

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة عباس لغرور خنشلة  
كلية علوم الطبيعة و الحياة

The People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
University of Abbes Laghrou, Khenchela  
Faculty of Natural and Life Sciences



# Cours de Botanique

Cours à l'usage des étudiants en 2ème Année LMD : Biologie, Agronomie,  
Ecologie, ...



2018/2019

**Dr. ZERAIB Azzeddine**  
Maître de conférences B

# *Préambule*

*Ce polycopié est destiné aux étudiants de deuxième année LMD en biologie, Ecologie, Agronomie, Eau et environnement et à tout public, qui s'intéresse à l'étude scientifique de la botanique (enseignants, adhérents des associations de protection de la nature,...), et qui ont déjà des connaissances de base en Biologie végétale surtout des connaissances en morphologie, anatomie et physiologie végétale.*

*A la fin de cet enseignement, l'étudiant sera capable de faire la classification et la caractérisation anatomique des grands groupes des végétaux, et de comprendre leurs modalités de reproduction.*

*En plus d'une introduction générale à la botanique, qui traite des notions et critères de la classification et la systématique des grands groupes du règne végétal ; ce polycopié comprend aussi deux grandes parties.*

*La première partie traite les organismes à thalle, répartis en quatre grands groupes : les algues eucaryotes, les Cyanophytes, les Champignons et les lichens. Les trois derniers n'appartiennent pourtant pas au règne végétal, mais entretiennent des liens étroits avec le monde végétal, notamment leur morphologie (thalle) et leur mode de vie (symbiose, l'absence de mobilité, la photosynthèse, ...).*

*La deuxième partie est consacrée à l'étude des organismes à Cormus appelés également Embryophytes (Bryophytes *s.l.*, Ptéridophytes *s.l.*, Gymnospermes, et Angiospermes).*

# SOMMAIRE

## INTRODUCTION GENERALE A LA BOTANIQUE

1- Historique.....	1
2- Définitions .....	3
2-1- Systématique .....	3
2-2- Taxonomie .....	3
2-3- Botanique .....	3
2-4- Végétale.....	3
3- Notions et critères de classification .....	4
3-1- Nomenclature et unités taxonomiques.....	4
3-1-1- Unités taxonomiques.....	4
3-1-2- Règles de la nomenclature.....	4
3-1-3- Notion d'espèce .....	5
3-2- Méthodes de classification .....	5
3-3- Principes de la phylogénie .....	5
3-3-1- Les groupes phylogénétiques .....	5
3-3-2- Choix des caractères dans la classification phylogénétique .....	6
4- Systématique des grands groupes .....	7

## PREMIERE PARTIE : THALLOPHYTES

<b>Chapitre 1 : Les Algues.....</b>	<b>9</b>
1- Généralités sur l'origine des plastes chez les algues.....	9
2- Les algues procaryotes (Cyanophytes).....	12
2-1- Morphologie.....	12
2-2- Cytologie.....	14
2-3- Reproduction.....	15
2-4- Systématique.....	16
2-4-1- La sous-classe des Coccogonophycidae.....	16
2-4-2- La sous-classe des Hormogonophycidae.....	17
2-5- Biologie et Ecologie des cyanophycées.....	18
2-5-1- Les cyanobactéries libres.....	18
2-5-2- Les cyanobactéries parasites.....	19
2-5-3- Les cyanobactéries symbiotiques.....	19
3- Les algues Eucaryotes.....	21

3-1- Morphologie.....	21
3-1-1- Archéthalle.....	21
3-1-2- Protothalle ou nématothalle.....	22
3-1-3- Chladomothalle.....	23
3-2- Caractères cytologiques et biochimiques.....	24
3-3- Reproduction.....	25
3-3-1- Reproduction asexuée.....	25
a- Division méiotique.....	25
b- Fragmentation de thalle.....	26
c- Formation des spores.....	26
3-3-2- Reproduction sexuée.....	27
3-3-3- Cycles Biologiques des algues.....	28
3-4- Systématique et particularités des principaux groupes.....	31
3-4-1- Les glaucophytes.....	31
a- Morphologie et cytologie.....	32
b- Reproduction.....	33
c- Classification.....	33
d- Morphologie des genres de collection des cultures.....	34
3-4-2- Les Rhodophytes.....	37
3-4-3- Les Chlorophytes et les Streptophytes.....	40
3-4-4- Autres groupes d'algues.....	46
<b>Chapitre 2 : Les champignons.....</b>	<b>61</b>
1- Généralités.....	61
2- Morphologie du thalle.....	62
3- Cytologie.....	63
4- Reproduction des champignons.....	63
5- Systématique et particularité des principaux groupes des champignons.....	65
5-1- Les Myxomycètes.....	65
5-2- Les Oomycètes.....	65
5-3- Les Eumycètes.....	65
5-3-1- Chytridiomycètes.....	66
5-3-2- Zygomycètes.....	67
5-3-3- Gloméromycètes.....	68
5-3-4- Ascomycètes.....	69
5-3-5- Basidiomycètes.....	71
6- Les lichens.....	75

6-1- Morphologie.....	75
6-2- Anatomie.....	76
6-3- Reproduction.....	77
3-4- Systématique .....	78
<b><u>DEUXIEME PARTIE: Les Embryophytes (Cormophytes)</u></b>	
Généralités sur les Embryophytes.....	79
<b>Chapitre 3 : Bryophytes.....</b>	<b>83</b>
1- Caractères généraux des bryophytes.....	83
2- Reproduction des Bryophytes.....	83
3-Systématique.....	84
3-1- Les Marchantiophytes.....	84
3-2- Les Antocerots.....	87
3-3- Les Bryophytes s.s. ....	88
<b>Chapitre 4 : Ptéridophytes.....</b>	<b>91</b>
1- Caractères généraux les Ptéridophytes.....	91
2- Reproduction des Ptéridophytes et leur cycle de vie .....	92
2-1- Reproduction asexuée.....	92
2-2- Reproduction sexuée .....	93
3- Systématique des Ptéridophytes .....	97
3-1- Les Rhyniophytes .....	97
3-2- Les Lycophytes .....	98
3-2-1- les Lycopodiales .....	98
3-2-2- les Sélaginellales .....	99
3-2-3- les Isoétales .....	100
3-3- les Sphénophytes .....	101
3-4- les Filicophytes .....	102
<b>Chapitre 5 : Les Gymnospermes .....</b>	<b>105</b>
1- Caractères généraux sur les Spermatophytes .....	105
1-1- Appareil végétatif .....	105
1-2- Appareil reproducteur .....	105
2- Classification des Spermatophytes .....	105
3- Les Gymnospermes s.l. ....	106
3-1- les préspermaphytes .....	106
3-1-1- Caractères généraux .....	107
3-1-2- Les Cycadophytes .....	107
3-1-2-1- Biologie des Cycadophytes .....	107

3-1-2-2- Reproduction des Cycadophytes .....	108
3-1-2-3- Classification des Cycadophytes .....	111
3-1-3- les Ginkgophytes .....	112
3-2- les Pinophytes .....	113
3-2-1- Caractéristiques généraux des Pinophytes .....	113
3-2-1-1- Appareil végétatif .....	113
3-2-1-2- Appareil reproducteur .....	113
3-2-1-3- Caractères anatomiques .....	115
3-2-2- Classification des Pinophytes .....	117
3-3- Les Gnétophytes .....	117
3-3-1- Biologie des Gnétophytes .....	117
3-3-2- Reproduction des Gnétophytes .....	118
3-3-3- Classification des Gnétophytes .....	119
<b>Chapitre 6 : Les Angiospermes</b> .....	121
1- Structure de l'appareil végétatif .....	121
1-1- La tige .....	121
1-2- La feuille .....	122
1-3- La racine .....	124
2- Structure de l'appareil reproducteur .....	125
2-1- La fleur .....	125
2-1-1- le périanthe .....	125
2-1-2 L'androcée .....	126
2-1-3- Le gynécée .....	127
2-2- L'inflorescence .....	129
2-3- Cycle de développement des angiospermes.....	131
2-3-1- La pollinisation .....	131
2-3-2- Double fécondation .....	132
2-3-3- Formation de l'albumen .....	133
2-3-4 Formation de la graine .....	133
2-- Le fruit .....	134
3- Classification des Angiospermes .....	136
3-1- Angiospermes monoaperturées .....	137
3-1-1- Paléodicotylédones.....	137
3-1-1-1- Protoangiospermes .....	137
3-1-1-2- Magnoliidae .....	138
3-1-2- Liliopsidae (monocotylédones) .....	138

3-1-2-1- Monocots archaïques .....	138
3-1-2-2 Liliiflores .....	138
3-1-2-3- Commelinidae .....	139
3-2- Angiospermes tri-aperturées (Eudicotylédones) .....	139
3-2-1- Eudicots archaïques .....	139
3-2-2- Rosidae .....	139
3-2-3- Asteridae .....	139
<b>Références Bibliographiques</b> .....	140

*Introduction*  
*à la*  
*Botanique*

# Introduction à la botanique

## 1- Historique

Les premiers taxinomistes ont classifié toutes les espèces connues en deux règnes, soit les **Végétaux** et les **Animaux**. Les micro-organismes ont été classés avec les végétaux, tout comme les organismes eucaryotes unicellulaires possédant des chloroplastes, en raison de la présence d'une **paroi cellulaire rigide**. De même pour les champignons, par ce qu'ils sont **incapables de se déplacer** comme la plupart des végétaux. Par contre, les eucaryotes qui se déplacent et s'alimentent « les protozoaires » étaient classifiés parmi les Animaux. Les organismes comme les **euglènes** qui se déplacent et capables de synthétiser la matière organique (photosynthèse), ils apparaissent dans les deux règnes.

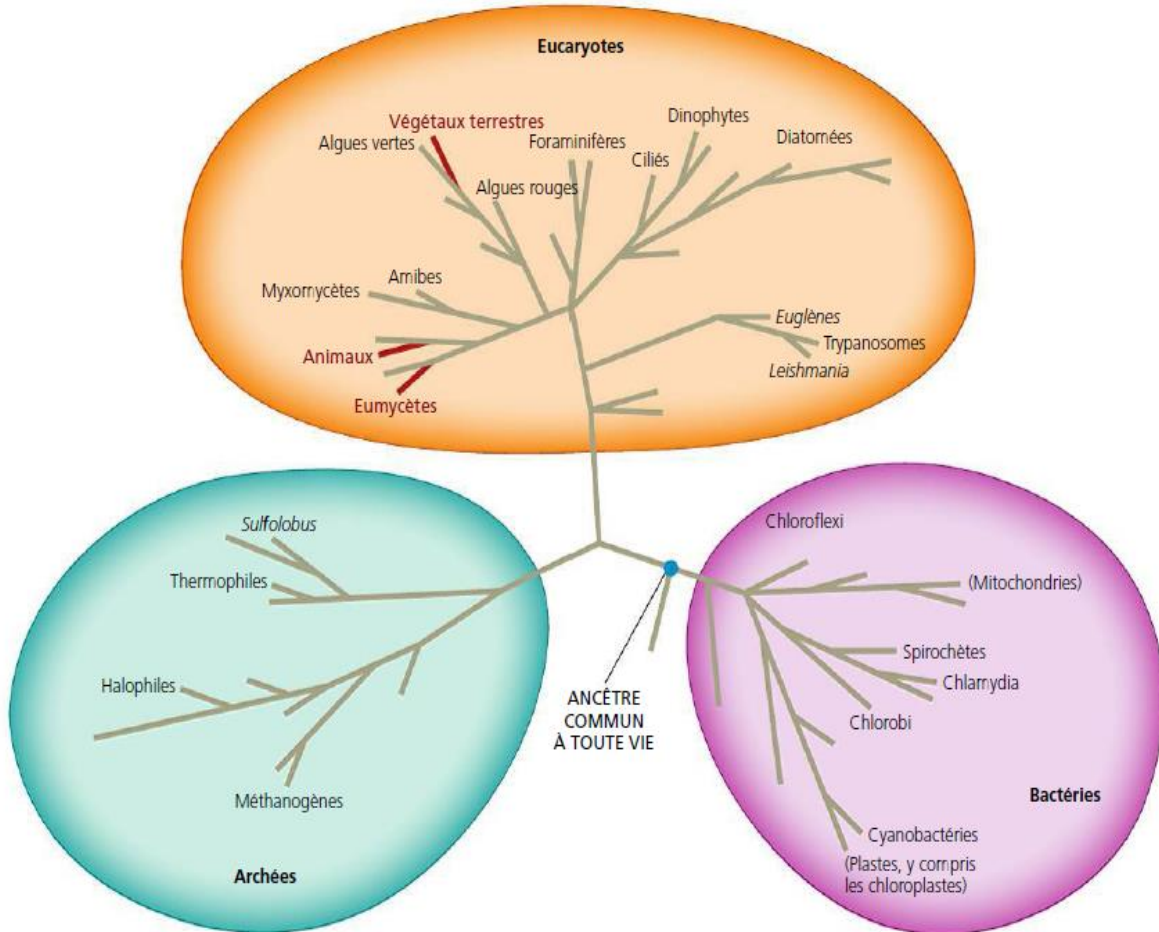
Vers la fin des années soixante, de nombreux biologistes ont convenu de l'existence de cinq règnes, soit ceux des **Végétaux**, des **Eumycètes**, des **Animaux**, des **Monères** (procaryotes) et des **Protistes** (un règne diversifié, mais composé essentiellement d'organismes unicellulaires). Puis la distinction de deux domaines différents dans le monde vivant: **les procaryotes** et **les eucaryotes** qui a été établie pour la première fois par [Stanier et al. \(1963\)](#).

Cependant, les phylogénèses réalisées à partir de données génétiques n'ont pas tardé à montrer les lacunes de cette classification: on observe autant de différences entre certains procaryotes qu'entre des procaryotes et des eucaryotes. En 1977 Carl Woese et George Edward Fox (1977) ont pu adopter un système à trois domaines : les **Archaea**, les **Eubacteria** et les **Eukarya (Fig. 1)**. Cette classification repose sur les séquences d'ADN codant l'ARN de la sous unité ribosomique 16S.

**Les Archées ou archéobactéries:** sont des organismes **unicellulaires, procaryotes** et **extrêmophiles**. Leur membrane plasmique constituée d'éther-lipides spécifiques (chaines d'alcool isopréniques attachées au glycérol par des liaisons éther) permettant une résistance aux milieux extrêmes. La paroi cellulaire est constituée de pseudo-peptidoglycane ou pseudo-muréine.

**Les Eubactéries :** sont également des organismes unicellulaires sans noyau et ressemblent à la plupart des bactéries que nous connaissons couramment comme *Escherischia coli*. Elles possèdent une paroi cellulaire constituée de peptidoglycanes.

**Les Eucaryotes** sont des organismes unicellulaires et des organismes pluricellulaires caractérisés par la présence d'un vrai noyau et des organites cellulaires (Réticulum endoplasmique, Appareil de Golgi, les plastes, mitochondries...).



**Fig. 1 :** L'arbre phylogénétique de trois domaines de la vie extrait de [Reece et al. \(2012\)](#). (Cet arbre repose sur des séquences de gènes d'ARNr, La longueur des branches est proportionnelle à la quantité de mutations génétiques survenues dans chaque lignée).

Aujourd'hui, quatre règnes ont été distingués dans les eucaryotes:

- \* **Protozoaires** : organismes unicellulaires non chlorophylliens, mobiles, phagocytose ;
- \* **Végétaux (Plantae)**: uni ou pluricellulaire autotrophes (chlorophylle);
- \* **Champignons** (et Lichens) : uni ou pluricellulaire hétérotrophes, cellules avec paroi ;
- \* **Animaux** : pluricellulaires hétérotrophes, phagocytose.

## 2- Définitions

### 2-1- Systématique

La systématique est la science de la description et de l'explication de la diversité biologique et de son histoire évolutive.

### 2-2- Taxonomie (Taxinomie)

Le terme taxonomie ou taxinomie, est construit à partir de « taxis » (ordre, arrangement) et de « nomos » (loi, règle) et signifie l'étude théorique des bases, principes et lois de la classification. Elle repose sur la hiérarchisation et la nomenclature.

### 2-3- Botanique

La botanique est la science consacrée à l'étude des végétaux, elle est rattachée aux autres sciences du vivant par plusieurs domaines. La botanique générale recouvre la taxonomie, la classification, la physiologie végétale, la morphologie végétale, la biogéographie végétale, ...etc.

La botanique systématique a pour attributions :

- De décrire les centaines de milliers d'espèces végétales peuplant la terre, ou l'ayant peuplée au cours des périodes géologiques écoulées;
- de leur donner un nom dépourvu d'ambiguïté;
- de les classer, c'est-à-dire de les ranger suivant leurs ressemblances en groupes hiérarchisés.

### 2-4- végétale

Terme difficile à définir qui peut recouvrir des réalités différentes selon les époques et les auteurs ;

La définition la plus récente correspond à **tous les organismes photosynthétiques eucaryotes (= plantes)**, le terme « **plante** » recouvre quant à lui : - Soit tous les organismes photosynthétiques eucaryotes ('algues' uni- et pluricellulaires, plantes terrestres) ;

- Soit tous les organismes photosynthétiques eucaryotes pluricellulaires ('algues' pluricellulaires et 'plantes' terrestres) (c'est le cas dans la classification de WHITTAEKER, où les 'algues' unicellulaires sont placées dans les 'protistes).

### 3- Notions et critères de classification

Devant la grande diversité biologique il est nécessaire de ranger, trier et mettre en ordre les taxons dans un système hiérarchisé.

#### 3-1- Nomenclature et unités taxonomiques

##### 3-1-1- Unités taxonomiques

Les unités taxonomiques les plus utilisées sont données ici avec les suffixes utilisés pour désigner les groupes régis par le code de nomenclature botanique (De Reviere, 2002):

**Tab. 1** : Unité taxonomique et leurs suffixes

Unités taxonomiques	Algues	Champignon	Embryophytes
Ebranchement	-phyta	-mycota	-phyta
Classe	-phyceae	-mycètes	-opsida
Sous-classe	-phycidae	-mycetidae	-dae
Famille	-aceae	-aceae	-aceae
Sous-famille	-oideae	-oideae	-oideae
Tribu	-eae	-eae	-eae
Sous-tribu	-inae	-inae	-inae

##### 3-1-2- Règles de la nomenclature

Depuis Linné en 1757, l'appellation des organismes vivants est codifiée par un nom du genre suivi d'un nom d'espèce (nomenclature binaire). Le premier (genre) est un nom générique, débute par une majuscule, et le second (espèce) est le nom spécifique en minuscule. Quelque fois un troisième nom apparaît, indiquant la sous-espèce ou la variété.

Ces noms composés sont imprimés en italique pour indiquer qu'il s'agit de mots latins. Et si on écrit à la main, on doit les souligner (sauf en cas de l'espèce).

Parfois le nom de l'espèce est suivi par le nom de l'auteur réduit en une seule lettre et un point. **Ex** : *Triticum sativum* L. (*Triticum sativum* Linné).

### **3-1-3- Notion d'espèce**

Plusieurs concepts d'espèce sont définis mais on peut la définir grossièrement comme l'unité de la classification, elle constitue une collection d'individus ou de populations réellement ou potentiellement capables de se croiser et qui sont reproductivement isolés des autres groupes ayant les mêmes propriétés.

### **3-2- Méthodes de classification**

La première classification utilisée de façon internationale prenant en compte les similitudes et les différences morphologiques fut la classification classique, plus souvent appelée classification de Linné. Puisque Carl von Linné en fut l'initiateur au XVIII<sup>ème</sup> siècle.

La méthode utilisée la plus couramment aujourd'hui pour classer les organismes s'appelle cladistique, ou analyse phylogénétique, parce qu'elle cherche explicitement à comprendre les relations phylogénétiques. Cette approche se focalise sur la séparation d'une lignée à partir d'une autre au cours de l'évolution, elle tente d'identifier les groupes monophylétiques.

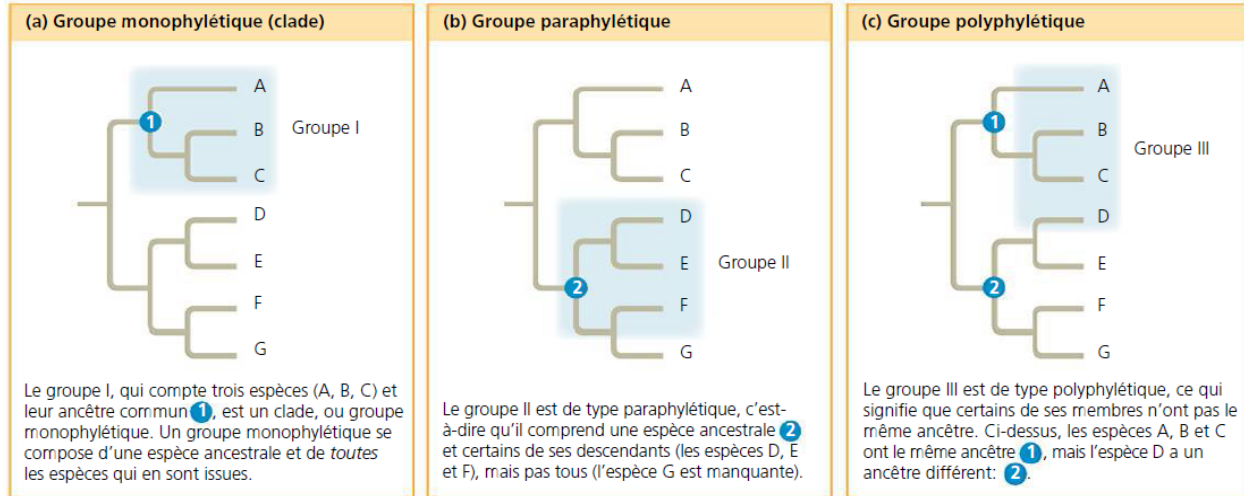
Les résultats de l'analyse cladistique est un cladogramme, qui donne une représentation graphique d'un modèle de travail.

### **3-3- Principes de la phylogénie**

#### **3-3-1- Les groupes phylogénétiques**

Trois types de groupes ont été distingués (**fig. 2**) :

- ✚ **Groupe monophylétique** : est un groupe incluant un ancêtre commun et tous ses descendants. C'est le seul groupe valide et donc utilisable en phylogénie.
- ✚ **Groupe paraphylétique** : est un groupe incluant un ancêtre commun et une partie seulement de ses descendants.
- ✚ Un groupe polyphylétique : est un groupe dont les représentants ont un ancêtre commun trop lointain pour être inclus dans le groupe c.-à-d. l'ancêtre est exclu du groupe.



**Fig. 02:** Les groupes monophylétique, paraphylétique et polyphylétique. Extrait de [Reece et al. \(2012\)](#)

### 3-3-2- Choix des caractères dans la classification phylogénétique

Dans la classification phylogénétique, les espèces sont rassemblées sur la base de ressemblances de caractères (morphologiques, anatomiques, moléculaires : séquences d'ADN, ARN, protéines...) héritées d'un ancêtre commun. Ces caractères sont dits **homologues**. En revanche, les ressemblances qui ne sont pas héritées d'un ancêtre commun sont soit des convergences soit des réversions et n'ont aucun sens phylogénétique.

Les caractères homologues hérités d'un ancêtre direct sont des **apomorphies** (ou états dérivés ou innovations). A l'inverse, un caractère homologue hérité d'un ancêtre plus lointain est un caractère partagé à l'état ancestral ou **plésiomorphie**. Les groupes monophylétiques sont définis sur la base de partage d'**apomorphies** (ou **synapomorphies**) et non de partage de **plésiomorphies** (ou **symplésiomorphies**).

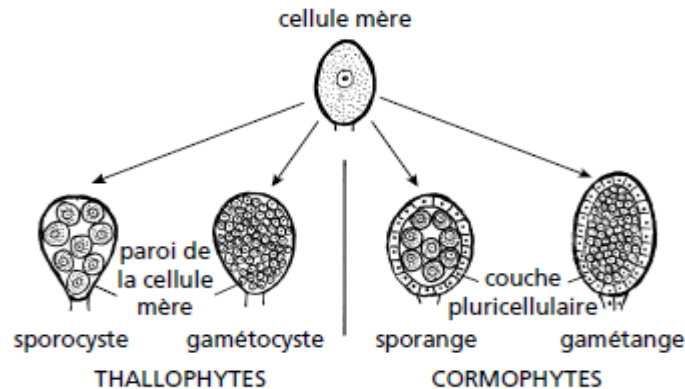
### 4- Systématique des grands groupes des végétaux

Selon la classification traditionnelle et en se basant sur l'organisation générale des végétaux Eucaryotes, les biologistes ont distingués les **Thallophytes** et les **Cormophytes**, dont l'appareil végétatif est respectivement un **thalle** et un **cormus**. Ce dernier est constitué des rameaux feuillés tandis que le premier ne comprend jamais de tiges, de feuilles, de racines et en principes pas de tissus conducteurs de sève. Il était logique de trouver chez les **Thallophytes** les **Algues**, les **Champignons** et les **Lichens**.

La distinction apparemment simple entre le thalle et le cormus, s'accompagne de différences beaucoup plus importantes au niveau des **organes reproducteurs** : au moment de la reproduction les *Thallophytes* produisent à partir d'une cellule mère des spores et des gamètes qui restent à l'intérieur de la paroi squelettique de celle-ci en formant un **sporocyste** ou un **gamétocyte**. L'enveloppe du sporocyste est formée par la paroi de la cellule mère, autrement dit, tout le contenu de la cellule mère se transforme en spores.

Au contraire chez les *Cormophytes* au cours des premières divisions d'une cellule mère une couche pluricellulaire forme un sac qui contiendra spores et gamètes : le sporange ou gamétange **fig. 3**.

Les premières divisions séparent tout d'abord des cellules qui constituent une enveloppe formée de plusieurs assises de cellules et c'est seulement la partie interne restante du protoplasme qui donnera naissance aux spores, autrement dit, une partie seulement du contenu de la cellule mère se transforme en spores.



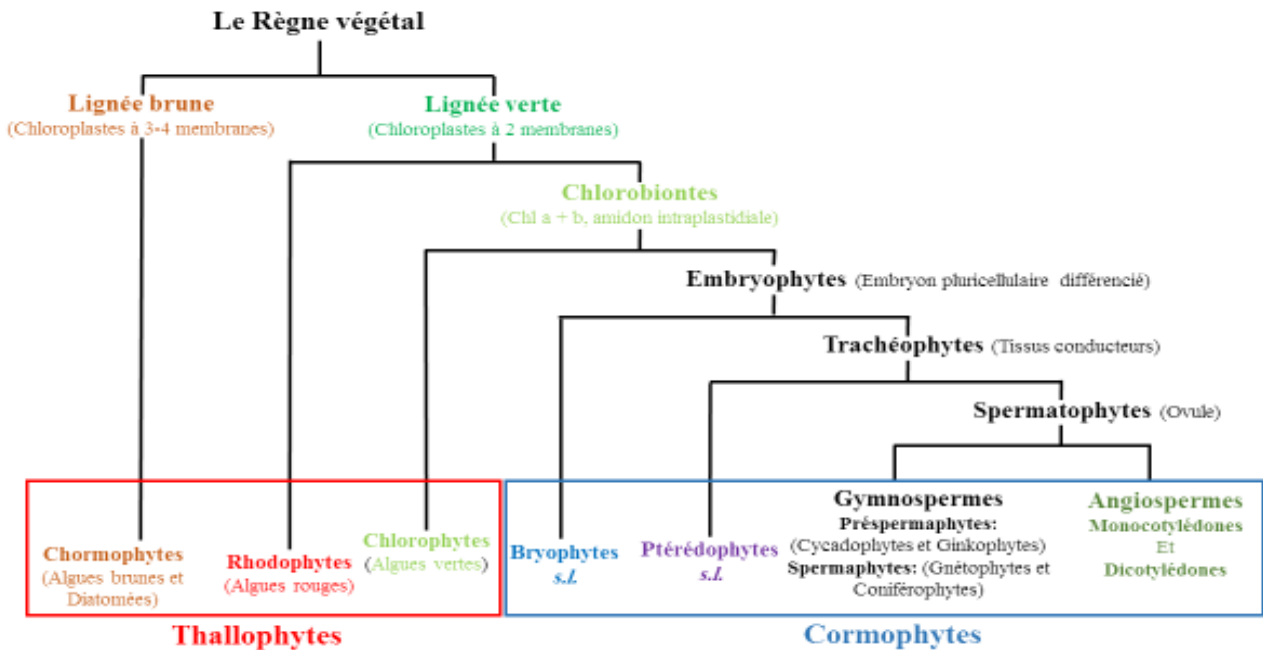
**Fig. 3 :** *Thallophytes* et *Cormophytes* différences par rapport aux organes reproducteurs

Selon la classification phylogénétique, le règne végétal forme un groupe polyphylétique et qui se partage en deux grandes lignées : la **lignée brune** et la **lignée verte** (**fig. 4**).

La lignée brune, caractérisée par des **chloroplastes à trois ou quatre membranes** résultants de phénomènes d'**endosymbiose secondaire**, correspond aux *Chromophytes* (Algues brunes et Diatomées) (**Thallophytes**).

La lignée verte, caractérisée par des **chloroplastes à deux membranes** résultant d'une **endosymbiose primaire**, comprend tous les végétaux (une partie des thallophytes et tous les

chormophytes). Elles se subdivisent en *Rhodophytes* ou Algues rouges, et *Chlorobiontes* caractérisés par la présence de chloroplastes contenant les **chlorophylles a** et **b** et de l'**amidon**.



**Fig. 4 :** Les grands groupes des végétaux.

Les chlorobiontes se partagent eux-mêmes en *Chlorophytes* ou Algues vertes et *Embryophytes* caractérisés par la formation d'un embryon pluricellulaire régionalisé, c'est-à-dire possédant des tissus spécialisés dont sont issues les différentes parties de la future plante.

Les Embryophytes se partagent entre les *Bryophytes au sens large* et les *Trachéophytes* possédant des tissus conducteurs de sève.

Les trachéophytes comprennent deux lignées évolutives, d'un côté les *Pteridophytes au sens large* et de l'autre les *Spermatophytes*, groupe caractérisé par la formation d'une structure appelée **ovule**.

Les spermatophytes se subdivisent en deux lignées les **Angiospermes** dont les graines fécondées sont enfermées dans un fruit et les **Gymnospermes** dont la graine est à nu.

Ce document comprend trois groupes, les **Cyanophytes**, les **Champignons** et les **lichens**, qui n'appartiennent pourtant pas au règne végétal, mais entretiennent des liens étroits avec le monde végétal, notamment leur morphologie (thalle) et leur mode de vie (symbiose, l'absence de mobilité, la photosynthèse, ...etc.).

*Première Partie*

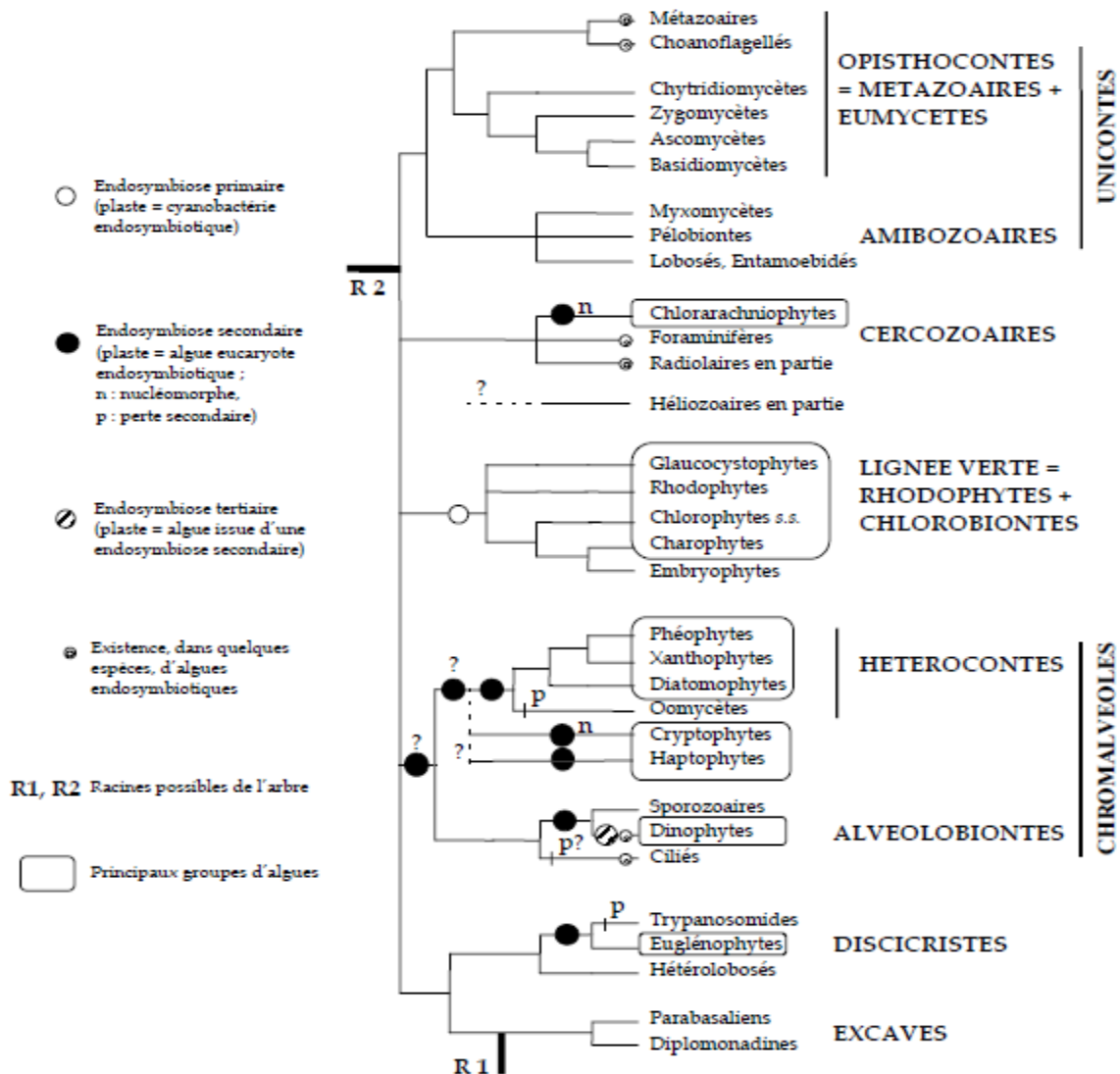
*Thallophytes*

*Chapitre 1*  
*Les Algues*

# Chapitre 1: Les algues

## 1- Généralités sur l'origine des plastes chez les Algues

Les algues sont des organismes **thallophytes**, capables de pratiquer la photosynthèse (**autotrophe**) et vivant majoritairement dans un milieu aquatique (marin ou dulcicole). Elles forment un groupe **polyphylétique** incluant des organismes **procaryotes** (les cyanobactéries) et **eucaryotes** (**fig. 5**). Ils sont répartis en trois principaux groupes en se basant sur le nombre de membranes de leurs chloroplastes : deux, trois ou quatre membranes (**Tab.2**).



**Fig. 5:** Arbre phylogénétique des eucaryotes (acquisitions de plastes par endosymbiose primaire et secondaire).

Tab. 2 : Classification des algues.

	Membranes externes des chloroplastes	Groupes d'algues
Procaryotes	0 membranes	Cyanophycées
Eucaryotes	2 membranes.	Glaucophyta, Rhodophyta, chlorophyta,
	3 membranes.	Euglenophyta, Dinophyta,
	4 membranes.	Cryptophyta, Heterokontophyta, haptophyta

**Les plastes à deux membranes**, ils seraient issus de la phagocytose d'une Cyanobactérie par un organisme unicellulaire eucaryote hétérotrophe. La Cyanobactérie hébergée par l'Eucaryote lui aurait conféré l'autotrophie et serait l'ancêtre hypothétique commun des algues rouges, algues vertes et des plantes terrestres qui constituent la Lignée verte. C'est la théorie de **l'endosymbiose primaire (Fig. 6)**.

**Les plastes à quatre membranes**, seraient issus de la phagocytose d'une algue rouge unicellulaire autotrophe par une cellule eucaryote hétérotrophe. Cet autre Eucaryote serait l'ancêtre hypothétique notamment des algues brunes. C'est la théorie de **l'endosymbiose secondaire**.

Au cours de l'endosymbiose secondaire, des cellules peuvent **perdre une membrane** et ainsi il en résulte un **plaste à 3 membranes**, et l'eucaryote qui porte ce type de plaste serait l'ancêtre hypothétique des **Euglenophyta** et les **Dinophyta**.

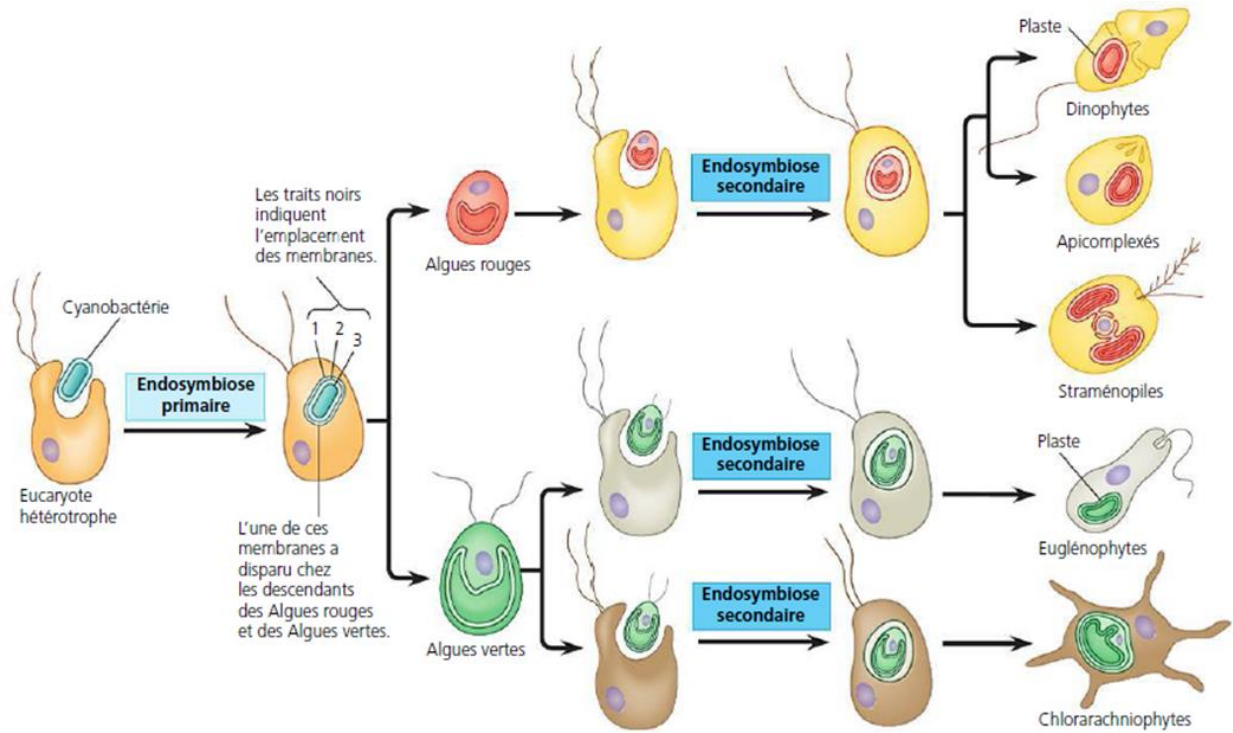


Fig. 6: La diversité des plastes produits par endosymbiose. Extrait de [Reece et al. \(2012\)](#), pp669.

photosynthèse, ...).

## 2- Les algues procaryotes (cyanophycées)

Organismes unicellulaires ou filamenteuses, procaryotes, autotrophes et vivant dans l'eau ou les milieux humides, les Cyanobactéries ont été longtemps considérées comme des «Algues bleues», ce qui justifie le nom de la classe des **Cyanophycées**, qui forme, à elle seule, cet Embranchement.

On les appelle aussi **Myxophycées** à cause de leur membrane gélatineuse, ou encore **Schizophycées** de fait de leur mode de division cellulaire (végétaux qui se coupent).

On dénombre 150 genres et 2000 espèces réparties sur cinq ordres, deux sous classes et une seule classe.

### 2-1- Morphologie

Les Cyanobactéries se présentent sous différentes formes; unicellulaires solitaires, unicellulaires coloniales informes, cénobes, trichomes qui peuvent être simples, ramifiés ou présentant des fausses ramifications (**Fig. 7**).

Chez certaines formes filamenteuses, en plus des cellules végétatives, on peut trouver deux formes de cellules:

**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 (**Fig. 8**).

**Les akinètes** : sont des spores immobiles (absence de flagelle) produites chez les formes hétérocystées. Elles sont résistantes aux conditions adverses et demeurent viables sur de longues périodes. On les distingue par leur grande taille, leur forme, leur pigmentation modifiée 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. 8**).

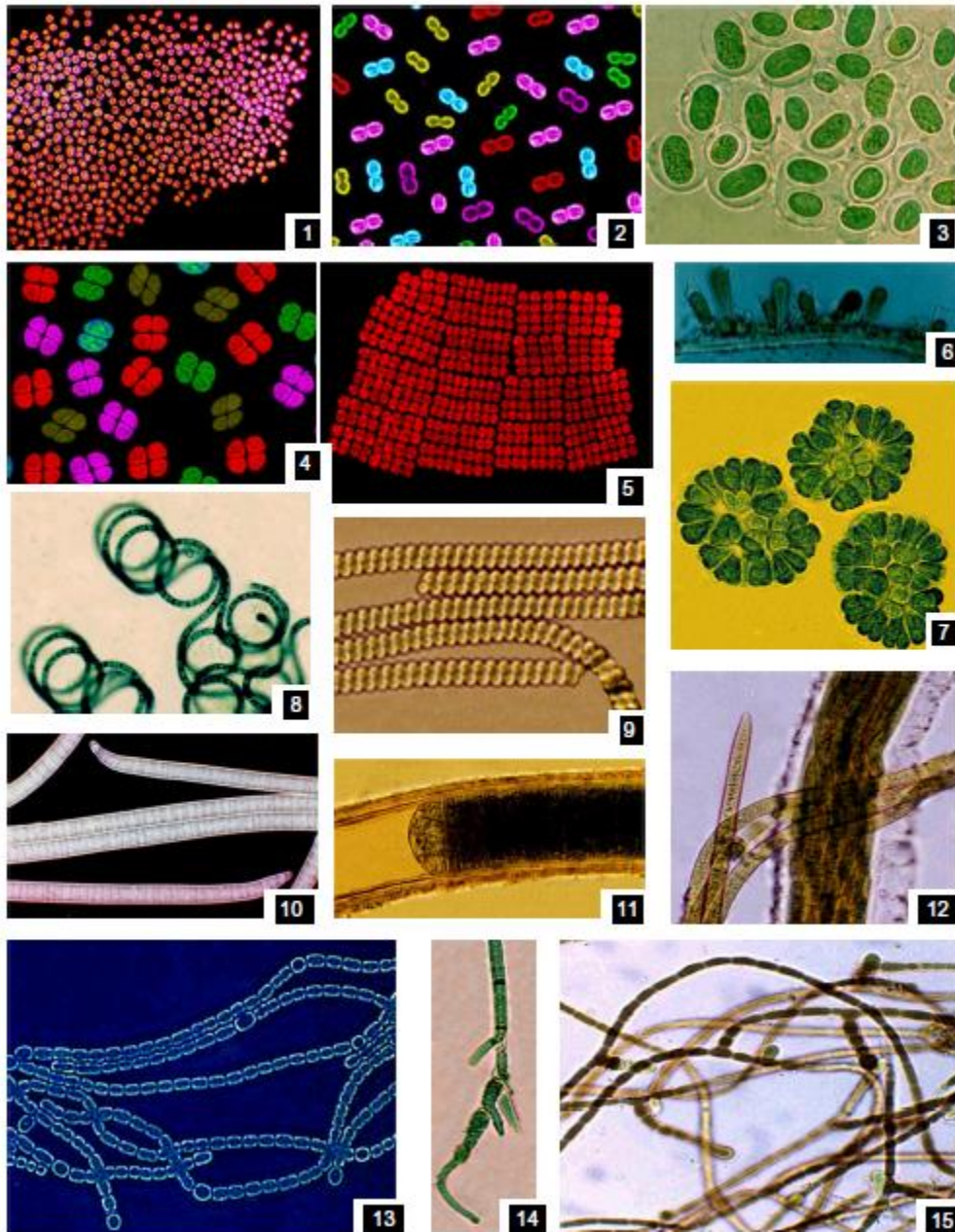


Fig. 7: Variabilité du thalle chez les cyanophycées. Extrait d'Anand *et al.* (2019)

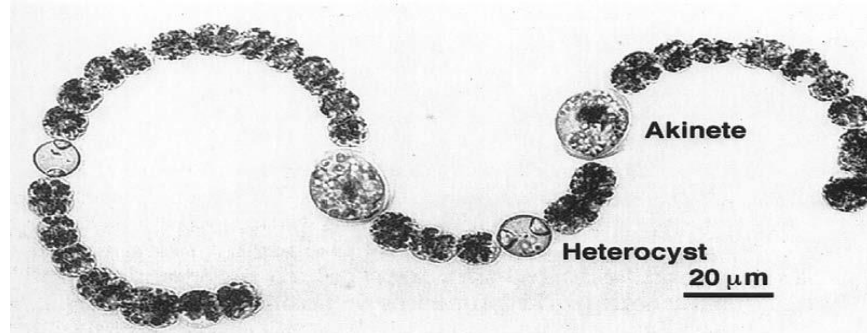


Fig. 8: Hétérocyste et Akinète. Extrait de Lee (2008).

## 2-2- Cytologie

Une cellule typique de Cyanobactérie comprend de l'extérieur vers l'intérieur (Fig. 9)

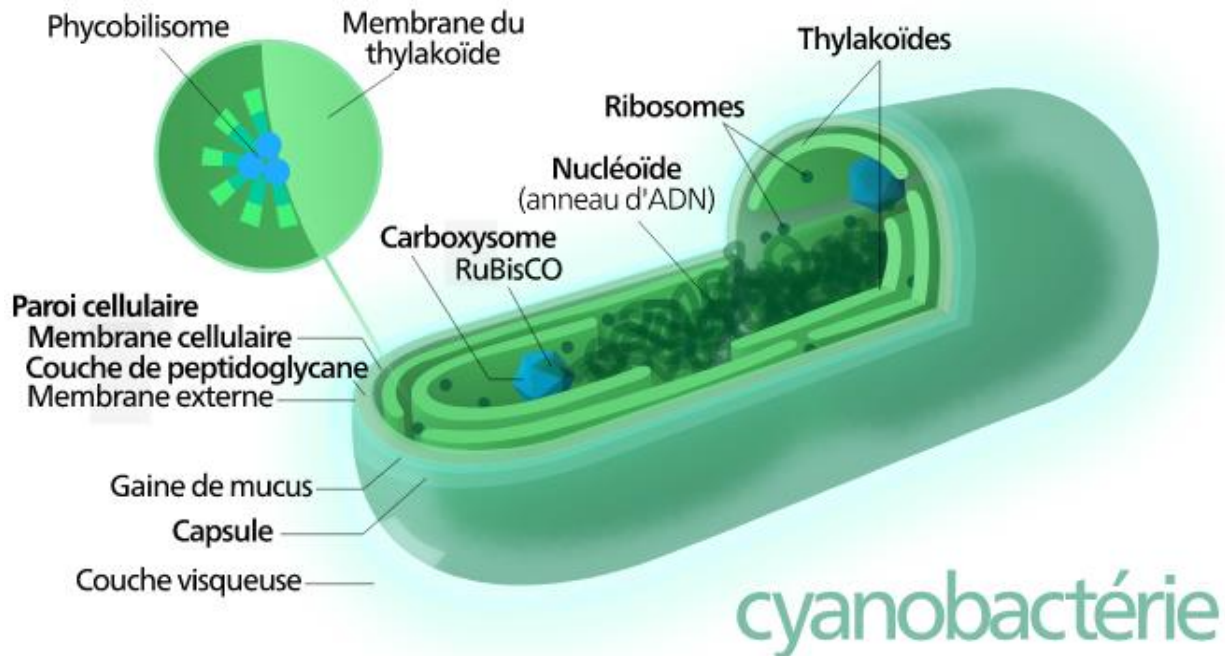


Figure 9 : Ultrastructure de la cellule cyanobactérienne. <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f5/Cyanobacterium-fr.svg>.

- Une gaine mucilagineuse, souvent épaisse et donnant à toute la colonie une consistance gélatineuse, d'où le nom de *Myxophycées* « Algues gélatineuses ». Cette enveloppe fait défaut dans une partie des espèces ;
- Une membrane externe, formée de protéines et de glycolipides, dont la structure et la composition sont voisines de celles des bactéries gram- ;

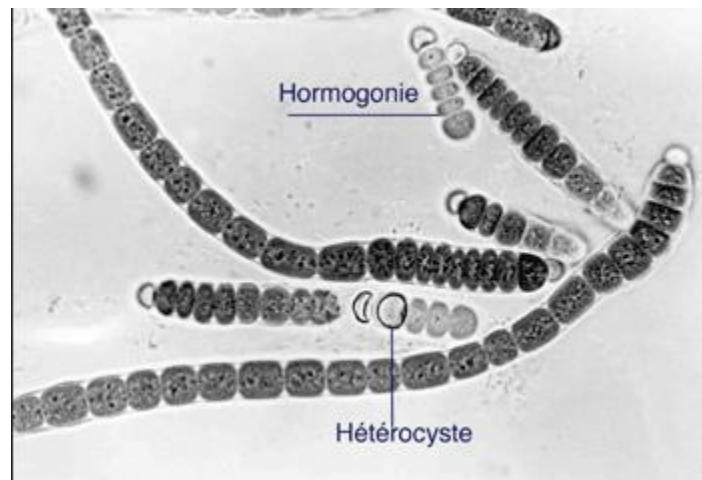
- Une membrane cytoplasmique;
- Un **chromatoplasme**, c'est à dire une couche colorée constituant l'appareil photosynthétique. Il est formé de thylacoïdes qui, à la différence des végétaux Eucaryotes, ne sont pas inclus dans des chloroplastes.
- La lamelle principale du thylacoïde (12-15 nm d'épaisseur) contient de la chlorophylle a et plusieurs caroténoïdes dont certains particuliers aux cyanobactéries.
- Les thylacoïdes portent à leur surface des alignements de granules dits **Phycobilisomes** qui contiennent deux pigments, la **phycocyanine** et la **phycoérythrine**, la phycocyanine, bleu-vert, est responsable de la teinte (souvent bleu-noirâtre) de ces organismes.
- La phycoérythrine, rouge et moins abondante sauf chez certaines espèces, elle peut aussi devenir dominante dans certaines conditions d'éclairement.
- Les deux pigments, voisins de ceux des algues rouges, sont des chromoprotéides tétrapyrroliques et permettent, ici également, l'absorption des radiations de la partie centrale (verte) du spectre visible ; l'énergie lumineuse est ensuite transmise à la chlorophylle.
- Une partie centrale, le **centroplasma**, qui est une sorte de noyau non figuré, contient des filaments d'ADN et est homologue de l'appareil nucléaire des bactéries.
- La cellule contient en outre, différentes inclusions :
  - Des grains de **cyanamylon** : polysaccharide à base de glucose proche du rhodamylon surtout abondants dans le chromatoplasme.
  - Des ribosomes, surtout, surtout nombreux dans le centroplasma ;
  - Des granules de réserves ; **Cyanophycine** de nature protéique, glycogène, cristaux polypeptidiques,...
  - Chez les espèces planctoniques flottantes des **vésicules gazeuses** contenant de l'azote ;
  - Des **carboxysomes** qui contiennent des enzymes pour la fixation du carbone ;
  - Des gouttelettes lipidiques (graisse).
- Les cyanobactéries **n'ont jamais d'appareil locomoteur** mais présentent des mouvements, comme les Oscillaires.

