

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ferhat Abbas Sétif 1
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



Polycopié de Cours de Botanique

Destiné aux étudiants de 2^{ème} Année Biologie LMD

Conçu et préparé

Par

Dr. HANI Meriem



Année Universitaire 2022/2023

Introduction à la botanique

La partie de la biologie qui traite des plantes et, par tradition, des procaryotes, des champignons et des algues, est **la botanique**. L'étude des plantes s'est poursuivie pendant des milliers d'années mais, comme toutes les branches de la science, elle ne s'est diversifiée et spécialisée que pendant le vingtième siècle. Jusqu'à la fin des années 1800. **La botanique** est cette partie de l'histoire naturelle qui a pour objet l'étude des végétaux. Elle nous apprend à les connaître, à les distinguer et à les classer. Cette science ne consiste pas, comme on le croit généralement, dans la connaissance pure et simple du nom donné aux différentes plantes ; mais elle s'occupe aussi des lois qui président à leur organisation générale, de la forme, des fonctions de leurs nombreux organes, et des rapports qui les unissent les uns avec les autres.

La botanique était une branche de la médecine, réservée principalement aux médecins qui se servaient des plantes dans des buts médicaux et qui s'intéressaient, dans le même but, à la découverte de ressemblances et de différences entre plantes et animaux.

Aujourd'hui, cependant, c'est une discipline scientifique importante avec de nombreuses subdivisions : la **physiologie végétale** étudie le fonctionnement des plantes, c'est-à-dire comment elles captent et transforment l'énergie et comment elles croissent et se développent ; la **morphologie végétale** étudie la forme des plantes ; l'**anatomie végétale** étudie leur structure interne ; la **taxonomie** et la **systématique des plantes** interviennent pour leur donner un nom et les classer, ainsi que pour étudier les relations entre elles ; la **cytologie** étudie la structure et le fonctionnement ; la **génétique** est l'étude de l'hérédité et de la variation ; la génomique est l'étude du contenu de génomes entiers ; la **biologie moléculaire** étudie la structure et la fonction des molécules biologiques ; la **botanique économique** est l'étude de l'utilisation des plantes par l'homme dans le passé, le présent et l'avenir ; l'**ethnobotanique** étudie l'utilisation des plantes dans des buts médicaux et autres par les peuplades indigènes ; l'**écologie** étudie les relations entre les organismes et leur environnement ; la **paléobotanique** étudie la biologie et l'évolution des plantes fossiles.

Le terme « **botanique** » vient du grec *botanê*, qui signifie « **plante** », dérivé du verbe *boskein*, « **nourrir** ». Cependant, les plantes ne sont pas seulement une source de nourriture, mais elles interviennent dans notre vie de bien d'autres façons. Elles nous procurent des fibres pour les vêtements, du bois pour les meubles, l'abri et le combustible, du papier pour les livres (comme la page que vous êtes en train de lire), des épices pour la saveur, des médicaments pour les soins et l'oxygène que nous respirons. Nous dépendons totalement des plantes. Les plantes interpellent en outre intensément nos sens, et notre vie profite de la beauté des jardins, des parcs et des zones naturelles dont nous disposons.

L'étude des plantes nous a donné une meilleure perception de la nature de toute vie et elle continuera dans cette voie au cours des années à venir. Grâce à l'ingénierie génétique et à d'autres formes de la technologie moderne, nous venons d'entrer dans la période la plus passionnante de l'histoire de la botanique, avec la possibilité de transformer les plantes, par exemple pour la résistance aux maladies, l'élimination des parasites, la production de vaccins, la fabrication de plastiques biodégradables, la tolérance aux sols fortement salins, la résistance au gel et l'enrichissement en vitamines et minéraux de denrées alimentaires comme le maïs et le riz.

Ce polycopié s'intéresse à tous les organismes qui ont traditionnellement été étudiés par les botanistes : non seulement les plantes, mais aussi les procaryotes, champignons et protistes autotrophes (algues). Par tradition, les eucaryotes et les protistes non photosynthétiques ont été le domaine des zoologistes. Bien que nous ne considérons pas les algues, les champignons comme des plantes, et nous ne dirons pas dans ce polycopié que ce sont des plantes, ces organismes sont étudiés ici parce que c'est la tradition et parce qu'ils sont normalement considérés comme faisant partie de la botanique dans les programmes, de même que la botanique elle-même était d'habitude considérée comme faisant partie de la médecine. En outre, beaucoup de procaryotes (comme les bactéries fixatrices d'azote) et de champignons (les champignons des mycorhizes) ont des relations symbiotiques bénéfiques avec leurs plantes hôtes. La virologie, la bactériologie, la phycologie (étude des algues) et la mycologie (étude des champignons) sont de plein droit des champs d'investigation propres bien définis, mais on les rassemble encore vaguement sous le chapeau de la botanique.

- **Définitions, notions et critères de classification.**

Depuis l'Antiquité, les classifications botaniques se sont succédées. D'abord basées sur l'utilité des plantes; elles se sont ensuite tournées vers l'étude morphologique avec les progrès des moyens d'observation lors de la Renaissance. Quand la théorie sur l'évolution apparût, elles se basèrent alors sur la réunion de plantes parentes. Cette dernière façon de classer le monde végétal fait aujourd'hui référence et profite des progrès scientifiques dans le domaine de la biologie moléculaire.

- **Nomenclature binomiale**

Chaque espèce, depuis Linné, est désignée par deux mots latins; c'est ce que l'on appelle la **nomenclature binomiale**. Le premier est le nom de genre, le second le nom d'espèce. Ex. : *Rosa canina* et *Rosa arvensis* sont deux espèces distinctes que l'on confond vulgairement sous le nom d'Églantier et qui appartiennent au genre *Rosa*.

De plus, pour être complet, le nom d'espèce est suivi par le nom, symboliquement abrégé (par ex.: L., pour Linné), du premier botaniste qui l'a décrite.

- ✓ **Principes fondamentaux de la nomenclature**

Les règles internationales de nomenclature ont été établies en 1867, au premier Congrès international de botanique, à Paris.

a. Les règles en sont fixées par les articles et recommandations du Code international de la nomenclature botanique.

b. Il y a hiérarchisation des noms avec terminaisons différentes selon le rang de l'entité à nommer (noms de sous-familles, de familles, de tribus, etc.). Au-dessus du rang d'ordre, le Code n'énonce pas de règles strictes.

c. Une seule langue, morte donc stable, est utilisée : le latin.

d. Les espèces sont nommées d'après un système binaire. Un nom d'espèce est formé de deux parties : la première est le nom de genre, la seconde est l'épithète spécifique; l'ensemble forme un *binom* (et non binome, qui est un terme mathématique).

Exemple. - *Andropogon gayanus* : *Andropogon* : nom de genre: *gayanus* : épithète spécifique. Il faut toujours faire suivre le nom d'espèce par le nom de l'auteur (ou des auteurs) qui l'ont créé.

Exemple. - *Andropogon gayanus* Kunth.

✓ *Du Règne à la sous-forme, catégories obligatoires*

Tout groupe taxonomique, qu'il s'agisse d'une famille, d'une espèce ou d'une variété, est appelé un « taxon ». Les noms de taxons supérieurs au rang d'espèce sont composés d'un seul mot ; les noms de sous-tribus et de rang supérieur ont une terminaison spécifique. Seuls certains rangs taxonomiques sont obligatoires. On trouvera ci-dessous une liste des taxons les plus couramment utilisés chez les plantes, les algues et les champignons avec leur terminaison. Les rangs obligatoires sont indiqués en gras (Tab.01).

Tableau 01: une liste des taxons les plus couramment utilisés chez les plantes, les algues et les champignons avec leur terminaison

RANG	PLANTES	ALGUES	CHAMPIGNONS
Règne/Regnum	-tae		
Division/Phylum	-phyta		-mycota
Sous-division/Sous-phylum	-phytina		-mycotina
Classe	-opsida	-phyceae	-mycetes
Sous-classe	-idae	-phycidae	-mycetidae
Super-ordre	-anae		
Ordre	-ales		
Sous-ordre	-ineae		
Super-famille	-acea		
Famille	-aceae		
Sous-famille	-oideae		
Tribu	-eae		
Sous-tribu	-inae		

✓ *Notion d'espèce, critère de ressemblance*

La notion d'espèce est d'abord intuitive et ne semble pas poser de problème. En fait, on considérera l'espèce comme une collection d'individus entre lesquels *les différences sont faibles*, alors qu'entre deux espèces, les différences sont plus ou moins profondes.

.C'est ce qu'on appelle le *critère de ressemblance* : « *l'espèce est la collection des individus nés les uns des autres, ou issus de parents communs et de tous ceux qui leur ressemblent autant qu'ils se ressemblent entre eux* » (Cuvier).

Le verbe *ressembler* doit être pris au sens large : les caractères biochimiques, physiologiques, cytologiques, sexuels, chromosomiques entreront en considération. L'identité de ces caractères sera suffisante pour se traduire en particulier par une fécondité indéfinie des individus issus les uns des autres. C'est ce qu'on appelle le *critère d'interfécondité* souvent énoncé comme un second critère de l'espèce, mais qui n'est, en réalité, qu'une conséquence du critère de similitude.

Au regard de la biologie moléculaire, l'espèce se définit comme l'ensemble des individus susceptibles *d'échanger de l'information génétique*. Il n'en reste pas moins que, pratiquement, *l'espèce est définie par des caractères morphologiques, qui sont seuls évidents et faciles à observer*. Comment en effet, savoir quand on récolte deux plantes, si celles-ci sont issues l'une de l'autre ou de parents communs? Comment prouver qu'elles sont indéfiniment fécondes entre elles? Comment connaître rapidement leurs structures biochimiques? Il s'ensuit que la *notion concrète d'espèce*, basée essentiellement sur les caractères morphologiques visibles, est *empirique*.

✓ *Variabilité de l'espèce, notion d'évolution*

Bien plus, l'espèce n'est pas suffisamment fixe pour se prêter à une définition rigoureuse. *L'espèce varie*; c'est presque un de ses caractères essentiels. L'espèce est en perpétuel devenir : Gaudry, paléontologiste français, la définit comme « *l'ensemble des individus qui ne sont pas encore assez différenciés pour cesser d'avoir des descendants communs* ».

En effet, on ne doit pas considérer, comme le firent les premiers naturalistes, que les espèces avaient été créées une fois pour toutes à l'origine des temps et s'étaient transmises jusqu'à nous sans changement mais, au contraire, qu'*elles sont apparues peu à peu au cours des âges*, les espèces les plus primitives précédant les espèces plus perfectionnées. C'est la *notion d'évolution*.

D'abord âprement combattue, la théorie de l'évolution des êtres vivants ne fait plus de doute maintenant : les découvertes paléontologiques, comme les travaux d'anatomie comparée en ont apporté les preuves définitives. Précisons seulement que dès qu'une « barrière » empêche l'interfécondité des individus d'une même espèce (par exemple, un isolement géographique, un isolement saisonnier, une polyploïdisation des garnitures chromosomiques...), il se crée, plus ou moins rapidement, des variétés, ou des sous-espèces, ou des espèces nouvelles; c'est la *spéciation*. L'espèce est ainsi en perpétuel mouvement et, si une espèce nous paraît stable, c'est que sa vitesse d'évolution est infiniment lente par rapport à la durée de nos observations.

En conclusion, la notion d'espèce n'est pas un concept statique mais un *concept dynamique* dont la science est à l'heure actuelle incapable de connaître tous les paramètres. Pour cela, il faudrait pouvoir retracer l'arbre généalogique de l'espèce, autrement dit, son *phylum*.

- **Systématique des grands groupes du règne "végétal"**

Dans la division du vivant en deux règnes – Animaux et Végétaux – Bactéries et Champignons faisaient traditionnellement partie des végétaux. En se fondant sur les séquences de l'ARN ribosomique, on distingue aujourd'hui *six grands ensembles* : **Archées**, **Eubactéries**, **Protistes**, **Champignons** (incluant les Lichens), **Animaux et végétaux**.

Les deux premiers possèdent une cellule *procaryote* réduite à une paroi externe, une membrane plasmique et un ADN circulaire inclus dans un cytoplasme. Les quatre ensembles suivants ont une cellule *eucaryote* pourvue d'une membrane plasmique protégée ou non par une paroi externe, d'un cytoplasme comportant un noyau, un cytosquelette, un système endomembranaire, éventuellement des flagelles locomoteurs et dotée, par *endosymbiose*, d'organites intracellulaires. L'incorporation de protéobactéries α (eubactéries pourpres) par endosymbiose est à l'origine des **mitochondries**, organites présents chez l'ensemble des eucaryotes (exception faite d'une perte secondaire).

L'incorporation, toujours par endosymbiose, de cyanobactéries (eubactéries photosynthétiques) est à l'origine des chloroplastes de la Lignée verte. Cette lignée comprend les **Algues rouges** (ou Rhodobiontes, ex. le Carragaheen) chez lesquelles la couleur verte de la chlorophylle est masquée par la phycoé-rythrine, pigment accessoire rouge et les **Chlorobiontes**, caractérisées, en plus de la chlorophylle a, par de la chlorophylle b (une forme oxydée) fonctionnant comme pigment accessoire. Les Chlorobiontes comprennent les **algues vertes** (ou chlorophytes, ex. l'Ulve) et les **Végétaux terrestres** (ou **Embryophytes**, ex. la Fougère, le Sapin, la Tulipe).

Une nouvelle endosymbiose (appelée endosymbiose secondaire), par ingestion d'un eucaryote unicellulaire issu des Algues rouges par une autre cellule eucaryote, conduit à la *Lignée brune* des **Ochrophytes** lesquelles doivent leur couleur à la fucoxanthine, pigment accessoire brun : ex. le Fucus, une algue brune, les Diatomées... Certaines des Ochrophytes ont perdu secondairement leurs pigments photosynthétiques et se comportent comme des « champignons » (ex. le Mildiou de la vigne). De même l'endosymbiose secondaire d'un eucaryote unicellulaire issu des algues vertes par une autre cellule eucaryote conduit aux **Euglénobiontes** (ex. l'Euglène) qui, elles aussi, peuvent perdre secondairement leur chlorophylle (ex. le *Plasmodium* du paludisme).

En fin de compte, la notion de végétal correspond à des Eucaryotes, qui, à un moment ou à un autre de leur évolution, ont intégré, directement ou indirectement, des procaryotes photosynthétiques, même s'ils ont perdu secondairement leurs chloroplastes, comme chez les Oomycètes ou les Angiospermes parasites (Cuscutées, Orobanches). Les Champignons (ou Eumycètes, ex. le Bolet, la Levure de bière), que l'on pensait autrefois cousins d'Algues rouges ayant perdu leur chlorophylle, sont un groupe frère des Choanoflagellés et des Éponges, donc plus proche des Animaux que des Végétaux. Quant aux

Lichens, ils résultent de la symbiose d'une Cyanobactérie ou d'une algue verte unicellulaire et d'un champignon.

- **Principaux critères de classification du monde végétal**

a- Critères cytologiques

D'après la structure du noyau de la cellule on a :

Les procaryotes : se sont les végétaux les plus primitifs dont les cellules sont dépourvues de noyau typique (appareil nucléaire composé de 1 à 2 chromosomes qui baignent dans le cytoplasme) .Exemple : les Cyanophytes (les algues bleues).

Les eucaryotes : se sont les végétaux qui possèdent un vrai noyau avec une membrane nucléaire, de chromatine et du nucléole. Exemple : les Spermaphytes (les plantes à graine)

b- Organisation de l'appareil végétatif

Les Thallophytes : (végétaux inférieurs) : la structure d'un végétal est simple, elle n'a aucun organe comparable aux racines, tiges ou feuilles des végétaux supérieurs ; le corps végétal est un thalle qui est uni ou pluricellulaire. Exemple : les algues.

Les Cormophytes : (les végétaux supérieurs) : l'appareil végétatif est nommé un cormus. il est composé d'une tige, des feuilles et des racines. Exemple : les Spermaphytes

Tableau 2: Classification selon l'organisation de l'appareil végétatif

Procaryotes Sans noyau	Bactéries			
	Cyanophycées			
Eucaryotes Avec noyau	Thallophytes Thalle	Algues		
		Champignons		
		Lichens		
	Cormophytes Cormus	Bryophytes		
		Rhizophytes Racines	Ptéridophytes	
			Préspermaphytes	
		Trachéophytes	Spermaphytes Graines	Gymnospermes
				Chlamydospermes
Angiospermes				

c- Critères anatomiques :

Les végétaux avasculaires : se sont les végétaux qui ne possèdent pas d'éléments conducteurs et l'absorption de l'eau et des sels minéraux s'effectue par capillarité. Exemple : les Bryophytes.

Les végétaux vasculaires : se sont les végétaux qui possèdent des vaisseaux conducteurs qui transportent la sève. Exemple : les Ptéridophytes

Structure de l'appareil reproducteur :

On divise classiquement le règne végétal en deux grands groupes ou embranchements :

1. L'embranchement des Cryptogames (cryptos : caché; gamos : mariage), c'est-à-dire des plantes sans fleurs, comprenant :

- les algues, étudiées par les algologues;
- les champignons. étudiés par les mycologues;
- les lichens. étudiés par les lichénologues:
- les mousses étudiés par les bryologues;
- les hépatiques étudiées par les bryologues:
- les fougères (Ptéridophytes), étudiées par les ptéridologues.

2. L'embranchement des Phanérogames (phaneron :visible: gamos :mariage), c'est-à-dire des plantes à fleurs, réparties en deux sous-groupes ou sous-embranchements :

- le sous-embranchement des Gymnospermes:
- le sous-embranchement des Angiospermes. lui-même comprenant deux classes : les Dicotylédones et les Monocotylédones.

Dans la pratique, on réunit souvent les fougères aux Phanérogames car elles ont en commun d'avoir des vaisseaux individualisés, constituant ainsi le groupe des plantes vasculaires, dont on connaît environ 250 000 espèces. Ensuite, les grands groupes sont eux-mêmes subdivisés en unités de plus en plus petites, selon la séquence complète suivante :

Règne (végétal),

Embranchements et sous-embranchements,

Classes et sous-classes,

Ordres et sous-ordres,

Familles et sous-familles.

 Tribus et sous-tribus,

Genres et sous-genres,

 Sections et sous-sections.

 Séries et sous-séries,

Espèces et sous-espèces.

Variétés et sous-variétés,

Formes et sous-formes.

Les subdivisions auxquelles l'on se réfère le plus couramment sont inscrites en caractères gras.

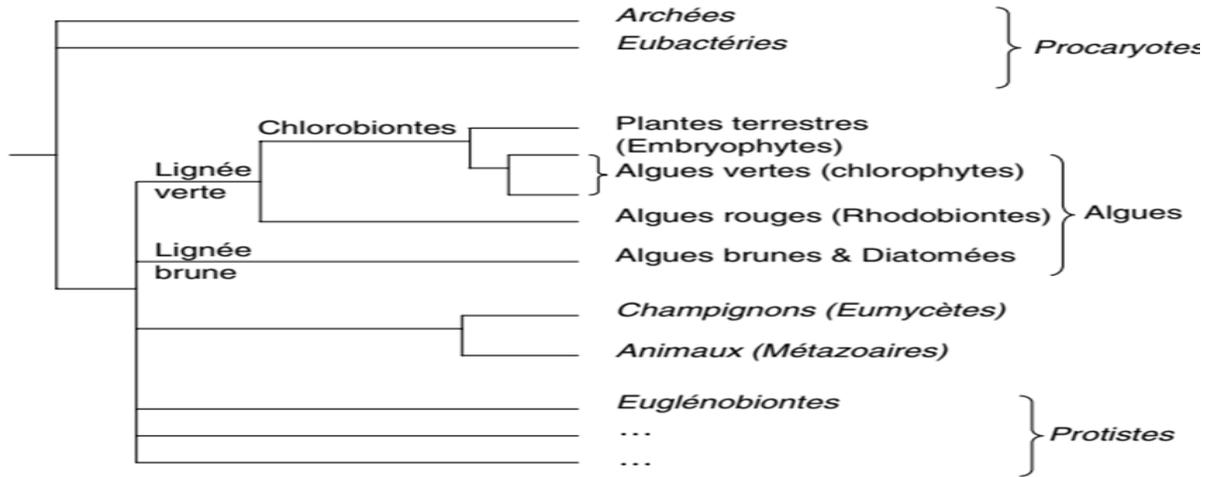


Figure 1: Place des végétaux dans le vivant.

Tableau 3: Présentation synoptique des divisions du règne végétal actuel

PROCARYOTES		Bactéries
	<i>algues bleues</i>	Cyanobactéries
EUCARYOTES		
Pas de chlorophylle	<i>champignons</i>	Oomycètes
	<i>champignons</i>	Eumycètes
Chlorophylle a + Pigments accessoires		Myxomycètes
		Pyrrhophytes
		Chrysophytes
		Bacillariophytes
	<i>algues brunes</i>	Phaeophytes
	<i>algues rouges</i>	Rhodophytes
	<i>algues jaunes</i>	Xanthophytes
Chlorophylle a + Chlorophylle b		
Zygote sans protection	<i>euglènes</i>	Euglénophytes
	<i>algues vertes</i>	Chlorophytes
Zygote protégé par une coque dure (oogone)		Charophytes
Gamète femelle contenu dans un archégone		
pas d'appareil vasculaire	<i>mousses</i>	Bryophytes
	un appareil vasculaire	
sexualité aquatique ni fleur ni graines		Psilophytes
		Lycophytes
		Phénophytes
	<i>fougères</i>	Ptéridophytes
sexualité aérienne : gamétophyte femelle dans un ovule		
ovules nus, pendus à des organes dans lesquels ils ne sont pas enfermés		Cycadophytes
		Gnétophytes
	<i>Ginkyo</i>	Ginkophytes
	<i>Gymnospermes</i>	Coniférophytes
ovules enfermés dans un carpelle, fleurs, graines	<i>Angiospermes</i>	Anthophytes

PREMIERE PARTIE: Les Thallophytes: Algues et Champignons

Chapitre1: Les Algues

***Les thallophytes**: leur appareil végétatif est appelé thalle (c'est une structure où toutes les cellules se ressemblent sans différenciation physiologiques, c'est à dire que toutes les fonctions sont réparties dans toutes les cellules). L'absorption de l'eau et des sels minéraux se fait au niveau de la surface de la paroi emmiperméable de toutes les cellules. Cependant, en fonction des espèces, le thalle présente des formes très variées allant de l'état unicellulaire jusqu'à des structures complexes.

1. Les Algues

Les Algues, ou *Phycophytes* (du gr. *phukos* = algue ; *phuton* = plantes), sont des Thallophytes chlorophylliens, c'est-à-dire des organismes capables de photosynthèse. Elles sont donc *autotrophes*. Les Algues sont, typiquement, des *organismes aquatiques*. Du point de vue écologique, elles constituent le premier maillon des chaînes alimentaires : ce sont les *producteurs* quasi exclusifs des mers et des océans (7/10 de la surface du globe). Elles sont fréquentes aussi en eau douce (lacs, mares, ruisseaux). Elles sont plus rares en milieu aérien.

Pour réaliser la photosynthèse, les Algues sont tributaires de la *lumière*. Or celle-ci est absorbée par l'eau et à quelques mètres de profondeur l'éclairement devient insuffisant pour assurer une assimilation compensant les pertes dues à la respiration. Les Algues sont limitées pour cette raison en milieu aquatique à une zone superficielle qui, en général, ne dépasse pas 40 à 60 mètres de profondeur (ce qui, à l'échelle océanique représente une mince pellicule ; au-delà, le milieu marin est dépourvu de producteurs). On distingue dans les populations algales deux grands ensembles.

Le premier est constitué d'espèces qui flottent ou nagent en pleine eau ; elles sont en général microscopiques et souvent unicellulaires. Elles forment la partie végétale et productrice du plancton et *phytoplankton* (du gr. *plankton* = errant). Le second ensemble – appelé *phytobenthos* (du gr. *benthos* = fond) – est constitué par des espèces fixées au fond.

Elles constituent en particulier une riche frange de végétation sur le littoral. Parmi ces *Algues côtières* se rencontrent des espèces dont les thalles atteignent de grandes dimensions et un degré élevé d'organisation pluricellulaire.

1.1. Les Algues procaryotes (Cyanophytes / Cyanobactéries)

Dénommées aussi Algues bleues ou Schizophytes ou encore Myxophytes, ne possèdent pas de noyau à membrane définie (ce sont des Procaryotes, à l'inverse des autres groupes qui sont des Eucaryotes) ni de chromatophores.

Les cyanobactéries forment un des groupes bactériens les plus larges et les plus diversifiés écologiquement. Elles sont présentes dans pratiquement tous les environnements et constituent un des acteurs majeurs de la biomasse et de la production végétale sur terre. Ce sont également les seuls procaryotes à réaliser une photosynthèse oxygénée, en utilisant l'eau comme donneur d'électrons, similaire aux algues et aux plantes supérieures.

Les cyanobactéries sont des procaryotes à paroi Gram négative et elles sont classées parmi les eubactéries. En effet les cyanobactéries, comme les bactéries vraies, ne possèdent pas de noyau individualisé. Elles sont dépourvues de membrane nucléaire, de nucléoles et de chromosomes différenciés. La partie centrale de la cellule renferme seulement des granulations de chromatine qui représentent un appareil nucléaire très simple. Le cytoplasme lui aussi est simple, en effet, les mitochondries, les dictyosomes et le reticulum endoplasmique n'y sont pas représentés. Les thylakoïdes qui supportent les pigments photosynthétiques, ne sont pas rassemblés en chloroplastes. La paroi cellulaire est par ailleurs caractérisée par la présence d'une couche rigide de peptidoglycane.

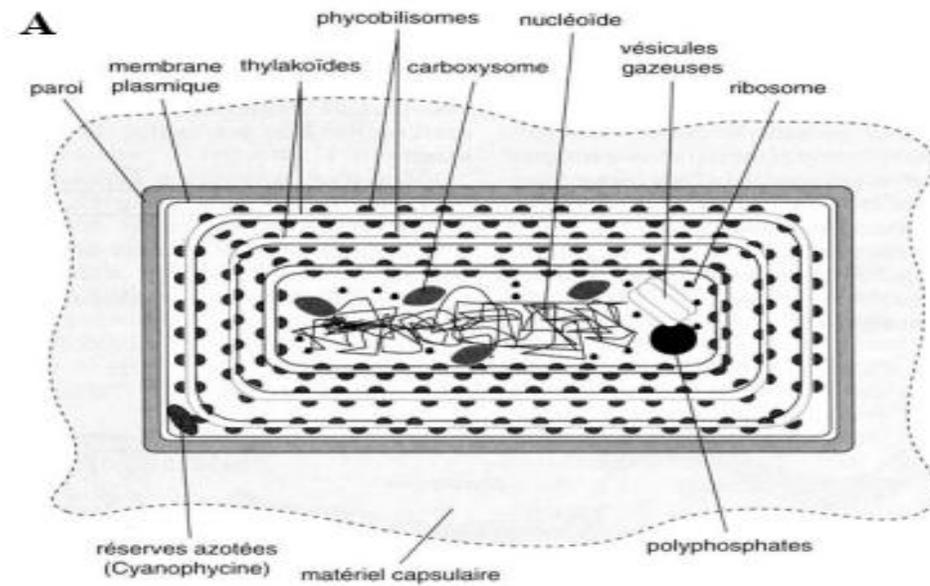


Figure 2: Ultrastructure d'une cyanobactérie.

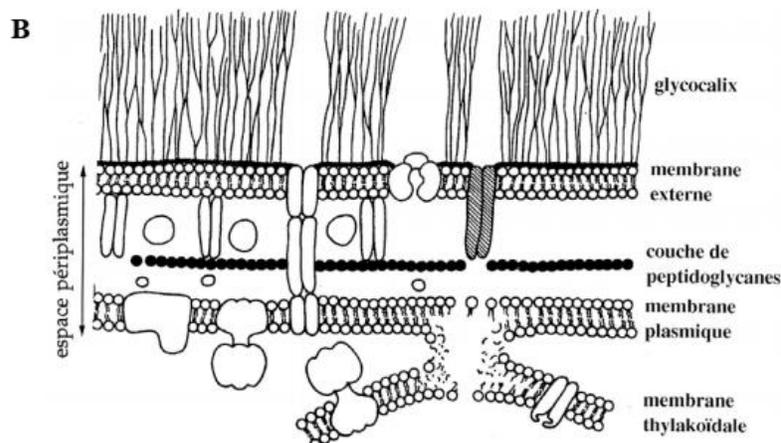


Figure 3: Modèle de l'enveloppe cellulaire des Cyanobactéries.

1. 1. 1. Organisation des thalles

1. 1. 1. 1. Diversité structurale

L'organisation des thalles de cyanobactéries est caractérisée par une grande variété. Les formes les plus simples sont unicellulaires, sphériques, ellipsoïdales, cylindriques, ovoïdes ou piriformes, nues ou entourées d'une gaine mucilagineuse homogène ou stratifiée. Plus complexes sont les colonies, agrégats de cellules (aux formes identiques à celles décrites précédemment) au nombre généralement variable, non jointives, enrobées dans un mucilage commun. La forme des colonies est très diversifiée, allant de la structure monostomatique (colonie plane à une seule couche de cellules) à la structure amorphe (nombreuses cellules dans un mucilage commun sans contour défini), en passant par les formes cubiques, sphériques, linéaires.

Les thalles les plus élaborés sont organisés sur le modèle filamenteux unisérié (une seule série de cellules jointives) ou plurisérié (plusieurs séries de cellules jointives), non ramifié ou de vraies ou fausses ramifications, sans gaine ou avec gaine mucilagineuse homogène ou stratifiée. Une entité organisée en une seule série de cellules est qualifiée de trichome, tandis que la même accompagnée d'une gaine porte le nom de filament. La gaine, constituée de polysaccharides, est incolore ou colorée (jaune, orangé, rouge...), car elle est souvent imprégnée par des sels de fer et de manganèse... Elle peut renfermer un ou plusieurs trichomes selon les genres considérés.

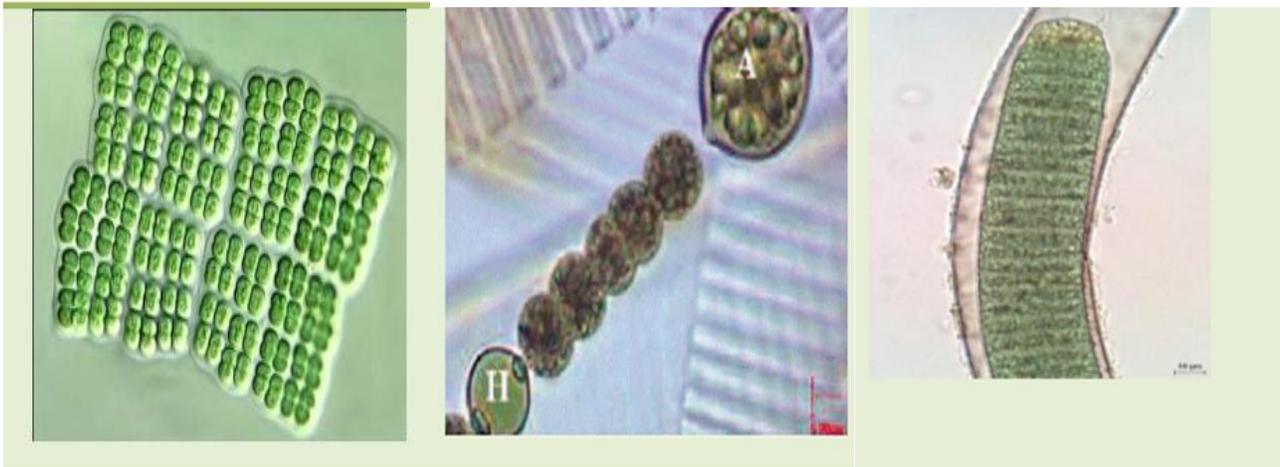
*Merismopedia**Anabaena**Lyngbya*

Figure 4 : Exemples de morphologies chez les cyanobactéries. Source : www.nostoc.pt

Cyanobactéries du genre Merismopedia, forme unicellulaire en colonies.

Cyanobactéries du genre Anabaena (cellule filamenteuse organisée en trichomes).

Cyanobactéries du genre Lyngbya (cellule filamenteuse présentant en gaine)

1. 1. 1. 2. Diversité cytologique

Il existe trois types principaux de cellules:

- **Les cellules végétatives**, au contenu peu différencié (en microscopie photonique) sauf lorsqu'elles renferment des vacuoles gazeuses (aérotopes), très réfringentes (responsables de la flottabilité des thalles qui en possèdent), et de couleurs très diverses, conséquence des teneurs respectives en pigments photosynthétiques tels que la chlorophylle a (vert), la phycocyanine (bleu) et la phycoérythrine (rouge) et en substances hélioprotectrices ;
- **Les hétérocystes**, à paroi épaisse et au contenu homogène faiblement coloré. Leur forme est sphérique, cylindrique, voire conique. Leur position dans le trichome est soit intercalaire, soit terminale à l'une des extrémités seulement ou aux deux, ou encore latérale (pédicellée). Les hétérocystes sont

généralement solitaires mais peuvent aussi apparaître en paire et, plus rarement, en série. La présence, dans les hétérocystes, de la nitrogénase leur confère la capacité de fixer l'azote moléculaire dissous dans l'eau pour le transformer en azote assimilable par la cellule. Les hétérocystes ne sont présents que chez certaines formes filamenteuses et, ce, seulement lorsque les conditions écologiques nécessaires à leur formation sont réunies ;

- **Les akinètes.** Ce sont des cellules généralement plus grandes que les cellules végétatives et les hétérocystes. Leur paroi est très épaissie et peut être colorée et ornementée. Leur contenu apparaît rempli de gros granules sphériques ou polyédriques. Leur teneur en AND est plus importante, de même que celles de la cyanophycine (réserve protéique) et du glycogène (réserve de glucides). Les akinètes sont des cellules de repos, capables de résister à des conditions écologiques très défavorables et qui, après retour à une situation environnementale normale, peuvent germer et redonner un thalle. Les akinètes n'existent que dans certaines structures filamenteuses. Ils sont solitaires ou disposés en série dans le trichome, en position intercalaire ou subterminale, adjacente ou éloignée des hétérocyste

1. 1. 1. 3. Multiplication

La multiplication des cyanobactéries est végétative, c'est-à-dire asexuée, et elle s'effectue par division binaire d'une cellule mère en deux cellules filles, par bourgeonnement ou par divisions multiples. Selon les espèces et les conditions environnementales, les temps de doublement des populations varient de quelques heures à plusieurs jours. Chez les formes unicellulaires la division successive de la cellule mère libère des nanocytes ou baeocytes.

Ainsi, les formes filamenteuses se dispersent par fragmentation au niveau des nécridives (cellules dégénérantes) libérant de courts trichomes ou filaments (les hormogonies).

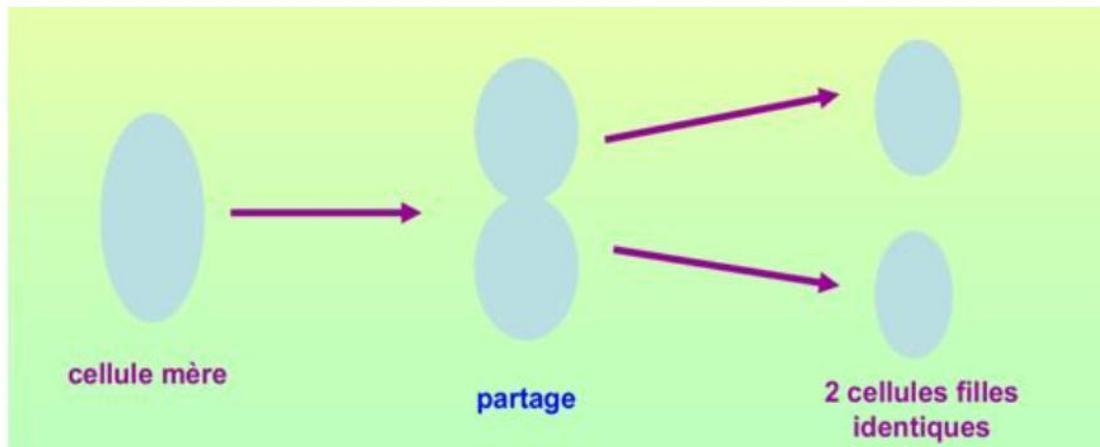


Figure 5: Multiplication par scissiparité

1.1.1.4. Ecologie et utilisation

Ces organismes ont une grande importance dans l'écosystème marin qui n'a pas toujours été reconnue. Ils peuvent être planctoniques (comme *Oscillatoria erythraea* mais ils sont surtout benthiques et abondants dans les étages médiolittoral et infralittoral. Ils forment, en particulier, une ceinture souvent

très nette dans la partie supérieure de l'étage médiolittoral et jouent un grand rôle sur les côtes calcaires en raison de leur mode de vie endolithe. Enfin, ils sont aussi fréquemment épiphytes; à ce titre, ils sont sûrement consommés par les animaux brouteurs et interviennent peut-être dans les phénomènes de "ciguatera" (empoisonnement de la population humaine par des toxines contenues dans la chair de certains poissons) apparaissant dans certaines régions du globe.

Au plan de leur utilisation par l'homme, les spirulines (*Oscillatoria pseudoplatensis* Bourrely, 1970 = *Spirulina maxima* = *Spirulina platensis*) des lacs plus ou moins salés (Tchad, Mexique) ont été consommées depuis longtemps par les riverains et sont commercialisées tant pour l'alimentation humaine qu'animale. Elles ont fait l'objet d'importantes études depuis 25 ans: (a) en raison de leur richesse en protéines et vitamines (la teneur en protéines atteint 70% chez certaines spirulines commercialisées) (b) en vue d'en extraire les pigments bleus, jaunes ou rouges, peu fréquents dans les organismes vivants et donc particulièrement recherchés par les industries alimentaires (c) pour produire une biomasse méthanisable comme source d'énergie.

1.1.1.5. Classification

Il existe plus de 1500 espèces différentes de cyanobactéries réparties dans environ 120 genres, en se basant sur des observations morphologiques ultrastructurales, sur le mode de reproduction et sur le milieu de culture.

Les Cyanophytes ou Cyanophycées sont divisées en deux sous-classes :

Les Coccogonophycidées qui groupent des formes solitaires ou coloniales, parfois filamenteuses mais sans hormogonies et à multiplication exclusivement par spores unicellulaires

les Hormogonophycidées qui groupent les formes filamenteuses se multipliant par hormogonies pluricellulaires.

✓ **Les Coccogonophycidées** comprennent trois ordres :

a) Les Chroococcales comprennent des Cyanophycées unicellulaires ou groupées en colonies de formes variées (cubique, sphérique, tabulaire) ou en archéthalles (paquets de cellules sans différenciation).

b) Les Pleurocapsales sont des Cyanophycées fixées sur les rochers et formant des protothales à filaments rampants portant des filaments dressés ramifiés.

c) Les Chamaesiphonales comprennent des formes filamenteuses simples et des formes unicellulaires présentant le plus souvent une base fixée et au sommet différencié

✓ **les Hormogonophycidées** comprennent deux ordres, les Stigonématales et les Nostocales.

a) Les Stigonématales forment des protothalles, comprenant un ensemble de filaments rampants et le plus souvent des filaments dressés croissant par division végétative.

b) Les Nostocales (ou Oscillatoriales) comprennent les Cyanophycées filamenteuses, unisériées, avec ou sans hétérocystes, se multipliant par hormogonies ou akinètes. Les ramifications lorsqu'elles existent sont toujours de fausses ramifications. Chez certaines espèces (famille des Rivulariacées), une extrémité du trichome est éléée en poil pluricellulaire. Dans la plupart des familles, on note la présence de gaines gélatineuses entourant un ou plusieurs trichomes. L'ordre renferme six familles.

Tableau 4: Systématiques des Cyanophytes

Classe	Ordre	Famille	Espèce
Coccogonophyceae	Chroococcales	Chroococcaceae	Ex : <i>Chroococcus turgidus</i> Ex : <i>Merismopedia elegans</i>
		chamaesiphonaceae	Ex : <i>Chamaesiphon curvates</i>
	Pleurocapsales	Pleurocapsaceae	Ex : <i>Pleurocapsa minor</i>
Hormogonophyceae	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	Ex : <i>Oscillatoriamar garitifera</i>
	Nostocales	Nostocaceae	Ex : <i>Anabaela spiroides.</i>
	Stigonematales	Stigonemataceae	Ex : <i>Stigonema mamillosum</i>

1.1.1.6. Exemples de cyanobactéries

❖ Le genre *Oscillatoria* (Oscillatoriacées)

Description: avec des trichomes libres, solitaires, non ramifiés, dépourvus de gaine et d'hétérocystes. Le trichome est cylindrique et l'apex présente parfois une forme particulière (courbé, capité, atténué ...etc.).

Les filaments sont mobiles et ces mouvements pendulaires hélicoïdaux sont caractéristiques du genre. Les Oscillaires forment des feutrages sur le fond ;elles peuvent être aussi très abondantes dans le plancton et former des fleurs d'eau.

Le genre *Oscillatoria* est divisé en deux :

-le sous-genre *Oscillatoria* qui groupe les espèces à trichome droit, soit environ 150 espèces dans toutes les eaux douces.

-le sous-genre *Spirulina* qui groupe les espèces à trichome régulièrement enroulé en hélice plus ou moins serrée, soit une trentaine d'espèces dans les eaux douces en général. Leur déplacement s'effectue en se vrillant dans l'eau à la façon d'une vis.

✓ **Position systématique**

Règne: **Bactéria**

Embranchement: **Cyanophytes ou cyanoschizophytes**

Classe: **Cyanophycées**

Sous-classe: **Hormogonophycidées**

Ordre: **Nostocales**

Famille: **Oscillatoriacées**

Genre: *Oscillatoria*

❖ **Le genre *Spirulina* (Oscillatoriaceae)**

Description

La Spiruline est une cyanophycée microscopique d'une longueur moyenne d'environ 250µm. Elle est composée de filaments mobiles de 10 à 12µm de diamètre non ramifiés et enroulés en spirale, généralement en 6 ou 7 spires. Cette forme hélicoïdale lui donnant l'allure d'un minuscule ressort lui a valu son appellation de «Spiruline»

✓ **Position systématique**

Règne: **Bactéria**

Embranchement: **Cyanophytes ou cyanoschizophytes**

Classe: **Cyanophycées**

Sous-classe: **Hormogonophycidées**

Ordre: **Nostocales**

Famille: **Oscillatoriaceae**

Genre: *Spirulina*

- ❖ **Le genre *Nostoc***: une cyanobactérie dont les thalles sont gélatineux et contiennent, dans une gelée commune, des trichomes enchevêtrés avec des hétérocystes intercalaires.

- ✓ **Position systématique**

Règne: **Bactéria**

Embranchement: **Cyanophytes ou cyanoschizophytes**

Classe: **Cyanophycées**

Sous-classe: **Hormogonophycidées**

Ordre: **Nostocales**

Famille: **Nostocacées**

Genre: *Nostoc*

- ❖ **Le genre *Rivularia* (Rivulariacées)**

Description

Forme des colonies gélatineuses sur les végétaux et les débris immergés. Les thalles globuleux, hémisphériques, fixés, sont constitués de filaments disposés radialement. Chaque filament possède une gaine avec un trichome à hétérocyste basal; à l'apex, le trichome s'éleve en poil articulé.

