la périphérie du prothalle.**

Elles possèdent une paroi pluricellulaire qui en se déchirant à maturité libère des **spermatozoïdes** hélicoïdaux flagellés qui vont pouvoir nager dans l'eau du sol ;

- des **archégonés dont l'organisation est sensiblement identique à celle décrite chez la mousse.**

Cependant le ventre qui contient l'oosphère est intégré au tissu prothallien.

De même le col est plus court.

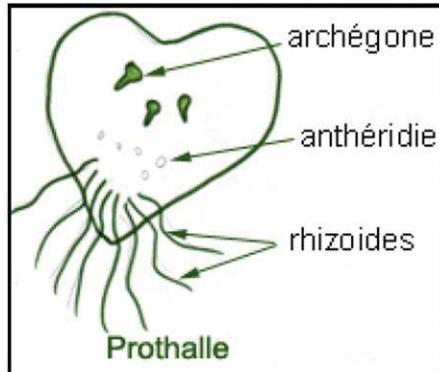


Fig. 50 : Gamétanges chez les fougères

II.1.3. Le sporophyte

Le sporophyte chez les ptéridophytes correspond à la plante feuillée

Les **sporangies se différencient au niveau des feuilles du sporophyte. Ils sont regroupés en sores** à la face inférieure des feuilles chez les fougères (**Fig. 51a**), ou disposés à l'aisselle des microphylls, elle-même regroupées en épis à l'extrémité des tiges chez les prêles et les sélaginelles (**Fig. 51b**).

Les **sores** sont protégés par une lame très mince, l'indusie (certaines espèces en sont dépourvues).

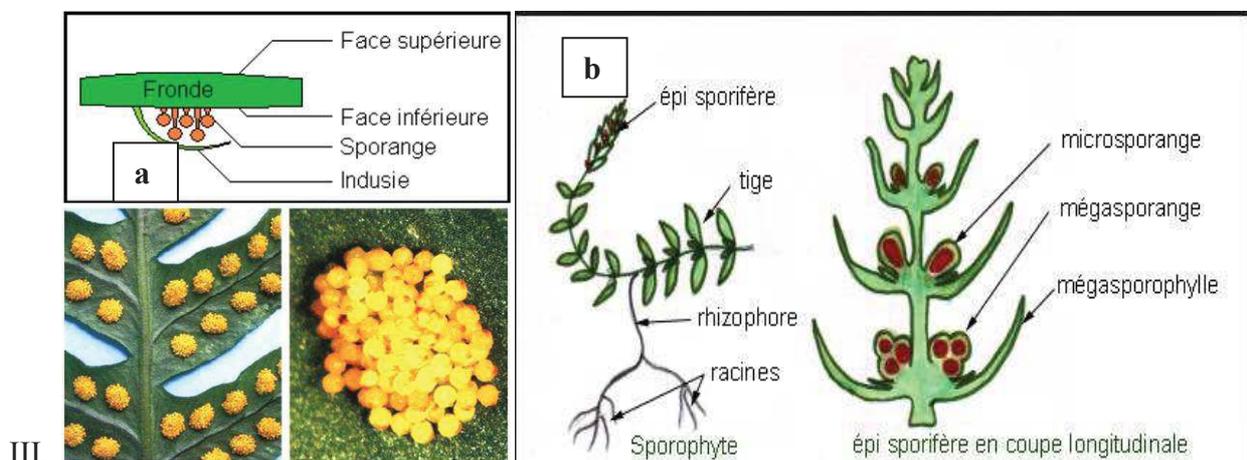


Fig. 51 : les sporangies (**a** : chez les fougères ; **b** : chez la sélaginelle)

III.1.4. Reproduction chez les ptéridophytes et cycle de développement

Les ptéridophytes se multiplient par deux voies sexuée et asexuée.

La reproduction asexuée se fait essentiellement par fragmentation du rhizome à croissance indéfinie.

La reproduction sexuée se fait par des spores. Le « cycle vital » est fermé. On peut le schématiser ainsi (**Fig. 52**):

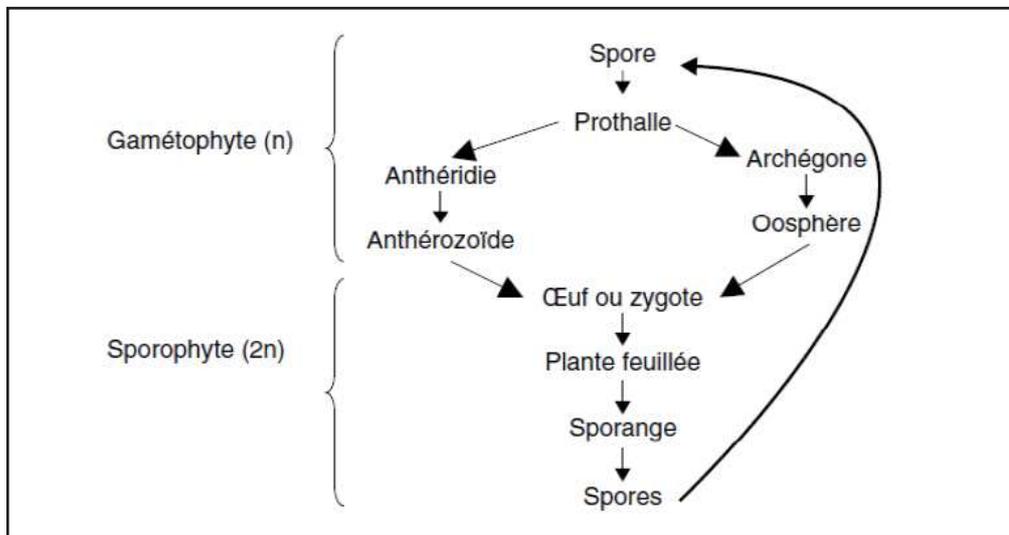


Fig. 52 : Cycle de développement des ptéridophytes

Les Fougères sont les premières plantes terrestres à avoir pratiquement tout le cycle de développement constitué par des organes à $2n$ chromosomes. Le gamétophyte, à n chromosomes, est en effet réduit à un organe rudimentaire et transitoire, **le prothalle**.

Le cycle de développement fondamental des ptéridophytes est caractérisé par deux générations bien distinctes (cycle digénétique diplo- haplophasique) avec prédominance de la phase sporophytique ($2n$) car toujours le gamétophyte demeure discret. Celui-ci sera soit bisexué, soit unisexué mâle ou femelle. Par rapport au cycle de développement des Bryophytes, il y a donc inversion de l'importance des phases haploïdes et diploïdes.

Le sporophyte diploïde constitue la plante feuillée vasculaire, et le gamétophyte haploïde constitue le prothalle porteur de gamètes.

Le sporophyte est ici la phase très nettement dominante. On notera toutefois que si le gamétophyte reste microscopique, ne différenciant ni organe ni tissu, il est chlorophyllien et autotrophe, c'est-à-dire qu'il constitue une phase entièrement autonome.

La fécondation des ptéridophytes est encore tributaire **du milieu aquatique** (nécessitant de l'eau de pluie ou de la rosée), **les spermatozoïdes ciliés et mobiles** sont libérés dans le milieu extérieur.

La fécondation est de type **Oogamie**. Plusieurs oosphères sont fécondées mais un seul se développe en un embryon qui reste fixé temporairement sur le prothalle femelle.

Cependant, les feuilles fertiles ou sporophylles qui portent les sporanges, siège de la réduction chromatique, montrent d'un groupe à l'autre des tendances vers un groupement qui annonce les Phanérogames.

Une fois **l'oosphère fécondée, le zygote se développe immédiatement en une jeune plante avec des frondes, un rhizome et des racines (Fig. 53)**.

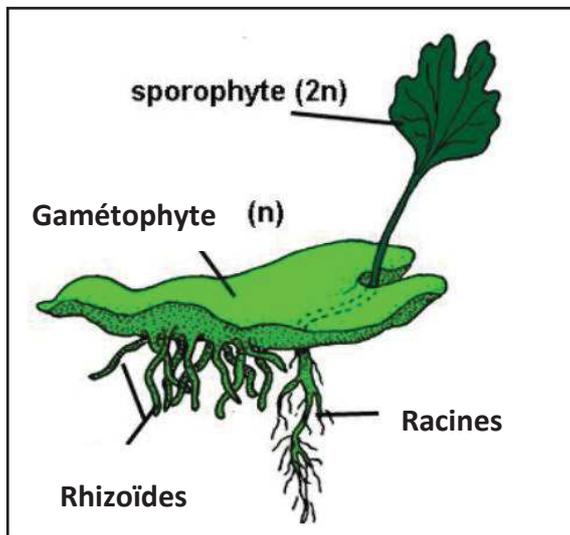


Fig. 53 : Début de développement du sporophyte

L'élément de dissémination des ptéridophytes est une spore haploïde (Cryptogamie). La spore, libérée dans la nature, germe pour donner un prothalle. Sur le prothalle vont se former les organes sexuels donnant des gamètes. Les anthérozoïdes (gamètes mâles) nagent jusqu'aux archégonies (gamètes femelles) toujours attachées au prothalle et donnent un zygote diploïde qui va aboutir à la formation d'un jeune sporophyte.

La jeune plante feuillée sporophyte peut vivre en parasite pendant un certain temps sur le prothalle; puis, elle acquiert son autonomie en développant ses propres racines.

Sur les feuilles du sporophyte vont se former des sporanges au sein desquels il va y avoir production de spores haploïdes. Ces spores seront libérées pour recommencer le cycle.

Les cycles d'une fougère et d'une sélaginelle sont présentés dans les figures 54 et 55 respectivement.