### 2-3- Reproduction

Les cyanobactéries se reproduisent uniquement par voie asexuée. Parmi les modes de division rencontrés, on cite :

La **scissiparité** ou la **division binaire** se fait par apparition d'une membrane annulaire qui se développe vers le centre.

La **Fragmentation de la colonie**, chez les espèces à trichomes, donne des **structures spécialisées** qui sont des **coccospores** (spores isolées) ou des **hormogonies (fig. 10)** (filaments de quelques cellules). Des cellules particulières permettent également la fragmentation du thalle. Ce sont des **nécridies**, des cellules **disjonctrices** et des **hétérocystes**. Les hétérocystes sont des cellules volumineuses et enkystées qui sont réparties le long du trichome. Ce sont des cellules spécialisées également dans la fixation de l'azote de l'air dans un milieu aérobique. Ces structures sont caractéristiques de certaines familles. Des espèces non munies d'hétérocystes peuvent fixer l'azote de l'air mais seulement en anaérobie.



**Fig. 10** : Hormogonies chez *Calothrix*

## 2-4- Systématique des cyanobactéries

Les cyanobactéries appartiennent au règne des *Eubactéries*. Elles forment l'embranchement des *Cyanophytes* et forment une seule classe *Cyanophyceae*. Cette classe est subdivisée en deux sous classes:

### 2-4-1- Sous-classe des COCCOGONOPHYCIDAE

Elle regroupe tous les cyanophytes ayant une forme solitaire, coloniale ou parfois filamenteuses mais sans **hormogonies**. Ils se multiplient par des **coccospores**.

Cette sous-classe comprend trois ordres:

**Ordre 1: CHOOCOCCALES:** regroupe les cyanophytes unicellulaires solitaires ou groupés en paquets composés des cellules organisées d'une façon amorphe. Cet ordre comprend deux familles:

**Famille 1: *Chroococcaceae*** : elle comprend plusieurs genres représentatifs;

Genre 1: *Gleocapsa*; Genre 2: *Microcystis*; Genre 3: *Merismopedia*

**Ordre 2: CHAMAESIPHONALES:** représentent un thalle unicellulaire, réduit parfois à un sporocyste ou sous forme filamenteuses ils présentent une base fixée. Se reproduit par **endospores** et **exospores**. Parmi les genres représentatifs on citera:

Genre 1: *Chamaesiphon*; Genre 2: *Entophysalis*.

**Ordre 3: PLEUROCAPSALES**

Renferment les cyanophytes à trichomes simples. La reproduction se fait par endospores.

Parmi les genres représentatifs, on cite: Genre: *Pleurocapsa*.

#### 2-4-2- Sous-Classe des HORMOGONOPHYCIDAE

Ce sont des cyanophytes ayant généralement des formes filamenteuses: trichomes simples, ramifiés ou possédant des fausses ramifications. La multiplication se fait par hormogonie. Dans cette classe, on rencontre des espèces à hétérocystes et à akinètes. Cette sous classe comprend deux Ordres:

**Ordre 1: NOSTOCALES**

Cet ordre compte quatre familles

**Famille 1: *Oscillatrioiaeeae*** : caractérisée par l'absence de ramifications, absence d'hétérocystes et d'akinètes. On citera comme genres représentatifs:

Genre 1: *Oscillatoria* : thalle filamenteux, absence d'hétérocystes, gaine mince ou nulle.

Genre 2: *Spirulina*

**Famille 2: *Nostocaceae***

Caractérisée par l'absence de ramifications mais la présence de cellules spécialisées (hétérocystes et akinètes). Comme genre représentatifs on cite: *Anabaena* et *Nostoc*.

**Famille 3: *Rivulariaceae***

Caractérisée par un trichome effilé, avec présence d'hétérocystes et d'akinètes. Genres: *Rivularia*, *Gleotrichia* et *Calothrix*.

*Rivularia* : Thalle filamenteux, hétérocystes basilaires, gaines épaisses mucilagineuses.

**Ordre 2: STIGONEMALES (= STIGONEMATALES)**

Regroupe des espèces présentant de véritables ramifications.

Famille *Stigonemataceae*: les genres représentatifs: *Stigonema* et *Haplosiphon*

**2-5- Biologie et écologie des Cyanobactéries**

Les cyanobactéries possèdent une grande adaptabilité. La plupart sont autotrophes et peuplent des milieux très variés, parfois dans les conditions les plus sévères auxquelles la vie reste possible; d'autres sont saprophytes, parasites ou symbiotes d'organismes très divers.

**2-5-1 Cyanobactéries libres****a) Espèces aquatiques fixées**

Les eaux douces à court lent ou nul conviennent à de nombreuses Cyanobactéries qui pullulent sur les fonds vaseux (*Oscillatoria*, *Phormidium*, *Lyngbia*...). Elles contribuent à donner à certaines vases d'eau stagnante leur odeur particulière. Ce sont elles aussi qui communiquent le « goût de vase » aux poissons d'eau douce.

Les eaux très minéralisés de certaines sources thermales hébergent de grandes quantités de Cyanobactéries. Dans les boues de quelque une de sources chaudes, elles se trouvent mélangées à des bactéries sulfureuses. Certaines espèces d'*Oscillatoria* témoignent d'une extrême résistance à l'acide sulfhydrique.

**b) Espèces planctoniques : les « fleurs d'eau »**

Nombreuses sont les cyanobactéries qui mènent une vie planctonique. Leur pullulation pendant la saison chaude est rapide et surabondante. Elles aboutissent à la formation d'une couche continue à la surface de certains lacs aux masses gluantes qu'elles forment, on donne le nom de fleurs d'eau : elles sont constituées par des chaînes cellulaires dans leur mucilage.

Elles appartiennent à des espèces assez variées. Des lacs et cours d'eau doivent même leur couleur verte à des fleurs d'eau. Une Oscillaire (*Oscillatoria rubescens*) colore en rouge les eaux glacées de quelques lacs. Certaines zones de la mer rouge présentent une teinte rougeâtre due au foisonnement d'*Oscillatoria erythraea*.

Ces fleurs d'eau rejettent des substances antibiotiques qui arrêtent ou ralentissent la multiplication de toutes autres espèces qu'elles-mêmes ; ce qui explique leur prédominance dans le plancton, quand les conditions écologiques (climat, nature de l'eau) les favorisent.

### c) Espèces aérophytes de la terre humides et des rochers

Certaines Cyanobactéries possèdent une extrême tolérance aux alternances de sécheresse et d'humidité, mais ne végètent qu'en atmosphère humide. Tels sont les Nostocs qui s'installent sur des rochers ou à la surface du sol.

Les eaux de pluie gonflent le mucilage dans lequel leurs filaments sont inclus : pendant la sécheresse le mucilage se déshydrate et apparaît comme une pellicule fripée.

Les filaments restent vivants dans les thalles desséchés pendant des dizaines d'années. D'autres espèces résistent à la sécheresse, mais se déshydratent plus vite (*Chroococcales* et *Chamaesiphonales*).

#### 2-5-2 Cyanobactéries parasites

Dans le tube digestif des vertébrées vivent des organismes filamenteux que l'on rapporte aux Cyanobactéries et qui constituent la famille des *Oscillospiracées*.

Ce sont des files de cellules plates, munies de disjoncteur, entourées ou non d'une gaine mucilagineuse, affectées de mouvements et pouvant se découper en hormogonies.

Un *Oscillospira* habite l'intestin du cobaye ; il peut former des spores par un processus particulier de fusion de plusieurs cellules. D'autres *Oscillospira* ont été trouvés dans l'intestin de têtards batraciens.

#### 2-5-3 Cyanobactéries symbiotiques

Elles sont très nombreuses ; les principaux cas sont :

##### a) A l'intérieur des cellules

Les « Cyanelles » sont des Cyanobactéries intracellulaires que l'on rencontre

- **Chez les protozoaires** Le cas classique est celui du Thécamibien *Paulinella chromatophora*. Lors de la division des protozoaires, la cyanobactérie se divise aussi, de telle sorte que les deux cellules filles reçoivent leur symbiote. Dans les Amibes nues, a été signalée aussi la présence de Cyanobactéries symbiotiques.
- **Chez les Métazoaires** Les tissus de certaines Eponges marines ont envahies par les Cyanobactéries symbiotiques.
- **Chez les Algues** Le cas le plus remarquable est celui de l'espèce *Nostoc symbioticum* vivant avec une Algue chlorophycées siphonale *Geosiphon pyriformis*. Le thalle de cette Algue s'étend à la surface du sol humide sous forme de filaments cloisonnés et dépourvus

de pigment assimilateur, de place en place, les filaments envoient des expansions latérales dans lesquelles pénètrent et se multiplient les cellules pigmentées du Nostoc.

- Dans les cavités des tissus des plantes supérieures Les Nostocs vivent dans les chambres aérifères de nombreux hépatiques, et dans les espaces remplis de mucilage du thalle des *Anthoceros*. La fougère aquatique *Azolla filiculoides* vit dans les cavités ou cryptes qui s'ouvrent à la surface inférieure de la feuille.

Un *Anabeana* envahit les racines des Cycas et elle modifie la croissance ; les racines raccourcissent tout en se ramifiant beaucoup (aspect corail). Enfin, les *Guennera* (Myrtacées) possèdent sur leur tige des poches à mucilage qui s'ouvrent à l'extérieur ; dans le mucilage végètent des Nostocs qui pénètrent aussi dans l'écorce.

Dans ces divers cas, la nature des rapports symbiotiques n'est pas connue.

#### **b) Dans les Lichens**

Plusieurs milliers d'espèces de Lichens sont formées par des Ascomycètes (très rarement les Basidiomycètes) symbiotiques de Cyanobactéries hormogonées.

L'aspect du lichen dépend de l'abondance de l'un ou de l'autre symbiote.

Les *Collema* ont un aspect gélatineux comme un Nostoc ; le champignon végète dans la gelée de la cyanobactérie. Les Algues bleues résident entre les filaments mycéliens, ou se localisent dans une couche bien délimitée.

### 3- Les Algues eucaryotes

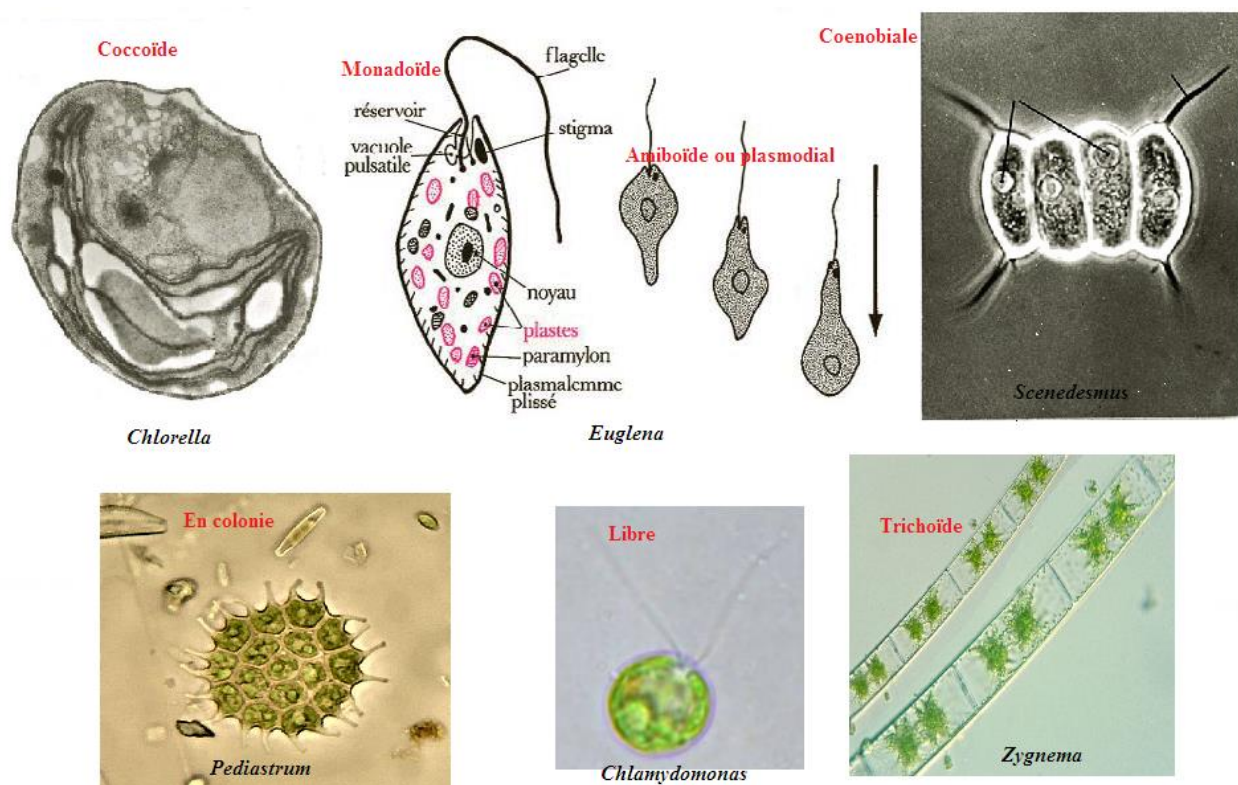
Les algues eucaryotes sont des êtres vivants **thallophytes, unicellulaires** ou **pluricellulaires, autotrophes, Cryptogames** (organes reproducteurs cachés  $\neq$  Phanérogames). Leur cycle de vie se déroule généralement en milieu aquatique où ils assurent leur cycle de reproduction.

#### 3-1- Morphologie

La morphologie des algues est très diversifiée, mais son appareil végétatif peut être classé selon le degré de complexité en :

**3-1-1- Archéthalle** : Thalle où toutes les cellules ont le même rôle, sous forme de :

**a- algues unicellulaires (ou protophytes)** : Ce sont soit des cellules **uniques** (ex de *Chlamydomonas*) soit sous forme de **colonies** de cellules toutes semblables entre elles (*Pandorina*). En outre, Elles peuvent être également sous forme de colonies à nombre défini de cellules (ou **cénobiale**) comme *Scenedesmus*, *Pediastrum*...(Fig. 10).



**Fig. 10** : Différents types d'archéthalles.

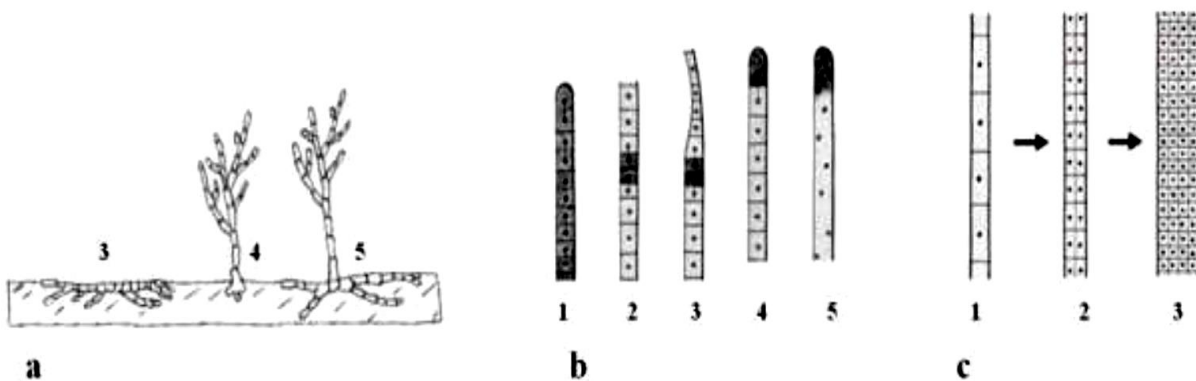
Il y a également des cellules pourvues de moyens de locomotion (la forme **monadoïde**, ex : Euglène), et autres dépourvues de ces structures (la forme **coccoïde**, ex : chlorelle), en outre l'euglènes capable de mouvements **amiboïdes** car son corps n'est pas limité par une paroi continue (**Fig. 10**).

**b-** sous forme **filamenteuse (trichome)** et n'ont ni base ni sommet (pas d'orientation) (**Fig. 10**).

### 3-1-2- Protothalles ou nématothalles

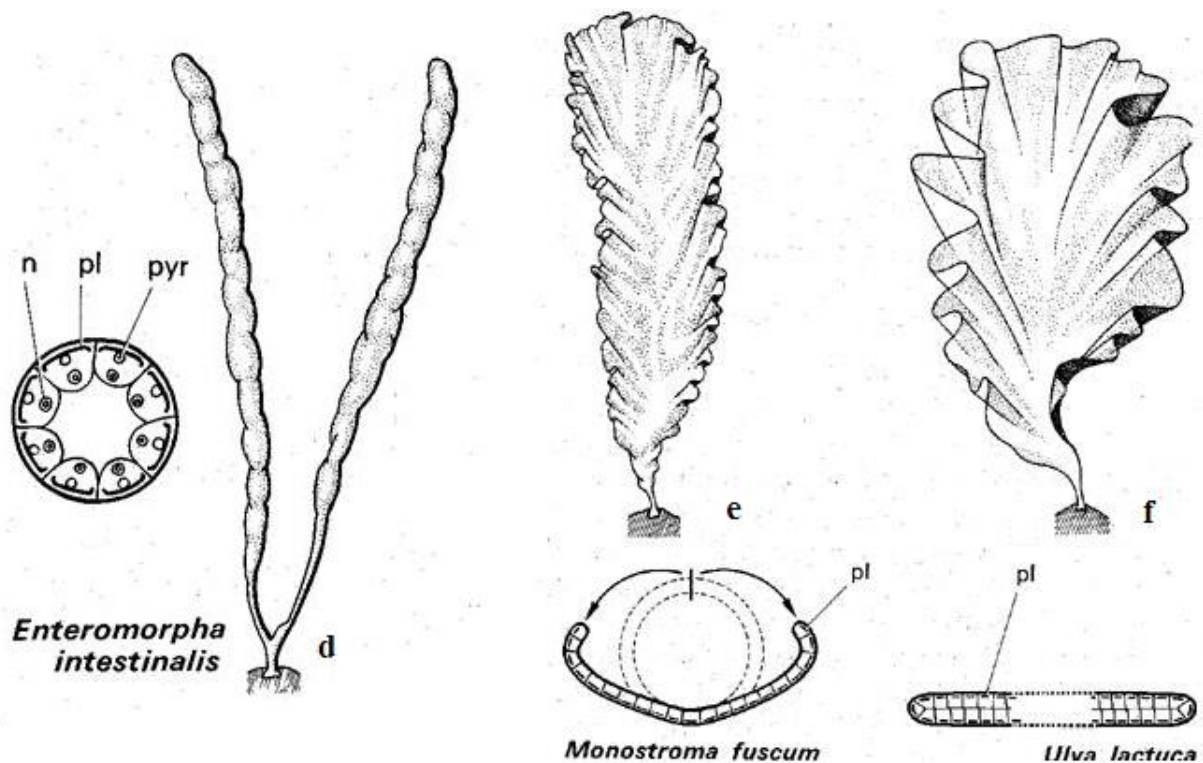
Thalle avec spécialisation dont une zone de croissance. Le nématothalle diffère de l'archéthalle par le fait qu'il est **ramifié**, mais la croissance de chacun des rameaux est **indéfinie**. Les nématothalles peuvent prendre une allure filamenteuse ou un aspect foliacé :

**Thalle à allure filamenteuse** : le prothalle peut être constitué uniquement de filaments rampants, il est appelé **prothalle prostré** ou uniquement de filaments dressés, **prothalle érecté**; dans ce cas, le nématothalle est **homotriche**. Il peut être **hétérotriche** s'il se compose de filaments dressés et rampants à la fois (**Fig. 11a**). Les nématothalles peuvent être **haplostique** (structure cellulaire unisériée) ou **polystique** (structure articulée ou plurisériée) (**Fig. 11b et 11c**).



**Fig. 11** : Différents types de nématothalles.

**a.** Différents types de thalle haplostique ; **3.** Thalle prostré réduit aux filaments rampants ; **4.** Thalle érecté sans filaments rampants ; **5.** Thalle hétérotriche, à la fois, des filaments rampants et des filaments dressés. **b.** Croissance des filaments haplostiques ; **1.** filament à croissance atélomique (bipartition transversale de toutes les cellules) ; **2.** filament à croissance intercalaire ; **3.** filament à croissance trichothallique (intercalaire subterminale engendrant des cellules étroites et allongées vers l'apex) ; **4.** filament à croissance télomique (bipartition transversale des cellules initiale situées à l'apex) ; **5.** filament siphonné à croissance télomique. **c.** Passage d'un prothalle haplostique (**1**) à un prothalle polystique (**3**).



**Fig.11** : Différents types de nématothalles (suite).

**d** ; *Enteromorpha intestinalis*. Thalle constitué de tubes à paroi monostromatique ; **e** : *Monostroma fuscum*. Thalle foliacé monostromatique, **f** : *Ulva lactuca*. Thalle foliacé bistromatique.

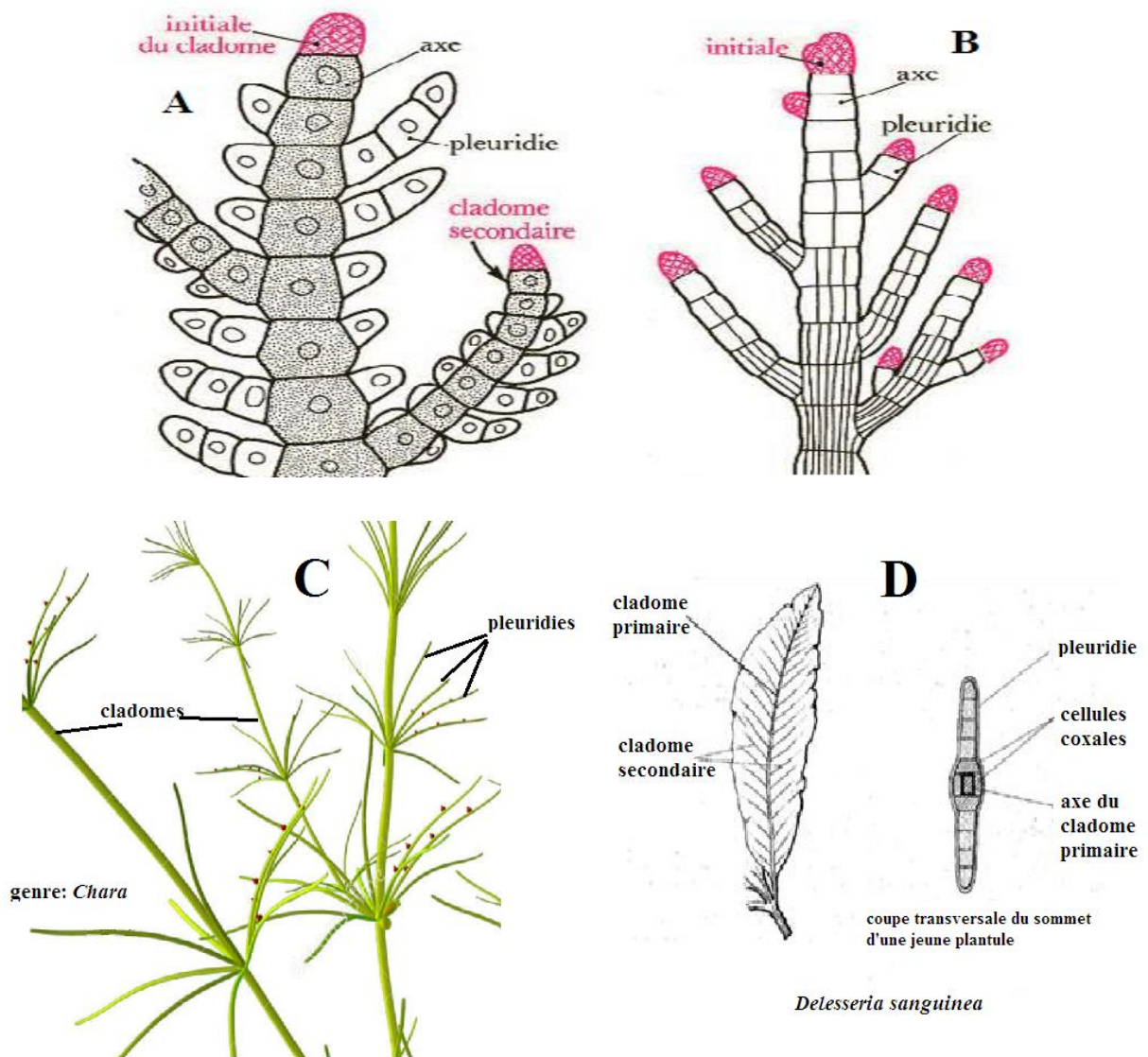
**Nématothalle à aspect foliacé** : Certains thalles d'algues ont l'aspect d'une fine membrane qui dérive directement d'une structure filamenteuse (**Fig. 11c**). Le filament commence par se développer en longueur puis les cellules se divisent en largeur pour former une lame ou un éventail. La lame peut n'avoir qu'une ou deux cellules d'épaisseur. Ce type de division est fréquent chez la laitue de mer et les laminaires (**Fig. 11d,e,f**).

### 3-1-3- Cladomothalles

Le thalle cladomien est une structure qui met en jeu des relations intercellulaires hiérarchisées. Une telle organisation évoque sous une forme rudimentaire celle d'un rameau feuillé de plante supérieure: l'axe et les pleuridies (rameaux latéraux) ressemblant respectivement à la tige, dont la croissance est indéfinie, et aux feuilles, dont la croissance est limitée et le rôle assimilateur.

Les thalles à cladomes sont dits **uniaxiaux** s'ils possèdent un seul **cladome principal** (Fig. 12B). Ils sont **multiaxiaux** s'ils en comptent plusieurs nés simultanément sur les cellules d'un nématothalle pluricellulaire, et groupés en un faisceau (Fig. 12A).

Les cladotalles peuvent prendre des aspects très variés. Comme chez les Rhodophycophytes ex. *Delesseria* qui mime une feuille d'Angiosperme (Fig. 12).



**Fig. 12** : différents types de cladomorphes. **A**, Algues Rouge, *Plumaria*; **B**, Algues Brune, *Halopteris*. **C**, Algues verte, genre : *Chara* ; **D**, Algues rouge, *Delesseria sanguinea* .

### 3-2- Caractères cytologiques et biochimiques

✚ La membrane externe de la cellule est fondamentalement **pecto-glucidique** comme chez les plantes supérieures, mais la **cellulose** est souvent remplacée par d'autres glucides (les **xylanes** et les **mannanes**), les substances mucilagineuses sont abondantes et la couche superficielle de la membrane est souvent gélifiée. Quelques algues unicellulaires ont une cellule nue, sans membrane, notamment les Euglène.

✚ Le noyau est comparable à celui des végétaux supérieurs, mais en générale plus petit et existence des mitochondries, de l'appareil de Golgi et des vacuoles (**Fig. 13**).

✚ L'appareil cinétique (flagelles) est présent d'une part, dans une partie des algues unicellulaires, et dans les organites reproducteurs (spores et gamètes) de la plupart des algues pluricellulaires.

✚ Certaines cellules mobiles portent une tache pigmentée sensible à la lumière appelée « la tache oculiforme » ou stigma.

✚ Les chloroplastes représentent la partie la plus intéressante de la cellule algale. Leur morphologie est très variable : parfois un ou deux plastes seulement par cellules. Ils portent souvent des épaissements granuleux appelés « Pyrénoides » au niveau desquels se forment les grains de réserves glucidiques (amidon)

✚ Le pigment assimilateur comprend toujours de la chlorophylle a accompagnée selon les groupes de chlorophylle b, c, ou d et des caroténoïdes. Chez les algues brunes, les caroténoïdes sont très abondants et dominant la couleur verte des chlorophylles. Chez les algues rouges se trouve, en outre un pigment à noyau tétrapyrollique, la phycoérythrine, et parfois de la phycocyanine.

✚ Enfin la nature biochimique des réserves est différente suivant les classes d'algues. Chez les algues vertes, la forme principale est constituée par l'amidon, comme chez les végétaux supérieurs. Chez les Rhodophytes, c'est un autre glucide voisin du glycogène, appelé « amidon floridéen » (le terme floridéen est pratiquement synonyme d'algues rouges). Chez les Algues brunes, les réserves sont plus variables, mais ne sont jamais de l'amidon : Mannitol, lipides.

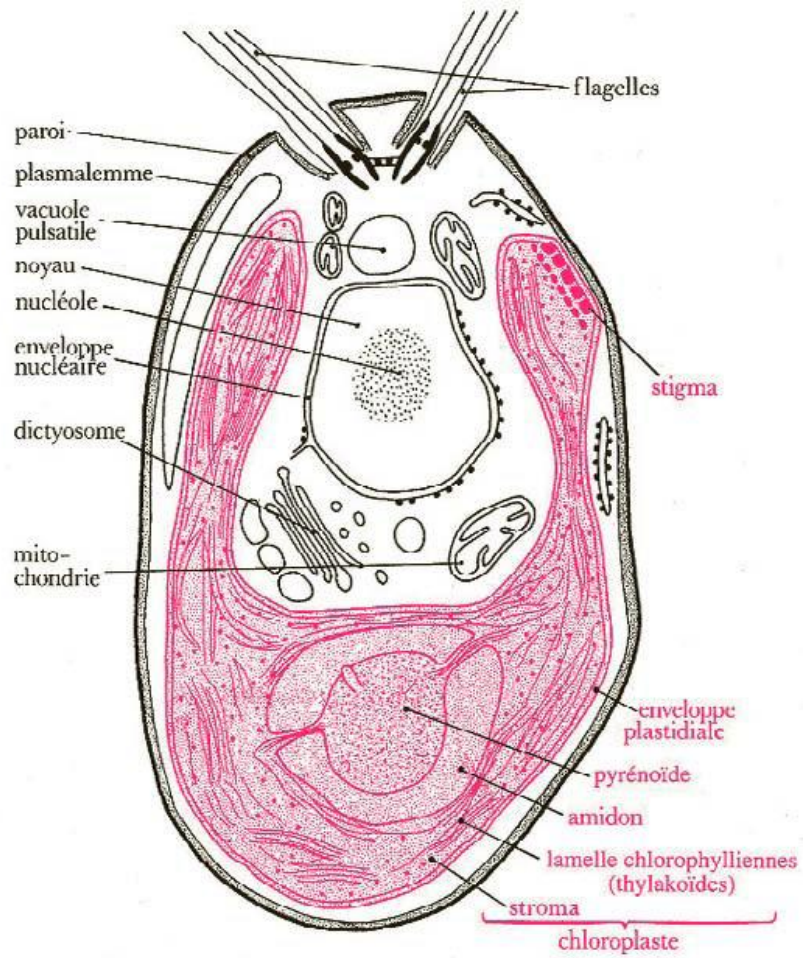


Fig. 13 : Organisation d'une cellule de Chlamydomonas (Roland *et al.*, 2008).

### 3-3- Reproduction

Les Algues se reproduisent selon deux modes :

**3-3-1- Reproduction asexuée :** Mode de reproduction le plus fréquent. L'algue est capable d'assurer sa descendance par des phénomènes ne faisant intervenir ni organes ni cellules sexuels; le génotype est conservé et les individus obtenus sont identiques génétiquement à l'individu souche.

Il existe plusieurs formes de reproduction sexuée :

**a- Division mitotique** des espèces unicellulaires. La division des cyanobactéries se fait par **scissiparité binaire**.

**b- Fragmentation de thalle:** chaque fragment régénère un thalle entier.

Chez les algues rouges du genre *Asparagopsis*, les algues vertes du genre *Caulerpa* ou algues brunes des genres *Ascophyllum*, *Fucus* ou *Saragassum*: une partie du thalle se brise, et est emportée par les courants et les vagues et redonnera un nouvel individu. C'est un véritable **bouturage**.

Chez les algues vertes du genre *Valonia*: il y a formation de territoires plurinucléés ou **cystes** sur le côté d'une vésicule qui par **bourgeoisement** donnent des thalles-fils.

Chez les algues brunes du genre *Sphacelaria*, il y a formation de **propagules**: apparition d'un massif de cellules sur le thalle capable après séparation de l'algue mère de donner naissance à un nouvel thalle.

#### c- Formation des spores

Une partie du thalle (**Eucarpie**) ou la totalité du thalle (**Holocarpie**) donne des sporanges ou sporocystes contenant les cellules mères des spores. Les spores libérées par ouverture des organes précédentes, sont dispersées, tombent sur un substrat et après germination donnent naissance à un nouvel individu. Certaines spores sont incapables de mouvements propres, les **aplanospores** d'autres sont capable de mouvement, les **zoospores** (**Fig. 14**).

Certaines cellules de thalle "s'enkystent" et donnent des spores capables de mener une vie ralentie quand les conditions sont défavorables puis germer si ces conditions redeviennent favorables. Ces spores résistantes sont appelées **acinètes** (**Fig. 14**).

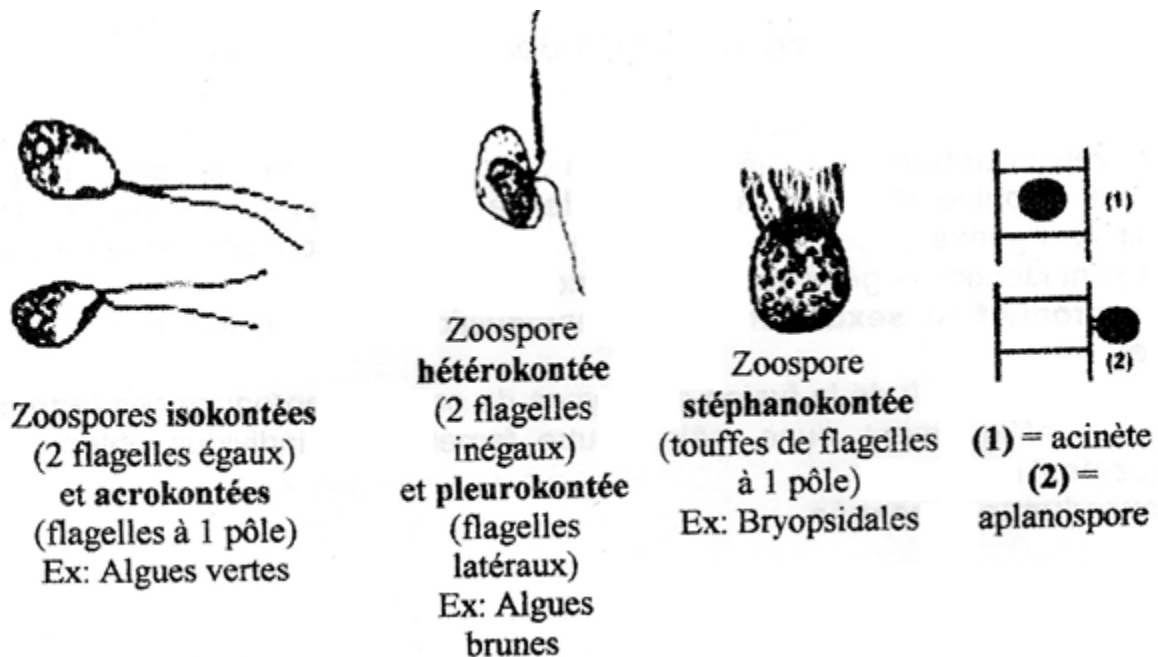


Fig. 14: types de spores.

**3-3-2- Reproduction sexuée :** mode de reproduction le moins fréquent et le plus aléatoire. Un nouvel individu naît de la fusion de 2 types de cellules reproductrices (gamètes) distinctes génétiquement, l'une mâle, l'autre femelle. Les individus obtenus sont génétiquement différents.

Il existe une grande diversité du mode de fécondation chez les algues (Fig. 15).

**a- Isogamie :** fécondation mettant en présence deux gamètes morphologiquement et physiologiquement identiques (ex. *Chlamydomonas*).

**b- Anisogamie :** fécondation mettant en présence deux gamètes morphologiquement et physiologiquement différents (ex. *Ulva*).

**c- Oogamie :** fécondation mettant en présence un gamète petit mobile en grand nombre et un gamète gros immobile, chargé en réserve (ex. *Fucus*).

**d- Cystogamie (conjugaison):** il n'y a pas d'individualisation des gamètes. La fécondation se fait par la formation d'un pont cytogamique (ou pont de conjugaison) entre deux filaments (ex. *Spirogyra*).

**e- Trichogamie** : le gamète femelle reste dans le gamétophyte et émet un poil appelé trichogyne. Le gamète mâle sans flagelle (spermatie) se colle sur le trichogyne (Rodophytes).

**f- Aplanogamie** : le gamète mâle est sans flagelle et le gamète femelle reste dans le gamétophyte et présente des papilles pour faciliter la fécondation. Cette dernière se fait au hasard il n'y a pas de chimiotactisme.

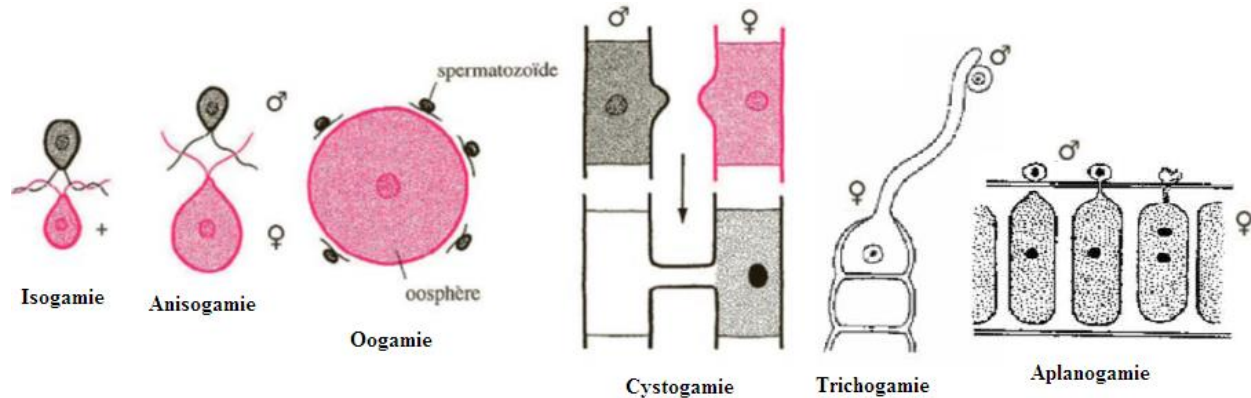


Fig. 15: Principaux types de fécondation chez les algues (Roland *et al.*, 2008, modifié).

### 3-3-3- Cycles biologiques des algues

Le développement des algues se caractérise par l'alternance de génération et de phases. Il existe deux types de phases:

- ✚ **L'haplophase** ou phase haploïde ( $n$  chromosomes) qui s'étend de la méiose jusqu'à la fécondation (fusion des gamètes) et la formation du zygote ;

- ✚ **La diplophase** ou phase diploïde ( $2n$  chromosomes) qui dure de la fécondation à la méiose.

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

- **Un gamétophyte** ( $n$ ) qui produit des gamètes mâles ( $n$ ) et femelles ( $n$ ) de la plante. Il commence avec la germination de la spore ( $n$ ). le gamétophyte n'est pas toujours haploïde (par exemple chez le Fucus) ;

- **Un sporophyte** ( $2n$ ) qui produit les spores ( $n$ ) après la méiose.

Selon le nombre de générations dans un cycle, on distingue:

Un cycle **monogénétique** : est constitué d'une seule génération allant de la formation d'un œuf (zygote) à la formation de l'œuf suivant. C'est-à-dire qu'il n'y a pas d'accroissement végétatif marqué entre les spores et les gamètes ou entre le zygote et les spores, il est représenté soit par un sporophyte soit par un gamétophyte.

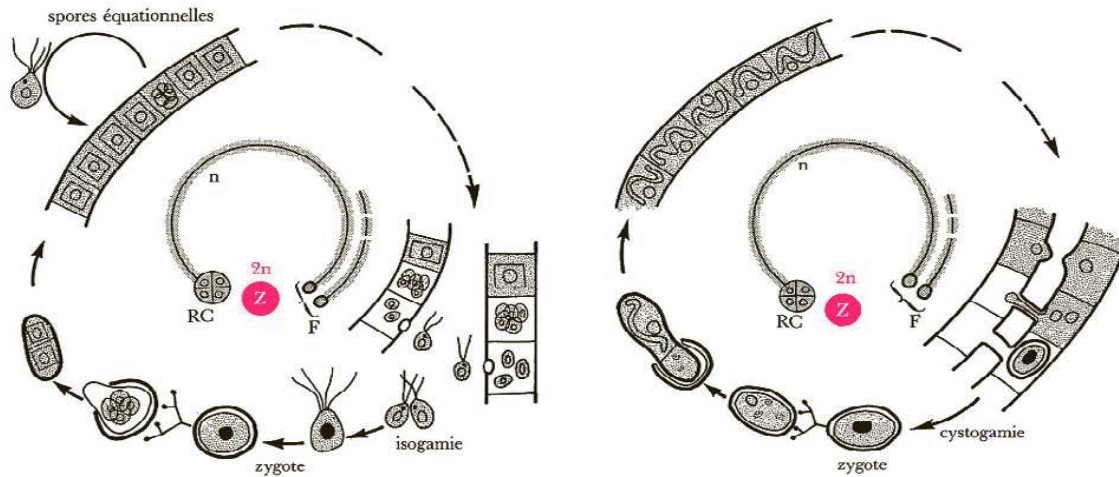


Fig. 16: Cycle monogénétique haplophasique, à droit le cycle de l' *Ulothrix*, à gauche le cycle de *Spirogyra* (Roland *et al.*, 2008).

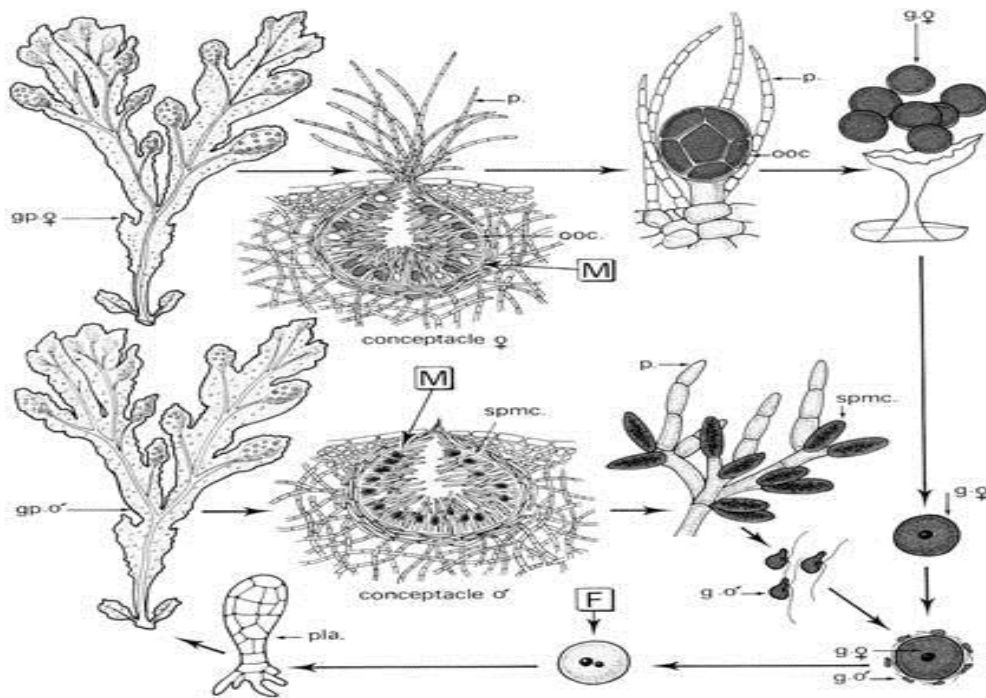


Fig. 17: Cycle monogénétique diplophasique du genre *Fucus*.

Un cycle digénétique dans le quel deux générations se succèdent alternativement : un gamétophyte issu d'une méiospore et un sporophyte issu d'un œuf (Fig. 18 et 19). Ce cycle présente plusieurs variantes en fonction de la morphologie des deux générations. Le cycle est **isomorphe** si le gamétophyte et le sporophyte sont morphologiquement identiques et ne peuvent être distingués que par la nature des produits émis (gamètes ou spores) ex. *Ulva lactuca* (Fig.18). Il est **hétéromorphe** si le gamétophyte et le sporophyte sont morphologiquement différents; Ex : *Laminaria* sp. (Fig. 19) ; les Mousses, et les Ptéridophytes.

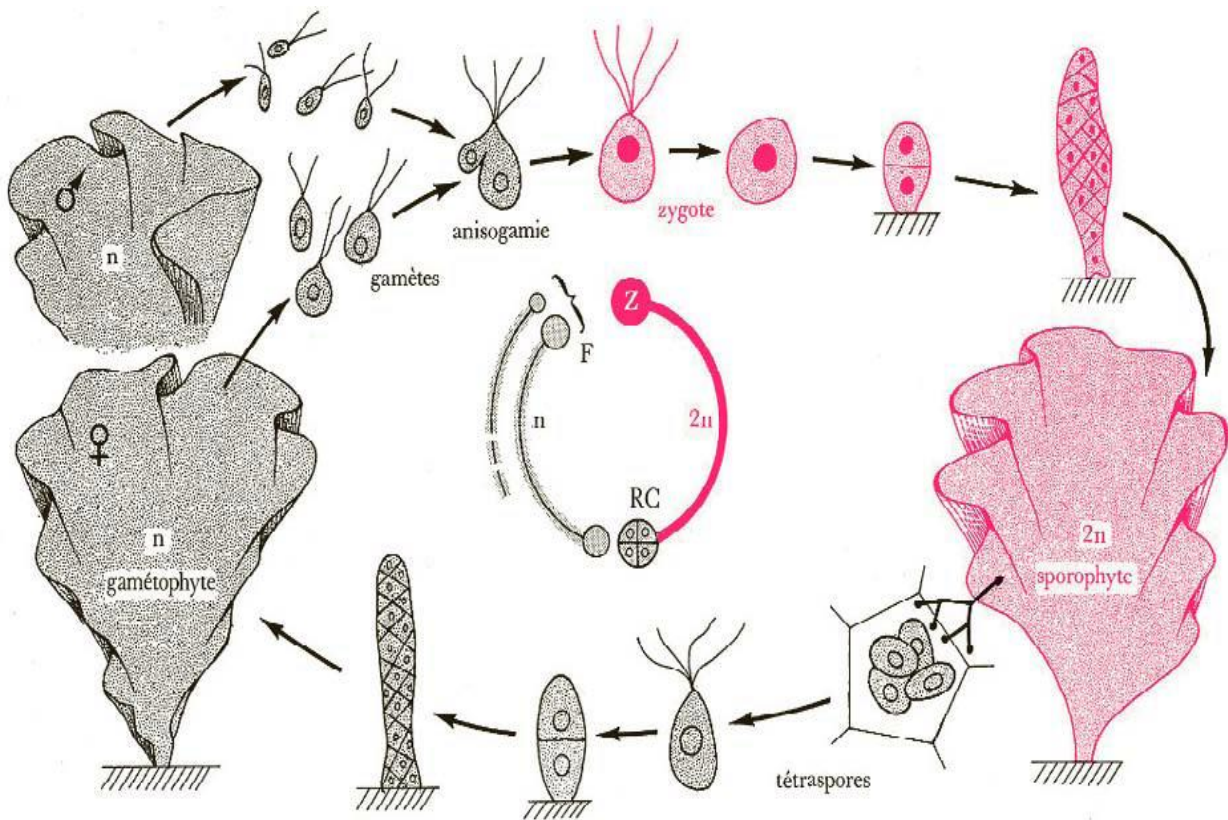


Fig. 18: Cycle digénétique haplo-diplophasique chez laitue de mer ou *Ulva* (algue verte) (Roland et al., 2008).

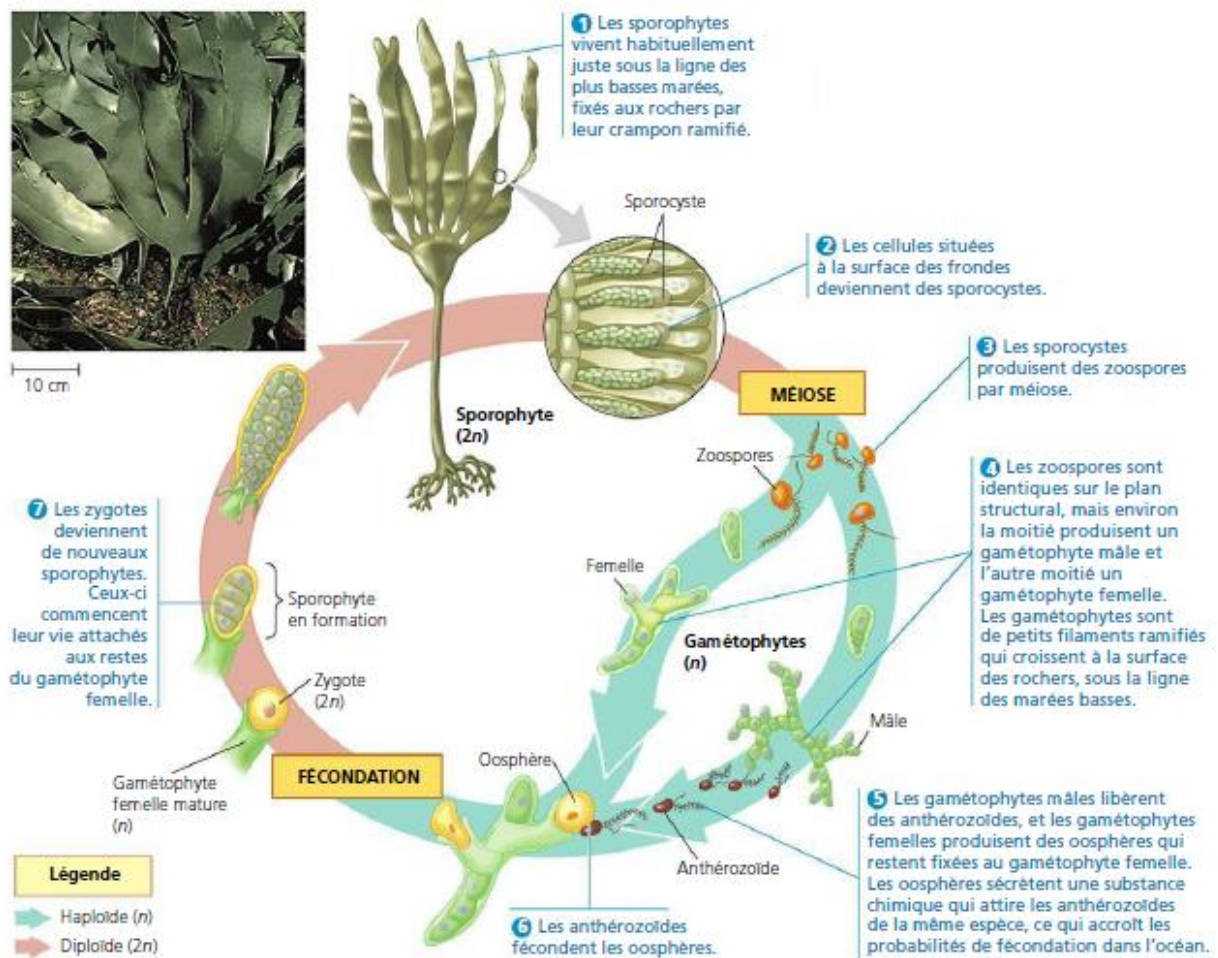
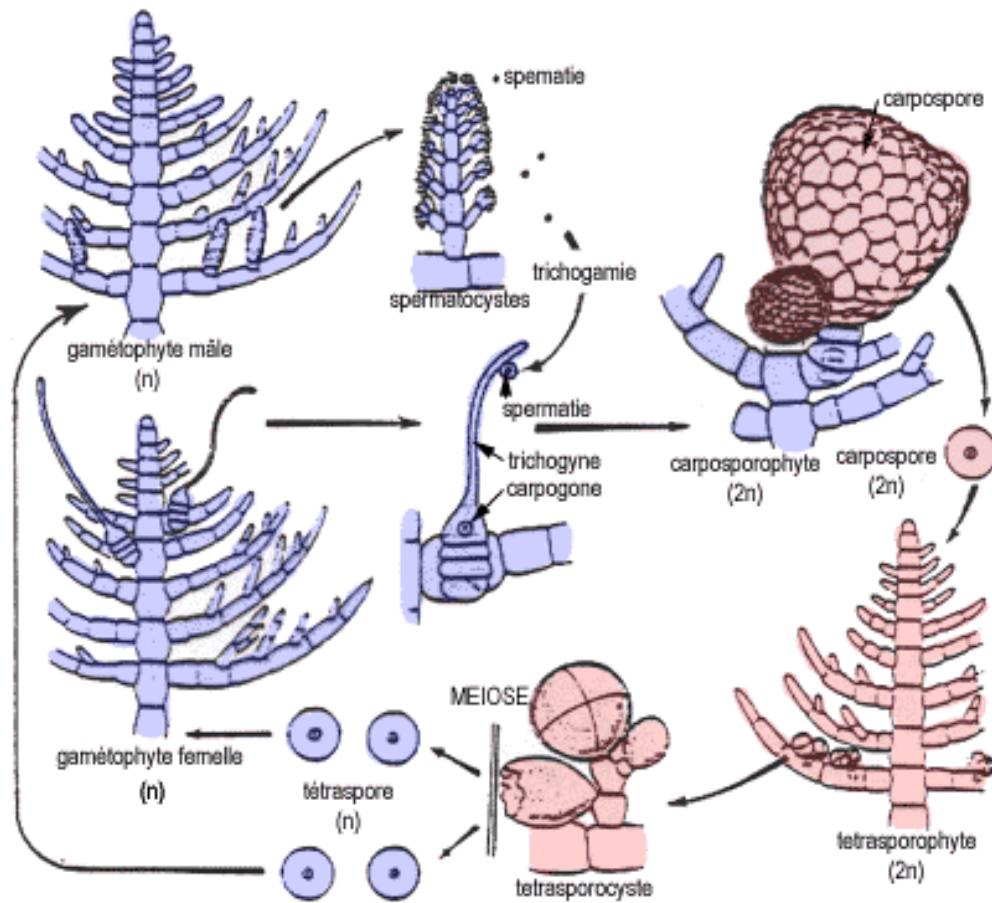


Fig. 19: Cycle digénétique diplophasique chez le genre *Laminaria* (algues brune) (Reece et al., 2012).