- ✓ **Position systématique**

Règne: **Bactéria**

Embranchement: **Cyanophytes ou cyanoschizophytes**

Classe: **Cyanophycées**

Sous-classe: **Hormogonophycidées**

Ordre: **Nostocales**

Famille: **Rivulariacées**

Genre: *Rivularia*

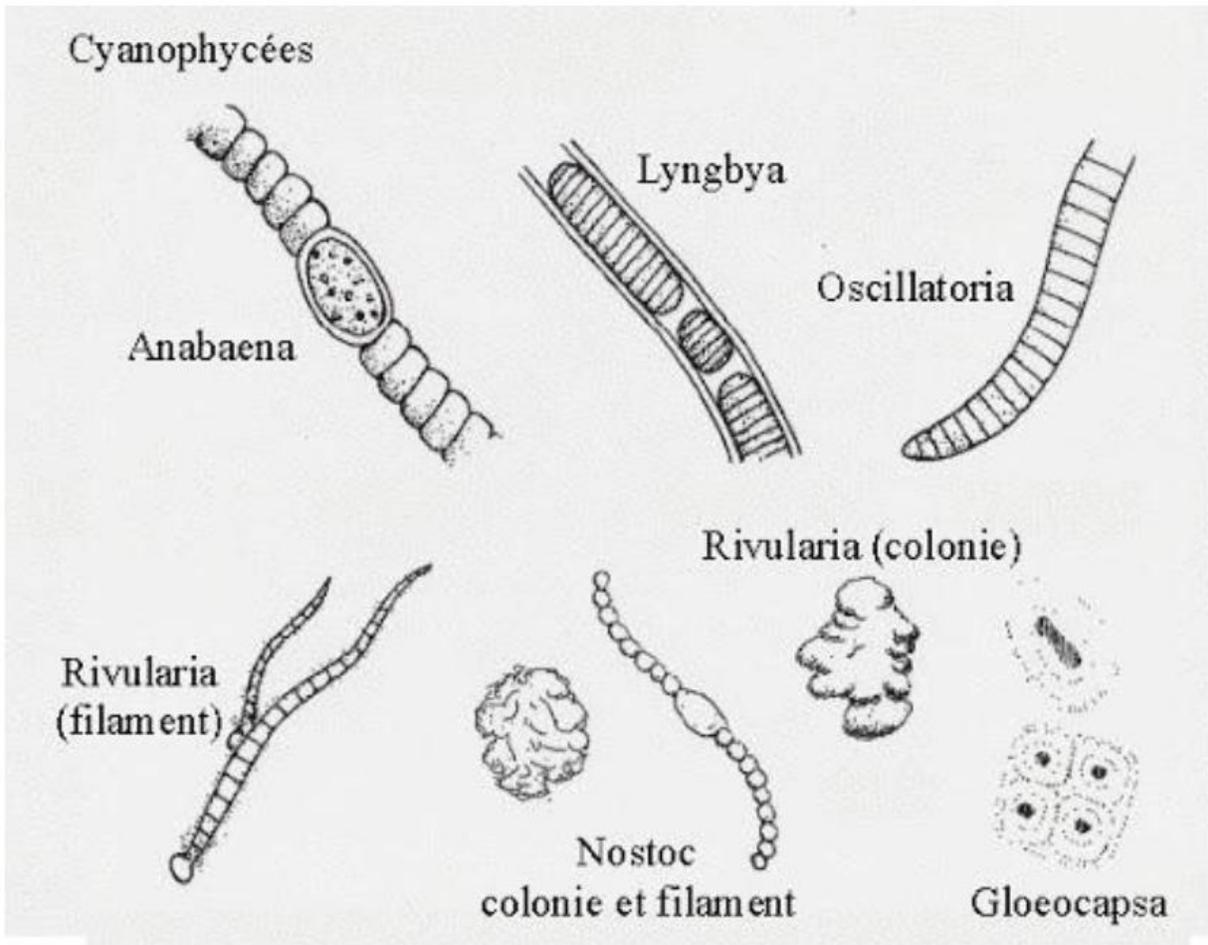


Figure 6: Quelques types de Cyanobactéries. (Robert, Roland 7)

1.2. Les Algues eucaryotes

Les algues eucaryotes sont des organismes chlorophylliens se développant dans l'eau ou dans des milieux très humides. Bien que surtout abondantes dans les eaux des mers, des lacs, des mares, des eaux courantes et des eaux thermales, on en trouve également sur les rochers humides et sur la terre. Exceptionnellement, elles peuvent être endophytes de tissus animaux ou végétaux. L'air, la lumière et des sels dissous sont, en plus de l'eau, nécessaires à leur développement.

Groupées avec les champignons dans la division des Thallophytes, ((les algues constituent en réalité un vaste ensemble hétérogène d'embranchements très distincts les uns des autres et n'ayant entre eux que peu de caractères communs) (FELDMANN, 1963). La distinction entre ces différents embranchements d'algues est faite d'après des caractères d'ordre cytologique et biochimique ainsi que des différences de structure et de mode de reproduction. En dehors de nombreuses formes unicellulaires, on trouve des algues pluricellulaires formant des thalles sans feuilles, ni tiges, ni racines, ni vaisseaux conducteurs.

Les algues d'eau douce comprennent un peu plus de 1100 genres et environ quatorzemille espèces répartis dans le monde. Ce sont des organismes très cosmopolites et la plus grande partie des espèces existantes a une distribution géographique très étendue. Ainsi la flore algale connue des régions intertropicales d'Afrique comporte une proportion importante d'espèces que l'on retrouve dans les autres régions du globe.

1.2.1. Morphologie

Les Algues eucaryotes ont des couleurs variées dues à la présence de *pigments* masquant plus ou moins la chlorophylle. Ce caractère conduit à subdiviser le groupe en trois grandes lignées qui s'opposent par un ensemble de caractères biochimiques, structuraux et fonctionnels: les *Algues Vertes*, les *Algues Brunes* et les *Algues Rouges*. Chaque lignée renferme des espèces *unicellulaires*, considérées souvent comme primitives, et des espèces *pluricellulaires* de complexité croissante dans lesquelles la division du travail physiologique est progressivement plus marquée.

L'examen de ces végétaux révèle une grande plasticité et montre de *nombreux essais évolutifs* concrétisés, dans la nature actuelle, par une grande diversité de *plans d'organisation* et de *modes de reproduction* qui sont à l'origine de *cycles de développement variés*. Un des intérêts de l'étude des Algues est qu'elles fournissent des fils conducteurs sur les étapes qui ont marqué la progression des formes.

Les données récentes de la biologie moléculaire indiquent qu'elles sont à l'origine de l'ensemble des groupes végétaux actuels, vraisemblablement par endosymbiose d'une cyanobactérie (Procaryote chlorophyllien) qui a évolué en plaste dans une cellule eucaryote archaïque, et dont l'ancêtre est commun pour les Algues Rouges et Algues Vertes ; de ces dernières ont émergé les Embryophytes.

1.2.1.1. Organisation des thalles des algues eucaryotes

Les thalles des algues sont uni- ou pluricellulaires. En effet, certains peuvent avoir des dimensions très respectables, comme les luminaires. Ils appartiennent à trois grands types d'organisation:

1.2.1.1.1. Archéthalles:

Sont constitués de cellules végétatives toutes semblables, qui sont capables de se diviser individuellement par bipartition ou se transformer en sporocyte ou en gametocyte émettant des spores ou gamètes.

a_ Archéthalles unicellulaires : plusieurs archéthalles sont dissociés en cellules distinguées après chaque bipartition cellulaire, ces dernières se séparent et se comportent comme des individus unicellulaires.

Certains archéthalles sont unicellulaires, les cellules sont incapables de bipartition végétative. Chaque cellule se transforme alors en sporocyte produisant des spores mobiles par des flagelles, des zoospores, c'est un thalle monadoïde. D'autres archéthalles unicellulaires se transforment en cellules sans flagelles ou en spores immobiles (autospores) à thalle coccoïde.

b_ Archéthalles cénobiaux : Sont formés d'une colonie ou groupement de cellules d'un nombre déterminé, ce sont des archéthalles cénobiaux ou des coenobes. Dans les archéthalles il n'ya pas de communication intercellulaire

c_ Archéthalles plasmodiaux : Des organismes formés par des masse cytoplasmiques nues, renfermant plusieurs noyaux et ayant une structure coenocytique (Algues bleues + champignons) - Les plasmodes se déplacent par des pseudopodes.

d_ Archéthalles mycéliens : les mycéliums ou filament mycéliens ont la structure de base des thalles, des champignons. Un filament cylindrique très ramifiés et rampant distingue chez les phycomycètes et les zygomycètes

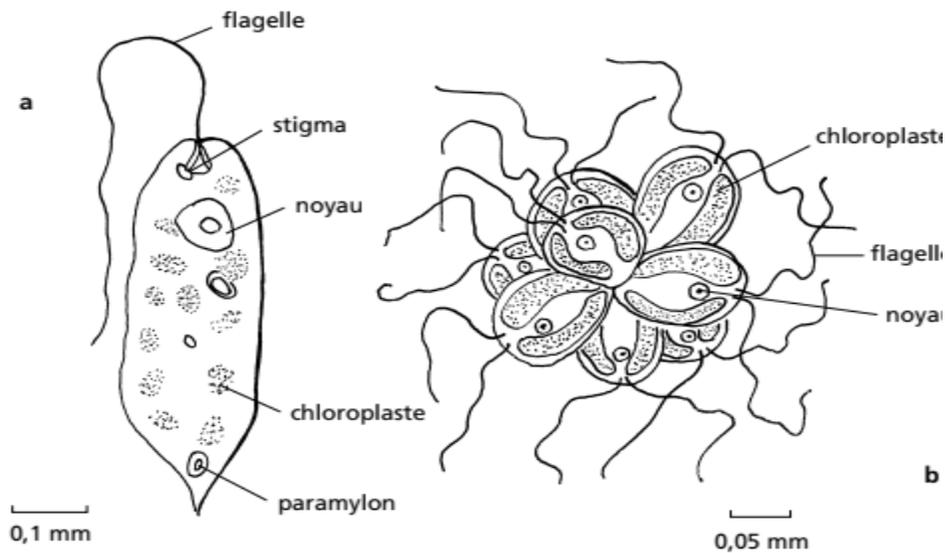


Figure 7: Exemples d'archéthalles

a, l'euglène ; b, synura

1.2.1.1.2. Les nématothalles: Le nématothalle peut être :

Hétérotriche : constitué de filaments dressés et rampants.

Homotriche : constitué d'un seul type de filaments dressé ou rampants.

Prostré : constitué de filaments rampants, les filaments dressés sont absents.

Erecté : constitué uniquement de filaments dressés.

- Le nématothalle diffère de l'archéthalle par le fait qu'il est ramifié et la croissance de chacun des rameaux est indéfini.

- Il peut y'avoir des communications intercellulaires dans le nématothalle (ramification simple)

- **Structure :** Les nématothalles peuvent être :

a- Haplastiques : c'est une structure cellulaire unisériée, formée de filaments constitués d'une file de cellules séparées par des cloisons.

b- Polystiques : c'est une structure articulée ou plurisériée où des cloisons séparent les articles plurinucléés.

c- Vésiculeuse : ils peuvent être des vésicules sans cloisons.

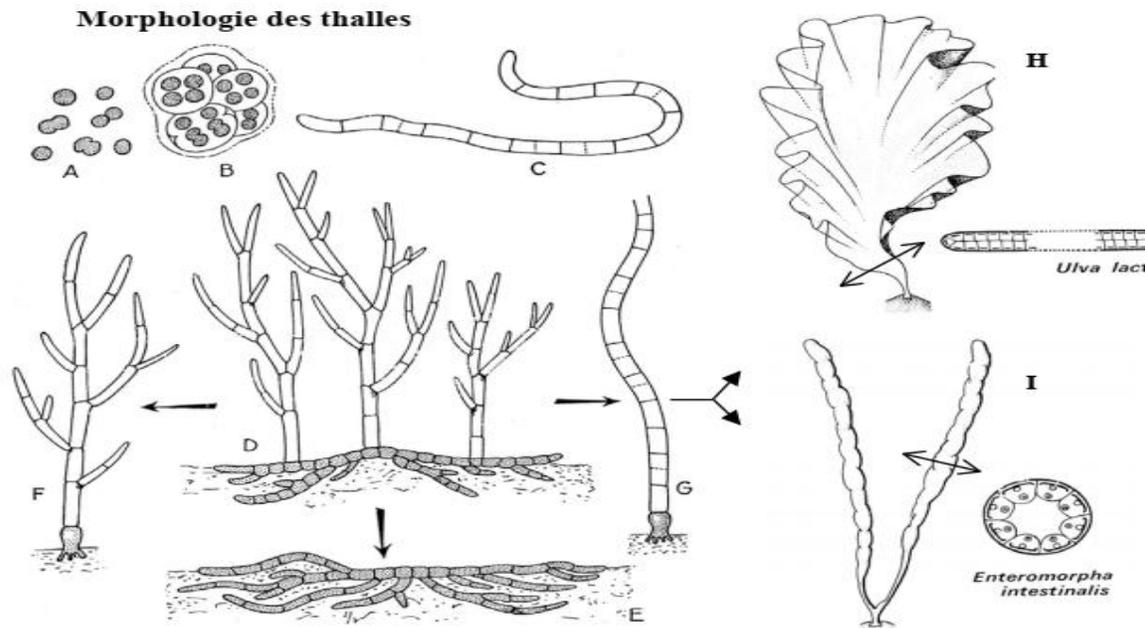


Figure 8: Structure des thalles non hiérarchisés.

(A, B et C = Archéthalles. A, thalles unicellulaires. B, thalles coloniaux. C, thalles filamenteux.

D, E, F, G, H, I = Nématothalles.

1.2.1.1.3. Cladotalles:

Ces thalles présentent un ou des axes appelés cladomes, à croissance définie et des petits rameaux ou pleuridies à croissance définie, l'articulation entre cladome et pleuridie se fait au niveau des cellules coxales.

La partie dressée d'un cladotalle peut être constituée de :

1- Un seul axe ou filaments central qui croît à partir d'une seule cellule initiale : le cladotalle est dit uniaxial, la structure de l'axe cladomien est haplostique.

2- Plusieurs axes ou filaments centriques, le cladotalle est dit multiaxial, sa structure est polystique et sa croissance se fait à partir de plusieurs cellules initiales.

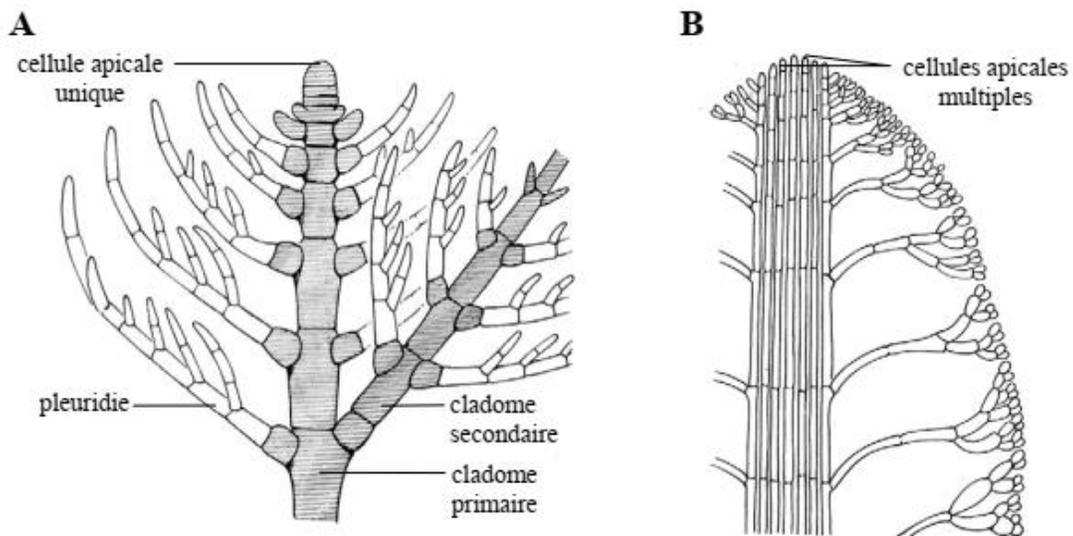


Figure 9: Structure des thalles hiérarchisés = thalles cladomiens.

A, Cladome uniaxial d'Antithamnion. Les cladomes sont des axes à croissance indéfinie alors que les pleuridies sont à croissance définie. B, Cladome multiaxial de Codium.

1.2.2. Cytologie

L'étude des structures cellulaires algales a progressé de façon considérable depuis deux décades grâce à l'utilisation du microscope électronique. La connaissance de ces structures a permis entre autres de déceler les relations existant entre différents groupes d'algues et résoudre certains problèmes de classification. Nous ne donnerons ici que les traits les plus importants de la cytologie algale (fig. 1).

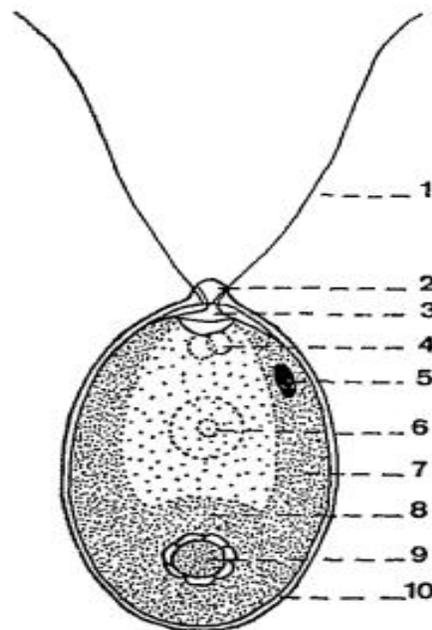


Figure 10 : Schéma d'une cellule de *Chlamydomonas*.

- 1, flagelle; 2, papille membranaire ; 3, papille cytoplasmique ; 4, vacuoles contractiles; 5, stigma;
6, noyau et nucleole; 7, chloroplaste en coupe optique longitudinale; 8, partie basale du plaste ;
9, pyrenoïde entouré d'amidon ; 10, membrane. (D'après BOURRELLY, 1966)

1.2.2.1. Paroi cellulaire: de nature glucidique (cellulose et composés pectiques), elle entoure la matière vivante de la cellule. Elle peut être absente chez certaines algues flagellées qui ne possèdent qu'une enveloppe mince formée par la pellicule externe du cytoplasme. Malgré la nature cytoplasmique de cette pellicule, celle-ci montre parfois des ornements disposés en réseau ou en spirale (par exemple chez les Euglénophycées du genre

La paroi glucidique est généralement formée de plusieurs couches, la couche externe est parfois mucilagineuse. La paroi peut s'imprégner de substances minérales : silice hydratée chez les Diatomophycées, carbonate de calcium chez diverses Chlorophytes ; des ornements en forme d'écailles ou plus complexes peuvent apparaître chez certaines Chrysophytes (écailles chez *Synura* par exemple).

1.2.2.2. Noyau: il occupe en général le centre de la cellule et comprend un nucléole. Il est parfois suspendu au centre de la cellule par des travées cytoplasmiques, comme chez *Spirogyra* ou chez les Diatomées naviculoïdes. Chez les genres à cellules à plusieurs noyaux (chez les Rhodophytes principalement), les noyaux sont en général situés dans le cytoplasme entre les vacuoles et les plastes. En général, la structure ne diffère pas de celle du noyau des cellules de plantes supérieures, mais il est plus petit.

1.2.2.3. Plastés: ils sont porteurs de la chlorophylle et des pigments accessoires. Ils sont de formes très variées mais caractéristiques et constantes pour chaque espèce : disques, plaques pariétales, rubans spiralés ou non, fourreaux, forme réticulée, étoilée, branchue, etc. On distingue en gros deux types : les plastés focaux, étoilés et en position axiale, comportant une partie centrale d'où partent des rayons plastidiaux dont les extrémités s'appliquent contre la paroi cellulaire (c'est le type considéré comme le plus primitif) et les plastés pariétaux de formes variées plaqués contre la paroi cellulaire.

Ils sont constitués d'un empilement de minces membranes doubles, les thylacoïdes, groupés en nombre variable suivant les groupes d'algues (un chez les Rhodophytes, deux chez les Cryptophycées, trois chez les Euglénophytes et Dinophycées, nombreux chez les Chlorophytes) pour former les lamelles plastidiales. Le plaste est entouré d'une enveloppe complexe.

Chez beaucoup d'algues, il renferme un pyrénoloïde, masse protéique formée de lamelles protéiques en relation avec celles plus minces du plaste. Le pyrénoloïde est chez les Chlorophytes entouré de grains d'amidon.

Chez certaines formes flagellées, une partie du plaste subit une différenciation localisée constituant le stigma ; celui-ci est formé par l'accumulation de granulations rouge-orangé chargées de carotène ; c'est un organe photosensible orientant les déplacements phototactiques de la cellule. Dans certains groupes (Euglénophytes, quelques Xanthophycées et Dinophycées), le stigma est indépendant du plaste.

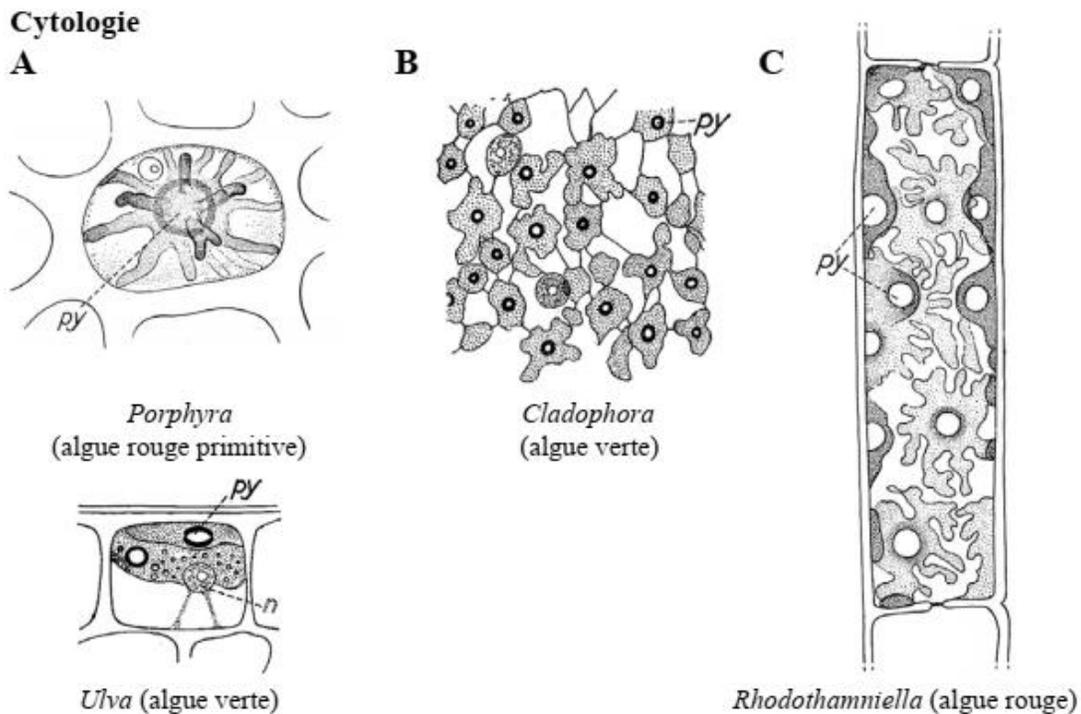


Figure 11: Structure de quelques plastes d'algues.

A, Structure archéoplastidiée. B, Structure mésoplastidiée. C, Structure néoplastidiée

1.2.2.4. Flagelles: les zoospores et zoogamètes (Zoïdes) qui se forment au cours de la multiplication de certaines algues et les cellules végétatives d'un certain nombre d'espèces sont munies de flagelles ; ceux-ci sont insérés sur un mastigosome ou blépharoplaste, les mastigosomes étant unis entre eux et avec le centrosome situé contre le noyau par un fin filament.

La structure des flagelles est uniforme: ils sont constitués d'une partie axiale avec deux microtubules et d'une partie périphérique avec neuf paires de microtubules. Les flagelles peuvent être lisses ou présenter deux rangées de fibrilles très fines appelées mastigonèmes: ils ont alors un aspect plumeux et sont appelés pleuronématés. Il peut y avoir une seule rangée de mastigonèmes (disposition stichonématée).

Leur morphologie et leur disposition sont très variées mais caractéristiques de chacun des groupes d'algues.

Les Chlorophytes flagellés possèdent deux, quatre ou huit flagelles égaux et lisses, les Chromophytes ont en général deux flagelles inégaux, l'un pleuronématé, l'autre nu. Chez les Dinophycées, le flagelle longitudinal est pleuronématé tandis que l'horizontal est stichonématé. Chez les Euglénophytes existent deux flagelles pleuronématés de longueur très inégale ; l'un des deux reste très souvent très court et se soude par son extrémité à l'autre.

En règle générale, on parlera de cellule stéphanocontée lorsque les flagelles nombreux forment une couronne apicale, acrocontée lorsqu'ils sont peu nombreux mais situés à l'apex de la cellule, pleurocontée lorsqu'ils sont latéraux, isocontée lorsque les deux flagelles présents sont égaux et de même structure et hétérocontée lorsqu'ils sont différents.

1.2.2.5. Appareil de Golgi: il existe dans un certain nombre d'algues sous forme de dictyosomes, petits corps ovoïdes formés de deux parties, l'une chromophile, l'autre chromophobe ; ils sont généralement groupés autour du noyau.

1.2.2.6. Chondriome: il se présente sous forme de mitochondries granuleuses ou de chondriocotes filamenteux. Il est présent dans toutes les cellules algales sauf chez les Cyanophytes.

1.2.2.7. Vacuoles : le cytoplasme contient généralement des vacuoles de disposition et de volume variables ; elles sont par exemple de volume réduit chez de nombreuses formes unicellulaires flagellées. Le suc vacuolaire est riche en substances variées : sels de potassium, pigments dissous. Certaines substances comme l'oxalate de calcium ou des cristalloïdes protéiques peuvent cristalliser dans les vacuoles. Chez beaucoup d'algues unicellulaires flagellées, il existe des vacuoles pulsatiles ayant un rôle excréteur et régulateur de la pression osmotique. Dans certains cas, il existe comme chez les Protozoaires, des vacuoles digestives.

1.2.2.8. Inclusions lipidiques: des gouttelettes d'huile sont fréquentes dans le cytoplasme de beaucoup d'algues, particulièrement chez les groupes qui n'élaborent pas d'amidon. Chez les Chlorophytes, les inclusions lipidiques sont surtout abondantes dans les formes de résistance (kystes) ou lorsque les conditions de milieu sont défavorables à la croissance et à la multiplication. Des pigments caroténoïdes dissous colorent souvent en jaune-orangé ou rouge ces inclusions.

Tableau 5: Caractéristiques importantes des groupes principaux d'algues

Embranchement (Règne)	Nom commun	Nombre d'espèces	Représentants	Pigments	Réserves	Paroi	Habitat
Chlorophytes (Protistes)	algues vertes	7500	<i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i> , <i>Spirogyra</i> , <i>Ulva</i>	Chloro. a,b Xanthophylles Carotènes	Sucres, amidon, fructane	Cellulose, mannanes, protéines, CaCO ₃	eau douce, saumâtre, salée et terrestre
Charophytes (Protistes)	250	<i>Chara</i> , <i>Nitella</i>	Chloro. a,b Xanthophylles Carotènes	amidon	Cellulose, CaCO ₃	eau douce et saumâtre	
Euglenophytes (Protistes)	Euglènes	700	<i>Euglena</i> , <i>Phacus</i>	Chloro. a,b Xanthophylles Carotènes	paramylon, huiles, sucres	absente	eau douce, saumâtre, salée et terrestre
Chrysophytes (Protistes)	algues brun jaune, vert jaune et diatomées	6000	<i>Dinobryon</i> , <i>Surirella</i>	Chloro. a, C1, C2 Carotènes fucoxanthine, xanthophylles	Chrysolam inarine, huiles	Cellulose, silice, CaCO ₃	eau douce, saumâtre, salée et terrestre
Phaeophytes (Plantes)	algues brunes	1500	<i>Laminaria</i> , <i>Fucus</i>	Chloro. a,b Xanthophylles Carotènes	laminarine, mannitol, huiles	cellulose, alginat, fucoidane	eau salée et saumâtre

Rhodophytes (Plantes)	algues rouges	3900	<i>Gracilaria</i> , <i>Gelidium</i> , <i>Chondrus</i>	Chloro. a rarement d Xanthophylles carotènes, zéaxanthine, phycocyanine C, phycoérythrine	amidon floridéen	cellulose, xylanes, galactanes, CaCO ₃	eau douce, saumâtre et salée
Pyrrhophytes (Protistes)	dinoflagellés, dinophytes	1100	<i>Gymnodinium</i> , <i>Ceratium</i> , <i>Alexandrium</i>	Chloro. a, C1, C2, carotènes, fucoxanthine, péridinine, dinoxanthine	amidon, glycanes, huiles	cellulose ou absente	eau douce, saumâtre ou salée

1.2.3. Reproduction (notion de gamie, de cycle de développement)

1.2.3.1. **Reproduction asexuée:** Elle peut être de 3 types :

- **Fragmentation:** le thalle se sépare en deux parties qui redonneront chacune un nouveau thalle.
- **Sporulation:** des spores peuvent être formées dans les cellules végétatives ordinaires ou dans des structures spécialisées appelées sporanges.
- **Scission binaire:** division du noyau puis du cytoplasme.

La forme caractéristique du cœnobe de *Scenedesmus quadricauda* provient de deux divisions successives par scission binaire. Les divisions suivantes provoquent la fragmentation de cette forme coloniale. Chez les cyanobactéries (*Oscillatoria*), des zones plus sensibles aux cassures sont présentes et favorisent ce mode de reproduction asexuée.

1.2.3.2. Reproduction sexuée (notion de gamie):

Dans la reproduction sexuée, il y a fusion de gamètes mâle et femelle pour produire un zygote diploïde. Des œufs se forment dans les cellules réceptrices identiques aux cellules somatiques (*Spirogyra*) ou dans des cellules végétatives femelles peu modifiées nommées oogones (*Fucus*). Les spermatozoïdes sont produits dans des structures mâles spécialisées appelées **anthéridies**.

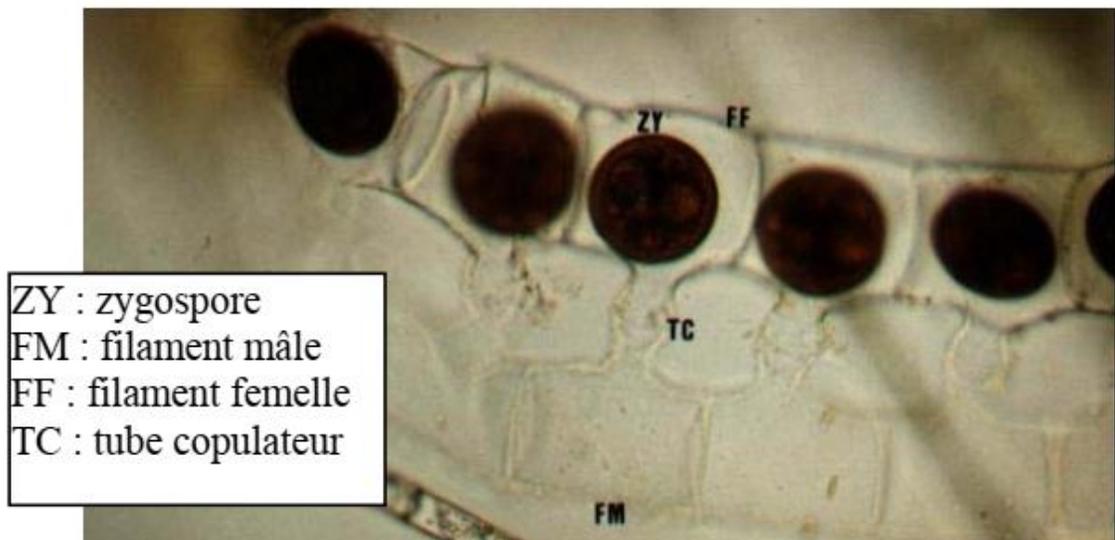


Figure 12: Reproduction sexuée chez Spirogyra

* **Le fucus vésiculeux** est un matériel classique pour étudier la reproduction sexuée. C'est précisément sur cet exemple que G. Thuret, en 1853, a pour la première fois, observé au microscope la copulation de deux gamètes.

La maturité sexuelle se reconnaît à l'apparition de renflements à l'extrémité des thalles. Ces renflements contiennent des *conceptacles*, sortes de cryptes pilifères fertiles dont certaines cellules, les *gamétocystes*, produisent les gamètes.

Dans cette espèce, les gamètes mâles (spermatozoïdes) et femelles (oosphères) sont produits par des thalles différents. Les gamétocystes sont le siège de la réduction chromatique à laquelle succède la gamétogénèse. Dans chaque *gamétocyste mâle* quatre divisions succèdent à la méiose et 64 spermatozoïdes sont différenciés. Ils sont petits, pourvus d'un stigma et très mobiles grâce à un appareil cinétique à deux flagelles insérés latéralement. Dans les *gamétocystes femelles* une division succède à la méiose et 8 oosphères sont produites. Elles sont volumineuses, chargées de réserves et dépourvues d'appareil locomoteur.

La gamétogénèse représente la seule période haploïde. Le cycle comporte ici une seule génération pluricellulaire. Elle est diploïde.

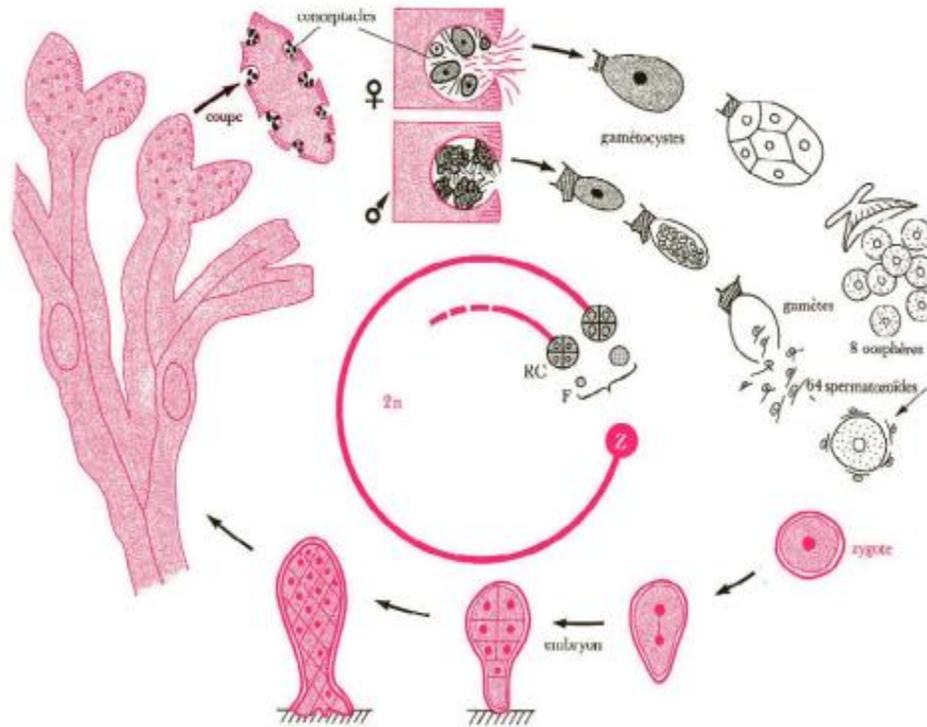


Figure 13: Cycle de développement du fucus vésiculeux.

F, fécondation ; RC, réduction chromatique ; Z, zygote.

✓ Gamètes et fécondation

Chez les algues, les gamètes présentent une grande diversité de structure, de comportement et d'origine. Dans les espèces primitives, ils sont morphologiquement identiques (*isogamie*). C'est le cas du *Chlamydomonas* dont les gamètes sont semblables entre eux et semblables aux cellules parentales. L'évolution tend à établir une ségrégation entre gamètes mâles, petits et mobiles, et gamètes femelles chargés de réserves, et progressivement immobiles.

Dans l'*anisogamie*, les deux cellules sexuelles conservent la même organisation mais sont de tailles différentes (ulve). La forme la plus achevée de cette évolution est l'*oogamie* dans laquelle des spermatozoïdes petits, nageurs, nombreux, s'opposent aux oosphères, volumineuses, riches en réserves, immobiles et produites en nombre plus restreint (*Dictyota*, fucus, laminaires).

Dans les types précédents, au moins un des gamètes est flagellé et actif : on parle de planogamètes et la fécondation est une *planogamie*.

Il est des cas où aucun des deux gamètes n'est mobile et leur rencontre se fait passivement : la fécondation est une *aplanogamie*. Elle se rencontre par exemple chez les Algues Rouges où le gamète

femelle est une cellule située à l'extrémité de certains rameaux des thalles et le gamète mâle, ou spermatic, est une petite masse protoplasmique sphérique entraînée passivement par le courant d'eau.

La *cystogamie* est un mode de fécondation particulier ne mettant pas en jeu de gamètes libres : ce sont les gamétocystes eux-mêmes qui fusionnent. Elle se produit par exemple chez la spirogyre où les cellules de deux filaments voisins établissent des *tubes de copulation* dans lesquels passe le protoplasme d'une des cellules. La répétition des tubes de copulation donne un aspect « en échelle » très caractéristique des filaments en reproduction.

Planogamie et aplanogamie sont des formes de fécondation bien adaptées au milieu *aquatique*. La cystogamie, elle, n'impose pas l'existence d'une phase liquide et peut s'adapter à un mode de vie *aérien*. Rare chez les algues, elle est très répandue chez les champignons où, plus ou moins modifiée, elle devient la règle chez les espèces terrestres.

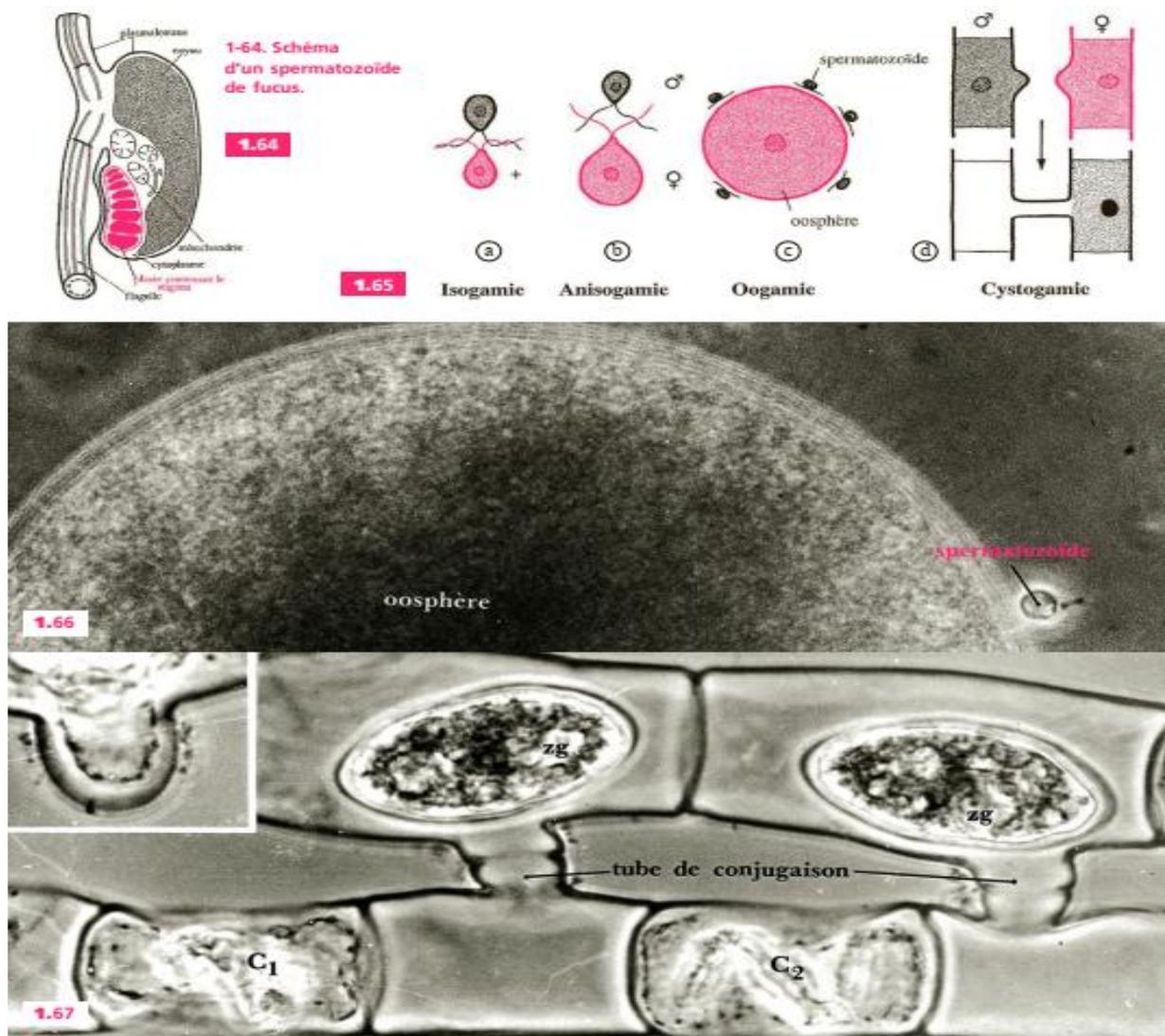


Figure 14: Fécondation chez les algues

1-65. Principaux types. 1-66. Oogamie du fucus. 1-67. Cystogamie de la spirogyre.

1.2.3.3. Cycles de développement

La fécondation fait doubler le stock chromosomique. La méiose est le mécanisme compensateur qui ramène l'équipement nucléaire au niveau initial. Il s'établit ainsi un cycle sexué au cours duquel alternent une phase haploïde ou *haplophase* (n chromosomes) et une phase diploïde ou *diplophase* ($2n$ chromosomes).

Le fucus vésiculeux a montré un exemple dont les gamètes représentent la seule phase haploïde et le thalle pluricellulaire est toujours diploïde : le cycle est dit *diplophasique*. Ce mode de développement est familier car il est habituel chez les animaux. En fait chez les plantes, et en particulier chez les algues, la méiose se produit à des moments variés et ne précède pas nécessairement la gamétogénèse. Lorsque la réduction chromatique intervient dès la germination du zygote, celui-ci constitue seul la diplophase et le thalle est haploïde (*cycle haplophasique*).

Dans d'autres cas, le zygote est à l'origine d'un thalle diploïde. Il produit par méiose des spores haploïdes (*tétraspores* ou *spores réductionnelles*) qui initient une génération haploïde portant les gamètes. Il y a donc *alternance de deux générations*, l'une haploïde, l'autre diploïde (*cycle haplodiplophasique*). On appelle *gamétophyte* ou *sporophyte* la génération produisant respectivement les gamètes ou les spores.