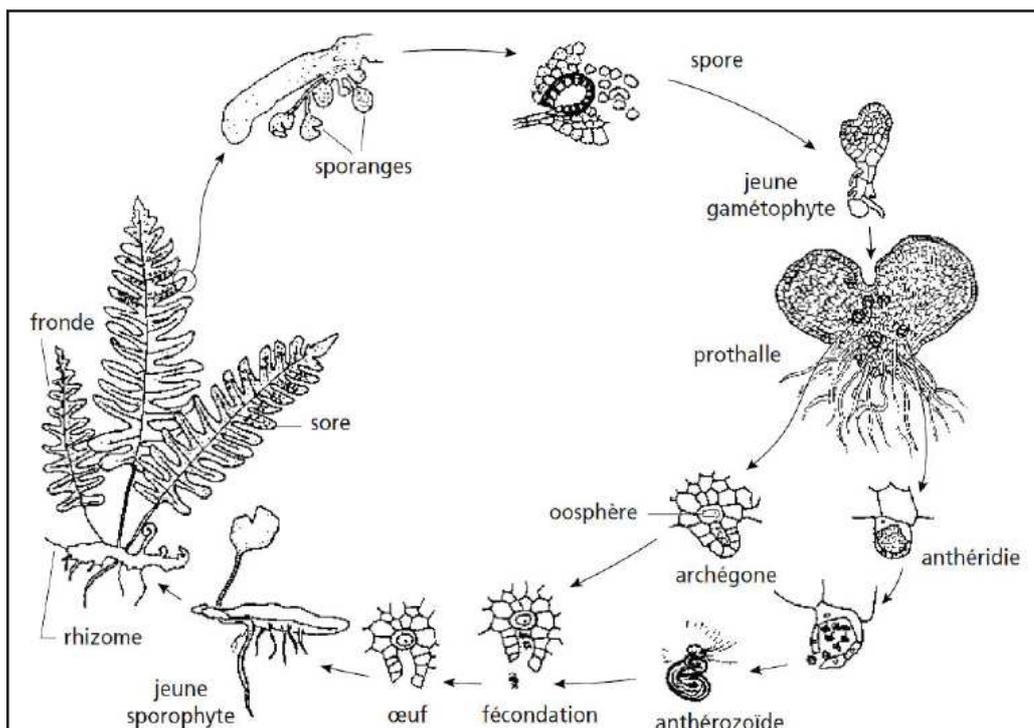


Fig. 54 : Cycle de développement d'une polypodiaceae : *Polypodium vulgare* (isosporie).

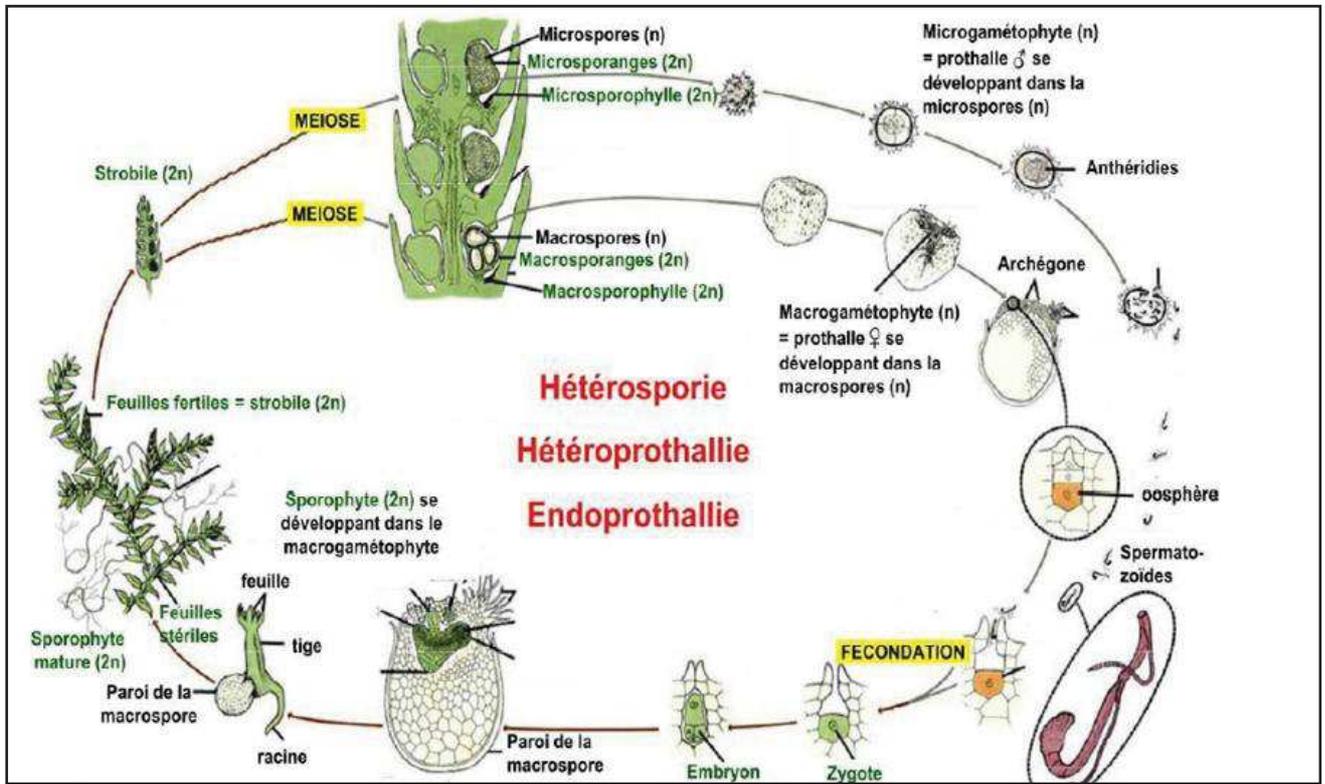


Fig. 55 : Cycle de développement d'une sellaginellaceae : *Selliginella denticulata* (hétérosporie, hétéroprothallie et endoprothallie)

(Isosporie, hétérosporie, hétéroprothallie et endoprothallie : c'est expliqué au cours)

III.1.5. Caractères anatomiques des Ptéridophytes

Les ptéridophytes sont les premières **trachéophytes**, elles sont caractérisées par l'organisation des tissus conducteurs en stèle « colonne », ou pachyte (Fig. 56).

Dans la stèle, le xylème et le phloème sont entouré d'un endoderme et d'un péricycle. Il existe différents types de stèles qui dérivent du type fondamental, la protostèle.

Dans ces stèles, le xylème est formé de trachéïdes ou vaisseaux imparfaits. Les trachéïdes annelés et spiralés forment le protoxylème, les trachéïdes scalariformes (c'est-à-dire, en forme d'escalier, du latin scalae), le métaxylème.

Chez les Filicophytes (fougères), les tissus conducteurs sont organisés en siphonostèle ou Dictyostèle.

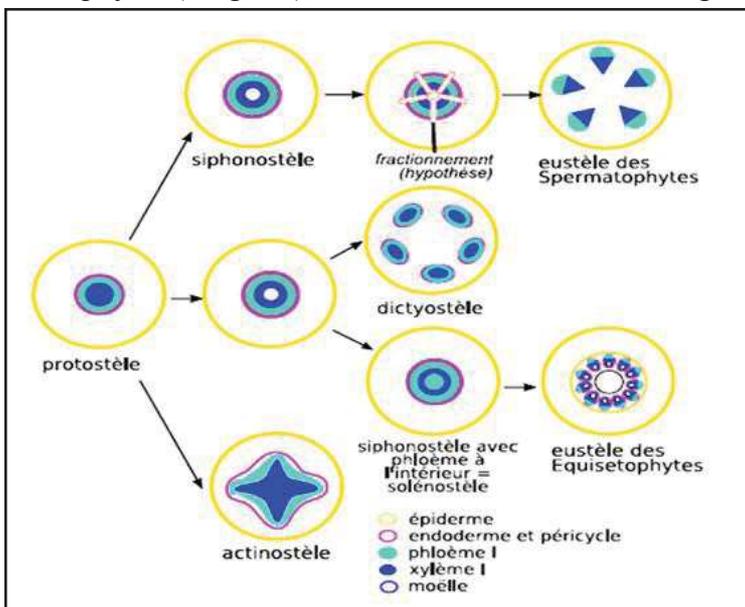


Fig. 56 : Les différents types de stèles

III.1.6. Classification des Ptéridophytes

La classification de quelques espèces de Ptéridophytes est représentée dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Classification des Ptéridophytes

Classes	Ordres	Familles	Espèces
Psilotopsida	Psilotales	Psilotaceae	<i>Psiltum nudum</i>
Psilophytopsida	Psilophytales		<i>Hyenia</i>
	Rhyniales	Rhyniaceae	<i>Rhynia</i>
Lycopsida (Eligulopsida) Ligulopsida	Lycopodiales	Lycopodiaceae (isosporées)	<i>Lycopodium clavatum</i>
	Sellaginellales	Sellaginellaceae (hétérosporées)	<i>Sallaginella denticulata</i> <i>Lepidocarpon</i>
	Lepidodendrales		<i>Lepidodendron</i> <i>Sigillaria</i>
Sphenophyliopsida	Equisetales	Equisetaceae	<i>Equisetum arvense</i>
Calamopsida	Calmitales		<i>Calamites</i>
	Sphenophyllales		
Primofilicopsida			
Eusporangiopsida	Ophioglossales	Ophioglossaceae	<i>Ophioglossum vulgatum</i>
			<i>Botrychis lunaris</i>
Protoleptosporangiopsida			
Leptosporangiopsida	Marsileales	Marsileaceae	<i>Marsilea quadrifolia</i>
	Salviniales	Salviniaceae	<i>Axolla</i>
		Azollacées	
	Polypodiales (Filicales)	Polypodiaceae	<i>Polypodium vulgare</i>
			<i>Dryopteris filix-mas</i>
			<i>Adiantum capillus veneris</i>
			<i>Asplenium trichomanes</i> <i>Asplenium ceterah</i>
	Marratiales	Marattiacées	<i>Angiopteris</i>
	Osmundales	Osmundacées	<i>Osmunda regalis</i>
Hymenophyllales	Hymenophyllacées		
Gleicheniales	Gleicheniacées		
	Pteridaceae	<i>Pteris aquilinum</i> <i>Pteridium</i>	

IV. Les Phanérogames (Spermaphytes)

Les **Phanérogames** ou plantes à fleurs (du grec, phaneros= visible et gamos= mariage) désigne l'ensemble des plantes qui ont leurs organes reproducteurs visibles, groupés aux extrémités de certains rameaux du sporophyte. D'autre part, elles ont la capacité de former des **graines** d'où le nom de **Spermaphytes** qu'on leur donne aussi.