**Un cycle trigénétique :** Trois générations se succèdent dans ce cycle car la phase diploïde se déroulent en deux périodes distinctes: la première (**carposporophyte**) est issue du zygote et se développe en parasite sur le gamétophyte femelle, elle disséminera des carpospores (spores mitotiques diploïdes) donnant la deuxième génération diploïde : le **tétrasporephyte**. le tetrasporophyte disséminera des spores méiotiques (tétraspores) qui donnent des **gamétophytes** mâles et autres femelles (Fig. 20).



**Fig. 20:** Cycle trigénétique haplo-diplophasique chez les algues rouges *Antithamnion*. D'après (Roland et Vian, 1985)

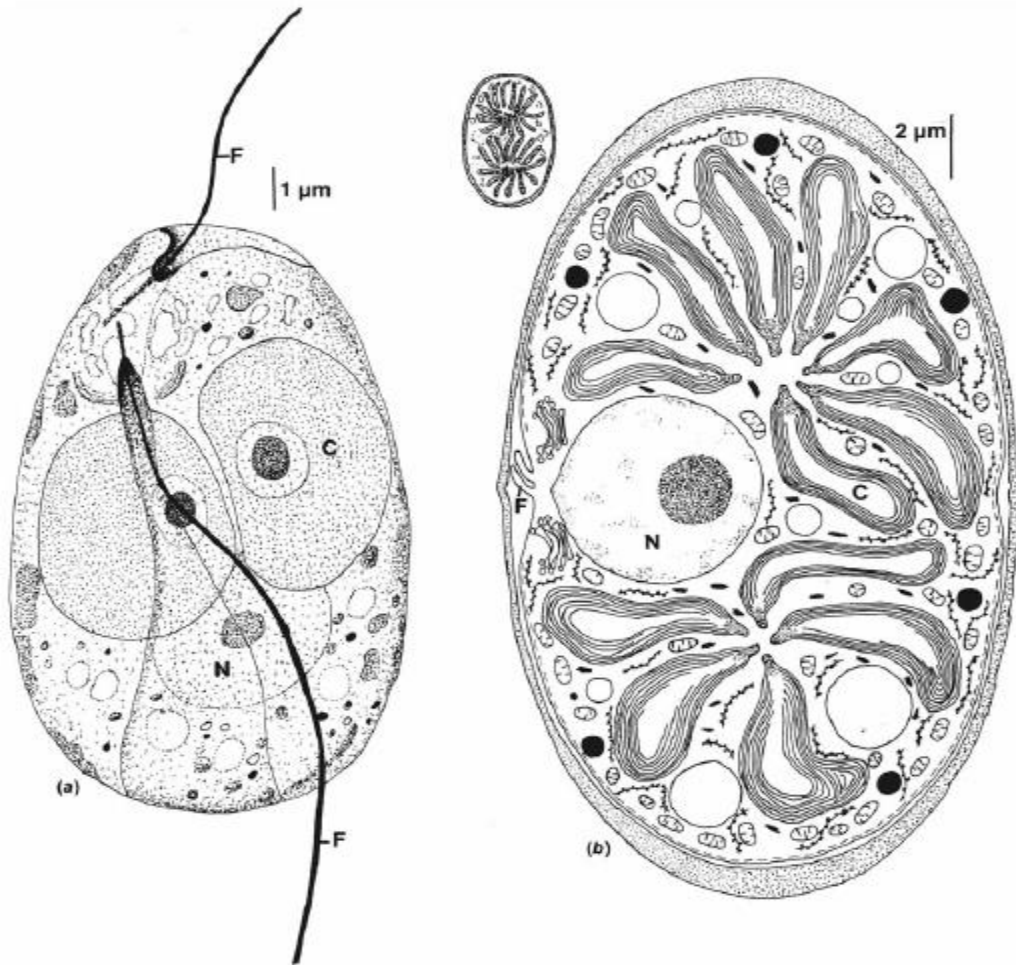
### **3-4- Systématique et particularités des principaux groupes**

#### **3-4-1- Glaucophytes**

Les **Glaucophytes** se présenteraient à l'origine de la lignée verte, de la grande majorité du monde végétal (**fig. 4, page 8**), bien que les données moléculaires fournissent des données non concluantes concernant cette hypothèse. La reconnaissance de Glaucophyta est intimement liée au concept de l'endo-symbiose entre protistes et cyanobactéries et à la théorie de l'évolution des cellules eucaryotes.

##### **3-4-1-1- Morphologie et cytologie**

Ce sont des Algues unicellulaires des eaux douces, aplatis dorso-ventralement, et munies de deux flagelles inégaux. Il a été évoqué qu'elles seraient issues d'une cyanobactérie photosynthétique intégrant par un eucaryote unicellulaire hétérotrophe (endosymbiose primaire). Cette bactérie aurait évolué en chloroplaste à structure ancestrale appelée **cyanelle ou muroplaste**, où on peut trouver les **phycobilosomes** qui renferment des pigments bleus, la **phycocyanine** et l'**allophycocyanine**. Les muroplastes sont les seuls plastes à avoir conservé leur paroi originale formée d'une couche de peptidoglycane (similaire à celle des bactéries).



**Fig. 21:** (a) : *Cyanophora paradoxa* (une glaucophyte) avec deux cyanelles (C), un noyau et deux flagelles (F) inégaux; (b) : Dessin semi-schématique d'une cellule de *Glaucozystis nostochinearum* montrant deux groupes de cyanelles (C), deux flagelles réduits (F), et un noyau (N). Extrait de Lee (2008).

### 3-4-1-2- Reproduction

La reproduction asexuée s'effectue par simple **division cellulaire** ou au moyen de **zoospores** par les **autospores** chez les espèces du genre *Glaucozystis*. La voie sexuée est **inconnue**.

### 3-4-1-3- Classification

Le **Glaucophyta** est l'embranchement le moins riche en espèces. Dans la classification la plus récente du groupe des glaucophytes, seuls huit genres ont été décrits, parmi lesquels quatre

genres seulement ont été isolés « *Glaucocystis*, *Cyanophora*, *Gloeochaete* et *Cyanoptyche* » et 15 espèces sont présentes dans des collections de cultures microbiennes, réparties sur deux familles, deux ordres et une seule classe (Tab. 3) :

**Tab. 3:** Classification des glaucophytes d'après Price *et al.* (2016)

Embranchement	Classe	Ordre	Famille	Genres
<b>Glaucophyta</b> (Skuja 1954)	<b>Glaucophyceae</b> Bohlin	<b>Glaucocystales</b>	<b>Glaucocystaceae</b>	<i>Gloeochaete</i>
		Bessey	G.S. West	<i>Cyanoptyche</i>
		<b>Cyanophorales</b>	<b>Cyanophoraceae</b>	<i>Glaucocystis</i>
		Kies et Kremer	Kies et Kremer	<i>Cyanophora</i>

Les autres membres présumés des Glaucophytes sont *Peliaina cyanea* Pascher 1929, *Strobilomonas cyaneus* Schiller 1954, *Glaucocystopsis africana* Bourrelly 1960 et *Chalarodora azurea* Pascher 1929, mais nous manquons à la fois de cultures cellulaires et de données moléculaires pour ces taxons.

Les spécimens identifiés comme *Chalarodora azurea* ont été récemment isolés en Slovaquie, mais les tentatives d'établissement de cultures cellulaires ont été infructueuses. Aucune donnée moléculaire de ces échantillons n'a été générée.

#### 3-4-1-4- Morphologie des genres de collections des cultures

La délimitation des genres *Glaucocystis*, *Cyanoptyche*, *Gloeochaete* et *Cyanophora* a été confirmée par des analyses moléculaires récentes. Nous décrivons ici les caractéristiques de chaque genre en fonction d'observations morphologiques d'espèces représentatives disponibles dans les collections microbiennes actuelles.

##### a- Le genre *Glaucocystis*

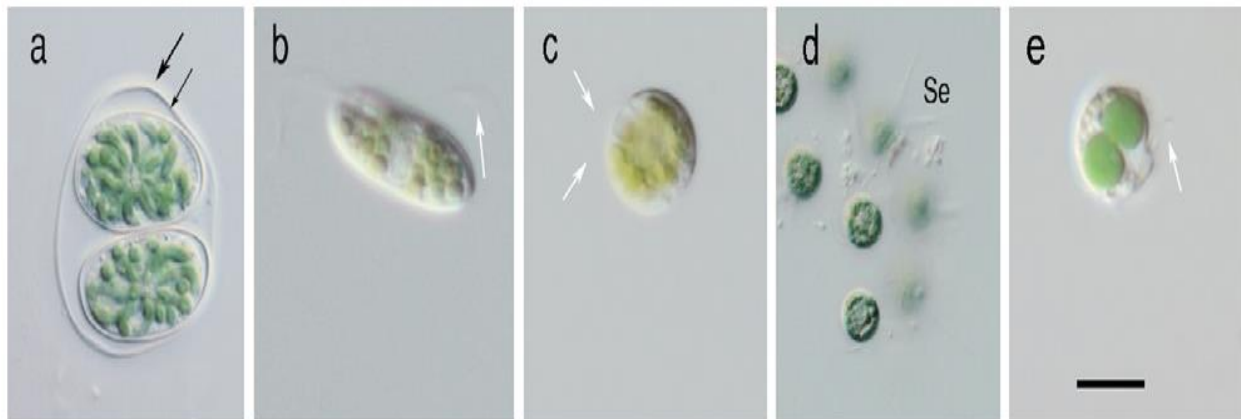
Les cellules libres (isolées) ou en groupes, caractérisées par la présence d'une paroi cellulosique. Dans un groupe, les cellules partagent une matrice commune liée par la paroi de la

cellule mère d'origine (**fig. 22, Tab. 4**). La forme de la cellule est généralement ovale, la paroi mère est également ovale, ou avec des lobes.

Les *Glaucocystis* possèdent des flagelles rudimentaires très courts, ils sont non-mobiles. Les cyanelles sont longues ressemblant à des gouttelettes effilées proximale et élargis distalement, et rassemblées dans des groupes en forme d'étoile.

**Tab. 4** : Caractéristiques des cellules des Glaucophytes d'après Jackson *et al.* (2014).

	<i>Cyanophora</i>	<i>Cyanoptyche</i>	<i>Glaucocystis</i>	<i>Gloeochaete</i>
Paroi cellulosique	-	+	+	+
Paroi de la cellule mère	-	-	+	-
Zoospores	+	+	?	+
Flagelles	+	+	rudimentaires	+
cils	-	-	-	+
Nombre de plaste par cellule	1-2	Jusqu'à $\sim 90^3$	$\sim 9(+)$	$>9$



**Fig. 22** : Différents glaucophytes sous microscope optique. D'après Jackson *et al.* (2015).

**b- Le genre *Cyanoptyche***

Les cellules sont simples, palmelloïdes (les cellules dans une matrice commune) ou zoospores (**Fig. 22b Tab. 4**). Les cellules en groupes ne sont pas liées par la paroi des cellules mères. Une cellule palmelloïde produit une seule zoospore de dimensions semblables ou même légèrement plus longues (cellules: 24 à 36  $\mu\text{m}$  de longueur; zoospores: 32 à 34  $\mu\text{m}$  de longueur). Les plastides sont arrondis à légèrement allongés mais moins allongés que chez *Glaucocystis*, et simples au lieu d'être en forme d'étoile.

**c- Le genre *Gloeochaete***

Les cellules solitaires ou en groupes, avec deux ou plus de cils par cellule (**Fig.22c, Tab.4**). La forme en groupes composés chacun de deux à quatre cellules délimité par une matrice (l'absence de la paroi de la cellule mère). Les plastides se multiplient et se rapprochent dans les cellules, chaque cellule comporte neuf plastides ou plus.

**d- Le genre *Cyanophora***

Des petites cellules (9–16  $\mu\text{m}$  de longueur x 7  $\mu\text{m}$  de largeur) biflagellées (**Fig.22e, Tab.4**), capables de se diviser par fission binaire et de produire des kystes ronds. Chaque cellule comporte deux ou 2n plastides qui ont souvent une légère invagination à mi-périphérie, parfois interprétée comme une preuve de la division des organites. Les caractéristiques morphologiques explorées dans la récente délimitation de cinq espèces de *Cyanophora* comprennent la **forme des cellules**, la planéité (dorsale/ventrale), le **sillon ventral**, l'**origine flagellaire**, la **division plastidique** et les fenestrations striées. L'insertion flagellaire et les fenestrations (chevauchement) n'étaient pas informatives au niveau des espèces chez *Cyanophora*, mais seraient des caractères intéressants à comparer entre les genres de glaucophytes.

### **3-4-2- Les Algues rouges (Rhodophytes)**

Cet embranchement compte près de six mille espèces dont la majorité sont marines. Ce sont des algues qui vivent en profondeur, fixées sur des supports tels que les rochers grâce à des crampons. On peut, bien sûr, les rencontrer en surface mais ce sont les seules capables de descendre jusqu'à une centaine de mètres grâce à la présence, dans leur chloroplastes, de phycobilines qui absorbent les radiations vertes et bleu-vert qui pénètrent en profondeur.

#### **3-4-2-1- Caractères généraux des Rhodophytes**

- + Les Rhodophycées sont des algues eucaryotes à cellules souvent plurinucléées ;
- + Se présentent sous différentes formes de thalles : Thalle unicellulaire, cette morphologie est très rare chez les Rhodophytes évolués, thalle filamenteux simple ou ramifié, thalle foliacé, thalle cladomien uniaxial ou pluriaxial ;
- + La paroi cellulaire est de nature pectocellulosique, elle contient en plus des polysaccharides tel que le xylomannane et le galactane ;
- + Les chloroplastes à deux membranes contenant les thylacoïdes solitaires comme chez les cyanophytes ;
- + Les pigments sont : la chlorophylle a et d; les carotènes, la phycoérythrine (responsable de la couleur rouge de l'algue) et la phycocyanine. La phycocyanine et phycoérythrine sont groupés en forme de grains sur les thylacoïdes formant des phycobilisomes ;
- + La substance de réserve est l'amidon extra-plastidial appelé: rhodamylon ou amidon floridien, présent dans les cellules sous forme de grains cytoplasmiques « l'amidon floridien est une molécule particulière qui ressemble à l'amylopectine de l'amidon ; il est en réalité plus proche du glycogène que de l'amidon.

#### **3-4-2-2- Reproduction**

**a- la reproduction asexuée :** Se fait par fragmentation du thalle ou par la production de structures spécialisées (spores).

**b- la reproduction sexuée :** La fécondation est de type **trichogamie** chez les espèces évoluées. Elle se fait par la production des gamètes : les **gamètes mâles (spermaties)** et les **gamètes femelles (oosphères)**. Ces gamètes sont nus sans paroi squelettique.

**c- cycle de vie** : Le cycle de vie chez les Rhodophytes peut être **digénétique** (Genre : *Porphyra*) ou **trigénétique** (Genre : *Antithamnion*).

### **3-4-2-3- Classification des Rhodophytes**

L'embranchement des Rhodophytes comprend une seule classe : **Rhodophyceae** divisée en deux sous classes : Les **Bangiophycideae** et les **Floridéophycideae**

**a- Sous classe des Bangiophycideae** : Cette sous classe est caractérisée par :

\* Un thalle unicellulaire ou filamenteux.

\* Présence de chloroplastes en forme étoilée.

\* La division est faite uniquement par reproduction asexuée sauf pour le genre *Porphyra* et *Bangia*. Cette classe contient 3ordres :

**Ordre1: Porphyridales** : ce sont des cellules isolées ou en cénobies. La reproduction est uniquement asexuée.

**Genre 1:** *Porphyridium* ;

**Genre2:** *Rhodorus*

**Ordre 2: Compsopogonales** : ce sont des algues à thalle cladomien, vivant dans les eaux douces. **Genre** : *Compsopogon*

**Ordre 3: Bangiales** : ce sont des algues dont la reproduction asexuée se fait par des spores et la reproduction sexuée fait intervenir des carpogones (gamètes femelles) sans trichogyne.

**Genre 1:** *Porphyra* ;

**Genre 2:** *Bangia*.

**b- Sous classe des Florideophycideae ou Florideae** :

Organisation du thalle de type : cladome uniaxial ou pluriaxial, présence de reproduction sexuée de type trigénétique. Cette sous classe comprend 14 ordres. Parmi lesquels on cite :

**Ordre 1 : Gelidiales** : espèces marines à structure uniaxiale

**Famille** : Gelidiaceae; **Genre** : *Gelidium* : Les gelidium constituent la principale matière première pour la préparation de l'agar.

**Ordre 2 : Cryptonemiales ou corallinales**

**Famille** : Corallinaceae : Thalle uniaxial ou multiaxial par leurs thalles incrustés de carbonate de chaux. **Genre** : *Corallina*

**Ordre 3 : Gigartinales** : beaucoup d'espèces de cet ordre sont utilisées pour la préparation de Carraghénanes et d'autres espèces fournissent l'agar.

**Famille** : Gigartinaceae;

**Genre 1**: *Chondrus* et **Genre 2**: *Gigartina*.

### 3-4-3- Les Algues vertes (Chlorophytes)

Les algues vertes réunissent entre 6000 et 7000 espèces, constituent le plus grand groupe d'algues. Les algues vertes unicellulaires, cosmopolites, sont majoritairement des algues d'eau douce, et constituent une grande part du phytoplancton. Un certain nombre de chloroccales vivent en symbiose avec des champignons formant des lichens.

#### 3-4-3-1- Caractéristique des algues vertes

- ✚ Algues d'un vert franc due à la présence de **chlorophylle a et b**, en plus des **carotènes** et des **xanthophylles** ;
- ✚ Elles possèdent une membrane cellulosique, souvent avec une couche externe pectique ;
- ✚ Le **chloroplaste** possède **deux membranes** ;
- ✚ Les **thylacoïdes** sont groupés par **paquets de plus de trois** ;
- ✚ Leurs réserves carbonées issues de la photosynthèse sont constituées d'amidon accumulé dans les plastes (**amidon intra-plastidiale**) ;
- ✚ Présence de **pyrénoïdes** (est un corps protéinique autour duquel s'accumule l'amidon) ;
- ✚ Présence de **stigma** (structure photosensible, riche en lipides et en carotène) ;
- ✚ La plupart des formes possèdent deux ou trois flagelles isokontés et acrocontés ;
- ✚ La plupart des formes possèdent une plusieurs vacuoles pulsatiles.

#### 3-4-3-2- Multiplication des algues vertes

**a- reproduction asexuée** : Chez les espèces unicellulaires, elle se fait par bipartition transversale, ou bien par bourgeonnement au niveau de chaque hémisomate. Par formation de renflement unicellulaire ou pluricellulaire (bulbiles) au niveau des rhizoïdes qui se détachent et donnent de nouveaux thalles (genre : *Chara*).

#### **b- reproduction sexuée**

- ✚ **Fécondation** : La **cystogamie**: très fréquente chez les Zygothyceae. **Isogamie anisogamie**: quand les gamètes sont pourvus des flagelles (ex : *Chlamydomonas* et *Ulva*). Rarement **oogamie** (ex: *Chara*).

- ✚ **Cycle de vie :** Le cycle de vie des chlorophycophytes est soit **Monogénétique haplophasique** (Ex: Zygothécées) soit **digénétique haplophasique** (la phase diploïde se limite au zygote).

### 3-4-3-3- Classification des algues vertes

Classiquement, les algues vertes (Les Chlorophycophytes) sont divisées en trois classes:

#### a- La classe des *Chlorophyceae*

Cette classe regroupe les formes unicellulaires, cénobiales ou à thalle pluricellulaires de forme variée (selon la classification phyllogénétique, les taxons unicellulaires sont classés dans le règne des protistes). Cette classe très hétérogène est divisée en trois sous-classe selon la morphologie des algues.

#### ✚ Sous-classe des *Monadophycidae*

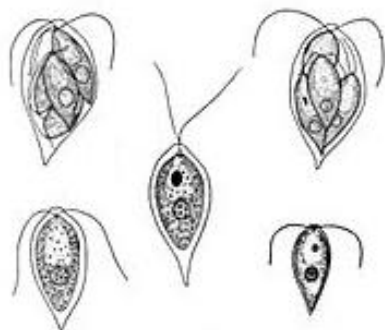
Cette sous classe regroupe la forme monadoïde (unicellulaire flagellée).

**Ordre des Volvocales :** Ce sont des formes unicellulaires libres ou réunies en colonies. Les cellules végétatives sont normalement flagellées le plus souvent à deux flagelles égaux.

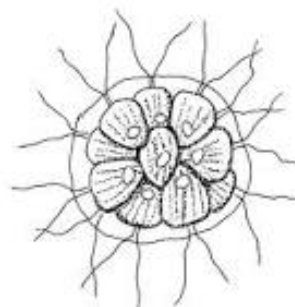
**Famille des Chlamydomonaceae :** Le genre: *Chlamydomonas* (Forme libre).

**Famille des Volvocaceae :** Constituée par l'ensemble de cellules formant une colonie.

Les cellules s'agglutinent deux à deux pour former des colonies définies, entourées d'une enveloppe. Genre 1 : *Pandorina* ; Genre 2 : *Volvox* (Forme coloniales).



Formes du genre *Chlamydomonas*



Une colonie de *Pandorina*

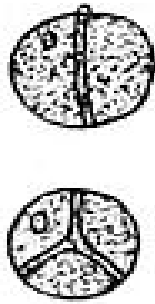
**Fig. 23 :** formes rencontrées chez les Volvocales.

✚ Sous-classe des Coccophycidae

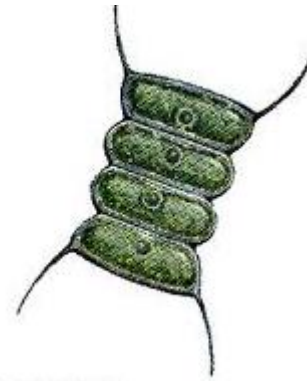
**Ordre des Chlorococcales** : Cet ordre regroupe un grand nombre d'algues unicellulaires ou cénobiales pourvues d'une membrane définie. On rencontre des cellules non flagellées.

**Famille: Oocystaceae** : Formes solitaires, **Genre** : *Chlorella*.

**Famille: Scendesmaceae** : Formes coloniales, **Genre** : *Scendesmus*.



**Genre** : *Chlorella*



**Genre** : *Scendesmus*

**Fig. 24** : formes rencontrées chez les Chlorococcales.

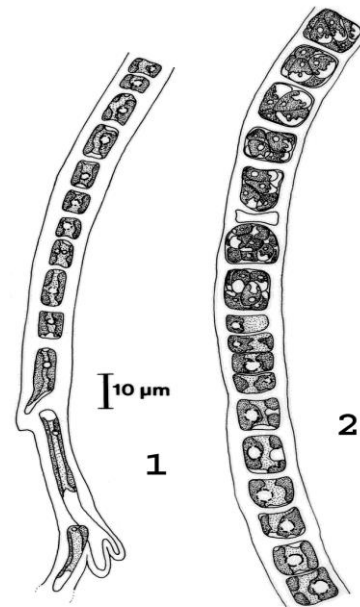
✚ Sous-classe des Septophycideae :

**Ordre des Ulothricales** : renferme les formes filamenteuses non ramifiées.

**Famille: Ulothricaceae**; **Genre** : *Ulothrix*

**Fig. 25** : *Ulothrix flacca* (Stegenga et al., 1997).

1- Partie basale du filament, 2- Partie supérieure du filament.



**Ordre des Ulvales** : Formes foliacées avec une ou deux couches de cellules ou en tube creux

**Famille**: Ulvaceae; **Genre** : *Ulva*; **Genre** : *Enteromorpha*.



**Genre** : *Ulva* (thalle foliacé)



**Genre** : *Enteromorpha* (thalle tubulaire)

**Fig. 26** : Formes rencontrées chez les Ulvales

#### ✚ Sous classe des Siphonophycideae

**Ordre des Siphonocladales** : cet ordre regroupe les algues filamenteuses simples ou ramifiées.

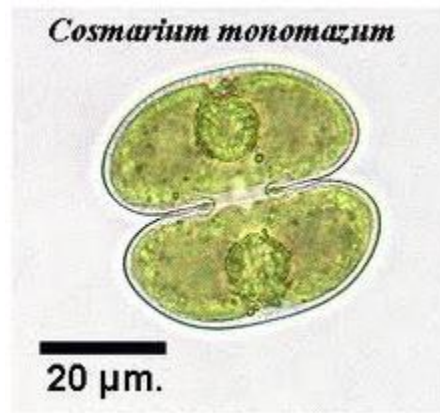
**La famille** des Cladophoraceae; **Genre** : *Cladophora* : thalle filamenteux très ramifié. La base du thalle présente des rhizoïdes de fixation.

#### **b- Classe des Zygothyceae**

Toutes les espèces de cette classe vivent dans les eaux douces. Elle se divise en deux principaux ordres :

##### **Ordre des Desmidiiales:**

**Famille des Desmidiaceae** : Algues unicellulaires ou cénobiales se caractérisant par une symétrie souvent marquée par un rétrécissement ou Ishme qui sépare la cellule en deux parties identiques : Hemisomates. Plus rarement la symétrie est seulement marquée par des inclusions cytoplasmiques. Exemple : *Closterium* et *Cosmarium*.



**Fig. 27:** forme des Desmediales (Ex. *Cosmarium monomazum*)

### **Ordre des Zygnematales:**

Caractérisé par une reproduction de cystogamie, cet ordre regroupe des espèces filamenteuses non ramifiées.

**Famille des Zygnemataceae :** La distinction entre les genres est basée sur la forme et le nombre de plaste. La conjugaison est scalariforme (tout le long du filament). Genre : *Zygnema*, *spirogyra*, *Mougeotia*.

### **c- Classe des Prasinophyceae**

Les algues de cette classe possèdent une cellule et des flagelles (de 1 à 8 généralement, atteignant parfois 16) recouverts de 1 à 5 couches d'écaillés rattachées à la membrane cellulaire.

Selon AlgaeBase (2013), cette sous classe comprend 4 ordres : Prasinococcales, Chlorodendrales, Pseudoscourfieldiales, Pyramimonadales.

### **d- Classe des charophyceae**

Cette classe est très homogène à thalle cladomien. Ne comporte qu'une seule famille, elle est plus proche des Embryophytes (Streptophytes) que des autres algues vertes.

### **Ordre des Charales**

**Famille** des Characeae ; **Genre :** *Chara*

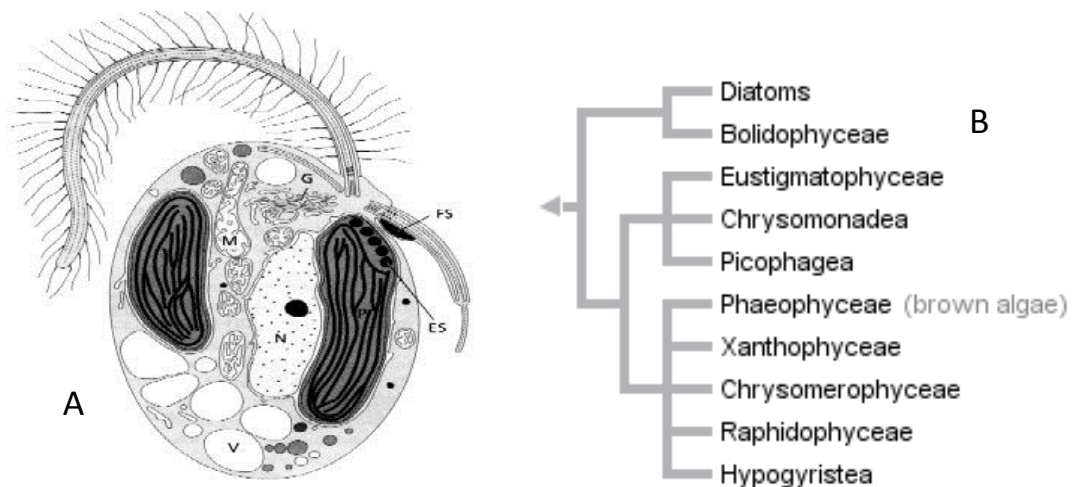
Cette algue est fixée au substrat par des rhizoïdes et peut atteindre jusqu'à 20 cm de long. Elle se présente en touffe dans les eaux saumâtres ou douces. Le thalle est de type cladomien. Le genre Chara a un cycle monogénétique haplophasique. La fécondation est une oogamie.

La plante présente des gamétocystes mâles (globules) qui vont libérés par éclatement des spermatozoïdes biflagellés. Ces spermatozoïdes vont féconder l'oosphère (nucules). Il va y avoir une réduction chromatique (Méiose) qui aboutit à une cellule à un noyau et à une cellule à trois noyaux. La cellule mononuclée donnera la cellule germinative qui donnera un protonéma et des rhizoïdes évoluant à un individu du genre Chara, alors que la cellule trinuclee donnera les réserves en amidon.

### 3-4-4- Autres groupes d'algues

#### a- Ochrophytes (Lignée brune)

Le clade des **Ochrophytes** comprend tous les groupes pigmentés des **hétérokontes**, y compris les **diatomées**, les **chrysophytes**, les **algues brunes** et bien d'autres. Les hétérokontes sont un clade de protistes, distingué des autres groupes par la présence de deux flagelles; un flagelle postérieur plus court et un flagelle antérieur plus long avec de nombreuses soies latérales (mastigonèmes). Leurs plastes ont **4 membranes** et sont issus de **l'endosymbiose secondaire** d'une algue rouge. Les phycobilines de l'algue rouge ont été perdues et une nouvelle chlorophylle *c* a été acquise.



**Fig. 28** : Clade des Ochrophytes. **A**, la cellule typique des Ochrophytes ; **B**, les groupes des Ochrophytes.

#### Les Algues brunes (les Phaeophytes)

##### Caractères généraux des Phaeophycées

- Presque toutes les phéophycées sont **marines**, côte rocheuse à **faible profondeur**, parfois émergés;
- Possèdent de la **chlorophylle a** et **c** ;
- Les pigments surnuméraires sont les **caroténoïdes** dont la **fucoxanthine** (caroténoïdes de couleur brune) ;

- + La paroi cellulaire renferme peu de cellulose, **alginate** (acide mannuronique) ;
- + L'absence de **l'amidon** ;
- + La substance de réserve est une **Laminarine vacuolaire**. cette dernière contient aussi des molécules de défense comme des **phénols, terpènes, ...etc.** ;
- + Le cytoplasme des cellules contient de petites vacuoles spécialisées, les **physodes** remplies de composés phénoliques ;
- + Leurs cellules reproductrices flagellées sont hétérokontées. Le flagelle arrière est pourvu de mastigonèmes.

### **Reproduction des phéophyceae**

#### **a-Reproduction asexuée :**

La reproduction peut être asexuée par fragmentation. Toutes les algues bénéficient en principe de cette possibilité végétative.

#### **b-Reproduction sexuée :**

La nature des organes reproducteurs permet de distinguer deux grandes sous classes, Les **Phéosporophycideae** et les **cyclosporophycideae**

\*Chez les **phéosporophysideae**, il existe deux types d'organes reproducteurs:

-**Les zoïdocystes uniloculaires** de forme ovoïde ou sphérique, renfermant de nombreux zoïdes haploïdes.

-**Les zoïdocystes pluriloculaires** où la cellule mère du zoïdocyste se divise par des cloisons succesifs de nombreuses petites logettes dont chacune renferme un seul zoïde

\***Chez les cyclosporophycideae**, la reproduction est toujours une **oogamie**, les gamètes femelles immobiles (**oosphère**) et les gamètes mâles (**anthérozoïdes**) mobiles. Ces deux types sont inclus dans des cavités appelées: **conceptacles** creusées dans des parties différenciées appelées **réceptacles**.

### Classification des phaeophyceae

La classe des phaeophycées est divisée en deux sous classes :

#### 1- Sous classe des phéosporophycideae

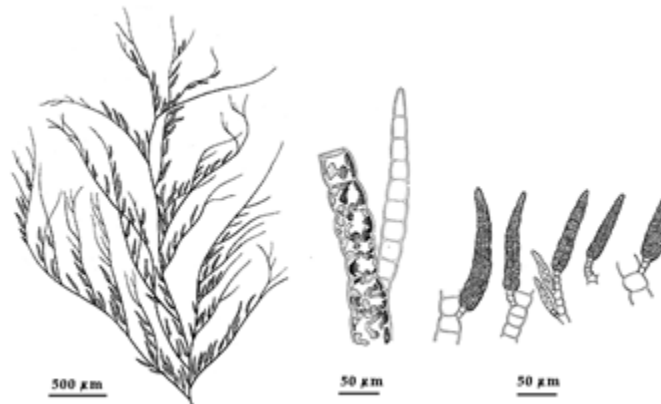
Ce sont des algues à cycle digénétique

#### Ordre1 : Ectocarpales

Cet ordre renferme des espèces peu différenciées, composées de filaments unisériés, ramifié à croissance intercalaire.

**Famille 1 :** Ectocarpaceae ; en fines touffes généralement épiphytique de grandes algues.

**Genre :** *Ectocarpus*.

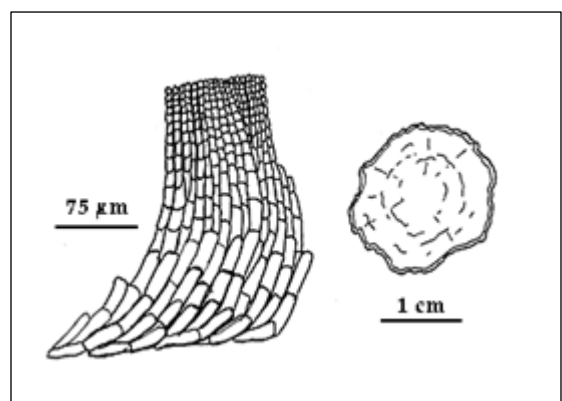


**Fig. 29:** Thalle d'une espèce du genre *Ectocarpus*.

**Famille 2:** Ralfsiaceae; courts filaments dressés plus ou moins coalescent latéralement et qui s'étalent en croûte étroitement appliqués sur les rochers.

**Fig. 30:**

Thalle du genre *Ralfsia*



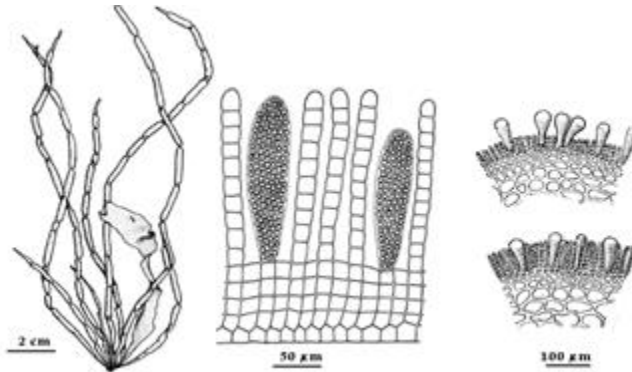
**Ordre 2 : Culeriales**

Ce sont des algues en lames ramifiées ou en éventails à croissance marginale trichothallique. Les thalles sont formés par des coalescences latérales des filaments.

**Genre:** *Culteria*

**Ordre 3 : Scytosiphoniales**

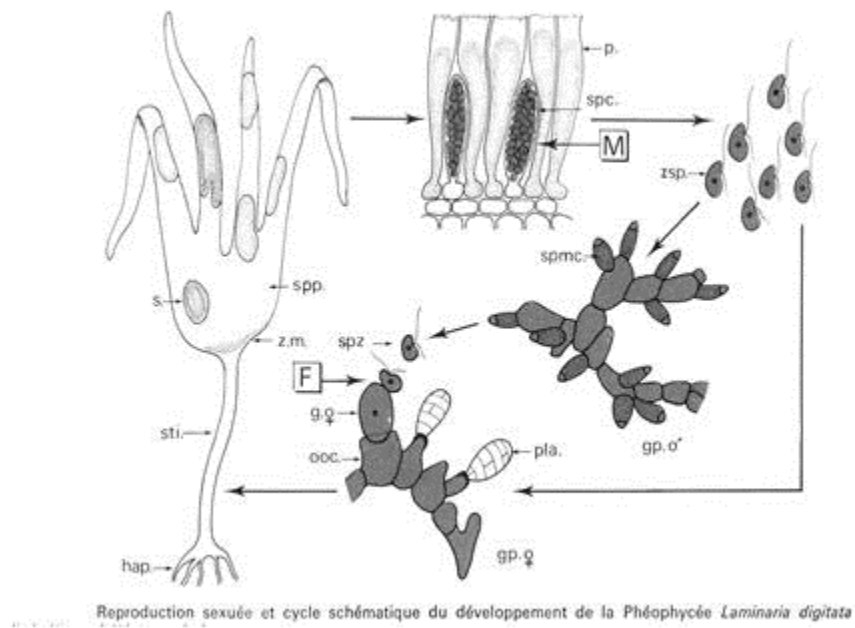
Les algues appartenant à cet ordre ont des frondes à croissance d'abord trichothallique puis intercalaire foliacées.



**Fig. 31:** thalle de l'espèce *Scytosiphon simplicissimus*.

**Ordre 4 : Laminariales**

Sont remarquables par leur forme, leur abondance, et leur taille qui généralement dépasse toutes les autres algues. Certains genres peuvent atteindre une quarantaine mètres de longueur. Elles sont exploitées industriellement par l'extraction des sels potassium, de l'iode et des alginates. Vivent à une certaine profondeur. Leur reproduction sexuée se fait par oogamie. L'alternance de générations entre un sporophyte diploïde atteignant plusieurs mètres de longueur et un gamétophyte haploïde. Le cycle digénétique des laminaires est un exemple d'hétéromorphisme.



**Fig. 32:** Cycle digénétique de *Laminaria*

**Famille 1 :** Phyllariaceae

**Genre :** *Phyllaria*

**Famille 2 :** Laminariaceae

**Genre :** *Laminaria*

**Famille 3 :** Lessoniaceae

**Genre :** *Macrocystis*

## 2- Sous classe des cyclosporophycideae

Cette sous classe renferme les espèces ayant un cycle de reproduction **monogénétique diplophasique** et contient un seul ordre.

### Ordre des Fucales

Ce sont des algues de grande taille, caractérisées par leur différenciation morphologique accentuée, l'absence d'une génération haploïde et la localisation de leurs organes reproducteurs dans de petites cavités ou conceptacles.

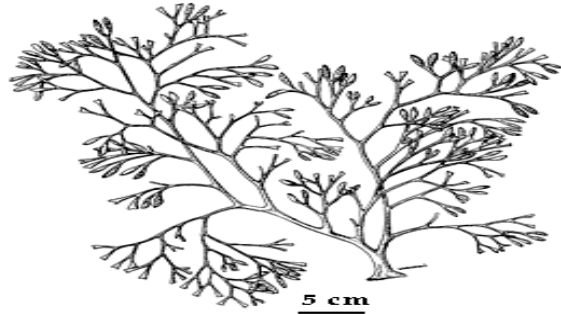
Les conceptacles sont généralement groupés dans les parties spécialisées du thalle que l'on nomme : réceptacles. La paroi du conceptacle est tapissée de filaments. Sur certains d'entre eux (les filaments) naissent des gamétocystes. Le zygote diploïde germe immédiatement pour donner un nouvel individu diploïde.

**Famille 1: Fucaceae;**

**Genre 1:** *Fucus*,

**Genre 2 :** *Pelvetia*,

**Genre 3:** *Ascophyllum*



**Fig. 33 :**Thalle *Pelvetia compressa*

**Famille 2 : Saragassaceae;**



**Fig. 34 :** Thalle du genre *Saraganum* de la famille des Saragassaceae.

## **Les Diatomées ou Bacillariophycées**

### **Caractères généraux**

Sont des microorganismes unicellulaires photosynthétiques, aujourd'hui placées dans le clade des Hétérocontes.

Leur taille varie de 20 à 200  $\mu\text{m}$  environ, quoique certaines puissent atteindre 2 mm. Elles peuvent se présenter en cellules isolées ou regroupées en colonies. Elles se caractérisent par une paroi rigide faite de silice hydratée insérée dans une matrice organique, le **frustule**. Cette paroi finement ornée (pores, excroissances, épines, etc.) est divisée en deux valves emboîtées de taille différente (**fig. 35**) : l'hypothèque, la plus petite des deux valves, vient s'emboîter dans l'épithèque (à la façon d'une boîte de Pétri). La bordure verticale de l'épithèque, appelé l'épicingulum, recouvre et cache le bord de l'hypothèque, ou hypocingulum. Chez de nombreuses espèces, les deux valves présentent également des ornements différents.

Les Diatomées occupent à l'heure actuelle la zone photique des eaux marines fraîches et froides, mais aussi les eaux douces et les sols. En milieu marin, on en connaît des espèces planctoniques et benthiques.

### **Cycle de vie des diatomées**

Les Diatomées ont un cycle de vie essentiellement diplophasique. Les cellules diploïdes se multiplient par mitose pendant plusieurs mois, voire plusieurs années. Chacune des valves de la cellule parente devient l'épithèque d'une cellule-fille, qui secrète l'hypothèque correspondante.

En conséquence, l'une des deux diatomées-filles est de taille inférieure à la diatomée initiale, alors que l'autre fille est de même taille. Par conséquent, au cours des divisions successives, des Diatomées plus petites apparaissent et l'une des lignées de descendantes voit sa taille diminuer à chaque génération (**fig. 36**).

Cette diminution ne dure pas indéfiniment. En dessous d'un certain seuil (environ 30% de la taille initiale), ces cellules entrent en méiose et produisent des gamètes (le gamète mâle est la seule cellule flagellée du cycle), dont la paroi cellulaire ne comporte pas de frustule siliceux. Le zygote

issu de la fusion des gamètes (auxospore) croît jusqu'à la taille maximale propre à l'espèce ou à la population avant de former un nouveau frustule (fig. 37).

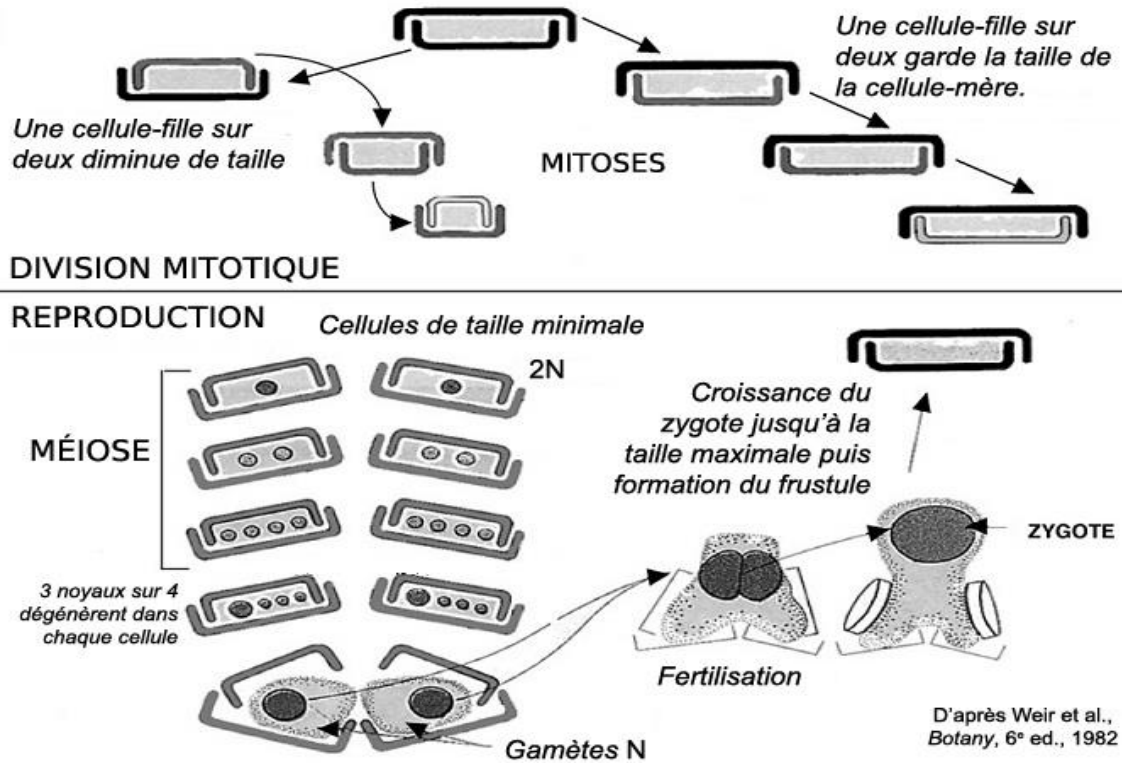


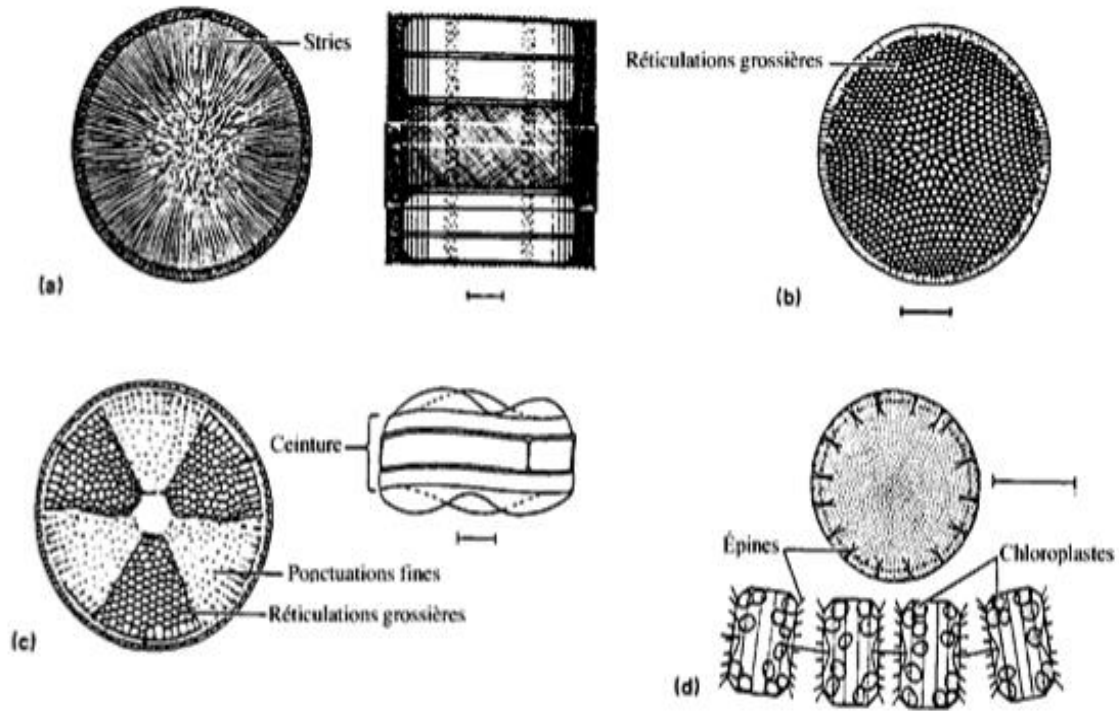
Fig. 35 : Schéma de la division mitotique et de la reproduction méiotique des Diatomées.

### Classification des diatomées

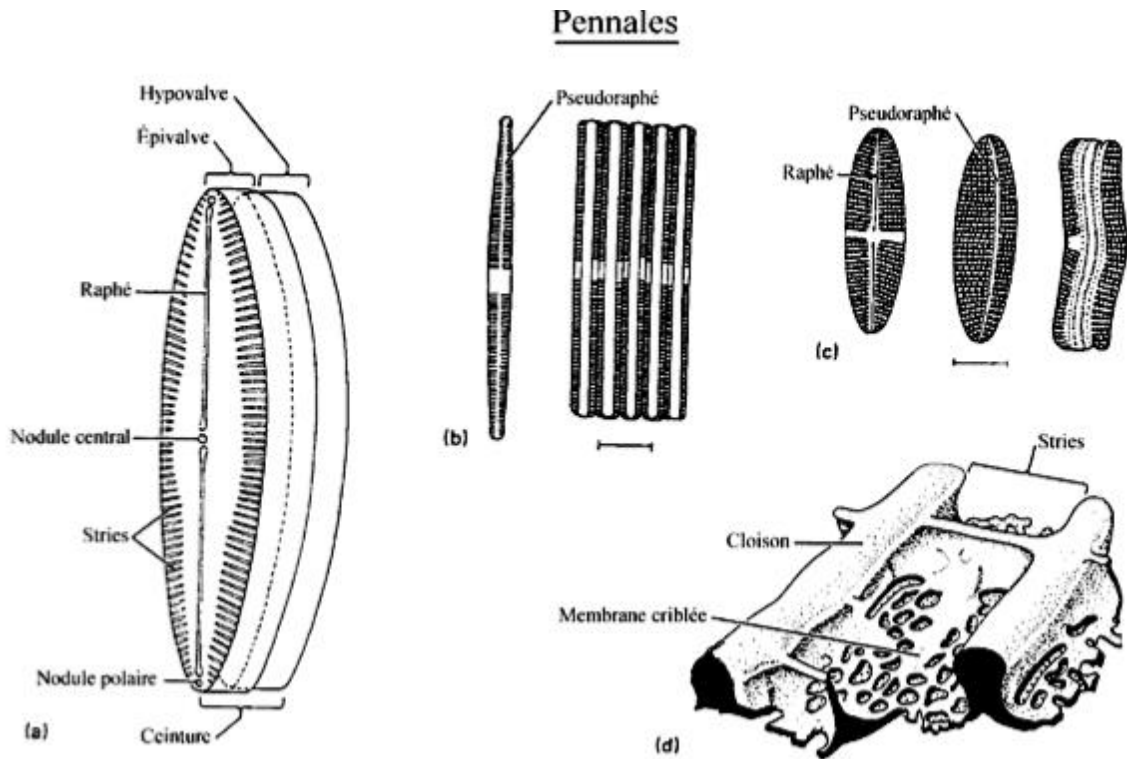
On distingue deux grandes catégories de Diatomées selon la géométrie de leur frustule :

– les **Diatomées centrales**, à symétrie radiale: le frustule circulaire porte des stries, rayonnant depuis un point ou une aréole (qui n'est pas forcément situé au centre de la valve), ou une réticulation.