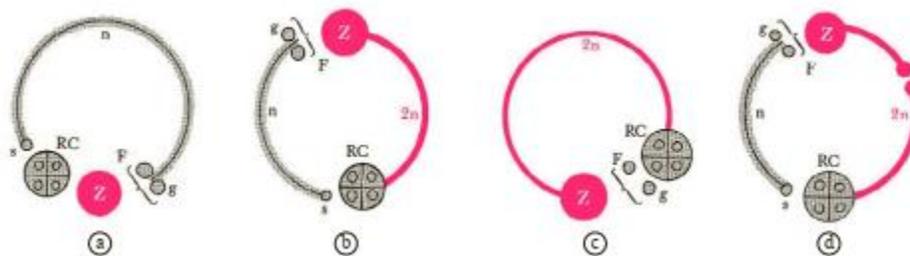


Figure 15: Cycles de développemnt

a. Cycle haplophasique (*Chlamydomonas, Ulothrix, spirogyre*).

b. Cycle haplo-diplophasique (*ulve, Dictyota*).

c. Cycle diplophasique (*fucus, Codium, Diatomées*).

d. Cycle à trois générations successives (*Algues Rouges*).

F, fécondation ; g, gamètes ; RC, réduction chromatique ; s, spore ; Z, zygote.

L'importance relative des phases est très variable selon les espèces. Chez l'ulve ou le Dictyota, les deux générations sont morphologiquement semblables ; dans d'autres espèces elles sont différentes. Par exemple, les grands thalles des laminaires représentent la diplophase très dominante sur une haplophase microscopique réduite à quelques cellules portant les gamétocystes.

Des complications supplémentaires peuvent intervenir. Ainsi, les Algues Rouges ont un cycle où se succèdent trois générations car la phase diploïde se déroule en deux périodes distinctes (la première, issue du zygote, se développe en parasite des rameaux porteurs des gamètes femelles : elle dissémine des spores donnant des thalles diploïdes indépendants où se fera la méiose).

De nombreuses espèces (*Ulothrix*, par exemple) produisent des spores directes ou équationnelles (non produites par méiose) qui assurent une multiplication végétative des thalles se situant en marge du cycle sexué.

La diversité des cycles de développement traduit la multiplicité des tentatives évolutives réalisées au sein du groupe.

D'une façon globale, on remarque que les organismes haploïdes sont primitifs et que l'évolution a privilégié la phase diploïde, plus stable génétiquement et plus favorable à la réalisation d'organismes différenciés dans lesquels la vie pluricellulaire est bien intégrée.



Figure 16: Cycles haplophasiques.

1-69. *Ulothrix*. 1-70. *Spirogyre*.

Les cycles sont comparables à ceci près que la première espèce produit des gamètes libres (isogamie), alors que dans la seconde, la fécondation résulte d'une cystogamie. En marge du cycle sexué, l'*Ulothrix* se multiplie par des spores équationnelles

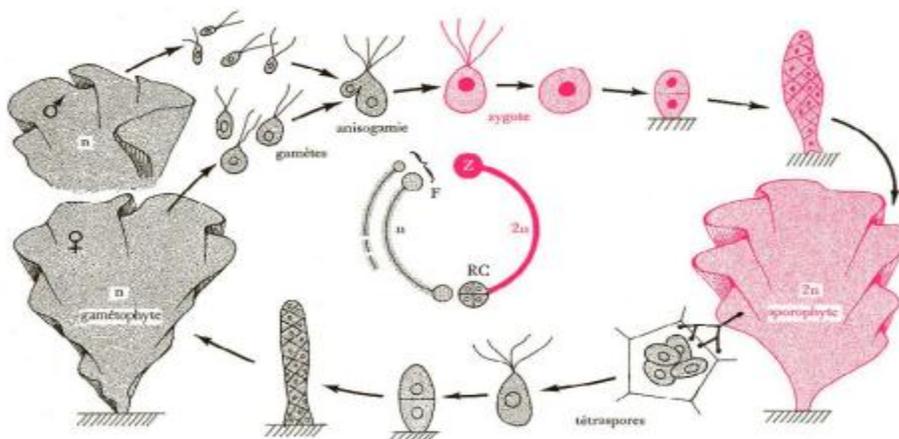


Figure 17: Cycle haplo-diplophasique.

Ulve ou *laitue de mer*. Alternance de deux générations d'aspect identique, l'une produisant les gamètes (gamétophyte), l'autre les tétraspores (sporophyte)

1.3. Systématique et particularités des principaux groupes

La classification des algues se fait selon des caractéristiques spécifiques, telles que les composantes de la paroi cellulaire, les pigments présents la couleur, le cycle de vie et le type de composés utilisés pour l'entreposage de la nourriture.

Les algues peuvent être classées selon :

- ✓ Les modes de reproduction
- ✓ Existence ou non d'organe.
- ✓ Existence ou non de vaisseaux conduisant la sève
- ✓ L'habitation (Chrétiennot, 1990).
- ✓ L'organisation du thalle
- ✓ Thalle unicellulaire (microphyte) ou thalle pluricellulaire (macrophyte) .

Tableau 6: Diversité des algues eucaryotes et procaryotes, marines et d'eau douce (d'après, Jeffrey et al., 1997 ; Sharma et Rai, 2011)

Règne	Embranchement/Classe
Procaryotes	Cyanophytes
	Prochlorophytes
Eucaryotes	Bacillariphytes
	Charophytes
	Chlorophytes
	Chrysophytes
	Cryptophytes
	Dinophytes
	Euglenophytes
	Glaucophytes
	Haptophytes
	Phaeophytes
Rhodophytes	

1.3.1. LES GLAUCOPHYTA

Ce sont des organismes unicellulaires du plancton des eaux douces; aplatis dorsoventralement, ils portent 2 flagelles inégaux apicaux.

-le chloroplaste bleu-vert ou "cyanelle" a 2 membranes et des caractères ancestraux

-les phycobilosomes renferment de la chlorophylle a et des pigments bleus, la phycocyanine et l'allophycocyanine.

Les Glaucophyta renferment trois genres :

Glaucocystis caractérisé par la présence d'une paroi cellulosique. Bien qu'il possède des flagelles rudimentaires très courts, il est non-mobile.

Cyanophora caractérisé par l'absence de paroi cellulosique. Il est mobile grâce à deux flagelles inégaux.

Gloeochaete caractérisé par la présence de pseudo-cils et par la présence de paroi cellulosique.

1.3.2. LES RHODOPHYTA

Sont le plus souvent des algues marines et leur présence dans les eaux douces se limite à une trentaine de genres peu fréquents. Leurs pigments sont constitués par des chlorophylles a et d, des a et ficarotènes, des xanthophylles et des biliprotéines (Phycoérythrine et Phycocyanine). Les réserves sont constituées de rhodamylon ou (amidon floridéen O, amidon particulier toujours extraplastidial prenant une teinte rougeâtre au contact de l'iode. En eau douce, la couleur des Rhodophytes est bleu-vert, rouge-violacé, très souvent vert sale ou vert noirâtre. Il n'existe pas de formes flagellées.

1.3.2.1. Caractères généraux

Cet embranchement compte environ 3000 à 5000 espèces dont la majorité sont des espèces marines, vivant fixées aux rochers ou aux coquilles des mollusques presque exclusivement dans les eaux salées.

- Les formes de thalles : Thalle unicellulaire (rarement), , thalle filamenteux simple ou ramifié, thalle foliacé, thalle cladomien uniaxial ou pluriaxial.

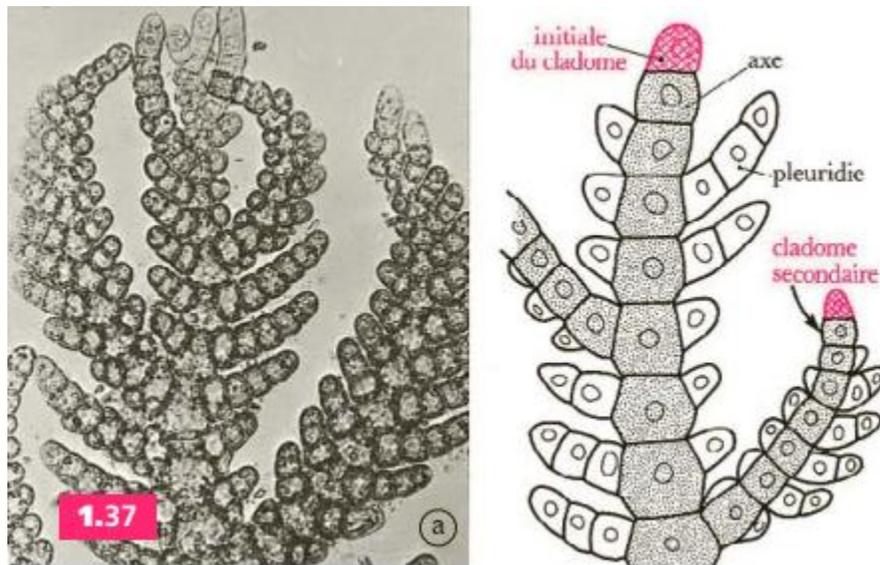


Figure 18: Cladome d'une Algue Rouge



Figure 19: Algues Rouges à thalles cladomiens.

(De gauche à droite : Plumaria ($\times 10$) ; Plocamium ($\times 3$) ; Delesseria)

- La paroi cellulaire est de nature pectocellulosique, elle contient des polysaccharides.
- Les chloroplastes à deux membranes contenant les thylacoides.
- Les pigments sont : la chlorophylle a et d; les carotènes, la phycoérythrine (résponsible de la Couleur rouge de l'algue)
- La substance de réserve est l'amidon extraplastidial appelé : rhodamylon ou amidon floridien, présent dans les cellules sous forme de grains cytoplasmiques.

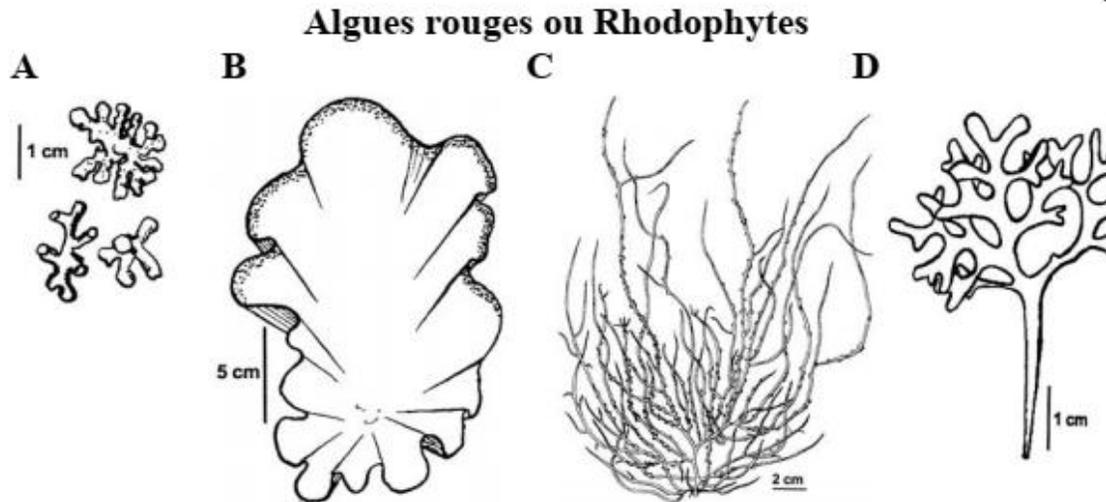


Figure 20: Diversité de la morphologie des thalles d'algues rouges :

thalle calcifié de Phymatholithon calcareum, une espèce du maërl (A) ; lame de Porphyra umbilicalis (B) ; filaments ramifiés de Gracilaria gracilis (C), cladothalle d'Antithamnion (et thalle fucoïde de Chondrus crispus (D)).

1.3.2.2. Reproduction des Rhodophytes

Reproduction asexuée: Se fait par fragmentation du thalle ou par la production de structures spécialisées (spores).

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.

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

Cycle fondamentalement trigénétiques iso ou hétéromorphes. La phase carposporophytique, diploïde, est toujours parasite du gamétophyte femelle. Le développement de cette phase diploïde supplémentaire, intercalée entre la phase gamétophytique et la phase méiosporophytique est propre aux algues rouges. On l'interprète comme un mécanisme compensant la rareté relative des gamies, liée à l'absence de flagelles chez le gamète mâle, par une multiplication clonale de chaque zygote formé.

- **Exemples de Rhodophytes**

Le genre Porphyra (Rhodophyta)

Porphyra est une algue rouge dont la phase morphologique la plus visible est un thalle foliacé unistrate d'une dizaine de centimètres de diamètre.

✓ **Position systématique**Règne: **Plantae**Embranchement: **Rhodophytes**Classe: **Rhodophycées**Ordre: **Bangiales**Famille: **Bangiaceae**Genre: *Porphyra***Reproduction**

Ces thalles sont haploïdes et se comportent comme des gamétophytes: les cellules de leur marge se différencient en gamétocystes. Chez une partie des gamétophytes, identifiés a posteriori comme mâles, chaque gamétocyste se résout en de nombreux gamètes non flagellés et de petite dimension: les spermatis.

Chez les autres thalles, chaque gamétocyste (oocyste) se transforme en une seule oosphère. La rencontre des gamètes se fait au hasard des mouvements de l'eau. Le zygote, contenu dans le gamétocyste femelle, se résout par mitoses en plusieurs cellules diploïdes, les carpospores, qui sont dispersées dans l'eau. Les carpospores germent habituellement sur une coquille de mollusque bivalve et produisent un petit thalle filamenteux très ramifié, qui passé habituellement inaperçu. Ce thalle est un méiosporophyte. Il différencie des méiosporocystes produisant chacun 4 méiospores haploïdes. Ces méiospores fondent une nouvelle generation gamétophytique.

En conclusion, le cycle peut être interprété soit comme trigénétique soit comme digénétique selon que l'on considère ou non les carpospores comme une phase à part entière. Il faut remarquer que le carposporophyte ne manifeste aucun accroissement par rapport au zygote. Dans les deux hypothèses, le cycle est hétérothallique (2 catégories de gamétophytes) et hétéromorphe. Le stade filamenteux (méiosporophyte) a longtemps été considéré comme une espèce à part entière (nommée *Conchocelis*) qui était classée dans un groupe d'algues rouges très éloigné de *Porphyra*. Cette confusion avait des conséquences néfastes pour la culture des *Porphyra* au Japon, puisque le stade *Conchocelis* présent dans les parcs à *Porphyra*, était considéré comme indésirable et à ce titre, était éliminé.

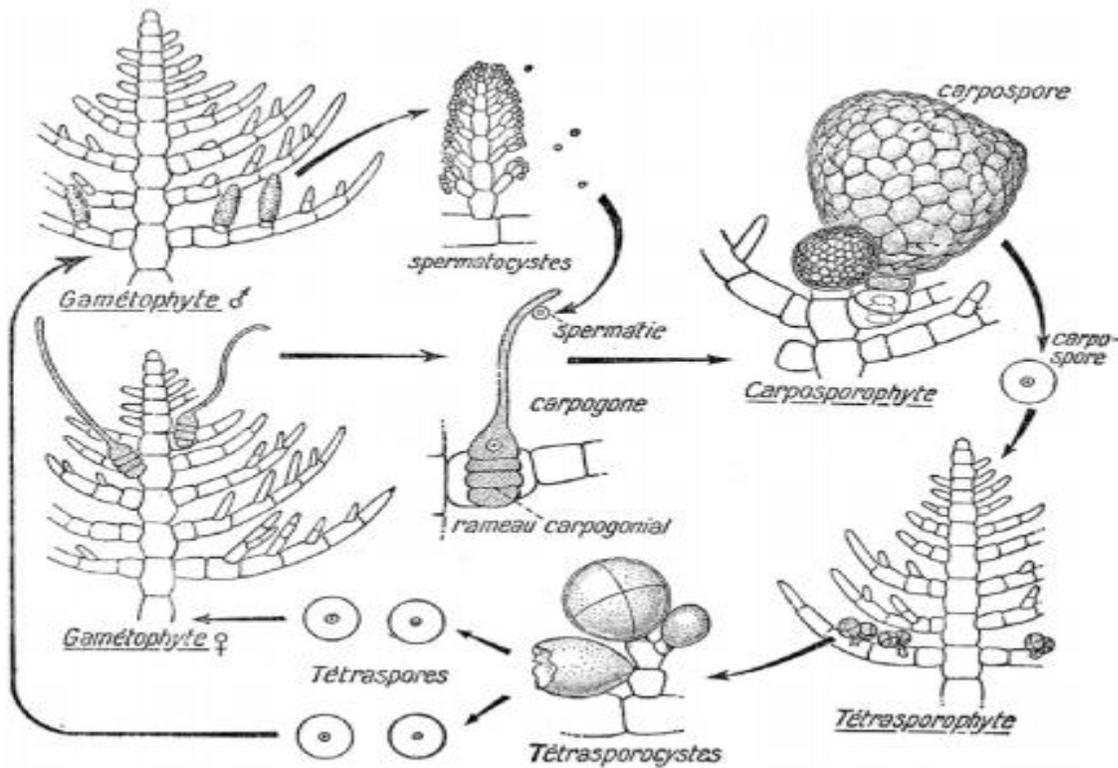


Figure 21: Cycle de l'algue rouge *Antithamnion sarniense*.

Il s'agit d'un cycle haplodiplophasique trigénétique dimorphe. La fécondation est une trichogamie.

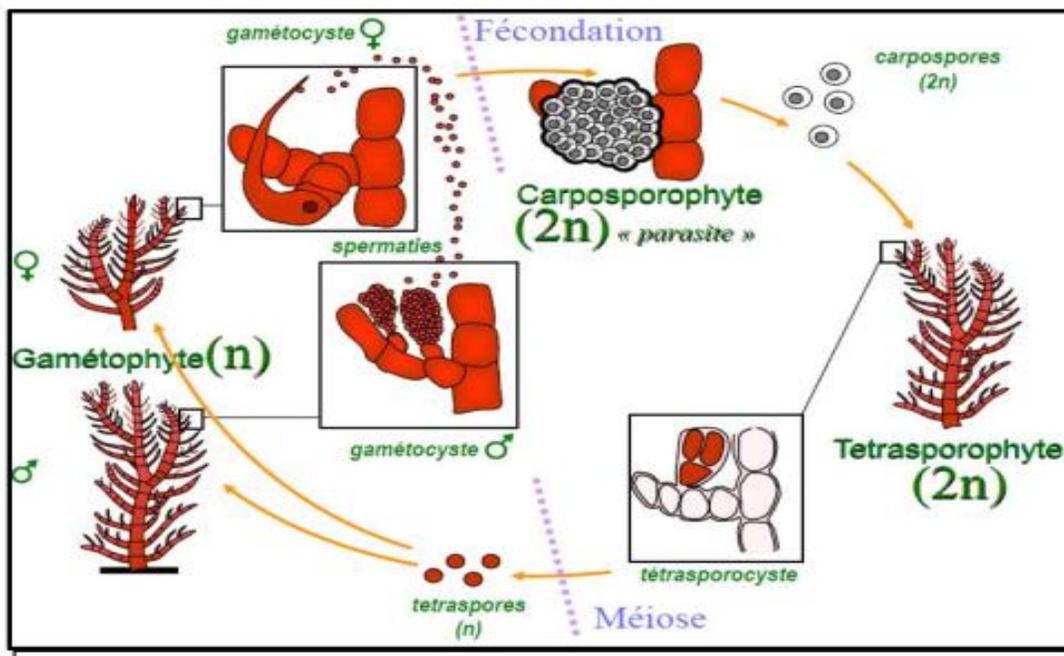


Figure 22: Cycle de reproduction trigénétique d'une algue rouge

(*Antithamnion plumata*)

1.3.2.3. Classification des Rhodophycytes

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

S/CI : BANGIOPHYCIDAE :

- Un thalle unicellulaire ou filamenteux.
- Chloroplastes pariétaux en forme étoilée.
- Croissance linéaire de type intercalaire.

Cette classe contient trois ordres : PROPHYRIDALES, COMPSOGONALES, BANGIALES.

S/ CI : FLORIDEOPHYCIDAE :

- Thalle de type : cladome uniaxial ou pluriaxial.
- Chloroplastes de type pariétaux.
- Présence de reproduction sexuée de type trigénétique.

Parmi les genres les plus importants : *Asparagopsis*, *Gelidium*, *Gellidela*, *Coralina*, *Chondrus* et *Gigardina*.

Tableau 7: Classification des Rhodophyta .

Classe des Bangiophycideae	Classe des Floridophycideae	
Ordre Porphyridiales	Ordre Batrachospermales	Corallinales
<i>Famille Porphyridiaceae</i>	<i>Famille Batrachospermaceae</i>	<i>Coralineaceae</i>
<i>Goniotrichaceae</i>	Palmariales	Gigartinales
Compsopogonales	<i>Palmariaceae</i>	<i>Solieriaceae</i>
<i>Compsopogonaceae</i>	Nemadiales	<i>Gigartinaceae</i>
<i>Erythropeptidaceae</i>	<i>Acrochaetiaceae</i>	<i>Phylloporaceae</i>
<i>Boldiaceae</i>	<i>Nemaliaceae</i>	<i>Gracilareaceae</i>
Bangiales	<i>Helminthocladiaceae</i>	Rhodymeniales
<i>Bangiaceae</i>	<i>Chaetangiaceae</i>	<i>Champiaceae</i>
	Gelidiales	Ceramiales
	Bonnemaisoniales	<i>Ceramiaceae</i>
	<i>Bonnemaisoniaceae</i>	<i>Dasyaceae</i>
	Cryptonemiales	<i>Delesseriaceae</i>
	<i>Dumontiaceae</i>	<i>Rhodomelaceae</i>
	<i>Glosiphoniaceae</i>	
	<i>Cryptonemiaceae</i>	
	<i>Kallymeniaceae</i>	
	<i>Choreocolaceae</i>	

1.3.3. LES CHLOROPHYTA ET LES STREPTOPHYTA

1.3.3.1. Caractères généraux des chlorophycophytes

*Leurs parois cellulaires ont la cellulose pour principal composant.

*Le chloroplaste possède deux membranes.

*Les thylacoïdes sont groupés par paquets de plus de trois.

* Le nombre et la forme des chloroplastes différents d'un groupe à un autre.

*Comme les végétaux supérieurs, elles possèdent deux chlorophylles (a et b) mais aussi des carotènes et de la xanthophylle.

* Leurs réserves carbonées issues de la photosynthèse sont constituées d'amidon accumulé dans les plastes.

*Présence de pyrènoïdes qui sont des corps protéiques autour duquel s'accumule l'amidon.

*Présence de flagelles (2 à 4) chez certaines espèces : isokontés et acrokontés. Certains flagelles présentent des mastigonèmes sur un seul côté (mastigonème pectiné) ou sur les deux côtés (mastigonème penné).

1.3.3.2. Reproduction des chlorophycophytes

a-Reproduction asexuée

Chez les espèces unicellulaires, elle se fait par bipartition transversale, ou bien par bourgeonnement 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

*La cystogamie : très fréquente chez les Zygothycophyceae. Chez les espèces unicellulaires le contenu de deux cellules fusionne et forment un zygote qui est souvent enveloppé d'une masse gélatineuse

* Chez les espèces filamenteuses la fécondation se fait par la formation d'un tube de conjugaison.

* Chez les charophyceae, les gamétocystes sont insérés au niveau de certains nœuds et sont visibles à l'œil nu. Les gamétocystes mâles ou globules sont sphériques et de couleur orangée. Les gamétocystes femelles ou nucules sont ovoïdes et de couleur noirâtres.

c-Cycle de vie :

Le cycle de vie des chlorophycophytes est monogénétique haplophasique (exemple: Zygothycophyceae genre : *Spirogyra*)

1.3.3.3. Classification des *Chlorophycophytes*

Les Chlorophytes sont des algues vertes accumulant de l'amidon dans leurs plastes, elles peuvent se subdiviser de la façon suivante, en quatre classes et dix-neuf grands ordres :

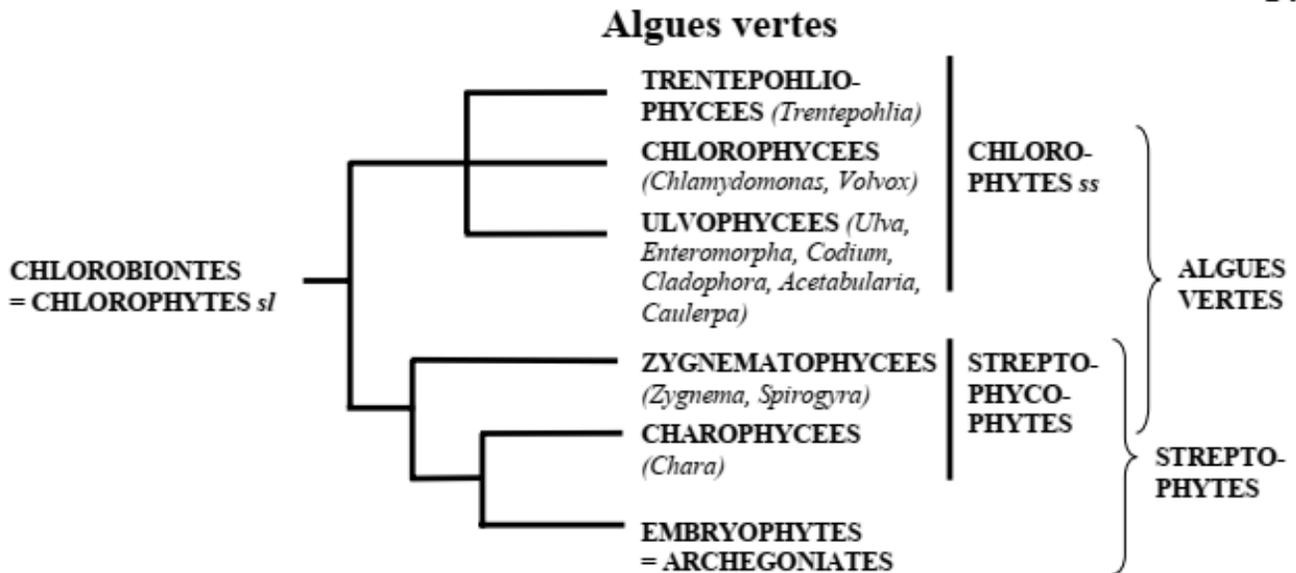


Figure 23: Position systématique des différents groupes d'algues vertes.

1. PRASINOPHYCEES

Cette classe d'algues comprend des cellules nageuses libres dont les flagelles sortent d'une dépression apicale, puits ou cratère flagellaire. On y distingue quatre ordres :

a-Les Pyramimonadales comprennent deux familles, les Pyramimonacées et les Tetraselmiacées. Le genre Pyramimonas, en forme de pyramide renversée dont la base présente un cratère flagellaire d'où sortent quatre flagelles égaux est abondant dans les eaux salées et natronées.

b- Les Pédinomonadales ont des cellules de petite taille à un ou deux flagelles. Il existe seulement quatre genres et une douzaine d'espèces en eau douce.

c-Les Halosphaerales ne comprennent, de même que l'ordre suivant, que des formes marines.

d-Les Prasinocladales.

2. CHLOROPHYCÉES

C'est la plus importante des classes de Chlorophytes ; elle se subdivise d'après leur morphologie en quatre sous-classes :

A. CHLOROPHYCIDÉES

Ce groupe comprend toutes les formes solitaires ou coloniales ni filamenteuses, ni thalloïdes. Il comprend les trois ordres suivants :

a-Volvocales

Cet ordre est composé d'algues flagellées et mobiles ; les cellules peuvent être solitaires ou agencées en colonies ayant une forme définie. Les Volvocales se rencontrent dans les eaux douces mais on en trouve aussi en abondance dans les eaux salées intérieures chlorurées ou natronées. Leur détermination est assez difficile pour des raisons d'ordre pratique : le matériel doit être généralement examiné vivant et l'on dispose rarement sur place d'une documentation suffisante sur la taxinomie de ce groupe.

Chez les Polyblépharidacées, les cellules sont nues sans membrane définie, tandis que les Phacotacées regroupent les formes pourvues d'une coque solide qui se sépare en deux au moment de la division (la plus connue est *Phacotus lenticularis*).

Les Chlamydomonadacées regroupent une trentaine de genres de flagellés solitaires pourvus d'une membrane ferme dont le plus connu est *Chlamydomonas* (fig. 24) ; la cellule est ovoïde, ellipsoïdale, globuleuse ou légèrement fusiforme, la section transversale est toujours ronde ; la forme du plaste dans la cellule a donné naissance à cinq sous-genres.

✓ Le *Chlamydomonas*

C'est une Algue Verte unicellulaire appartenant au plancton d'eau douce. La cellule est mobile grâce à un appareil cinétique comportant deux flagelles ou fouets, situés à l'avant du corps. L'essentiel du volume cellulaire est occupé par un chloroplaste incurvé en forme de cloche. À sa base, un gros pyrénôïde est entouré de grains d'amidon. Les thylakoïdes forment de longs saccules dispersés dans le stroma du plaste. Un stigma est situé juste sous la paroi et le plasmalemme dans la région antérieure. C'est une aire spécialisée du plaste constituée par une accumulation de globules lipidiques contenant des pigments caroténoïdes pourpres ou oranges. Le stigma est une sorte d'« œil primitif » qui semble intervenir dans les réactions photosensibles de la cellule (orientation des déplacements par rapport à la lumière).

La paroi est mince mais continue et rigide ; elle est de nature glycoprotéique. Le noyau est central. Une vacuole pulsatile, située près de la base des flagelles, se contracte et se vide périodiquement. Les autres organites sont ceux d'une cellule eucaryote habituelle.

À la fois autotrophe par son chloroplaste et mobile par ses flagelles, le *Chlamydomonas* réunit des caractéristiques végétales (photosynthèse) et animales (locomotion). Il est par sa structure apparenté à plusieurs lignées d'Algues unicellulaires ou pluricellulaires ayant évolué dans plusieurs directions. On le considère comme une espèce primitive proche d'un « archétype » ou forme ancestrale hypothétique d'où seraient issus des organismes plus différenciés.

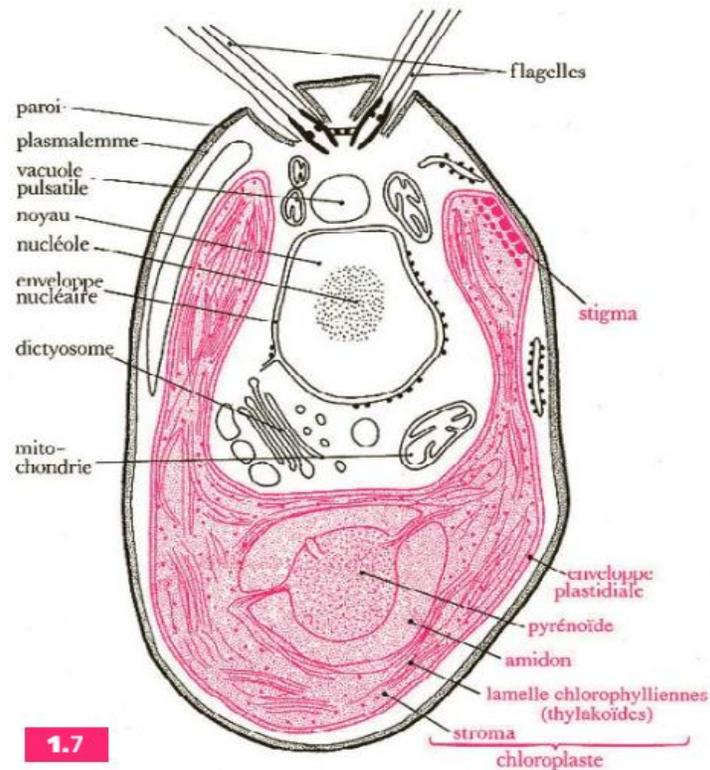


Figure 24: Organisation d'une cellule de Chlamydomonas.

✓ **Position systématique**

Règne: **Plantae**

Embranchement: **Chlorophycophytes**

Classe: **Chlorophycées**

Sous-classe: **monoadophycidées**

Ordre: **Volvocales**

Famille: **Chlamydomonacées**

Genre: **Chlamydomonas**

• **La reproduction chez la Chlamydomonas :**

1. Reproduction asexuée: La reproduction asexuée est assurée par la fragmentation de la cellule en un groupe de zoospores biflagellées dont chacune ressemble, à une cellule mère plus petite, qui redonne par simple croissance un nouveau thalle de chlamydomonas.

- La cellule végétative perd ces flagelles et devient un sporocyste.
- Le contenu de la cellule subit une ou deux mitoses, pour donner deux ou quatre zoospores.
- La paroi se déchire en libérant les zoospores, ressemblant chacune à la cellule mère, et donnent un nouvel individu après sa croissance.

2. Reproduction sexuée: La reproduction sexuée est assurée par des gamètes, ayant le même contenu que les cellules adultes (et les zoospores) mais une taille plus réduite; suivant les espèces les gamètes sont identiques ou différents par leur taille; dans ce dernier cas certaines espèces sont hétérothalliques, d'autres sont homothalliques.

La cellule du gametophyte (A), haploïde se divise à l'intérieur de sa paroi et devient alors un gamétocyste contenant 8- 16 ou 32 gamètes à deux flagelles. La rupture de la paroi du gamétocyste libère les gamètes dans le milieu, les gamètes peuvent être semblables (espèces isogames) (C&B) ou de tailles différentes (espèces anisogames)

Les gamètes se fusionnent lors de la fécondation (D).

* La fécondation donne un zygote diploïde, mobile grâce à quatre flagelles : planozygote (E).

* Le planozygote perd ses flagelles et s'entoure d'une paroi épaisse (F) .

* Dans les conditions favorables le zygote germe en subissant immédiatement la méiose en donnant 4 spores haploïdes (G), zoospore libre (H)

Type de gamie : planogamie isogamie ou anisogamie

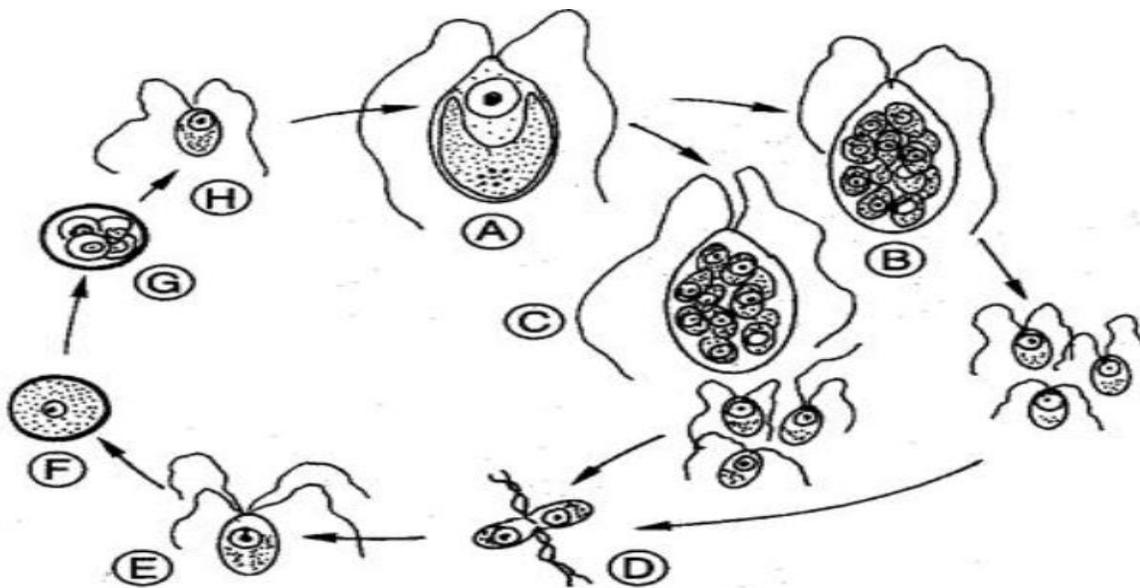


Figure 25: Cycle de la reproduction sexuée chez la *Chlamydomonas*

b- Les Volvocacées enfin comprennent les formes coloniales où les cellules le plus souvent à deux fouets sont réunies par une gaine gélatineuse commune.

Les genres les plus fréquemment rencontrés sont *Pandorina* (*P. morum*), *Eudorina* (*E. elegans*), *Pleodorina* et *Volvox*. Chez *Pandorina* les cellules le plus souvent au nombre de 16, sont serrées et comprimées les unes contre les autres comme des fruits de mûre et enrobées dans une enveloppe gélatineuse à deux feuillets. Chez *Eudorina*, les cellules sont globuleuses, toutes de taille identique les unes des autres et disposées en couronnes parallèles tandis que chez *Pleodorina*, les cellules sont de deux tailles différentes. *Volvox* forme de très grosses colonies sphériques ou ovoïdes jusqu'à 1,5 mm de diamètre, facilement reconnaissables par le grand nombre de cellules qui les composent; des colonies filles existent souvent à l'intérieur de l'enveloppe de la colonie mère. Les cellules sont toutes identiques, biflagellées, sphériques, piriformes ou pyramidales.

c- Tétraspores Cet ordre comprend des algues passant la majeure partie de leur existence à l'état palmelloïde, enrobées de gelée amorphe ou structurée ; elles n'acquièrent de flagelles (2 ou 4 égaux) qu'au moment de la zoosporulation.

B. ULOTHRICOPHYCIDÉES

Cet embranchement groupe les Chlorophytes filamenteuses ou thalloïdes. Il comprend les ordres suivants:

a- Ulothricales Ce sont toutes des Chlorophycées organisées en filaments simples, non ramifiés, constitués de cellules en général uninucléées disposées en une seule file, rarement plusieurs. Les genres les plus fréquemment rencontrés sont :

Ulothrix (Ulothricacées) avec des filaments sans cellule apicale différenciée fixés à l'état jeune mais librement flottants à l'état adulte. Les cellules sont uninucléées avec un plaste pariétal enveloppant de la moitié à entièrement la cellule. Chez quelques espèces, une vacuole contenant un granule existe à chaque pôle de la cellule. Les formes planctoniques ont souvent une gaine muqueuse bien développée. *Uronema* est un genre voisin avec des cellules à plaste pariétal réduit. Une cellule basale de forme spéciale et une cellule apicale plus ou moins pointue existent aux extrémités du filament).

Binuclearia (Ulothricacées) avec des filaments cylindriques d'abord fixés puis librement flottants. Les cellules avec un plaste pariétal sont entourées d'une membrane gélatineuse épaisse ; au moment de la division, les deux cellules-filles restent le plus souvent contenues dans le même article.

b-Ulvales Cet ordre groupe les Chlorophytes en thalle foliacé, à une ou deux couches de cellules ou en tube cylindrique creux ou plein.

Schizomeris (Ulvacées) forme des thalles cylindriques pleins non ramifiés fixés à leur base ; les cellules sont prismatiques et disposées en anneaux réguliers.

Exemple: L'espèce *Ulva lactuca*

L'ulve ou « **laitue de mer** » vive dans la zone recouverte périodiquement par les marées, le thalle est une mince lame lobée, verte, fixée sur les rochers par des rhizoïdes.

✓ Position systématique

Règne: **Plantae**

Embranchement: **Chlorophycophytes**

Classe: **Chlorophycées**

Sous-classe: **Septoophycidées**

Ordre: **Ulvales**

Famille: **Ulvacées**

Genre: *Ulva*

Espèce: *Ulva lactuca*



Figure 26: Aspect générale d'Ulva

La reproduction chez la laitue de mer: *Ulva lactuca***Reproduction sexuée: (A---> G)**

➤ Sur le bord du thalle, apparaît une zone de couleur sombre, 0.5 à 1.5cm de larges où naissent les gamètes. Cette espèce est hétérothallique (dioïque) :

➤ (A).Thalle femelle haploïde (1n) –**gamétophyte** ♀ - à marge verte sombre, dont les cellules de la marge deviennent des gamétocystes qui se différencient par mitoses successives pour donner 8-16 gamètes haploïdes (g) munis chacun de deux flagelles.

➤ (B) Thalle mâle haploïde (1n) – **gamétophytes** ♂ - à marge jaunâtre, dont les cellules de la marge deviennent des gamétocystes qui se différencient par mitoses successives pour donner 16-32 gamètes haploïdes (g) semblables, plus petits, que les gamètes ♀.

- (C) Après la rupture de la paroi des gamétocystes les gamètes sont libérés dans le milieu. La fécondation concerne ici deux gamètes mobiles de tailles différentes, aboutit à la formation d'un zygote à quatre flagelles. (planogamie, anisogamie)
- (D) le zygote perd ses flagelles, se fixe sur le substrat se développent en un filament puis en un thalle foliacé diploïde.
- (E) thalle diploïde « **sporophyte** »
- (F) Les cellules à la marge du thalle du sporophyte deviennent des sporocystes chacune subit une méiose suivie ou non d'une division supplémentaire pour donner 4 à 8 cellules haploïdes : les spores réductionnelles à quatre flagelles.
- (G) les spores sont plus grosses que les gamètes, mobiles et munies de 4 flagelles : ce sont des zoospores. Ces zoospores vont se fixer sur le substrat pour donner un thalle gamétophyte ♀ ou ♂.