Au cours de l'histoire évolutive des végétaux, on assiste à une réduction de la phase gamétophytique (réduction de taille mais aussi du temps de vie) au profit de la phase sporophytique (la plante feuillée à 2n) (Fig. 57).

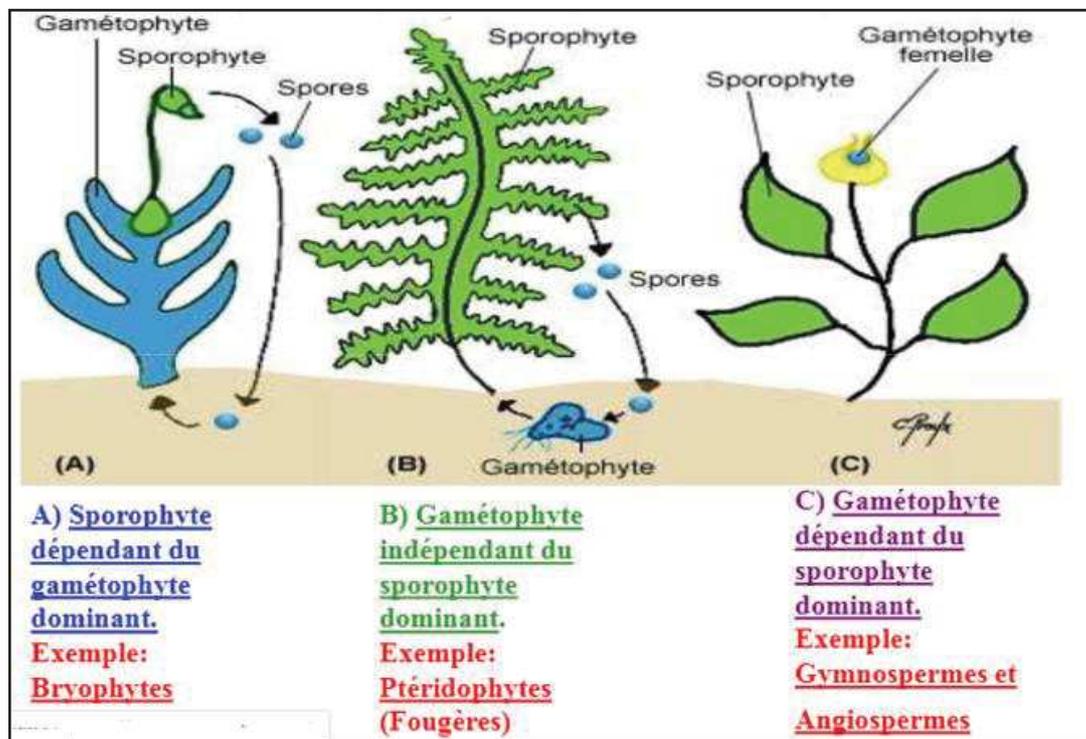


Fig.57 : Relation entre les générations des cormophytes

Les Phanérogames se divisent en trois sous-embranchements, les Préphanérogames, les Gymnospermes et les Angiospermes.

IV.1. Les Préphanérogames

Il ne reste aujourd'hui qu'une centaine d'espèces; pratiquement que des espèces fossiles. Les Préphanérogames (Préspermaphytes, Fougères à graines, Gymnospermes primitives, Gymnospermes archaïques) est un groupe intermédiaire entre les Pteridophytes et les vrais Spermaphytes. Durant longtemps, ont été considérés comme Gymnospermes. C'est un groupe qui est peu représenté, limité à l'Asie. Ce sont généralement des espèces présentant à l'état ornemental.

Les caractères distinctifs des Préphanérogames sont essentiellement:

- C'est un groupe qui a perfectionné l'ovule (Un nouvel organe de dissémination). Mais pas de véritable graine. Ces ovules par leurs téguments renforcés simulent des graines avec lesquelles on les a confondus
- Gamétophyte femelle protégé par tégument : ovule (endoprothallie)
- ovules à réserves faites avant la fécondation
- Gamète mâle est encore mobile
- Appareil floral archaïque.
- Morphologiquement, un ovule fécondé est identique à un ovule non fécondé, par contre chez les phanérogames un ovule après fécondation change d'aspect et se transforme.
- La fécondation se réalise en milieu liquide : les anthérozoïdes sont ciliés mais ne nagent pas, ils descendent par gravité.
- Le développement de l'œuf en embryon se fait toujours lorsque l'ovule fécondé tombe dans le sol, il continue sa croissance puis la jeune plantule s'enracine et donne un nouvel individu. Les préphanérogames sont **ovipares**.

IV.1.1.Appareil végétatif

Les Préphanérogames regroupent des plantes dont l'appareil végétatif ressemble à celui des fougères arborescentes avec des frondes.

Les Préphanérogames possèdent :

- Un port de fougères (feuilles très développées) ;
- La présence de vaisseaux (trachéides) ;
- Des espèces dioïques (pied mâles et femelles séparées).
- La ramification de leur appareil végétatif est souvent dichotomique.
- Feuilles végétatives enroulées en crosse rappelant la fronde des Filicophytes

- **Chez les Cycas** : les feuilles fortement découpée rappelle la fronde des fougères, mais l'allure de l'arbre la rapproche des palmiers avec un tronc épais, terminé par une rosette de feuille de grande taille, à gros ovules. Les ovules fécondés sont riches en Amidon (Fig. 58a et b).
- **Chez le Ginkgo**: on peut parler de feuilles véritable, aplatie et disposée tout au long des rameaux (Fig. 58c).

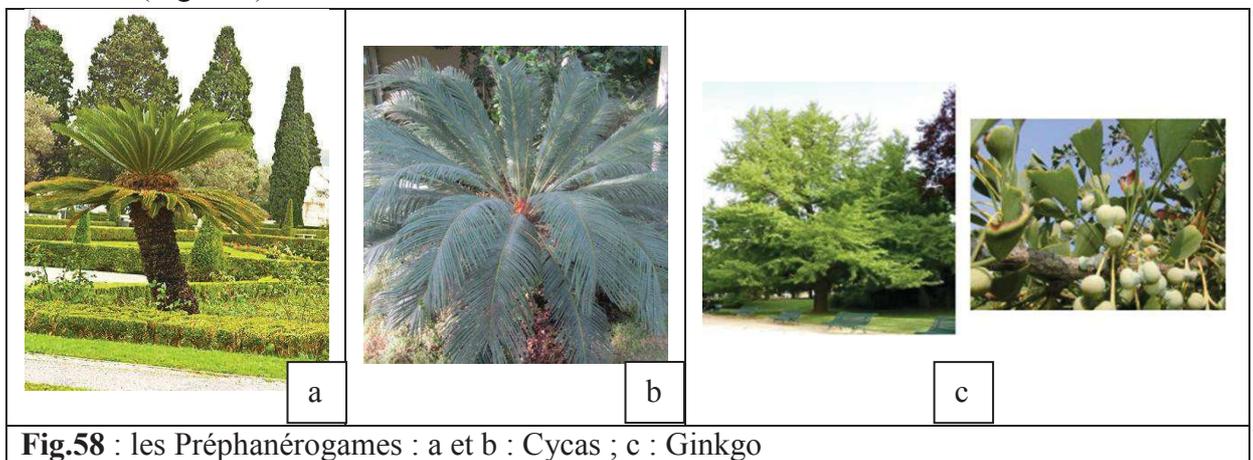


Fig.58 : les Préphanérogames : a et b : Cycas ; c : Ginkgo

IV.1.2. Appareil reproducteur

Chez les préspermaphytes, les appareils reproducteurs sont des **cônes pendants, portés par des individus différents** : espèces **dioïques**.