– les **Diatomées pennales**, à symétrie bilatérale: le frustule allongé présente des stries disposées autour d'un plan de symétrie bilatérale. De nombreuses Diatomées Pennales présente sur ce plan de symétrie une fente, le raphé, interrompue par un nodule de silice central. Elle permet une communication avec le milieu extérieur et l'excrétion de mucilage. Si cette fente est atrophiée ou peu marquée, on parle de pseudo-raphé. Les Pennales sans raphé sont appelées : Diatomées araphidées ou crypto-raphidées.

Centrales

**Fig. 36 :** Diatomées centrales. (a) *Melosira* : vue de la valve (à gauche) et vue cingulaire d'une colonie (à droite) ; (b) *Coscinodiscus*, vue de la valve ; (c) *Actinoptychus*, vue de la valve (à gauche) et valve cingulaire (à droite) ; (d) *Thalassiosira* : vue de la valve (en haut) et vue cingulaire d'une colonie (en bas). Échelle = 10 µm.



**Fig. 37** : Diatomées pennales. (a) *Pinnularia* : vue oblique montrant le raphé ; (b) *Flagilaria* : valve avec le pseudoraphe (à gauche) et colonie en vue cingulaire (à droite) ; (c) *Achanthes* : vue de l'hypovalve avec le raphé (à gauche), vue de l'épivalve avec le pseudoraphe (au centre) et vue de la ceinture (à droite) ; (d) détail d'un aréole d'une diatomée. Échelle = 10  $\mu$ m. D'après M. D.

## b- Euglenophytes

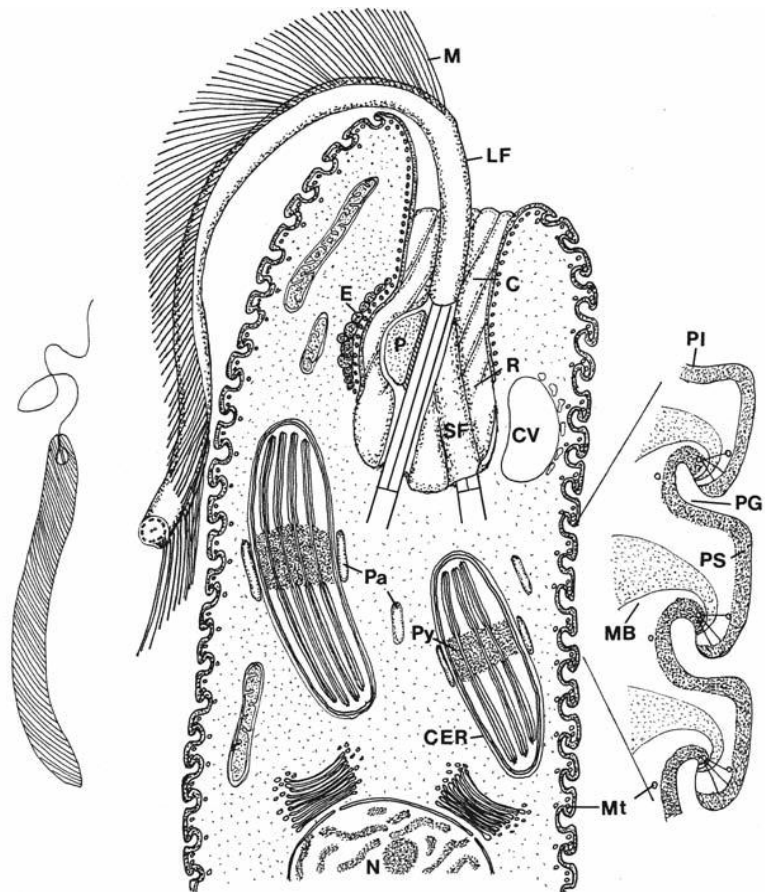
## Caractéristiques

Les Euglénophytes sont en général **des algues libres**, mobiles grâce à **leurs flagelles**, **incolores** ou **colorées** par les **chlorophylles a** et **b** accompagnées de **carotène** et de **xanthophylles**. Les réserves sont constituées par du **paramylon extraplastidial** (polymère de Glucose liés par des liaisons  $\beta$  (1,3), spécifique de ce groupe) formant des bâtonnets, des grains perforés ou des anneaux. Les deux flagelles **fortement inégaux** sortent d'une dépression apicale profonde: le cytopharynx ou réservoir qui s'ouvre à l'extérieur par un pore se prolongeant parfois en un sillon longitudinal plus ou moins long. Des vacuoles pulsatiles se déversent à la base du cytopharynx sur les flancs duquel est accolé chez de nombreuses espèces un stigma. L'ensemble de la cellule est entouré d'une cuticule déformable, mince ou épaisse, très souvent parcourue par des stries hélicoïdales (**Fig. 38**).

**Fig. 38:** Schéma représente l'ultrastructure de la cellule d'une Euglenophytes (*Euglena*)

(C) Canal; (CER) chloroplast endoplasmic reticulum; (CV) contractile vacuole; (E) eyespot; (LF) long flagellum; (M) mastigonemes; (MB) muciferous body; (Mt) microtubules; (N) nucleus; (P) paraflagellar swelling; (Pa) paramylon; (PG) pellicle groove; (PI) plasmalemma; (PS) pellicle strip; (Py) pyrenoid; (R) reservoir; (SF) short flagellum.

Extrait de Lee (2008).



Les euglénophytes, ainsi que les autres membres du phylum, ont un seul noyau chromosomique et leur membrane nucléaire n'est pas une continuation du réticulum endoplasmique. La division du noyau se produit comme une mitose intranucléaire sans la participation des centrioles.

## **Reproduction des Euglénophytes**

### ***Reproduction asexuée***

La reproduction des Euglénophytes est essentiellement **asexuée**. La mitose chez ces organismes diffère quelque peu de celle observée chez les animaux, les plantes et même d'autres protistes.

Le début de la division cellulaire est marqué par la migration du noyau vers la base des flagelles. Pendant la division, ni l'enveloppe nucléaire ni les nucléoles ne disparaissent dans ces organismes. Lorsqu'elles atteignent la position appropriée, les deux structures s'allongent en même temps que les chromosomes se déplacent vers le centre du noyau et forment une plaque métaphasique en forme de fil. Le centre de la plaque est pénétré par les nucléoles.

Contrairement au reste des eucaryotes, le noyau des Euglénides s'étire initialement perpendiculairement à la longueur de l'axe de la cellule, séparant ainsi les chromatides sœurs. Ce n'est qu'après l'allongement des extrémités du noyau que les fibres du fuseau se raccourcissent et que les chromosomes se dirigent vers les pôles.

Lorsque les cellules atteignent la télophase, le noyau s'étire dans toute la cellule. La strangulation de la membrane nucléaire se termine par la division du nucléole et la séparation des noyaux filles.

La cytokinèse est causée par la formation d'un sillon de division qui se forme dans la région antérieure de la cellule et se déplace vers la région postérieure jusqu'à ce que les deux nouvelles cellules soient séparées.

**Reproduction sexuée**

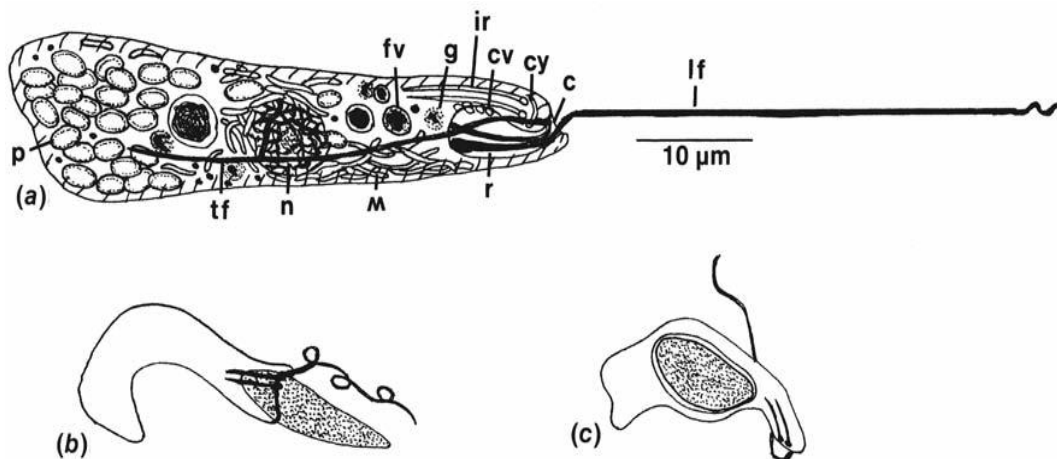
On a longtemps pensé que les euglénoïdes flagellés étaient dépourvus de reproduction sexuée. Cependant, des études récentes ont montré que beaucoup d'entre eux présentent un type de méiose tout au long de leur cycle de vie, bien que les rapports ne soient pas très détaillés.

**Classification des Euglénophytes**

Les Euglénophytes sont abondantes dans les eaux riches en matières organiques. Cet embranchement ne renferme qu'une classe, les **Euglénophycées**, qui se subdivisent en trois ordres et 14 genres au total :

✚ **L'ordre des Heteronematales**

Ce sont toutes des formes incolores dépourvues de plaste et de stigma, le fouet antérieur est toujours raide pendant la nage, le second flagelle lorsqu'il existe, est tourné vers l'arrière et ondule faiblement ; la base de ces fouets incluse dans le cytopharynx est épaissie. Les cellules ont un organe d'ingestion spécial, sont phagocytaires, absorbant des particules d'aliments entières et les digérant dans des vésicules d'aliments. *Peranema trichophorum* est un euglénoïde qui ingère d'autres cellules (**Fig. 39**)



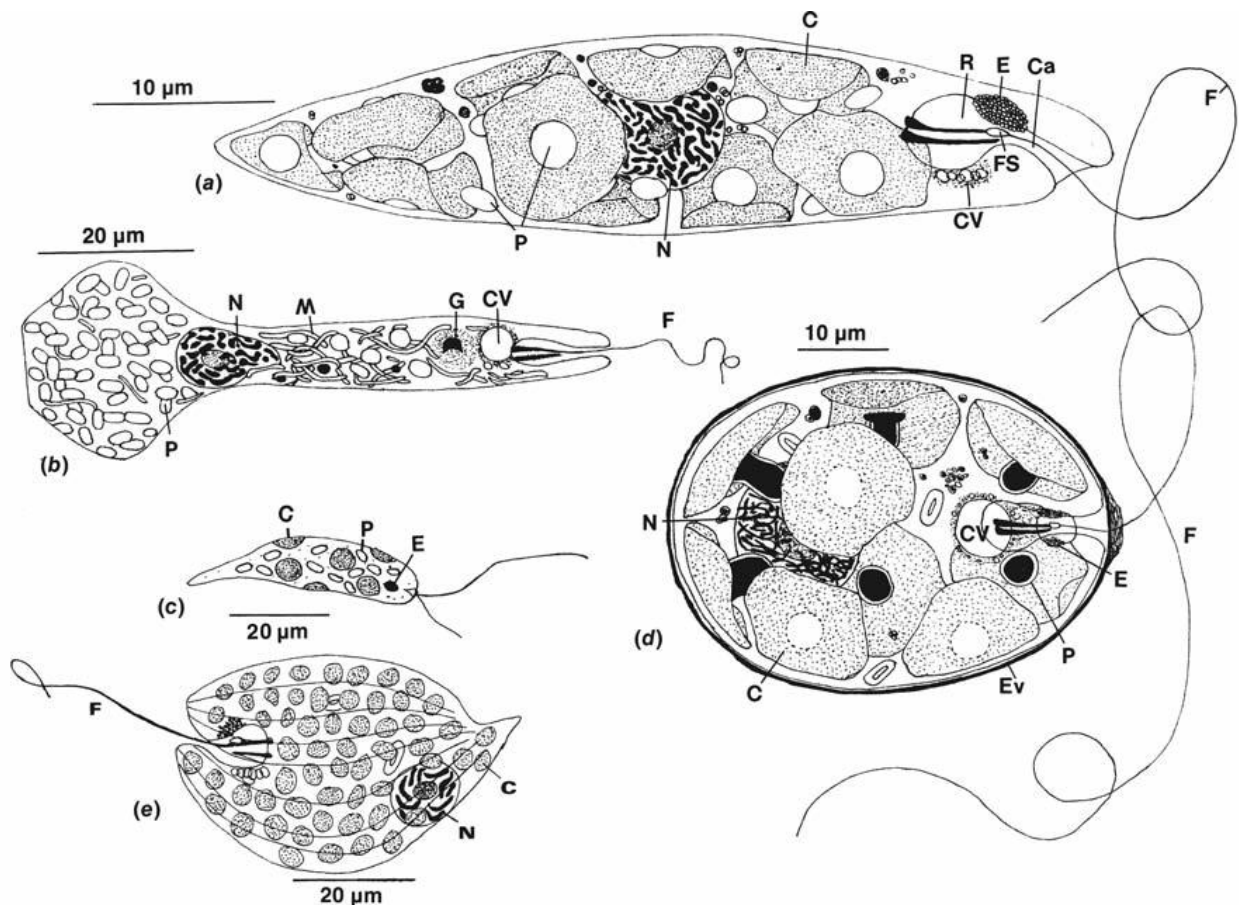
**Fig. 39:** *Peranema trichophorum*. (a) structure générale de la cellule. (b), (c) Deux étapes dans l'ingestion d'une cellule d'*Euglena* (cellule pointillée). (Lee, 2008)

**C:** Canal; **cv:** contractile vacuoles; **cy:** rim of cytosome; **fv:** food vesicle; **g:** Golgi; **ir:** ingestion rods; **lf:** leading flagellum; **m:** mitochondrion; **n:** nucleus; **p:** paramylon; **tf:** trailing flagellum.

### ✚ Ordre des Euglenales

Cet ordre renferme des formes unicellulaires vertes ou rarement incolores à deux flagelles bien développés (Eutreptiacées) ou seulement à un seul bien visible (Euglénacées). Les genres que l'on rencontre le plus souvent sont les suivants :

**Euglena** (Euglénacées) : avec des cellules fusiformes ou parfois globuleuses et à section transversale circulaire. La cuticule est toujours ornée de stries hélicoïdales plus ou moins marquées. Il existe un ou plusieurs plastes verts avec ou sans pyrénéoïde (**Fig. 40 a**). Chez *E. viridis*, il existe des plastes en bandelettes qui rayonnent d'un pyrénéoïde axial entouré de paramylon.



**Fig. 40 :** a) *Euglena gracilis*. (b) *Astasia klebsii*. (c) *Eutreptiella marina*. (d) *Trachelomonas grandis*. (e) *Phacus triqueter*. (C) Chloroplast; (Ca) canal; (CV) contractile vacuole; (E) eyespot; (Ev) envelope; (F) emergent flagellum; (FS) flagellar swelling; (M) mitochondrion; (N) nucleus; (P) paramylon grains or paramylon sheath around chloroplast; (R) reservoir. (Lee, 2008)

*Phacus* (Euglénacées) avec des cellules aplaties, foliacées avec un apex échancré et l'antapex effilé en queue oblique plus ou moins longue. Les plastes sont nombreux et en disques pariétaux (**Fig. 40 e**)

*Lepocinch* (Euglénacées) à cellules à contour elliptique ou fusiforme avec une cuticule épaisse présentant des stries hélicoïdales fortement marquées. Toute la cellule présente une symétrie radiale parfaite ; les réserves sont constituées par un ou deux gros paramylons en anneaux placés latéralement et se faisant face.

*Trachelomonas* (Euglénacées) ayant une thèque ou logette brune de forme ellipsoïdale, ovoïde ou sphérique, souvent ornée de pores, de fossettes, d'épines, de verrues ou d'aiguillons ; cette thèque est percée d'un pore qui laisse passer la flagelle locomoteur de la cellule contenue à l'intérieur (**Fig.40 d**).

*Astasia* (Euglénacées) avec des cellules incolores très métaboliques ou fermes à contour invariable, dépourvues de plastes et le plus souvent de stigma. La cuticule est nettement striée hélicoïdalement (**Fig. 40 b**).

#### **Ordre des Eutreptiales**

Les organismes des Eutreptiales ont deux flagelles émergents, l'un dirigé vers l'avant et l'autre latéralement ou postérieurement pendant la nage; pas d'ingestion spéciale (**Fig. 40 c**).

*Chapitre 2*  
*Les champignons*  
*et*  
*les lichens*

## Chapitre 2: Les champignons

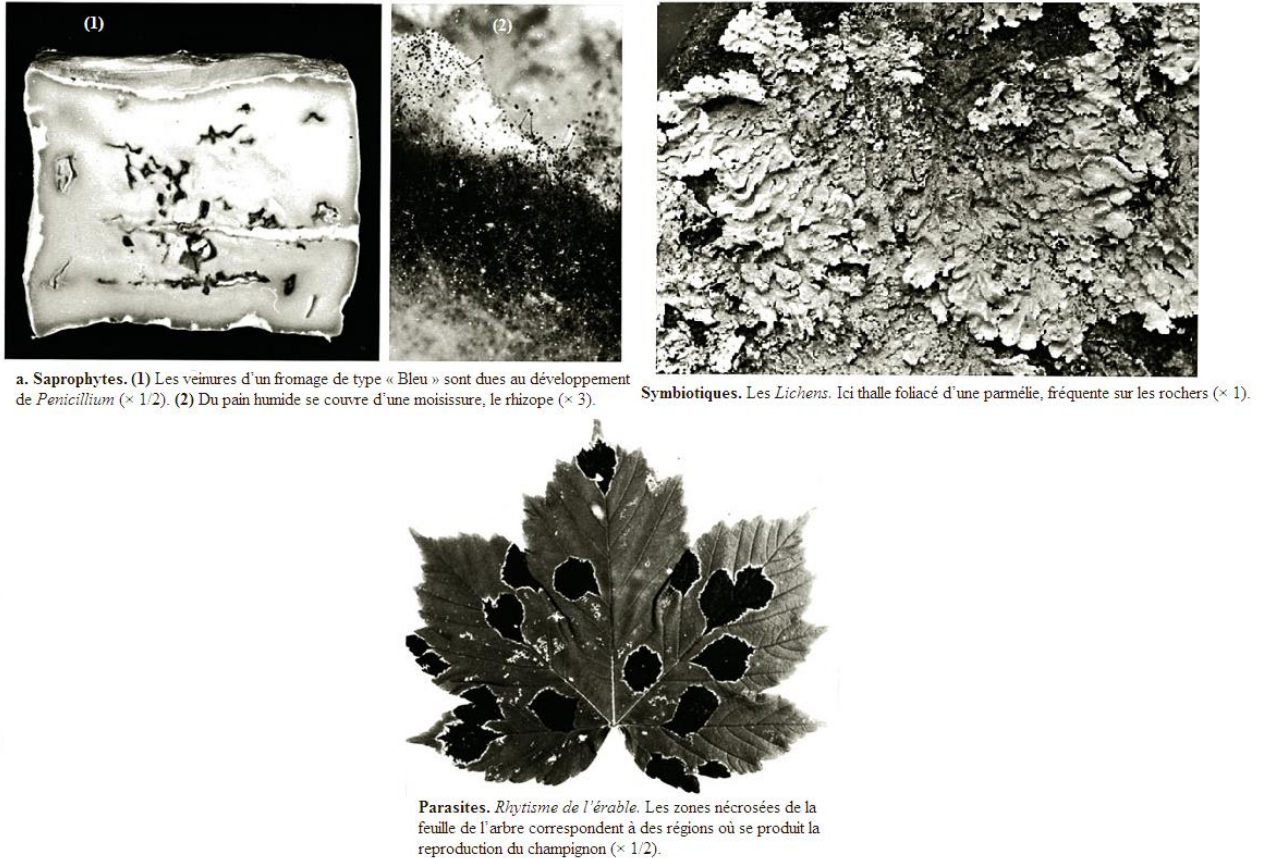
### 1- Généralités

Au sens large les Champignons ou *Mycophytes* (myco = champignon, leur étude constitue la mycologie), constituent un groupe très hétérogène des organismes **eucaryotes** et **thallophytes** qui se distinguent fondamentalement des algues par l'absence de chlorophylle et de toute ébauche de plastes (**hétérotrophes**). Parmi les caractéristiques biochimiques qui les distinguent des végétaux il faut citer la synthèse fréquente de **chitine** au lieu de cellulose, qui existe également chez les Arthropodes : insectes et crustacés, dans les parois et la mise en réserves de glucides sous forme de **glycogène**, qui est stocké dans le cytoplasme comme dans les cellules animales (hépatocytes, par exemple).

Du point de vue écologique, ils sont essentiels pour le recyclage de la matière. Avec les bactéries ce sont les grands destructeurs des molécules complexes. On distingue trois modes de vie : certains sont **saprophytes** et se nourrissent de matières organiques mortes ; ce sont des détritivores qui dégradent des substrats très variés. Ils participent à l'élaboration de l'humus et des sols. **Les parasites** s'accroissent aux dépens d'autres cellules vivantes. Ils causent des dégâts considérables notamment aux plantes cultivées. Enfin, une dernière catégorie est **symbiotique**, c'est-à-dire qu'elle établit avec une autre espèce un équilibre à bénéfices réciproques.

Concernant leur mode de nutrition, les champignons se nourrissent par **absorption**. Ils dégradent la matière organique à l'extérieur de leurs cellules grâce à leurs **enzymes lytiques**. La matière dégradée, en ces composantes unitaires, est ensuite absorbée pour être utilisée par la cellule fongique.

Les champignons se reproduisent par les spores directes ou indirectes (**Cryptogames**).



**Fig. 39** : modes de vie des champignons (Roland *et al.*, 2008, modifiée).

## 2- Morphologie du thalle

Les champignons les plus simples sont **unicellulaires** (les levures) mais la plupart sont pluricellulaires, formés de filaments ramifiés, dont l'ensemble constitue **le mycélium**.

Ils sont de deux types:

**Coenocytique** (champignons primitifs), quand les filaments ne sont pas cloisonnés, ce sont de longs filaments à noyaux multiples. Les filaments sont des **siphons** ;

**Cloisonnés** (champignons supérieurs), quand les filaments appelées hyphes. Sont divisées par des cloisons. La cloison entre deux cellules est un **Septum**, perforé en son centre par un minuscule pore qui permet la circulation de substances d'une cellule à l'autre. Chez les champignons les plus évolués le thalle est un massif (hyphes accolées), à fructification à la face inférieure du chapeau; dit **Carpophores** ou **sporophores**.

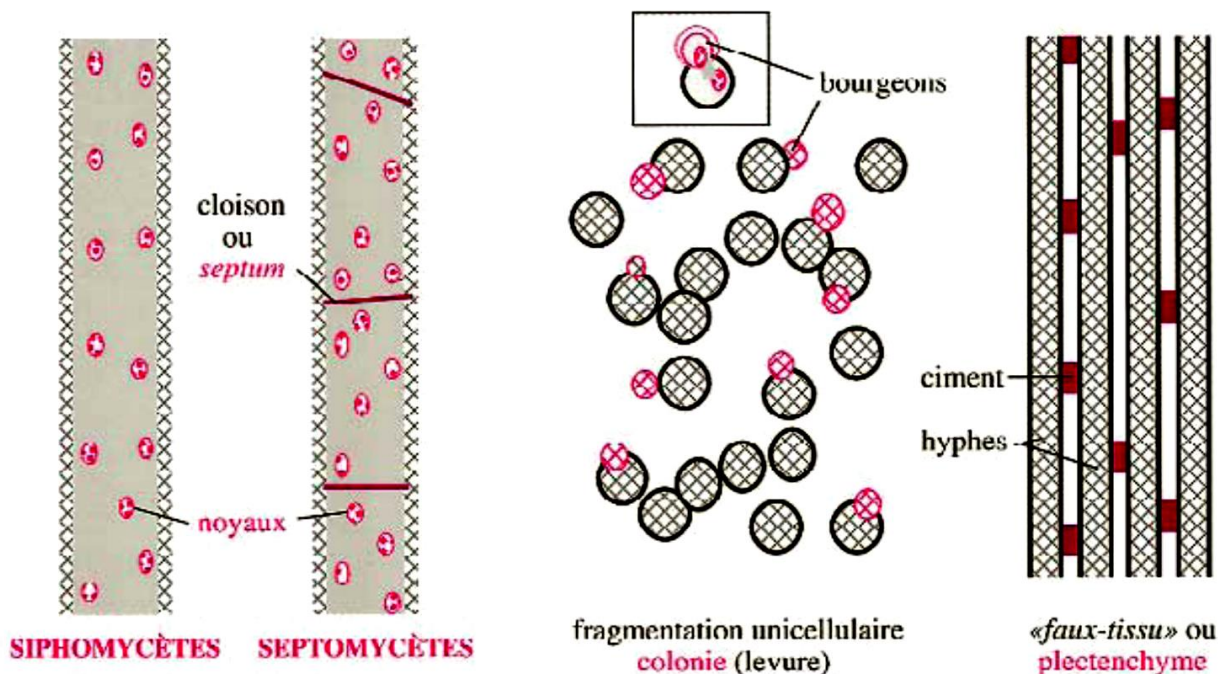


Fig. 40 : Types de mycéliums chez les champignons (Roland *et al.*, 2008).

### 3- Cytologie

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

**Le cytoplasme** contient des mitochondries, un réticulum avec des ribosomes, des vésicules protéiques, des microtubules, du glycogène et des granulations lipidiques.

**La vacuole** constitue un important stock enzymatique.

**La paroi** des cellules fongiques contient de la **chitine**

### 4- Reproduction des champignons

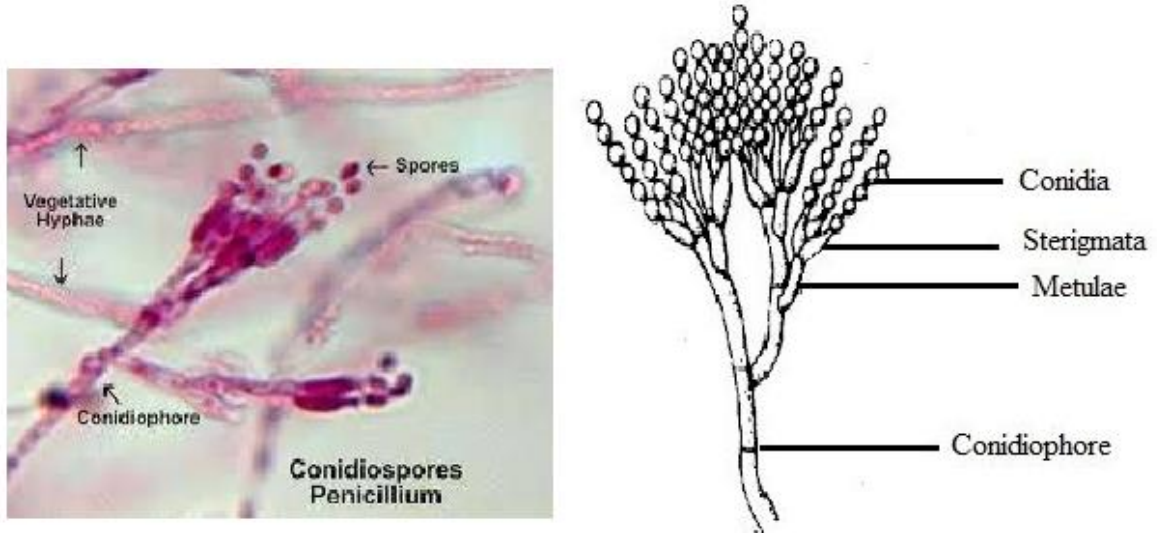
Elle se fait par les deux voies, **sexuée** et **asexuée**.

**La reproduction asexuée** se fait par : la **fragmentation du mycélium** ;

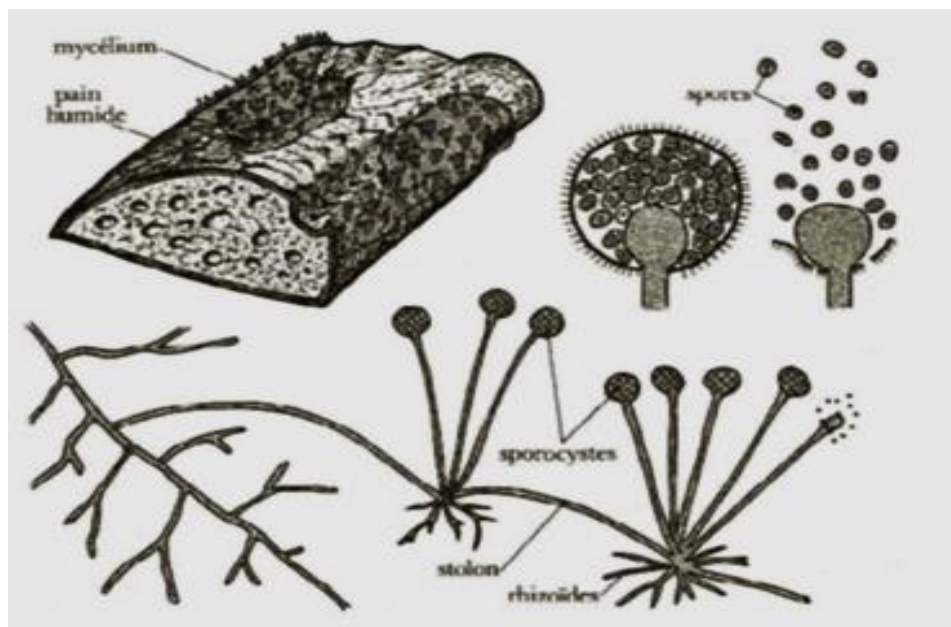
La production de **stolons** comme chez *Rhizopus nigricans* ;

La production des **spores**, dans ce cas, il existe deux types de spores : **spores directes** (mitotiques) et **spores méiotiques**. Les spores directes sont soit **exogènes (conidies)** générées en

continu par une cellule à l'extrémité du filament appelée **phialide** ou **conidiocyste** (ex. *Penicillium* **Fig. 41**), soit **endogènes** (endospores produites à l'intérieur d'un sporocyste, ex. *Rhizopus nigricans*, **Fig. 42**).



**Fig. 41:** Mycélium de *Penicillium* sp. Montrant des conidies et des phialides (sterigmata)



**Fig. 42:** Mycélium de *Rhizopus nigricans* montrant les stolons et les spores mitotiques (Roland *et al.*, 2008).

La reproduction sexuée se fait par production de gamètes typiques, qui se trouvent dans les **spermatocystes** (gamétocystes mâles) et **oogones** (gamétocystes femelles).

La **fécondation** des cellules sexuelles se fait le plus souvent en **deux phases**:

- + **Plasmogamie**: c'est uniquement le cytoplasme des deux cellules qui fusionne. Cet état binucléé peut être plus ou moins long jusqu'à aller à plusieurs années.
- + **Caryogamie**: c'est la fusion des deux noyaux. Le zygote diploïde qui en résulte va évoluer différemment selon le champignon:

a- Soit il subit une **méiose** assez rapidement .Il prend alors le nom de **spore de germination**. Le cycle de production est dit **haplobiontique**.

b- Soit il forme un **mycélium diploïde** (le sporophyte). Il prend alors le nom de **spore de passage**. Le cycle de production est dit **haplodiplobiontique**.

Les spores méiotiques mettent fin à la phase sporophytique (diploïde). Elles sont toujours haploïdes. Leur formation varie selon le groupe de champignons ; les **zygospores**, les **ascospores** et les **basidiospores** correspondant respectivement aux **zygomycètes**, aux **ascomycètes** et aux **basidiomycètes**.

La **fécondation** chez les Eumycètes peut être une **trichogamie** (chez les Ascomycètes), une **cystogamie** (Zygomycètes) ou **pérritogamie** (basidiomycètes). Il y a **homothallisme** lorsque les thalles mâles et femelles sont identiques et **hétérothallisme** lorsqu'ils sont différents (Thalle +, thalle -).

## 5- Classification des champignons

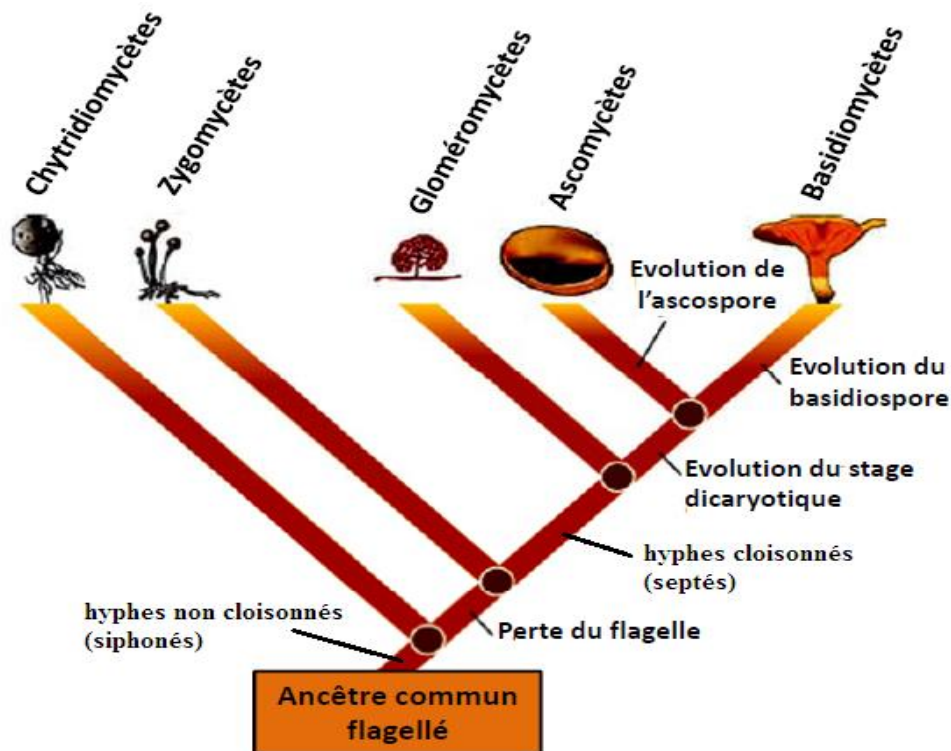
La classification des champignons est basée sur la **composition des parois**, sur la **structure des filaments** et des **organes reproducteurs**. Les groupes sont hétérogènes, les ancêtres sont différents mais ils ont le même mode de vie. Les champignons au sens large ont été divisés en trois règnes différents :

Les **oomycètes** qui ont été séparés des Eumycètes, et forme le règne des **Chromista** (division des **Mastigomycota**), à cause de leur paroi cellulosique et sa reproduction sexuée au cours de laquelle sont élaborées des **spores biflagellées**.

Les **Myxomycètes** (règne des **Mycetozoa**) sont beaucoup plus proches des protozoaires que des autres champignons. Leur mode de vie et leur organisation sont plus plutôt protozoaires et leurs modalités de reproduction sont proches de celles des autres champignons. Ce groupe de

champignons ont été exclus des eumycètes à cause de leur thalle qui est un plasmode (absence de la chitine) et les cellules reproductrices qui sont des **zoïdes biflagellés**.

En fin, le règne de vrai champignons ou **Eumycète** (ou encore **Fungi**), qui sont caractérisés par une paroi chitineuse et des spores immobiles à l'exception de la forme uni flagellée chez les chytridiomycètes. On distingue **5** divisions (ou embranchements) dont les relations phylogénétiques sont données dans la **figure 43** : les Chytridiomycètes, les Zygomycètes s.l., les Gloméromycètes, les Ascomycètes et les Basidiomycètes.



**Fig. 43** : Arbre phylogénétique des Eumycètes.

### 5-1- L'embranchement des chytridiomycètes ou Chytridiomycota

Les chytridiomycètes sont un groupe de champignons très mal connu. La classe des chytridiomycètes comporte plus de 750 espèces réparties sur 10 ordres. Ils correspondent à des espèces **aquatiques unicellulaire** ou avec un **mycélium coenocytique**, conservant éventuellement des cellules **flagellées (uni-flagelle)**. Ils peuvent produire soit un seul **zoosporange**, soit de **plusieurs zoosporanges** réunis sur un réseau de filaments.

Les chytridiomycètes sont des saprotrophes ou des parasites d'algues, de plantes, de champignons, et d'invertébrés. Ils sont considérés comme un taxon basal (plus ancien) des autres Eumycètes.

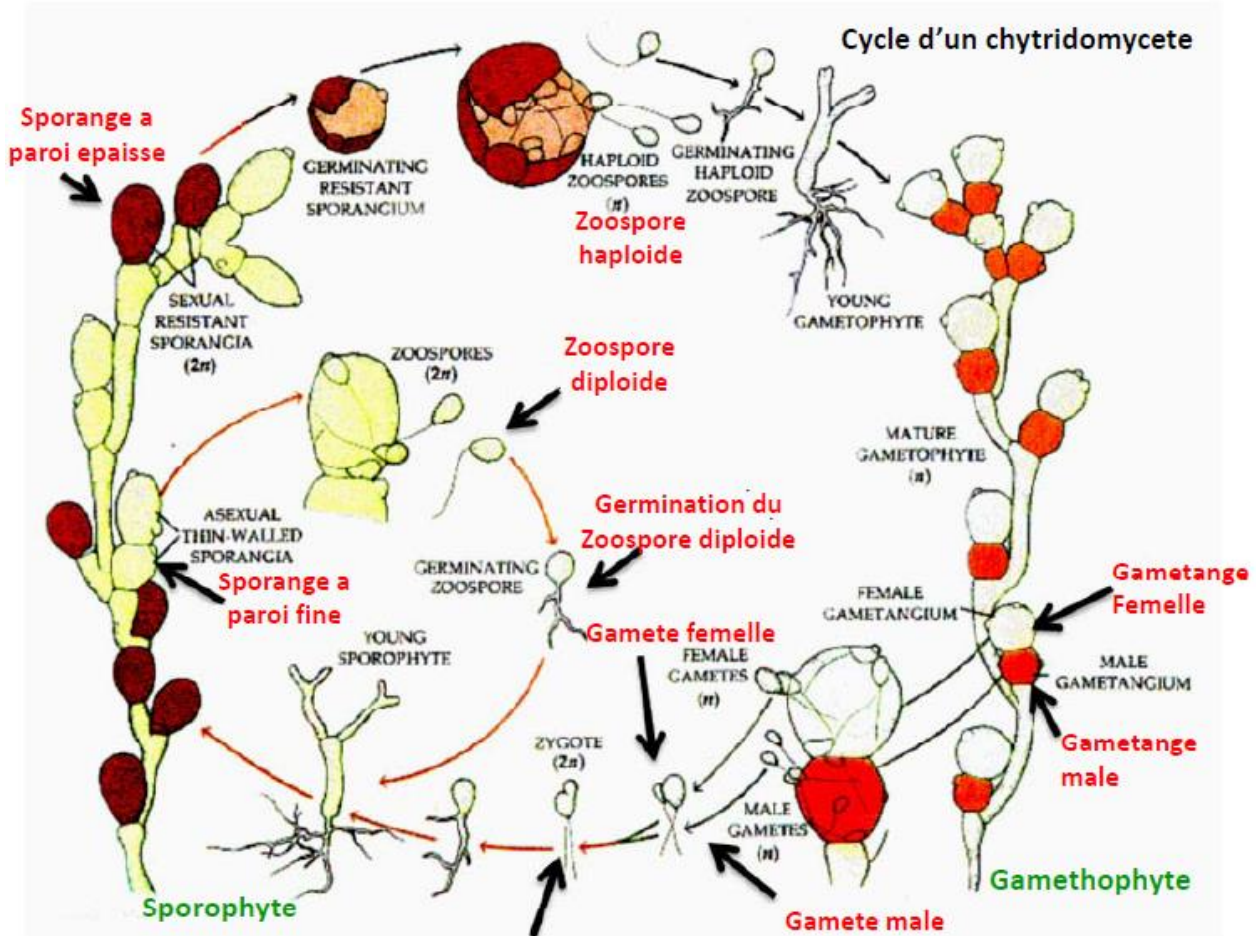


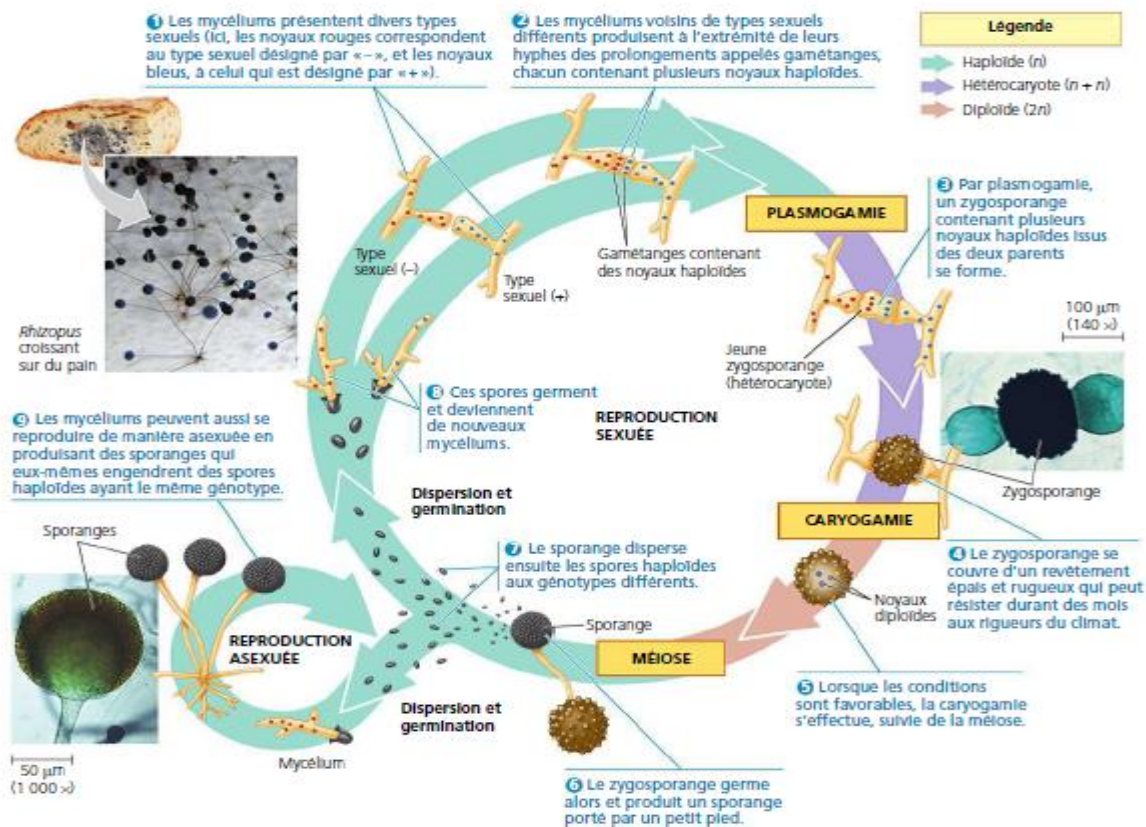
Fig. 44 : Cycle de vie d'un Chytridiomycète.

### 5-2- L'embranchement des Zygomycètes s.l.

L'embranchement des zygomycètes comporte environ 1000 espèces à **spores non flagellées** (spores inertes tuniquées), à **thalles siphonnés** et présentant une **zygospore** issue de l'enkystement d'un zygote subissant immédiatement la méiose (cycle entièrement haplophasique). Ce sont des champignons symbiotiques (endomycorhiziens), saprophytes (*Rhizopus nigricans*) ou parasites (mycoses). Chez les Zygomycètes s.l., on distingue deux classes: les **Zygomycètes s.s.** et les

**Trichomycètes.** Chez les **zygomycètes s.s.** la reproduction se fait par **mitospores** (asexuées), plusieurs ordres ont été distingués : Mucorales, Dimargaritales, Entomophtorales, Zoopagales, et Kickxellales. Chez les **Trichomycètes** la reproduction se fait par **Zygosporés** (sexuées), elle comporte : les Herpellales, les Amoebiales, les Aselariales, les Ecrinales.

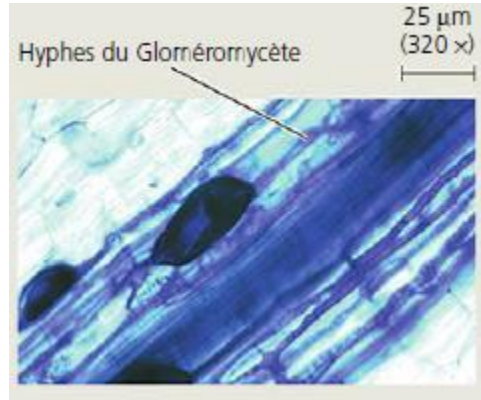
**Cycle de reproduction des Zygomycètes :** La reproduction **sexuée** se fait par **cystogamie** ou **conjugaison** des gamétocystes. Il y a formation d'un zygote qui s'enkyste après avoir subi une méiose (zygosporé). Le cycle est **monogénétique haplophasique** (Fig. 45).



**Fig. 45:** Le cycle de développement du Zygomycète, *Rhizopus stolonifer* (Reece et al., 2012).

### 5-3- L'embranchement des Gloméromycètes

C'est un taxon qui n'a été séparé des **Zygomycètes** que récemment (en 2001). Ce sont des espèces (environ 160 espèces) **microscopiques, mycorhiziennes obligatoires**, qui jouent un rôle capital dans les groupements végétaux. On ne leur connaît pas de **reproduction sexuée**, ils se reproduisent par voie asexuée au moyen de grosses **spores enkystées**.



**Fig. 46** : un cliché montre les hyphes d'un Glomérormycète (en bleu foncé) à l'intérieur de la racine d'une plante (Reece et al., 2012).

## 5-4- L'embranchement des Ascomycètes

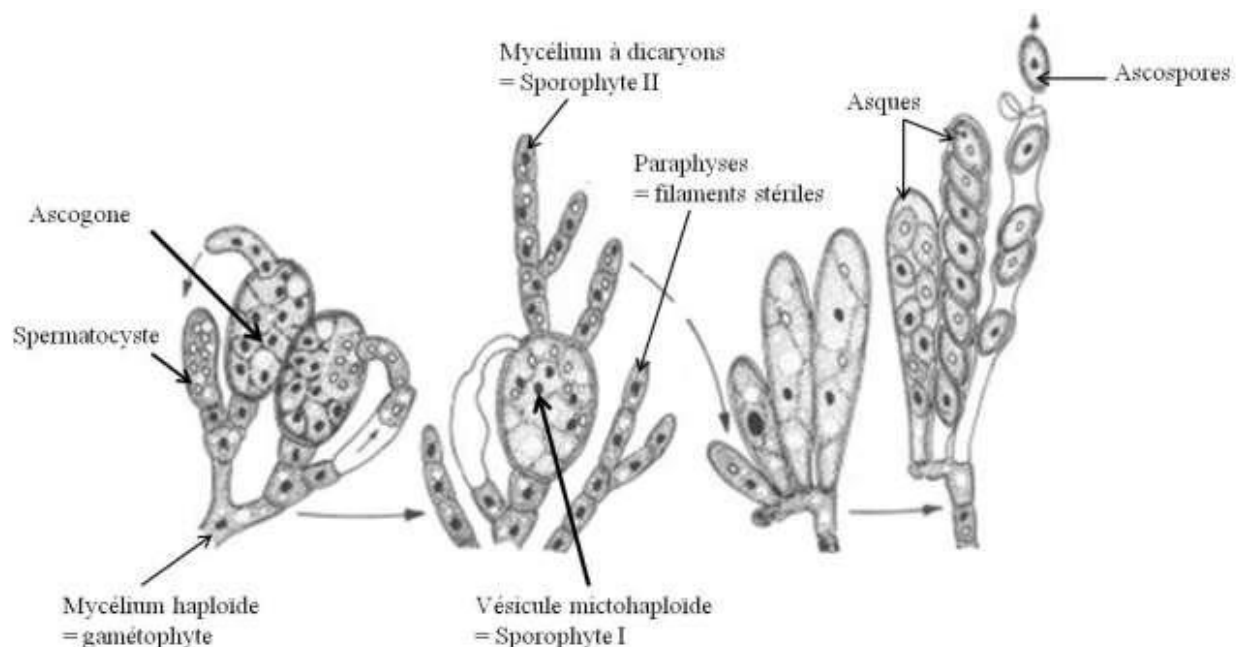
### 5-4-1- Caractères généraux des ascomycètes

Les mycologues ont décrit 65 000 espèces d'Ascomycètes, qui vivent dans l'eau de mer, l'eau douce et les milieux terrestres. Les Ascomycètes se caractérisent par la production de spores dans **des asques**, structures en forme de sac, durant la reproduction sexuée. À la différence des Zygomycètes, la plupart des Ascomycètes effectuent leur stade sexué dans des appareils sporifères microscopiques ou macroscopiques, appelés **ascocarpes**, qui contiennent les asques.

Le thalle des ascomycètes est **cloisonné filamenteux, cladomien** ou **levuriforme**. La paroi est **chitineuse** ou **chitino-callosique** sans cellulose. Ils sont caractérisés par l'absence de **zoïde**. La reproduction peut se faire soit par voie **asexuée** par production de **conidies** soit par voie **sexuée** par **trichogamie** (entre le gamétocyste femelle ou **ascogone**, surmonté d'un **trichogyne** et un gamétocyste mâle ou **anthéridie**, contenant des gamètes mâles immobiles ou **spermaties**).

### 5-4-2- Cycle de reproduction chez ascomycètes

La fécondation chez les Ascomycètes donne naissance à la formation d'abord d'un **sporophyte I** microhaploïde (vésicule avec de nombreux noyaux mâles et femelles non fusionnés) puis d'un sporophyte II dicaryotique (après cloisonnement) qui se développe en un appareil sporifère appelé ascocarpe ou ascome. Le sporophyte II donne des sporocystes appelés asques contenant un nombre limité de spores méiotiques endogènes ou ascospores. Le cycle de développement est trigénétique (**Fig. 47**).



**Fig. 47 :** Le cycle de développement de l'Ascomycète, cycle **trigénétique**.

### 5-4-3- Classification des ascomycètes

Les Ascomycètes se subdivisent en trois sous embranchements : Taphrinomycotina, Saccharomycotina et Pezizomycotina.