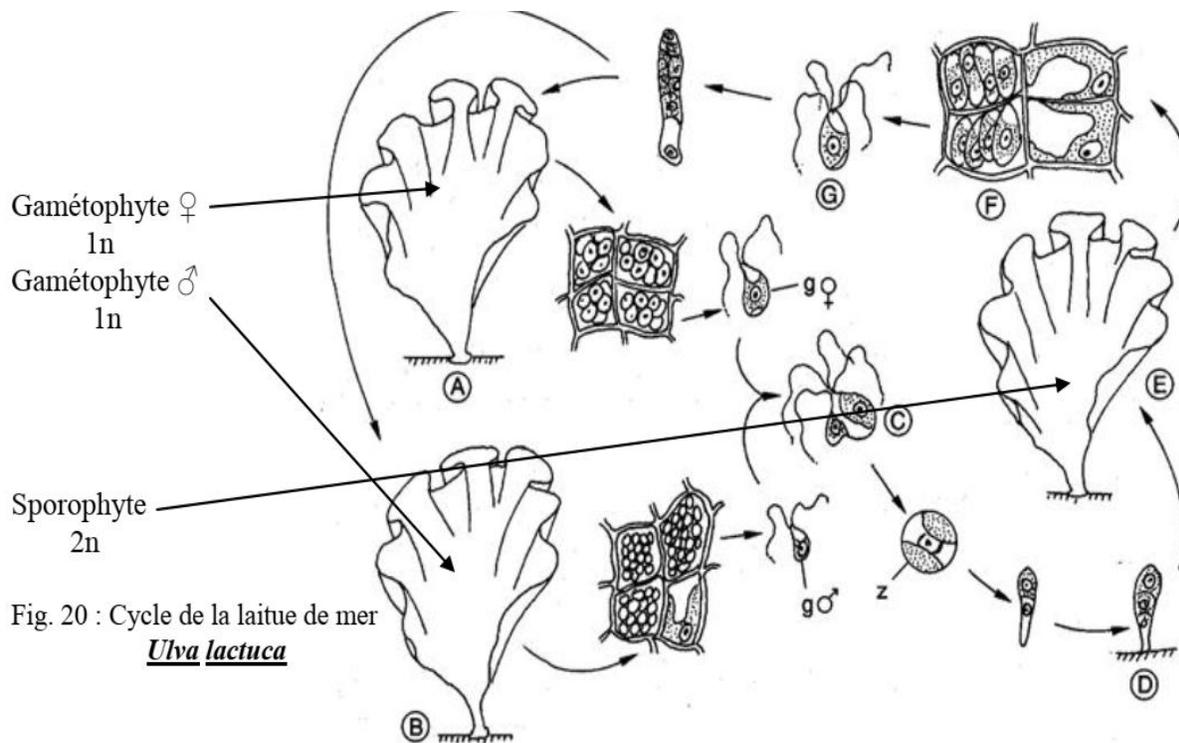


Fig. 20 : Cycle de la laitue de mer
Ulva lactuca

Figure 27: Cycle de la laitue de mer , *Ulva lactuca*

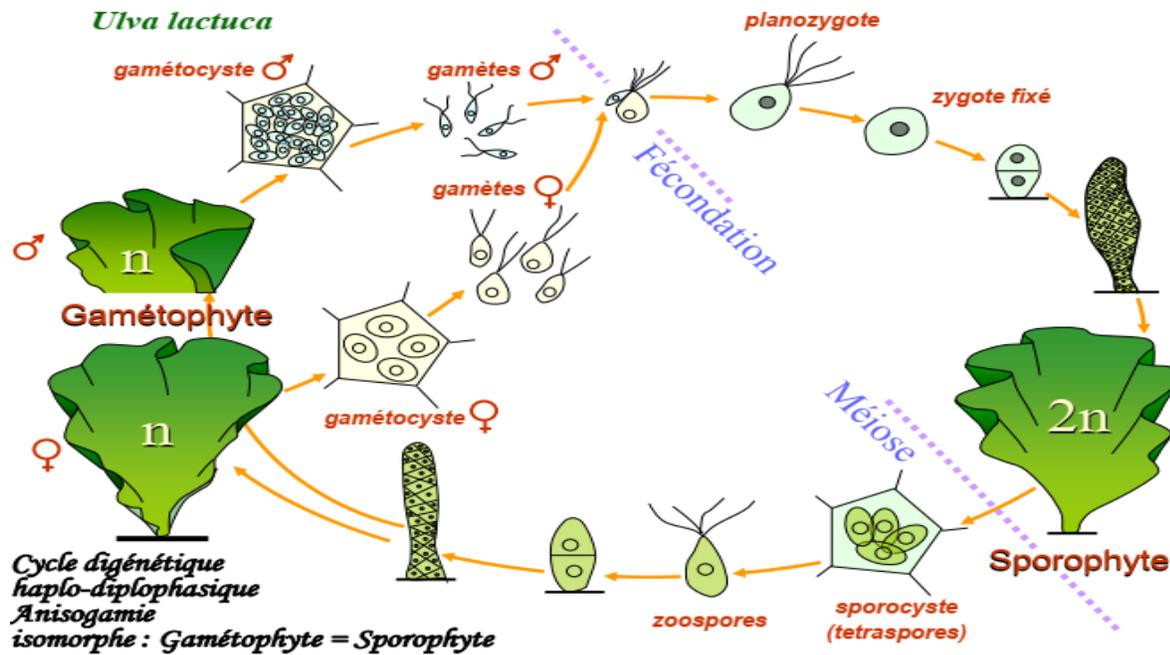


Figure 28: gamétogénèse chez la laitue

c- Chaetophorales

On trouve dans cet ordre des algues filamenteuses ramifiées, des forms à thalles parenchymateux globuleux ou aplatis et des algues croissant en paquets cubiques.

Stigeoclonium (Chaetophoracées) est une forme comprenant une partie dressée et une partie rampante toutes les deux composées de filaments unisériés, irrégulièrement ramifiés. Dans la partie dressée, les cellules terminales s'calent en poil plus ou moins long.

d- Chlorosarcinales

Cet ordre comprend presque uniquement des formes ubaériennes se développant sur le sol humide en paquets irréguliers ou cubiques. Il existe en tout une seule famille avec une dizaine de genres et une vingtaine d'espèces pour l'ensemble du globe.

e- Trentepohliales

Ce sont des Chlorophytes subaériennes qui se développent sur un substrat humide : sols, rochers, feuilles, troncs d'arbres. Elles forment des thalles discoïdaux uni ou pluristratifiés ou des feutrages de filaments ramifiés.

Trentepohlia (Trentepohliacées) forme des feutrages avec parfois des filaments dressés. Une quarantaine d'espèces existent dans les régions tropicales

3. ZYGOPHYCÉES (ou Conjugées)

Ce sont des algues vertes filamenteuses ou unicellulaires toujours dépourvues de cellules flagellées et caractérisées par la conjugaison de gamètes amiboïdes. D'après la structure de la membrane, on distingue deux ordres :

a- Zygnématales

Les cellules sont toujours uninucléées, haploïdes. La reproduction végétative est de type normal comme chez toutes les formes filamenteuses.

A la reproduction sexuée, deux cellules se transforment en gamétocystes et donnent chacune un gamète amiboïde ; gamète mâle et gamète femelle, isomorphes fusionnent soit dans un des gamétocystes, soit dans le tube de copulation reliant les deux gamétocystes, soit dans une enveloppe gélatineuse entre les deux gamétocystes. Le zygote formé s'entoure d'une membrane épaisse et ornée, il germe après méiose pour donner quatre thalles végétatifs.

Les formes filamenteuses sont groupées dans la famille des Zygnematacées, les formes unicellulaires dans les Mésotaeniaceées. Les genres les plus souvent trouvés sont :

Spirogyra (Zygnematacées) qui forme des filaments simples ; les cellules ont 1 à 16 plastes rubanés tordus en hélice et portant des pyrénoides ; le noyau est central. La systématique des quelques trois cents espèces existantes est fondée sur la conformation des cloisons intercellulaires (avec ou sans repli), le nombre de plastes, les modalités de la reproduction et la taille des cellules végétatives

✓ Position systématique

Règne: **Plantae**

Embranchement: **Chlorophycophytes**

Classe: **Zygnophycées**

Ordre: **Zygnemales**

Famille: **Zygnematacées**

Genre: ***Spirogyra***

Zygnema (Zygnematacées) dont les filaments sont composés de cellules à deux plastes étoilés séparés par le noyau. La détermination des 120 espèces existantes est faite d'après la morphologie du zygote et de la zygospore et la dimension des cellules.

✓ Position systématique

Règne: **Plantae**

Embranchement: **Chlorophycophytes**

Classe: **Zygnophycées**

Ordre: **Zygnemales**

Famille: **Zygnematacées**

Genre: **Zygnema**

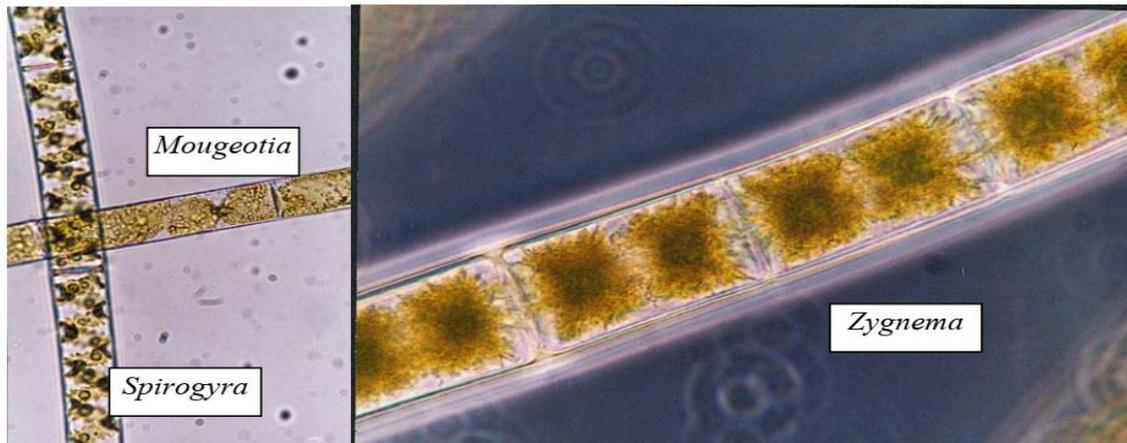


Figure 29: Aspect générale des algues vertes

(Zygnema et Spirogyra)

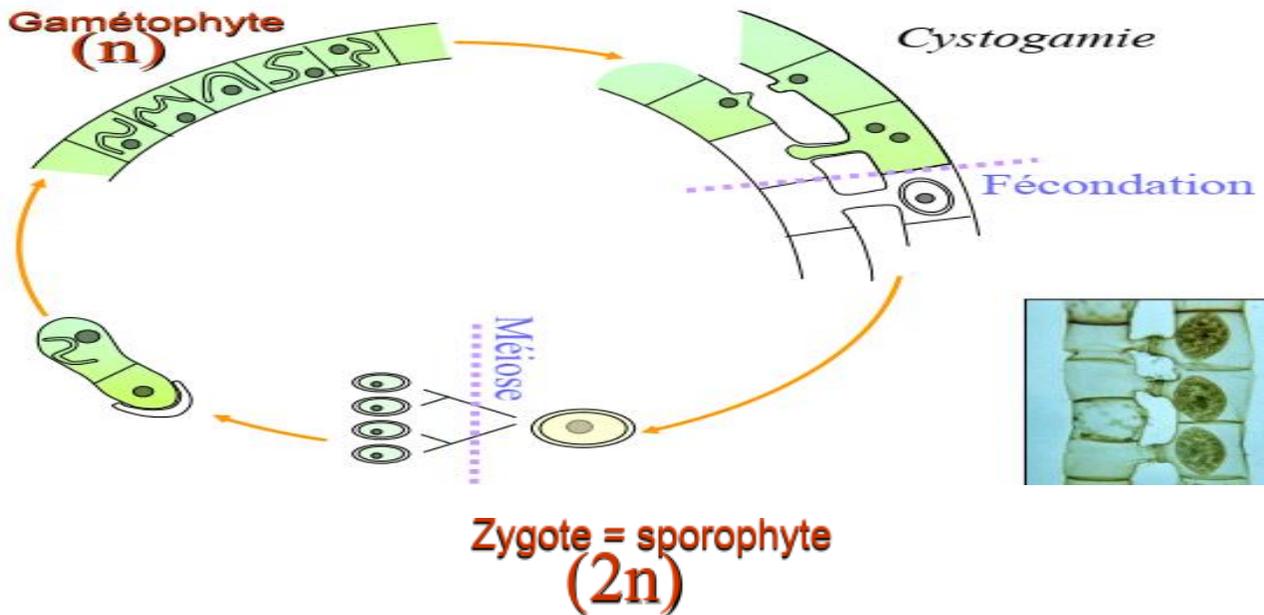


Figure 30: Cycle monogénétique haplophasique. Cystogamie (Spirogyra)

b- les Desmidiées à membrane percée de pores et ornementée et à suture médiane.

4. LES CHAROPHYCEES

Les Charophycées ne comprennent qu'un seul ordre: **les Charales**. Ce sont des algues vertes de grande taille (parfois jusqu'à un mètre) ayant un aspect particulier avec axes et verticilles rappelant les Preles ou les Cératophylles.

L'algue est entièrement submergée, souvent imprégnée de calcaire ; elle présente une structure cladomienne typique : elle comporte une (tige principale et croissance indéfinie composée de cellules nodales et de cellules internodales très allongées ; chaque nœud donne naissance à un verticille de rameaux courts (6 à 10 suivant les genres) à croissance limitée appelés pleuridies montrant à leur tour des cellules nodales et internodales. Chez

le genre Chara, les entre-nœuds sont entourés par un cortex formé de longs filaments longitudinaux légèrement tordus en hélice (fig. 31). La reproduction se fait par formation d'anthéridies et d'oogones sur les nœuds des rameaux verticillés. La multiplication végétative se fait grâce à la germination de bulbilles naissant sur les rhizoïdes.

Il existe une seule famille, les Characées, avec six genres; Chara et Nitella sont les plus répandus. Ils tapissent le fond de certaines mares des plaines d'inondation.

✓ Position systématique

Règne: **Plantae**

Embranchement: **Chlorophycophytes**

Classe: **Charophycées**

Ordre: **Charales**

Famille: **Characées**

Genre: **Chara**

Reproduction: La classe est caractérisée par un cycle oogame, monogénétique haploïde, mais surtout par des gamétocystes de structure complexe, protégés par des cellules stériles, annonçant les gamétanges tuniqués des Métaphytes. L'organe mâle est un globule, entouré d'écussons reliés au centre du globule par un pédoncule unicellulaire, le manubrium, et renfermant plusieurs spermatocystes formant des chaînettes cellulaires. L'organe femelle est un nucule, formé d'une paroi de 5 filaments hélicoïdaux, surmonté d'une couronne à 5 dents, et renfermant une oosphère géante. La fécondation donne un zygote entouré d'une paroi résistante, qui sédimente sur le fond. La méiose a lieu à la germination. Trois des méiospores constituent une poche nourricière, la quatrième produit un nouveau gamétophyte.

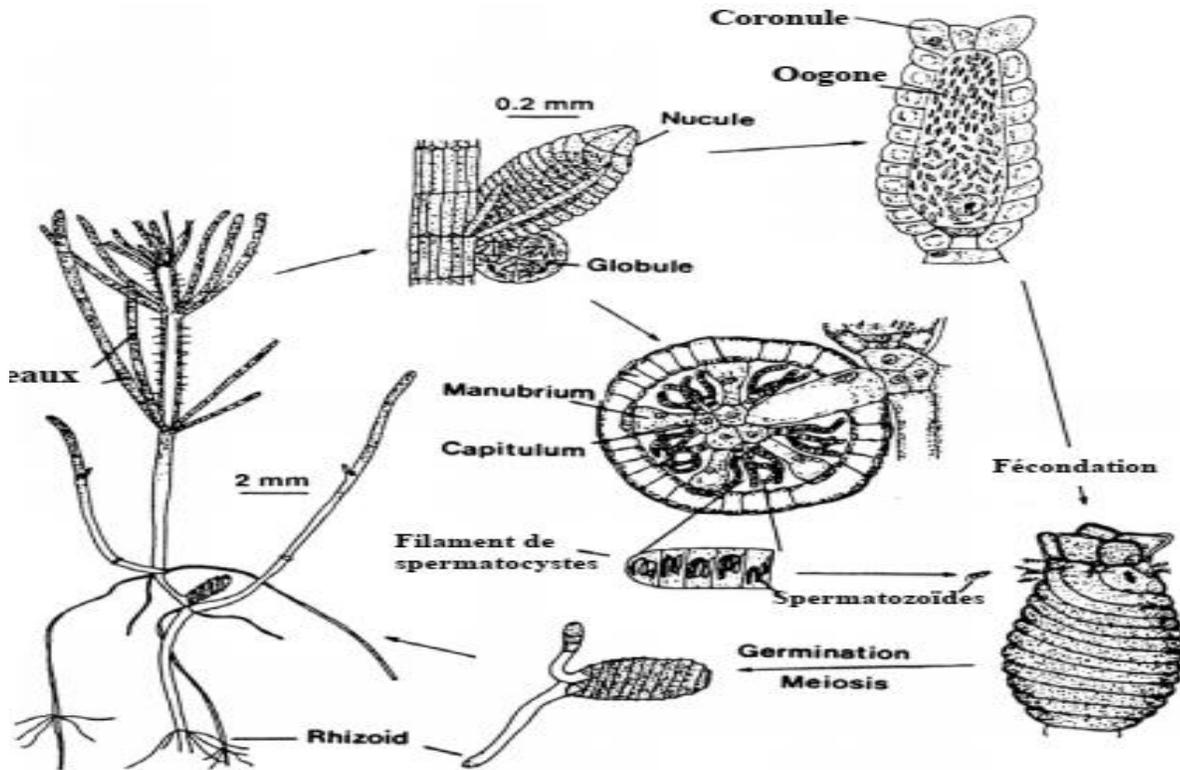


Figure 31: Cycle d'un Chara

Il s'agit d'un cycle haplophasique monogénétique. La fécondation est une oogamie.

✓ LES STREPTOPHYTES

Les Streptophytes comprennent plusieurs groupes dont

a- les Mesostigmatophycées : algues flagellées d'eau douce

b- les Zygnématophytes : ces algues en majorité d'eau douce, sont soit unicellulaires soit filamenteuses; elles sont caractérisées par un mode de reproduction particulier, la conjugaison.

Ex: Zygnema, Spirogyra, Micrasterias, Clostridium

c- les Chlorokybophycées : les cellules renferment un chloroplaste à 2 pyrénoides

d- les Klebsomidiophycées : algues filamenteuses dont le chloroplaste possède un pyrénouide pariétal

e- les Coléochaetophycées : comme Coleochaete divergens, algue épiphyte de plantes aquatiques d'eau douce

f- les charophytes : plantes aquatiques vivant en eau douce comme Chara vulgaris ou Nitella gracilis

13.4. LES HAPTOPHYTA OU COCCOLITHOPHORIDES

Ce sont des unicellulaires biflagellés photosynthétiques dont l'exosquelette est constitué de plaques dures organiques ou calcaires, les "coccolithes" qui par accumulation forment des sédiments à l'origine des assises crayeuses du crétacé. La cellule porte en outre un filament ou haptonème formé de 6-7 microtubules.

Ex: *Emiliana*, *Discosphaera*

1.3.5. LES CHRYSOPHYTES OU CHROMOPHYTES (OCHROPHYTA)

1.3.5.1. Caractères généraux des *Chrysophytes*:

Sont caractérisées par des chromatophores bruns, jaunes ou vert-jaunâtres. Elles ne possèdent jamais d'amidon et ne se colorent pas au contact de l'iode. Il existe de nombreuses formes flagellées possédant pour la plupart deux fouets inégaux.

1.3.5.2. Reproduction des *Chrysophytes*:

- Reproduction sexuée très fréquente; cycles digénétiques iso- ou hétéromorphes; les espèces les plus massives sont généralement digénétiques à sporophyte dominant ou monogénétiques diploïdes. Planogamie ou oogamie.

- Reproduction asexuée par fragmentation ou sporulation.

- Evolution des cycles: les espèces les moins massives, considérées comme primitives, ont des cycles digénétiques isomorphes isogames. Les espèces plus massives montrent une tendance à la réduction de l'haplophase, qui va de pair avec une anisogamie. Cette évolution culmine chez les Fucales, qui ont un cycle monogénétique diploïde et une oogamie.

1.3.5.3. Classification des *Chrysophytes*

Ce groupe se divise en cinq classes :

-Les Chrysophycées à plastes jaunes ou bruns renfermant des chlorophylles a et c, du carotène et diverses xanthophylles, sont des organismes unicellulaires ou coloniaux, rarement filamenteux. Elles forment souvent des logettes ou kystes siliceux plus ou moins sphériques, percés d'un pore fermé par un bouchon.

-Les Xanthophycées possèdent des plastes vert-jaune ou vert à peine jaunâtre où les chlorophylles a et c sont associées à plusieurs xanthophylles et du B carotène, les pigments bruns étant absents. Leur teinte est souvent très proche de celle des Chlorophytes mais l'absence d'amidon permet de séparer facilement ces deux groupes. Plusieurs formes constituent des kystes siliceux, globuleux, formés de deux valves de taille égale ou inégale se séparant à la germination par une ligne équatoriale.

Les Phéophycées sont des algues brunes toujours filamenteuses ou thalloïdes, jamais unicellulaires. Elles sont surtout marines et ne sont représentées en eaux douces que par cinq genres et cinq à six

espèces fort rares. Elles possèdent des plastes bruns contenant des chlorophylles a et c, du B carotène et des xanthophylles (surtout de la fucoxanthine et de la diatoxanthine). Elles ne produisent jamais d'amidon et les matières de réserve consistent en laminarine et en mannitol. La reproduction se fait par des zoosporocystes uni ou pluriloculaires.

-Les Raphidophycées (ou Chloromonadophycées) sont toujours des formes unicellulaires, solitaires, nageant à l'aide de deux flagelles de taille inégale. Leurs pigments sont constitués par de la chlorophylle a, du B carotène et trois xanthophylles.

-Les Diatomées ou Diatomophycées (ou Bacillariophycées) sont des algues unicellulaires ou coloniales, quelquefois filamenteuses, à plastes bruns ou jaunes contenant de la chlorophylle a et c du B carotène et plusieurs xanthophylles. Elles sont caractérisées par leurs parois cellulaires imprégnées de silice formant une logette bivalve appelée frustule.

Celui-ci a l'aspect d'une boîte surmontée d'un couvercle, les deux valves sont ornementées de stries, pores, aiguillons, épines qui ont un grand rôle dans la systématique de ces organismes.

Largement répandues en eau douce et en eau salée, les diatomées sont présentes dans toutes les mers du monde. Elles peuvent être libres entre deux eaux ou fixées à d'autres algues, à des plantes submergées, aux rochers, etc. Ce sont les organismes prédominants dans le phytoplancton des mers froides ou tempérées où l'on dénombre plusieurs millions d'individus par litre d'eau.

Les Diatomées constituent un groupe très diversifié et *majoritaire dans le phytoplancton*. À titre d'exemple, elles sont responsables, à elles seules, de 20 à 25 % de la production primaire nette océanique mondiale. Elles sont représentées par 10 000 à 12 000 espèces.

La cellule est entourée par une paroi faite de couches de silice hydratée (opale) associée à des matériaux organiques. Cette *paroi siliceuse*, ou *frustule*, est constituée de deux valves inégales qui s'emboîtent l'une dans l'autre comme les deux parties d'une boîte de Pétri. Les ornements du frustule sont très géométriques et spécifiques.

Suivant la forme du frustule, on distingue les *Diatomées Centrales*, à symétrie axiale et ornementation rayonnante autour d'un centre, et les *Diatomées Pennales* à symétrie bilatérale et ornements disposés de part et d'autre d'une fente médiane, le *raphé*. Le cytoplasme situé autour d'une grande vacuole centrale contient des plastes lenticulaires bruns pourvus d'un pyrénoloïde. La forme de réserve habituelle est constituée de gouttelettes lipidiques s'accumulant dans le cytoplasme.

La formation des nouvelles valves se produit dans de longues vésicules limitées par une différenciation du plasmalemme, le *silicalemme*. La pénétration du silicium du milieu fait intervenir des pompes membranaires qui consomment de l'ATP.

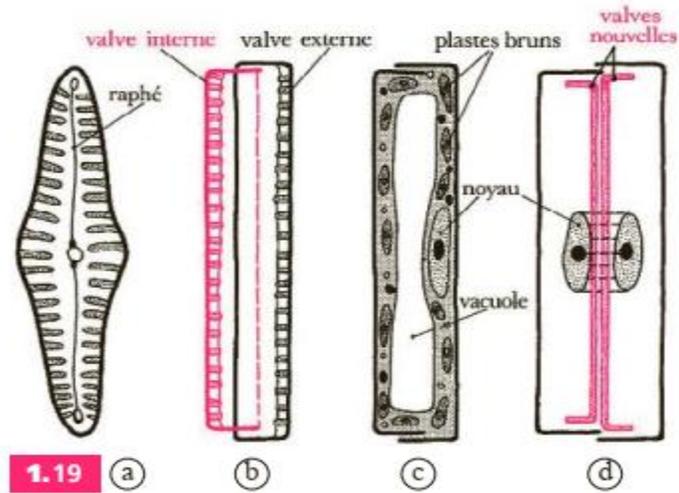


Figure 32: Organisation d'une cellule de diatomée pennale.

a. Valve du frustule. b. Profil montrant l'emboîtement des valves. c. Contenu protoplasmique.

d. Formation des nouvelles valves lors d'une division.



Figure 33: Quelques exemples de Diatomées

✓ Reproduction des Diatomées

a- Reproduction asexuée

La multiplication cellulaire végétative est la principale méthode de multiplication des Diatomées et se fait lorsque les conditions sont favorables à leur prolifération. Le frustule inextensible, impose aux cellules un mode de division particulier. Le noyau se divise et chaque nouveau noyau entraîne une des valves de la paroi. Chaque partie reconstitue l'autre frustule à l'intérieur de celle existante. Les Diatomées sont de plus en plus petites. Quand la cellule devient trop petite intervient la reproduction sexuée.

b- Reproduction sexuée

- la multiplication asexuée, induisant une diminution progressive de la taille des générations successives de diatomées. À partir d'une taille minimale (30 % de la taille initiale), la reproduction intervient entre deux diatomées afin de générer des individus de taille nonnale, Le processus est complexe et diffère chez les diatomées centrales et les pennales.
- Chez les diatomées centrales, les cellules se transforment les unes en gamètes femelles, les autres en gamètes mâles. Les gamètes mâles sont munis d'un flagella avec lequel ils s'introduisent dans les diatomées gamètes femelles.
- Chez les diatomées pennales, la fécondation se fait par cystogamie : il y a d'abord adhésion des deux diatomées, facilitée par du mucilage. Chacune évolue alors en un ou deux gamètes actifs (mâles, sans flagelle) ou passifs (femelles) qui fusionnent ensuite par divers moyens.

Dans tous les cas, l'œuf résultant de la fusion des gamètes, appelé auxospore, s'entoure d'une épaisse paroi mucilagineuse et grossit considérablement avant de sécréter un frustule et donc devenir une nouvelle diatomée de grande taille.

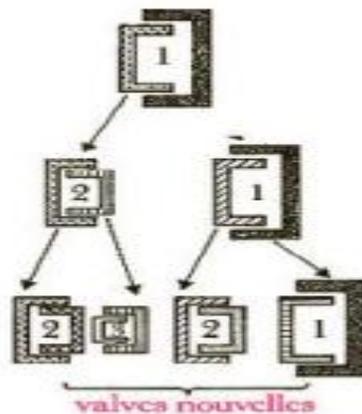


Figure 34: Divisions successives chez les Diatomées.

Les valves régénérées étant les valves internes, les descendants ont des tailles variables, et la population est hétérogène (les chiffres indiquent des individus de dimensions identiques).

1.3.5.3. Exemple des Chromophytes :

Le genre *Laminaria*

Pseudo-tige avec crampons, thalle brunâtre très long (plusieurs mètres) divisé en lanières aplaties, à disposition palmée

✓ **Position systématique**

Règne: **Plantae**

Embranchement: **Ochrophyta**

Classe: **Phaeophyceae**

Ordre: **Laminariales**

Famille: **Laminariaceae**

Genre: *Laminaria*



Figure 35: Le genre Laminaria

Le genre *Fucus*

Caractéristiques :

Le fucus vésiculeux est une algue brune fixée sur les rochers à l'aide d'un petit crampon en forme de disque. Ce crampon donne naissance à un stipe cylindrique court et souple qui se divise presque à la base et donne naissance à une fronde plane traversée par une côte médiane saillante allant jusqu'à l'apex. Les rameaux ont une marge ondulée, ils sont linéaires et presque toujours dichotomes et portent de part et d'autre de la côte des vésicules aérifères sphériques et lisses de la taille d'un petit pois

souvent groupées par deux de façon quasi symétrique. En période de reproduction, en bout de thalle, on observe des renflements fourchus de couleur claire correspondant aux organes reproducteurs également groupés par paires. Le thalle a la texture du cuir et sa couleur oscille entre le brun-olive, le jaunâtre foncé et le brun noir. Il peut mesurer de 15cm à 1m de longueur pour une largeur de 0,5 à 4 cm



Figure 36: Le *fucus vésiculeux*.

✓ **Position systématique**

Règne: **Plantae**

Embranchement: **Chromophyta**

Classe: **Phaeophyceae**

Ordre: **Fucales**

Famille: **Fucaceae**

Genre: ***Fucus***

Espèce: ***Fucus vesiculosus***

Cycle d'un Fucus dioïque (Phaeophyta)

Les thalles de *Fucus* sont diploïdes. Ils ont la forme de lanières rubanées ramifiées dichotomiquement, et montrent deux types d'épaississements. D'une part, le long de la nervure médiane, des vésicules gonflées de gaz jouent le rôle de flotteurs (aérocystes); d'autre part, aux extrémités du thalle, des réceptacles contiennent les structures productrices de gamètes.

Chaque réceptacle est criblé d'un grand nombre d'orifices qui assurent une communication entre autant de conceptacles et le milieu extérieur. Un conceptacle se présente comme une cavité tapissée de poils

stériles pluricellulaires (paraphyses) mêlés de gamétocystes pédicellés. Les conceptacles d'un réceptacle mâle contiennent des filaments pluricellulaires courts, ramifiés, terminés par des gamétocystes mâles (spermatocystes). Chaque gamétocyste mâle subit une méiose et chacune des 4 cellules haploïdes qui en sont issues subissent immédiatement 2 à 5 mitoses qui aboutissent à la formation de petits gamètes pleurokontés hétérokontés, des spermatozoïdes, qui seront libérés dans l'eau. Les conceptacles d'un réceptacle femelle contiennent des oocystes à pédicelle unicellulaire non ramifié. Chaque oocyste subit une méiose suivie de 0 ou 1 mitose et produit donc 4 -8 oosphères, qui seront libérées dans l'eau. La rencontre des gamètes est guidée par un chimiotactisme. La gamie est une oogamie. Le zygote germe sur un substrat approprié et se développe en nouveau thalle.

En conclusion, une seule génération morphologique assure le déroulement du cycle, et correspond à des thalles diploïdes. Le cycle est donc monogénétique diploïde. Les méiospores se comportent comme des gamètes et la méiose peut donc être qualifiée de gamétique. Chez ce type de cycle, par conséquent, les gamétophytes sont diploïdes.

Certains auteurs, néanmoins, s'appuyant sur le fait que les cellules issues de la méiose subissent une ou plusieurs mitose, considèrent que la phase haploïde est pluricellulaire et que le cycle est digénétique à gamétophyte extrêmement réduit.

Chez certaines espèces de *Fucus* qualifiées de monoïques, chaque thalle porte à la fois des réceptacles mâles et des réceptacles femelles. Chez d'autres, qualifiées de dioïques, chaque thalle ne produit qu'une seule catégorie de gamètes.

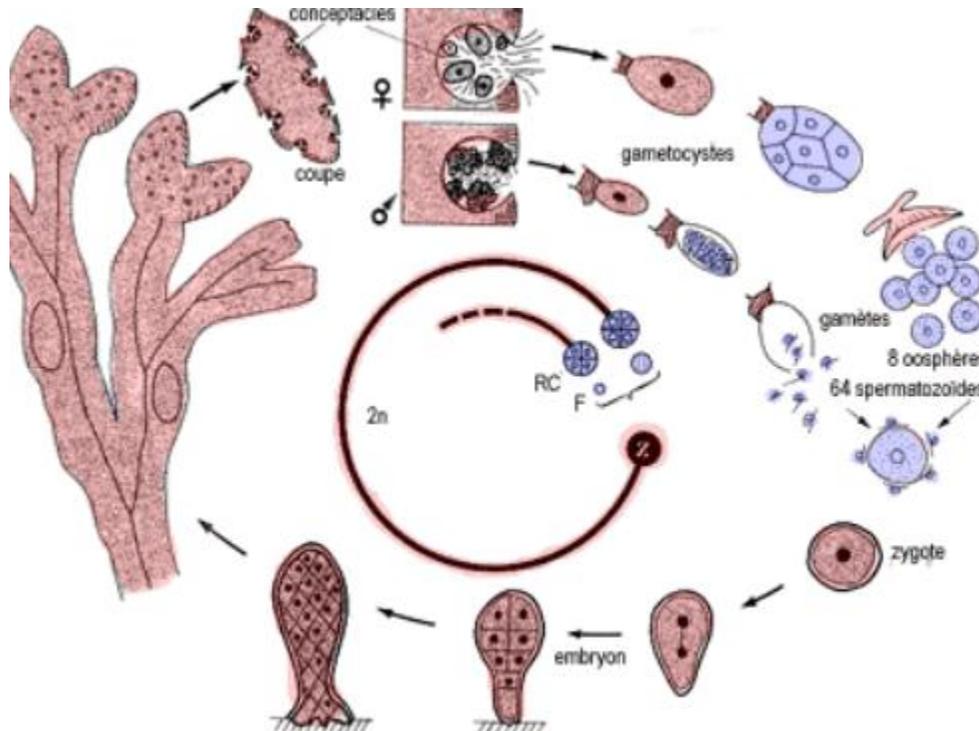


Figure 37: Cycle de reproduction diplophasique –monogénétique de *Fucus vesiculosus*

1.3.6. Les Dinophytes

Ce sont des unicellulaires planctoniques marins ou d'eau douce ou encore parasites d'animaux marins certaines espèces sont toxiques et sont responsables de l'apparition du phénomène des eaux rouges dangereux pour les animaux marins, les coquillages ou l'homme

- la moitié des espèces sont photosynthétiques (chlorophylle a et c), les autres carnivores, la cellule porte 2 flagelles perpendiculaires situés dans des sillons. La cellule est entourée d'une coque formée de plaques de cellulose

Ex: *Ceratium*, *Peridinium*, *Noctiluca*, *Gonyaulax*

1.3.7. LES EUGLENOZOA

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 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.

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 :

Les Euglénales

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 pyrénoïde. Chez *E. viridis*, il existe des plastes en bandelettes qui rayonnent d'un pyrénoïde axial entouré de paramylon.

- **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.

- **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.

-*Strombomonas* (Euglénacées) diffère du genre précédent par la forme et la structure de la logette. Celle-ci est toujours atténuée vers l'avant en un col plus ou moins haut tandis que la partie postérieure, le plus souvent, s'effile en queue.

-*Asfasia* (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.

1.3.8. LES CRYPTOPHYTA

Les Cryptophyta sont des organismes unicellulaires flagellés, un ou deux flagelles ont des ciliés tubulaires bipartites et la cellule est couverte d'un periplast consistant de plaques spéciales, Ils utilisent des chlorophylles a et c, des pigments surnuméraires rouges ou bleus aussi bien que phycobilins pour récolter la lumière utilisée dans la photosynthèse, le produit de stockage photosynthétique est l'amidon.

Les Cryptophyta habite dans l'eau marins, d'eau douce ou des milieux terrestres humides

Ex: *Goniomonas*, *Chilomonas*, *Cryptomonas*, *Pyrenomona*, *Rhinomonas*

Chapitre 2: Les Champignons et les Lichens

2.1. Problèmes posés par la classification des champignons

Les Champignons ou *Mycophytes* (*myco* = champignon, leur étude constitue la mycologie) sont des Thallophytes qui se distinguent fondamentalement des Algues par l'absence de chlorophylle et de toute ébauche de plastes. Incapables de photosynthèse, ils sont hétérotrophes et doivent consommer des molécules organiques déjà élaborées. Ils se classent parmi les *consommateurs* comme les animaux.

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* (glucane) qui est stocké dans le cytoplasme comme dans les cellules animales (hépatocytes, par exemple).

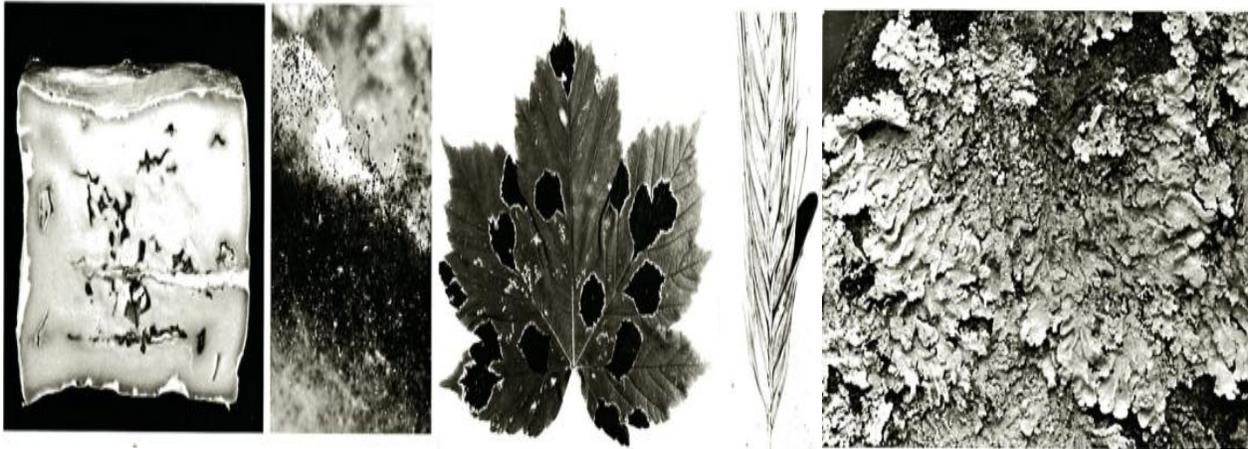
Du point de vue écologique, ils sont essentiels pour le recyclage de la matière. Avec les bactéries ce sont les grands destructeurs des molécules complexes. On distingue trois modes de vie :

- 1) 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.
- 2) Les *parasites* s'accroissent aux dépens d'autres cellules vivantes. Ils causent des dégâts considérables notamment aux plantes cultivées.
- 3) Une dernière catégorie est *symbiotique*, c'est-à-dire qu'elle établit avec une autre espèce un équilibre à bénéfices réciproques.

Le groupe est très vaste et montre une grande diversité d'aspects, de tailles, de structures et d'activités métaboliques. L'origine des champignons est ancienne – ils sont connus depuis l'ère primaire – et leur filiation est discutée. Longtemps classé avec les végétaux *s. s.*, ils sont actuellement considérés comme une lignée à part, distincte à la fois des animaux et des végétaux. La biologie moléculaire confirme que leur individualisation s'est produite très tôt au cours de l'évolution. Les formes les plus primitives passent par des stades aquatiques mobiles avec un flagella (zoospores, gamètes) ce qui suggère une parenté avec des Protistes.

Dans leur grande majorité, les champignons actuels sont aériens. Ils pratiquent une fécondation sans émission de gamètes libres (*cystogamie*). Ils produisent souvent en marge de la reproduction sexuée, une multiplication végétative avec production de quantité de spores aériennes qui assurent un ensemencement très efficace.

Dans l'économie humaine, ils ont des rôles positifs (agroalimentaires notamment avec les levures), médicaux (en particulier avec les antibiotiques) ou négatifs (phytopathologie...)

*Saprophytes**Parasites**Symbiotiques**Figure 38: Exemples illustrant trois modes de vie hétérotrophes des champignons.*

2.2. Structure des thalles (mycéliums, stroma, sclérote)

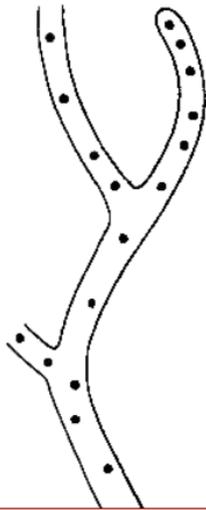
Historiquement, les champignons et les pseudo-champignons *Chromista* ont été considérés pendant longtemps comme une partie du règne végétal en raison de la ressemblance avec les plantes dans le fait, à quelques exceptions, qu'ils ont des parois cellulaires définies, sont non mobiles et se reproduisent par l'intermédiaire des spores (du grec *spora* : semence, spore).

Cependant, les champignons sont hétérotrophes et manquent de chlorophylle. Ils n'ont pas de tissus et par conséquent ils ne possèdent ni racines, ni tiges, ni feuilles, ni système vasculaire. Leur corps somatique (ou végétatif) est appelé thalle. Les thalles fongiques sont généralement filamenteux et multicellulaires, mais pour certains groupes, ils sont unicellulaires. Il y a aussi un petit groupe de pseudo-champignons *Protozoa* qui appartient au règne animal et dont le thalle est souvent plasmodial.

Le thalle des champignons peut prendre différentes formes:

- **Thalle plasmodiale** (*myxomycètes*)
- **Thalle unicellulaire** (ex: levures)
- **Thalle pluricellulaire filamenteux** (les autres), Il existe 2 types de filaments: filaments non cloisonnés et filaments cloisonnés

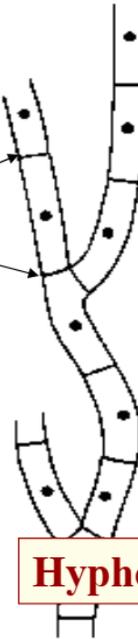
Filaments non cloisonnés



Siphon (ou Coenocyte)

Filaments cloisonnés

Cloisons = septa



Hyphe

Figure 39: Types de thalle filamenteux

Plamode masse cytoplasmique molle, déformable, dépourvue de paroi squelettique pectocellulosique (comme chez les végétaux) et multinuclées

Thalle Un enchevêtrement de nombreux filaments très fins et ramifiés: **Le mycélium**

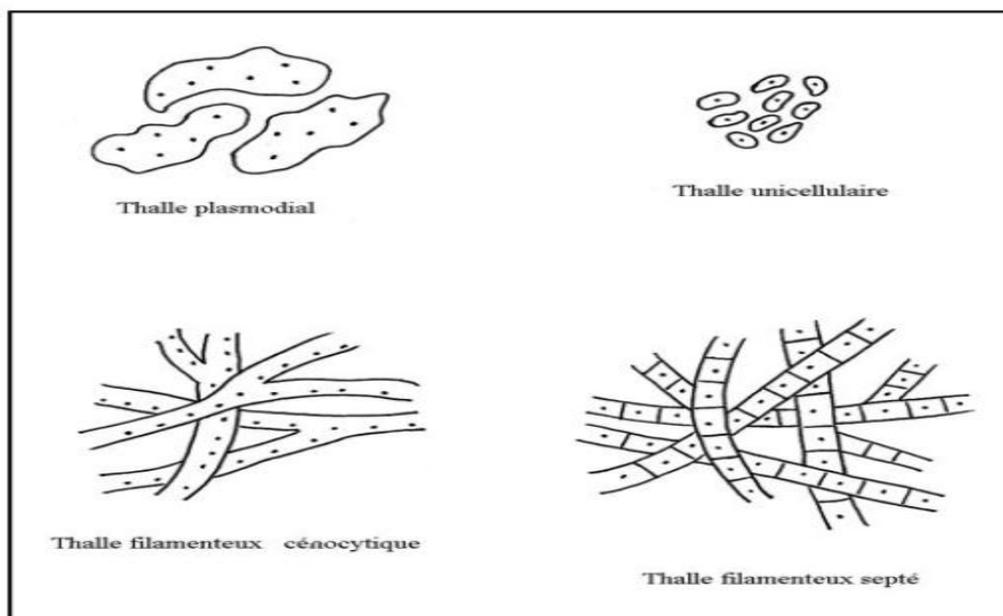


Figure 40 : Principaux types des thalles des champignons et pseudo-champignons.