➤ L'appareil reproducteur femelle : l'ovule

Le cône femelle est formé de **feuilles fertiles ou ovulifères** regroupées en cône. Les feuilles ovulifères sont morphologiquement semblables aux feuilles végétatives mais légèrement plus petites, elles sont composées d'un rachis et de folioles et de couleur brunâtre (**dépourvues de chlorophylle**). Elles portent à leur base deux rangées d'**ovules de grosseur variable** (Fig. 59)



Fig. 59 :

A. Cône femelle jeune ; B. Cône femelle mure portant des ovules ; C. Ecaille ovulifère.

L'ovule est **nu** et constitué de (Fig. 60) :

- un **tégument** unique, vascularisé et tristratifié (sarcotesta, sclérotesta, endotesta).
- un **nucelle** central, massif dans lequel se différencie :
- le **prothalle** femelle ou endosperme
- les **archéogones** (situés au sommet de l'endosperme)

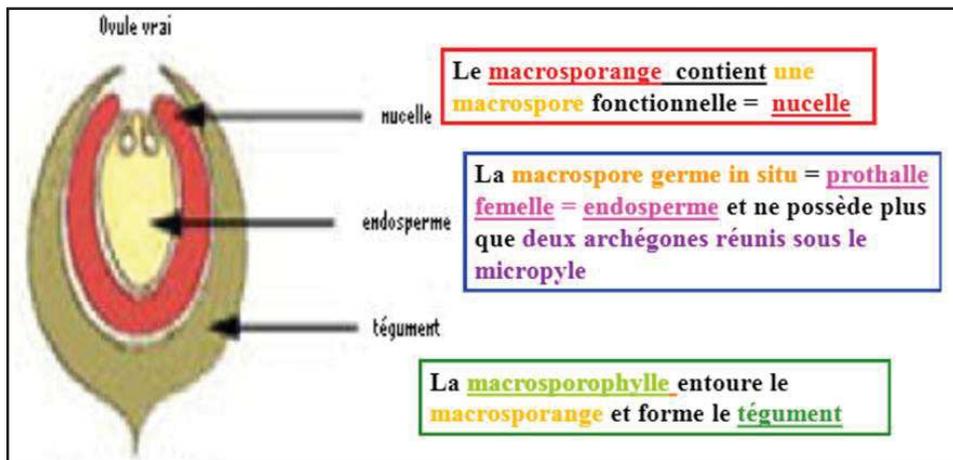


Fig. 60 : Ovule des Préphanérogames

➤ L'appareil reproducteur male : étamines et grains de pollen

Les pieds mâles sont rares dans la nature. Le cône mâle est constitué par un ensemble de petites feuilles modifiées et emboîtées. Elles portent sur leur face inférieure de très nombreux sporanges contenant des spores provenant de la transformation d'une cellule ayant subi la méiose. Ces spores disséminées sont des **grains de pollen** et représentent le gamétophyte mâle, ou prothalle mâle.

Tout naturellement et par ressemblance avec les organes mâles des plantes à fleurs, les feuilles modifiées seront appelées **étamines** et les sporanges, **sacs polliniques**.

Les étamines sont constituées d'un filet à l'extrémité duquel on trouve deux sacs polliniques. L'origine phylogénétique du filet est la microsporophylle des ptéridophytes hétérospores alors que chaque sac pollinique dérive du microsporangie.

A l'intérieur des sacs polliniques se forment par méiose des microspores. Celles-ci ne sont pas disséminées, mais à l'intérieur de l'épaisse paroi des microspores se développent par mitoses successives le microprothalle ou gamétophyte mâle, réduit à quatre cellules, appelé **grain de pollen**.

Ce sont ces grains de pollen, ou anthérozoïdes ciliés, qui seront disséminés et qui, au contact de l'ovule, libéreront les deux gamètes mâles dans la chambre pollinique de l'ovule.

➤ Reproduction des Préphanérogames

Le cycle de reproduction des préspermaphytes est typiquement diplo-haplophasique avec une **génération gamétophytique très réduite** qui se développe sur le sporophyte alors qu'elle était indépendante chez les ptéridophytes. Seul le gamétophyte mâle (grain de pollen) est libéré alors que le gamétophyte femelle (endosperme) reste inclus à l'intérieur de l'ovule.

Chez les préphanérogames la fécondation est **zoïdogame** (**dans ce type de fécondation, les gamètes mâles, des anthérozoïdes** ciliés, parviennent au contact des archéogones en nageant à travers une chambre pollinique remplie d'eau qui surmonte l'ovule). La fécondation se réalise en milieu liquide: toutefois l'eau

nécessaire au déplacement des anthérozoïdes n'est plus fournie par le milieu mais par **la liquéfaction de la partie supérieure du nucelle qui surmonte les archégones.**

La fécondation des Préspermatophytes fait encore intervenir des spermatozoïdes avec flagelles locomoteurs. Ils nagent vers l'oosphère dans une poche de liquide creusée à l'intérieur de l'ovule. L'appareil locomoteur du gamète n'est plus différencié et libère complètement la fécondation du milieu aquatique.

➤ Cycle de développement des Préphanérogames

Le cycle est donc constitué de deux générations successives différentes. Il est haplodiplophasique, digénétique à dominance sporophytique (Fig. 61 et 62).

Par rapport aux Ptéridophytes, des différences apparaissent.

1. **On parle dorénavant d'ovule comme organe de reproduction femelle.** L'ovule est nu.
2. **Le gamétophyte femelle (l'endosperme),** diminue de taille et est constitué d'un tissu, et de une ou deux archégones.
3. **Le nucelle peut être considéré comme le sporange femelle (macrosporange).** Il est lui-même protégé par des tissus spécifiques : les téguments.
4. **Les grains de pollen constituent le prothalle, ou gamétophyte mâle. Ils sont disséminés** maintenant en milieu aérien. Ces grains de pollen sont formés à partir de cellules issues de la méiose dans des sporanges mâles : les sacs polliniques, portés par des étamines.
5. **Les gamètes mâles sont toujours des spermatozoïdes et la fécondation peut encore être considérée** comme « aquatique » dans la chambre pollinique.
6. **L'embryon se développe grâce aux réserves accumulées dans l'endosperme avant la fécondation.**
7. **C'est l'ovule qui est disséminé et non une graine.**

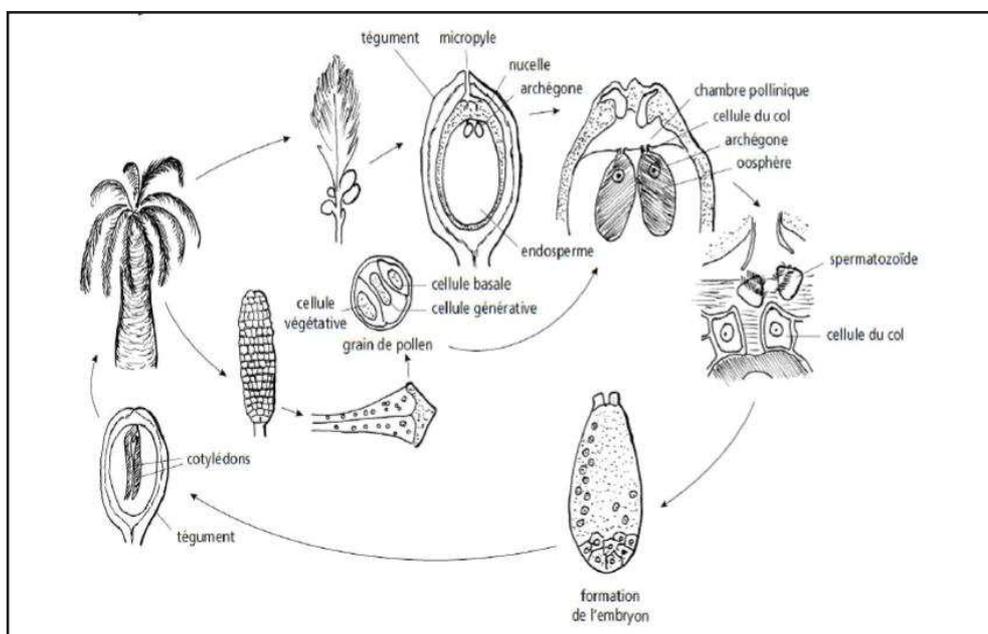


Fig.61 : Cycle de développement des *Cycas*

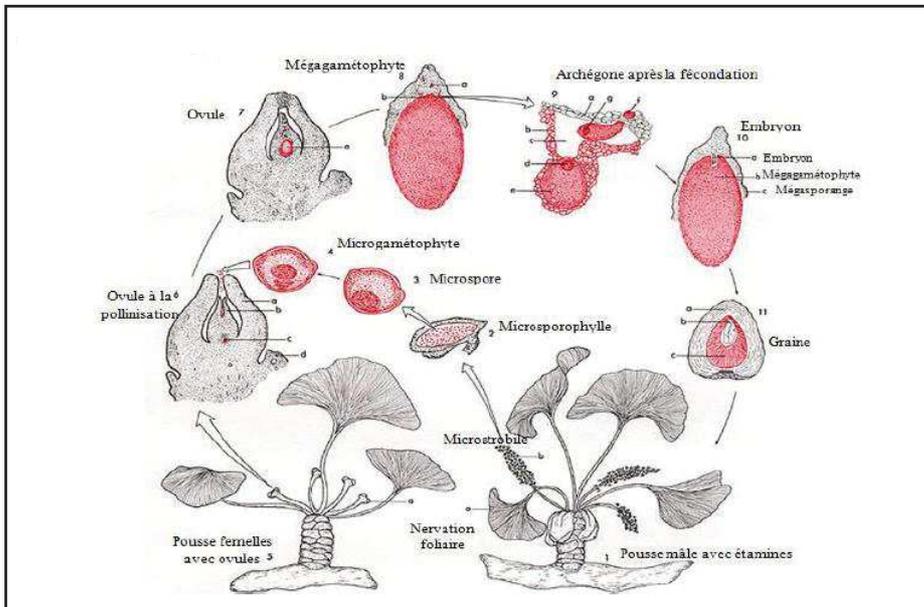


Fig.62 : Cycle de développement des *Ginkgo*

➤ **Anatomie des Préphanérogames**

L'étude anatomique du rachis montre une disposition des faisceaux libéro-ligneux **en oméga inversé** (Fig. 63).

Chaque faisceau est constitué de xylème et de phloème séparés par une zone cambiale.

De part et d'autre de cette zone, se trouve du liber et quelques éléments du bois homoxylé.

La moelle est très importante et persemée de nombreux canaux sécréteurs de gomme toxique. L'écorce, également importante, présente par contre des faisceaux vasculaires réduits.