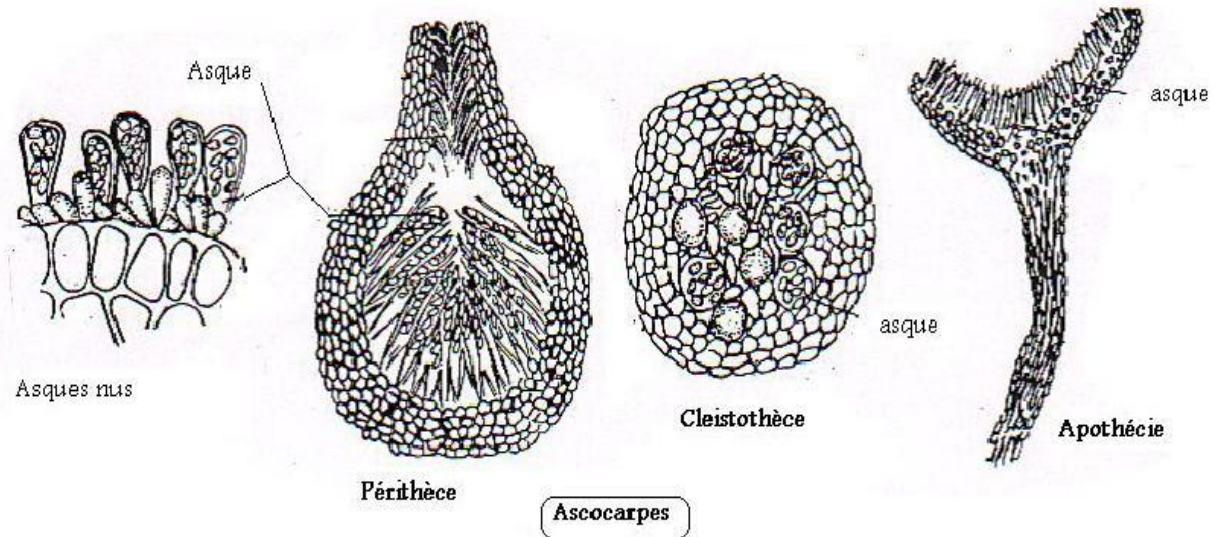
Les **Taphrinomycotina** appelés aussi **Archiascomycètes** sont sans ascocarpe, asques nus disposés sans ordre précis (**Fig. 48**). Ce groupe constitué de quatre classes :

- ✚ Les **Schizosaccharomycètes** sont des levures qui se reproduisent **par fission**.
- ✚ Les **Pneumocystidomycètes** sont des parasites de mammifères dont on ne connaît qu'un seul genre : *Pneumocystis*.
- ✚ Les **Neoelectomycetes** sont les seuls à former des structures **reproductrices pluricellulaires**. La classe ne comprend qu'un seul genre : *Neoelecta*.
- ✚ Les **Taphrinomycetes** sont des parasites de plantes dimorphiques, ils présentent un stade levure non parasite et un stade filamenteux (hyphal) dans les plantes infectées.
- ✚ Les **Archaeorhizomycetes** vivent dans le sol à proximité des racines mais ne forment pas de mycorhizes.

La sous-division des **Saccharomycotina** ou Hémiascomycètes sont sans ascocarpe et les asques donc nus, se reproduisent par bourgeonnement.

En fin, les **Pezizomycotina** ou **Euascomycètes** forment des asques dans des **ascocarpes** (Ce groupe comporte environ 90 % des ascomycètes connus).

Les **ascocarpes** sont des structures mycéliennes donnant des asques. Les ascocarpes largement ouverts sont des **apothécies** et les ascocarpes **fermés** sont des **cleistothèces** ou ouverts par un petit ostiole sont des **périthèces** (**Fig. 48**).



**Fig. 48** : Variabilité morphologique des ascocarpes.

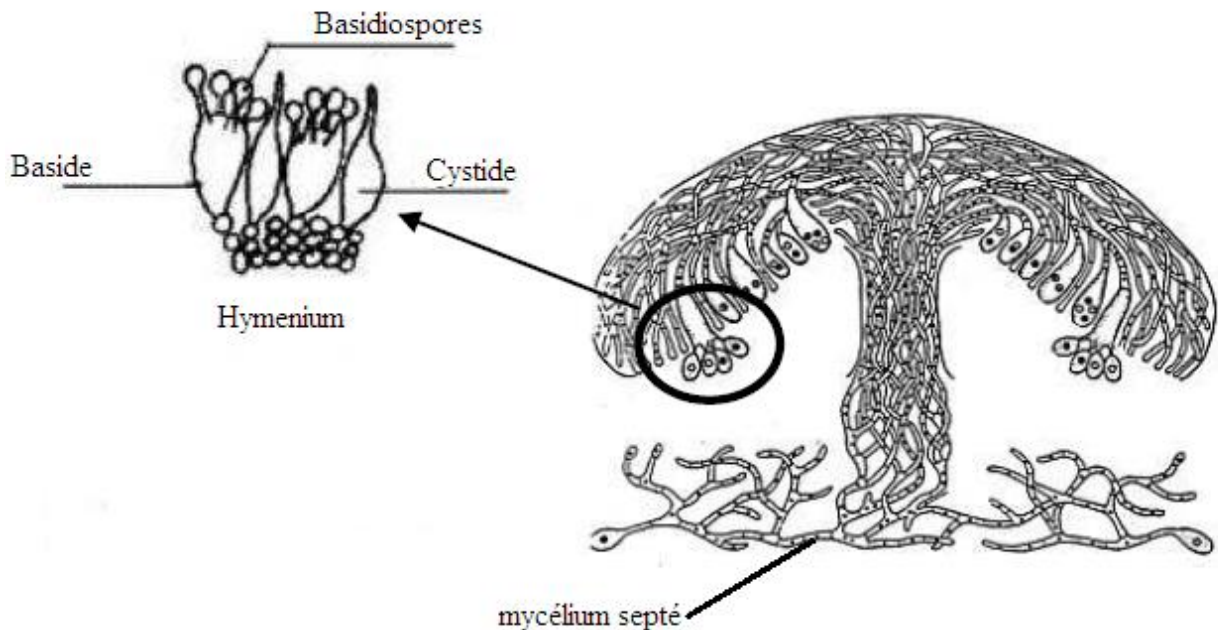
## 5-5- L'embranchement des Basidiomycètes

### 5-5-1- Morphologie des Basidiomycètes

L'embranchement des **Basidiomycètes** comprend environ 30 000 espèces, dont les polypores, et les champignons à **carpophore** volumineux, qu'on appelle couramment champignons à chapeau. Cet embranchement comprend aussi des moisissures, des mutualistes formant des mycorhizes ainsi que deux groupes de parasites destructeurs pour les végétaux, soit les rouilles (7 000 espèces) et les charbons (1 000 espèces).

Le thalle des Basidiomycètes est un hyphe cloisonné, comme chez les Ascomycètes avec qui ils forment deux groupes frères. Mais, il existe également des Basidiomycètes microscopiques, moins connus qui peuvent être phytopathogènes (rouilles, charbons) ou agent d'altération d'aliments.

L'hyménium d'un basidiomycète est formé de plusieurs basides terminées par des basidiospores et entre ces basides, sont disposées des cystides stériles.



**Fig. 49:** Thalle des Basidiomycètes.

### 5-5-2- Reproduction des Basidiomycètes

#### a- Reproduction asexuée

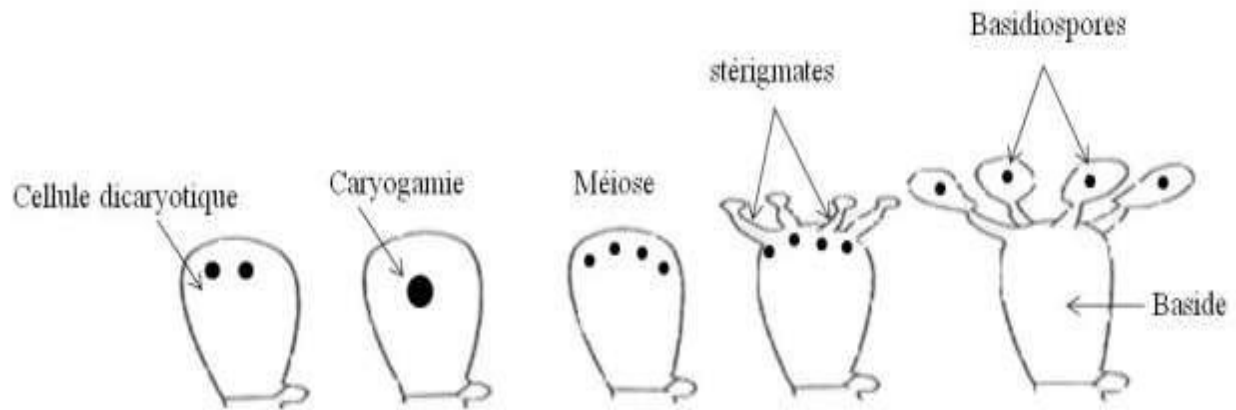
La reproduction asexuée se fait par la production des spores asexuées (conidiospores), se forment à partir des filaments mycéliens par simple multiplication cellulaire.

### b- Reproduction sexuée

La reproduction sexuée se fait par plasomgamie entre deux cellules morphologiquement indifférenciées appartenant à deux filaments voisins. La gamie est une **périttogamie** ou **somatogamie**, qui aboutit à la formation d'un mycélium **secondaire dicaryotique**.

La caryogamie se fait dans les basides aboutissant à la formation de noyaux diploïdes ( $2n$ ) qui subissent ensuite le processus de méiose permettant le passage à l'état haploïde ( $n$ ). Ces noyaux haploïdes migrent ensuite dans les basidiospores à l'extrémité des basides (**Fig. 50**). Les basides sont disposées dans une couche fertile appelée hyménium.

Le cycle chez quelques Basidiomycètes est trigénétiq (phase haploïde, phase sporophytique microhaploïde et phase sporophytique dicaryotique chez les Pucciniomycotina par ex.). Chez les autres, le cycle est réduit à deux générations.



**Fig. 50:** Formation de basidiospores.

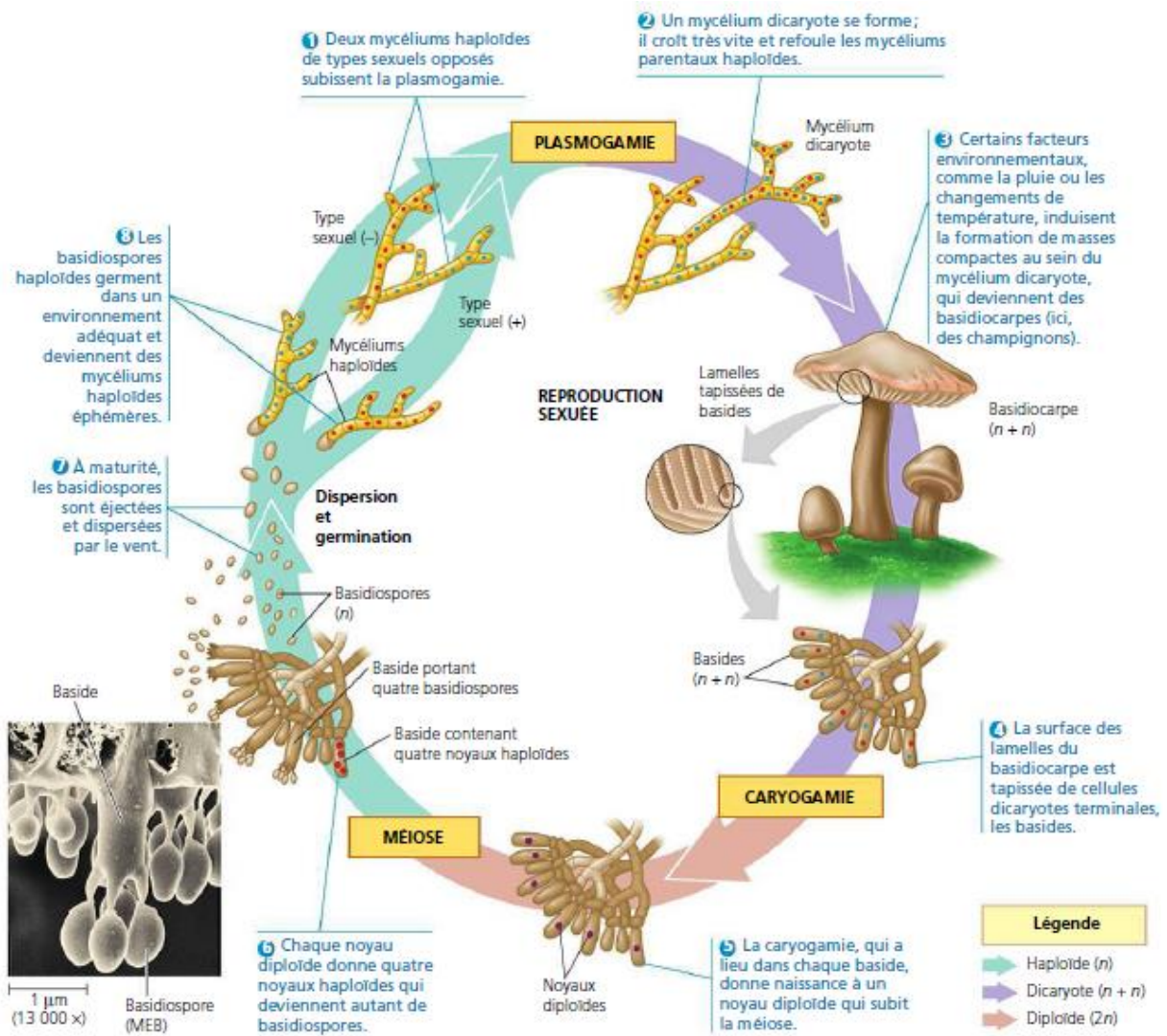


Fig. 51: Le cycle de développement des Basidiomycètes formant des champignons.

### 5-5-3- Classification des Basidiomycètes

Les basidiomycètes regroupent 3 clades: Les Pucciniomycotina, les Ustilagomycotina et les Agaricomycotina.

## 6- Les lichens

Les lichens sont issus d'une **symbiose** entre un **champignon** appelé mycobionte ou mycosymbiote, en majorité un **Ascomycète**, ou plus rarement un Basidiomycète, et une **algue** appelée photobionte ou photosymbiote. Dans 90 % des cas, le photobionte est une algue verte (chlorolichens), alors qu'il s'agit d'une cyanobactérie (cyanolichens) dans les 10 % restants. L'algue synthétise la matière organique à partir du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de l'air et du rayonnement solaire (photosynthèse). Tandis que, le champignon prélève dans le milieu l'eau et les sels minéraux indispensables à la symbiose lichénique. il est également responsable de l'ancrage de la structure et protège l'association lichénique.

### 6-1- Morphologie des lichens

L'appareil végétatif d'un lichen est un **thalle (Fig. 52)**. Deux principaux types de lichens se distinguent selon l'aspect du thalle: **les thalles gélatineux** et **les thalles secs**. Dans les thalles gélatineux, les filaments du champignon se ramifient dans la masse gélatineuse des Cyanobactéries (Nostoc, par exemple) sans en altérer beaucoup la forme de la **gonidie**. A l'état sec, ils sont noirs, coriaces et friables. En présence d'eau, ils gonflent pour donner une masse gélatineuse.

**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. On distingue :

- **Les thalles encroûtant** ou crustacés qui peuvent s'étaler en croûte peu épaisse adhérant fortement au substrat (ex. *Lecanora*).

- **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 (ex. *Parmelia*, *Xanthoria*).

- **Les lichens fruticuleux** ont un thalle en forme arborescente plus ou moins ramifiée et à section ronde ou aplatie (ex. *Usnea*, *Ramalina*). Ils sont fixés à un support en un seul endroit par une base étroite.

- **Les lichens squamuleux** sont composés d'écailles ou de lobes plus ou moins adhérents au substrat, mais pouvant facilement s'en détacher.

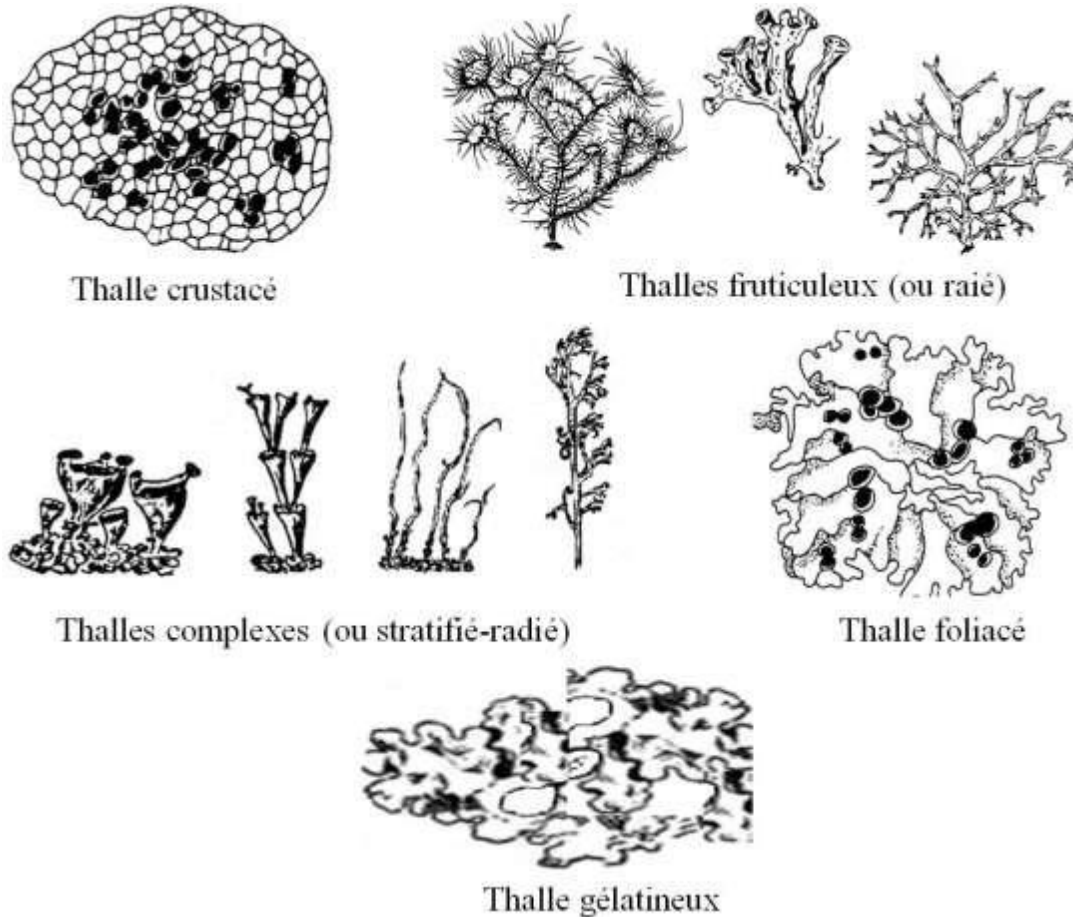


Fig. 52 : Aspects morphologiques des lichens.

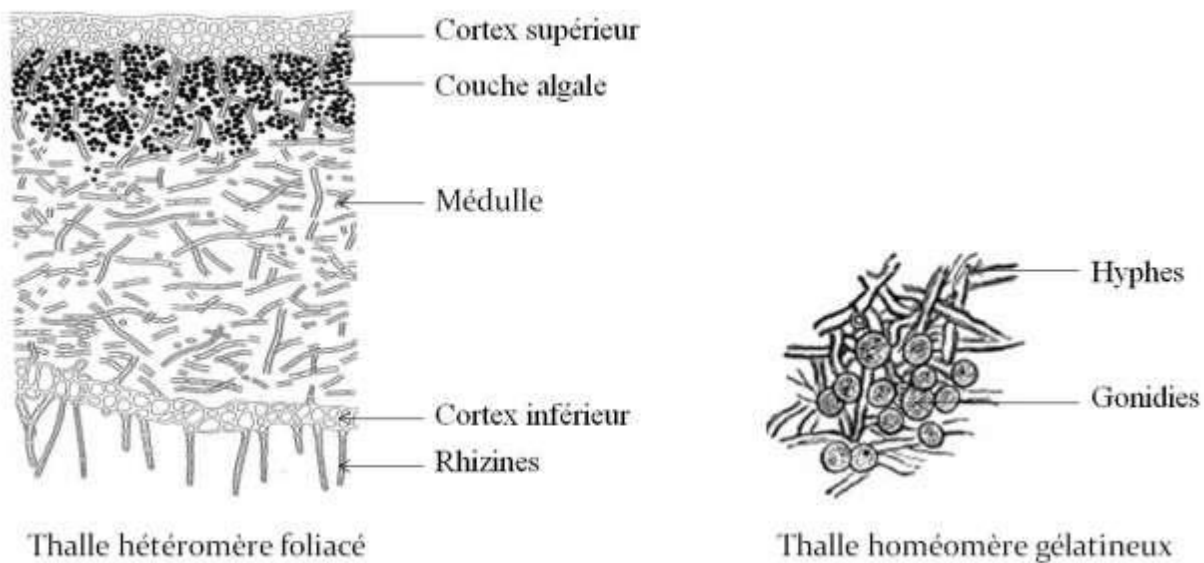
- **Thalles composites ou complexes** : ils présentent un thalle primaire foliacésquamuleux, plus ou moins adhérent au substrat, et un thalle secondaire dressé, plus ou moins ramifié, développé dans un second temps sur le thalle primaire (Ex : *Cladonia*).

### 6-2- Anatomie des lichens

Le thalle du lichen est formé par un réseau d'hyphes (ou mycélium du champignon). C'est au milieu d'un enchevêtrement de ces filaments que se trouvent les gonidies. Selon la répartition des gonidies, on distingue deux types de thalles :

- **Le lichen homéomère** présente un thalle homogène. Les hyphes et les gonidies sont mélangés dans les mêmes proportions dans toute l'épaisseur du thalle (**Fig.53**). Dans le genre *Collema*, la gonidie est une Cyanobactérie (*Nostoc*). On peut observer dans ce thalle une limite corticale supérieure et une limite inférieure.

- Le **thalle hétéromère** présente sur sa section transversale plusieurs couches. Les cellules de l'algue sont localisées en une couche dite verte ou couche algale. Une coupe transversale d'un lichen hétéromère foliacé (**Fig.53**), montre un cortex supérieur où les hyphes du champignon forment un réseau dense de filaments entrelacés constituant une couche protectrice. Sous cette zone, se trouve une couche algale où des hyphes entourent les cellules de l'algue. Sous cette couche se trouve la zone médullaire ou médulle formée exclusivement d'hyphes. En dessous de la médulle se retrouve une deuxième zone corticale appelée cortex inférieur qui peut présenter des filaments destinés à la fixation appelés rhizoïdes ou rhizines. Dans les thalles foliacés, la couche verte n'existe que vers la face supérieure du thalle. Chez les lichens fruticuleux, elle existe tout autour de la médulle.



**Fig. 53** : Structure anatomique des lichens.

### 6-3- Reproduction des lichens

Les lichens montrent une reproduction **sexuée** et une reproduction **asexuée**.

La reproduction sexuée, assurée par le mycobionte, forme deux types de structures spécialisés les ascocarpes ouverts ou apothécies (forme de cupules à la surface du cortex) et les ascocarpes fermés ou périthèces (forme d'outre ouverte par un petit ostiole, enfoncée superficiellement dans le thalle) productrices de spores méiotiques (ou ascospores).

La reproduction asexuée est réalisée par l'algue et le champignon en produisant des propagules par simple fragmentation du thalle (bouturage) ou à l'aide de structures spécialisées telles que:

- **Les isidies** sont des protubérances de formes variées (cylindriques, écailleuses ou spatuliformes) sur le cortex supérieur, contenant les deux symbiotes et se détachant du thalle ;
- **Les soralies** sont des masses farineuses ou granuleuses produisant des sorédies.

Elles sont constituées de cellules algales entourées d'hyphes bien individualisées se détachant également.

Certains lichens du genre *Cladonia*, se brisent à l'état sec sous l'effet du piétinement formant des boutures naturelles.

La reproduction asexuée, réalisée par le mycobionte seul, se fait au moyen de conidies à l'extrémité des hyphes toujours enfoncés dans le thalle. Ces spores mitotiques sont disséminées en attendant la rencontre de l'algue compatible.

#### 6-4- Systématique

Les lichens ne constituent plus une unité systématique. Cependant, dans les classifications anciennes, ils sont entièrement intégrés aux champignons. Le nom attribué au lichen est celui du mycobionte. Ainsi, la classification de Zahlbruckner (1907, 1929) sépare deux sous classes :

- **Les Ascolichens** (le mycobionte est un Ascomycète), très fréquents, comprennent environ une cinquantaine de familles
- **Les Basidiolichens** (le mycobionte est un Basidiomycète) beaucoup moins fréquents, avec seulement 3 genres et moins de 20 espèces essentiellement tropicales

*Deuxième Partie*  
*Les Cormophytes*

# **Embryophytes ou les plantes terrestres**

**(Cormophytes = Archégonates)**

## **Caractères généraux des Embryophytes**

Les **Embryophytes** sont typiquement des **Plantes terrestres**. Ce qui est traduit d'un côté au niveau de l'appareil végétatif par des rameaux dressés (Cormus), et par l'apparition de nouvelles molécules protectrices, cutines, sporopollénines, anthocyanes; et d'autre côté au niveau de l'appareil reproducteur et du cycle de développement, par des organes nouveaux, anthéridie, archégone, et embryon.

### **Au niveau de l'appareil végétatif**

#### **✚ Le Cormus (Axes aériens dressés)**

Le premier groupe qui colonise le milieu terrestre est celui des **Bryophytes**, où à côté de formes rampantes du type thalle, se rencontrent des formes dressées ayant l'aspect d'une petite plante avec « tiges » et « feuilles », qui favorisent la captation de la lumière et les échanges gazeux.

De véritables tiges, de véritables feuilles et des racines n'apparaîtront cependant que chez les **Trachéophytes** avec l'**acquisition d'un appareil vasculaire** assurant la circulation des liquides entre le sommet de la plante et sa base, fixée dans le sol par les racines « chez les plantes aquatiques primitives, baignant dans l'eau, un tel appareil conducteur n'était pas nécessaire quelle que soit l'importance acquise par la plante ».

#### **✚ Les molécules protectrices**

Les épidermes, pour éviter une rapide dessiccation, se recouvrent d'une cuticule, couche vernissée hydrophobe riche en **cutines**, pour éviter l'action nocive des rayons ultraviolets synthétisent des molécules-écran, **les anthocyanes**. De même, le cytoplasme particulièrement fragile des méiospores mâles est protégé par de nouvelles molécules très résistantes imprégnant la paroi, **les sporopollénines**.

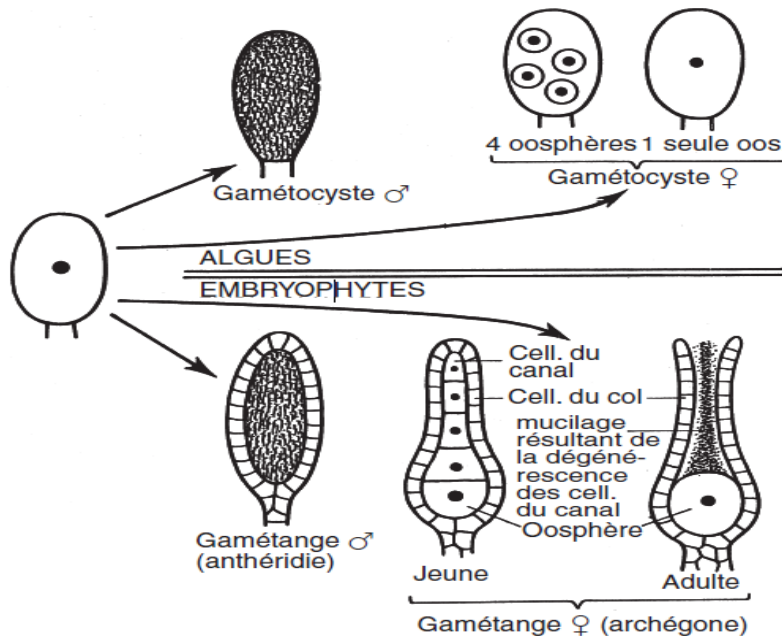
## Au niveau de l'appareil reproducteur

### ✚ Anthéridies, archégones

Les gamètes et les méiospores, au lieu d'être formés dans des cellules, directement au contact de l'eau (gamétocystes et sporocystes des algues), le sont désormais dans des organes formés d'une enveloppe de cellules protectrices. Ces structures sont appelées **gamétanges** et **sporanges**.

Par exemple, dans un gamétange, la cellule à l'origine des gamètes donne d'abord naissance à un certain nombre de cellules d'enveloppe lesquelles protègent les gamètes du milieu extérieur, puis la ou les cellules-mères centrales engendrent les gamètes proprement dits (**fig. 54**). La différenciation des sporanges, producteurs des méiospores se fait selon des modalités voisines.

Le gamétange mâle est appelé **anthéridie** : le gamétange femelle **archégone**, d'où le nom de Plantes à **archégonies** également donné aux **Embryophytes**.



**Fig. 54** : Formation comparée des gamétocystes et des gamétanges.

## ✚ Cycle de reproduction

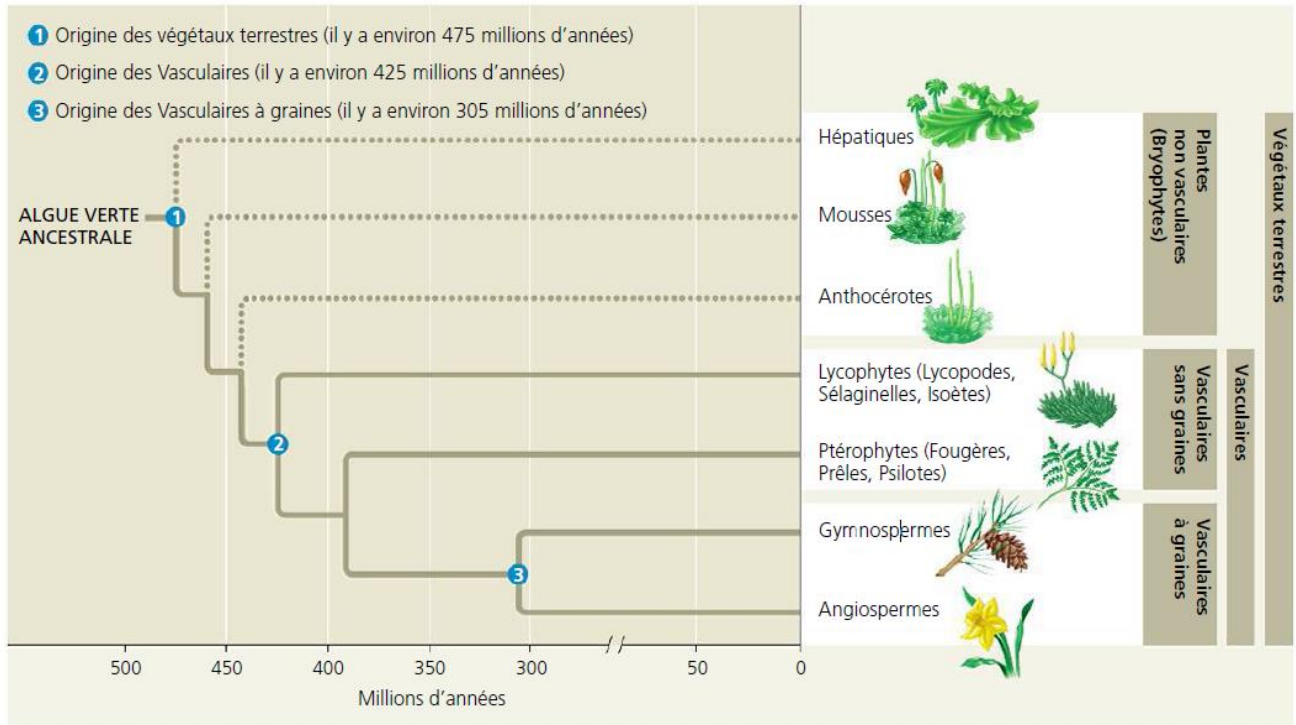
Chez les Embryophytes, le zygote à  $2n$  chromosomes, au lieu de donner immédiatement naissance à quatre méiospores chacune à l'origine d'une nouvelle plante haploïde à  $n$  chromosomes, comme chez de nombreuses algues vertes, ne le fait qu'après un certain temps : la méiose est retardée. Ce retard permet au zygote de se développer en un ensemble tissulaire diploïde à  $2n$  chromosomes ou **embryon** (du grec embruon, foetus) d'où le nom du taxon. Au cours de l'évolution des **Embryophytes**, ce retard va devenir de plus en plus grand.

De plus, le jeune embryon se développe en parasite sur le gamétophyte. C'est là une nouvelle conséquence de l'habitat terrestre : un milieu aquatique pouvait permettre le développement autonome d'une jeune structure, pas le milieu terrestre beaucoup plus hostile (dessiccation, rayonnement ultra-violet...).

## Classification des Embryophytes

Les Embryophytes (**Fig. 55**) regroupent :

- Les **bryophytes sensu lato** avec 25000 espèces ; regroupe les cormophytes non vasculaires (les Hépatiques, les Mousses, les Anthocérotes)
- Les **ptéridophytes sensu lato** avec 11000 espèces ; regroupe les plantes terrestres vasculaires, mais sans graines (les Lycophytes et les ptérophytes)
- Les **Spermatophytes** ou plantes à ovules avec 270000 espèces : regroupe les végétaux terrestres vasculaires à graines.



**Fig. 55:** Schéma de la classification des Embryophytes. Les bryophytes et les ptéridophytes sont paraphylétiques; les Gymnospermes et les Angiospermes sont monophylétiques (Reece et al., 2012).

*Chapitre 3*  
*Bryophytes*

## Chapitre 3: Les Bryophytes

### 1- Caractères généraux des bryophytes

Les **bryophytes** au sens large représentent un groupe **paraphylétique** qui englobe trois groupes monophylétiques : les **Marchantiophytes**, les **Anthocérophytes** et les **Bryophytes *sensu stricto*** (ou Mousses ou Muscinées). Ces trois clades partagent les caractères suivants:

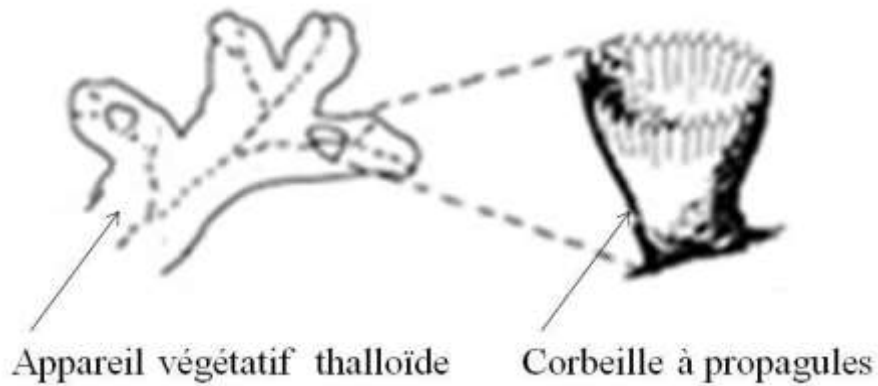
Un cycle digénétique haplodiplophasique à dominance du gamétophyte haploïde et un sporophyte parasite du gamétophyte femelle ;

- ✚ Présence de **spores haploïdes** résistantes à la **dessiccation** ;
- ✚ Présence d'une **cuticule** ;
- ✚ Présence d'un **embryon** ;
- ✚ Cellules reproductrices plus protégées dans des **gamétanges** ou dans des **sporangies**
- ✚ Présence de **rhizoïdes**.

### 2- Reproduction des Bryophytes

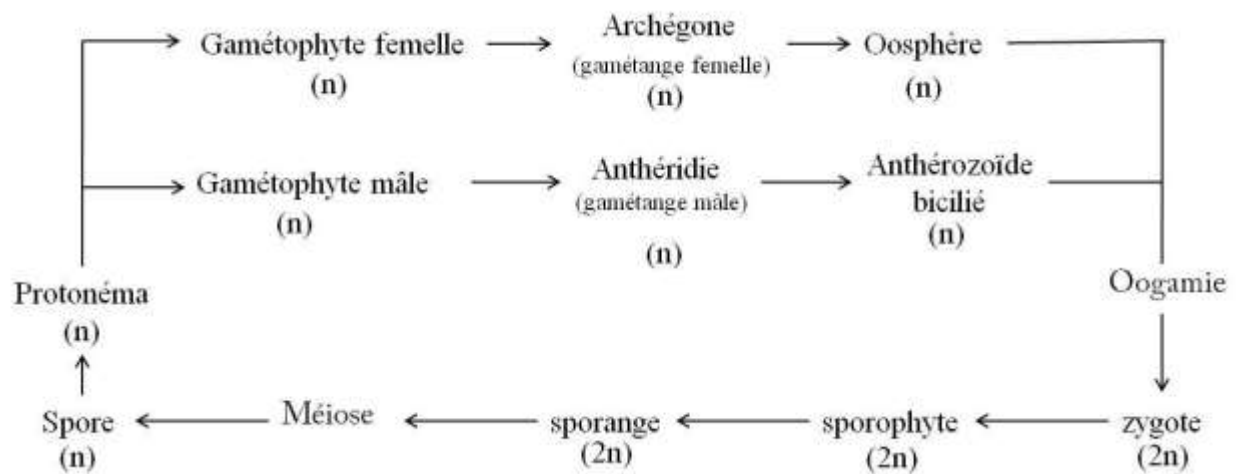
Deux voies de reproduction **sexuée** et **végétative** se rencontrent chez les bryophytes.

La multiplication végétative est un mode de reproduction qui favorise une occupation rapide des sols nus, livrés à la colonisation (propriété importante pour les bryophytes). Elle est assurée soit par la **fragmentation du protonéma** (chaîne de cellules chlorophylliennes qui constitue le début de la phase haploïde du cycle de vie d'une bryophyte) **soit par des propagules** (excroissance pluricellulaire, **Fig.56**) ou par des **tubercules formés par les rhizoïdes**.



**Fig. 56 :** Appareil végétatif et corbeille à propagules chez les Hépatiques (bryophytes *s.l.*).

Le cycle de développement sexué des bryophytes *s.l.* (**Fig. 57**) est un cycle digénétique haplodiplophasique hétéromophe à dominance du gamétophyte haploïde avec un sporophyte parasite du gamétophyte femelle.



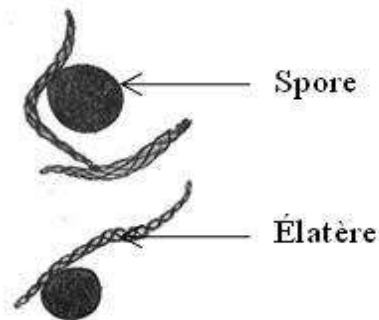
**Fig. 57:** Cycle digénétique diplohaplophasique à dominance du gamétophyte chez les bryophytes.

### 3- Systématique des Bryophytes

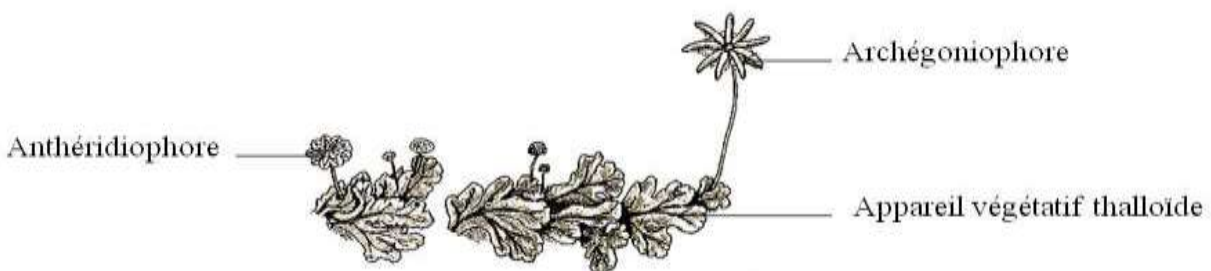
#### 3-1- Les Marchantiophytes

Les marchantiophytes ou hépatiques se présentent sous forme d'un thalle plus ou moins différencié ou d'une tige feuillée. Les hépatiques expriment de nombreux caractères originaux, certains étant des synapomorphies du groupe:

- Rhizoïdes généralement unicellulaires ;
- Gamétophyte mature à symétrie dorsi-ventrale ;
- Synthèse d'acide lunularique ;
- Cellules contenant des oléocorps (corps lipidiques) ;
- Capsule simple sans opercule ni péristome ni columelle avec 4 valves (fentes de déhiscence verticales) ;
- Présence d'élatères (**Fig. 58**): cellules très allongées dont la paroi squelettique présente des épaisissements en spirale.
- Protoména faiblement développé parfois inexistant ;
- Présence de gamétangiophores (anthéridiophores, archégoniophores) (**Fig.59**).



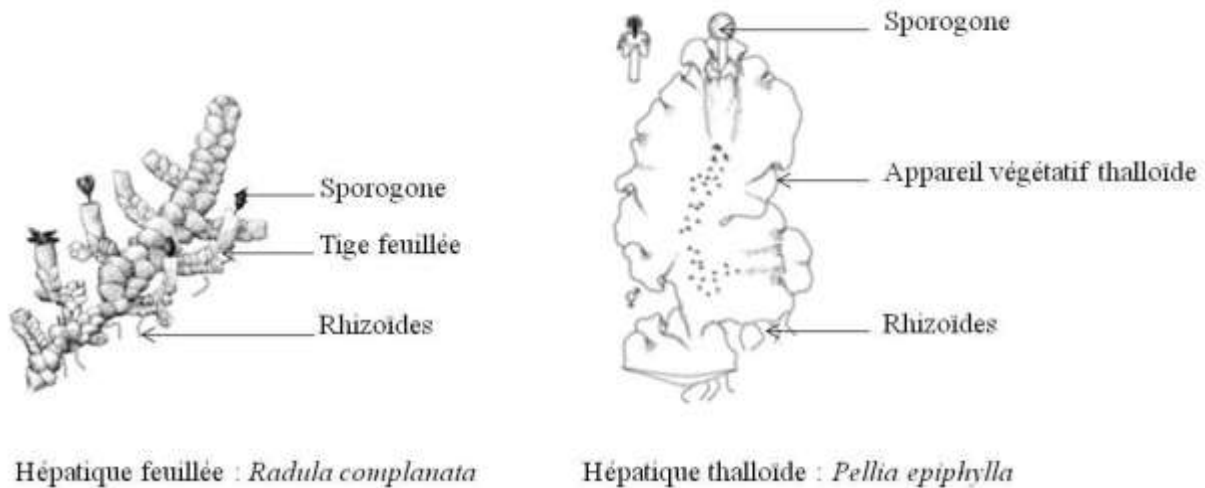
**Fig. 58** : Morphologie des spores et élatères chez les Marchantiales.



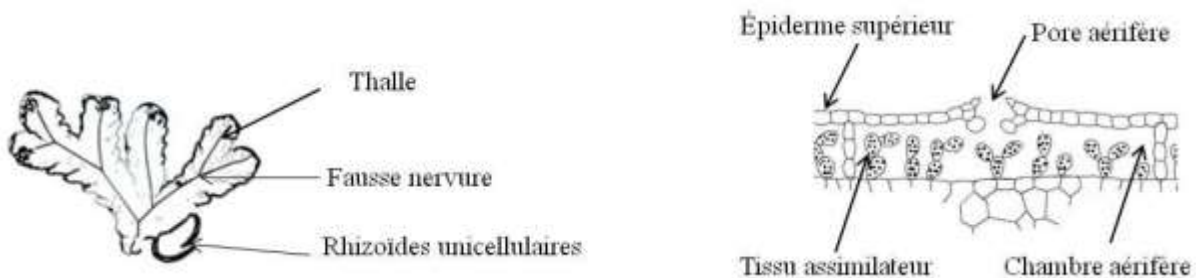
**Fig. 59** : Morphologie de *Marchantia polymorpha* montrant les anthéridiophores et les archégoniophores

### Morphologie des Marchantiophytes

L'appareil végétatif des Marchantiophytes (**Fig. 60**) est soit une tige feuillée, soit un thalle. La face inférieure du thalle est en contact du substrat et possède des structures unicellulaires, les rhizoïdes. La croissance des axes est dichotomique grâce à des cellules apicales (absence de méristème). Elles ne possèdent pas de stomates mais des pores aérifères ouverts en permanence. Ces pores débouchent dans une chambre aérifère permettant, ainsi, la respiration et la photosynthèse (**Fig. 61**). Il n'y a pas non plus de tissus conducteurs différenciés. La conduction se fait de cellule à cellule.



**Fig. 60** : Appareil végétatif des Marchantiales (ou Hépatiques).



**Fig. 61** : Morphologie et coupe transversale du thalle de *Marchantia polymorpha*.

## Reproduction

Les thalles en croissance produisent des rameaux spécialisés ou gamétangiophores (anthéridiophores, archégoniophores). Sur les anthéridiophores se différencient des anthéridies (gamétanges mâles) enfoncées dans des cavités à la face supérieure. L'éclatement des anthéridies libère les anthérozoïdes. Sur les archégoniophores, se développent des archégonies (gamétanges femelles) enfoncés dans des cavités situées sur la face inférieure. Les archégonies et les anthéridies proviennent de la différenciation de cellules épidermiques (**Fig. 62**).



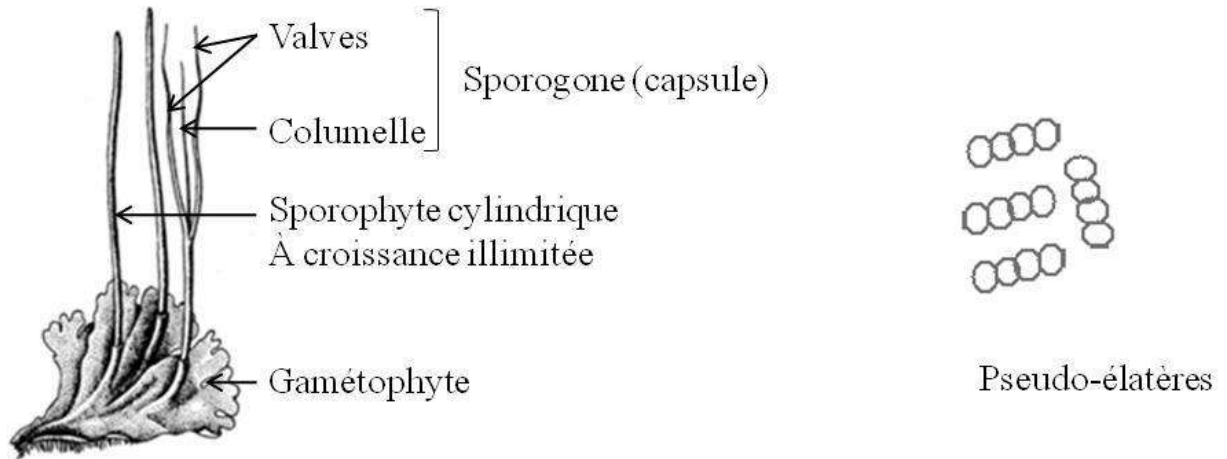
**Fig. 62** : Structure des gamétangiophores chez les Marchantiophytes.

L'œuf fécondé (zygote) issu d'une oogamie se développe à l'intérieur de l'archégonie donnant un sporophyte parasite du gamétophyte femelle.

### 3-2- Les Antocerotés

Ce sont des organismes thalloïdes (**Fig. 63**). Leur monophylie est confirmée par des caractères cellulaires et des caractères propres à leurs gamétophytes. Ce groupe est caractérisé par :

- ✚ Cloisonnement vertical du zygote ;
- ✚ Croissance continue du sporophyte (présence de méristème) ;
- ✚ Sporophyte cylindrique ;
- ✚ Présence de columelle ;
- ✚ Présence de stomates au niveau de la capsule ;
- ✚ Ouverture de la capsule par deux valves ;
- ✚ Un plaste unique par cellule et présentant un pyrénéoïde ;
- ✚ Présence de pseudo-élatères formés de 4 cellules ;
- ✚ Différenciation des anthéridies à partir de cellules sous épidermiques ;
- ✚ Protonéma filamenteux puis thalloïde.



**Fig. 63 :** Morphologie et pseudo-élatères de *Anthoceros laevis* (Anthocérotes).

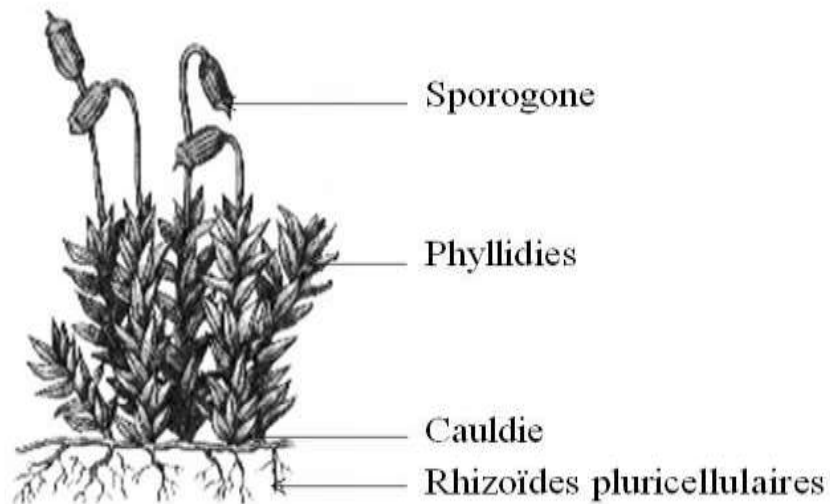
### 3-3- Les Bryophytes s.s. ou les Mousses

Elles sont caractérisées par :

- ✚ Présence d'un protonéma bien développé filamenteux ;
- ✚ - Gamétophyte différencié en tige feuillée à symétrie radiale ;
- ✚ - Présence de rhizoïdes multicellulaires ;
- ✚ - La croissance sporophytique se fait à partir d'une cellule apicale ;
- ✚ - Présence d'une capsule sporangiale dont la déhiscence se fait par un opercule ;
- ✚ - Présence de stomates au niveau de la capsule ;
- ✚ - Présence d'un système vasculaire non lignifié (hydroïdes, leptoides).

#### Morphologie des mousses

L'appareil végétatif est un axe feuillé (**Fig. 64**). Les organes foliacés sont formés d'une ou de plusieurs assises cellulaires avec une fausse nervure (cellules allongées). La structure simplifiée de ces organes ne permet pas de les assimiler directement à ceux des plantes supérieures. Pour cette raison, on utilise le terme de 'phyllidies' pour les organes foliacés ; de 'cauldies' pour les axes et de 'rhizoïdes' multicellulaires et ramifiés pour les organes qui permettent la fixation sur un substrat.