2.2.1. Mycéliums

Il présente une structure relativement simple comparée à la diversité des constructions cellulaires réalisées par les algues. C'est un appareil végétatif bien adapté aux divers modes de vie hétérotrophe des champignons. Les filaments microscopiques qui le constituent excrètent dans le milieu une grande variété d'enzymes lytiques (protéases, amylases, RNases, phosphatases, etc.) qui hydrolysent et scindent les macromolécules et permettent l'absorption des produits de dégradation. Les formes les plus usuelles de mycélium sont les « moisissures », feutrage de *siphons* ou d'hyphes qui recouvre les matières organiques en décomposition. Les siphons s'allongent et se ramifient sans se cloisonner : les hyphes sont constitués de cellules ou d'articles plurinucléés. Les cloisons transversales sont percées de pores permettant les échanges. Lorsque les hyphes s'agrègent entre eux, ils peuvent donner naissance, notamment au moment de la reproduction, à des constructions agglomérées plus ou moins massives appelées faux-tissus ou *plectenchyme*.

Inversement, certaines espèces ont un mycélium qui se morcelle et, notamment en milieu organique riche, font retour à l'état unicellulaire. C'est le cas des levures qui s'accroissent par bourgeonnement. Lorsque le bourgeon a atteint une certaine taille, il se sépare de la cellule-mère. On parle alors de *mycélium dissocié*.

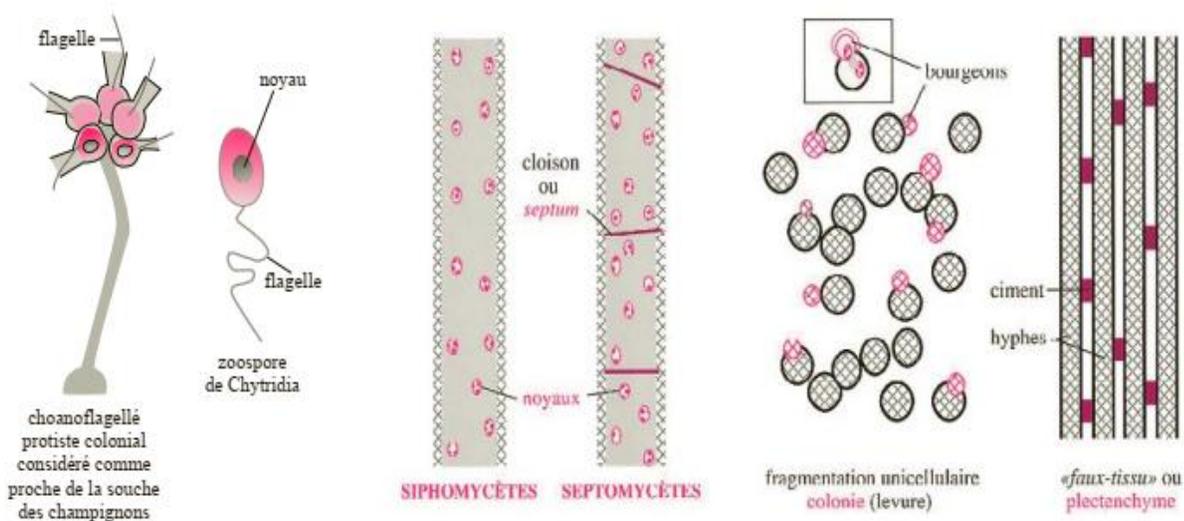


Figure 41: Types de mycéliums.

2.2.2. Stroma

Comme tous les autres organismes vivants, la différenciation est un changement régulé d'un état à un autre, morphologiquement et/ou physiologiquement. Ces changements dans la morphologie aboutissent à une large gamme de structures différenciées qui servent à des fonctions particulières. Celles-ci renferment une variété de différents types de structures productrices de spores appelées stromes. Ainsi, un strome est une masse compacte de hyphes végétatives, produites par le plectenchyme et sur/dans lequel sont communément produites les hyphes fertiles qui génèrent des structures reproductives sexuées et asexuées.

2.2.3. Sclérotés

La production des sclérotés est largement répartie chez les champignons à mycélium septé. Les sclérotés se développent initialement par ramification hyphale localisée et répétée, suivie par l'adhésion des hyphes et l'anastomose des branches (Figure 42). Durant la maturation des sclérotés, les hyphes externes peuvent être agglutinées et forment une croûte tandis que l'intérieur se différencie en un cortex de cellules à paroi épaisse mélanisée et un médulla central de hyphes avec des réserves substantielles en éléments nutritifs de stockage de glycogène, de lipides et de tréhalose.

Les sclérotés peuvent survivre pendant de longues périodes, souvent des années, dans le sol. Dans des conditions favorables, ils germent soit en produisant des hyphes (les sclérotés mycélogéniques de *Sclerotium rolfsii* et *Rhizoctonia solani*, par exemple) ou en produisant directement des structures sexuelles de sporulation (comme chez *Claviceps purpurea* et *Sclerotinia sclerotiorum*).

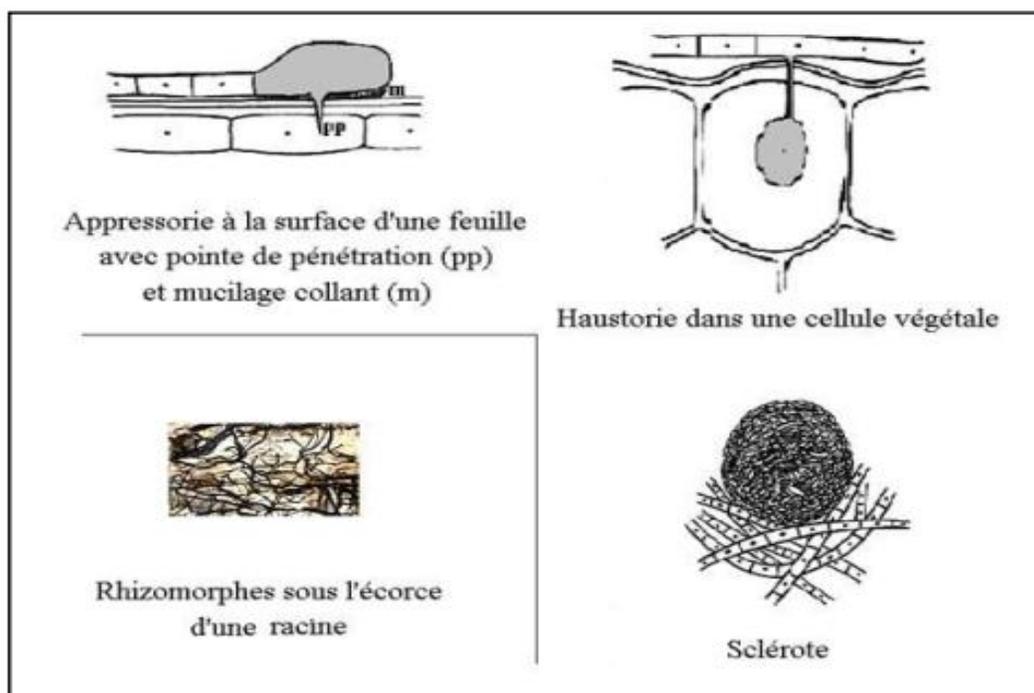


Figure 42 : Quelques structures différenciées des thalles des champignons et pseudo-champignons.

(Nasraoui B., 2015)

2.3. Reproduction

La **reproduction** est la formation de nouveaux individus ayant toutes les caractéristiques typiques de l'espèce parentale. Les champignons se reproduisent principalement par l'intermédiaire des **spores** qui sont des structures uni- ou multicellulaires avec diverses formes et tailles, capables de reproduire l'espèce parentale après germination. Les spores peuvent se former à travers une voie asexuée (ressemblant à des bourgeons qui se forment sur des branches de plantes) ou à travers une voie sexuée

après fécondation. En outre, certains phénomènes parasexuels peuvent aussi être observés chez les champignons.

Les spores peuvent être:

- ✓ **Endospores:** produites à l'intérieur du sporocyste



Figure 43: Exemple des endospores

- ✓ **Exospores :** générées en continu à l'extrémité des filaments spécialisés

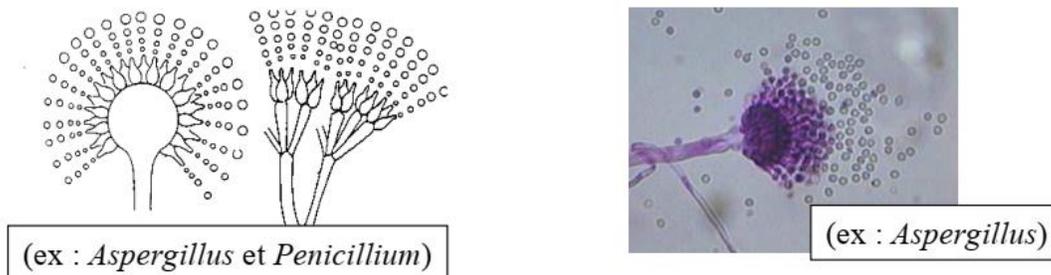


Figure 44: Exemple des exospores

2.3.1. Reproduction asexuée

La reproduction asexuée est la production non sexuée des spores (sans fécondation). Les méthodes de reproduction asexuée communément rencontrée chez les champignons peuvent être:

- fragmentation d'une partie du thalle en fragments,
- scission ou bourgeonnement du thalle en cellules-filles,
- bourgeonnement *de novo* de spores mitotiques "vraies" à partir du thalle.

Certains champignons utilisent la fragmentation des hyphes comme un moyen normal de propagation. La fragmentation peut avoir lieu accidentellement par l'arrachement de parties du mycélium sous l'action de forces externes. Les hyphes de certains autres champignons se fragmentent habituellement en ses composants cellulaires qui se comportent alors comme des spores. Ces spores sont connues sous le nom de **thallospores** ou **spores thalliques** (Figure 45)

Chez la plupart des champignons unicellulaires, tels que les levures, la reproduction asexuée a lieu par l'intermédiaire de la scission ou du bourgeonnement.

La scission et le partage simple d'une cellule en deux cellules-filles par étranglement et la formation d'une paroi cellulaire (*Schizosaccharomyces*). D'autre part, le bourgeonnement implique la production d'une petite excroissance (bourgeon) à partir d'une cellule. Le bourgeon s'accroît en taille quand il est encore attaché à la cellule-mère puis se détache et forme un nouvel individu (*Saccharomyces*). Chez certaines espèces de levures, les bourgeons forment des chaînes ressemblant à un court mycélium, appelé **pseudomycélium**.

Chez la majorité des champignons, la méthode commune de reproduction asexuée est par l'intermédiaire de spores "vraies". Ces spores sont produites *de novo* moyennant un processus de bourgeonnement et sont appelées **blastospores** ou **spores blastiques** (Figure 45). Elles varient énormément en morphologie, couleur, taille, nombre de cellules, arrangement des cellules, etc... Les spores qui peuvent se former ou non à partir de **cellules sporogènes**, se développent directement sur de simples hyphes ou sur diverses structures spécialisées appelées **sporophores**.

Chez les stades asexués (Champignons Anamorphiques), les spores sont appelées **conidies** et les termes de cellules sporogènes et sporophores sont remplacés par **cellules conidiogènes** et **conidiophores**, respectivement. Ces conidiophores peuvent être libres ou groupés en structures conidifères portées par un strome appelé **conidiome**.

Les spores produites asexuellement par les champignons autres que les anamorphes des *Ascomycota* et des *Basidiomycota* sont portées dans des sporanges et sont alors appelées sporangiospores ou sont produites à l'extrémité ou sur les côtés des hyphes de diverses façons et sont assimilées à des conidies et sont ainsi appelées. Un **sporange** est une structure du type sac dont le contenu entier est converti par clivage en nombreuses **sporangiospores**, rarement en une seule sporangiospore (Figure 45). Les sporangiospores des *Zygomycota* ne sont pas mobiles et sont appelées **aplanospores** tandis que les sporangiospores des *Chytridiomycota* et des pseudo-champignons *Oomycota* sont mobiles et sont appelées **zoospores**. Ces zoospores sont équipées avec un ou deux flagelles leur permettant de se déplacer dans l'eau liquide. Les pseudo-champignons *Plasmodiophoromycota* produisent aussi des zoospores flagellées mobiles.

2.3.2. Reproduction sexuée

Comme chez les autres organismes vivants, la reproduction sexuée chez les champignons implique la copulation et la fécondation aboutissant à l'union de deux noyaux compatibles. Le processus de la reproduction sexuée consiste en trois phases distinctes.

D'abord, la **plasmogamie** qui est l'union de deux protoplastes mettant les noyaux près l'un de l'autre à l'intérieur de la même cellule. Ensuite en deuxième phase, la **caryogamie** qui est l'union des deux noyaux rassemblés ensemble par la plasmogamie. Chez certaines espèces, la caryogamie suit la plasmogamie presque immédiatement tandis que chez d'autres, ces deux étapes sont séparées dans le temps et l'espace, avec la plasmogamie seule au départ qui donne une cellule binucléée contenant un noyau de chaque parent. Cette paire de noyaux est appelée **dicaryon**.

Les deux noyaux peuvent ne pas fusionner jusqu'à considérablement plus tard dans le cycle biologique du champignon. Pendant la croissance (division cellulaire) et la sporulation du champignon, l'état dicaryotique peut être perpétué de cellule en cellule par la division simultanée des deux noyaux étroitement associés mais qui restent toujours séparés dans les cellules et les spores nouvellement formées.

Tôt ou tard, la fusion nucléaire a lieu et est suivie par la **méiose**, qui de nouveau réduit le nombre de chromosomes à un stade haploïde et constitue la troisième phase de la reproduction sexuée. Cette reproduction sexuée aboutit à la production de spores spécialisées ayant des noms particuliers tels que zygospores, ascospores, basidiospores et oospores.

Certaines espèces de champignons produisent des structures sexuelles mâle et femelle distinctes sur un même thalle. Ces espèces sont **hermaphrodites** ou **monoéciques**. Chaque thalle d'une espèce **monoécique** peut s'auto-reproduire sexuellement s'il est auto-compatible. D'autres espèces, dites **diéciques**, consistent en des thalles mâles et femelles, avec certains individus produisant seulement des structures sexuelles mâles et d'autres seulement des structures sexuelles femelles. Un seul thalle d'une espèce diécique ne peut pas s'auto-reproduire sexuellement normalement puis que l'individu est soit mâle ou femelle.

Généralement, les structures sexuelles des champignons sont appelées **gamétanges**. Elles peuvent porter des cellules sexuelles appelées **gamètes** ou peuvent contenir simplement des noyaux qui sont des gamètes fonctionnels. Les termes **isogamétanges** et **isogamètes** sont utilisés pour désigner, respectivement, les gamétanges et les gamètes qui sont morphologiquement semblables (Figure 45). Par contre, les termes **hétérogamétanges** et **hétérogamètes** sont utilisés pour désigner, respectivement, les gamétanges et les gamètes mâles et femelles qui sont morphologiquement distincts. Dans ce dernier cas, le gamétange femelle est appelé **ascogone** chez les *Ascomycota* ou **oogone** chez les pseudo-champignons *Oomycota* ; le gamétange mâle est toujours appelé **anthéridie** (Figure 45).

Par ailleurs, nombreux champignons (principalement les *Basidiomycota*) n'ont pas de structures sexuelles différenciées ; les hyphes et les spermaties (spores de rôle strictement reproductif) d'un côté et les noyaux d'un autre côté fonctionnent, respectivement, comme des gamétanges et des gamètes.

Chez certaines espèces fongiques, un phénomène **parasexuel** peut avoir lieu et consiste en la fusion de deux hyphes compatibles.

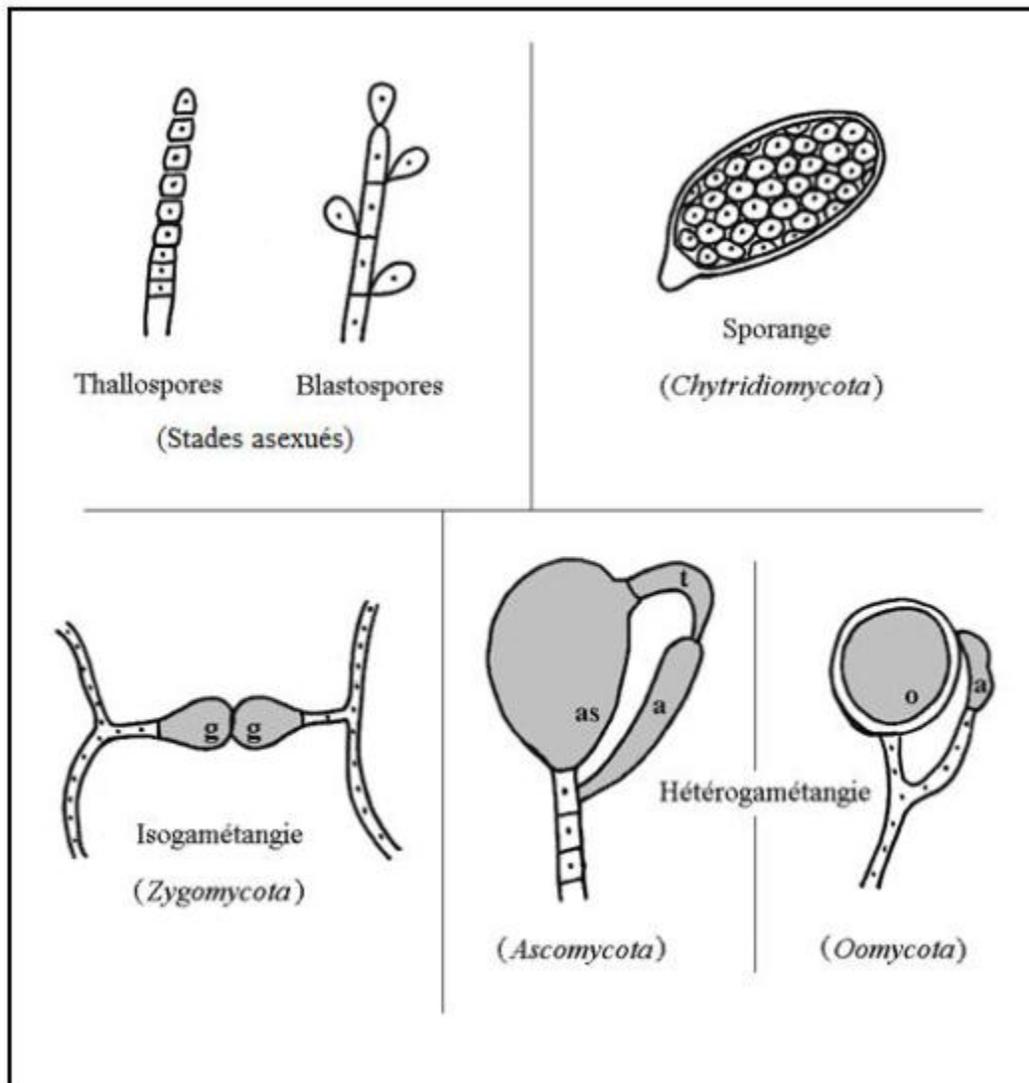


Figure 45 : Quelques structures typiques de reproduction (asexuée et sexuée) chez les champignons et pseudo-champignons

(a : anthéridie, as : ascogone, g : gamétange, o : oogone, t : trichogyne).

2.4. Systématique et particularités des principaux groupes de champignons

Le règne des champignons (*Fungi*) se divise en 8 phylums et renferme les champignons vrais qui sont des organismes eucaryotes se nourrissant par absorption et caractérisés par des parois cellulaires riches en chitine et β -glucanes, des mitochondries avec des crêtes plates, des thalles unicellulaires ou filamenteux et des spores généralement non flagellées, et quand les flagelles existent, ils sont sans mastigonèmes. La reproduction est sexuée ou asexuée et la phase diploïde est souvent courte. Il existe près de 98 000 espèces fongiques décrites.

Les 8 phylums contenus dans ce règne sont :

- 1) *Ascomycota*,
- 2) *Basidiomycota*,
- 3) *Blastocladiomycota*,
- 4) *Chytridiomycota*,
- 5) *Glomeromycota*,
- 6) *Microsporidia*,
- 7) *Néocallimastigomycota*,
- 8) *Zygomycota*.

Les **champignons Anamorphiques** (antérieurement les Deutéromycètes) ne sont plus considérés comme une catégorie taxonomique formelle puisqu'ils ne forment pas une unité monophylétique. Ce sont des champignons qui auraient perdu la faculté de se reproduire sexuellement ou qui sont des anamorphes d'autres phylums, principalement les *Ascomycota* et rarement les *Basidiomycota*

2.4.1. PHYLUM DES MYXOMYCOTA

Les Myxomycètes ont été longtemps considérés comme des champignons (ex Gymnomycota) ; ensuite, il y a quelques années, ils ont été classés dans le règne des Protoctista (**Mycetozoa**), famille des **Myxostelidae**. Car, bien que se reproduisant au moyen de spores (comme les champignons). Cependant, la situation évolue très vite ! A ce jour (2010), la classification des Protoctista n'a plus de réalité systématique. Les Myxomycètes et apparentés peuvent être classés dans le règne des Amoebozoa (Amoebozoaires), embranchement des Mycetozoa. Certains auteurs considèrent les Mycetozoa comme règne autonome. Le rang à accorder à ces « unités phylogénétiques » est auréolé d'un certain flou.

A l'heure actuelle, les travaux de FIORE-DONNO et al (2008) constituent la meilleure référence, car l'équipe de Sandra Baldauf travaille depuis très longtemps sur la systématique moléculaire des organismes unicellulaires.

✓ **Leur exclusion du règne des Fungi se justifie par les raisons suivantes :**

- ils ne possèdent pas de mycelium
- ils sont capables dans leur phase végétative de se déplacer (comme des amibes) par le biais d'un plasmode mou et non cloisonné
- à ce stade, ils n'ont pas de paroi cellulaire rigide et donc pas de chitine : il s'agit d'une seule cellule non segmentée, dans laquelle baignent de nombreux noyaux
- lors de la phase de reproduction, des membranes vont apparaître entre les noyaux, mais elles sont de nature cellulosique
- ils digèrent par phagocytose les substances nécessaires à leur développement : il s'agit donc d'ingestion par « enrobage », et non d'absorption

- quand les spores sont flagellées, elles sont biflagellées

2.4.1.1. Le cycle de vie des Myxomycètes peut être résumé ainsi:

a- **Les spores germent** et produisent une à quatre **zoospores** munies de flagelles et donc capables de se déplacer (un peu comme des spermatozoïdes).

b- **Les myxamibes se multiplient**, et celles qui sont compatibles fusionnent par paires. Il en résulte un organisme appelé plasmode, qui va progressivement grandir par multiplication du nombre de noyaux. Il pourrait être comparé à une amibe géante, sauf qu'une amibe vraie ne possède jamais qu'un noyau. Toutefois le plasmode constitue, jusqu'à la fin de sa vie, une seule et unique cellule, sans paroi rigide, possédant de multiples noyaux (alors que les animaux, par exemple, sont constitués de plusieurs cellules, chacune possédant un seul noyau). C'est à ce stade plasmodien que le Myxomycète peut se déplacer sur le support (plusieurs cm par heure) et digérer de nombreuses substances (bactéries, champignons, même de grande taille). Le plasmode est souvent incrusté de carbonate de calcium granuleux ou cristallisé ; en outre, il renferme fréquemment des morceaux de bois mort et d'autres matières qu'il incorpore mécaniquement dans sa locomotion amiboïde. On ne peut pas, à l'heure actuelle, identifier les Myxomycètes selon l'aspect du plasmode.

c- **Le plasmode**, dans un environnement idéal (conditions atmosphériques, humidité, nourriture, etc.), **donne naissance à l'appareil producteur de spores** (le **sporocarpe** (Figure (46 et 47)), parfois pédicellé, et aspect définitif du Myxomycète, qui permet de le repérer dans la nature et de l'identifier. Les spores (en très grand nombre) seront alors souvent emprisonnées dans un réseau de fins filaments appelé capillitium.

d- Si les conditions sont défavorables, les états mobiles (myxamibes ou plasmode) peuvent se transformer en formes de résistance (**microkystes, sclérotés**) et attendre le retour de conditions favorables à leur développement.

Espèces les plus fréquentes : *Mucilago crustacea* sur pelouse (Crachat de sorcière) ; *Lycogala epidendron* (Lait de loup), *Fuligo septica* (Fleur de tan), *Enteridium lycoperdon*, *Stemonitis axifera* (très spectaculaire)

D'autres genres : *Arcyria*, *Lamproderma*, *Badhamia*, *Ceratomyxia*, *Physarium*, *Leiocarpus*, *Myxarium*, *Trichia* ...



*Figure 46: Sporocarpe (ou sporophore, sporocyste), pédicelés (avec pied);
(Physarum nutans)*



*Figure 47: Sporocarpe (ou sporophore, sporocyste),
sessiles (sans pied);
(Diderma ochraceum)*

2.4.2. PHYLUM DES OOMYCOTA

Le phylum des *Oomycota* contient la quasi-totalité des espèces du règne des *Chromista* qui sont aquatiques ou terrestres, saprobes ou parasites. On connaît près de 1 000 espèces décrites, ce qui ne représente qu'environ 1% du nombre total des espèces fongiques vraies. Le phylum des *Oomycota* renferme une seule classe qui est celle des **Oomycètes**.

2.4.2.1. CLASSE DES OOMYCETES

Les **Oomycètes** ne sont pas des champignons car ils n'ont pas le même ancêtre que les champignons vrais, malgré leur morphologie et nutrition par absorption similaires à celles des champignons. Il a été convenu de les appeler pseudo-champignons ou faux-champignons.

La plupart des Oomycètes sont formés de parasites facultatifs ou hautement spécialisés des plantes vasculaires, provoquant des maladies très graves sur certaines cultures agronomiquement importantes. Concernant le **thalle**, les Oomycètes renferment à la fois des formes unicellulaires holocarpiques et des espèces filamenteuses eucarpiques formées de hyphes cénoctiques, abondamment ramifiées. Les cloisons sont absentes sauf à la base des structures reproductives. Les espèces qui attaquent les plantes se développent de façon intracellulaire ou intercellulaire.

Certains organites cellulaires des Oomycètes sont différents de ceux des champignons vrais. Par exemple, chez les Oomycètes, les mitochondries ont des crêtes tubulaires et l'appareil de Golgi consiste en de multiples cisternes plates, contrairement aux champignons où les mitochondries ont des crêtes plates et l'appareil de Golgi a une structure très simple, consistant souvent en un seul élément cisternal. La composition de la paroi cellulaire est aussi différente entre les Oomycètes et les champignons. Les parois cellulaires des Oomycètes sont majoritairement composées de β -1,3- et β -1,6-glucanes et surtout de cellulose plutôt que de chitine comme dans le cas des champignons. Également, contrairement aux champignons, les Oomycètes contiennent l'acide aminé hydroxyproline dans leurs parois cellulaires. Leurs phases végétatives sont diploïdes plutôt qu'haploïdes ou dicaryotiques comme chez la plupart des champignons.

2.4.2.2. La reproduction des Oomycètes

La **reproduction asexuée** de la plupart des Oomycètes a lieu par l'intermédiaire des zoospores qui se développent dans les sporanges ou dans quelques cas, dans une vésicule évanescence qui émerge à partir du sporange. Chez les espèces phytopathogènes, les sporanges peuvent aussi se comporter comme des conidies qui germent directement par des tubes germinatifs sans se cliver en zoospores.

Deux types de zoospores biflagellées morphologiquement distincts sont produits par la plupart des Oomycètes en fonction de leur cycle biologique particulier (Figure 48). Le premier est appelé **zoospore primaire** et est piriforme avec les flagelles attachés à l'extrémité antérieure de la spore. Le second type est appelé **zoospore secondaire** et est pratiquement produit par tous les Oomycètes qui forment des zoospores. Elle est réniforme avec les flagelles insérés latéralement dans un sillon à la surface de la spore.

Dans les deux types de zoospores, les flagelles sont inégaux. L'un est un flagella portant des poils flagellaires dirigés vers l'avant, l'autre est un flagelle formant une queue derrière. La fonction des zoospores dans le cycle biologique des Oomycètes est de nager sur des distances courtes dans l'eau, trouver des substrats ou hôtes potentiels, s'enkyster et former ultimement des tubes germinatifs qui vont se développer en de nouveaux thalles.

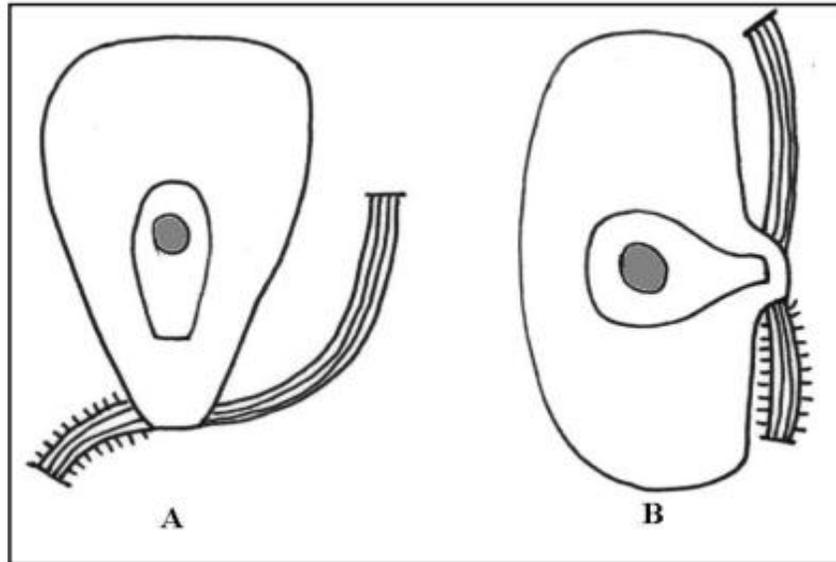


Figure 48 : Aspect général des zoospores primaire (A) et secondaire (B) de *Saprolegnia* sp.

La **reproduction sexuée** de la plupart des Oomycètes est hétérogamétangique. Chez les formes les plus simples, le thalle entier agit comme un gamétange. Mais chez la plupart des espèces, des gamétanges typiques se différencient en petites hyphes formant des structures mâles désignées par **anthéridies** et des structures femelles globuleuses plus larges appelées **oogones**. Après la méiose qui a lieu dans les gamétanges, un ou plusieurs œufs non mobiles, appelés **oosphères**, se développent à l'intérieur de chaque oogone.

En fonction des espèces, les oosphères peuvent se différencier soit par un processus de clivage centrifuge, soit par une aggrégation centripète du cytoplasme oogonial périphérique appelé **périplasme**.

A maturité, chaque oosphère, contient une importante vacuole de stockage appelée **ooplaste** et un ou plusieurs noyaux. Les anthéridies en développement sont attirées aux oogones par des hormones et produisent des **tubes fécondateurs** quand elles deviennent fortement appliquées à la surface des oogones. La fécondation a lieu quand un noyau haploïde de l'anthéridie est introduit dans l'oosphère à travers le tube de fécondation et fusionne avec le noyau de cet oosphère.

Après la fécondation, chaque oosphère se développe en une **oospore** qui mûrit dans l'oogone. Les oospores sont des spores résistantes à paroi épaisse capables de survivre dans des conditions

environnementales défavorables. Après la germination, les oospores développent de nouveaux thalles diploïdes (Figure 49).

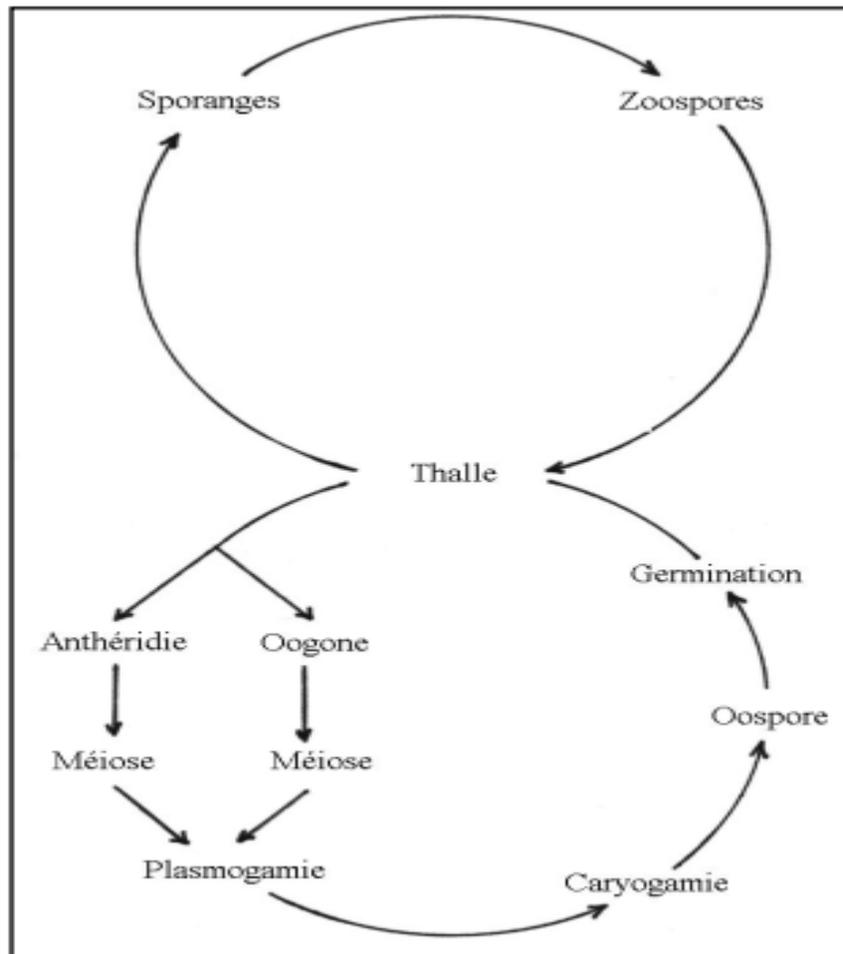


Figure 49 : Cycle biologique général des Oomycètes.

2.4.2.3. Classification des Oomycètes

La classe des Oomycètes renferme 8 ordres parmi lesquels 3 contiennent des phytopathogènes. Ces derniers sont les ordres des Albuginales, des Péronosporales et des Saprologniales.

1) Ordre des Albuginales

Cet ordre renferme des phytopathogènes dans la famille des **Albuginacées**.

Famille des Albuginacées : La famille des Albuginacées contient des pathogènes obligatoires de plantes appartenant aux genres *Albugo* et *Pustula*.

Exemples:

- *Albugo candida* : agent de la "rouille" blanche des crucifères,
- *Albugo occidentalis* : agent de la "rouille" blanche de l'épinard,

- *Pustula tragopogonis* : agent de la "rouille" blanche du tournesol.

2) Ordre des Péronosporales

L'ordre des Péronosporales renferme généralement des pathogènes de plantes dans les familles des Péronosporacées et des Pythiacées.

Famille des Péronosporacées : Les espèces de la famille des Péronosporacées sont des parasites obligatoires hautement spécialisés des plantes vasculaires, souvent provoquant des maladies économiquement très importantes désignées par mildiou. Les genres les plus fréquents sont *Bremia*, *Peronosclerospora*, *Peronospora*, *Phytophthora*, *Plasmopara*, *Pseudoperonospora*, *Sclerophthora* et *Sclerospora* (Figure 50).

Exemples :

- *Bremia lactucae* : agent du mildiou de la laitue,
- *Peronosclerospora maydis* : agent du mildiou du maïs,
- *Peronospora destructor* : agent du mildiou de l'oignon,
- *Peronospora farinosa* : agent du mildiou de la betterave,
- *Peronospora pisi* : agent du mildiou du pois,
- *Peronospora viciae* : agent du mildiou de la fève,
- *Phytophthora capsici* : agent du pied noir du piment,
- *Phytophthora citrophthora* : agent de la gommose des agrumes,
- *Phytophthora fragariae* : agent du cœur rouge du fraisier,
- *Phytophthora infestans* : agent du mildiou de la pomme de terre,
- *Phytophthora melonis* : agent du pied noir du concombre,
- *Phytophthora nicotianae* : agent de la jambe noire du tabac,
- *Phytophthora parasitica* : agent du mildiou terrestre de la tomate,
- *Plasmopara halstedii* : agent du mildiou du tournesol,
- *Plasmopara viticola* : agent du mildiou de la vigne,
- *Pseudoperonospora cubensis* : agent du mildiou des cucurbitacées,
- *Sclerophthora macrospora* : agent du mildiou des céréales,
- *Sclerospora graminicola* : agent du mildiou des graminées.

Famille des Pythiacées : Cette famille contient des espèces des genres *Globisporangium*, *hytopythium* et *Pythium* qui s'attaquent généralement aux organes souterrains des plantes.

Exemples :

- *Globisporangium debaryanum* : agent de la fonte des semis de diverses espèces végétales,
- *Globisporangium ultimum* : agent de la pourriture racinaire de diverses espèces végétales,
- *Phytopythium helicoides* : agent de la pourriture racinaire du pistachier,
- *Phytopythium vexans* : agent du chancre du liège des arbres,
- *Pythium aphanidermatum* : pathogène de diverses espèces végétales.

3) Ordre des Saprologniales

L'ordre des Saprologniales contient des espèces phytopathogènes de la famille des Leptolégniacées.

Famille des Leptolégniacées : Le genre le plus connu des pathogènes de plantes est *Aphanomyces*.

Exemples:

- *Aphanomyces euteiches* : agent du pourridié du pois,
- *Aphanomyces raphani* : agent de la pourriture noire des racines du radis.

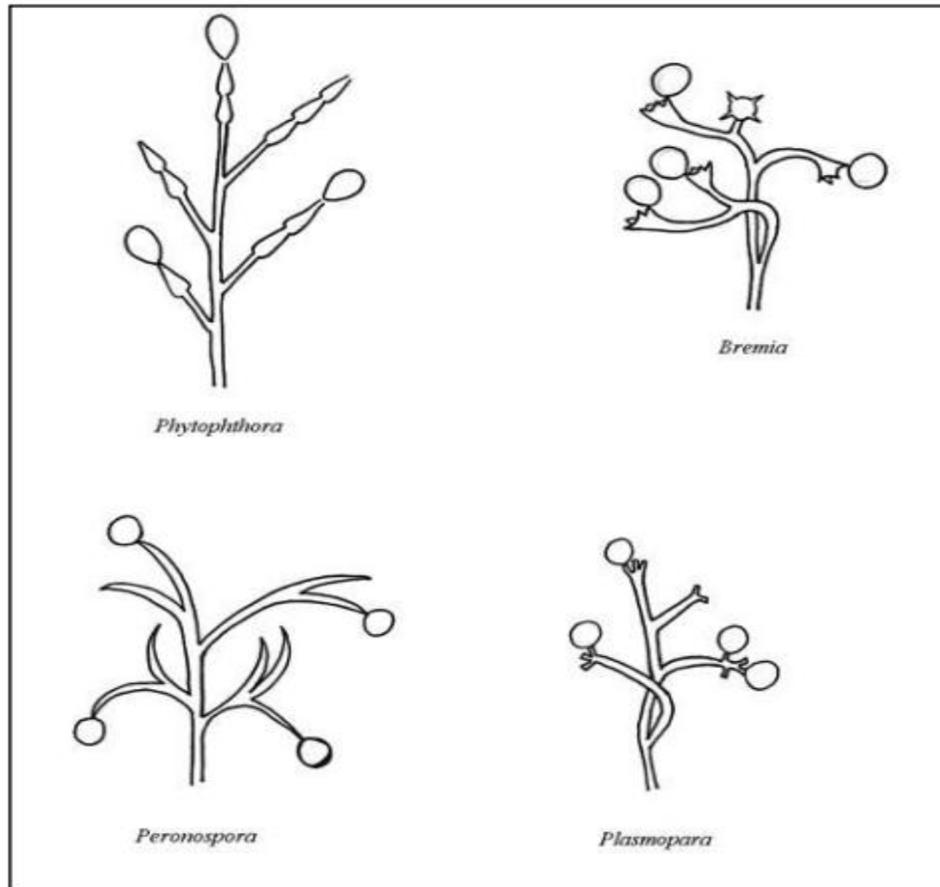


Figure 50: Quelques types de sporangiophores (ou conidiophores) avec des sporanges (ou des conidies) de certains genre d'Oomycètes, agents causaux de la maladie du mildiou.

2.4.3. EUMYCOTA (les vrais champignons (*Fungi* ou *Mycota*))

2.4.3.1. PHYLUM DES CHYTRIDIOMYCOTA

Le phylum des *Chytridiomycota* (ou les chitrides) se caractérise par un thalle unicellulaire ou mycélien cénocytique et un stade zoospore généralement monoflagellée ou rarement multiflagellée dont les flagelles sont sans mastigonèmes.

Ce phylum se divise en 2 classes qui sont les **Chytridiomycètes** renfermant des pathogènes de plantes et les **Monoblépharidomycètes**.

2.4.3.1.1. CLASSE DES CHYTRIDIOMYCETES

Les **Chytridiomycètes** sont des champignons vrais qui produisent des cellules mobiles à un certain stade dans leurs cycles biologiques. L'une de leurs caractéristiques, partagée avec les *Zygomycota*, est d'avoir un **thalle** cénocytique quand il est filamenteux. Le thalle peut aussi être unicellulaire. Les parois cellulaires sont connues contenir la chitine et les glucanes, bien que la cellulose a été démontrée exister dans quelques cas particuliers.

Les Chytridiomycètes renferment plusieurs phytopathogènes dont certaines espèces sont des vecteurs de nombreux virus de plantes d'importance économique. Ils peuvent être des parasites **endobiotiques** vivant entièrement à l'intérieur des cellules de leurs hôtes ou des parasites **épibiotiques** produisant leurs structures reproductives à la surface de leurs hôtes.

Certains Chytridiomycètes produisent des **rhizoïdes** qui sont des filaments courts contenant un cytoplasme mais non des noyaux et sont éventuellement séparés du reste du thalle par des cloisons. Ils servent à ancrer le **thalle** à son substrat et le nourrit en absorbant la nourriture. Chez d'autres espèces, le thalle est caractérisé par un mycélium plus ramifié et est alors appelé **rhizomycélium** (Figure 51).

Bien que les hyphes des Chytridiomycètes soient typiquement cénocytiques, chez certaines espèces, une cloison se forme régulièrement à la base de chaque structure reproductive et des cloisons dispersées peuvent se former dans les parties les plus âgées des hyphes. Les mycéliums de la plupart des formes complexes peuvent produire des **pseudocloisons** qui sont chimiquement différentes des parois hyphales.

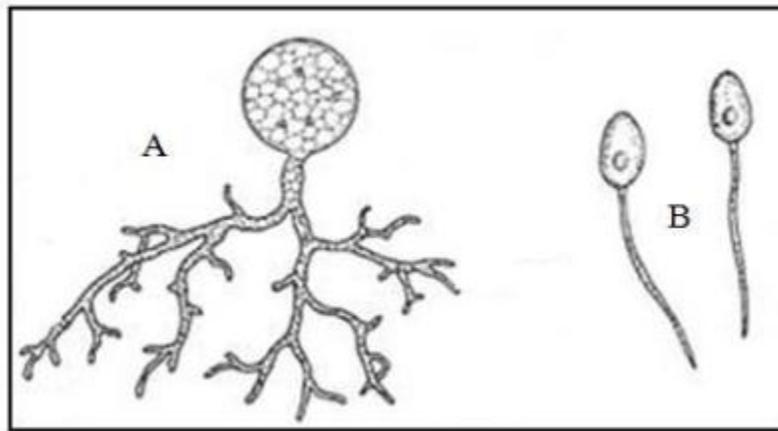


Figure 51 : Spore germant par rhizomycélium (A) et zoospores (B) de Chytridiomycètes

2.4.3.1.2. La reproduction des Chytridiomycètes

La **reproduction asexuée** des Chytridiomycètes a lieu par l'intermédiaire des **zoospores** qui se forment dans les sporanges. Ces zoospores postérieurement flagellées peuvent émerger à travers une ou plusieurs papilles quand le sporange se décharge (Figure 51).