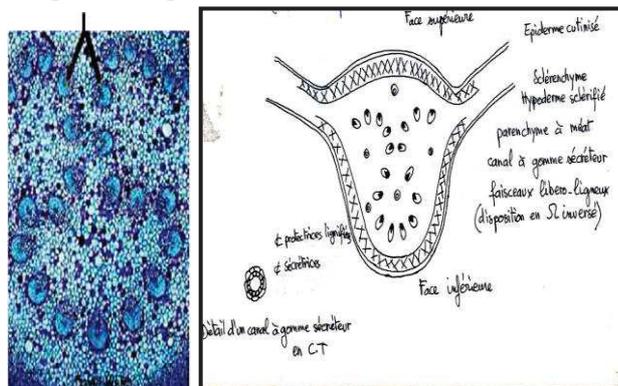


Fig. 63 : la disposition des faisceaux libéro-ligneux **en oméga inversé** chez les préphanérogames

➤ **Classification**

- **Cycadophytes** : Représentés par 3 familles (Zammiaceae, Cycadaceae et Stangeriaceae) et 11 genres.

- *Cycas revoluta* ; Cycadaceae ; Cycadales
- *Bowenia serrulata* ; Stangeriaceae ; Cycadales
- *Zamia obliqua* ; Zamiaceae ; Cycadales

- **Ginkgophytes** : représentés uniquement par l'espèce *Ginkgo biloba*

V. Les Spermaphytes ou Phanérogames (Plantes à graines, plantes à fleurs)

Les Spermaphytes actuelles sont représentées par 250 000 à 300 000 espèces, dont une très grande majorité représentée par les Angiospermes (plantes à fleurs) et le reste est représenté par les Gymnospermes (environ 1 000 espèces actuelles).

V.1. Caractères généraux des Spermaphytes

- Ce sont des plantes à graines et à ovules.
- Des phanérogames, parce qu'elles ont une sexualité visible; Plantes à fleurs.
- Ce sont des plantes terrestres (Embryophytes) qui possèdent des ovules se transformant en graines après fécondation ;
- Des cormophytes : des végétaux qui possèdent des tiges, des feuilles, des racines ;
- Des trachéophytes,
- L'ovule renferme le gamétophyte réduit haploïde qui produit le gamète femelle l'oosphère. L'ensemble reste dépendant du sporophyte (endoprothallie complète).
- Végétaux les plus perfectionnés et les plus adaptés à la vie terrestre;
- L'élément de dissémination et de conservation de l'espèce, chez les spermaphytes, est un sporophyte (diploïde) appelé **graine**.
- La plante feuillée est un sporophyte qui développe des organes sexuels.
- Les gamètes mâles, porté par des grains de pollen, se fixent sur le stigmate et arrivent aux gamètes femelles qui restent toujours fixées aux sporophytes. Ainsi, la fécondation a lieu sur le sporophyte pour donner un zygote diploïde qui se développe et donne une graine qui va assurer la dissémination et la conservation de l'espèce. Chez les spermaphytes, le stade gamétophyte (haploïde) est très réduit et vit toujours en parasite sur le sporophyte. La fécondation chez les spermaphytes ne se fait pas dans l'eau comme chez les autres végétaux.

Les Spermaphytes sont divisés en deux grands groupes : les Gymnospermes et les Angiospermes

V.2. Les Gymnospermes

Les Gymnospermes actuelles typiques sont essentiellement représentées par les Conifères. Leur cycle de vie est caractérisé par une phase végétative plus longue que la phase reproductive.

V.2.1. Appareil végétatif

Les Gymnospermes sont toutes ligneuses (arbres, arbustes), c'est-à-dire qu'ils ont une tige rigide formée de bois : aucune espèce n'est herbacée. Ce sont très souvent des arbres de grande taille, moins souvent un arbuste ou un arbrisseau. Ils ont un cycle de développement s'étalant sur plusieurs années. Leur longévité peut être élevée; le Pin longue vie (*Pinus longaeva*) vit plus de 4 000 ans. Leur Cycle de vie est lent Ils ont un port **pyramidal ou conique**, du fait d'une très forte dominance apicale. Ses branches sont souvent disposées en couronnes ou pseudo-verticilles.

Les feuilles sont petites, soit en forme d'aiguille (pins, mélèzes, cèdres), soit en forme d'écailles (cyprès, thuyas) (**Fig. 64**). Ces feuilles sont soit alternes, opposées ou verticillées. Dans la majorité des cas, les feuilles sont persistantes, c'est pourquoi les arbres sont toujours verts.

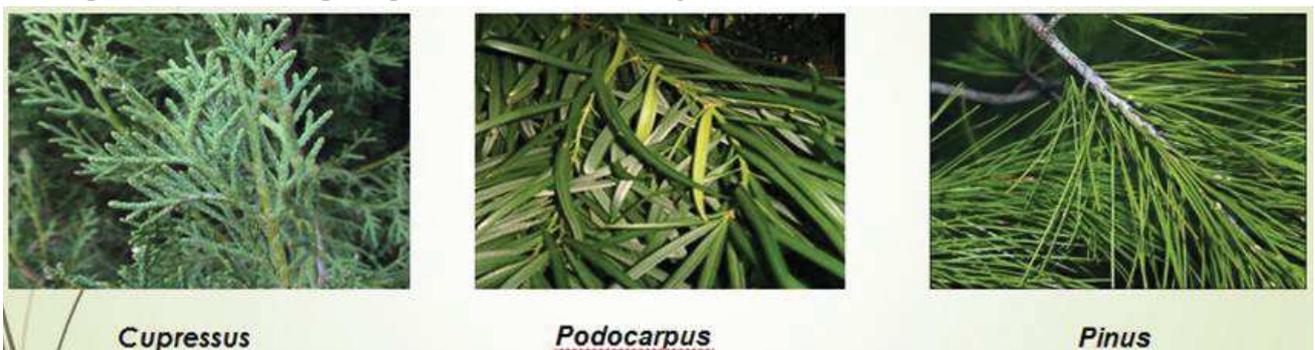


Fig.64 : les feuilles chez les coniférophytes

Les 2 sexes sur le même pied (monoïques) rarement séparés (dioïques ex. If).

Ce sont des plantes xérophytiques (résistantes à la sécheresse des montagnes, cuticule épaisse, stomates peu nombreux cachés dans les cryptes, surface foliaire très réduite).

Ils ne rejettent en général pas de souche après une coupe.

Enfin, ils sécrètent de la résine, ils possèdent, en général, un appareil sécréteur (canaux à résines) qui leur donne une odeur caractéristique justifiant l'appellation de « **Résineux** »

Leur bois est **homoxylé**; car formé d'un seul type d'éléments : Trachéïdes à ponctuations aréolées.

V.2.2. Appareil reproducteur

Ils sont généralement monoïques (pins, sapins) à l'exception de certaines espèces qui sont dioïques (ifs). Les organes sexuelles sont groupés en cônes unisexués soit mâles, soit femelles qui sont portés par le même pied.

Ils portent des cônes ligneux (cône, strobile, galbule) à l'âge adulte (d'où le nom de conifères) (Fig. 65).

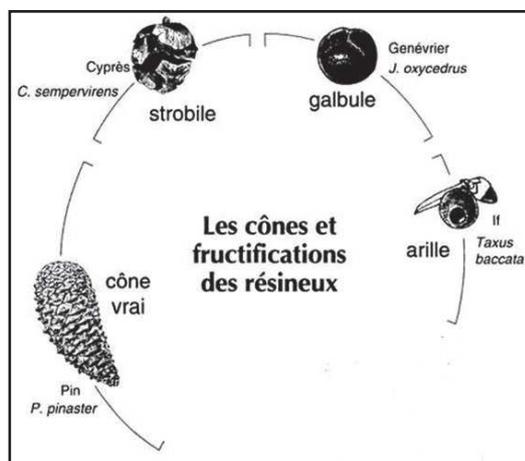


Fig. 65 : Les cônes chez les résineux

Leurs ovules nus (avec une certaine tendance à l'angiospermie) ; Un sac embryonnaire (gamétophyte femelle) pluricellulaire (7 cellules, y compris le gamète) ; Un gamétophyte mâle pluricellulaire (3 cellules, y compris 2 gamètes).

Les organes sexuels mâles sont représentés par des feuilles sporangifères (écailles) ou étamines portant des microsporanges (sacs polliniques) contenant des microspores (graines de pollen).

Les organes sexuels femelles (les ovules), parfois d'origine caulinaire (issu de la tige), sont nus ; ils peuvent être situés sur la face dorsale des écailles dont l'ensemble forme en cône femelle.

Ces écailles, qui ont la même valeur que le carpelle d'angiospermes, ne se renferment jamais complètement pour former une cavité close protégeant les ovules. Les ovules sont toujours unitégumentés

V.2.3. Reproduction des Gymnospermes

La reproduction des Gymnospermes est sexuée ; La pollinisation se fait toujours par le vent.

C'est le prothalle haploïde ou endosperme qui se charge de réserves.

Les processus de reproduction (fécondation, embryogénèse) sont de longue durée, de sorte qu'il y a souvent, par exemple chez les pins, plusieurs générations de cônes femelles visibles sur les mêmes branches.

Les écailles, d'abord petites et écartées, laissent arriver librement le pollen ; puis, elles grandissent et se referment en protégeant les ovules qui se transforment en graines. En général, les cônes se lignifient (pins, épicéas, cyprès) et s'ouvrent finalement par dessiccation en laissant échapper leurs graines. Exceptionnellement, ils deviennent charnus (« baies » de genévriers).

Les ifs forment un repli rouge et charnu autour de l'ovule fécondé (arille) ; il n'y a pas de cône.

La fécondation s'effectue par **siphonogamie**. Ce type de fécondation se rencontre chez les Gymnospermes les plus évoluées et chez l'ensemble des Angiospermes. Le grain de pollen émet des gamètes mâles non ciliés qui sont conduit aux archégonies à travers un tube pollinique.