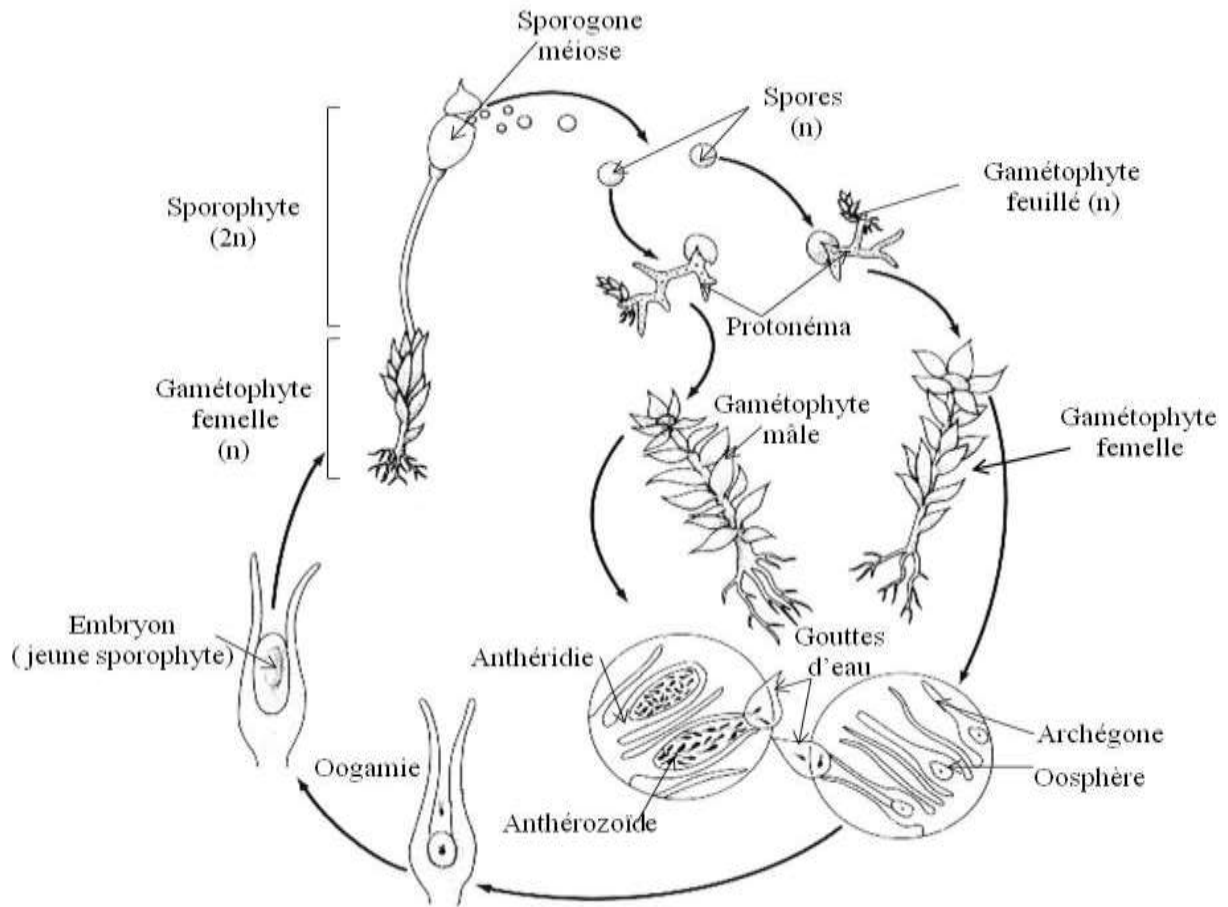


**Fig. 64** : Appareil végétatif des Mousses (Muscinées).

Les tissus conducteurs sont constitués de cellules allongées à paroi inégalement épaissie, présentant parfois de véritables pores. Des cellules spécialisées dans la conduction de l'eau (hydroïdes) forment le cylindre central. Elles sont entourées d'un manchon de cellules spécialisées dans la conduction de la sève élaborée (leptoïdes). Les sporophytes de quelques Mousses différencient de véritables stomates.

### Cycle de reproduction

Le cycle de reproduction chez les Muscinées est digénétique haplodiphasique à dominance du gamétophyte haploïde (**Fig. 65**).



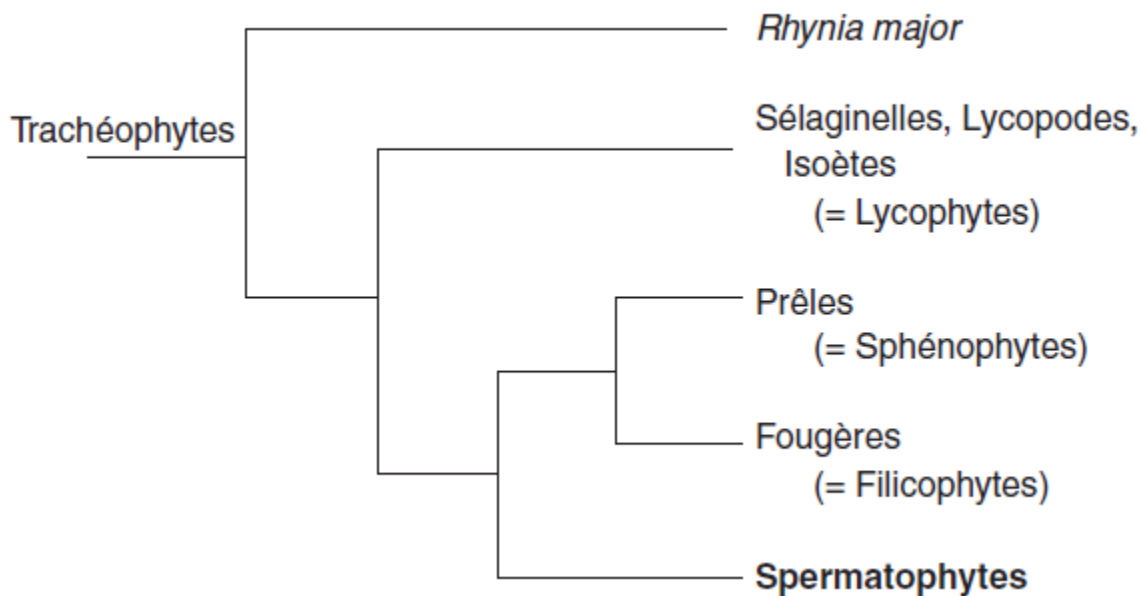
**Fig. 65 :** Cycle digénétique haplodiplophasique à dominance du gamétophyte haploïde chez les Mousses (Muscinées)

*Chapitre 4*  
*Ptérídophytes*

## Chapitre 4: Les Ptéridophytes s.l.

### 1- Caractères généraux des ptéridophytes

Les **ptéridophytes** au sens large forment un groupe **paraphylétique** qui englobe trois groupes **monophylétiques**: les **Lycophytes**, les **Sphénophytes** et les **Filicophytes**, apparus il y a moins de 400 millions d'années. Ce sont généralement de petites plantes sans graines, vivaces par une tige souterraine horizontale (rhizome) qui vivent dans les lieux frais et ombragés (**figure 66**).



**Fig. 66:** Cladogramme des ptéridophytes (ce cladogramme repose surtout sur des données moléculaires)

Par comparaison avec les Bryophytes, les Ptéridophytes montrent un appareil végétatif plus différencié et adapté à la vie aérienne. Ils sont caractérisés par un cycle de vie digénétique haplodiplophasique (**figure 67**) à **dominance du sporophyte diploïde** et à **sporangies nus**. Ce sporophyte, complexe, possède désormais tous les organes spécifiques des **cormophytes**: **racines**, **tiges**, **feuilles**. Il est muni d'un **appareil vasculaire** (**trachéïdes = vaisseaux imparfaits**) et de tissus de soutien assurant sa rigidité (synthèse de lignine). La possession de racines rend les fougères moins étroitement tributaires des variations de l'humidité du substrat que les Bryophytes.

Tandis que, la possession de tissus conducteurs et de soutien va de pair avec une taille plus élevée que chez les Bryophytes. Cette taille élevée favorise la dispersion des spores à grande distance.

Néanmoins, l'affranchissement par rapport au milieu aquatique n'est pas parfait: la fécondation reste aquatique comme chez les Bryophytes (**cryptogames**), et le gamétophyte, sans épiderme et non vascularisé, reste inféodé à des conditions très humides. De plus, le jeune individu diploïde, encore dénué de toute protection particulière, doit se développer immédiatement et ne peut le faire que dans des conditions où l'eau est abondante au moins temporairement.

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.

La plupart des espèces de **Vasculaires sans graines** sont **homosporées** : elles possèdent un seul type de sporange qui produit un seul type de spores, lesquelles donnent généralement des **gamétophytes bisexués**, comme chez presque toutes les Fougères, à l'exception des espèces aquatiques. Les espèces **hétérosporées** comportent deux types de sporanges et engendrent deux types de spores : dans les **mégasporophylles**, les **mégasporanges** donnent des **mégaspores**, qui forment des **gamétophytes femelles** (ou **mégagamétophytes**). Dans les **microsporophylles**, les **microsporangies** produisent des **microspores**, qui deviennent des **gamétophytes mâles** (ou **microgamétophytes**). Toutes les Vasculaires à graines (**spermatophytes**) et quelques Vasculaires sans graines (ptéridophytes) sont **hétérosporées**.

## 2- Reproduction des ptéridophytes et leur cycle de vie

Deux voies de reproduction **sexuée** et **végétative** se rencontrent chez les ptéridophytes.

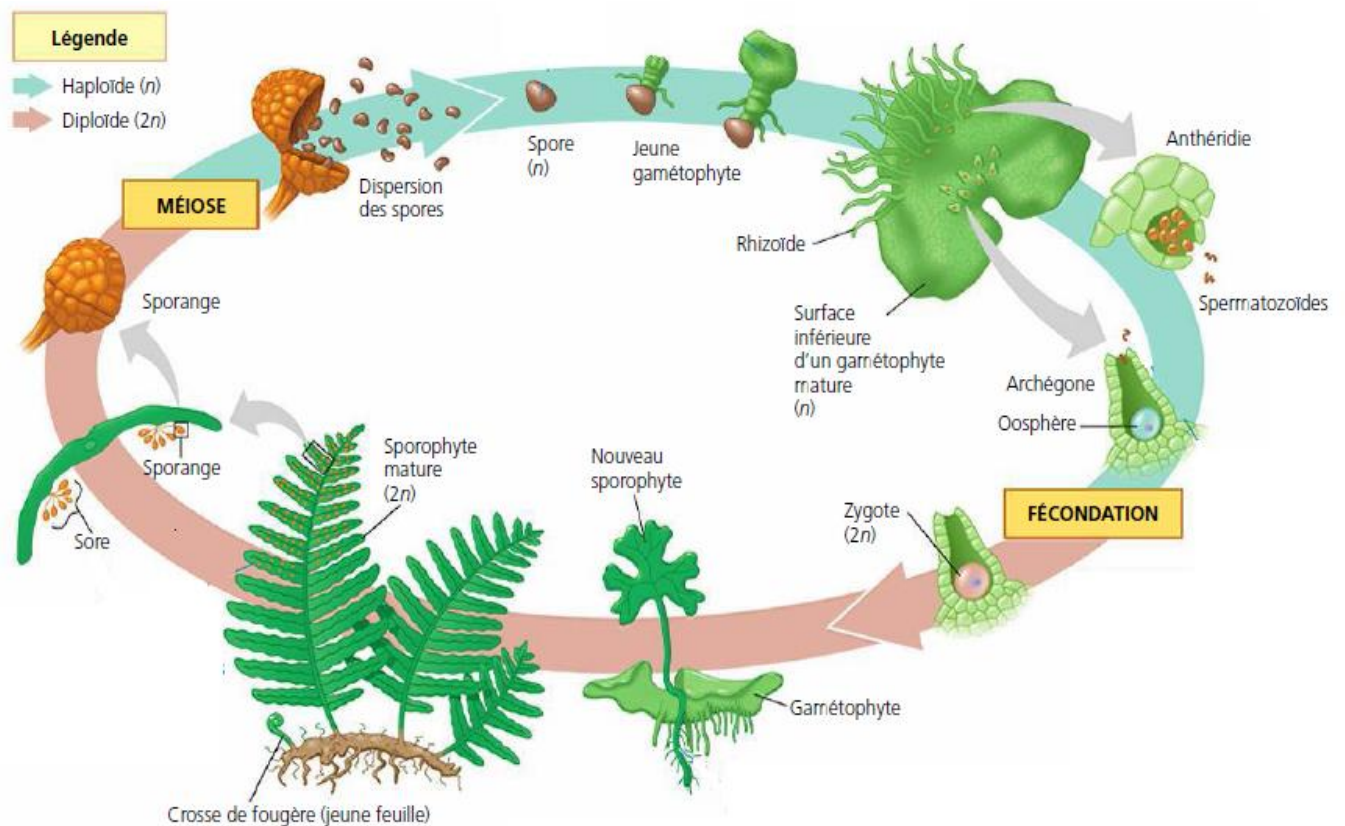
### 2-1- Reproduction asexuée

La **multiplication végétative** se fait essentiellement par **fragmentation du cormus** et plus précisément du **rhizome** à croissance indéfinie. Certaines espèces ne se reproduisent que par cette méthode, ceci leur permet de conquérir de vastes territoires (ex. *Pteridium aquilinum* ou Fougère aigle).

## 2-2- Reproduction sexuée

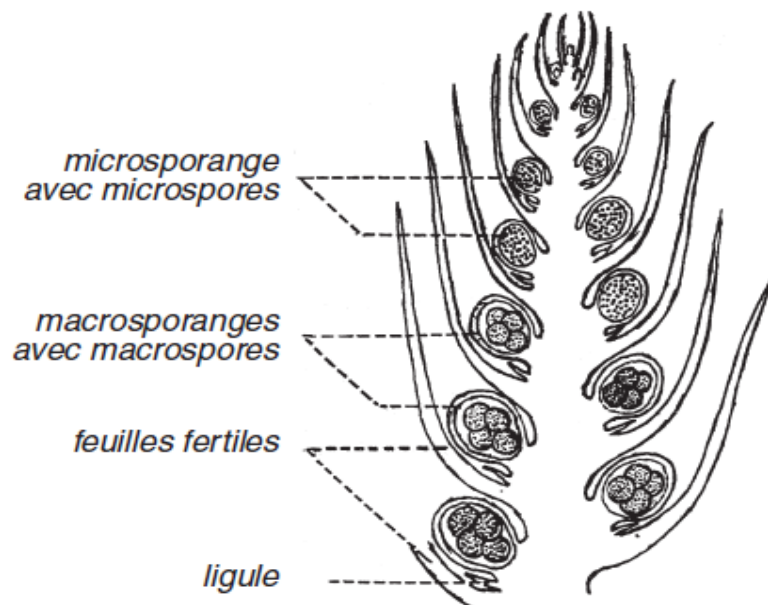
Le cycle biologique des ptéridophytes est typiquement digénétique haplo-diplophasique avec une forte prédominance de la génération sporophytique sur la génération gamétophytique.

Chez la plupart des fougères, on parle de **cycle homosporé** car toutes les spores sont identiques entre elles. Dans ce cas (**figure 67**), après méiose puis maturation dans les sporanges, les spores sont disséminées. Elles donnent naissance aux prothalles, sur lesquels se différencient à la fois des anthéridies et des archégonies. Les gamètes mâles, les **anthérozoïdes**, nagent dans l'eau du milieu extérieur et sont attirés par **chimiotactisme** vers les archégonies, pour aller féconder l'**oosphère**. On parle de **zoïdogamie oogame**. L'œuf se développe au sein de l'archégonie pour former le jeune sporophyte qui vivra dans les premiers temps en parasite du gamétophyte qui finira ensuite par dégénérer et disparaître.



**Fig. 67:** Cycle du développement d'une fougère (cycle digénétique diplohaplophasique) à dominance du sporophyte chez les ptéridophytes.

Chez les **sélaginelles** le cycle est **hétérospore**. Ce sont des plantes de petites tailles à **microphylls**. Les sporanges sont disposés à l'aisselle de sporophylles groupées en épis, mais ils sont de deux sortes. Les uns, plus petits, les **microsporangies** produisent après méiose de nombreuses spores minuscules, les **microspores**. Les autres, à la base de l'épi, plus gros, les **macrosporangies**, ne libèrent après méiose que quatre spores, de forte taille cette fois, les **macrospores**, gonflant la paroi du sporange. Les sporophylles, portant les microsporangies, s'appellent des **microsporophylles** et celles, portant les macrosporangies, des **macrosporophylles** (figure 68).



**Fig. 68** : Sélaginelle. Coupe longitudinale d'un épi fertile.

C'est à l'intérieur de la paroi des spores que se développent après dissémination les prothalles (gamétophytes). Le prothalle mâle à l'intérieur de la microspore est presque réduit à une anthéridie, on l'appelle le microprothalle, et il libérera à maturité des gamètes mâles nageurs, flagellés, les anthérozoïdes. Au sein de la macrospore, le macroprothalle femelle se développe en faisant saillie hors de la paroi de la spore, différenciant rhizoïdes et archégonies. On parle ici d'hétéroprothallie. Le macroprothalle femelle accumule des réserves nutritives qui permettront le développement du jeune sporophyte issu de la fécondation.

Chez les sélaginelles la fécondation est toujours aquatique, mais on voit que, dans ce cas, il existe une protection accrue des sporanges par la sporophylle, et des gamétophytes par les parois des spores, associée à une hétérosporie et à une hétéroprothallie qui correspondent à une plus grande différenciation des sexes au niveau de la génération gamétophytique. En comparaison des fougères, les prothalles sont ici de taille beaucoup plus réduite.

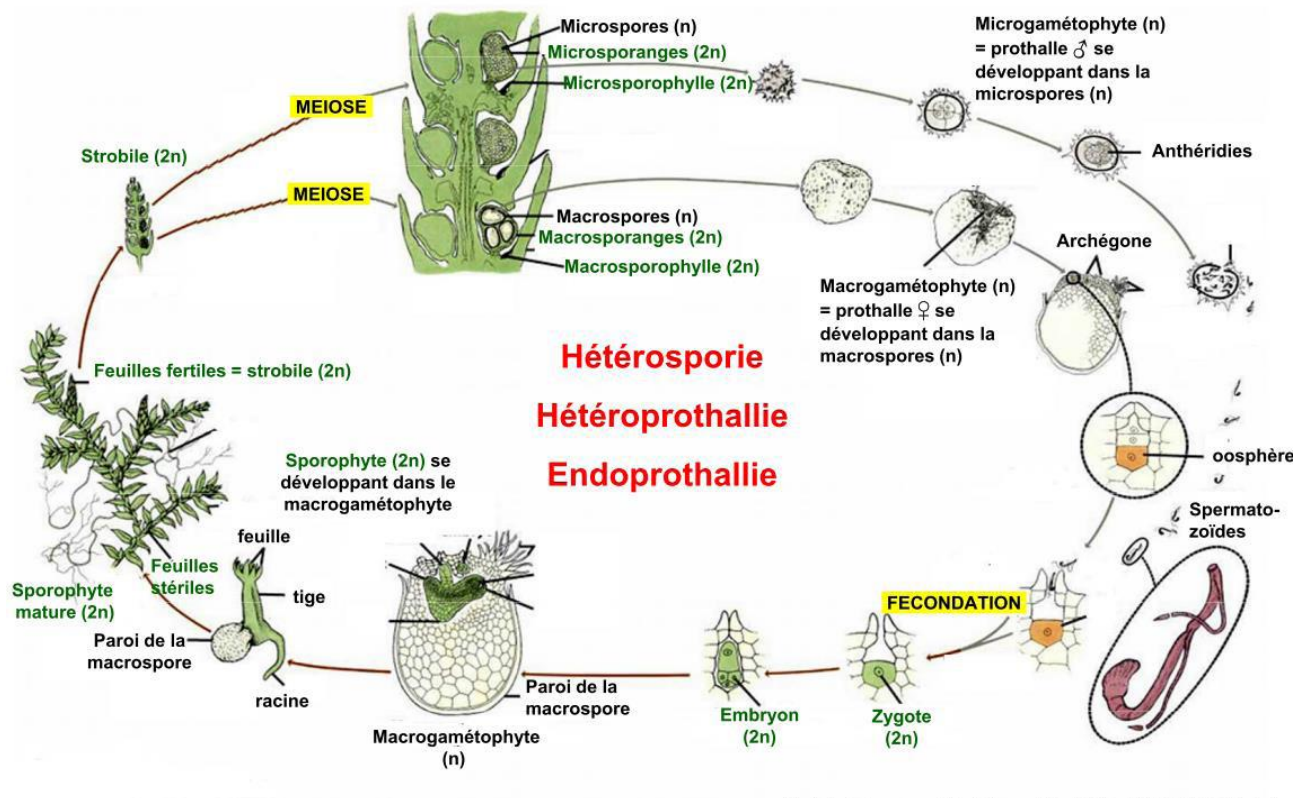
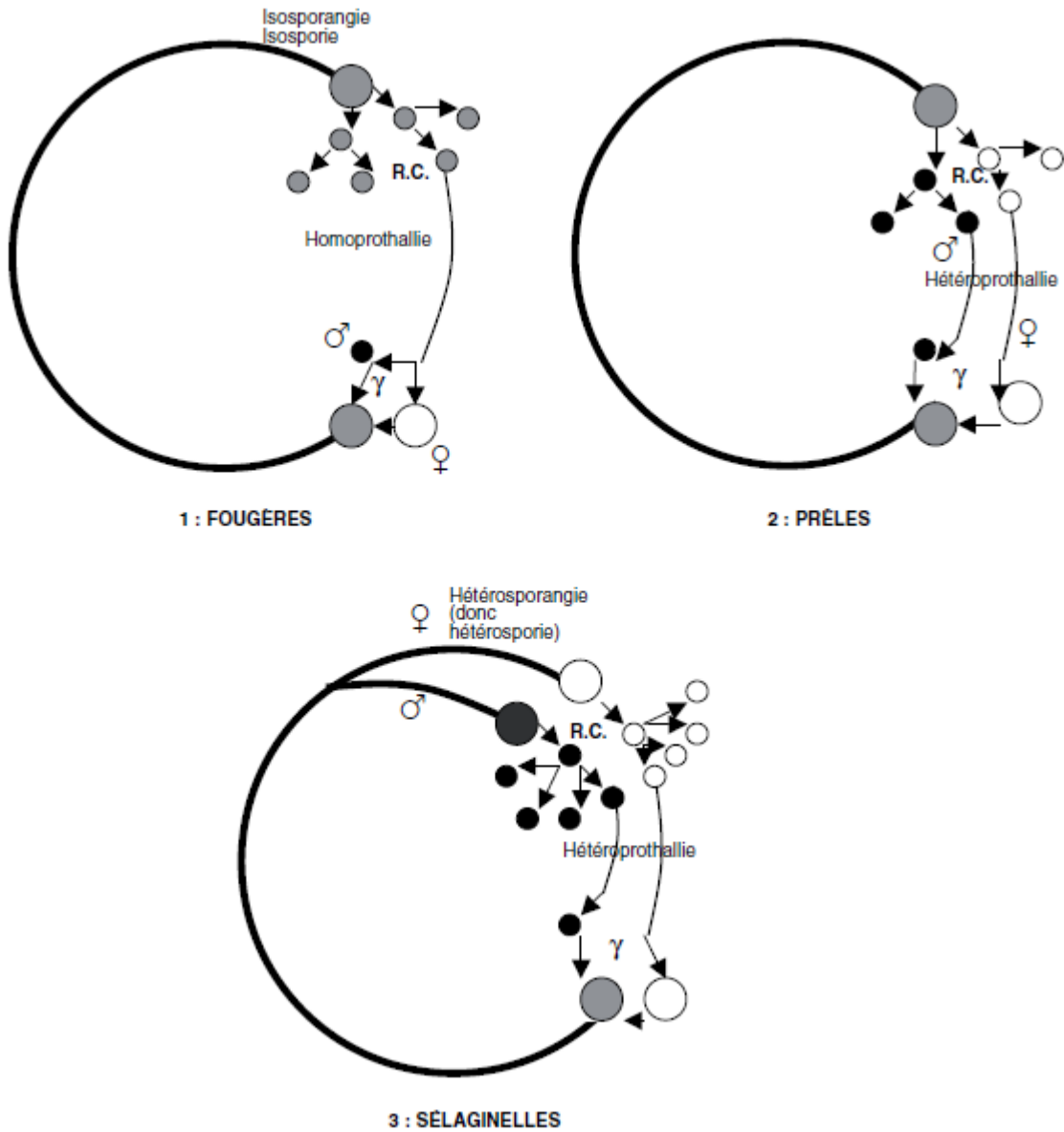


Fig. 69: Cycle de reproduction hétérospore d'une sélaginelle.

Chez les **Prêles**, les spores issues des sporanges ont **morphologiquement semblables**, mais certaines donneront des prothalles mâles porteurs uniquement d'anthéridies et certaines des prothalles femelles avec des seuls archégones : **l'isosporie apparente** cache une **hétérosporie biologique**.

Généralement, la différenciation sexuelle chez les ptéridophytes peut être résumée par le schéma dans la **figure 70**.



**Fig. 70:** Évolution de la sexuation chez les ptéridophytes. En 1, cas des Fougères : sexuation tardive, par apparition d’anthéridies et d’archéogones sur le même prothalle; en 2, cas des Prêles : sexuation dès le stade prothalle et méiospores; en 3, cas des Sélaginelles : la sexuation se fait dès le stade sporange, sur le sporophyte avec différenciation entre macro- et microsporange – R.C., méiose; traits gras : phase sporophytique, traits fins : phase gamétophytique, γ : gamètes.

### 3- Systématique des Ptéridophytes

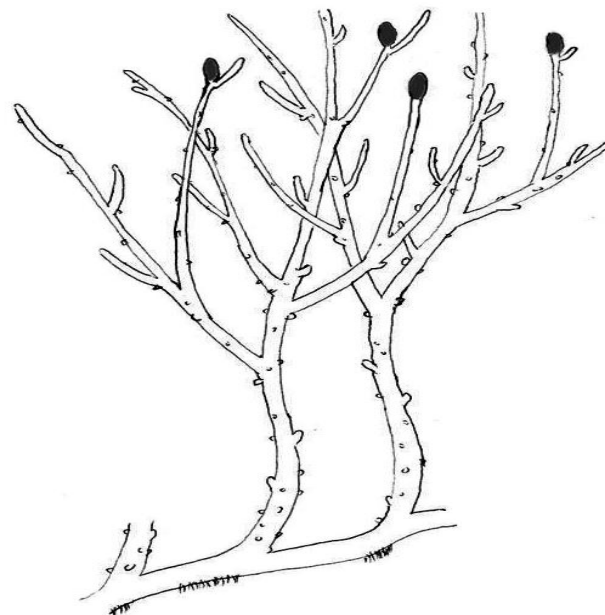
Les Ptéridophytes *sensu lato* comprennent les Rhyniophytes, les Lycophytes, et les Ptérophytes (Ptéridophytes *sensu stricto*) qui compte plusieurs groupes parmi lesquels : les Sphinophytes et les Filicophytes.

Le cladogramme proposé ci-dessus (**figure 66**) n'est qu'une hypothèse parmi d'autres, car selon les auteurs, la position des différents groupes au sein des Ptéridophytes *sensu lato* varie. Pour certains, les différents groupes signalés dans le cladogramme ont valeur d'embranchements, pour d'autres ce sont des classes. Ici, c'est le terme neutre de groupes qui sera utilisé.

#### 3-1- Les Rhyniophytes

Bien que représenté uniquement par des plantes fossiles, ce groupe figure ici car il comprend les plus anciennes plantes vasculaires connues datées de moins de 425 MA et qui ont disparu au dévonien moyen (380 MA). D'après les fossiles trouvés, il s'agit de plantes de petite taille, formées d'axes ramifiés dichotomiquement terminés par des sporanges. Elles ne possèdent ni tiges, ni feuilles, ni racines (mais des rhizoïdes) (**figure 71**).

D'après les données fossiles, les gamétophytes et les sporophytes des Rhyniophytes devaient être très ressemblants. On parle d'alternance de générations isomorphes.



**Fig. 71:** Représentation schématique de *Rhynia* d'après des empreintes fossiles.

### 3-2- Les Lycophytes ou Lycopodiophytes

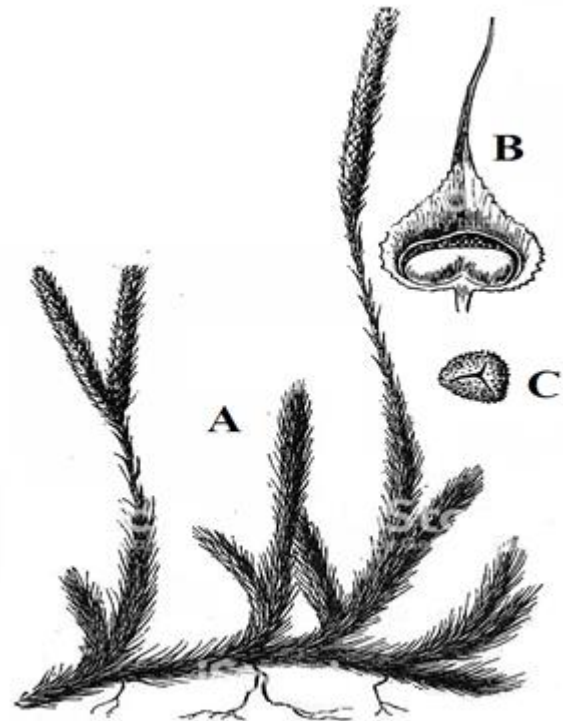
Durant le Carbonifère (de 359 à 299 millions d'années avant aujourd'hui), la lignée des Lycophytes comprenait de petites plantes herbacées et des arbres gigantesques pouvant dépasser les 2 m de diamètre et 40 m de hauteur. Les Lycophytes géants ont évolué durant des millions d'années dans les marais chauds et humides, mais ils ont disparu quand le climat s'est refroidi et asséché, à la fin du Carbonifère. Par contre, les petits Lycophytes ont survécu. Il en existe aujourd'hui environ 1 200 espèces, toutes herbacées, réparties en trois ordres ne comptant chacun qu'une seule famille : les **Lycopodiales**, les **Sélaginellales** et les **Isoétales**.

Les Lycophytes actuels ont des feuilles de petites taille (**microphylls**) à une seule nervure et insérées en spirale.

#### 3-2-1- les Lycopodiales

Une seule famille, les Lycopodiacées, qui compte environ 400 espèces réparties en une quinzaine de genres dont les plus connus sont *Lcopodium* et *Huperzia* (**figure 72**).

**Fig. 72:** le lycopode, *Lycopodium clavatum*. **A**, sporophyte du lycopode ; **B**, sporophylle ; **C**, sporange.



L'appareil végétatif de sporophytes chez les espèces de cet ordre se présente sous la forme d'un rhizome ramifié possédant de courtes racines et rampant à la surface du sol. A partir de ce rhizome s'élèvent des axes verticaux de 10 à 15 cm, à ramifications dichotomiques, à feuilles rapprochées, le plus souvent disposées en spirale (rarement opposées ou verticillées), plus ou moins rigides. Les **sporophylles** (feuilles fertiles), portant chacune un sporange, disposées en épis terminaux (**strobiles**) chez la plupart des espèces. Chez certaines autres elles sont réparties parmi les feuilles stériles.

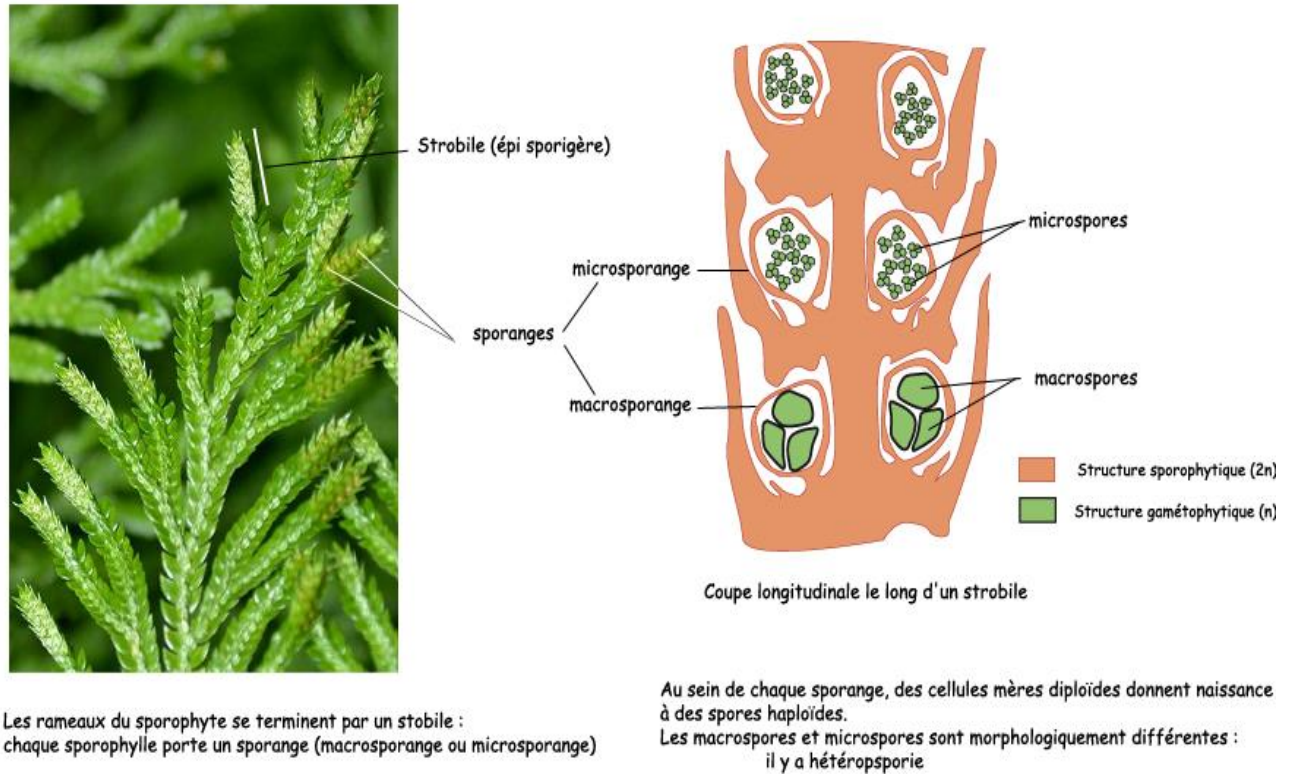
Il n'y a qu'un type de spores (les Lycopodiales sont dites **isosporées**) donnant en germant un seul type de prothalles qui sont bisexués (les Lycopodiales sont dites **isoprothallées**). La maturation des anthéridies et des archéogones peut demander plusieurs années (jusqu'à quinze).

### 3-2-2- les Sélaginellales

Une seule famille, les Sélaginellacées, avec un seul genre, *Selaginella* qui comprend 750 espèces. Le sporophyte est une tige herbacée, très ramifiée, le plus souvent rampante. L'ensemble prend un aspect aplati. Les microphylles sont disposées sur quatre rangs et opposées deux à deux. A la base de chaque feuille et sur la face inférieure se développe une petite lame membraneuse, la **ligule (figure 73)**.

Les **sporophylles**, également ligulées, sont disposées en épis terminaux avec, à leur base, des **mégasporophylles** (femelles) portant chacune un **mégasporange** et à leur sommet, des **microsporophylles** (mâles) portant chacune un **microsporange**. On obtient donc deux types de sporanges, les sélaginellales sont dites **hétérosporées**. Les gamétophytes mâles se développent à l'intérieur des microspores, ne formant qu'une seule anthéridie. A la base de l'épi, dans chaque macrospore, se différencient les gamétophytes femelles portant plusieurs archéogones. Comme il y a deux sortes de gamétophytes, les sélaginellales sont dites **hétéroprothallées**.

Les anthérozoïdes ciliés libérés par les anthéridies nagent jusqu'aux archéogones et la fécondation peut avoir lieu. Comme pour les autres pteridophytes, le jeune sporophyte issu de cette fécondation se développe, au départ, aux dépens du gamétophyte femelle avant de prendre son autonomie.



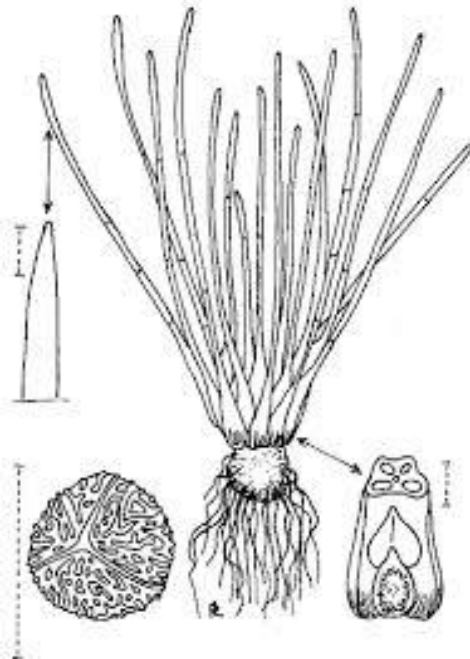
**Fig. 73** : les Selaginelles.

### 3-2-3- les Isoétales

Une seule famille, les Isoétacées, avec un seul genre *Isoetes*, comptant 30 espèces. Elles sont des plantes de petite taille, possèdent une courte tige souterraine épaissie (**Corne**) portant à sa face inférieure des racines et à sa face supérieure des microphylls dressées et effilées (**figure 74**). Le corne possède un cambium qui forme des tissus secondaires.

Toutes les microphylls peuvent être, également des sporophylles portant à leur base les plus externes des mégasporanges et pour les plus internes des microsporangies (isoétales sont dites **hétérosporées**).

Le prothalle mâle est très réduit, il ne donne qu'une seule cellule anthéridiale aboutissant à la formation de quatre anthérozoïdes ciliés. De même pour le prothalle femelle, il est très réduit puisqu'un seul archégone est formé (s'il n'est pas fécondé, d'autres peuvent ensuite se développer). Les Isoétales sont dites hétéroprothallées.



**Fig. 74:** Isoète.

### 3-3- les Sphénophytes ou Equisétophytes

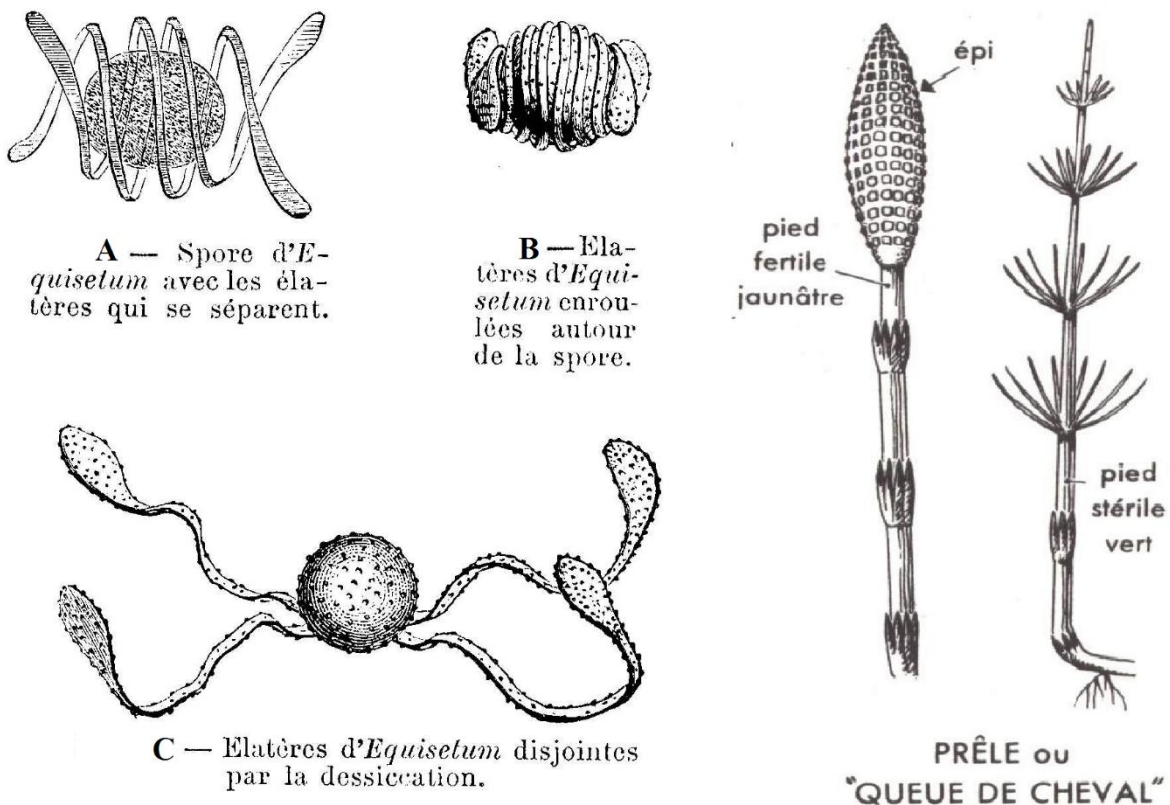
Actuellement, les sphénophytes ne sont représentées que par 15 espèces regroupées dans un seul genre *Equisetum*. Ce sont végétaux des lieux humides, voire très humides, qui se propagent par rhizome ramifié enfoncé parfois profondément dans le sol.

A partir de ces rhizomes se développe des tiges dressées, creuses et articulées de quelques centimètres, le plus souvent de quelques dizaines de centimètres de haut, comme chez l'espèce *Equisetum giganteum* (10 m).

Ces tiges portent des nœuds au niveau desquels se développent des verticilles de feuilles réduites à des écailles (microphylls) et fusionnées en un manchon. Toute la plante est rigoureuse car les cellules épidermiques contiennent de la silice.

Chez certaines espèces, toutes les tiges aériennes sont semblables : elles sont à la fois chlorophylliennes et fertiles. Chez d'autres espèces, il existe des tiges chlorophylliennes stériles et des tiges non chlorophylliennes et non ramifiées fertiles. Les deux types de tiges se développent à partir du même rhizome mais les tiges fertiles qui apparaissent les premières au printemps.

Les **sporangies** sont groupés en épis à l'extrémité des axes végétatifs ou d'axes spécialisés, les **sporangiophores**. Les spores sont identiques morphologiquement (**isosporie morphologique**) mais elles produisent des prothalles mâles ou femelles (**hétérosporie génétique**) origine d'une **hétéroprothallie**. Les spores des prêles possèdent des expansions de leurs parois appelées **élatères** très sensibles aux variations d'hydratation. Ils contribuent à la dissémination en se déployant brutalement lorsque le taux d'hygrométrie diminue (**figure 75**).



**Fig. 75** : différents organes des prêles.

### 3-4- Les Filicophytes

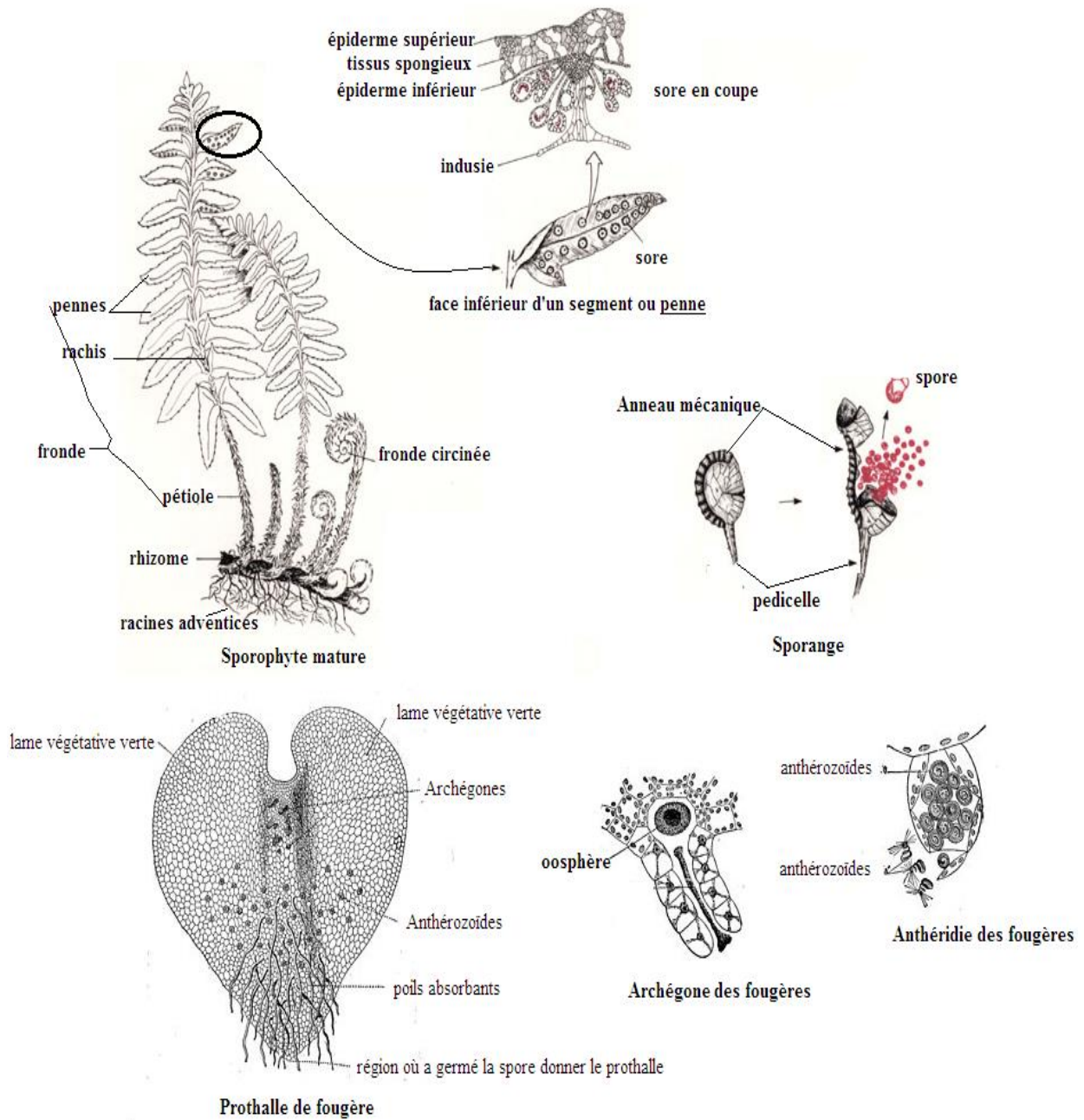
Les Filicophytes ou les fougères, sont des **leptosporangiés isosporés** (sauf les formes aquatiques qui sont hétérosporées). Leurs synapomorphies sont liées aux sporanges: ils sont munis d'un **anneau mécanique** et issus chacun des divisions d'une seule cellule. Une autre synapomorphie est l'organisation de leur système conducteur en **dictyostèle**.

Les Filicinées est le groupe des ptéridophytes le plus représenté avec plus de 10 000 espèces regroupées en 35 familles et 320 genres. On les rencontre dans tous les milieux. Ce sont essentiellement des plantes herbacées terrestres, mais on trouve également des espèces arborescentes, des lianes, et des espèces épiphytes. Leur taille peu varie de quelques centimètres jusqu'à 20m (forme arborescente). L'appareil végétatif est constitué d'un **rhizome** riche en réserve et ramifié portant des **racines adventives** et de grandes feuilles appelées **mégaphylles** ou **frondes**.

Les sporanges sont réunis en **sores** qui peuvent être nus ou recouverts d'une petite extension, **l'indusie**, qui sont localisées sur la face inférieure des folioles ou **pinnules**. La tige feuillée représente donc le **sporophyte diploïde**.

Lorsque les isospores haploïdes germent, elles donnent un prothalle chlorophyllien bisexué (porte à la fois les anthéridies et les archégonies), le plus souvent **cordiforme**, de petite taille, à une seule assise de cellules. Il est fixé au sol par des **rhizoïdes**. Le prothalle est donc le gamétophyte.

La présence de l'eau est indispensable au déplacement des gamètes mâles (la fécondation est une **zoïdogamie**). Le zygote situé dans le ventre de l'archégonie subit un ensemble de mitoses et forme **l'embryon** qui vit aux **dépens** de prothalle chlorophyllien. L'embryon donne une nouvelle tige feuillée devenant rapidement autonome. Le cycle de développement est donc **digénétique haplodiplophasique hétéromorphe à diplophase dominante**.



**Fig. 76:** Aspect général d'un exemple de Filicophytes, prothalle et sporange.

*Chapitre 5*  
*Gymnospermes*

## Chapitre 5: Les Gymnospermes

Les **Gymnospermes** appartiennent aux **Spermatophytes** ou **plantes à graines**, un ensemble de plantes possédant un **ovule**.

### 1- Caractères généraux des spermatophytes

#### 1-1- Appareil végétatif

L'appareil végétatif des Spermatophytes est plus perfectionné que celui des ptéridophytes;

- ✚ Les trachéides à ponctuations scalariformes sont remplacées par des **trachéides à ponctuations** dites aréolées (Gymnospermes) puis par des **vaisseaux parfaits** (Angiospermes : **Xylème** et **phloème**);
- ✚ La ramification de type dichotomique est remplacée par un type latéral;
- ✚ Les tissus et organes ne proviennent plus de la division d'une seule initiale, mais du fonctionnement d'un ensemble méristématique.

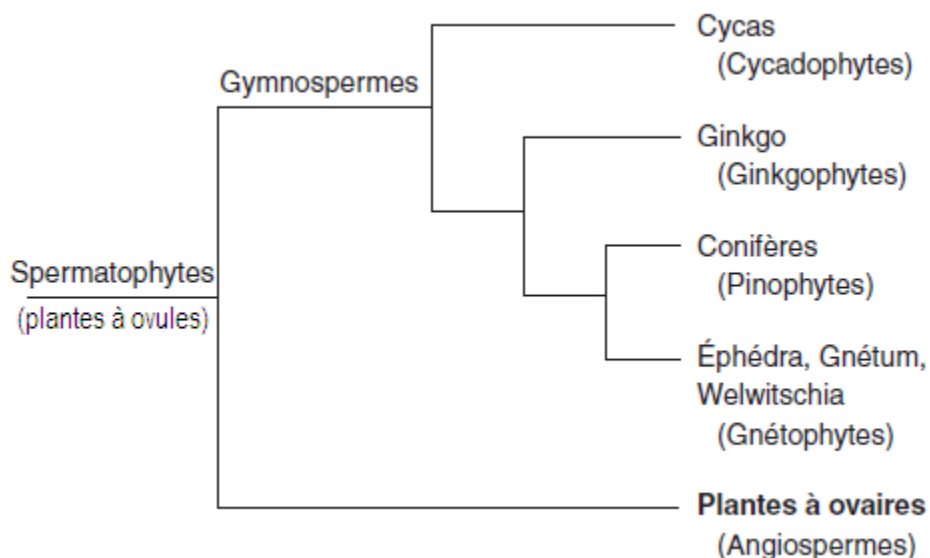
#### 1-2- Appareil reproducteur

La reproduction des **Spermatophytes** comporte deux innovations majeures :

- ✚ Le gamétophyte reste inclus à l'intérieur de la tétraspore : le **prothalle** se développe dans la spore et, sans contact avec l'extérieur, il perd son autotrophie : pour son alimentation il dépend ainsi du sporophyte. Cette **endoprothallie** est à l'origine du **grain de pollen** et de l'**ovule**, lequel, après la **fécondation**, se transforme en **graine** :
- ✚ La **fécondation n'est plus tributaire de l'eau extérieure**: elle devient un processus interne à la plante et développe une structure nouvelle, le **tube pollinique**.

### 2- Classification des spermatophytes

Les Spermatophytes comprennent deux clades, les **Gymnospermes** et les **Angiospermes**.



**Fig. 77:** Cladogramme des spermatophytes. Les relations phylogénétiques entre ces taxons restent très incertaines.

### 3- Les Gymnospermes *s.l.*

Le terme **Gymnospermes** est utilisé pour qualifier des groupes chez lesquels les ovules ou les graines sont nus (du grec *gymnos*, nu et *sperma*, graine) : les **Cycadophytes**, les Ginkgophytes, les Gnétophytes et les Pinophytes (**figure 77**). Cet embranchement comprend environ 1000 espèces réparties sur 14 familles. Au total, une espèce représente les Ginkgo, 68 représentent les Gnétophytes, 289 sont des Cycadophytes, et le reste des espèces sont des conifères, ces chiffres de taxons sont discutables à  $\pm 5-10\%$ . De nombreux problèmes de classification sub-familiale et tribale complexes restent à résoudre.