La **reproduction sexuée** des Chytridiomycètes est accomplie par une variété de méthodes. Certaines espèces sont **holocarpiques**, tandis que d'autres sont **eucarpiques**. Dans cette reproduction, la copulation peut être **planogamétique** où la conjugaison a lieu entre des planogamètes isogames (gamètes morphologiquement similaires) ou des planogamètes anisogames (gamètes morphologiquement différents). La copulation peut aussi avoir lieu quand un gamète mâle mobile (anthérozoïde) libéré à partir d'un gamétange mâle, féconde un gamète femelle non mobile (œuf).

Chez des formes plus évoluées, la copulation est **gamétangique** et est accomplie par le transfert d'un protoplaste entier d'un gamétange dans un autre. La reproduction des Chytridiomycètes peut aussi prendre place par somatogamie qui est la fusion de structures végétatives.

2.4.3.1.3. Classification des Chytridiomycètes

La classe des Chytridiomycètes renferme plusieurs ordres parmi lesquels 2 contiennent des phytopathogènes.

1) Ordre des Chytridiales

Dans cet ordre, les espèces phytopathogènes existent dans la famille des Synchytriacées.

Famille des Synchytriacées :

La famille des Synchytriacées contient des phytopathogènes appartenant au genre *Synchytrium*.

Exemples :

- *Synchytrium endobiotium* : agent de la gale verruqueuse de la pomme de terre,
- *Synchytrium macrosporium* : pathogène de centaines d'espèces végétales,
- *Synchytrium phaseoli* : pathogène des légumineuses.

2) Ordre des Spizellomycétales (ou Olpidiales)

Cet ordre contient entre-autres une famille qui renferme des phytopathogènes. C'est la famille des Olpidiacées.

Famille des Olpidiacées :

Cette famille contient certains phytopathogènes qui appartiennent au genre *Olpidium*.

Exemples :

- *Olpidium brassicae* : pathogène des racines du chou,
- *Olpidium viciae* : agent de la gale verruqueuse de la fève.

2.4.3.2. PHYLUM DES ZYGOMYCOTA

Les *Zygomycota* continue à être considérés comme un phylum bien qu'ils forment un groupe polyphylétique qui se divise en 4 sous-phylums : *Entomophthoromycotina*, *Kickxellomycotina*, *Mucoromycotina* et *Zoopagomycotina*. Seul le sous-phylum des *Mucoromycotina* renferment des agents phytopathogènes.

- 1) Sous-phylum des *Entomophthoromycotina*
- 2) Sous-phylum des *Kickxellomycotina*
- 3) Sous-phylum des *Mucoromycotina*
- 4) Sous-phylum des *Zoopagomycotina*

- SOUS-PHYLUM DES *MUCOROMYCOTINA*

Etant *Zygomycota*, le sous-phylum des *Mucoromycotina* se caractérise par l'absence de cellules mobiles et un **thalle** filamenteux cénocytique. Les parois hyphales sont composées de chitine, de chitosane et d'acide polyglucuronique. Chez certaines espèces, le mycélium peut posséder des cloisons plus ou moins régulièrement espacées.

Quelques autres espèces croissent par des hyphes aériennes appelées **stolons** qui développent des **rhizoïdes** au contact avec le substrat (Figure 52).

2.4.3.2.1. Reproduction des *Mucoromycotina*

La **reproduction asexuée** des *Mucoromycotina* se réalise par l'intermédiaire des **sporangiospores** produites en grand nombre (des dizaines jusqu'à des milliers) dans des **sporangies** ou en petit nombre (une à quelques unes) dans des **sporangioles**.

Dans le cas d'une seule sporangiospore par sporangiole, il est nécessaire de la différencier d'une conidie qui ne se forme dans aucune structure en forme de sac. Les sporangies sont portés par des **sporangioportes** (Figure 52).

La **reproduction sexuée** des *Mucoromycotina* s'effectue par la fusion de deux gamétanges, souvent de morphologie similaire. Les gamétanges fusionnés évoluent en **zygosporange** qui produit à la fin une spore de conservation à paroi épaisse appelée **zygospore**.

Beaucoup d'espèces sont hétérothalliques tandis que certaines autres sont homothalliques.

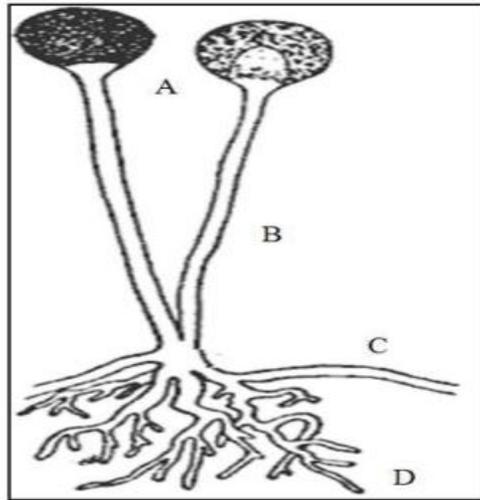


Figure 52 : Soporanges (A), Sporangiphore (B), Stolon (C) et Rhizoïdes de Mucoromycotina

2.4.3.2.2. Classification des Mucoromycotina

Le sous-phylum des *Mucoromycotina* renferme 3 ordres dont seul l'ordre des Mucorales contient des espèces pathogènes de plantes.

Ordre des Mucorales

L'ordre des Mucorales renferme plusieurs familles dont les plus importantes sont celles des Choanéporacées et des Mucoracées. Ces dernières renferment des pathogènes qui attaquent les produits végétaux en cours de stockage.

Famille des Choanéporacées : Les Choanéporacées contiennent des phytopathogènes qui appartiennent aux genres *Choanephora* et *Gilbertella*.

Exemples :

- *Choanephora cucurbitarum* : agent de la pourriture des fruits des cucurbitacées,
- *Gilbertella persicaria* : agent de la pourriture des pêches.

Famille des Mucoracées : La famille des Mucoracées renferme des espèces qui sont phytopathogènes. Elles appartiennent aux genres *Mucor* ou *Rhizopus*.

Exemples :

- *Mucor racemosus* : agent de la moisissure des fruits stockés,
- *Rhizopus stolonifer* : agent de la moisissure des fraises et des pommes de terre stockées.

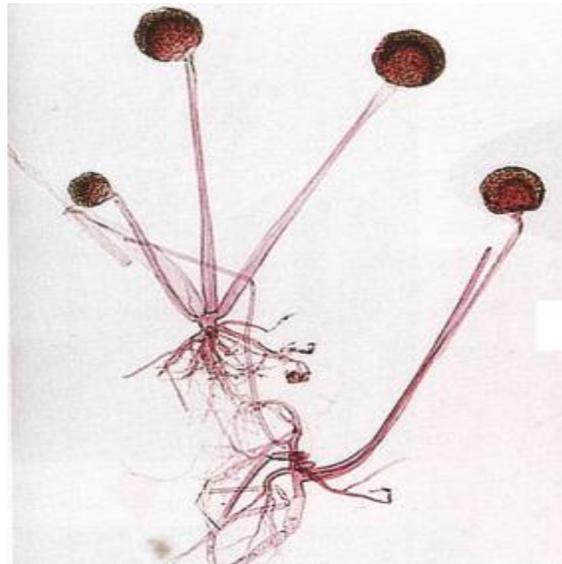


Figure 53: *Rhizopus*

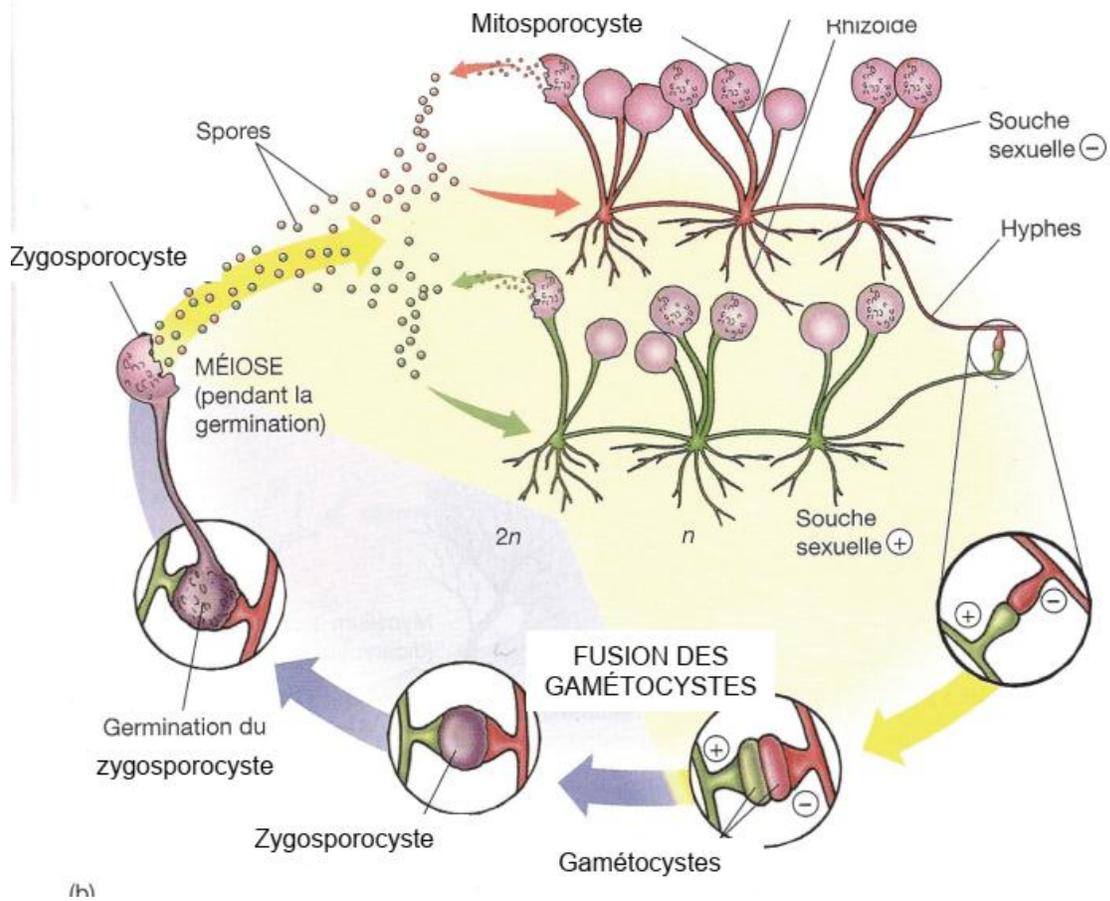


Figure 54: Cycle d'un Zygomycète: *Rhizopus*
D'après RAVEN et al. (2007a), corrigé

2.4.3.3. PHYLUM DES *GLOMEROMYCOTA*

En utilisant les techniques moléculaires, le phylum des *Glomeromycota* a été séparé du phylum des *Zygomycota* puisqu'il s'est avéré que les 2 phylums ne sont pas dans la même unité monophylétique et n'ont donc pas le même ancêtre. Le phylum des *Glomeromycota* renferme une seule classe, celle des **Gloméromycètes** dont les espèces forment des mycorhizes arbusculaires avec les racines de beaucoup de plantes.

2.4.3.4. PHYLUM DES *ASCOMYCOTA*

Le phylum des *Ascomycota* est le plus grand groupe des champignons avec plus de 60000 espèces dont un nombre élevé est formé de pathogènes de plantes. Les caractéristiques les plus communes de ce phylum sont la production d'ascospores et la présence de parois hyphales lamellaires avec une couche externe mince dense aux électrons et une couche interne relativement épaisse, transparente aux électrons. Ces caractéristiques ont permis aux mycologistes, avant le développement des techniques moléculaires, de reconnaître la plupart des Champignons Anamorpha comme des *Ascomycota* même en absence des téléomorphes.

Le **thalle** des *Ascomycota* peut être unicellulaire ou le plus souvent mycélien. Les parois cellulaires contiennent principalement la chitine, bien que la présence de cellulose ait été rapportée chez certaines espèces. Les hyphes des *Ascomycota* sont divisées en compartiments par des cloisons contenant d'habitude, au niveau de leur centre, un petit pore circulaire qui permet une continuité cytoplasmique entre les cellules des hyphes. Les pores peuvent être bouchés avec les corps de Woronin pour différentes raisons, telles que la séparation des hyphes âgées ou endommagées du reste du mycélium.

Les *Ascomycota* peuvent produire des structures mycéliennes spécialisées telles que les **apressories**, les **haustories** et les **hyphopodes**. Chez certaines espèces, les hyphes mycéliennes peuvent se développer en **sclérotés**.

2.4.3.4.1. Reproduction des *Ascomycota*

- **La reproduction asexuée** a lieu par l'intermédiaire de diverses conidies produites directement sur le thalle ou à partir de cellules conidiogènes portées par des conidiophores qui sont libres sur le thalle ou groupés dans/sur des structures conidifères particulières. Cette reproduction asexuée des espèces d'*Ascomycota* va être développée plus loin dans le chapitre réservé aux Champignons Anamorpha.

La reproduction sexuée des *Ascomycota* s'effectue de différentes façons :

- **Isogamétangie** : deux gamétanges morphologiquement similaires fusionnent et la cellule de fusion se développe en asque. Dans la plupart des cas, la caryogamie prend place rapidement après la plasmogamie de façon à ce que la phase dicaryotique soit courte.

- **Hétérogamétangie** : deux gamétanges uninucléés ou multinucléés morphologiquement différents sont produits. Le gamétange mâle, l'**anthéridie**, vide son contenu dans le gamétange femelle, l'**ascogone**, par l'intermédiaire d'une hyphe spécialisée portée par l'ascogone, le **trichogyne**. Les

asques se développent à partir d'excroissances de l'ascogone. La phase dicaryotique peut persister un moment avant que la caryogamie ne se réalise (Figure 53)

- **Spermatisation** : Une seule cellule mâle détachée s'attache à une structure femelle réceptive (trichogyne ou hyphes somatique) et vide son noyau dans la cellule réceptive. Ensuite, le noyau mâle migre jusqu'à l'ascogone à travers les pores des cloisons. Le gamète mâle fonctionnel peut être une **spermatie**, une **microconidie** ou une **conidie**. Les spermaties sont de minuscules cellules sphériques ou allongées, uniclées et de sexe mâle, incapables de germer par un tube germinatif. Elles peuvent se former sur le mycélium ou dans des structures spécialisées appelées **spermogonies**. Les microconidies (conidies minuscules) et les conidies se comportent comme des spermaties, mais peuvent aussi germer par un tube germinatif.

- **Somatogamie** : Deux hyphes somatiques non spécialisées de deux mycéliums compatibles fusionnent et leurs noyaux migrent jusqu'à l'ascogone à travers les pores des cloisons.

Chez la plupart des *Ascomycota*, à l'exception des levures, les deux noyaux (mâle et femelle) restent en association étroite et subissent des divisions successives donnant de nombreuses cellules dicaryotiques. La caryogamie se réalise essentiellement dans le jeune asque. Presque immédiatement, la méiose a lieu aboutissant à la production de quatre noyaux haploïdes.

Ces quatre noyaux haploïdes se divisent par la suite mitotiquement pour former huit noyaux qui vont s'incorporer dans huit ascospores durant l'ascosporengénèse. Ainsi, des portions de cytoplasme, chacune contenant typiquement un seul noyau, deviennent délimitées par une enveloppe consistant en deux unités membranaires fortement appliquées l'une à l'autre pour former une **ascospore**. Ensuite, les parois des ascospores se déposent entre ces membranes pour les séparer chacune de l'autre au fur et à mesure que les ascospores mûrissent (Figure 54).

La totalité du cytoplasme dans l'asque n'est pas incorporée dans les ascospores en formation. La partie qui reste à l'extérieur des ascospores est appelée **épiplasme** et sert probablement à nourrir les ascospores en développement et dépose leurs ornements externes. Le nombre le plus commun des ascospores produites par asque chez la plupart des espèces est huit. Cependant, certaines espèces produisent des asques contenant des nombres plus réduits (un, deux, trois ou quatre) ou plus élevés (jusqu'à un nombre aussi élevé que mille) d'ascospores.

En fonction des espèces, les ascospores ont une variété de tailles, de formes et contiennent une, deux ou plusieurs cellules.

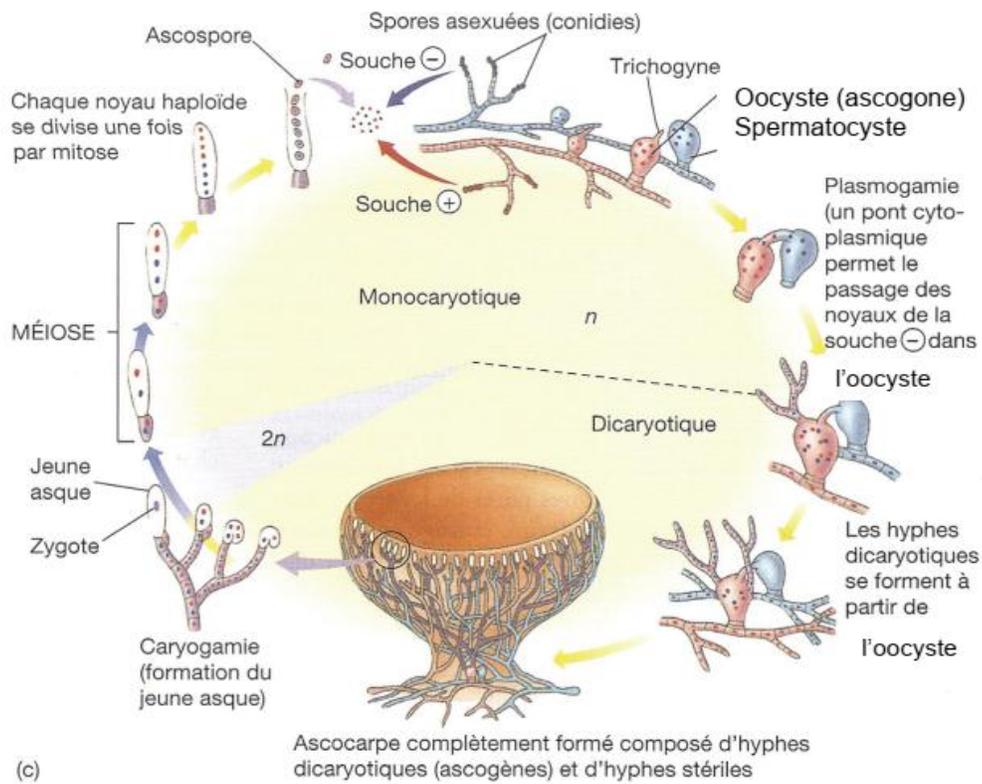


Figure 55: Cycle d'un Ascomycète : *Peziza*

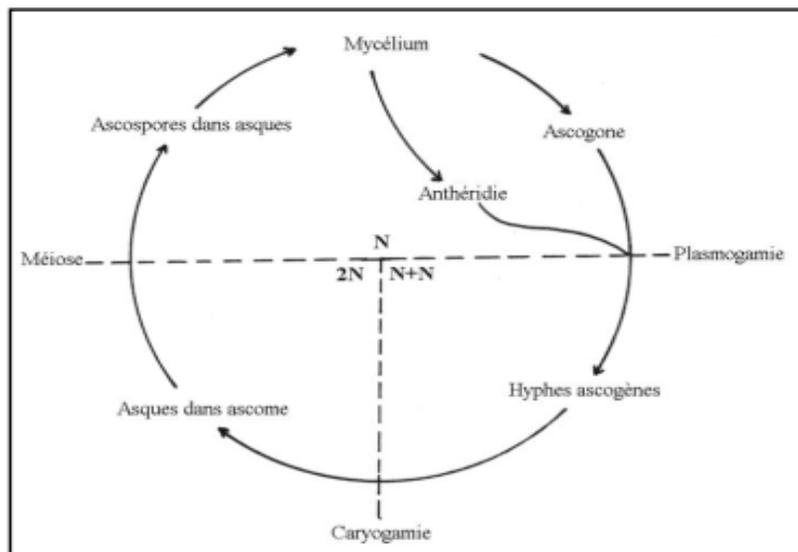


Figure 56 : Cycle biologique général des Ascomycota qui ont une reproduction sexuée hétérogamétangique.

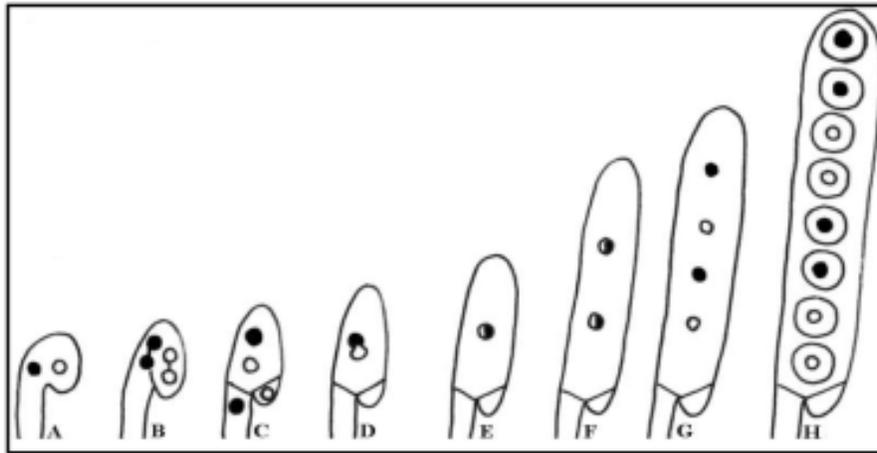


Figure 57 : Étapes typiques du développement de l'asque et des ascospores chez les Ascomycota.

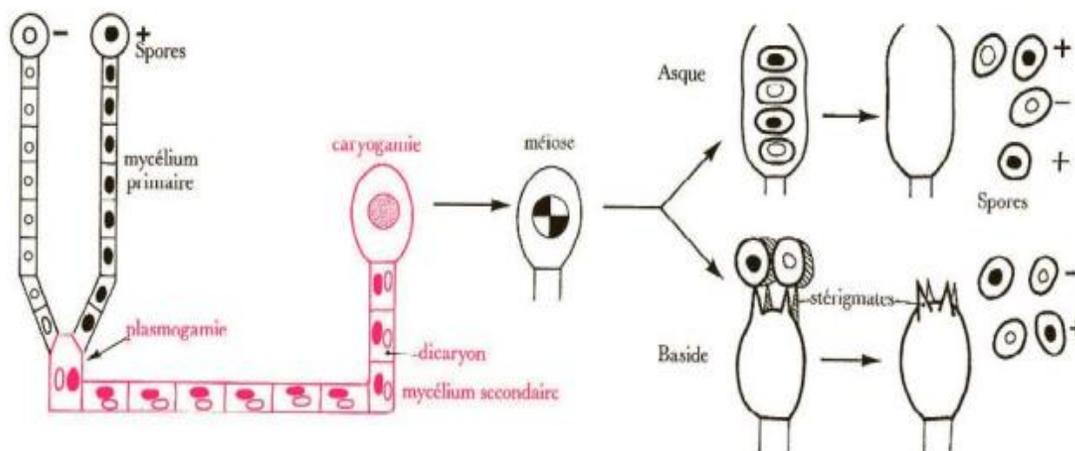


Figure 58: Développement simplifié d'une espèce hétérothallique (spores + et -)

avec succession de mycélium primaire haploïde et demycélium secondaire à dicaryons, suivie par la production d'asques (Ascomycètes) ou de basides (Basidiomycètes).

Les **asques** varient en forme et en taille. Ils peuvent être libres sur le thalle ou contenus dans des ascocarpes. Qu'ils soient nus ou enveloppés dans un ascocarpe, les asques se forment sur une couche définie appelée hyménium. Les asques peuvent être **prototuniqués** (avec une paroi mince délicate et libérant les ascospores par déliquescence), **unituniqués** ou **bituniqués** (les deux avec deux couches : **endotunique** et **exotunique**).

Dans l'asque unituniqué, ces couches adhèrent l'une à l'autre étroitement tout le long de la vie de l'asque et les ascospores sont libérées à travers un pore, fente ou opercule terminal. Chez l'asque bituniqué, l'endotunique s'étire d'habitude vers le haut deux à trois fois sa longueur originale, se

séparant de l'exotunique rompu au moment de la libération des ascospores. Ces dernières sont libérées à travers un pore dans l'endotunique. Les asques sont alors appelés **fissituniqués** quand, à la déhiscence, l'endotunique se sépare complètement de l'exotunique.

En dehors de quelques petits groupes, la plupart des *Ascomycota* produisent les asques dans des structures sporifères appelées **ascocarpes** ou **ascomes**.

En fonction de la l'absence ou de la présence et la morphologie des ascomes, les *Ascomycota* peuvent être séparés en cinq groupes:

- **Asques libres** (ou **nus**) : asques produits sans aucun ascome,
- **Cléistothèce** : asques produits dans un ascome complètement fermé,
- **Périthèce** : asques produits dans un ascome plus ou moins fermé, qui à maturité forme un pore (ostiole) à travers lequel les ascospores sont libérés,
- **Apothécie** : asques produits dans un ascome ouvert à maturité comme une coupe,
- **Pseudothèce** : asques produits dans une locule à l'intérieur d'un ascostrome qui forme la paroi de l'ascome.

En plus de ces cinq formes typiques d'ascome, plusieurs autres formes intermédiaires existent et sont difficiles à classer. La plupart des ascomes forment, en plus des asques, des filaments stériles appelés **paraphyses** dans le cas des périthèces et des apothécies, et **pseudoparaphyses** dans le cas des pseudothèces.

La **parasexualité** peut aussi être observée chez les *Ascomycota*, en plus de la reproduction sexuée. Elle consiste en une fusion hyphale aboutissant à l'**hétérocaryose** suivie par la caryogamie et ensuite l'**haploïdisation** conduisant à de nouvelles combinaisons génétiques.

Pendant plus d'un siècle, les *Ascomycota* étaient groupés sur la base de la morphologie des ascomes et l'arrangement des asques. Mais la révolution moléculaire pendant la dernière décennie, a éclairci la systématique des *Ascomycota* en permettant de classer les taxons selon leurs phylogénies. Les techniques moléculaires ont ainsi permis de résoudre le problème chronique de la classification des Champignons Anamorphes en les rattachant d'une façon claire et évidente à leurs téléomorphes même si ces derniers ne sont pas observés dans la nature.

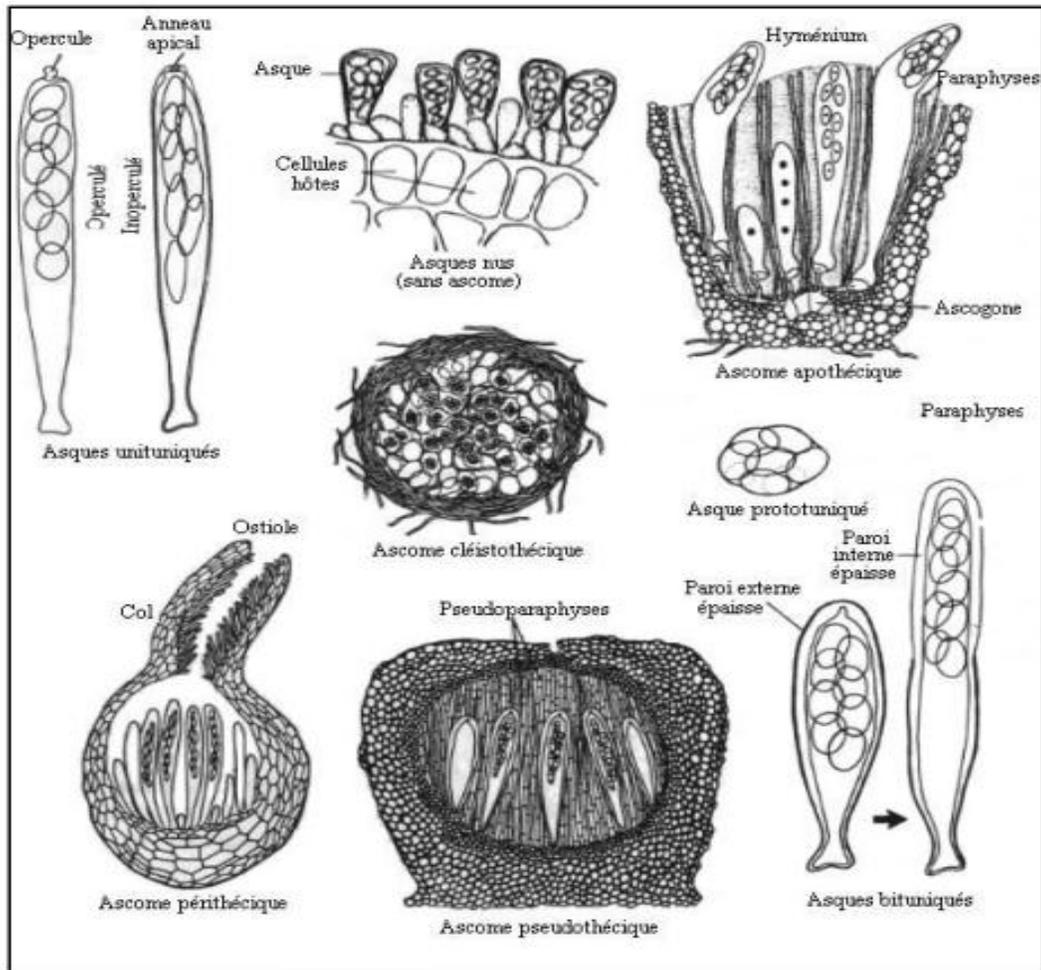


Figure 59 : Quelques asques et ascomes typiques des Ascomycota

(Kendrick, 2000 ; modifié et traduit)

2.4.3.4.2. Classification des Ascomycota

Les données moléculaires ont permis de diviser le phylum des *Ascomycota* en 3 sous-phylums monophylétiques : les *Saccharomycotina*, les *Taphrinomycotina* et les *Pezizomycotina*. Ces 3 sous-phylums se divisent eux-mêmes en 15 classes.

Les *Saccharomycotina* renferment une seule classe, qui est la classe sans ascome des Saccharomycètes formée par les levures bourgeonnantes.

Le sous-phylum des *Taphrinomycotina* comporte 4 classes caractérisées par l'absence d'ascome et qui sont les Néoelectomycètes, les Pneumocystidomycètes, les Schizosaccharomycètes (levures se divisant par scissiparité) et les Taphrinomycètes.

Le sous-phylum des *Pezizomycotina* renferme 10 classes caractérisées par la présence d'ascomes. Il s'agit des classes des Arthoniomycètes (lichens), des Dothidéomycètes, des Eurotiomycètes, des Laboulbénomycètes (entomopathogénie), des Lécanoromycètes (lichens), des Léotiomycètes, des

Lichinomycètes (lichens), des Orbiliomycètes (prédation des nématodes), des Pézizomycètes (saprotrophie) et des Sordariomycètes.

2.4.3.5. PHYLUM DES *BASIDIOMYCOTA*

Le phylum des *Basidiomycota* est un grand groupe diversifié de champignons vrais contenant plus de 30000 espèces décrites. Ils sont caractérisés par la production de basides portant des basidiospores après plasmogamie, caryogamie et méiose. Beaucoup d'espèces macroscopiques sont communément observées dans les prairies et les forêts.

Le **thalle** des *Basidiomycota* consiste généralement en des hyphes cloisonnées bien développées et moins fréquemment en levures unicellulaires. Chez certaines espèces, les hyphes mycéliennes peuvent se développer en **sclérotés**, en **rhizomorphes** ou en **cordons mycéliens**. Les *Basidiomycota* peuvent produire des structures mycéliennes spécialisées telles que les **apressories** et les **haustories**.

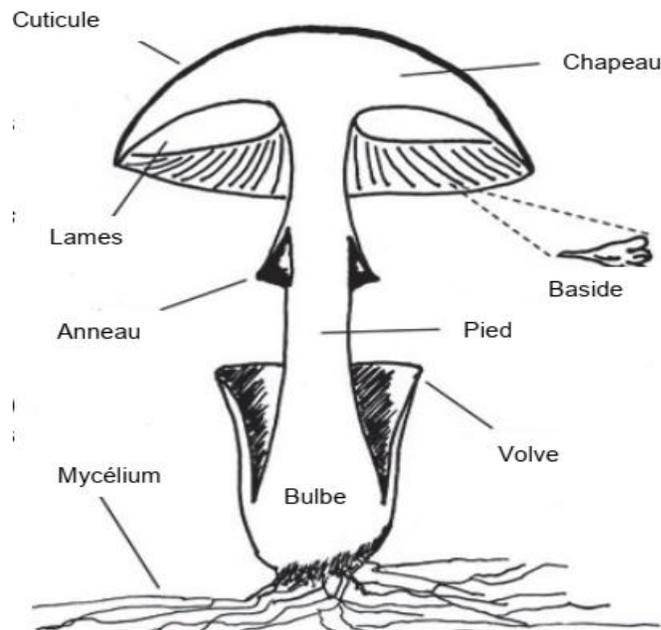


Figure 60: Morphologie d'un Basidiomycète

La structure érigée (chapeau + pied + volve...sans les mycéliums) porte le nom de carpophore.

<http://www.corif.net/site/especemois/champignon.htm>

Le mycélium de la plupart des espèces hétérothalliques passe par trois stades de développement distincts, primaire, secondaire et tertiaire. Le **mycélium primaire** est homocaryotique et d'habitude se développe après la germination des basidiospores. Ce mycélium cloisonné est souvent composé de cellules uniclées. Ensuite, le mycélium primaire donne naissance au **mycélium secondaire** après la plasmogamie entre des spermaties et/ou des hyphes. En conséquence, ce mycélium secondaire et les spores qu'il produit, sont dicaryotiques avec des cellules binuclées.

Durant ce stade, l'une des caractéristiques spécifiques aux *Basidiomycota* est la production d'**anses d'anastomose** qui se forment durant la division conjuguée des noyaux à l'extrémité d'une hyphe en

croissance (Figures 61). Une autre caractéristique spécifique est la formation chez beaucoup d'espèces de *Basidiomycota* de **cloison dolipore** qui peut être couverte de **parenthosomes** (Figure 61). Le **mycélium tertiaire** se développe à partir du mycélium secondaire et consiste en un mycélium organisé et spécialisé qui renferme les basidiocarpes et/ou les basides qui libèrent les basidiospores. Le mycélium tertiaire est aussi dicaryotique.

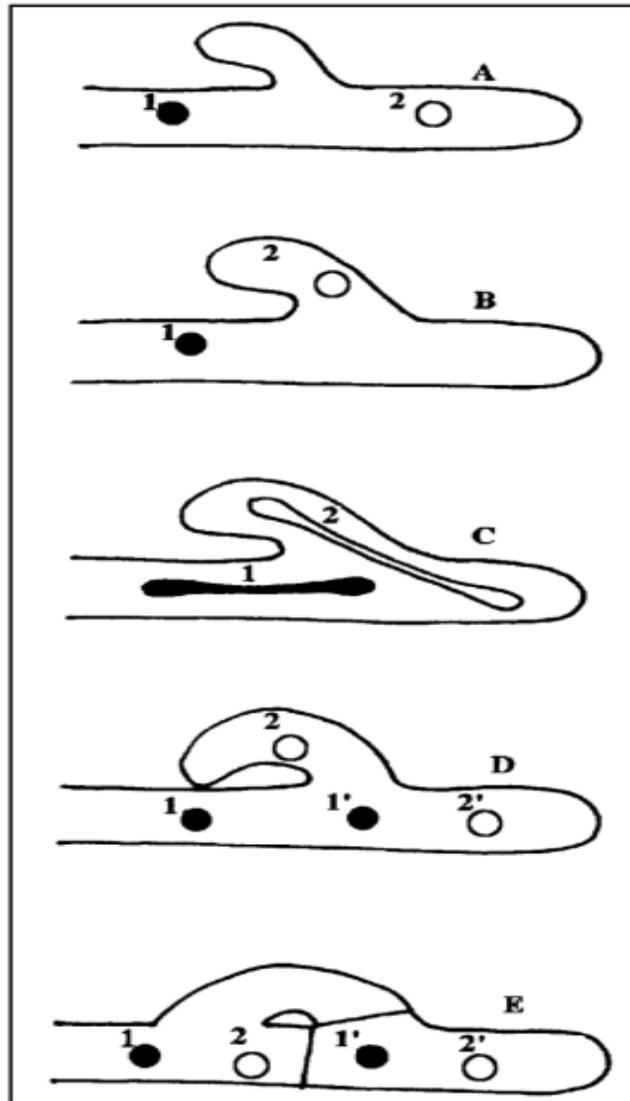


Figure 61 : Etapes typiques du développement de l'anse d'anastomose chez les Basidiomycota.

2.4.3.5.1. Reproduction des *Basidiomycota*

La **reproduction asexuée** des *Basidiomycota* entraîne, pour la plupart des espèces, la production de divers types de spores qui prennent en général des noms spécifiques (écidiospores, urédospores, sporédies,...). Les anamorphes de la plupart des *Basidiomycota* sont écartés du groupe des

Champignons Anamorphiques, sauf un petit nombre d'espèces, dont ceux qui se développent par multiplication végétative du mycélium.

La **reproduction sexuée** chez les *Basidiomycota* culmine par la production des basides portant des basidiospores. Elle commence par la fusion et plasmogamie entre des spermaties et des hyphes réceptives ou entre des hyphes de mycéliums primaires compatibles. Les stades suivants sont les mycéliums secondaire et tertiaire qui sont dicaryotiques.

A partir du mycélium tertiaire, les basidiocarpes et/ou les basides se différencient. Ensuite, la caryogamie et la méiose ont lieu dans les basides qui produisent les basidiospores extérieurement.

Les **basidiospores** sont typiquement haploïdes, uninucléées et au nombre de quatre (Figures 58 et 59). Leur germination permet le développement du mycelium primaire. Ce type de germination est fréquent et est appelé **germination directe**.

Dans quelques groupes, cependant, les basidiospores peuvent germer pour former ce qui est appelé des spores secondaires ou bourgeonner pour former des conidies ou des microconidies. Ensuite, ces spores secondaires, conidies ou microconidies germent pour développer le mycélium primaire. Ce type de germination est désigné par **germination indirecte**.

Les **basides** sont des structures qui portent à leur surface un nombre défini de basidiospores qui se forment après caryogamie et méiose. La baside peut être de structure simple en forme de massue dont l'origine est une cellule terminale d'une hyphe binucléée. Après caryogamie et méiose, cette baside donne naissance à quatre noyaux haploïdes tandis que quatre petites excroissances appelées **stérigmates** poussent vers l'extérieur au sommet de la baside et élargissent leurs extrémités pour former les débuts des basidiospores.

Pendant ce temps, une vacuole se forme à la base de la baside, s'accroît en taille et pousse le contenu de la baside dans les basidiospores en formation, de façon à ce que chaque basidiospore reçoit finalement une portion de cytoplasme et un seul noyau. Dans d'autres types de basides, il y a deux parties en plus des stérigmates, la **probaside** et la **métabaside**. La probaside est la portion de baside où la caryogamie a lieu tandis que la métabaside est la portion où la méiose prend place.

Dans certaines basides, la probaside et la métabaside sont morphologiquement distinctes tandis que dans d'autres, ces deux termes désignent simplement des stades de développement différents à l'intérieur de la même structure. D'habitude, deux types de basides sont connus, **holobasides** et **phragmobasides**. Les holobasides sont formées d'une seule cellule tandis que les phragmobasides sont typiquement divisées en quatre cellules par des cloisons transversales.

Chez les agents des rouilles et des charbons, le développement des basides commence quand la spore de conservation à paroi épaisse appelée **téliospore** germe pour former une sorte de filament cloisonné (la baside) sur lequel les basidiospores sont produites.

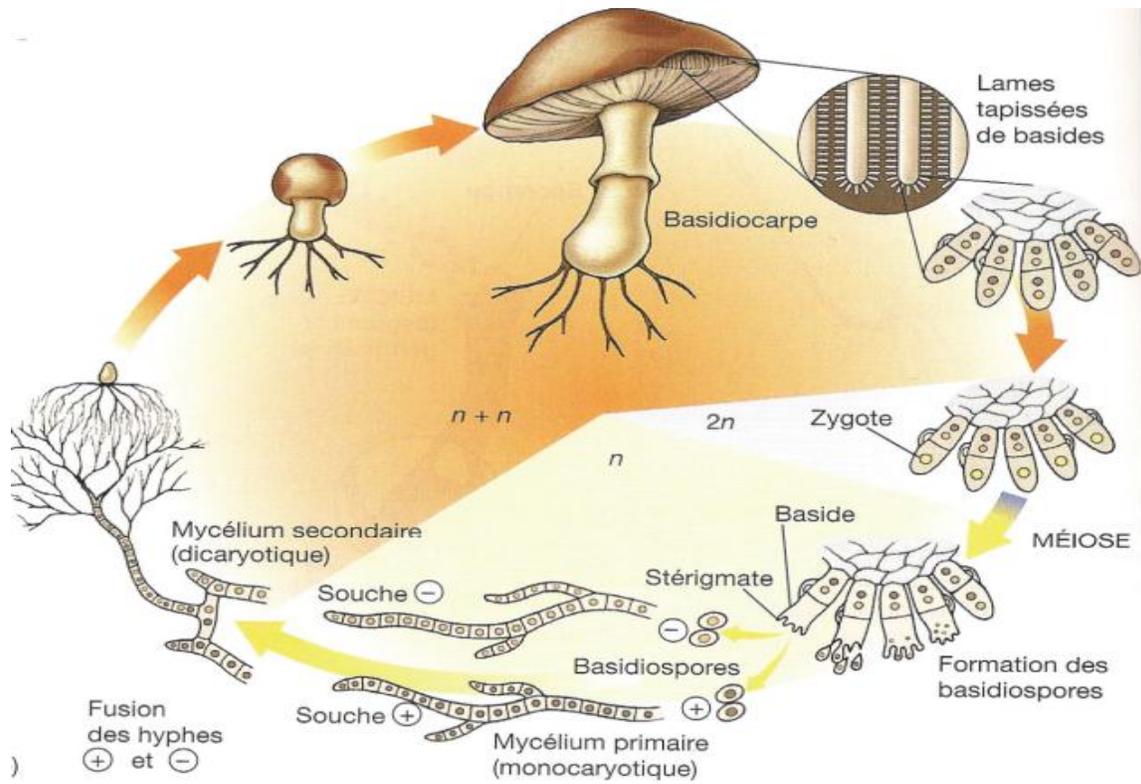


Figure 62: Cycle d'un Basidiomycète
D'après RAVEN et al. (2007a)

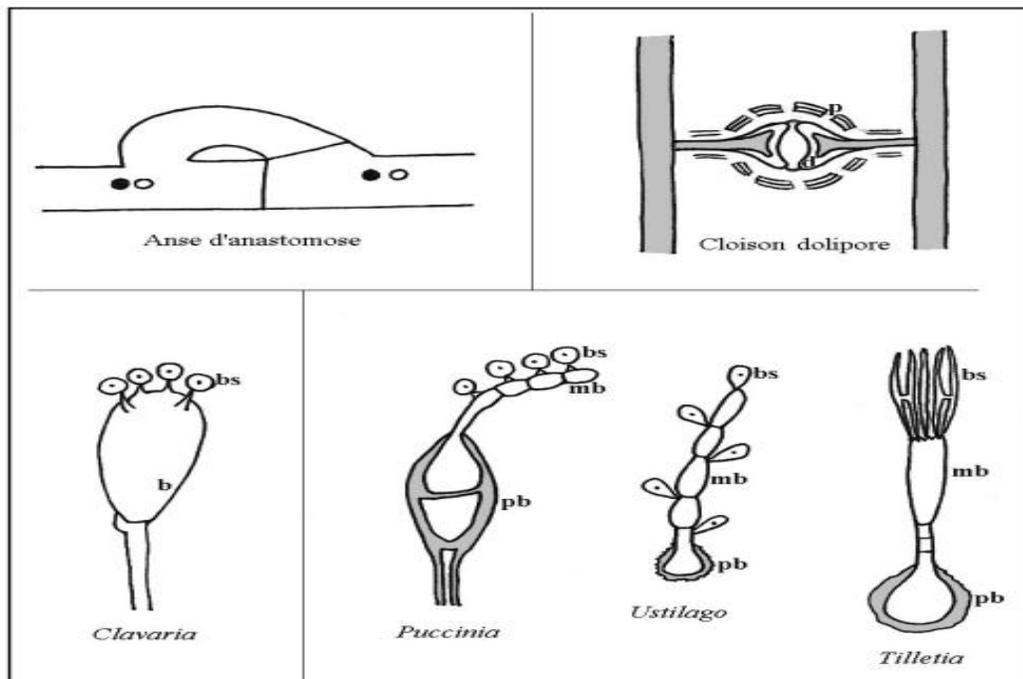


Figure 63 : Quelques structures typiques des Basidiomycota

(b : baside, bs : basidiospore, d : dolipore, mb : metabaside, p : prenthosomes, pb : probaside).