N.B : La siphonogamie est un mode de fécondation des plantes à graines par l'intermédiaire d'un tube pollinique qui libère les anthérozoïdes dans une synergide chez les angiospermes ou près de l'oosphère dans l'archégonie chez les gymnospermes.

La siphonogamie s'oppose à la zoïdogamie. La siphonogamie est un type de fécondation végétale simple (chez les gymnospermes) ou double (chez les angiospermes, un autre gamète mâle féconde l'endosperme).

Elle représente un mode d'adaptation à l'environnement terrestre, puisque les gamètes mâles ne sont jamais libérés dans l'environnement externe, notamment chez les conifères.

V.2.4. Les caractères anatomiques des Gymnospermes

- Présence de formations secondaires libéro-ligneuses et subéro-phellodermiques ;
- Bois secondaire **homogène**, formé uniquement de trachéïdes à ponctuations aréolées (Fig. 66);
- Appareil sécréteur constitué le plus souvent par des canaux à oléo- résine ;
- Formations primaires criblo-vasculaires, comme chez les Eudicots, à xylème centrifuge et phloème centripète ;
- Les rayons ligneux (ou parenchyme horizontal), visibles souvent à l'œil nu, se distinguent par leur disposition radiale, leur minceur et leur couleur claire. Ils ont une longueur (sens radial), une hauteur (sens vertical) et une épaisseur (sens tangentiel) limitées, mais caractéristiques pour chaque espèce. Ils croisent les éléments verticaux (parenchyme vertical, fibres et éléments conducteurs).



Fig. 66 : Coupe transversale du bois homogène d'une tige de pin

V.2.5. Etude d'une Pinophyte (Pin d'Alep = *Pinus halepensis*)

Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) est un Conifère caractéristique des régions méditerranéennes (Fig. 67). C'est un arbre de 5 à 20 m de hauteur. Il est très héliophile (besoin de lumière important). Résiste très bien à la sécheresse.

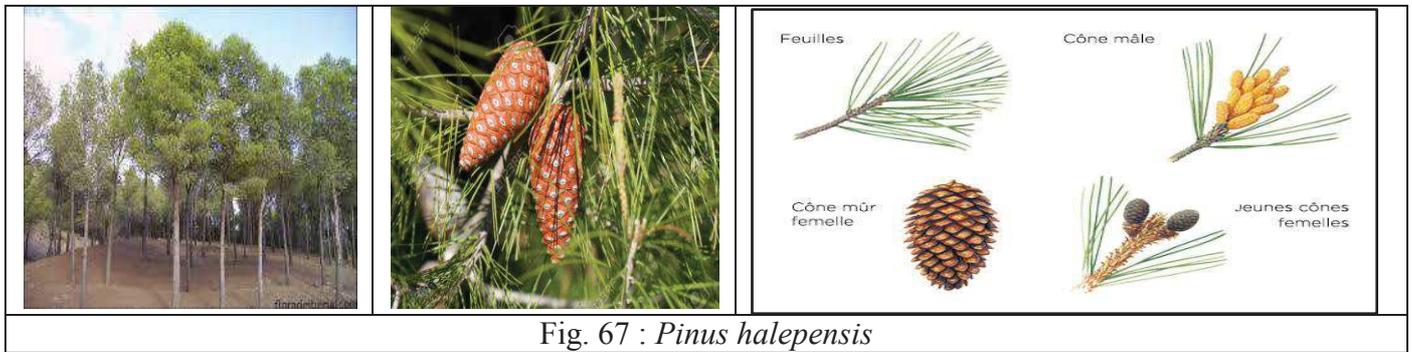


Fig. 67 : *Pinus halepensis*

3 types de rameaux (Fig. 68):

- longs : auxiblastes
- moyens : mésoblastes
- courts : brachyblastes
- feuilles en aiguilles (Fig. 68): pseudophylles regroupées en deux chez cette espèce
- feuilles scarieuses (Fig. 68) : euphylles

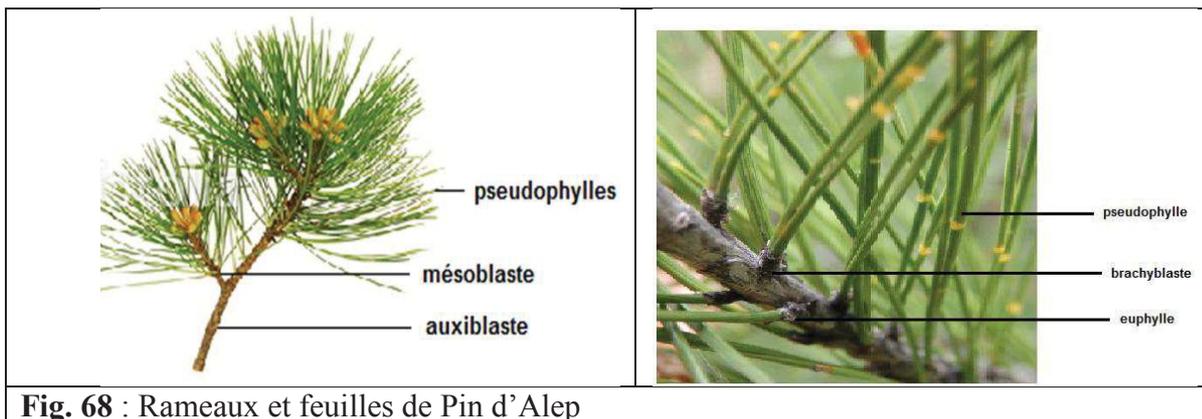


Fig. 68 : Rameaux et feuilles de Pin d'Alep

- Les cônes mâles sont groupés en châtons sous les jeunes rameaux de l'année.
- A l'aisselle de chaque cône mâle il y a une bractée : donc le **cône mâle est une fleur mâle**
- L'ensemble des cônes mâles constitue **une inflorescence (Fig. 69)**.
- Le cône mâle : ensemble d'écailles mâles=écailles staminales portant deux sacs polliniques chacune
- Une coupe longitudinale dans le cône mâle montre les sacs polliniques et les grains de pollen (**Fig. 69**)

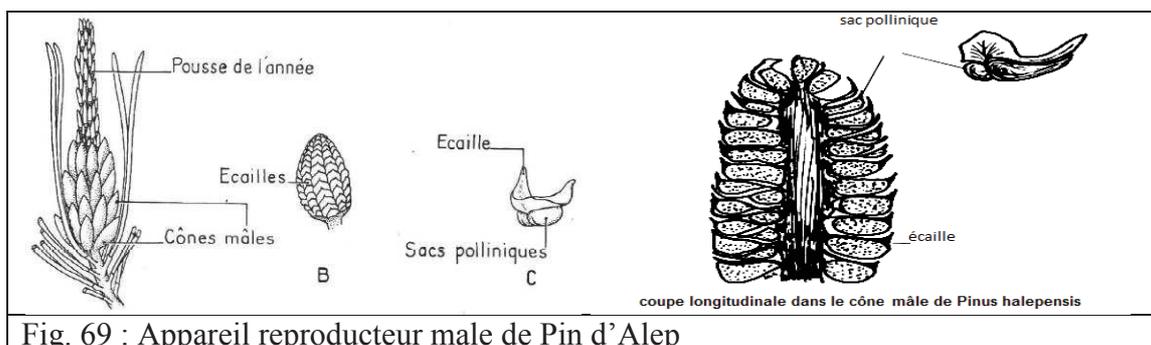


Fig. 69 : Appareil reproducteur male de Pin d'Alep

Les fleurs males se composent d'un grand nombre de petites feuilles minces insérées autour d'un petit axe formant dans leur ensemble un petit cône.

Chacune de ces feuilles et qui constitue une étamine porte à sa face inférieure deux petits microsporangies remplis de microspores. À maturité chaque microsporange ou sac pollinique s'ouvre par une fente et laisse échapper dans l'air ses microspores ou grains de pollen.

Au niveau des microsporangies les cellules mères (2n) subissent la méiose qui donne des cellules haploïdes (n) ; sorte de « spores ».

Chaque cellule haploïde subit une mitose pour donner un grain de pollen constitué de deux cellules, une cellule végétative et une cellule gamétogène. Le grain de pollen porte deux ballonnets qui facilite la dissémination par le vent (Fig. 70).