#### 3-1- les préspermaphytes (les Cycadophytes et les Ginkgophytes)

Les cycadophytes et les Ginnkgophytes forment le groupe des **préspermaphytes** (ou **préphanérogames**)

### 3-1-1- Caractères généraux

#### a- l'appareil végétatif

- ✚ Les préspermaphytes sont des plantes **dioïques**, c'est-à-dire que les pieds mâles et les pieds femelles sont **distincts** ;
- ✚ La ramification de leur appareil végétatif est souvent **dichotomique** (ramification se fait par paires), l'anatomie primaire rappelant celles des fougères (vaisseaux à ponctuations scalariformes = en échelle).

#### b- reproduction

- ✚ Il n'y a pas formation d'une **vraie graine**, les ovules par leurs téguments renforcés, simulent des graines avec lesquelles on les a confondus ;
- ✚ En plus de téguments formés, l'ovule accumule aussi les réserves nécessaires pour le développement de l'embryon avant la fécondation (Morphologiquement un ovule fécondé est identique à un ovule vierge) ;
- ✚ La fécondation se réalise en milieu liquide (les anthérozoïdes sont ciliés mais ne nagent pas, ils descendent par gravité) la fusion des gamètes peut durer plusieurs mois ;
- ✚ Ils sont ovipares ; le développement de l'œuf en embryon se fait toujours lorsque l'ovule fécondé tombe dans le sol, il continue sa croissance, la jeune plantule s'enracine et donne un nouvel individu.

### 3-1-2- Les Cycadophytes

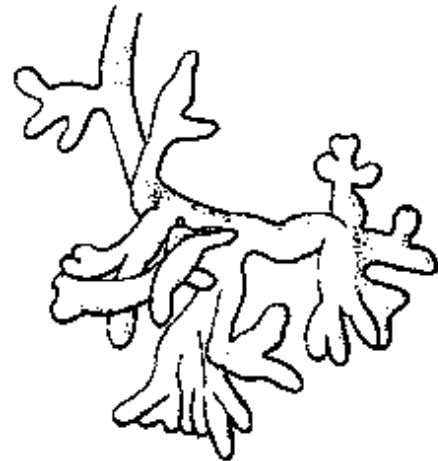
#### 3-1-2-1- Biologie

Les Cycadophytes sont des plantes dioïques originaires des régions tropicales et subtropicales. Ils sont souvent confondus avec les palmiers auxquels ils ressemblent, avec leur tige non ramifiée terminée par un bouquet de feuilles et portant des cicatrices des feuilles tombées. Mais ici, la tige n'est pas un stipe mais un vrai tronc qui s'accroît en épaisseur grâce au fonctionnement d'un cambium bifacial, donnant du bois secondaire vers l'intérieur et du liber secondaire vers l'extérieur.

Les feuilles, de grande taille, sont composées, pennées et disposées en spirale. Les cycadophytes réalisent une symbiose racinaire avec les cyanobactéries fixatrices d'azote. Les racines abritant ces cyanobactéries ont un géotropisme négatif, c'est-à-dire qu'elles poussent vers le haut et prennent un aspect contourné et épaissi typique : **racines coralloïdes**.



A, Aspect général de la plante



B, Racines coralloïdes de Cycas

Fig. 78: Aspect général et racines coralloïdes de *Cycas*.

### 3-1-2-2- Reproduction des cycadophytes

#### a- reproduction asexuée

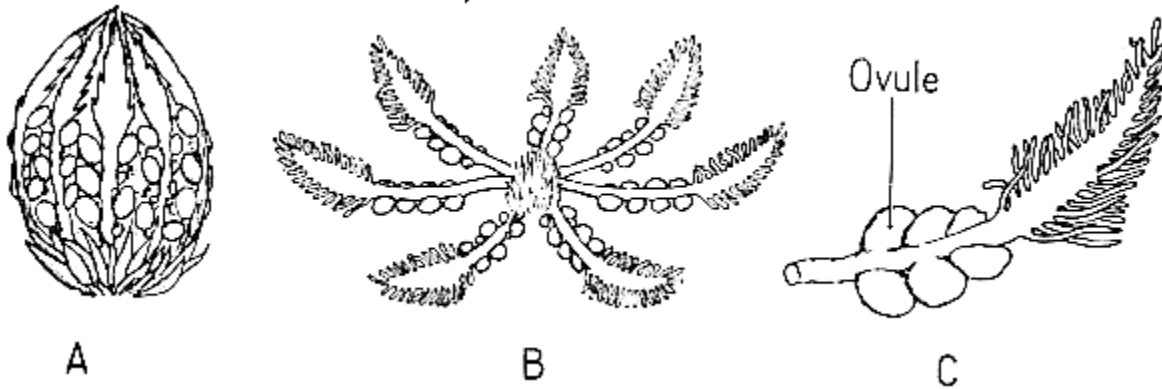
Par les rejets qui se forment sur la tige ou, le plus souvent, à partir des racines près du tronc, donnant naissance à une couronne de nouveaux individus entourant le plant principal.

#### b-reproduction sexuée

##### Appareil reproducteur femelle

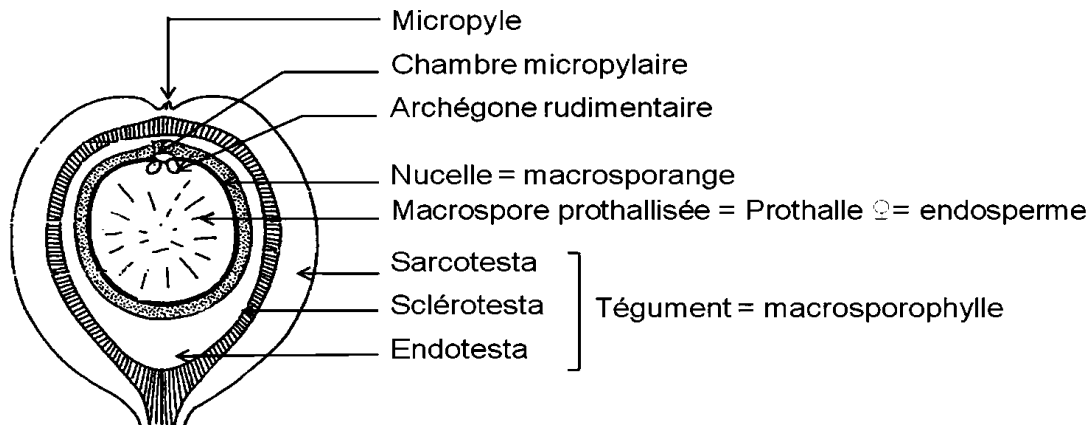
La reproduction sexuée se fait par l'intervention du pollen et les ovules. Ces derniers sont portés par les mégasporophylles réunies en cônes ovulifères situés à l'apex de l'individu femelle (**figure 79**).

Les ovules disposés par deux, sont situés à la face supérieure et à la base des sporophylles en forme d'écaillés. Chez *Cycas*, les feuilles ovulifères brunâtres, enchevêtrées, sont portées par un axe court et forment une sorte de bouquet terminal s'ouvrant à maturité des ovules. Elles portent, chacune, entre deux et huit ovules micropyle dirigé vers l'extérieur.



**Fig. 79:** Cône femelle de *Cycas* : **A**, non épanoui ; **B**, ouvert ; **C**, feuille ovulifère.

Les ovules sont volumineux, car ils accumulent des réserves avant la fécondation. Chaque ovule est constitué d'une partie centrale, le **nucelle** ou macrosporange, entouré par un seul **tégument** tripartite vascularisé (formé de 3 couches: **sarcotesta**, charnue ; **sclérotesta**, dure et sclérifiée et l'**endotesta**, mince) (**figure 80**).



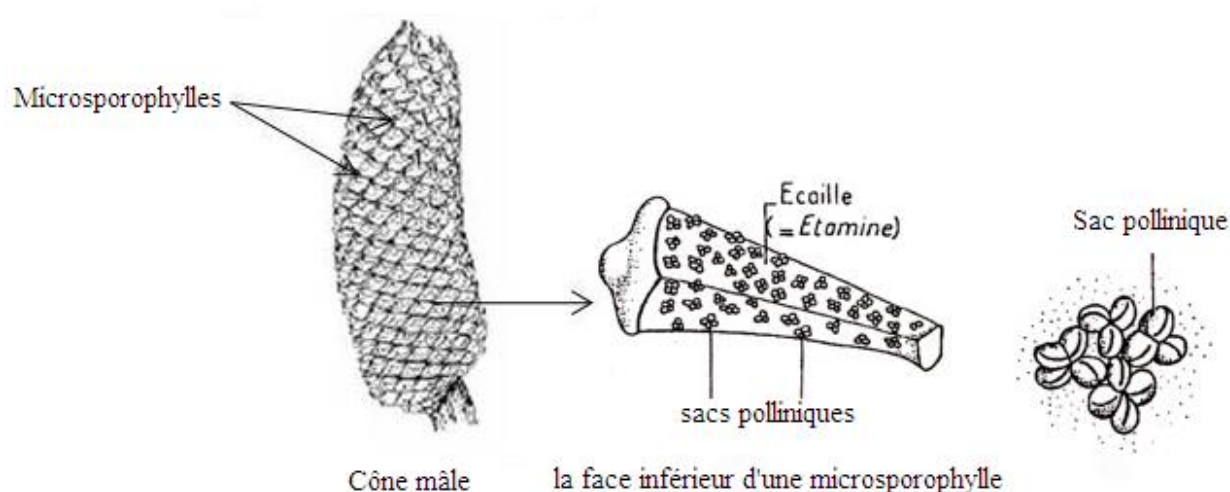
**Fig. 80:** Coupe longitudinale d'un ovule de *Cycas*.

Le tégument interrompu par une petite ouverture, le **micropyle**, sous lequel se trouve une cavité, la **chambre pollinique**. Dans le nucelle, une cellule mère (à  $2n$ ) subit la réduction

chromatique pour donner quatre macrospores (à  $n$ ) dont une seule continuera le processus. Les autres dégènèrent. La macrospore subit alors de nombreuses divisions aboutissant à la formation d'un prothalle femelle, appelé **endosperme**. Du côté du micropyle, quelques archégones très réduits se différencient, chacun contenant une **oosphère**.

### Appareil reproducteur mâle

Sur les individus mâles, se situent des cônes de 2 à 40cm de long, qui sont constitués par des écailles (microsporophylles) portés sur leur face inférieure, de nombreux microsporanges globuleux appelés sacs polliniques. Chaque écaille ou microsporophylle est l'homologue d'une étamine des Angiospermes et donc le cône mâle est l'homologue d'une fleur mâle. Le grain de pollen est constitué de trois cellules (cellule végétative, cellule génératrice, cellule basale). Chaque grain de pollen produit deux spermatozoïdes ciliés.



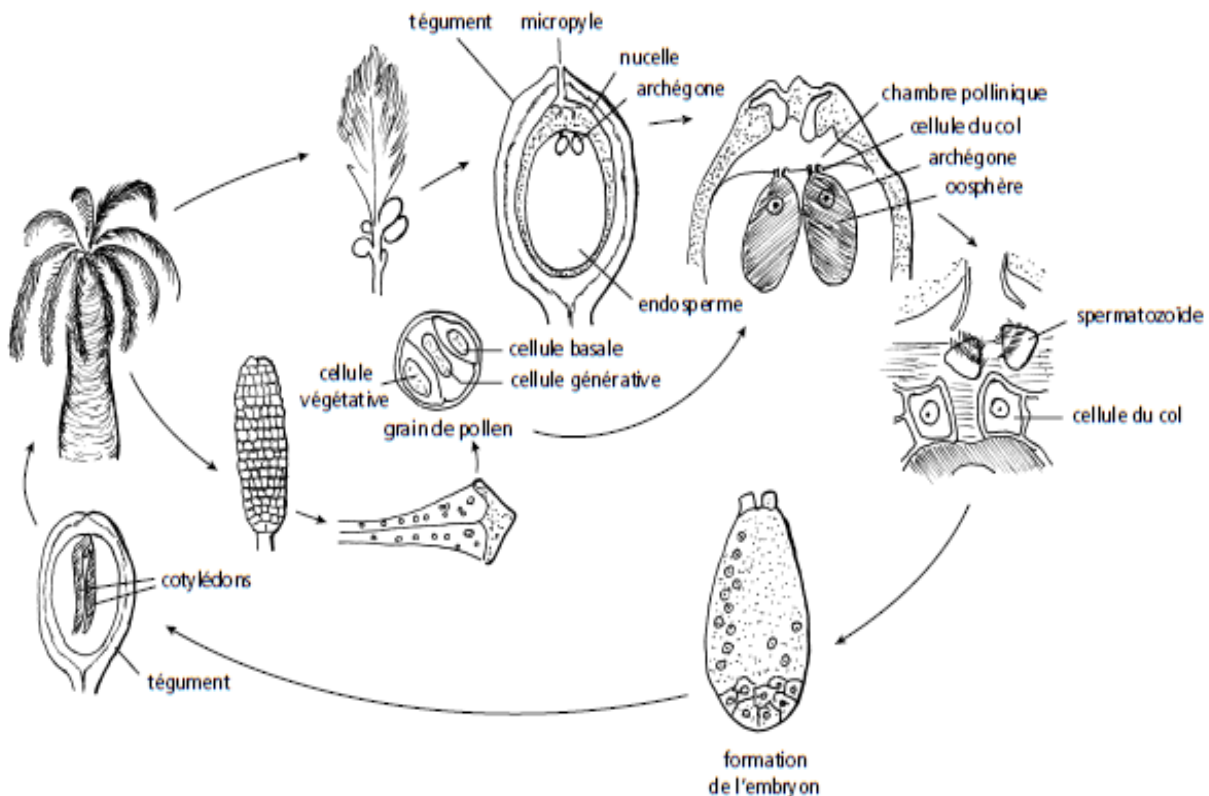
**Fig. 81:** Appareil reproducteur mâle de *Cycas*.

### Cycle de vie

La **pollinisation** chez les Cycadophytes, essentiellement **entomophile**, est assurée essentiellement par des **coléoptères**. Lorsque le pollen arrive au niveau du pied femelle, il pénètre dans l'ovule par le micropyle et germe dans la chambre pollinique. Le court tube pollinique amène les deux anthérozoïdes à proximité de l'oosphère puis éclate. Il libère alors les deux anthérozoïdes multiflagellés ainsi qu'un liquide dans lequel ils nagent pour aller féconder l'oosphère. La

fécondation donne naissance à un œuf ou **zygote**. L'eau du milieu n'est plus nécessaire au déplacement des gamètes mâles dans la dernière partie de leur trajet. Comme dans cette dernière étape les gamètes mâles se déplacent par eux-mêmes, on parle de **zoïdogamie**. Il peut s'écouler jusqu'à **six mois entre la pollinisation et la fécondation**.

Plusieurs oosphères peuvent être fécondées, mais une seule se développe en **embryon**. Le tégument de l'ovule reste charnu à l'extérieur mais devient coriace à l'intérieur. La germination démarre tout de suite, quelques soient les conditions extérieures. Comme il n'y a pas de période de dormance on ne peut pas parler de **vraie graine**.



**Fig. 82:** Les différentes étapes de la reproduction du cycas, *Cycas revoluta*.

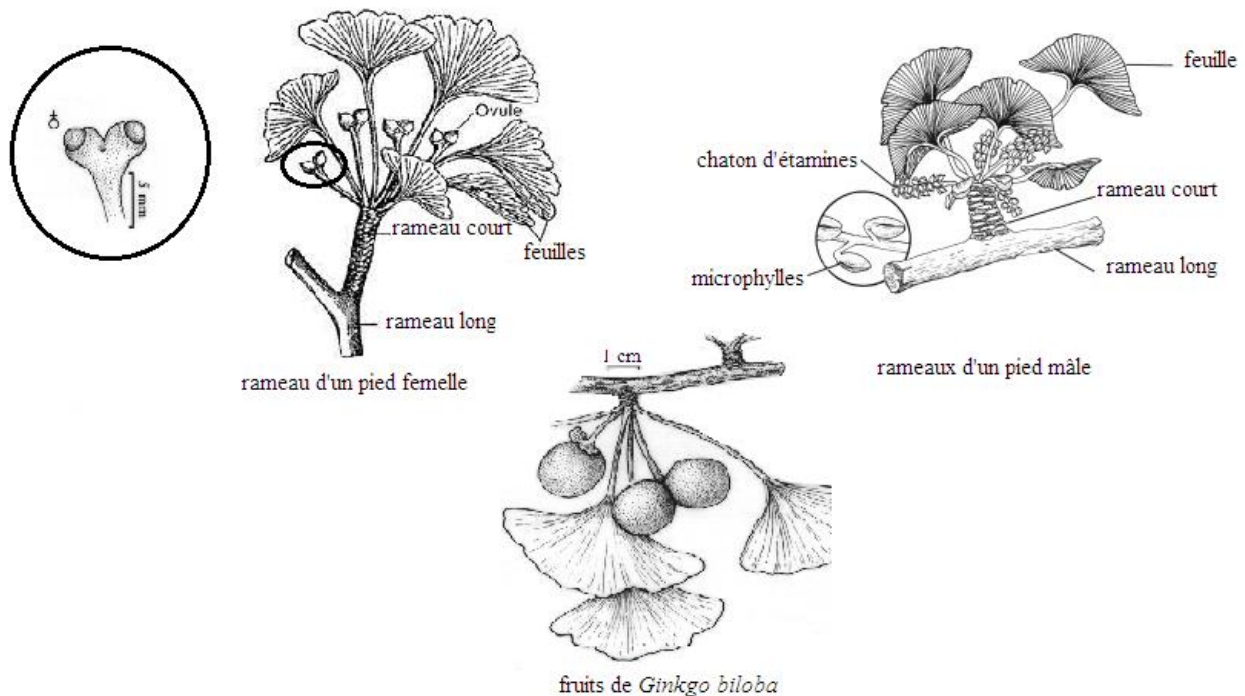
### 3-1-2-3- Classification des Cycadophytes

Chez les Cycadophytes, on compte 300 espèces réparties en deux familles (**Zamiacées** et **Cycadacées**) et 10 genres. (pour certains auteurs, il n'y aurait que 140 espèces réparties sur trois familles).

### 3-1-3- Les Ginkgophytes

Les Ginkgophytes sont un groupe très ancien puisqu'ils seraient présents depuis le permien inférieur (moins de 270 millions d'années). Ils ont atteint leur maximum de diversification au jurassique-Crétacé à l'ère secondaire. Ils ne sont représentés actuellement que par une seule famille, les **Ginkgoacées**, formée d'un seul genre, **Ginkgo**, lui-même constitué d'une seule espèce, **Ginkgo biloba**.

C'est un grand arbre dioïque (2 pieds) 30-40m, originaire de Chine, il est très cultivé en Europe. Il possède deux types de rameaux : des rameaux longs portant des feuilles distantes les unes des autres et des types courts portant des feuilles et organes reproducteurs en bouquets. Il a des feuilles caduques pétiolées, à limbe en éventail, bilobé, à lobes crénelés ( $\neq$ denté) groupés par 3 ou 5 (**figure 83**)



**Fig. 83:** *Ginkgo biloba*.

Le schéma théorique du cycle de reproduction des Cycadophytes peut également être appliqué aux Ginkgophytes car le déroulement des différentes phases est le même. C'est au niveau de la morphologie des organes reproducteurs qu'apparaissent des différences.

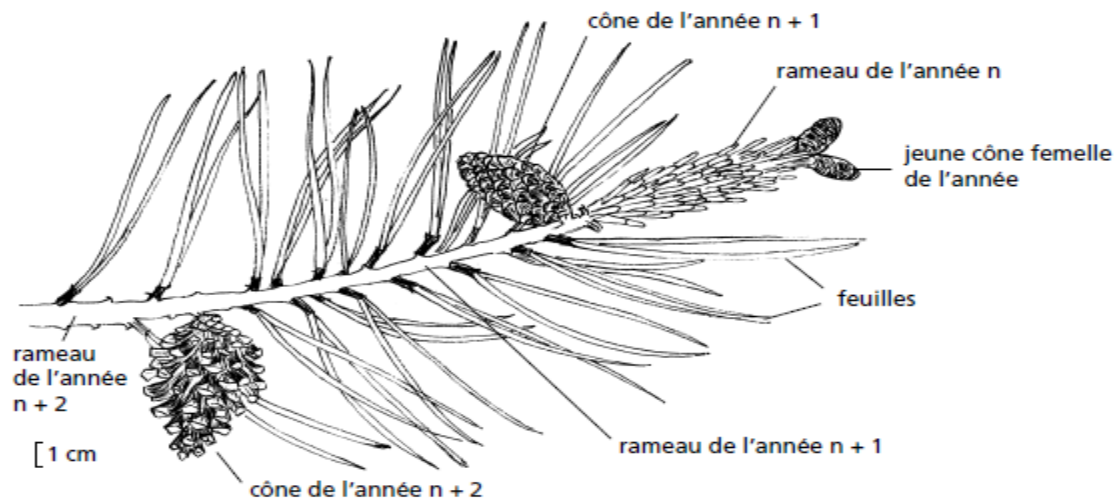
### 3-2- Les Pinophytes

La division des **Pinophytes** ne comprend qu'une classe : celle des **Pinopsida**. Ce sont des plantes vasculaires à ovules nus portés par une écaille dite **ovulifère** ou **séminale**. Ils ne sont pas représentés à l'heure actuelle que par environ 700 espèces.

#### 3-2-1- Caractéristiques généraux des Pinophytes

##### 3-2-1-1- Appareil végétatif des Pinophytes

En général, cet embranchement renferme des plantes ligneuses : arbres, arbustes à **ramification de type latéral**. Leur port est caractéristique en **cône** ou en **pyramide** car la **croissance apicale** est très marquée. En général, les rameaux portent des vraies feuilles : les **euphylls** à limbe **simple** et large (*Podocarpus* et *Agathis*), en aiguilles chez le cèdre et le sapin ou en écailles chez les pins (**figure 84**).

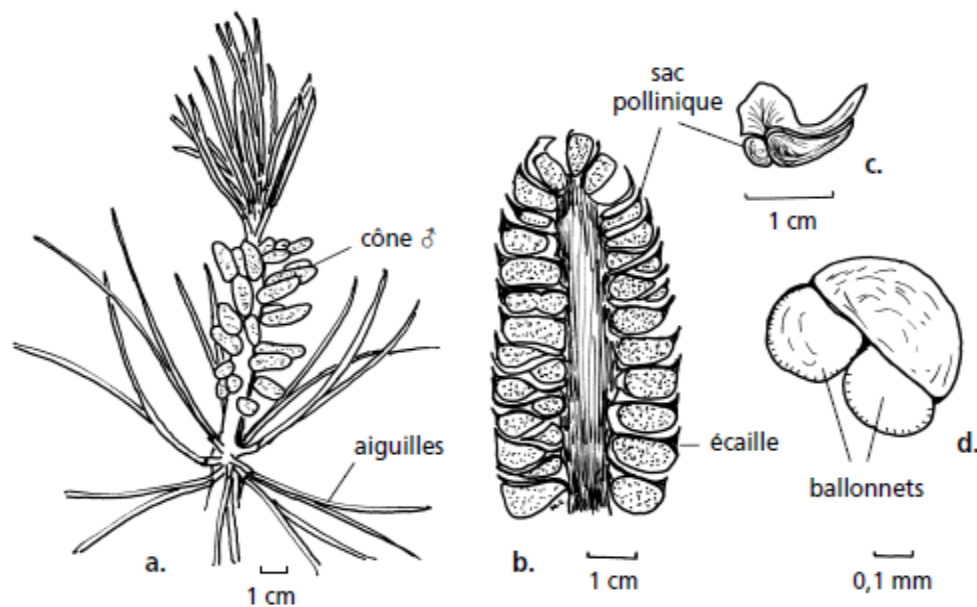
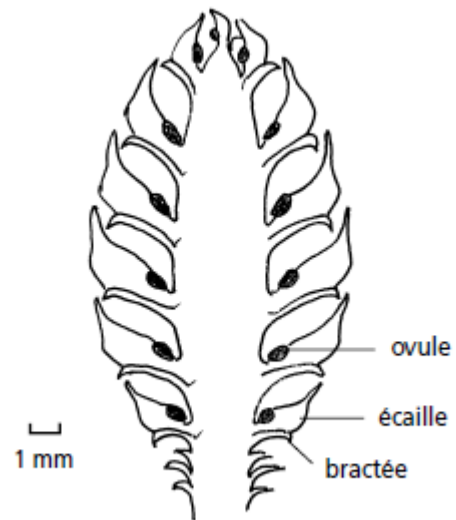


**Fig. 84:** Les cônes femelles sur une branche de pin à la fin du printemps.

##### 3-2-1-2- Appareil reproducteur

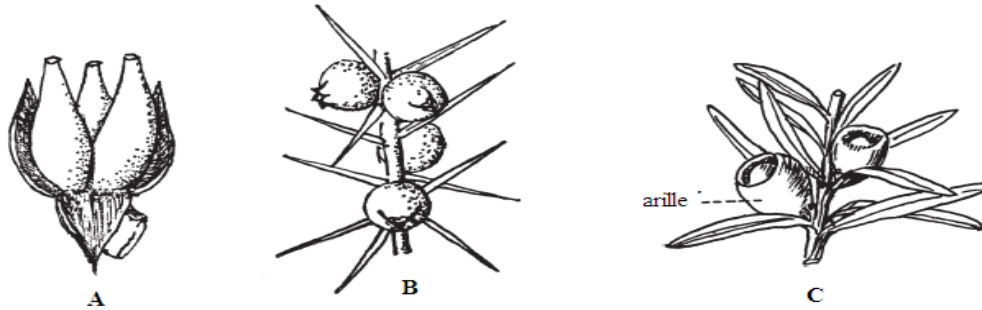
Les organes reproducteurs sont des **cônes** (ou **strobiles**) **mâles** et **des cônes femelles** d'où le nom conifères. Les **cônes femelles** (**figure 85**) sont formés d'écailles portant deux ovules sur la face supérieure et les cônes mâles (**figure 86**) sont formés d'écailles portant deux sacs polliniques sur la face inférieure. Les cônes sont parfois groupés en chatons.

**Fig. 85:** Schéma de la coupe longitudinale d'un jeune cône femelle de pin montrant la disposition des écailles et des ovules.



**Fig. 86:** Les cônes mâles chez le pin sylvestre.

La pollinisation est **anémophile**. Certains conifères (if, genévrier) ne possèdent pas de cônes typiques mais ont parfois les graines entourées **d'arilles** (enveloppe charnue plus ou moins développée autour d'une graine) (**figure 87**).



**Fig. 87:** Cônes des Genévriers (A et B) et de l'if (C). En A, cône jeune au moment de la pollinisation (x 10), constitué de 3 feuilles ovulifères portant chacune un ovule; en B, cônes mûrs (« baies » de Genévrier).

### Cycle de vie

Le grain de pollen germe en émettant une tube pollinique qui transporte les deux gamètes mâles jusqu'à un archégone au contact de l'oosphère. Contrairement ce qui se passe chez les cycadophytes et chez les Ginkgophytes, les gamètes mâles ne sont pas ciliés et ne nagent pas, ils sont conduits jusqu'au bout par le tube pollinique, on parle de **siphonogamie**. L'oosphère est fécondée par l'un des deux gamètes mâles, le deuxième dégénère.

L'oosphère fécondée produit un œuf ou zygote, se développant en embryon. Plusieurs grains de pollen peuvent germer sur in même ovule, donc plusieurs oosphères peuvent être fécondées. Il y a donc formation de plusieurs embryons, on parle donc de **polyembryonie**.

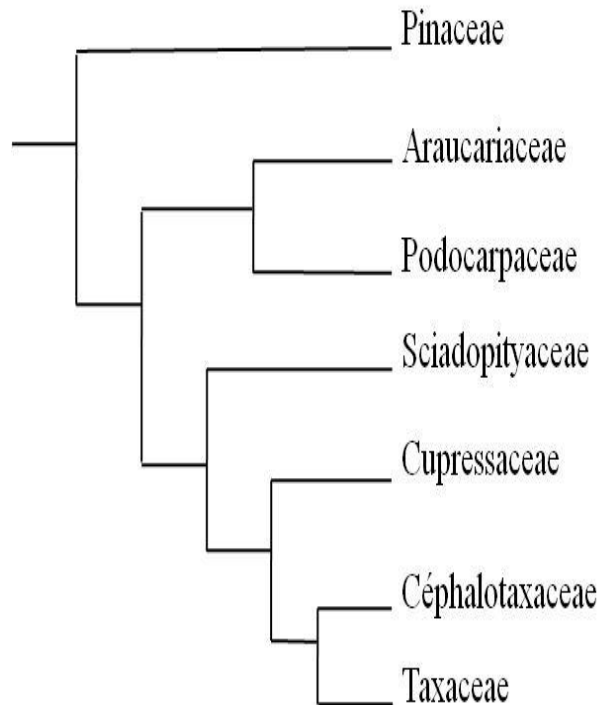
Dans la plupart des cas un seul embryon se développe complètement. Entouré de réserves, il entre en vie ralentie. Les téguments de l'ovule se dessèchent et le protègent jusqu'à sa germination : on a une **graine**.

### 3-2-1-3- Caractères anatomique

- Bois secondaire homoxylé à trachéides à ponctuations aérolées.
- Tissu sécréteurs d'oléorésines (huile et résine) d'où le nom de 'résineux ' à part les Ifs (dépourvus de canaux sécréteurs).



### 3-2-2- Classification des Pinophytes



Les Pinophytes sont divisés en 07 familles, 50 genres et 550 espèces environ. La famille des Pinaceae représente le groupe frère de toutes les autres familles (**figure 89**).

**Fig. 89:** Arbre phylogénétique des Pinophytes.

### 3-3- Les Gnetophytes

Morphologiquement, les espèces qui constituent ce groupe sont très différentes, mais les études moléculaires montrent qu'il s'agit d'un groupe monophylétique.

#### 3-3-1- Biologie

Quelques dizaines d'espèces, sont tous des plantes ligneuses et dioïques (rarement monoïques). Elles ont un port soit arbustif soit lianescent, sauf *Welwitschia mirabilis* qui a un port très particulier.

Les feuilles sont simples, parfois très réduites, opposées ou verticillées. Le bois possède des vaisseaux en plus des trachéides. Il possède aussi, en plus des tissus de soutien et ou de réserves constituant le parenchyme ligneux (ce bois est dit **hétéroxylé**).

Les vaisseaux sont formés de files de cellules dont les parois latérales sont renforcées par la lignine et possèdent des ponctuations aréolées. Les parois transversales ayant disparu, ces files de cellules forment des véritables tuyaux, d'où l'appellation de **vaisseaux**.

L'appareil reproducteur ressemblent à des fleurs réduites (pseudo-fleurs) et sont regroupés en épis ou chatons ou parfois sous forme de cônes. Les pseudo-fleurs femelles possèdent un seul ovule droit et unitégumenté. Au niveau du micropyle, le tégument s'allonge pour former un tube micropylaire. L'ovule possède une ou deux enveloppes supplémentaires. Cet ensemble d'enveloppes non fermées protégeant incomplètement l'ovule d'où le nom Clamydospermes (du grec *khlamys*, manteau ; *sperma*, graine) = *Saccovulées*.

Les pseudo-fleurs mâles sont réduites à des étamines pourvues d'un filet. La pollinisation soit anémophile, soit entomophile grâce à la production de nectar.

A la maturité, les graines sont entourées par des enveloppes charnues ou membraneuses. Ces enveloppes ne sont pas fermées donc on ne peut pas parler de fruit.

### 3-3-2- Reproduction

Les différentes étapes du cycle de reproduction sont les mêmes que chez les pinophytes. Le transport des gamètes mâles est assuré par le tube pollinique, ce qui permet de parler, là aussi, de **siphonogamie**. On note une différence importante dans l'étape de la fécondation ; chez les Gnétophytes, les deux gamètes mâles réalisent la fécondation, on parle alors de **double fécondation** (considérée pendant longtemps comme caractéristique exclusive des angiospermes). La différence entre Gnétophytes et Angiospermes, c'est que :

**Chez les Gnétophytes** : la double fécondation réalisée par les deux gamètes mâles, l'un fusionnant avec l'oosphère, et l'autre avec une autre cellule de l'endosperme, aboutit à la formation de deux embryons dont un seul se développe.

**Chez les Angiospermes**, l'un des gamètes mâles fusionne avec l'oosphère pour donner un embryon et l'autre fusionne avec une autre cellule pour donner un **tissu de réserve**.

3-3-3- Classification des Gnétophytes

Les Gnétophytes ne comptent que trois familles mono-génériques et environ soixante-dix espèces.

- ✚ La famille des **Welwitschiées**, Genre : **Welwitschia**, une seule espèce dans ce genre, **W. mirabilis**.

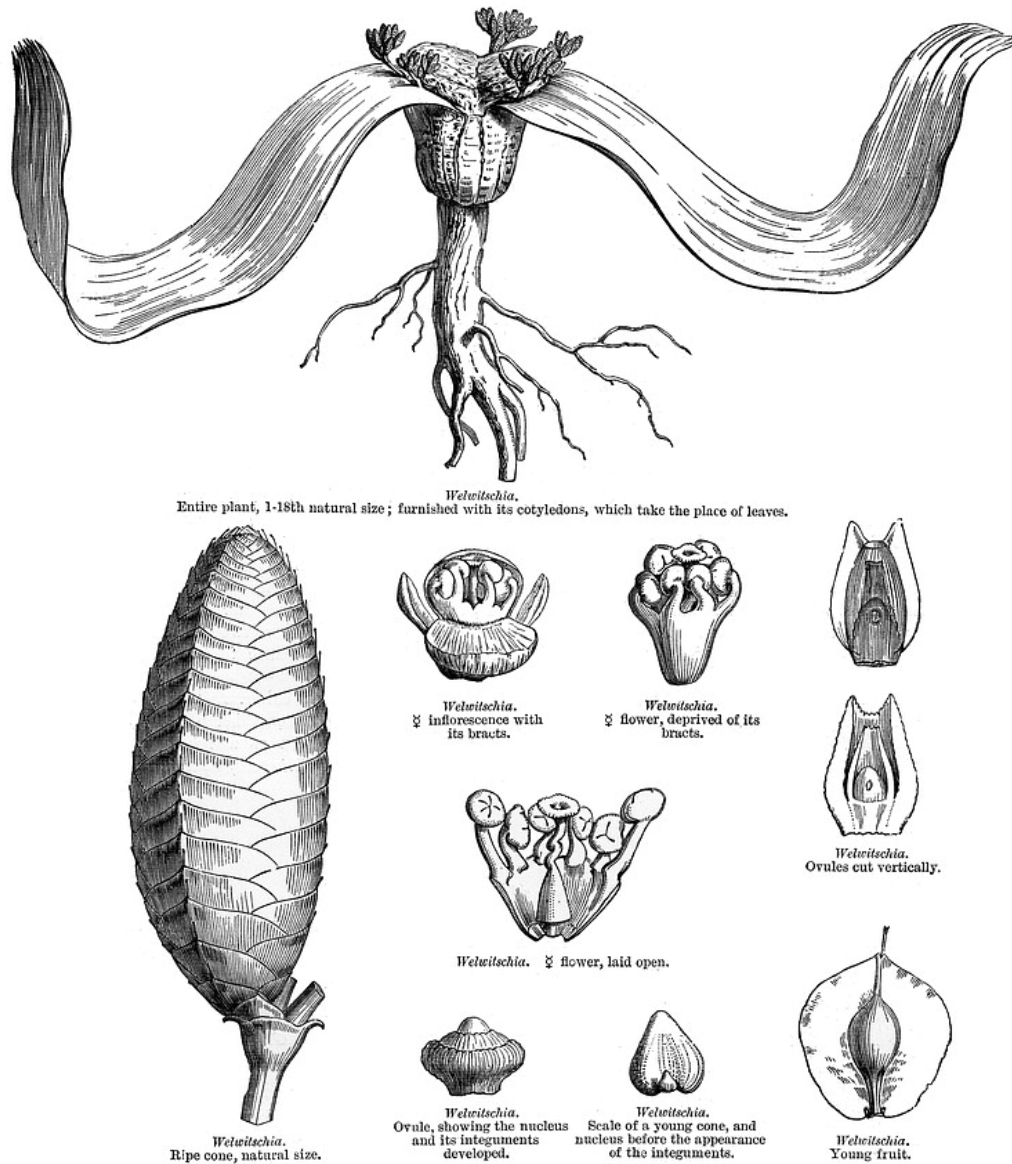
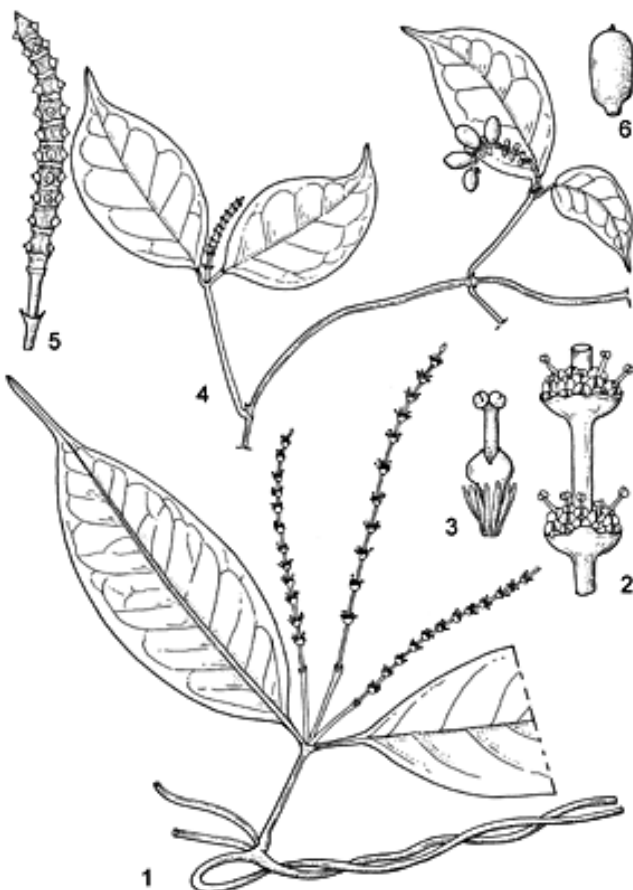


Fig. 90: l'espèce *Welwitschia mirabilis*.

✚ La famille des  
**Ephédracées**, genre  
*Ephedra*

Ce genre compte environ 35 espèces, le plus souvent

**Fig. 91:** les différents organes d'une *Ephedra* sp.



✚ La famille des **Gnétacées**, genre  
*Gnetum*

Environ 30 espèces constituent ce genre. Ce sont des arbustes ou plus souvent des lianes. Les feuilles sont larges pétiolées, à nervures pennée.

**Fig. 92:** *Gnetum africanum* ; 1, Rameau pied mâle ; 2, inflorescence mâle ; 3, fleur mâle ; 4, Rameau pied femelle ; 5, inflorescence femelle ; 6, une graine.

*Chapitre 6*  
*Angiospermes*

## Chapitre 6: Les Angiospermes

Les Angiospermes ou plantes à **ovaire**, constituent le groupe dominant dans la flore actuelle, aussi bien au niveau du nombre d'espèces qu'au niveau des surfaces occupées.

Ils se distinguent des gymnospermes par :

- ✚ Les écailles ovulifères ou carpelles, entourant complètement les ovules d'où le nom des angiospermes (grec *aggeion*: capsule et *sperma*, germe), qui après la fécondation, se transforment en fruit ;
- ✚ Les organes reproducteurs se regroupent en fleurs bisexuées ;
- ✚ Présence d'une double fécondation.

Bien sûr de nombreux autres caractères différencient encore les Angiospermes des groupes précédentes, comme par exemple la germination du pollen sur le stigmate, les racines pratiquement toujours mycorhizées, ....

### 1- Structure de l'appareil végétatif

Il n'existe pas d'appareil végétatif type chez les angiospermes. Toutes les formes et toutes les tailles sont rencontrées. Une grande diversité morphologique au sein de ce groupe, traduit leur grande capacité d'adaptation depuis leur apparition (il y a 130M d'années).

#### 1-1- La tige

La tige est un axe divisé en nœuds, points d'insertion des feuilles, et en entre-nœuds. La tige porte différents types de bourgeons : **les bourgeons à bois** qui évoluent en rameaux feuillés. Ces bourgeons sont souvent petits et pointus, et les **bourgeons à fleurs** qui évoluent en fleurs. Ils sont plus gros et plus ronds. Les bourgeons peuvent être terminaux, axillaires ou adventifs.

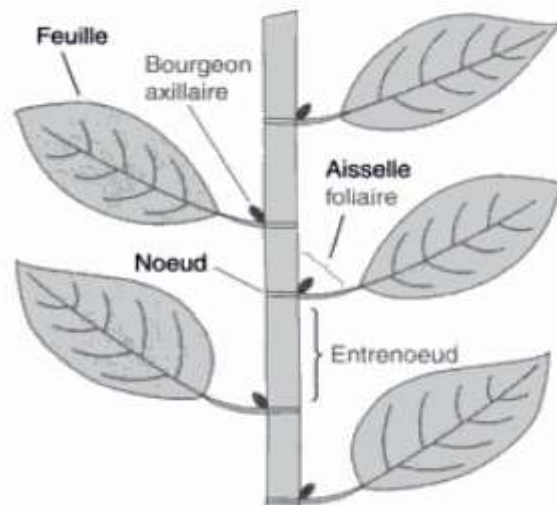


Fig. 93: Schéma générale d'une tige d'angiosperme

Selon l'allure générale de la plante, on peut distinguer deux types de tiges, **herbacées** chez les herbes et **ligneuses** chez les arbres, arbustes et les arborescent.

On peut également distinguer plusieurs formes de tiges selon leurs fonctions:

- + Les **tiges volubiles** s'enroulent en hélice autour d'un support (liseron) permettant aux espèces grimpantes d'accéder à la lumière.
- + Les **stolons** sont des tiges aériennes à croissance horizontale par des entrenoeuds.
- + Les **rhizomes** (gingembre) et les **tubercules caulinaires** (pomme de terre) sont des tiges souterraines hypertrophiées par accumulation de réserves, permettant la survie de la plante pendant la mauvaise saison.
- + Les tiges **succulentes** des *Cactus* ou de certaines *Euphorbes* stockent de l'eau.
- + Les **épines** de certaines espèces (aubépines) sont des tiges transformées assurant une défense contre les herbivores.

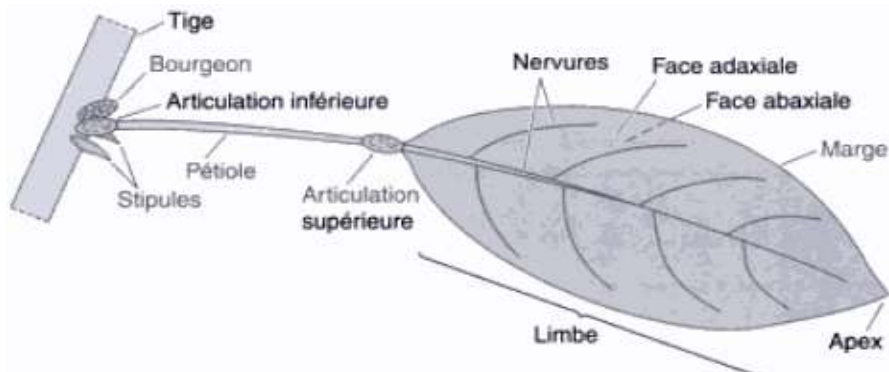
## 1-2- La feuille

La feuille est composée de 3 parties (**figure 94**):

**Le limbe**, a la forme d'une lame aplatie, sa symétrie est bilatérale.

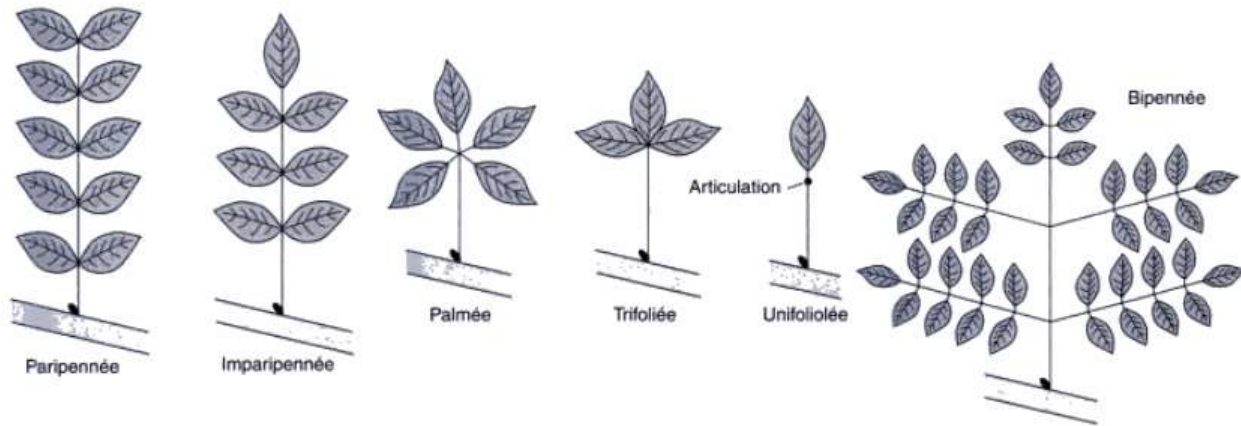
**Le pétiole** a une section souvent arrondie, parfois triangulaire et sa symétrie est bilatérale. Si le pétiole est absent, la feuille est dite **sessile**.

**La gaine** est la partie élargie du pétiole, elle peut porter 2 appendices, ce sont les **stipules**.



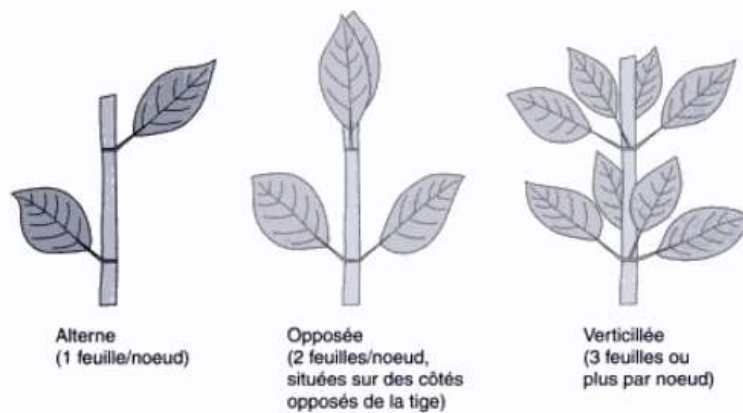
**Fig. 94:** morphologie de la feuille.

Les feuilles peuvent être **simple** entières ou découpées en **folioles (composées)** ; la disposition des folioles varie: réunies au même point, la feuille est composée **palmée** ; insérées à des niveaux différents, la feuille est composée **pennée** (nombre de folioles paire : **paripennée** et un nombre de folioles impaire : **imparipennée**).



**Fig. 95:** Disposition des folioles dans les feuilles composées.

La disposition des feuilles sur la tige est appelée **phyllotaxie**. Lorsqu'une feuille est insérée seule à chaque nœud, la position est **alterne**. Lorsque les feuilles sont insérées par deux au niveau des nœuds, la disposition est **opposée**. Si au moins trois feuilles sont insérées en cercle sur un même nœud, la disposition est verticillée (**figure 96**).



**Fig. 96:** disposition des feuilles sur la tige (phyllotaxie).

Les feuilles peuvent avoir une nervation **parallèle**, cas de nombreuses Monocotylédones ou une nervation **pennée** ou **palmée**, cas de nombreuses Eudicotylédones.

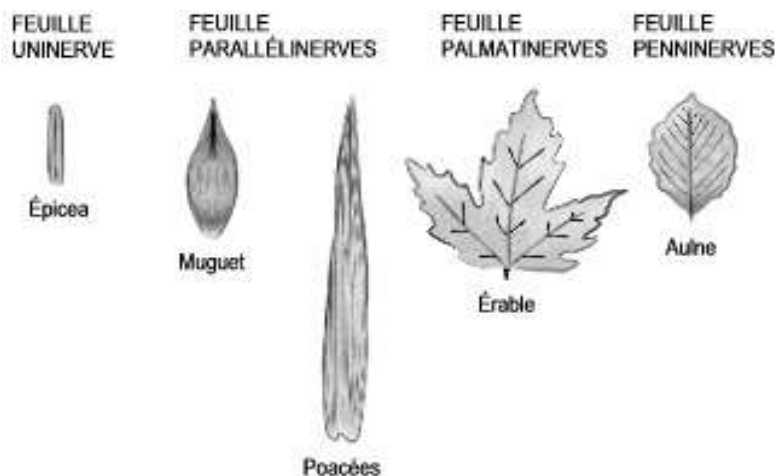


Fig. 97: types de nervation des feuilles.

### 1-3- La racine

On distingue différents types de systèmes racines :

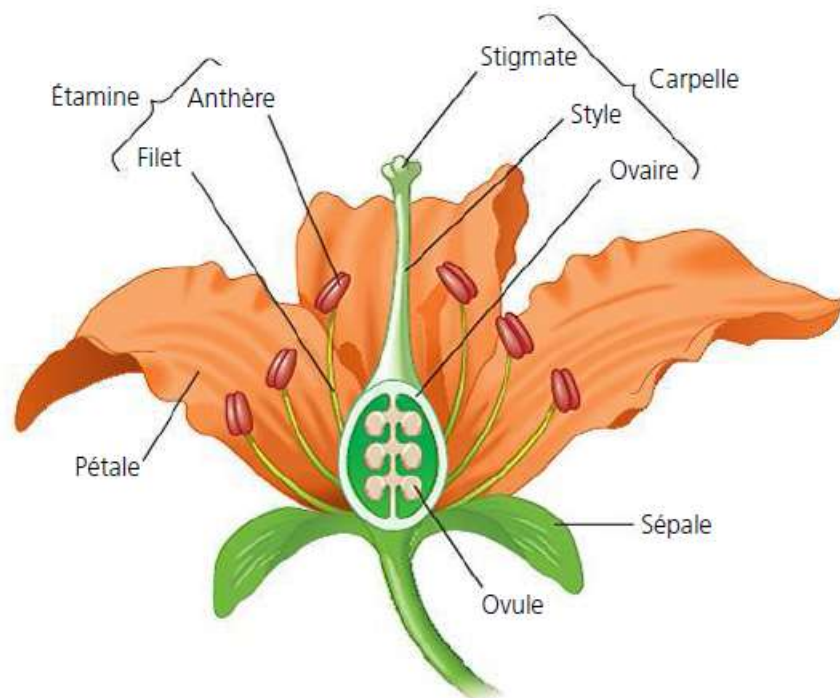
- ✚ **Système racinaire pivotant**: forte racine principale s'enfonçant verticalement et profondément dans le sol, tel un **pivot** sur lequel prennent naissance des racines secondaires. Elles caractérisent beaucoup les Eucotylédones.
- ✚ **Système racinaire fasciculé** : Sans pivot principal, mais constituée de 3 ou 4 racines importantes s'enfonçant obliquement dans le sol et sur lesquelles prennent naissance des racines adventives. Elles sont toutes d'égale importance. Elles caractérisent beaucoup les Moncotylédones.
- ✚ **Système racinaire adventive** : Il s'agit de racines prenant naissance sur une tige aérienne ou souterraine ou toutes autres parties du végétal.
- ✚ **Les racines traçantes**: se développent horizontalement sous la surface du sol, et sur lesquelles des tiges et des racines complémentaires peuvent apparaître, ce qui permet de donner naissance à une nouvelle plante.

Il existe aussi d'autres types de racines, moins courants, et qui permettent à certaines plantes de pousser dans des conditions spécifiques : les racines **crampons**, racines **aériennes**, racines **venteuses**,....