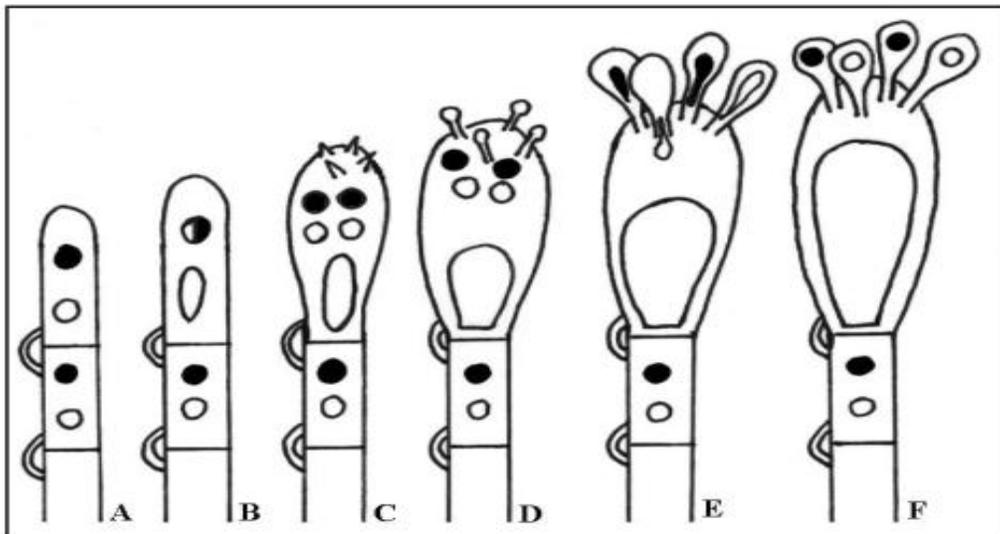


Figure 64 : Etapes typiques du développement de la baside et des basidiospores chez les Basidiomycota.

Les **basidiocarpes** ou **basidiomes** sont des structures sporulantes où la plupart des *Basidiomycota* produisent leurs basides. Les basidiomes sont comparables aux ascomes des *Ascomycota*. Mais ces basidiomes ne sont pas produits par les agents des rouilles et des charbons. Les basidiomes varient en taille de microscopique à macroscopique et sont de différentes morphologies. Ils peuvent s'ouvrir à un stade précoce, à un stade tardif ou même rester complètement fermés ; leurs spores sont alors libérées après la désintégration des basidiomes ou après fractures sous l'effet de forces externes.

Chez la plupart des espèces, les basides sont typiquement formées dans des couches définies appelées **hyméniums** (Figure 65) qui sont comparables aux couches portant les asques chez les *Ascomycota*. Dans les basidiomes, l'hyménium est une couche composée à la fois de basides et de tous les autres éléments stériles qui peuvent être présents. Il peut couvrir toute la surface ou seulement une portion des basidiomes ou peut être confiné à des portions spécialisées du basidiome.

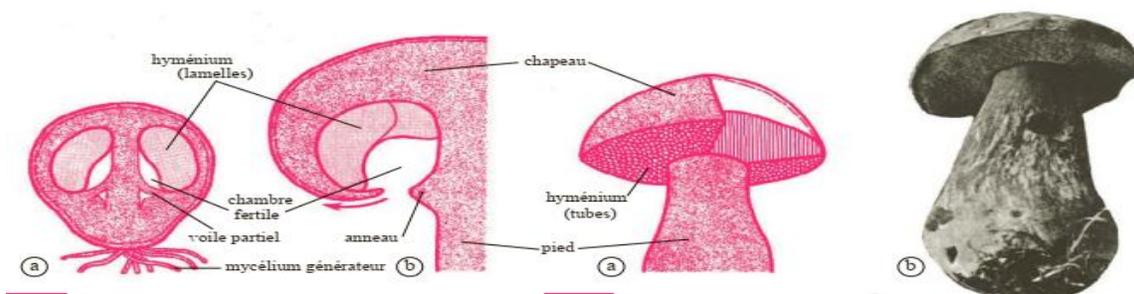


Figure 65: Épanouissement du carpophore du champignon de couche.

Hyménium en lamelles rayonnantes.

2.4.3.5.2. Classification des *Basidiomycota*

Les données moléculaires ont permis de diviser le phylum des *Basidiomycota* en 3 sous-phylums monophylétiques : les *Agaricomycotina*, les *Pucciniomycotina* et les *Ustilaginomycotina*. Ces 3 sous-phylums se divisent eux-mêmes en 12 classes.

Le sous-phylum des *Agaricomycotina* renferme 3 classes : les Agaricomycètes, les Dacrymycètes et les Trémellomycètes. La plupart des pathogènes des plantes de ce sous-phylum sont rencontrés dans la classe des **Agaricomycètes**.

Le sous-phylum des *Pucciniomycotina* contient 8 classes:les Agaricostilbomycètes, les Atractiellomycètes, les Classiculomycètes, les Cryptomycocolacomycètes, les Cystobasidiomycètes, les Microbotryomycètes, les Mixiomycètes et les Pucciniomycètes.

Le sous-phylum des *Ustilaginomycotina* contient 2 classes : les **Exobasidiomycètes** et les **Ustilaginomycètes**.

❖ Exemple de Basidiomycètes: Le genre amanite

Les amanites forment un genre de champignons à chapeau bien développé, fréquent dans la nature et important car il comporte à la fois des espèces comestibles recherchées (A. des Césars ou oronge ; A. rougissante ou golmotte) et des espèces toxiques dangereuses (A. muscarine ; A. panthère) voire mortelles (A. phalloïde ; A. vireuse ; A. printanière).

Le carpophore est caractérisé par un *voile général* qui enveloppe entièrement les stades jeunes. Avec la croissance, ce voile est étiré puis déchiré laissant habituellement une *volve* membraneuse autour de la base du pied et des verrues ou *écailles* plus ou moins persistantes sur le chapeau. Le pied garde le plus souvent un *anneau*, reste du *voile partiel*.

✓ Position systématique

Règne: Mycota

Embranchement: Basidiomycota

Classe : Agaricomycetes

Ordre : Agaricales

Famille : Amanitaceae

Genre : Amanita

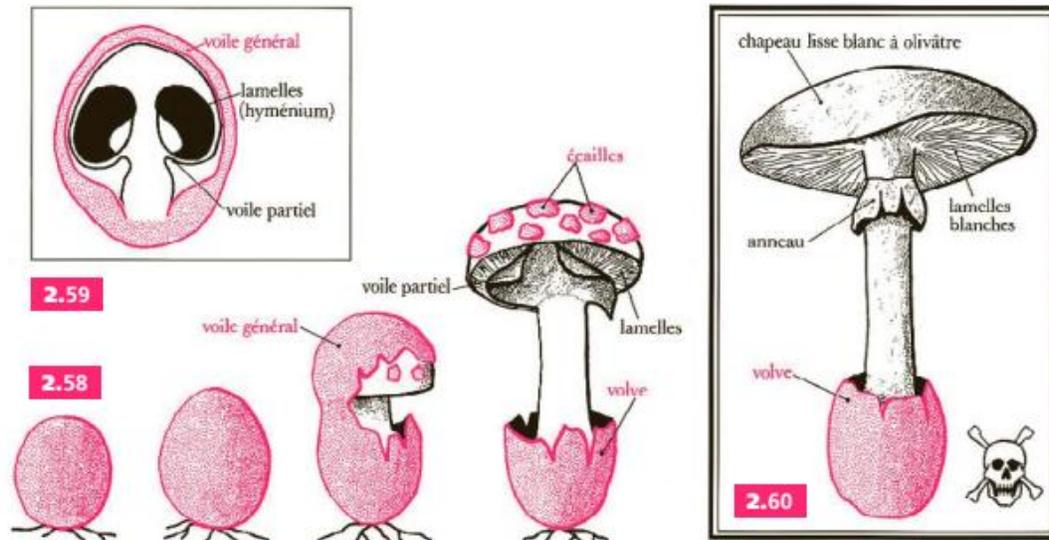


Figure 66: Amanite.

2-58. Développement du carpophore d'une amanite.

2-59. Coupe longitudinale très jeune.

2-60. Caractères de l'amanite phalloïde (l'amanite printanière, *A. verna*, également mortelle, est entièrement blanche).

2.5. Une association particulière algue-champignon: les lichens

Un lichen est une association permanente et stable établie entre un *champignon* et une *algue*. Celle-ci, appelée *gonidie*, est soit une cyanobactérie, soit une Algue Verte unicellulaire proche des chlorelles. Le mycélium du champignon est cloisonné : c'est un *Septomycète* dont les filaments donnent au thalle une anatomie définie.

Un lichen joint les éléments de support et de protection (mycélium du champignon) à des cellules autotrophes (algue) ce qui leur confère une autonomie nutritionnelle et leur permet de s'installer sur des milieux neufs ou arides. À ce titre ce sont des *pionniers de végétation*. En revanche ils sont très sensibles à certains gaz, comme le SO₂, produits en milieu urbain ; leur disparition est le signe d'une atmosphère viciée : ce sont des *indicateurs de pollution*.

Cette association symbiotique constitue des organismes stables (que l'on caractérise de façon imagée par l'équation $1 + 1 = 1$) considérés comme des espèces individualisées. Elles sont très nombreuses et certaines très anciennes, sans doute parmi les premières à avoir colonisé le milieu terrestre.

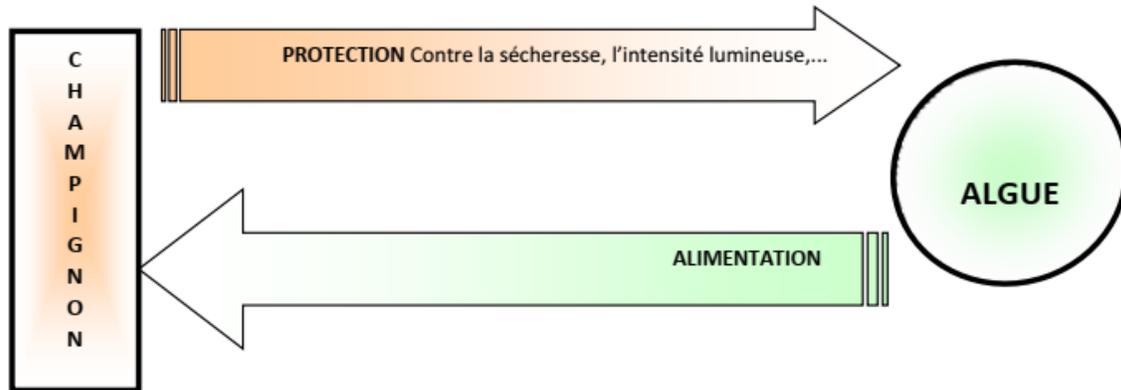


Figure 67 : Schéma de la symbiose lichénique

2.5.1. Morphologie

Un lichen est constitué de thalle, appareil végétatif du lichen, d'où leur appartenance aux *Thallophytes*. Le thalle constitue l'essentiel du lichen, il assure la nutrition, l'entretien de la vie et de la croissance. Les thalles des lichens ont des formes très variées, classés en 6 types morphologique fondamentaux, chacun pouvant comporter des aspects plus ou moins divers et parfois des formes de transition avec d'autres types:

2.5.1.1. Thalles crustacés

Sont plus ou moins continus, ayant l'aspect de « croûte » (comme l'indique leur nom), souvent fendillés. Ils peuvent être lobés au pourtour. Ils sont fendillés quand les fissures sont fines, irrégulières ou superficielles. Au contraire, quand les fentes dans le thalle sont suffisamment profondes, elles forment un réseau de petits compartiments de tailles variées.

- Si les compartiments ont une taille de l'ordre de 1,5 mm de large et sont plutôt plats et polygonaux, le thalle est aréolé.
- Si les compartiments mesurent de 0,5 à 1,5 mm de large et sont plutôt arrondis et convexes, le thalle est verruqueux.
- Si les compartiments mesurent 0,5 mm de large, ils forment des petits grains, le thalle est granuleux.
- Si le thalle est formé de minuscules granules, de 0,1 à 0,2 mm, on le dit lépreux (pulvérulents ou granulo-pulvérulents).

Les limites des thalles peuvent être imprécises ou très nettes, avec parfois une ligne sombre, noire ou feutrée appelée l'hypothalle. Les thalles crustacés sont généralement très adhérents au substrat et difficilement détachables. Ils peuvent croître sur le substrat, on les dit alors épisubstratiques, ou dans le substrat, on les dit alors endosubstratiques.

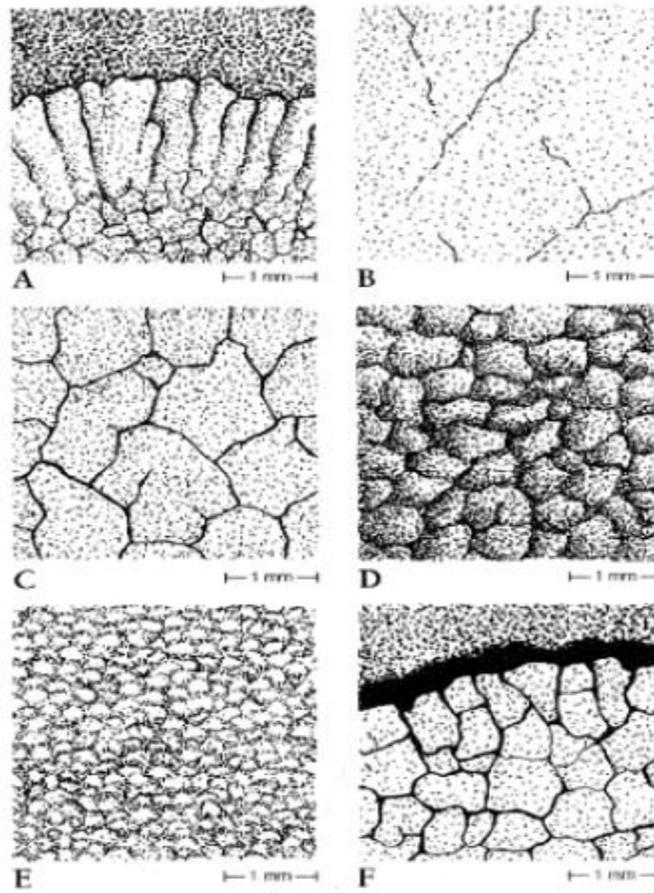


Figure 68: Différents types de thalles crustacés
 A: thalle crustacé lobé au pourtour; B: thalle crustacé fendillé;
 C: thalle crustacé aréolé; D: thalle crustacé verruqueux;
 E: thalle crustacé granuleux; F: thalle crustacé avec ligne d'hypothalle noir.
 (Tiévant, 2001)

2.5.1.2. Thalles foliacés :

Les thalles foliacés ressemblent à des feuilles, ils sont aplatis et pourvus d'un cortex supérieur et inférieur. Ce sont des Thalles étalés sur le substrat, ils sont généralement fixés à celui-ci par de petits crampons ou rhizines. Les uns, dits thalles ombiliqués, adhèrent au support par une surface réduite à peu près centrale et sont surtout caractéristiques du genre *Umbilicaria* et certaines *Dermatocarpon*. Les autres non ombiliqués, adhèrent au support par la plus grande partie de leur surface, le plus souvent grâce à des rhizines. Ils sont beaucoup plus rependus que les précédents, la plus part sont en forme de rosette, comme ceux de la majorité des *Parmelia*, *xanthoria* et *physcia*.

2.5.1.3. Thalles fruticuleux :

Ce sont des thalles en lanières plates, qui peuvent être divisées et cannelées ou en tiges, simples ou plus ou moins ramifiées de section ronde ou plate. Le port peut être étalé, pendant ou dressé, le thalle n'adhère au substrat que par une seule de ses extrémités, de surface réduite (Fig. 69).

Les deux faces des lanières sont généralement de même couleur, sauf pour quelques espèces comme *Evernia prunastri*

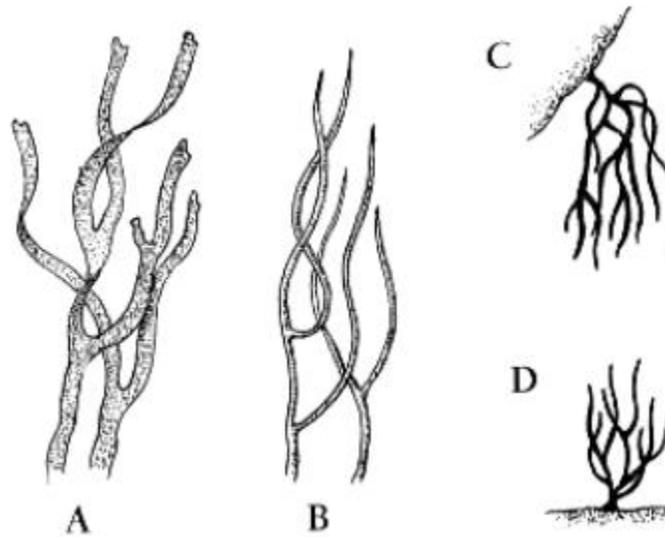


Figure 69: Différents types de thalles fruticuleux
 A: thalle fruticuleux en lanières; B: thalle fruticuleux en tige;
 C: thalle fruticuleux pendant; D: thalle fruticuleux dressé
 (Tiévant, 2001)

2.5.1.4. Thalles squamuleux :

Ils sont formés de petites squames ou écailles concaves ou convexes. Les thalles squamuleux sont semblables pour épousseter (dépeussier) et couvrir des lichens d'une croûte en manquant d'un cortex inférieur. Ils sont constitués de petites squamules ou écailles, de plus de 1.5 mm, serrée les unes contre les autres, contiguës, plus ou moins imbriquées ou superposées, convexe, concaves ou plates ; plus ou moins appliquées et fixée sur le substrat



Figure 70: Thalle squamuleux
 (Van Haluwyn et Lerond, 1993)

2.5.1.5. Thalles composites :

Combinent le type foliacé ou squamuleux, au moins transitoirement, sous la forme de petites squamules et le type fruticuleux, sous la forme de petites branches dressées, creuses, ramifiées ou non et parfois de forme très caractéristique. les thalles composites sont spéciaux au *Cladonia*, ils comportent :

- Un thalle primaire crustacé, squamuleux ou plus rarement foliacé, plus ou moins étalé sur le substrat.
- Un thalle secondaire fruticuleux, formé d'éléments appelés podétions se développant perpendiculairement au substrat, ramifié ou non, fréquemment en forme d'entonnoir.

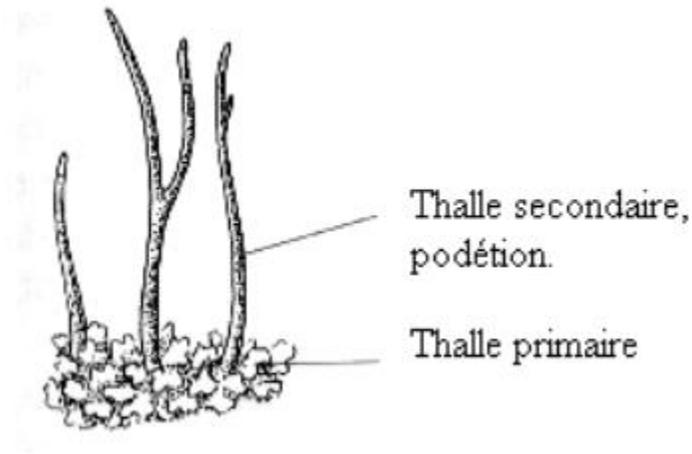


Figure 71: Thalle composite
(Tiévant, 2001)

2.5.1.6. Thalles gélatineux :

Ce sont ceux qui contiennent des cyanobactéries. Ils sont en forme de glomérules, de minuscules touffes ou de lames foliacées. Leurs thalles sont comparables à celui d'une colonie de cyanobactérie comme un Nostoc, qui serait infiltré de champignon; la structure est homogène sans strates différenciées. A l'état sec, ils sont racornis (dur desséché), noirâtres et peu visibles; ils gonflent à la pluie en formant des masses lobées vert-glauque.



Figure 72: Thalle gélatineux
(Van Haluwyn et Lerond, 1993)

2.5.2. Anatomie

Il existe 13250 espèces de champignons et 40 espèces d'algues qui sont lichénisantes. L'algue assure au champignon les hydrates de carbones et les substances azotées par photosynthèse et le champignon assure une protection pour l'algue, limitant le risque d'assèchement ou d'éclairement trop brutal, donc il est un bon rabatteur d'eau, des sels minéraux nécessaires, de vitamines C et D et de substances glucidiques.

Sous le microscope, (Figure 73) si on examine un lichen crustacé en coupe, on observe des hyphes incolores du champignon en périphérie sous forme d'un réseau dense constituant une couche protectrice appelée la zone corticale. Vers l'intérieur, il y a des hyphes non enchevêtrés, entourant de cellules bleues verdâtres de l'algue. Ensuite se trouve une zone médullaire formée exclusivement d'un tissu d'hyphes et en dessous il existe une zone corticale. Les différentes couleurs de lichens sont dues aux acides lichéniques.

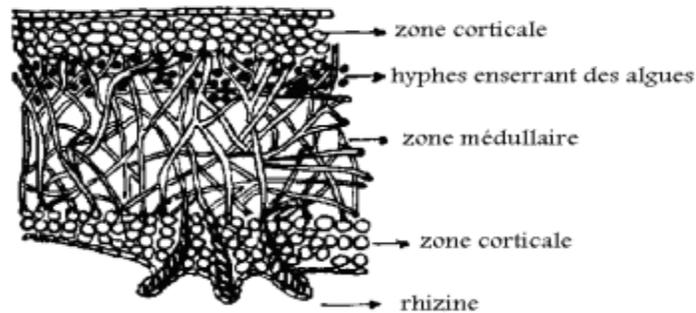


Figure 73: Vue microscopique d'une coupe longitudinale d'un lichen crustacé

(Van Haluwyn et Lerond, 1993)

Au point de vue structure anatomique, le thalle présente deux modifications bien distinctes:

2.5.2.1. Structure homéomère : Le thalle des lichens est dit homéomère quand l'algue y prédomine sur le champignon (figes 69), ou quand les cellules d'algues et d'hyphes sont mêlées et réparties dans toute l'épaisseur du thalle dans les mêmes proportions

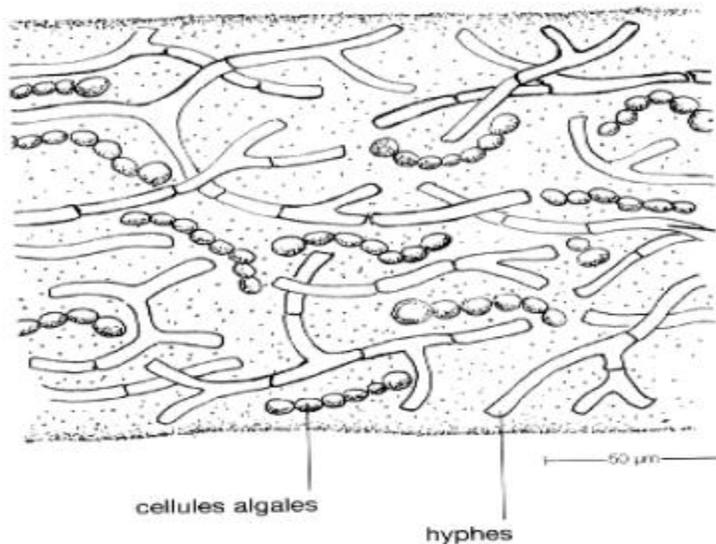


Figure 74: Structure homéomère: coupe transversale du thalle
(Boullard, 1990)

2.5.2.2. Structure hétéromère: C'est-à-dire formé de couches anatomiquement différentes, tantôt superposées (structure stratifiée), tantôt concentriques (structure radiée).

a. Structure hétéromère stratifiée : C'est la structure de la plupart des lichens foliacés, de beaucoup de lichens crustacés et de quelques lichens fruticuleux. En coupe transversale, on observe : un cortex supérieur, une couche algale, une médulle et un cortex inférieur constitué seulement d'hyphes, très denses, pouvant donner naissance à des rhizines.

b. Structure hétéromère radiée: chez la plupart des lichens fruticuleux, la couche gonidiale fait tout le tour de la section transversale, quelle que soit la forme, arrondie, aplatie ou irrégulière. La partie la plus interne de la médulle peut disparaître en grande partie comme chez les *Alectoria* dont le thalle est plus ou moins creux, ou au contraire être formée comme chez les *Usnea*, d'hyphes très serrés parallèles à l'axe et constituée un cordon axial.



Figure 75: Structure hétéromère stratifiée: coupe transversale du thalle (Boullard, 1990)

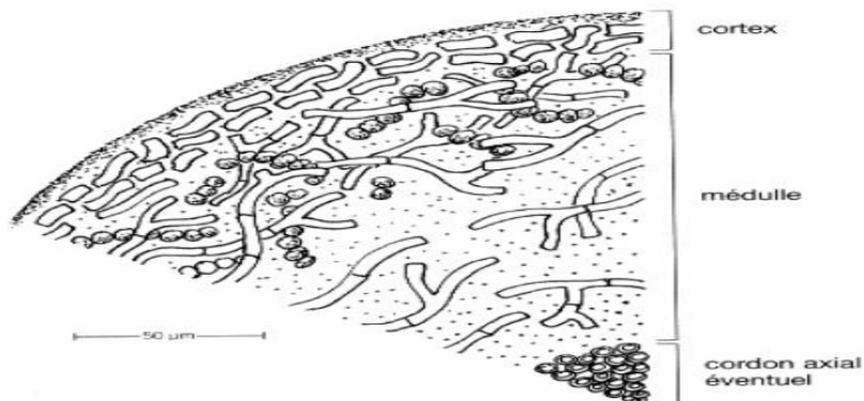


Figure 76: Structure hétéromère radiée: coupe transversale du thalle (Boullard, 1990)

2.5.3. Reproduction

La reproduction des lichens se fait de deux façons:

- Par dissémination du complexe lichénique: soit par bouturage de fragments de thalle, ou par émission de sorédies ou d'isidies;
- Par la production de spores du champignon, qui en germant ensuite donnent des hyphes qui capturent des algues. En revanche, les gonidies ne se multiplient que par voie asexuée

2.5.3.1. Multiplication végétative

Les lichens sont des organismes reviviscents. Capables de subsister longtemps à l'état sec, ils deviennent cassants; leurs fragments dispersés par le vent ou les animaux peuvent engendrer de nouveaux individus.

Des structures plus organisées peuvent également se former: les soralies et les isidies; elles contiennent toujours le mycosymbiote et le photosymbiote.

* Légères, les soralies sont facilement transportées par le vent, la pluie, les insectes et permettent une dissémination de l'espèce.

* Les isidies, plus lourdes que les soralies, ne peuvent être transportées aussi loin, elles assurent plutôt une colonisation du substrat

2.5.3.2. La reproduction sexuée

La multiplication des lichens par voie sexuée pose un problème particulier; seul le mycobionte en est capable; il formera les fructifications typiques du champignon libre.

Deux hyphes fongiques sexuellement différenciées fusionnent et donnent, à la surface du thalle, des structures en forme de boutons (les **apothécies**), ou de coupes plus ou moins fermées (les **périthèces**), dans lesquelles des cellules particulières (les **asques**) vont élaborer les ascospores (en général 8 **spores** par asque mais le nombre peut varier, et des mitoses postméiotiques permettent d'obtenir dans certains cas 32, 64... ascospores, ou beaucoup moins si certaines cellules méiotiques avortent).

Entre les asques se trouvent des cellules stériles: les paraphyses, dont les extrémités renflées peuvent contenir des pigments responsables de la couleur de l'hyménium. Après leur libération, ces spores issues d'une reproduction sexuée, germent et donnent des hyphes qui capturent des algues pour pouvoir redonner un nouveau thalle lichénique.

Il est important de signaler que le thalle de certaines espèces, porte de nombreuses petites pustules noires ressemblant à de minuscules périthèces. Ces structures sont des **pycnides**, formées par les hyphes du champignon, produisant des pycnidiospores qui permettent la multiplication végétative du champignon.

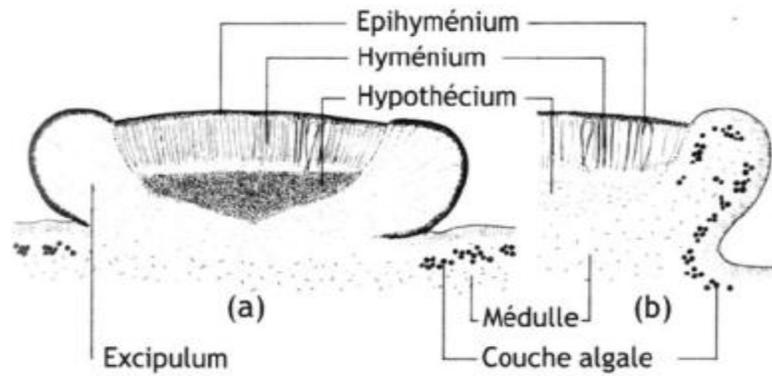


Figure 77: Coupe longitudinale à travers une apothécie

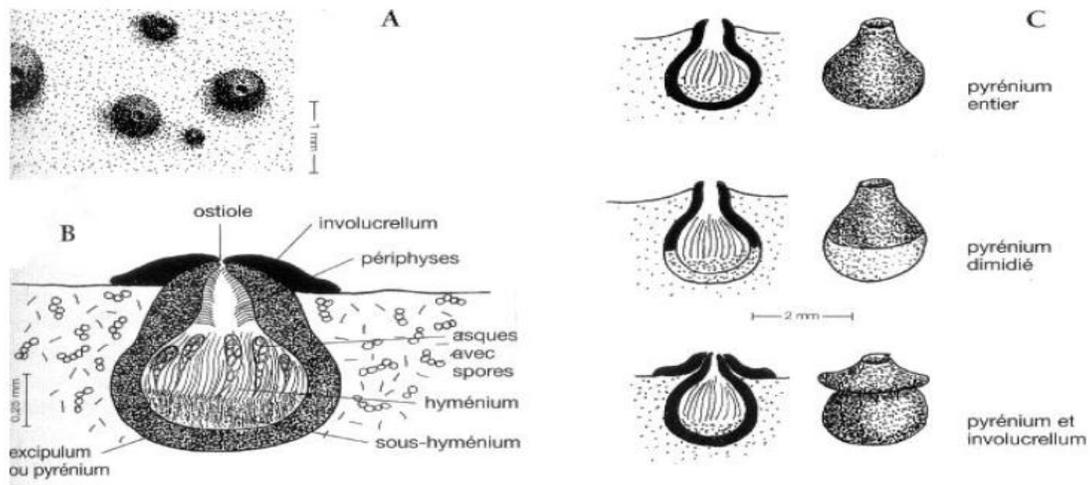


Figure 78: Coupe longitudinale et différents types de périthèces
 A : périthèce ; B : périthèce (coupe) ; C: différents types de périthèces

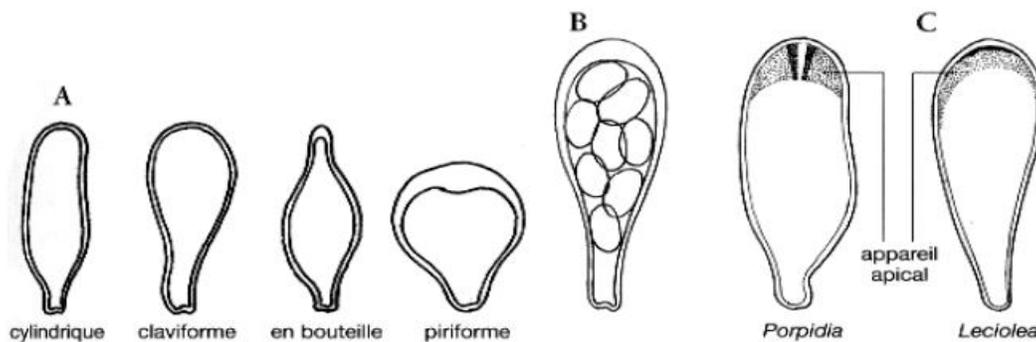


Figure 79: A: différentes formes d'asques;
 B: asque claviforme à 8 spores; C: structure d'un asque
 (Clauzade et Roux, 1985)

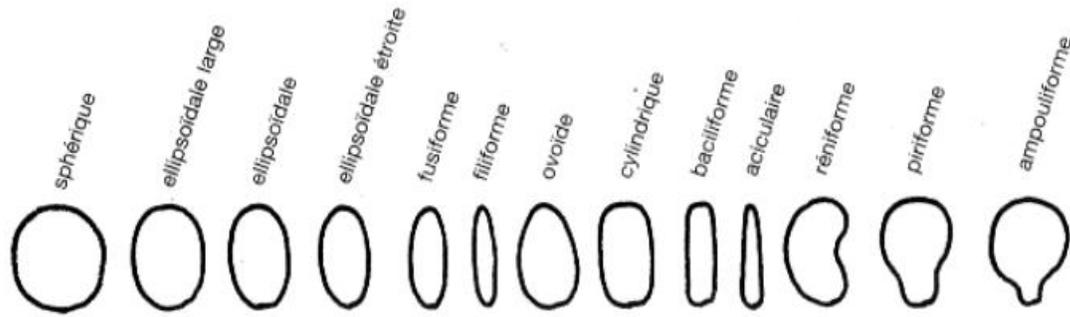


Figure 80: Différentes formes de spores (Clauzade et Roux, 1985)

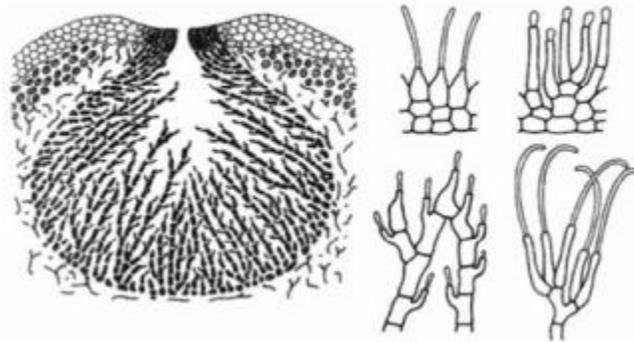


Figure 81: Coupe à travers une pycnide et différents types de conidiophores produisant des conidies

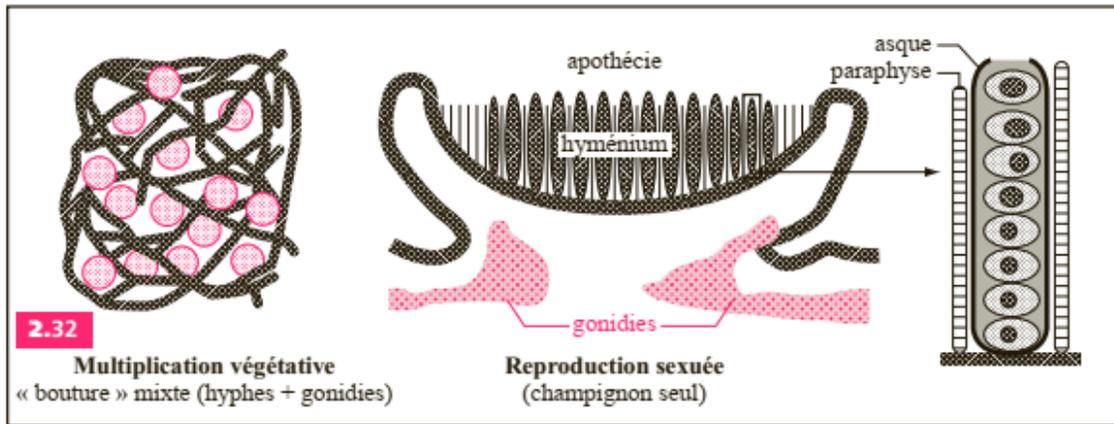
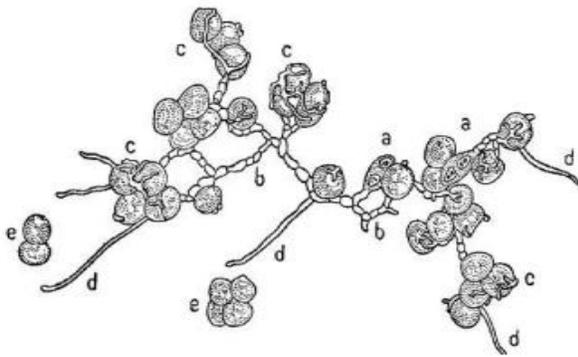
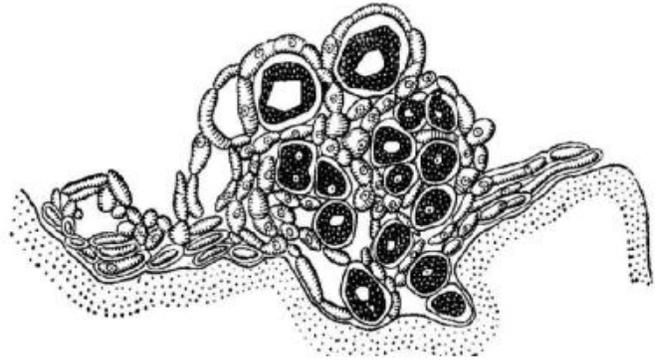


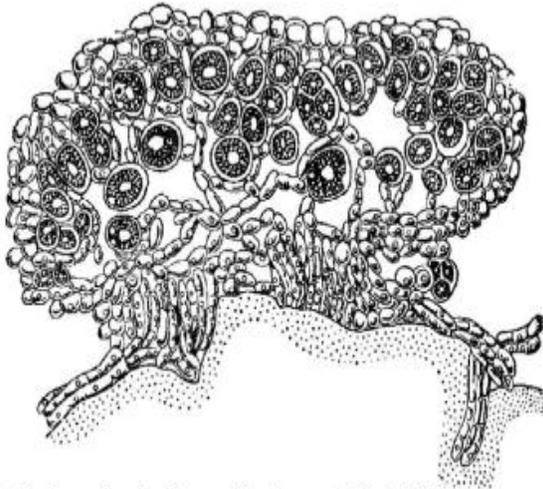
Figure 82: Multiplication végétative et reproduction sexuée.



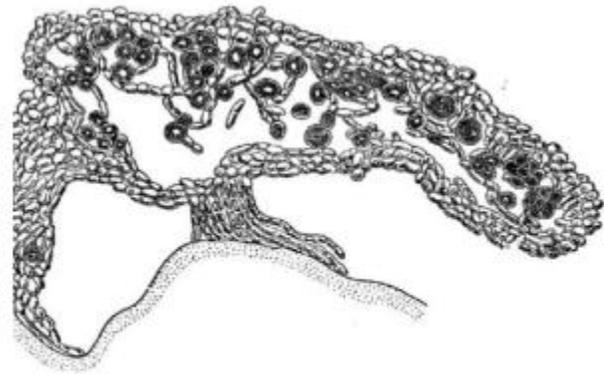
A : formation prothalle de xanthoria parietina ; a, spores germées, b, filament renflés ; c, filaments crampons ; d, filaments chercheurs ; e algues chlorophycées, d'après



B : Prothalle de Xanthoria parietina ; X450 Werner



C : thalle primaire de xanthoria parietina X450



D : jeune thalle secondaire de xanthoria parietina

Figure 83: Etape de formation du thalle d'un lichen

DEUXIEME PARTIE: Les Embryophytes

Chapitre 3: Les bryophytes

Les Embryophytes sont des plantes terrestres. L'habitat terrestre se traduit au niveau de l'appareil végétatif par des *rameaux dressés* (*cormus* en grec, d'où le nom de Cormophytes donné également aux Plantes terrestres), par l'apparition de nouvelles molécules protectrices, *cutines*, *sporopollénines*, *anthocyanes*; au niveau de l'appareil reproducteur et du cycle de développement, par des organes nouveaux, *anthéridie*, *archégone*, *embryon*.

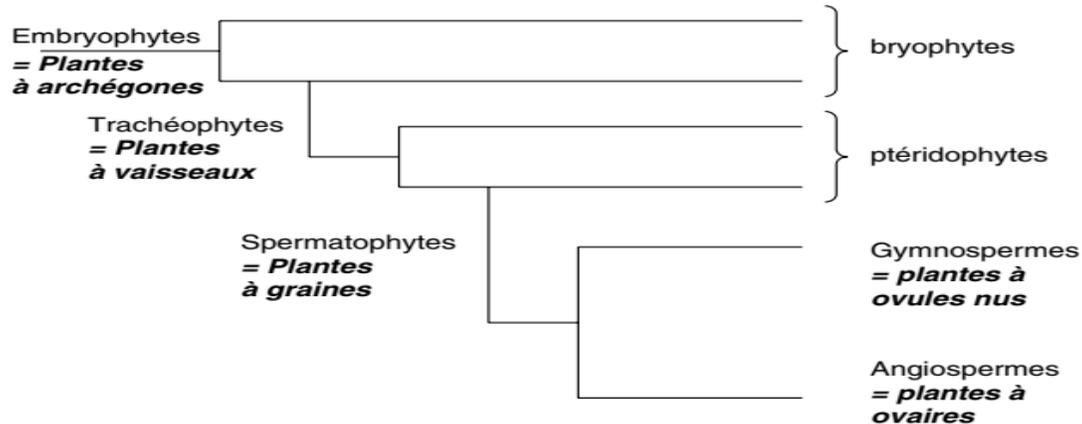


Figure 84: Schéma de la classification des Embryophytes.