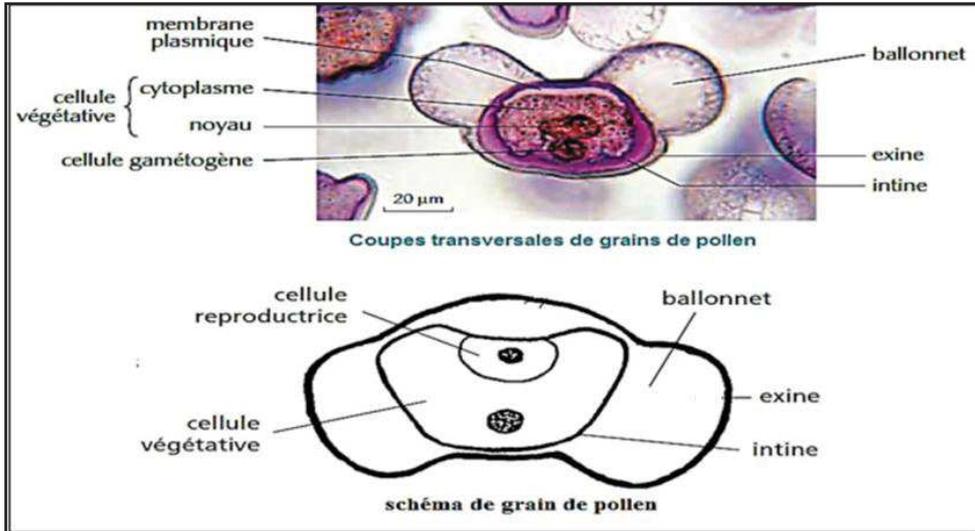


Fig. 70 : Grain de pollen de Pin d'Alep

- Le cône femelle est dure, secrète une substance gluante : **résine**. Il est de **couleur violet** (Fig. 71)
- La coupe longitudinale montre la présence d'un ensemble d'écailles femelles portant 2 ovules, écaille femelle = **écaille ovulifère**. A l'aisselle de chaque écaille ovulifère il y a une **bractée = fleur femelle**
- L'ensemble des écailles femelles qui constitue le cône femelle est une **inflorescence**

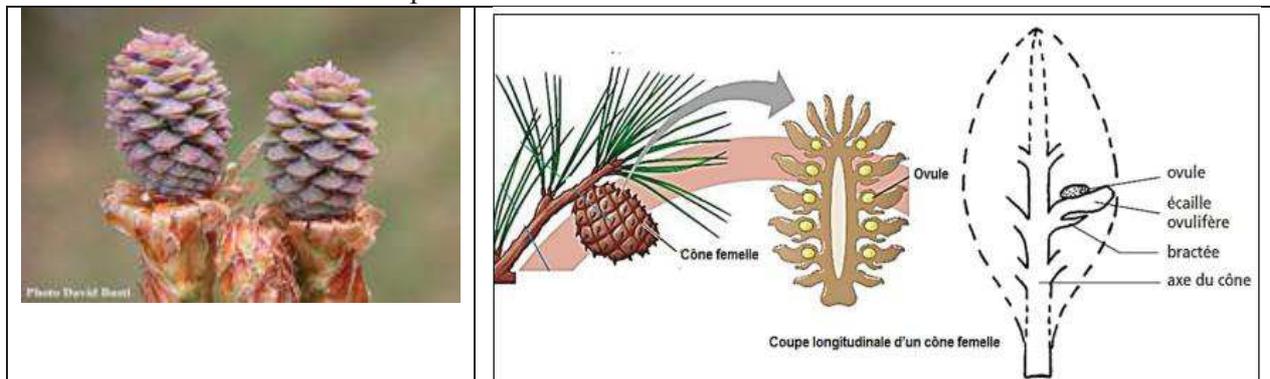


Fig. 71 : Cône femelle de Pin d'Alep

Il existe plusieurs cônes femelles sur le même arbre (Fig. 72)

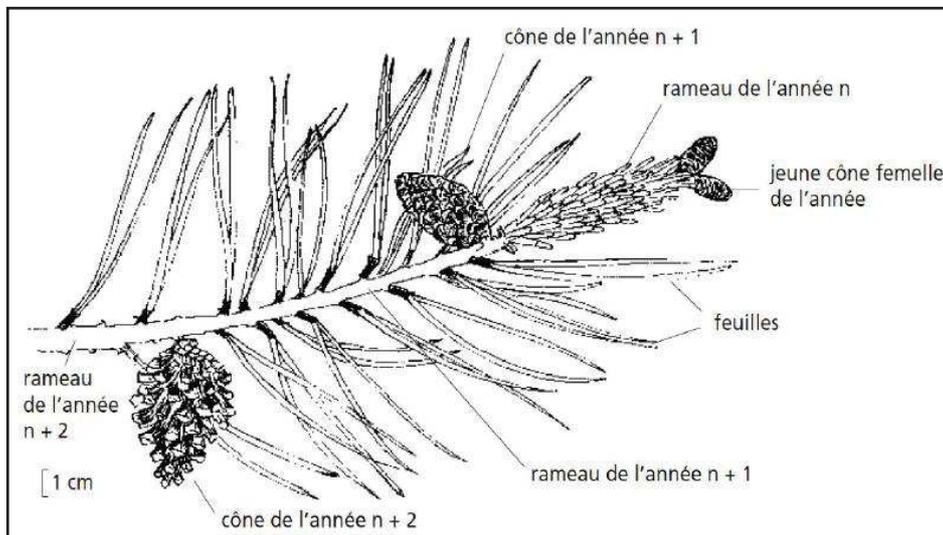


Fig. 72 : Les cônes femelles présents sur le Pin d'Alep

➤ **La structure de l'ovule :**

Chaque ovule est entouré de tégument et renferme un tissu dit nucelle ; en plus de l'endosperme qui représente le gamétophyte femelle (Fig. 73).

L'endosperme porte 2 à 3 archégones. Les téguments laissent une ouverture qui s'appelle micropyle.

Les ovules sont nus sur l'écaïlle ovulifère, directement accessibles au pollen. L'ovule est toujours entouré par un seul tégument protecteur. Ce tégument renferme le nucelle ou macrosporange dans lequel se forment après méiose quatre macrospores.

Trois dégénèrent, la macrospore restante se développe au sein du nucelle par mitose pour donner le gamétophyte femelle ou "endosperme".

L'endosperme, bien que réduit à quelques centaines de cellules possède encore deux archégones qui se différencient au pôle apical ou pôle micropylaire. Une seule oosphère par ovule sera fécondée.

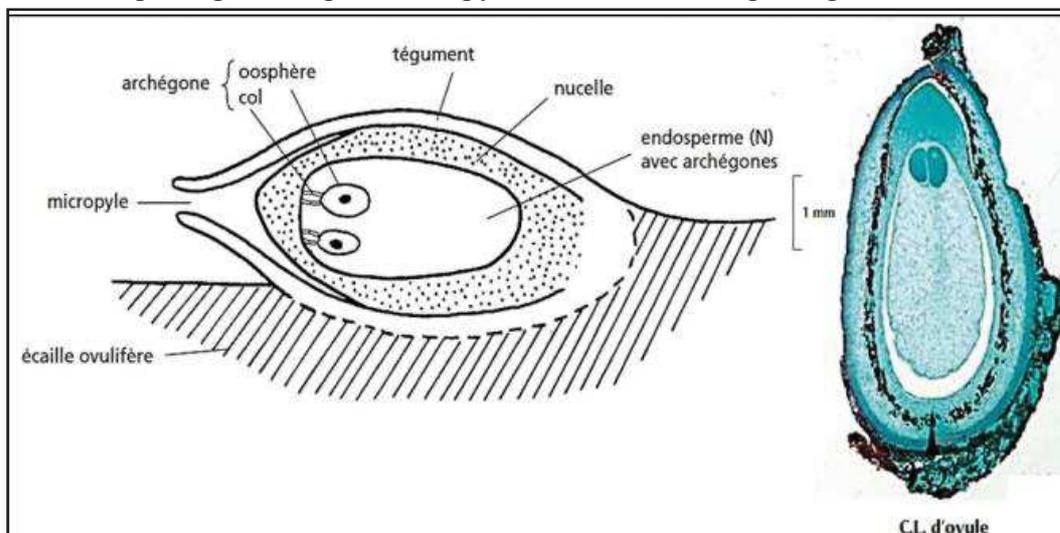


Fig. 73 : L'ovule de Pin d'Alep

➤ **Formation de l'endosperme**

Au cours de la première année une cellule diploïde ($2n$) au sein de l'ovule subit une méiose et donne 4 cellules haploïdes dont 3 dégénèrent. La cellule restante se développe par mitose et donne l'endosperme. Le développement de l'endosperme s'arrête pour reprendre durant la deuxième année. Ainsi apparaissent 2 à 3 archégones dont chacun contient une oosphère (gamète femelle).

➤ La fécondation

Le tube pollinique pénètre dans le col de l'archégone et déverse sont contenu dans l'oosphère. Un des gamètes féconde l'oosphère. L'autre gamète, la cellule végétative dégénèrent.

➤ Reproduction des Pins (Fig. 74):

A la première année, la cellule végétative de grain de pollen produit le tube pollinique qui pénètre dans l'ovule. Environ deux mois après, la cellule anthéridiale se divise en deux cellules y compris la cellule spermatogène. A ce stade, la croissance du tube pollinique s'arrête.

L'ovule est pourvu d'un tégument et d'un micropyle, il renferme le nucelle au sein duquel il se développe à la fin du printemps la mégaspore. Cette dernière subit une croissance importante et se divise plusieurs fois pour donner l'endosperme qui cesse de se développer.

A la deuxième année, La croissance du tube pollinique reprend, il se ramifie dans le nucelle. La cellule spermatogène se divise en deux gamètes males.

La croissance de l'endosperme reprend au printemps suivant. Il se cloisonne puis les archégonies se différencient (à la fin du printemps) au nombre de 2 ou 3. L'oosphère de grande taille est prête à être fécondée.

À la fin de la gamétogenèse, les gamètes males et femelles sont formés. Seul un noyau male pénètre dans l'oosphère qu'il féconde, le reste dégénère (le deuxième noyau et le noyau du tube pollinique).

La fécondation est dite simple, un seul zygote se forme par ovule. Les écailles ovulifères du cône femelle de la deuxième année se resserrent les unes contre les autres.

Le zygote se développe et à la fin, il y a formation d'un embryon qui se transforme en petite plantule avec des cotylédons qui entourent le méristème caulinaire peu développé: une courte tige et une petite racine se forment.

Les réserves (protéines et lipides) s'accumulent dans l'endosperme. Ces réserves sont stockées après la fécondation.

En même temps, le tégument s'épaissit et se lignifie et à la fin, l'endosperme et la plantule subissent une déshydratation et l'ovule est ainsi transformé en graine véritable.

L'écartement des écailles des cônes femelles libère des graines ailées.