## 2- Structure de l'appareil reproducteur

### 2-1- la fleur

Les organes reproducteurs sont groupés en **fleurs**, organes qui chez les angiospermes sont très évolués et prennent souvent des formes et des couleurs attrayantes. Chaque fleur est située à l'extrémité d'un **pédoncule floral** inséré sur la tige à l'aisselle d'une feuille modifiée appelée **bractée (figure 98)**. Les pièces florales sont disposées en 4 cycles appelés verticilles. De l'extérieur vers l'intérieur, on distingue :



**Fig. 98:** La structure d'une fleur type.

#### 2-1-1- Le périanthie

Il comprend 2 verticilles de pièces stériles:

**Le calice** : il est formé par les **sépales**, pièces verdâtres, d'aspect foliacé.

**La corolle** : elle est constituée des **pétales** fixés au-dessus des sépales et alternant avec ceux-ci. Les pétales sont des pièces non chlorophylliennes mais ils sont colorés par des pigments. A la base de chaque pétale, une glande microscopique, le nectaire, sécrète un liquide sucré : le **nectar**.

Si les pièces du périgone sont toutes identiques, régulièrement disposées autour d'un axe, la fleur est dite, régulière à symétrie radiaire ou actinomorphe. La fleur est dite **dialypétale**, si les pétales sont libres. Elle est **gamopétale** quand les pétales sont soudés.

La fleur est dite **irrégulière**, quand la symétrie est **bilatérale** ou **zygomorphe**, les pièces du périgone ne sont pas toutes identiques, disposées de part et d'autre d'un plan de symétrie. **Les fleurs zygomorphes** peuvent être **dialypétales** (Fabacées, Orchidacées) ou **gamopétales** (Lamiacées).

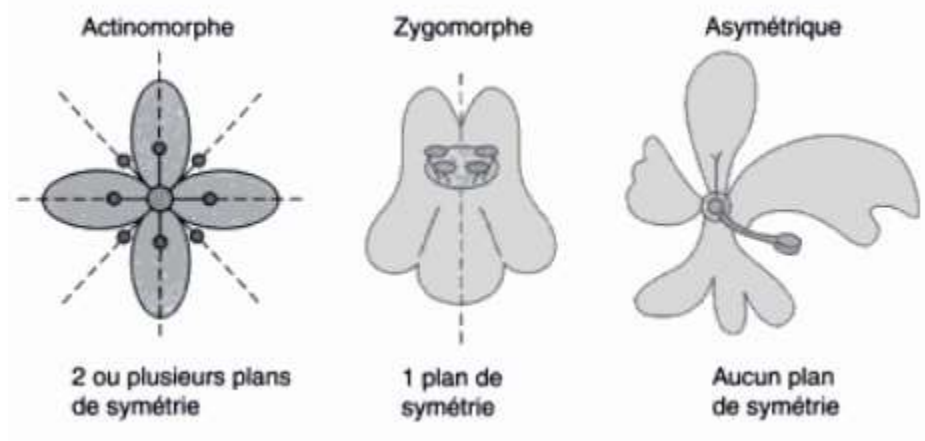
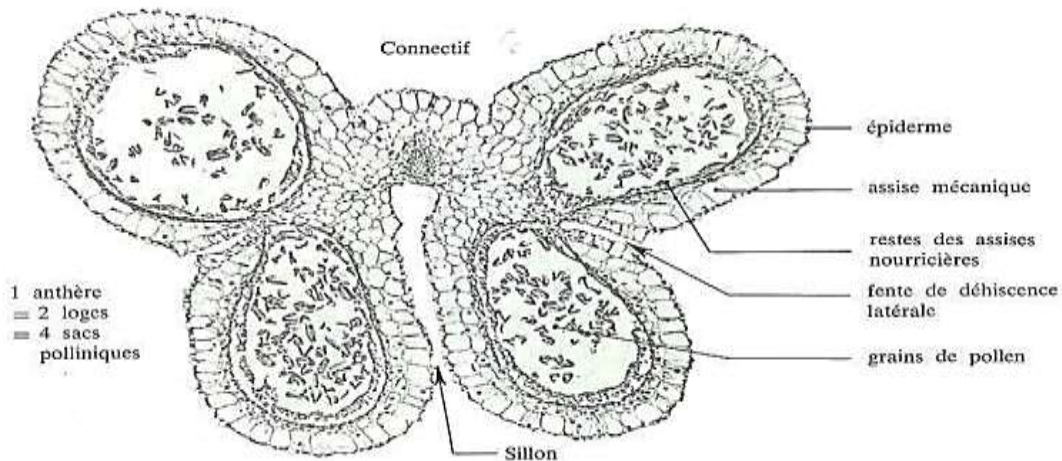


Fig. 99: types de symétries florales.

### 2-1-2- L'androcée

Il est formé de l'ensemble des **étamines**. Chaque étamine comprend un **filet** fin et allongé, surmonté d'une partie élargie, l'**anthère**, qui est constituée de **2 sacs polliniques** contiennent le **pollen** (figure 100).

Le nombre d'étamines par fleur varie de 1 à 50. Il est souvent caractéristique de la famille (10 chez les Fabacées). Les étamines sont libres (Rosacées) ou soudées. Elles peuvent être soudées par le filet (Malvacées) ou par les anthères (Astéracées).



**Fig. 100:** anthère mûre.

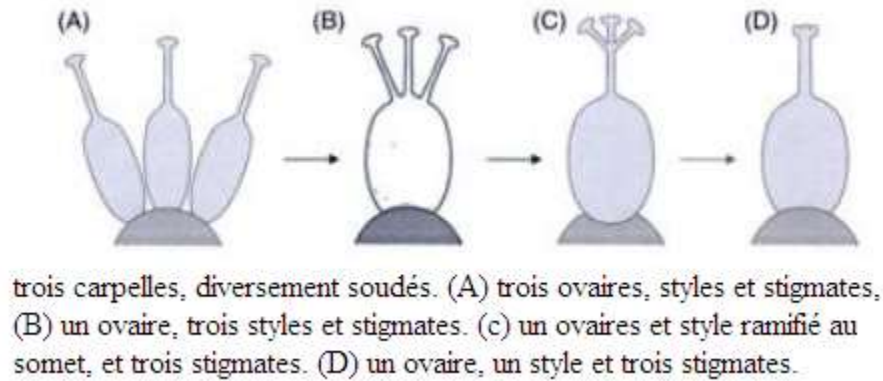
Généralement, les fleurs ont deux cycles d'étamines (**diplostémone**), rarement un seul cycle (**isostémone**). L'androcée peut être **polystémone** (nombreuses) ou **méristémone** (division des étamines). Les étamines peuvent être **libres**, on parle alors d'androcée **dialystémone**, ou **soudés** et l'androcée est dit **gamostémone**. Si toutes les étamines sont soudées, on parle **d'androcée monadelphie**. Si une partie seulement des étamines est soudée, on parlera **d'androcée diadelphie**. Si les anthères sont soudées, on parle alors de **synanthérie**.

### 2-1-3- Le gynécée

L'ensemble des **carpelles** correspond au **gynécée** ou **pistil** (pour certains auteurs, le terme pistil est à réserver à un gynécée formé de plusieurs carpelles soudés). Ils sont situés au centre de la fleur. Ils correspondent à des feuilles fertiles qui sont renfermées sur les **ovules** et dont les bords se sont soudés. Les ovules ne sont plus du tout en contact avec le milieu extérieur. Les ovules prennent naissance au niveau d'un bourrelet plus au moins renflé appelé **placenta**.

Un carpelle est formé d'une partie basale renflée contenant le ou les ovules, l'**ovaire**. Le plus souvent, l'ovaire se continue par un filament plus ou moins effilé pouvant atteindre 30 cm chez le maïs, le **style**, qui se termine par une partie plus ou moins renflée, le **stigmat** (**figure 101**).

Les carpelles peuvent être **indépendants** ou **soudés**. Quand la fleur comprend plusieurs carpelles soudés, leurs styles peuvent être libres ou soudés en un style unique.



**Fig. 101:** variabilité du gynécée chez les angiospermes.

Les ovules sont formés d'un pied (le **funicule**), et d'une partie renflée possédant deux téguments ouverts au niveau du micropyle. La partie renflée de l'ovule peut se situer dans le prolongement du funicule (ovule **droit** ou **orthotrope**), perpendiculairement au funicule (ovule **campylotrope**) ou être complétement basculée avec le micropyle orienté vers la base du funicule (ovule **renversé** ou **anatrophe**) (**figure**).



**Fig. 102:** différents types d'ovules.

La disposition des ovules à l'intérieur de l'ovaire ou **placentation**, est en rapport avec le mode de groupement des carpelles.

- ✚ **placentation pariétale:** la cavité de l'ovaire ne contient qu'une seule loge, et donc pas de cloisons, les ovules se trouvent sur la paroi de l'ovaire (pensée, violette, orchidée)
- ✚ **placentation axillaire:** la cavité de l'ovaire contient autant de loges que de carpelles soudés, les cloisons qui séparent les loges sont formées par les parois soudées de 2 carpelles voisins. Les ovules étant attachés au centre, le long des cloisons. (lis, tulipe)

- ✚ **placentation centrale:** la cavité de l'ovaire ne contient qu'une cavité, les ovules sont fixées sur une colonne centrale (primevère, Caryophyllacées)

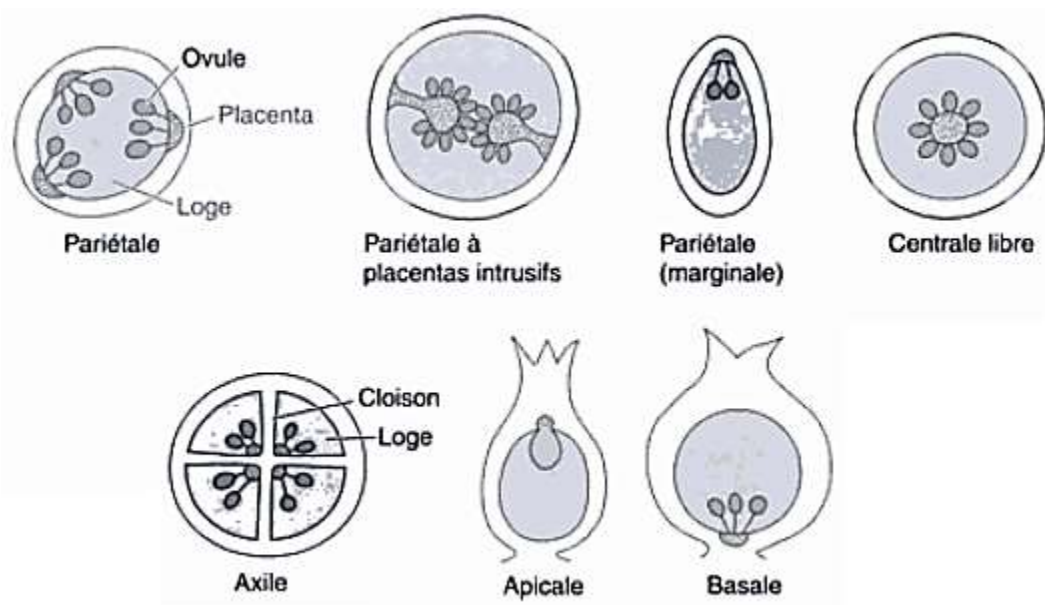


Fig. 103: Types de placentation.

## 2-2- L'inflorescence

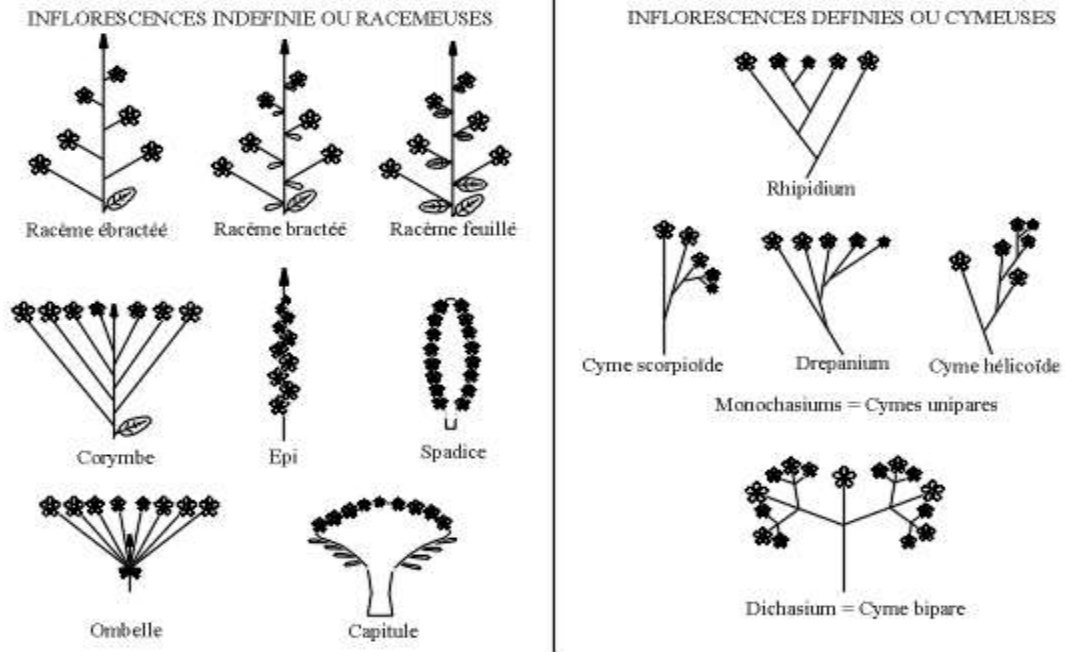
Les fleurs se groupent en **inflorescence**, dont on distingue deux types fondamentaux: la **grappe** et la **cyme**.

**La grappe** : la zone de croissance se situe à l'extrémité de l'axe de l'inflorescence ; de sorte que l'axe a une croissance indéfinie (la grappe simple, l'épi, le corymbe, le capitule, l'ombelle) (**figure 104**);

**La cyme**: la zone de croissance terminale évolue en fleur; 2 nouvelles zones de croissances apparaissent de part et d'autre de cette fleur ; la croissance des axes est donc définie (la cyme bipare, unipare, scorpioïde,...) (**figure 104**).

**Les inflorescences composées** résultent du groupement de plusieurs inflorescences en un même ensemble; les inflorescences secondaires peuvent être du même type ou différentes. ex : grappe de grappes , ombelle d'ombelles ( Apicées ) ,épi d'épillets ( Poacées ) , grappe de cymes ( vigne).

Inflorescences simples



Inflorescences composées

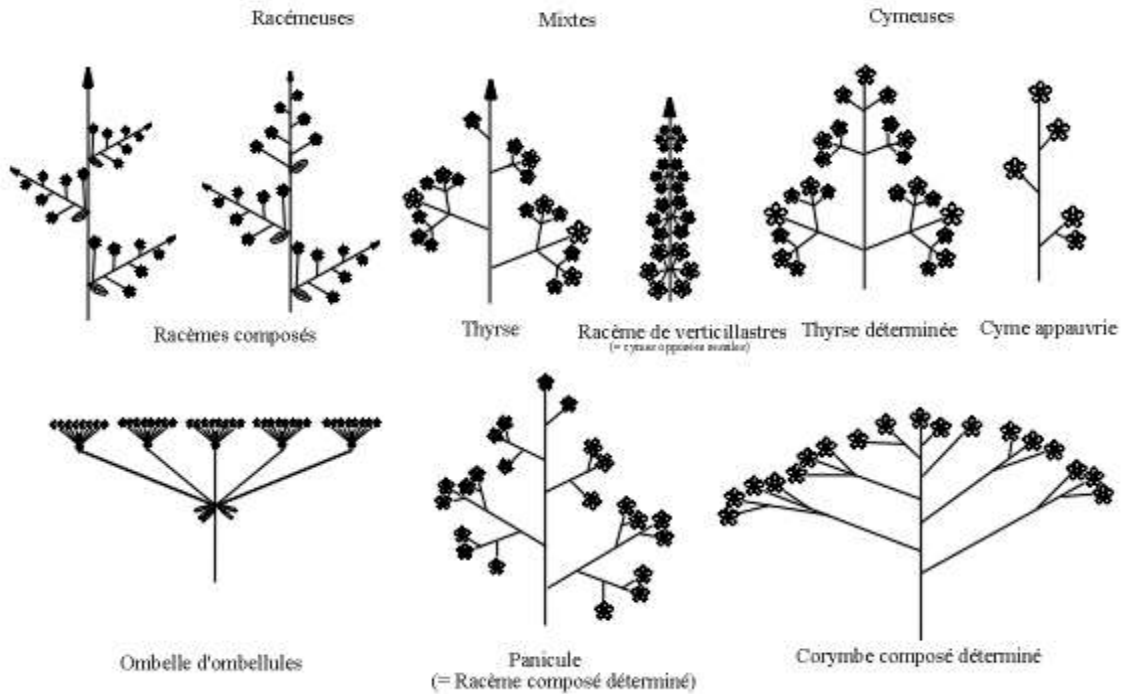


Fig. 104: les différents types d'inflorescences.

## 2-3- Cycle de développement des angiospermes

### 2-3-1- Pollinisation

On peut distinguer deux étapes successives dans la pollinisation :

#### ✚ La translation du pollen d'une fleur à l'autre

La fleur, lorsqu'elle est **très visible** et de **couleur vive**, est souvent **pollinisée** par les insectes (**entomogamie** ou pollinisation **entomophile**), beaucoup plus précise que celle assurée par le vent (**anémogamie** ou pollinisation **anémophile**). Le transport par les insectes et le vent permet la pollinisation entre individus différents (pollinisation croisée).

Toutefois certaines fleurs sont devenues secondairement **autogames**: elles sont alors fécondées par leur propre pollen (**autogamie**): parfois dans ce cas la corolle ne s'ouvre pas.

L'autogamie élimine les aléas du transport du pollen mais n'assure plus le brassage des gènes entre individus différents. Les plantes de grande culture (céréales...) sont généralement autogames.

#### ✚ La germination et la progression du tube pollinique jusqu'à l'ovule

Lorsqu'il y a compatibilité, les grains de pollen germent: le noyau reproducteur se divise en 2 gamètes tandis que, aux dépens de réserves de cellulose de l'intine, se forme un tube pollinique qui chemine dans le tissu conducteur du style, puis dans la cavité ovarienne et finalement atteint l'ovule et l'oosphère.

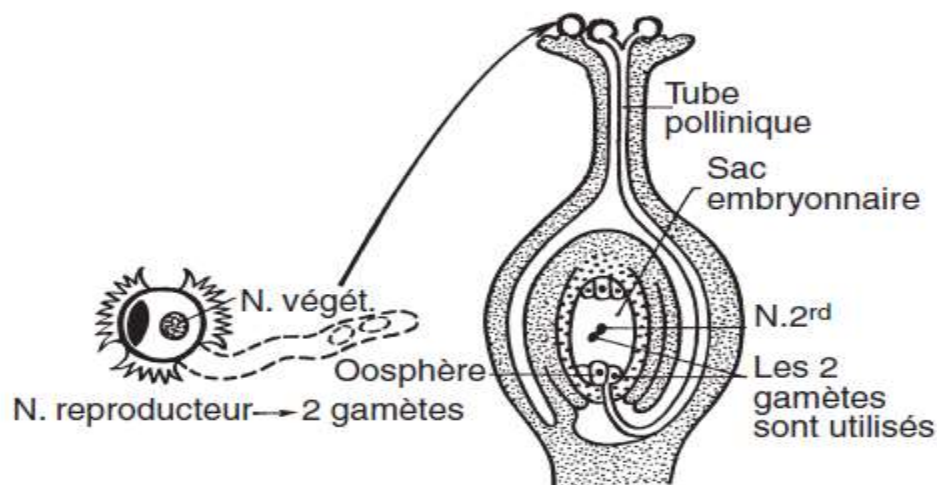
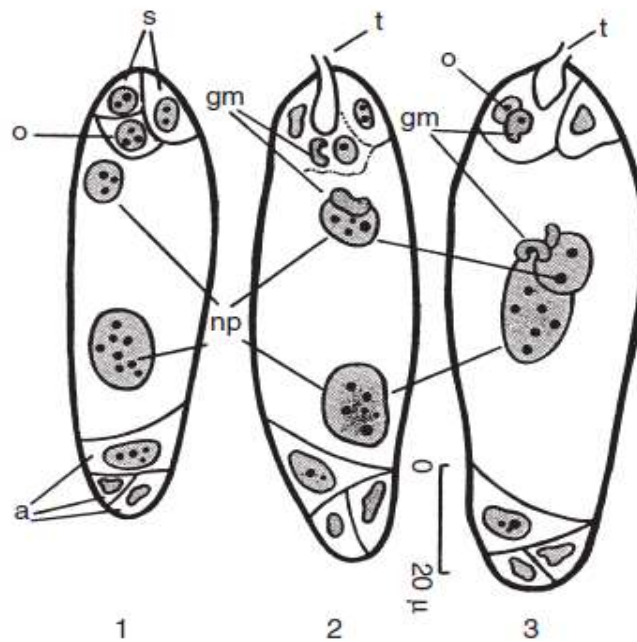


Fig. 105 : Germination du pollen et croissance du tube pollinique.

### 2-3-2- La double fécondation

Avant tout, les Angiospermes sont caractérisées par une double fécondation. L'un des gamètes engendré par la division du noyau reproducteur du grain de pollen féconde l'oosphère pour donner l'«œuf embryon» à  $2n$  chromosomes qui se divise aussitôt et donne naissance à l'embryon.

Les deux noyaux polaires du sac embryonnaire, fusionnent pour former le noyau secondaire à  $2n$  chromosomes, lequel s'unira au deuxième gamète («double fécondation») pour donner l'«œuf albumen» à  $3n$  chromosomes, qui donne naissance à un massif cellulaire à  $3n$  chromosomes: l'albumen (du latin, album, blanc; la couleur des albumens est blanche).

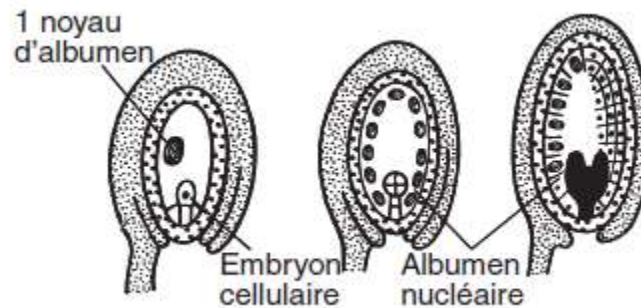


.. La double fécondation. En 1, sac embryonnaire avant la fécondation; En 2, les deux gamètes mâles (gm) libérés par le tube pollinique (t) vont, l'un vers l'oosphère, l'autre vers l'un des noyaux polaires. Remarquer la destruction de l'une des synergides, due à l'impact du tube pollinique. En 3, les gamètes sont prêts à fusionner : en haut, l'un des gamètes mâles et l'oosphère, au centre l'autre gamète mâle et les noyaux polaires qui se réunissent préalablement (o, oosphère; s, synergides; np, noyaux polaires; a, antipodes).

**Fig. 106:** la double fécondation.

### 2-3-3- Formation de l'albumen

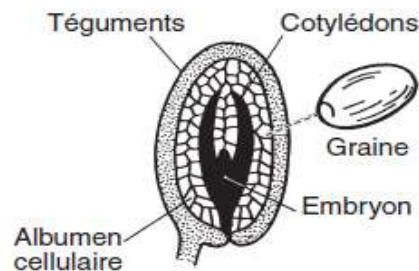
L'albumen digère les restes du prothalle, envahit toute la cavité de l'ovule; c'est un tissu riche en substances de réserves, aux dépens duquel l'embryon va se développer (**figure 107**). L'albumen, tissu à  $3n$  chromosomes, se substitue ainsi au prothalle femelle, tissu à  $n$ , dans son rôle **nourricier**: c'est là un perfectionnement, la nourriture de l'embryon étant mieux assurée par un tissu de réserve polyploïde.



**Fig. 107:** Formation de l'albumen.

### 2-3-4- Formation de la graine

Lorsque l'embryon a différencié un point végétatif, amorce de la future tige, une ou deux feuilles (les cotylédons) et une racicule (**figure 108**), l'ensemble se déshydrate et entre à l'état de vie ralentie à l'abri des téguments sclérifiés; l'ovule fécondé s'est transformé en **graine**, laquelle, après un temps de repos plus ou moins long, germera et donnera une nouvelle plante feuillée.



**Fig. 108:** Formation de la graine.

Lorsque la graine germe, l'embryon se développe et devient un sporophyte, qui fleurit quand il atteint la maturité. Alors le cycle de développement des angiospermes peut se résumer ainsi :

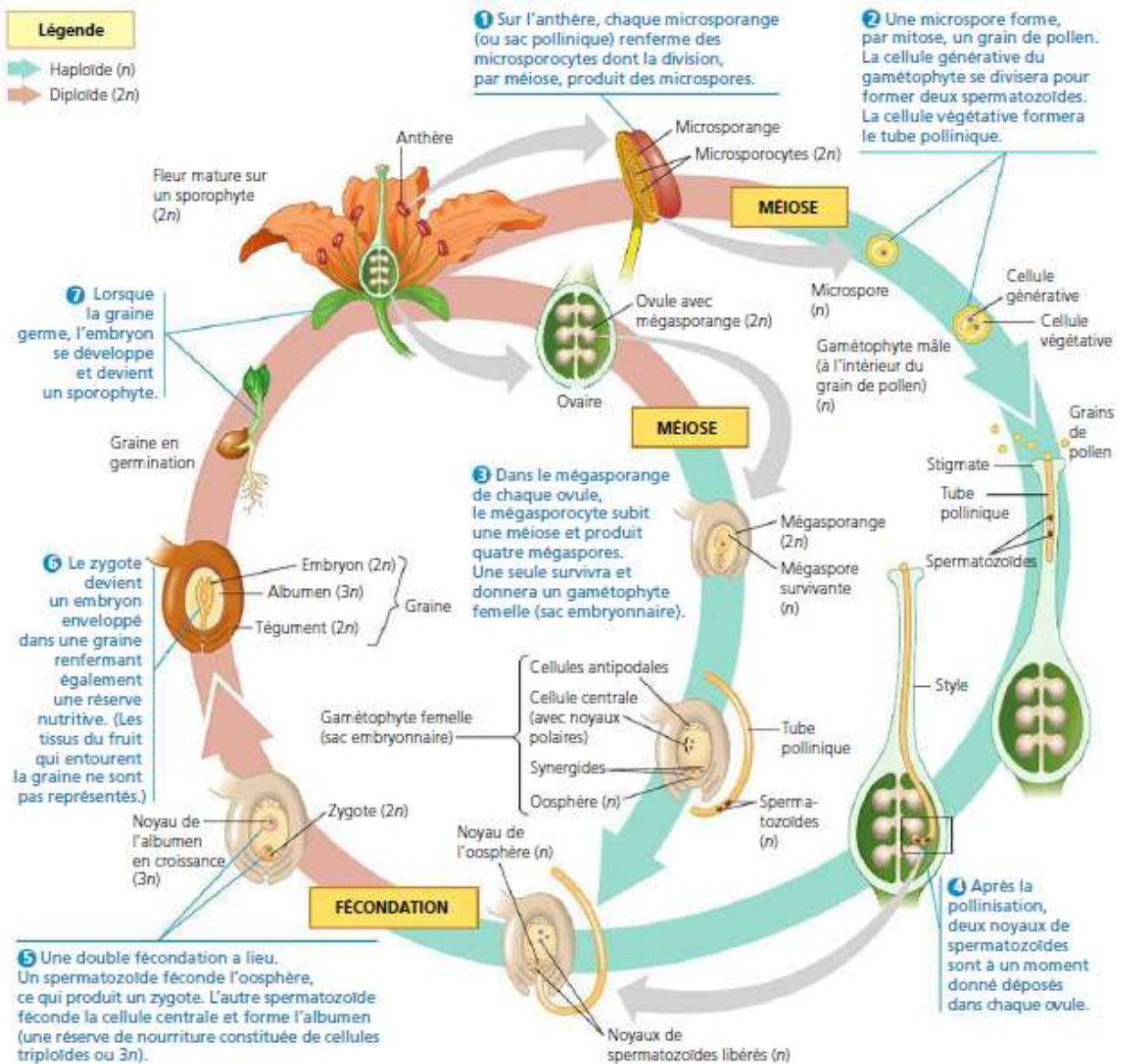


Fig. 109: Cycle de développement d'une Angiosperme.

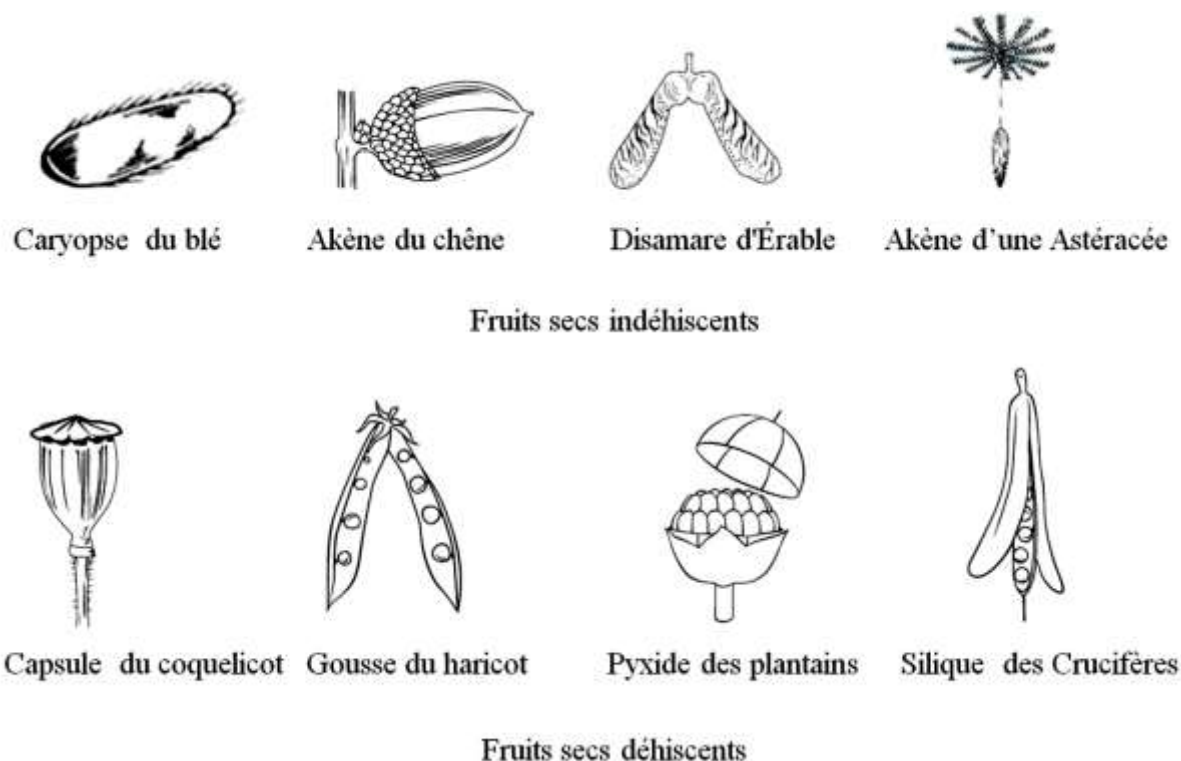
## 2-4- Le fruit

Après la fécondation, tandis que les ovules deviennent des graines, l'**ovaire** se transforme en un **fruit** qui peut être déhiscent ou indéhiscent. L'ovaire constitue une avancée évolutive majeure: il procure une meilleure protection des ovules; il intervient dans les mécanismes d'auto-

incompatibilité et facilite le guidage du tube pollinique; après la fécondation, devenu fruit, il intervient dans la dissémination des graines.

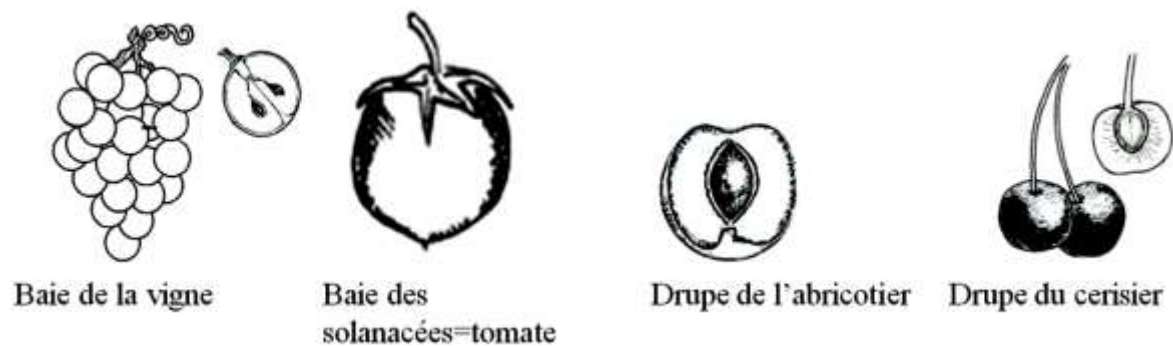
Le fruit ou **péricarpe**, comporte l'**épicarpe**, qui dérive de l'épiderme externe de l'ovaire; **mésocarpe**, constitué par le parenchyme médian, et l'**endocarpe**, qui correspond à l'épiderme interne de l'ovaire. Lorsque d'autres parties de la fleur que le gynécée se développent et deviennent importantes, l'ensemble est appelé **faux fruit**. Selon le nombre et la soudure éventuelle des carpelles, la nature du péricarpe (**sec** ou **charnu**) et sa **déhiscence**, on distingue trois types de fruits :

- ✚ Les fruits secs, qui peuvent être **déhiscents** (ex. gousse, silique ou capsule) ou **indéhiscents** (ex. caryopse, akène, samare) (**figure 110**).



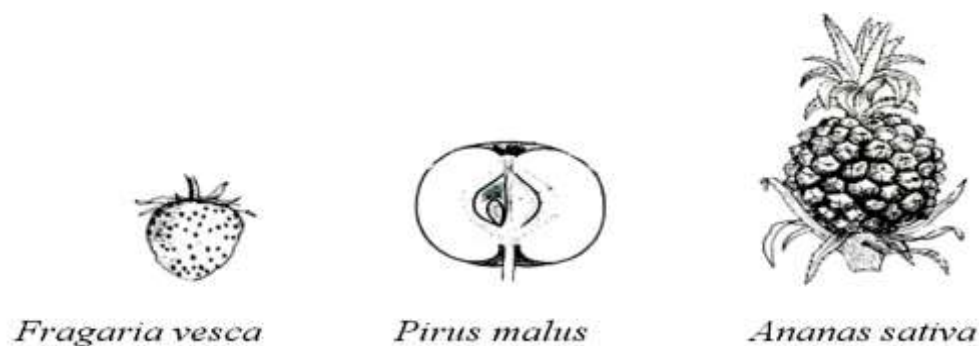
**Fig. 110:** Différents types de fruits secs.

Les fruits **charnus** qui peuvent être des **baies** (fruits à pépins) où le péricarpe est entièrement **charnu** (ex. tomate, raisin), ou des **drupes** (fruits à noyau) où l'épicarpe et le mésocarpe sont charnus mais l'endocarpe est lignifié pour former un noyau (ex. cerise, amande, olive) (**figure 111**).



**Fig. 111:** Différents types de fruits charnus.

Les fruits **complexes** ou **faux fruits**, intègrent d'autres parties de la fleur autre que le carpelle (ex. figue = réceptacle de l'inflorescence, fraise = réceptacle floral à ovaire supère, pomme = réceptacle floral à ovaire infère, Ananas = toute l'inflorescence) (**figure 112**).



**Fig. 112:** Types de fruits complexes.

### 3- Classification des Angiospermes (*Magnoliophyta*)

Classiquement l'embranchement des Magnoliophyta est divisé en deux classes: les Monocotylédones et les Dicotylédones, ceci sur la base de caractères morphologiques variés tels que la **nerivation des feuilles**, le **nombre de cotylédons**, le **nombre d'ouvertures du pollen**, etc.

Cependant, de nombreuses études phylogénétiques, fournissent une image différente par rapport aux divisions classiques. Ainsi, la première dichotomie des plantes à fleurs les séparent en Monoaperturées (Paléodicotylédones et Monocotylédones) versus triaperturées (Eudicotylédones).

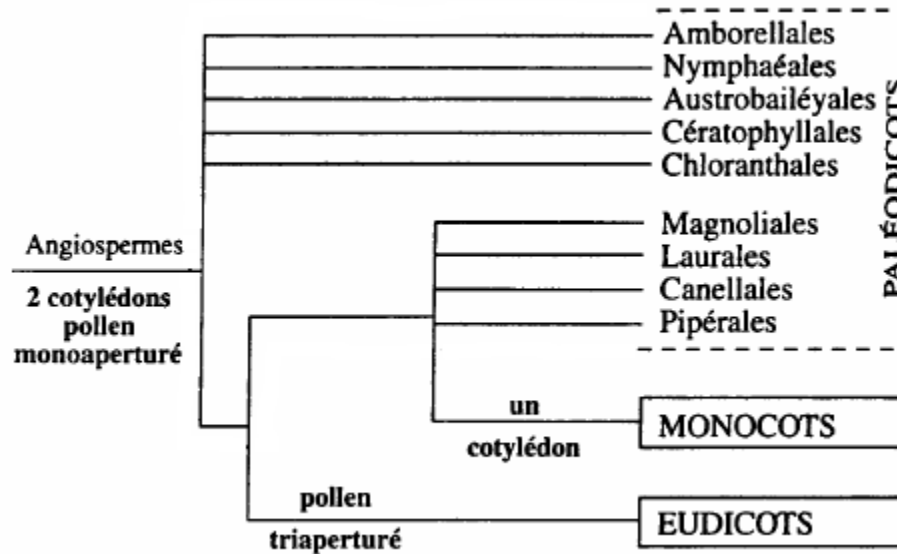


Fig. 113: Phylogénie des Angiospermes.

### 3-1- Angiospermes monoaperturées

Ce sont les Angiospermes regroupant des caractères archaïques tels que pollen uniaperturé, **fleurs** trimères, homoïo- ou achlamydes et/ou à disposition spiralée. Ce groupe comporte deux classes et cinq sous classe :

#### 3-1-1- la classe des Paléodicotylédones

Dicotylédones archaïques à port **arboré** ou **herbacé**, **pinnatinervurées**. Ce sont des Angiospermes à **pollen uniaperturé** ou dérivé, à vaisseaux **imparfaits** ou absents, à **fleurs trimères** et/ou à **disposition spiralée**. Elles partagent de nombreuses plésiomorphies avec les Monocotylédones, citons le pollen de type inaperturé, l'absence de spécialisation au niveau du périanthe (corolle et calice indistincts ou absents), les étamines souvent imparfaites. Cette classe est subdivisée en deux sous classes :

#### Sous-classe 1: Protoangiospermes

Plantes surtout herbacées, aquatiques ou terrestres, à feuilles souvent parallélinerves (monocotylédonoïdes) et à fleurs homoïochlamydées, monochlamydées ou achlamydées. Cette sous classe comprend 5 ordres ; Amborellaceae, Nymphaeales, Austrobailéales, Ceratophyllales et Chloranthales.

### Sous- classe 2 : Magnoliidae

Les plantes de cette sous classe sont des Arbres, arbustes, ou herbes souvent odorants (à huiles essentielles) avec des fleurs trimères, homoïochlamydées ou monochlamydées (4 ordres ; Magnoliales, Laurales, Canellales, et Pipérales.

### 3-1-2- la classe des Liliopsidae (monocotylédones)

Plantes à un seul cotylédon, à port généralement herbacé, à feuilles parallélinerves. Cette classe regroupe 3 sous classes (**figure 114**):

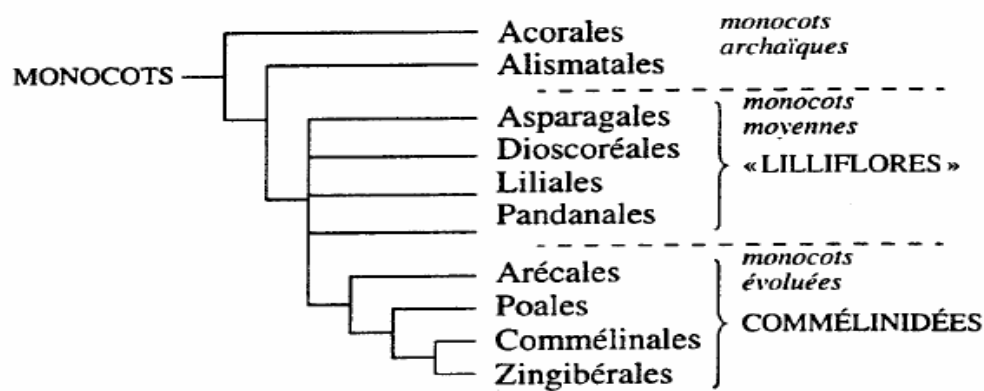


Fig. 114: Phylogénie des monocotylédones.

### Sous classes 1 : Monocots archaïques

Plantes toujours herbacées, héliophytes ou aquatiques; feuilles cordiformes ou sagittées à nervation réticulée; fleurs dialycarpellaires ou monocarpellaires; fleurs grandes dichlamydées hétérochlamydées ou fleurs petites achlamydées groupées en inflorescences compactes et à périanthe non scarieux.

### Sous classes 2 : Liliiflores

Plantes herbacées ou parfois ligneuses; feuilles le plus souvent étroites, à nervation parallèles ou parfois latifoliées; fleurs gamocapellaires; fleurs typiquement dichlamydées homoïochlamydées pétaloïdiennes ; fleurs avec nectaires, adaptées à l'entomogamie ; albumen très dur, rarement amylicé, avec réserve de lipides; fruits sont capsule ou baie.

**Sous classes 3 : Commelinidae**

Fleurs hétérochlamydées souvent imparfaites et regroupées en pseudanthès (inflorescences plus ou moins compactes); périanthe devenant scarieux, avec adaptations à l'anémogamie; placentation apicale ou basale avec loge uni-ovulée; albumen amylicé avec grains d'amidon composés, sans réserve lipidique; fruit sec indéhiscent ou drupe

**3-2- Angiospermes supérieur (tri-aperturées) : la classe des Eudicotylédones**

Ce sont les Angiospermes regroupant des caractères dérivés tels que **pollen triaperturé, fleurs souvent tétra- ou pentamères, hétérochlamydes, gamopétales**. Ce groupe comporte une classe (Eudicotylédones) et trois sous classes :

**3-2-1- Sous-classe des Eudicots archaïques**

Eudicots présentant des **caractères primitifs**, soit à fleur apétale ou trimère ou spiralée, soit à fleur encore à **carpelles libres**.

**3-2-2- Sous-classe des Rosidae**

Eudicots **moyennement évolués**, à fleurs dichlamydées nettement 4-5 mères, **dialypétales** et le plus souvent à **carpelles soudés**.

**3-2-3- Sous-classe des Asteridae**

Eudicots **très évolués**, à fleurs dichlamydées nettement 4-5 mères, **sympétales** et le plus souvent à **carpelles soudés**.

*Références  
bibliographiques*

## Références bibliographiques

- Abbayes, H. (Des), Chadefaud, M., Feldmann, J., Ferren, Y., Gaussen, H., Grasse, P.P. Prevot, A.R., 1987.** Précis de botanique. Tome 1, Végétaux inférieurs. 2e Ed. Masson, Paris, New-York, Barcelone, Milan. 722 pages.
- Aharon Oren, A.; Ventura, S. 2017.** Review: The current status of cyanobacterial nomenclature under the “prokaryotic” and the “botanical” code. *Antonie van Leeuwenhoek*, 13 pages. DOI: 10.1007/s10482-017-0848-0.
- AlgaeBase. M.D. Guiry et G.M. Guiry. 2012.** World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway., consulté le 1 mai 2013.
- Amirouche, N., Bouguedoura, N., Hadj-Arab, H. 2010.** Botanique, algues, champignons, lichens. Ed. Houma. Alger. 88 pages.
- Amirouche, N., Bouguedoura, N., Hadj-Arab, H., 2010.** Botanique. Les embryophytes. 2e Ed. OPU. Alger. 103p.
- Anand, N., Thajuddin N., Dadheech, P.K. 2019.** Chapter 3, Cyanobacterial Taxonomy: Morphometry to Molecular Studies. (Ed.) Mishra, A.K., Tiwari, D.N., Rai, A.N. *Cyanobacteria: From Basic Science to Applications*. Academic Press, Elsevier.
- Burgisser, L., & Cailliau, A. 2012.** Les mousses : Liste Rouge, inventaire et initiation aux bryophytes du canton de Genève. Conservatoire et Jardin Botaniques de la ville de Genève. 168 pages.
- Biye, E.H., Balkwill, K. & Cron, G.V., 2014.** A clarification of *Gnetum* L. (Gnetaceae) in Africa and the description of two new species. *Plant. Syst. Evol.*, 300, 263–272.
- Coste, C. 2016.** Introduction à la biologie et l’écologie des lichens Un exemple de diversité lichénique : la Corse. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, 152, 96-100.
- De Clerck, O., Bogaert, K.A., Leliaert, F. 2012.** Chapter 2: Diversity and Evolution of Algae: Primary Endosymbiosis. (Ed.) Piganeau, G. *Genomic Insights into the Biology of Algae. Advances in Botanical Research*. Volume 64, Pages 1-466.
- De Reviere, B. 2002.** Biologie et phylogénie des algues, Tome 1 et Tome 2, Ed. Belin.

- Des Abbayes, 1978.** Précis de botanique - Tome 1, Végétaux inférieurs. Masson.
- Eikrem, W., Medlin, L. K., Henderiks, J., Rokitta, S., Rost, B., Probert, I., ... & Edvardsen, B. 2016.** Haptophyta. In Handbook of the Protists (pp. 1-61). Springer.
- Iltis, André. 1980.** "Les algues." Lévêque C.(ed.). Flore et faune aquatiques de l'Afrique sahélo-soudanienne 1 (1980): 9-61.
- Jackson, C., Clayden, S., Reyes-Prieto A. 2014.** The Glaucophyta: the blue-green plants in a nutshell. *Acta Soc. Bot. Pol.* 84(2):149–165.
- John, David M., and Fabio Rindi. 2015.** Filamentous (nonconjugating) and plantlike green algae. In. *Freshwater Algae of North America*. Academic Press, 375-427. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385876-4.00008-6>
- Hall, John D., and Richard M. McCourt. 2015.** "Conjugating green algae including desmids." *Freshwater Algae of North America*. Academic Press, 429-457. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385876-4.00009-8>.
- Haury, J., Thiébaud, G., Coudreuse, J., Muller, S.** Les lichens, Bryophytes, Ptéridophytes, et Phanérogames aquatiques. *Ingénieries n° spécial*, P 23-36.
- Iltis, André. 1980.** Les algues. In. *Flore et Faune aquatiques de l'Afrique sahélo-soudanienne 1*: 9-61.
- Komárek, Jiří, and Jeffrey, R. Johansen. 2015.** Coccoid cyanobacteria. In *Freshwater Algae of North America*. Academic Press, 75-133. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385876-4.00003-7>.
- Komárek, Jiří, and Jeffrey R. Johansen., 2015.** Filamentous cyanobacteria. In. *Freshwater Algae of North America*. Academic Press, 135-235. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385876-4.00004-9>.
- Laberche, J-C. 2010.** *Biologie végétale*. Troisième éd., Dunod, Paris. 305 pages.
- Lee, R. E. 2018.** *Phycology*. Cambridge university press.

- Lejoly, J. 2005.** Systématique des plantes à fleurs en relation avec les principales plantes médicinales. Vol II, *Notes à l'usage des étudiants du 1er Bac en Sciences pharmaceutiques, Université Libre de de Bruxelles.* 295 pages.
- Leliaert, F., Smith, D. R., Moreau, H., Herron, M. D., Verbruggen, H., Delwiche, C. F., & De Clerck, O. 2012.** Phylogeny and molecular evolution of the green algae. *Critical reviews in plant sciences*, 31(1), 1-46.
- Ourari, M. 2016.** Cours de Botanique. Office des publications universitaires. 1, Place central, Ben Aknoun, Alger, Algérie. 99P.
- Ozenda, P., Clauzade, G., 1970.** Les lichens : Etude biologique et flore illustrée. Masson et C<sup>ie</sup> Editeurs, Boulevard Saint-Germain, Paris. 800P.
- Price, D.C., Steiner, J.M. Su Yoon, H., Bhattacharya, D., Löffelhardt W. 2017.** Chapter 2: Glaucophyta. (Ed.), Archibald, J.M. et al., *Handbook of the Protists*, Springer International Publishing.
- Reece, J.; Urry, L.; Cain, M.; Wasserman, S.; Minorsky, P.; Jackson, R. 2012.** *Campbell Biologie.* Pearson Education Inc., 9ème édition, 1458 pages.
- Reynauld, J. 2011.** Botanique : Comprendre la botanique « Histoire, évolution, systématique ». Ed. Ellipses Edition Marketing S.A., Paris cedex. 238p.
- Rodríguez-Ezpeleta, N.; Brinkmann, H.; Burey, S.C.; Roure, B.; Burger, G.; Löffelhardt, W.; Bohnert, H.J.; Philippe, H.; Lang, B.F. 2005.** Monophyly of Primary Photosynthetic Eukaryotes: Green Plants, Red Algae, and Glaucophytes. *Current Biology*, 15: 1325–1330. DOI: 10.1016/j.cub.2005.06.040.
- Roland, J-C.; El Maarouf-Bouteau, H.; Bouteau, F. 2008.** Atlas Biologie végétale : Organisation des plantes sans fleurs, algues et champignons. Dunod, Paris, 7<sup>ème</sup> édition, 138 pages.
- Roland, J-C.; Vian, B. 1985.** Atlas de Biologie végétale. Tome I, Organisation des plantes sans fleurs. Ed. Masson.

**Ruggiero, M. A., Gordon, D. P., Orrell, T. M., Bailly, N., Bourgoin, T., Brusca, R.C., Cavalier-Smith, T., Guiry, M.D., Kirk, P.M. 2015.** A Higher Level Classification of All Living Organisms. PLoS ONE 10(4): e0119248. doi:10.1371/journal.pone.0119248.

**Sheath, Robert G., and John D. Wehr. 2015.** Introduction to the freshwater algae. In *Freshwater Algae of North America*. Academic Press, 2015. 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385876-4.00001-3>.

**Spichiger, R.E. ; Savolainen, V.V. ; Figeat, M. ; Jeanmonod, D. 2002.** Botanique systématique des plantes à fleurs. Une approche phylogénétique nouvelle des Angiospermes des régions tempérées et tropicales. 2e Ed. Presses polytechniques et universitaires normandes. 413p.

**Stanier, R.Y.; Doudoroff, M.; Adelberg, E.A. 1963.** "The principles and practice of pure culture methods." *The Microbial World*, 2nd ed., Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.

**Stegenga, H., Bolton, J.J. and R. J. Anderson. 1997.** Seaweeds of the South African west coast. *Contributions from the Bolus Herbarium* 18: 655pp.

**Sukenik, A.; Zohary, T.; Padisák, J. 2009.** Cyanoprokaryota and Other Prokaryotic Algae. In, *Encyclopedia of Inland Waters*. Elsevier Inc., 138-148.

**Vincent W.F. 2009.** Cyanobacteria. (Ed.), Likens, G. E. (2010). *Plankton of inland waters*. Academic Press. pp 226-232.

**Wehr, J.D., Sheath, R.G., Kociolek, J.P. 2015.** *Freshwater Algae of North America*. Academic Press, Elsevier.

[https://uses.plantnet-project.org/en/Gnetum\\_africanum\\_\(PROTA\)](https://uses.plantnet-project.org/en/Gnetum_africanum_(PROTA))

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f5/Cyanobacterium-fr.svg>.