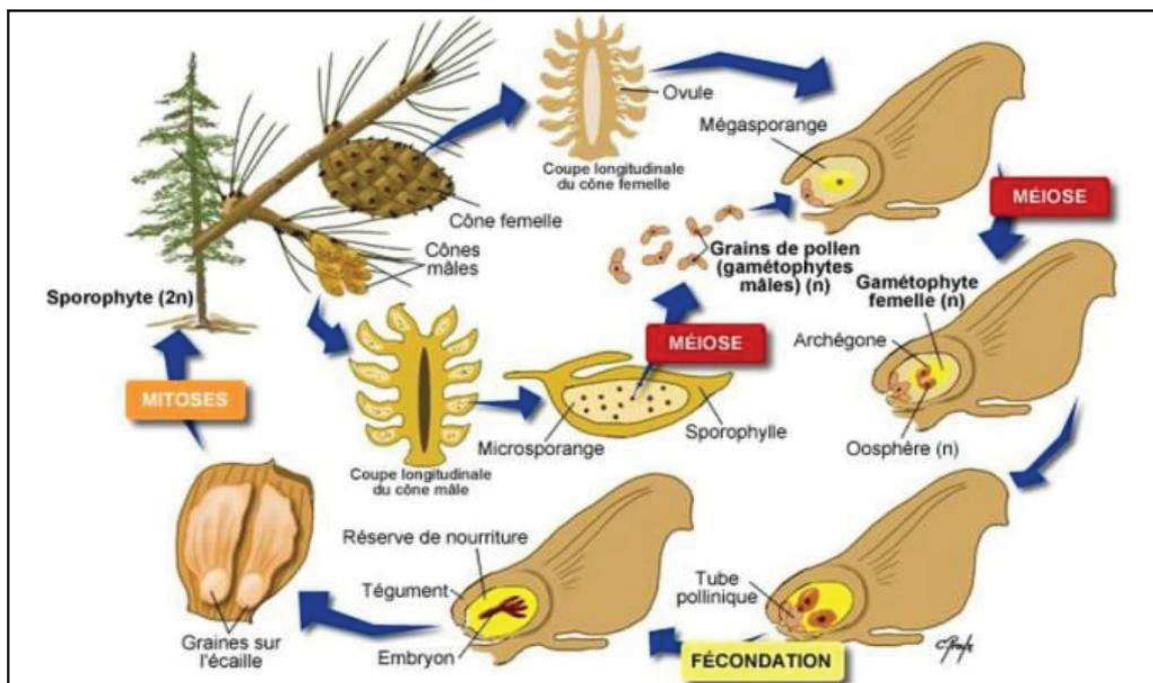


Fig. 74 : Cycle de reproduction chez les Pins

Comme chez le cycas, dans le cycle de développement des Gymnospermes on retrouve :

1. L'ovule comme organe de reproduction femelle, il est toujours nu sur sa feuille.
2. Le gamétophyte femelle, issu d'une seule cellule de la méiose, qui est parasite du sporophyte.
3. Le nucelle qui peut être considéré comme le sporange femelle. Il est lui-même protégé par des tissus spécifiques : les téguments.
4. Le grain de pollen constitue le prothalle, ou gamétophyte mâle. Il est disséminé en milieu aérien.

Mais des caractéristiques nouvelles apparaissent :

- 1.- Les gamètes mâles ne sont plus ciliés, ils sont incapables de se mouvoir par eux mêmes.
2. La fécondation s'affranchit du milieu hydrique pour se réaliser. C'est une siphonogamie.
3. Les téguments de l'ovule, après fécondation, se durcissent protégeant ainsi la plantule.
4. Pendant le développement de l'embryon, les cellules de l'endosperme et celles des cotylédons accumulent des réserves, qui seront utilisées au moment de la germination.
5. La plantule se déshydrate et entre en vie ralentie en attendant des conditions favorables de germination. C'est une graine qui est disséminée.

V.2.6. Position systématique des Gymnospermes

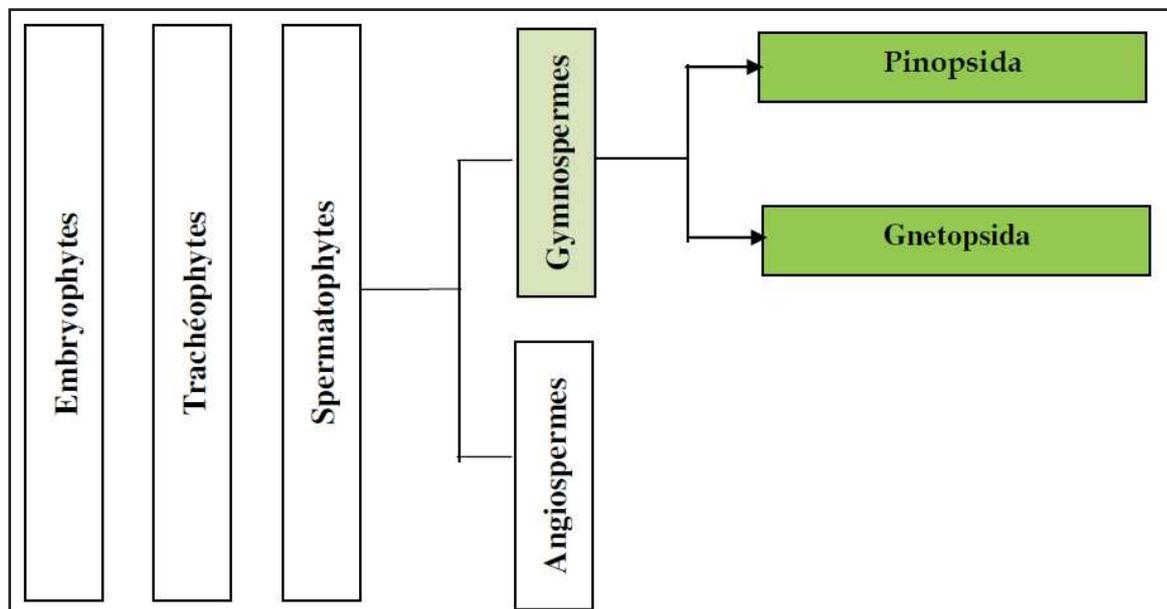


Fig. 75 : Position systématique des Gymnospermes

Les Gnétophytes comprennent environ 70 espèces actuelles réparties en 3 genres.

- *WelWitschia*,
- *Ephedra* et
- *Gnetum*

Ils présentent à la fois des caractères de gymnospermes (graine nue) et des caractères d'angiospermes (double fécondation, structure florale réduite et vaisseaux). Les dernières analyses moléculaires classent les Gnétophytes comme un groupe frère des Pinaceae

Tableau 7. Classification des Gymnospermes

Classes	Ordres	Familles	Genres
Pinopsida (Conifères, Vectrices)	Pinales 7 familles, 50 genres ,550 espèces	Pinaceae ou Abietaceae	<i>Pinus</i> <i>Cedrus</i> <i>Abies</i> <i>Picea</i>
		Cupressaceae	<i>Juniperus</i> <i>Tetraclinis</i> <i>Cupressus</i> <i>biota</i>
		Taxodiaceae	<i>Sequoiadendron</i> <i>Taxodium</i>
		Araucariaceae	<i>Araucaria</i>
		Podocarpaceae	<i>Podocarpus</i>
		Cephalotaxaceae	<i>Cephalotaxus</i>
		Sciadopityaceae	<i>Sciadopitys</i>
		Taxales	Taxaceae
Gnetopsida (Saccovulées ou Chlamydospermes)	Gnetales	Ephedraceae	<i>Ephedra</i>
		Gnetaceae	<i>Gnetum</i>
	Welwitschiales	Welwitschiaceae	<i>Welwitschia</i>

Exemples des plantes importantes :

	Espèces	Nom commun	Famille
1	- <i>Pinus halepensis</i>	Pin d'Alep	Pinaceae
2	- <i>Pinus pinaster</i>		Pinaceae
3	- <i>Pinus pinea</i>		Pinaceae
4	- <i>Pinus sylvestris</i>		Pinaceae
5	- <i>Pinus maritima</i>	Pin maritime	Pinaceae
6	- <i>Pinus nigra</i>	Pin noir	Pinaceae
7	- <i>Abies numidica</i>	Sapin de Numidie	Pinaceae
8	- <i>Abies alba</i>	Sapin	Pinaceae
9	- <i>Cedrus atlantica</i>	Cèdre de l'Atlas	Pinaceae
10	- <i>Larix decidua</i>	Mélèze	Pinaceae
11	- <i>Picea abies</i>	Epicéa	Pinaceae
12	- <i>Juniperus communis</i>	Genévrier commun	Cupressaceae
13	- <i>Juniperus oxycedrus</i>	Oxycèdre	Cupressaceae
14	- <i>Juniperus phoenicea</i>	Genévrier rouge	Cupressaceae
15	- <i>Juniperus sabina</i>	Genévrier Sabine	Cupressaceae
16	- <i>Juniperus thurifera</i>	Genévrier thurifère	Cupressaceae
17	- <i>Cupressus sempervirens</i>	Cyprès commun	Cupressaceae
18	- <i>Cupressus dupreziana</i>	Cyprès du tassili	Cupressaceae
19	- <i>Tetraclinis articulata</i>	Thuya de barbarie	Cupressaceae
20	- <i>Thuya occidentalis</i>	Thuya d'Occident	Cupressaceae
21	- <i>Araucaria columnnea</i>		Araucariacées
22	- <i>Sequoia gigantea</i>		Taxodiaceae
23	- <i>Taxus baccata</i>	If	Taxaceae
24	- <i>Ephedra alata</i>		Ephedraceae
25	- <i>Ephedra distachya</i>		Ephedraceae
26	- <i>Ephedra fragilis</i>		Ephedraceae
27	- <i>Welwitschia mirabilis</i>		Welwitschiacées