Les bryophytes et les ptéridophytes sont paraphylétiques; les Gymnospermes et les Angiospermes sont monophylétiques.

3. Les Bryophytes :

Ce sont des végétaux anciens, assez discrets et méconnus, faisant la transition évolutive entre les algues (toutes à thalle) et les végétaux vasculaires ou supérieurs (tous à tige typique), tels que les ptéridophytes (fougères et prêles) et les plantes à fleurs. Les bryophytes ne sont que partiellement émancipés du milieu aquatique. Ce sont des cryptogames, se reproduisant grâce à des spores libérées et disséminées par le vent et possédant un cycle à deux générations séparées.

3.1. Morphologie

Malgré leur structure simple et une affinité nette avec certaines Algues Vertes, les Bryophytes (du gr. *bruon* = mousse) constituent déjà le début d'un monde nouveau, celui des Embryophytes ou Archégoniates, progressivement adapté au milieu terrestre. La plupart vivent en colonies et couvrent le sol d'un tapis plus ou moins continu dans les sous-bois riches en humus : elles y constituent l'essentiel de la strate végétale basse ou *strate muscinale*. Certaines s'établissent sur les murs et les rochers, c'est-à-dire sur des milieux arides.

D'une façon générale, l'écologie des Bryophytes est très dépendante de l'eau, et des mécanismes biologiques ou des dispositifs particuliers permettent son économie. Les représentants du groupe sont souvent considérés comme de bons indicateurs de conditions microclimatiques et de la nature du sol.

Les Bryophytes comprennent principalement les *Mousses* et les *Hépatiques*. Quoiqu'il y ait une certaine variabilité dans l'aspect morphologique, les hépatiques ne possédant notamment pas de stomates, il s'agit d'un groupe présentant un *cycle de développement caractéristique*.

Dépassant rarement 20 cm de long et souvent beaucoup plus petit, il est constitué soit de tiges portant des petites feuilles peu épaisses et simplifiées (observables par transparence), soit d'un thalle ramifié aplati sur le substrat et plus ou moins épais. On est donc bien à un stade intermédiaire entre les thalles typiques des algues et les tiges complexes des plants supérieures.

Il n'y a donc pas de vraies racines, mais seulement des rhizoïdes filamenteux, et pas non plus de vrais vaisseaux conducteurs, mais seulement parfois des cellules allongées jouant ce rôle dans certaines tiges de mousses. Les bryophytes doivent donc absorber l'eau et les sels minéraux directement par imbibition et diffusion à travers les thalles, les feuilles ou les tiges ; pour augmenter la surface d'échanges, on peut citer les feuilles nombreuses et très fines, des lamelles parallèles sur certaines feuilles (polytrics), un duvet de rhizoïdes sur certaines tiges ...

Les feuilles de sphaignes ont deux types de cellules (*voir doc plus loin*) : des petites cellules vivantes et vertes entourant des grosses cellules mortes et translucides gorges d'eau, d'où un fonctionnement « en éponge » suivant l'humidité ambiante. La croissance vers le haut des tiges de sphaignes dure très longtemps, ce qui permet l'accumulation des débris végétaux et la formation de tourbe, en conditions très humides et sans oxygène.

De plus, durant les périodes sèches ou froides assez longues, certaines mousses et hépatiques (des dunes, rochers, toits, troncs) perdent jusqu'à 90 % de leur eau interne et passent alors progressivement en vie ralentie ou anhydrobiose, avec arrêt de la croissance et du métabolisme. Pour certaines espèces adaptées à la grande sécheresse, cette phase peut durer des décennies. Par la suite, elles peuvent se réhydrater en quelques minutes pour reprendre une vie normale : c'est le phénomène de reviviscence, tout à fait caractéristique de ce groupe de végétaux.



Figure 85 : Les Bryophytes

3.2. Reproduction des différents embranchements

3.2.1. Cycle de développement

Une spore à n chromosomes, petite masse sphérique et unicellulaire, émet un *protonéma* (de *protos*, premier et *nema*, fil) chlorophyllien, filamenteux ou lamellaire (fig. 5) dont la structure rappelle une algue verte. Sur ce protonéma naissent des bourgeons qui forment soit des tiges feuillées (Mousses, Sphaignes), soit une lame ou thalle (Hépatiques), puis le protonéma, organe transitoire, disparaît.

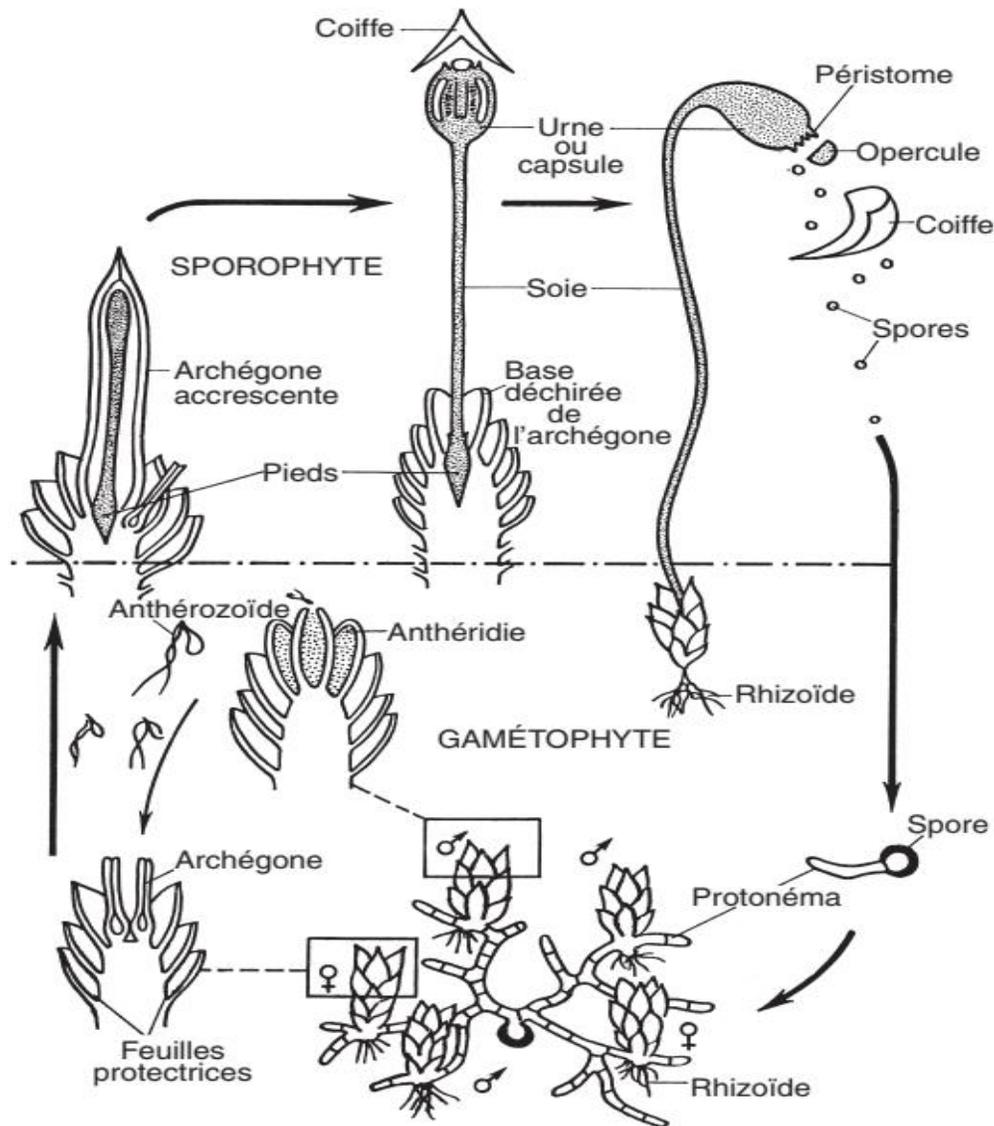


Figure 86: Cycle de développement de la Funaire hygrométrique.

Quand la tige feuillée (ou le thalle) a pris un développement suffisant, il apparaît, généralement protégés par quelques replis ou feuilles, des *organes males ou anthéridies* et des *organes femelles ou*

archéogones (dans les espèces monoïques, les mêmes pieds portent des organes mâles et femelles; dans les espèces dioïques, ce sont des pieds différents).

Les anthéridies, sphériques ou allongées, contiennent les *anthérozoïdes*, gamètes mâles toujours biciliés.

Les archéogones, en forme de bouteille à long col allongé, contiennent le gamète femelle ou *oosphère*.

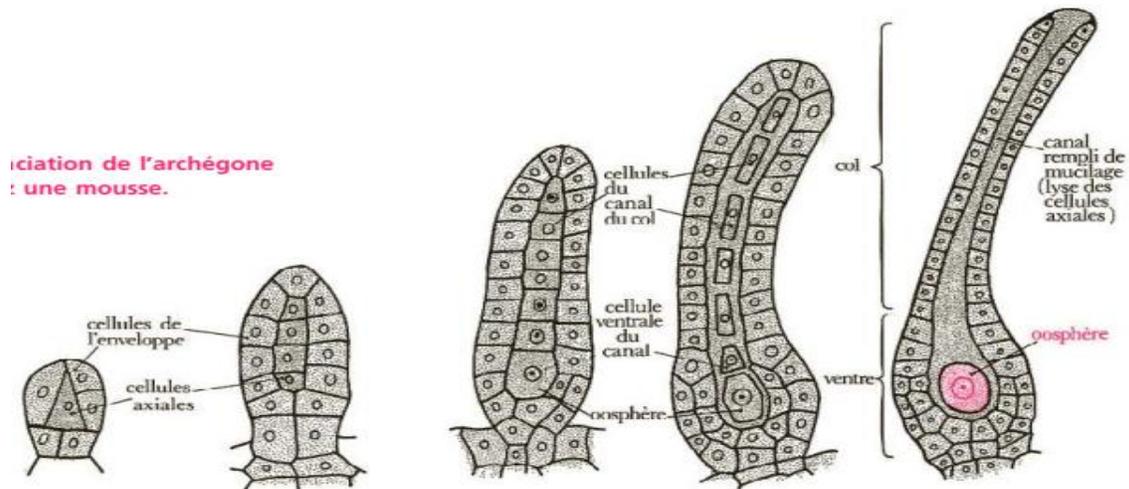


Figure 87 : Différenciation de l'archéogone chez une mousse

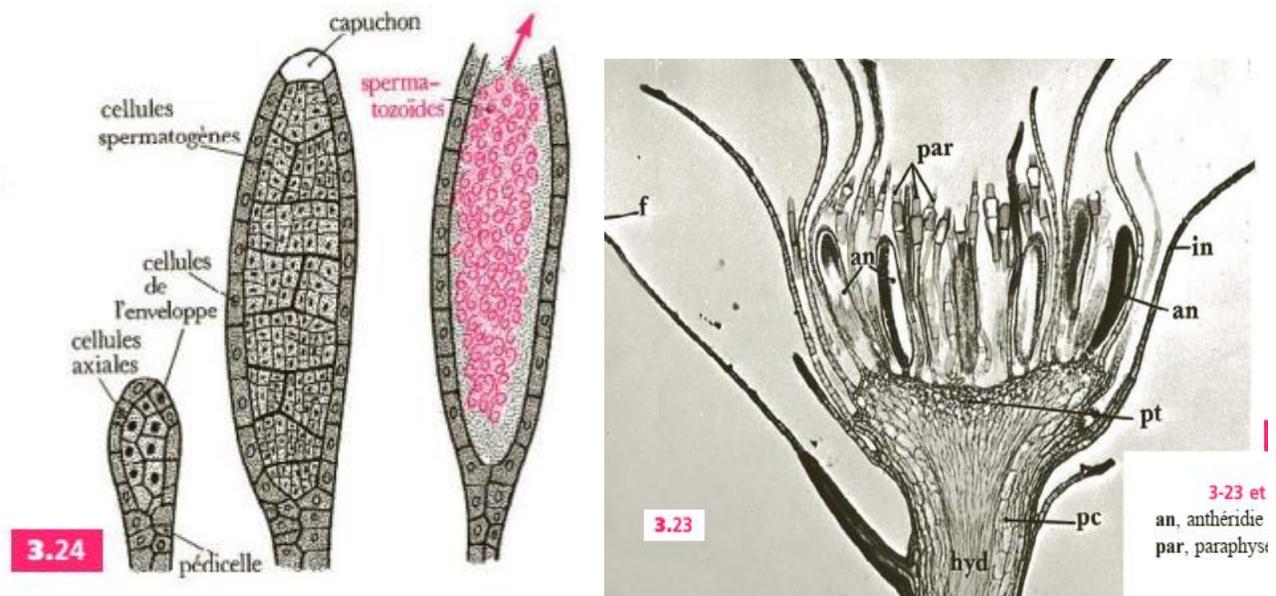


Figure 88 : Corbeille à anthérides

an, anthéride; hyd, hydroides; in, involucre; par, paraphyse; pc, parenchyme cortical; pt, plateau

Les anthérozoïdes mûrs, libérés de l'anthéridie par gélification et rupture de la paroi, sont entraînés par les gouttes d'eau dans lesquelles ils se déplacent : à ce moment, l'organe femelle est ouvert au sommet et les cellules placées dans l'axe du col sont résorbées, laissant un canal, rempli de matière

mucilagineuse, riche en glucose, laquelle attire par chimiotactisme les anthérozoïdes, leur permettant d'arriver jusqu'à l'oosphère.

Les noyaux mâle et femelle, à n chromosomes, fusionnent en donnant un œuf ou zygote à $2n$ chromosomes, lequel se divise aussitôt et se transforme en un jeune sporogone, tandis que la partie ventrue de l'archégone, continuant sa croissance, constitue une enveloppe qui le protège.

Le sporogone (fig. 6) se compose :

- d'un pied, organe qui lui permet de rester fixé sur la plante feuillée ou le thalle;
- d'un pédicelle ou soie, plus ou moins allongé, qui porte à son extrémité un sporange ou capsule s'ouvrant soit par un couvercle ou opercule, soit par des valves, libérant ainsi les spores. Ces spores se forment après une réduction dite chromatique (R. C.) qui réduit le nombre des chromosomes de $2n$ à n

Les spores sont également appelées tétraspores ou méiospores (du grec *meiô*, diminuer) en raison de leur mode de formation; elles sont entourées d'une enveloppe commune de callose correspondant à la paroi de la cellule mère. L'individualisation de chacune des spores, laquelle précède leur dispersion, est assurée par une glucanase, enzyme hydrolysante.

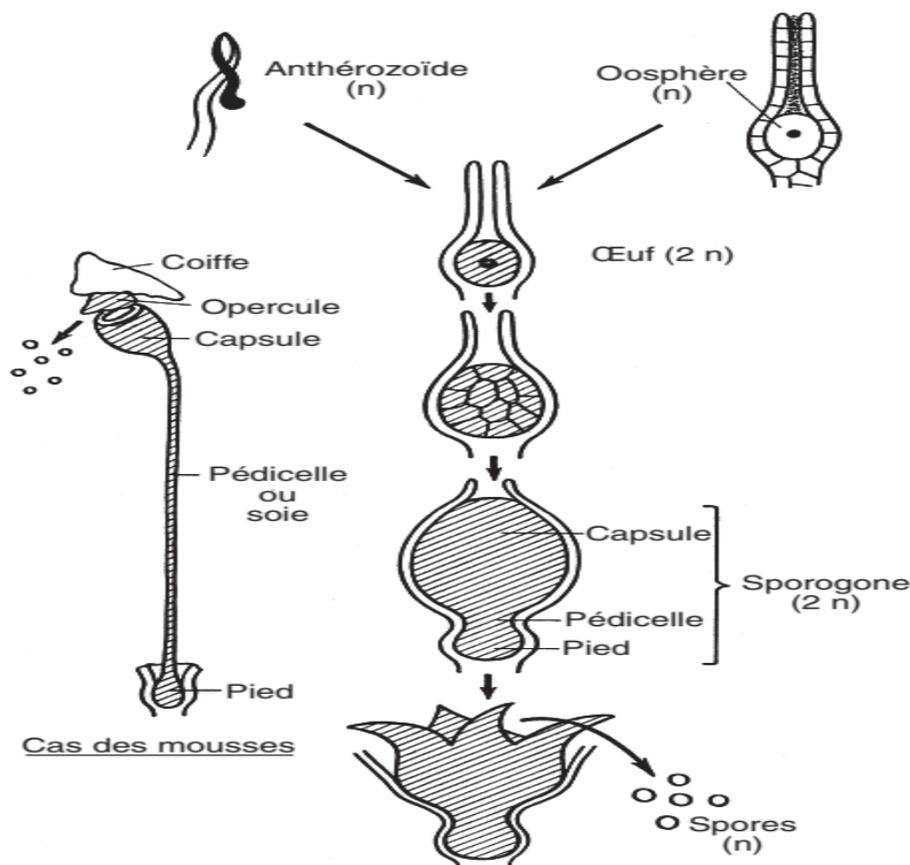


Figure 89: Formation du sporogone.

Les parties correspondant au sporophyte sont hachurées.

Chaque spore possède une paroi double :

- * une à l'extérieur, l'*exine* épaisse, cutinisée à sporopollénine;
- * à l'intérieur, l'*intine* mince et cellulosique.

Tombées sur le sol, les spores germent si les conditions leur sont favorables (chaleur, humidité...):

- * l'exine éclate;
- * l'intine s'allonge, fait hernie hors de l'exine;
- * le noyau de la spore se divise, donnant bientôt naissance à un nouveau protonéma.

La séparation des sexes peut se faire dès la formation des spores, les unes donnant naissance à des individus adultes porteurs d'organes mâles, les autres à des adultes porteurs d'organes femelles. Le plus souvent elle se fait sur le protonéma dont certains bourgeons se différencient en individus mâles et d'autres en individus femelles. Enfin, elle peut n'avoir lieu qu'au stade de la plante adulte sur laquelle se différencient à la fois des anthéridies et des archégonies.

Chez les Mousses (fig. 6 à gauche) proprement dites, le sporogone s'allonge très fortement : l'enveloppe formée par l'archégonie – bien qu'accrescente – se rompt et sa partie supérieure entraînée forme une *coiffe* sur le sommet du sporange, appelé communément *urne* ou *capsule*.

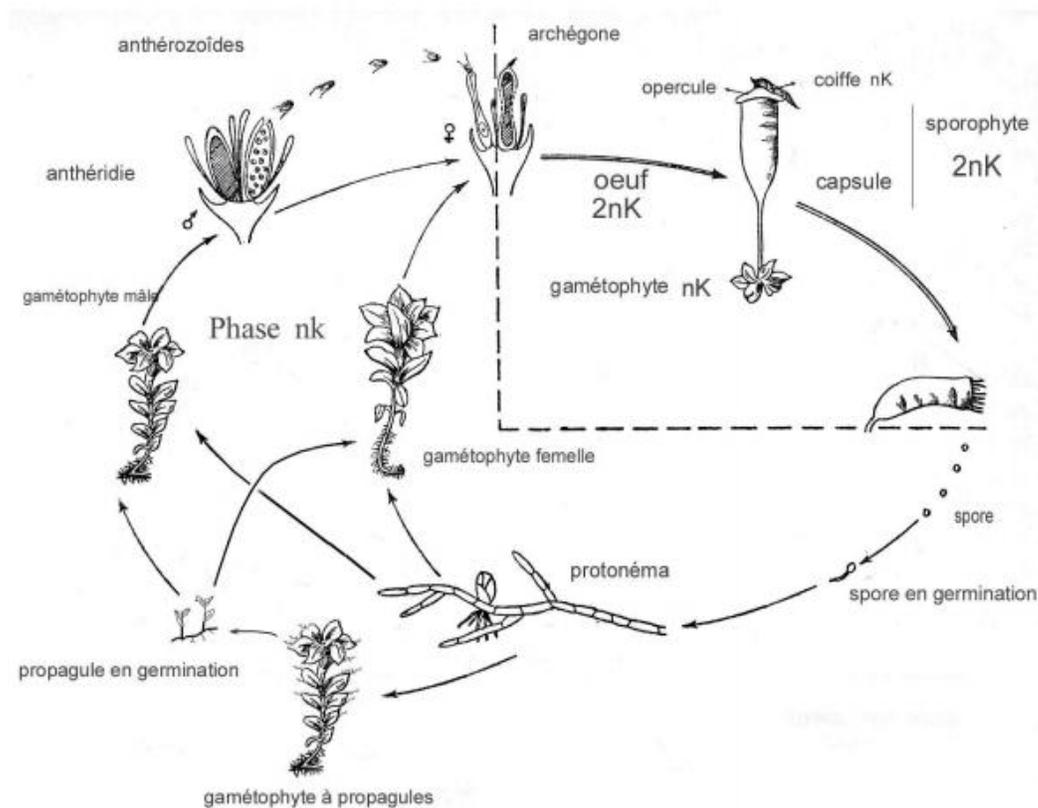


Figure 90 : Cycle de vie haplodiphasique des bryophytes

(d'après Augier (1966) modifié par Bardat 2007)

On résumera ainsi les différents stades du cycle reproducteur des bryophytes :

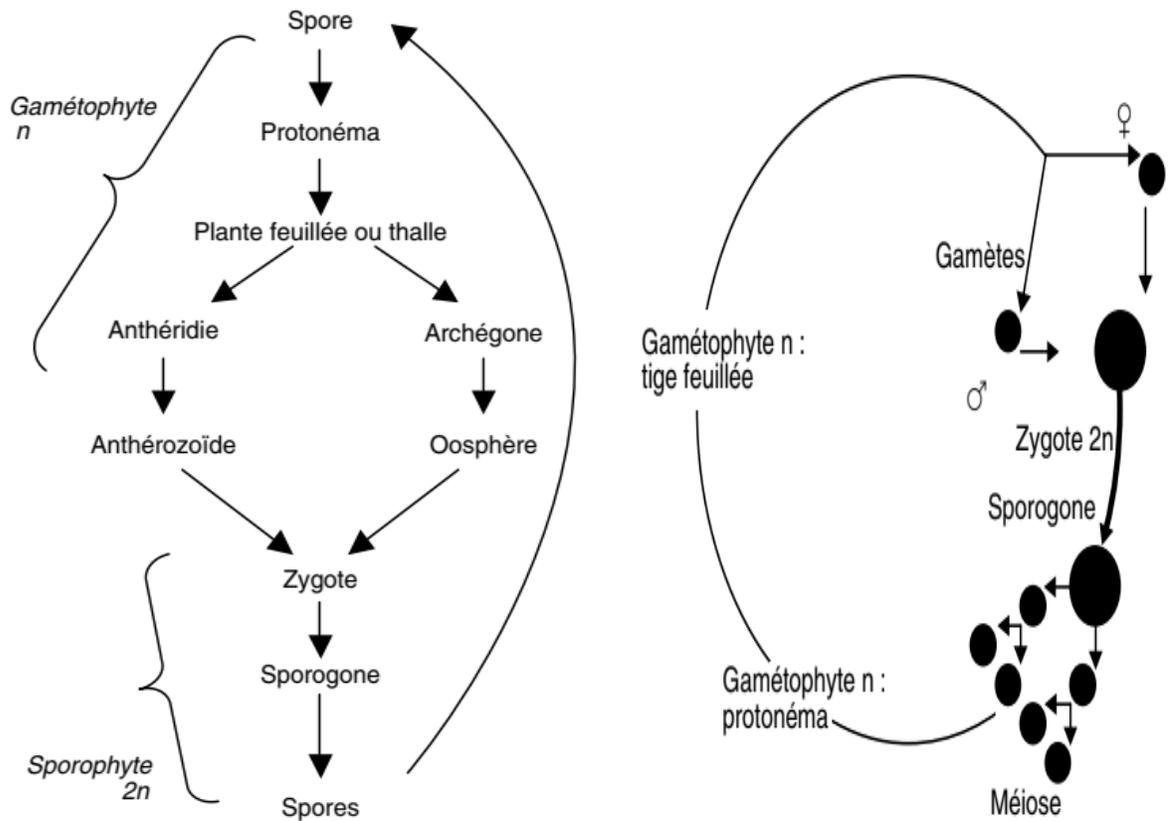


Figure 91: les différents stades du cycle reproducteur des bryophytes

3.2.2. Caractères généraux du cycle de développement

Trois points sont à souligner:

1. La fécondation est aquatique : Le déplacement des anthérozoïdes ciliés jusqu'à l'oosphère nécessite la présence d'eau, ce qui lie les bryophytes aux lieux *humides*. Ainsi, les bryophytes qui ont été au cours de l'évolution les premières plantes vraiment terrestres, gardent encore, dans leur *cycle reproductif*, la trace de leur origine marine.

Il est d'ailleurs à remarquer qu'au cours de l'évolution, les innovations portent d'abord sur l'appareil végétatif (passage ici, du thalle à un axe dressé) tandis qu'une grande fixité s'observe au niveau de l'appareil reproducteur (maintien des anthérozoïdes ciliés) comme si la nature craignait de modifier trop rapidement les mécanismes de la reproduction, fonction essentielle de la survie du groupe.

2. La phase diploïde (sporophyte) est très courte, réduite au sporogone (fig. 91); de plus, elle reste en relation physiologique étroite avec le gamétophyte sur lequel elle se développe.

3. Le **gamétophyte** est représenté par des organes végétatifs peu différenciés. Les organes végétatifs sont à n chromosomes, ce qui limite leur importance : en effet, les structures vivantes à n chromosomes sont généralement de petite taille et peu différenciées.

3.3. Classification des Bryophytes

Les Bryophytes comprennent principalement les Mousses (Bryophytes s. str.) , les Hépatiques (Marchantiophytes) et les Anthocérotes (Anthocérotophytes).



Figure 92 : Classification des Bryophytes

1 : *Sphagnum squarrosum* , 2: *Dicranum scoparium* , 3: *Thuidium tamariscinum* , 4: *Jungermannia* sp. , 5: *Reboulia hemisphaerica* , 6: *Anthoceros agrestis*

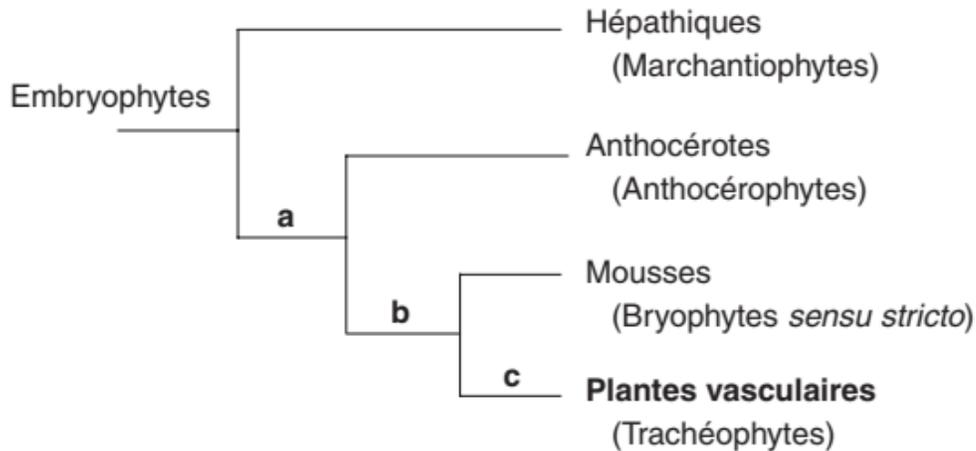


Figure 93: Cladogramme des bryophytes.

a : premiers stomates; b : apparition des leptoides et hydroïdes; c : sporophyte dominant et ramifié.

Tableau 8: Les principaux groupes de bryophytes s.l., classification pratique non phylogénétique.

Groupes	Sous-groupes	Caractères principaux	Exemples de genres (voir planches)
Marchantiophytes ou Hépathiques sporophyte simplifié, à soie fugace	Hépathiques à feuilles	tiges feuillées à symétrie bilatérale, souvent petites et ramifiées ; structure foliaire très variée, sans nervure ; capsule sommitale s'ouvrant par 4 dents	<i>Anastrophyllum, Anthelia, Barbilophozia, Bazzania, Blepharostoma, Calypogeia, Cephalozia, Chiloscypus, Diplophyllum, Frullania, Jungermannia, Lejeunea, Lepidozia, Lophocolea, Lophozia, Marsupella, Nardia, Nowellia, Odontoschima, Plagiochila, Porella, Ptilidium, Radula, Scapania, Trichocolea, Tritomaria</i>
	Hépathiques à thalle	groupe hétérogène ; thalle aplati souvent dichotomique	<i>Conocephalum, Cryptothallus, Lunularia, Marchantia, Metzgeria, Peltia, Preissia, Riccardia, Riccia</i>
Anthocérotophytes	Anthocérotes	présence d'un thalle en rosette	<i>Anthoceros</i> pas de capsule, mais axes fertiles allongés
Bryophytes s.s. ou Mousses s.l. tige feuillée à symétrie axiale ; feuille souvent à nervure ; sporophyte complexe avec une capsule et une coiffe et souvent une soie	Andréaeales	capsule s'ouvrant par 4 fentes	<i>Andreaea</i>
	Sphaignes	capsule sans soie ; 2 types de cellules foliaires très distincts	<i>Sphagnum</i> , nombreuses espèces pas faciles à distinguer
	Mousses acrocarpes (et cladocarpes, intermédiaires)	groupe très hétérogène ; espèces petites à grandes ; sporophytes en position terminale sur les tiges dressées, non ramifiées ou à rameaux parallèles entre eux, formant des tapis serrés ou des coussins arrondis	<i>Aulacomnium, Atrichum, Barbula, Bartramia, Bryum, Buxbaumia, Campylopus, Ceratodon, Cinclidotus, Dicranella, Dicranum, Fissidens, Funaria, Grimmia, Leucobryum, Mnium, Orthotrichum, Philonotis, Plagiomnium, Pleurochaete, Pogonatum, Pohlia, Polytrichum, Racomitrium, Rhizomnium, Rhodobryum, Schistidium, Schistostegia, Splachnum, Syntrichia, Tetraxis, Tortella, Tortula, Trichostomum, Ulota</i>
	Mousses pleurocarpes	groupe plus homogène ; espèces moyennes à très grandes ; sporophytes en position latérale sur les tiges souvent couchées ou obliques, à nombreux rameaux écartés des tiges, formant des tapis lâches et parfois épais	<i>Abietinella, Amblystegium, Anomodon, Brachythecium, Campyllum, Calliargonella, Cirriphyllum, Climacium, Cratoneuron, Ctenidium, Drepanocladus, Eurhynchium, Fontinalis, Hedwigia, Homalothecium, Hookeria, Hylocomium, Hypnum, Isothecium, Kindbergia, Leptodon, Leskea, Leucodon, Neckera, Orthothecium, Plagiothecium, Pleurozium, Ptilium, Rhynchostegium, Rhytidiadelphus, Rhytidium, Sanonia, Scleropodium, Scorpidium, Thamnobryum, Thuidium, Tomentohypnum</i>

3.3.1. Marchantiophytes (Hépatiques)

Les Hépatiques (9 600 espèces) ont, pour deux tiers d'entre elles, un aspect feuillé, comme les mousses; les autres se limitent à une *lame foliacée* ou thalle qui présente souvent des lobes comme un foie, d'où leur nom (fig. 95 du *Marchantia*). Il n'y a pas de stomates, ni sur le sporogone, ni sur le thalle, bien que des pores permettent les échanges gazeux chez plusieurs espèces. Un marqueur chimique, l'acide lunatique, caractérise le groupe.

Ils présentent une tige couchée sur le substrat portant des rangées de feuilles dissymétriques. Les rangées de feuilles supérieures sont plus développées. Caractérisées par un protonéma souvent réduit et massif, un appareil végétatif et des capsules simples, elles comprennent deux groupes : les *hépatiques à feuilles* (*Diplophyllum*, *Fossombronina*) et les *hépatiques à thalle* dont l'appareil végétatif est une lame aplatie (lunulaire, *Marchantia*)



Figure 94 :Hépatiques.

3-63. Hépatique à thalle, *Lunularia* (elle développe souvent des corbeilles à propagules en croissant de lune, d'où son nom). 3-64. Hépatique à thalle, *Marchantia*. Le thalle porte des chapeaux où se développent les gamétanges. Ici chapeau femelle à archégone. – 3-65. Hépatique à feuille, *Diplophyllum*.



Figure 95: *Marchantia polymorpha*
http://www.ebu.ee/tokko/25_samblad.html

3.3.1.1. Cycle d'une hépatique (Marchantiophyta, *Marchantia polymorpha*)

Le cycle des hépatiques, à feuilles (Anthoceroophyta) ou à thalle (Marchantiophyta), est fondamentalement du même type que celui des mousses (Bryophyta sensu stricto). Les différences concernent des détails de structure du gamétophyte et du sporophyte.

Le gamétophyte est un thalle monoïque foliacé vivace appliqué sur le sol, de structure complexe, ramifié dichotomiquement, ancré par des rhizoïdes. Il porte des corbeilles à propagules, assurant la multiplication végétative. Les gamétanges sont portés par des structures en forme de parasol, les gamétangiophores, composés d'un pédoncule et d'un chapeau. Les archégoniophores ont un chapeau à neuf lobes profondément découpés et portent à leur face inférieure les archégonies. Les anthéridiophores, à huit lobes peu marqués, portent les anthéridies dans des cryptes de leur face supérieure.

La fécondation a lieu avant la croissance du pédoncule des archégoniophores. Le sporophyte, réduit à une capsule, se développe selon un géotropisme positif. La capsule s'ouvre par quatre valves. Elle contient, outre les spores, des élatères fréquentes chez la plupart des hépatiques. Les élatères sont des cellules stériles très allongées, dont la paroi présente des épaissements hélicoïdaux. A maturité, les élatères sont des cellules mortes, auxquelles les épaissements de la paroi confèrent des propriétés hygroscopiques, et don't les mouvements facilitent l'ouverture de la capsule et la dispersion des spores.

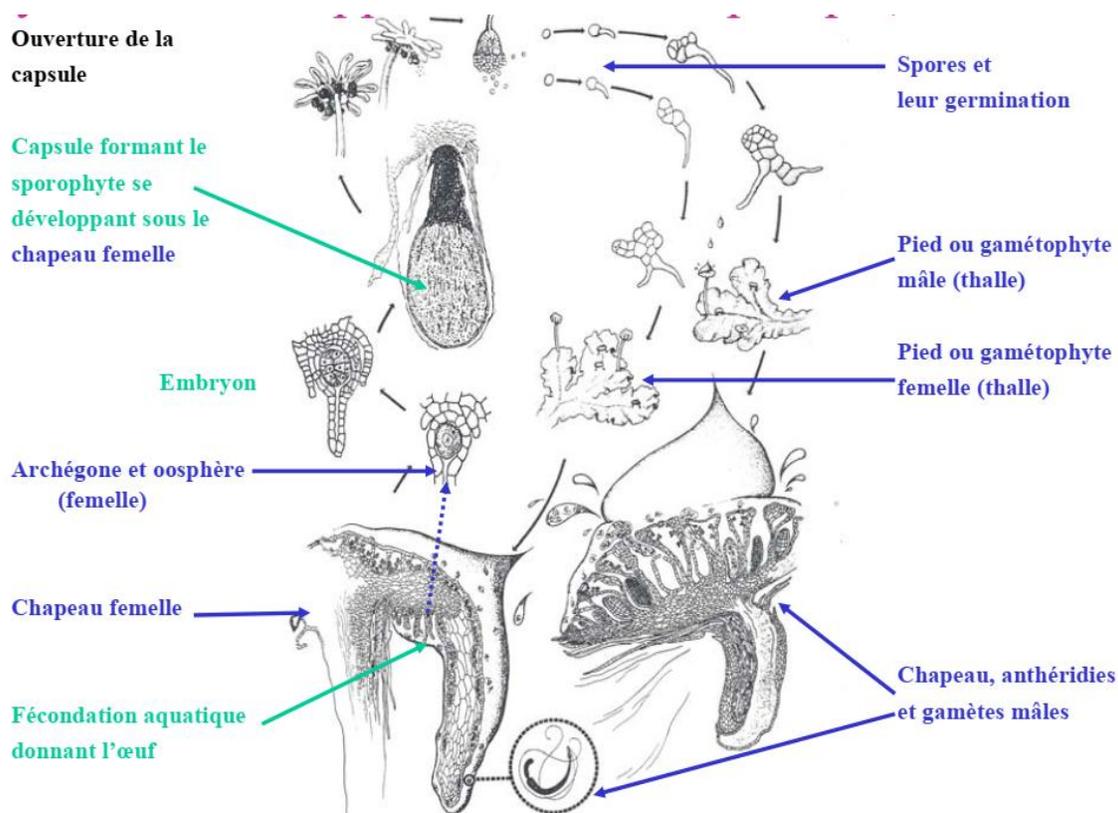


Figure 96: Cycle de développement d'une hépatique, *Marchantia*

3.3.2. Anthocérotophytes (Anthocérotes)

Petit groupe d'une centaine d'espèces longtemps rattaché aux Hépatiques, possèdent des stomates aussi bien sur le gamétophyte que sur le sporophyte; l'archégone, très protégé, est inclus dans les tissus du gamétophyte; le sporophyte est capable d'une certaine croissance en hauteur grâce à un méristème basal. Comme les algues et à la différence des Mousses et Hépatiques, ils ne synthétisent pas d'anthocyanes.

Ils ont un appareil végétatif constitué par une lame plus ou moins étalée sur le substrat. On observe l'apparition par rapport aux thallophytes d'une orientation et d'une spécialisation dans la structure des tissus. La partie supérieure de la lame est riche en chloroplastes et la partie inférieure est riche en élément de réserves. L'appareil végétatif est un thalle = prothalle.

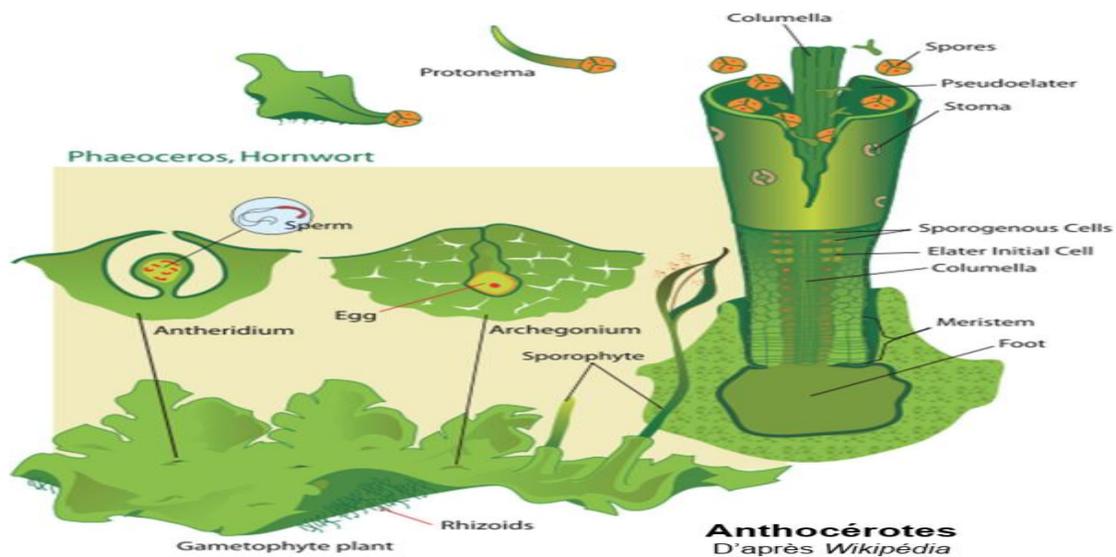


Figure 97: Anthocérotes



Figure 98: Anthoceros agrestis

<http://www.naturalistes-romands.ch/bryoge/cultures/cultures.html>

3.3.3. Bryophytes s. str. (Mousses)

Chez les Mousses proprement dites (15 200 espèces) et les Sphaignes (150 espèces) la plante prend l'aspect d'une tige feuillée. C'est une apparence, tige et feuilles ne sont pas comparables à celles des autres végétaux terrestres.

La « tige » est un simple cordon revêtu d'un épiderme faiblement cutinisé. Des cellules allongées, les hydroïdes spécialisées dans le transport de l'eau et les leptoïdes dans celui des molécules issues de la photosynthèse, apparaissent seulement chez certaines Mousses tropicales et les Sphaignes.



Figure 99: Une Mousse :Polytrichum commune

http://domenicus.malleotus.free.fr/v/polytric_commun.htm



Figure 100: Une Sphaigne

http://www.sarracenia.fr/Culture_Sarracenia.htm

Les « feuilles » sont de simples émergences de la tige constituées d'une seule assise de cellules chlorophylliennes, excepté dans la région médiane où deux ou trois épaisseurs de cellules simulent une

nervure. « Tige » et « feuille » sont dépourvues de stomates. Des anthocyanes assurent une protection contre les U.V., mais leur variété structurale est encore faible.

Petite taille et faible différenciation sont liées. Chez ces plantes où il n'y a ni racines permettant d'aller chercher en profondeur l'eau et les sels minéraux, ni stomates assurant par transpiration un mouvement des liquides, seule la capillarité intervient. Cette dernière ne peut avoir lieu que sur quelques centimètres et en présence d'un film liquide baignant au moins les parties inférieures de la plante.

Les Mousses seront ainsi de petite taille et localisées aux lieux humides et cela d'autant plus que leur reproduction par anthérozoïdes ciliés dépend de l'eau.

En revanche, le sporogone, organe à 2n chromosomes, présente un épiderme muni de stomates et, au niveau de la soie, une ébauche de tissu conducteur.

La majorité des mousses appartient au groupe des Bryales. Elles ont un protonéma filamenteux, une tige feuillée à symétrie radiale et une capsule typique. D'après la disposition du sporogone sur le gamétophyte, on distingue :

a) les *mousses acrocarpes* (*akros* = sommet, *carpos* = fruit) dont les sporogones sont terminaux (polytric, funaire, *Mnium*, *Leucobryum*) ;

b) les *mousses pleurocarpes* (*pleuros* = côté) dont les sporogones sont latéraux. Il s'agit de mousses d'assez grande taille, à tiges ramifiées, appartenant au groupe des *Hypnum* dans lequel la plus commune est la mousse des jardinières utilisée par les fleuristes.

Les sphaignes se distinguent des précédentes par leur biologie et leur structure particulières.

Chez les mousses, on distingue les ordres suivants :

* **les bryales**, ce sont les vraies mousses.

* **Les sphagnales**. C'est un ordre très homogène avec un seul genre les sphaignes qui interviennent dans l'édification des tourbières.

* **Les andréales**. C'est l'ordre le moins connu. Il ne comporte qu'un seul genre vivant sur les rochers siliceux en montagnes.

A noter que chez les Bryophyte la génération morphologique visible est haploïde (c'est le gamétophyte) alors que le sporophyte se développe en parasite.

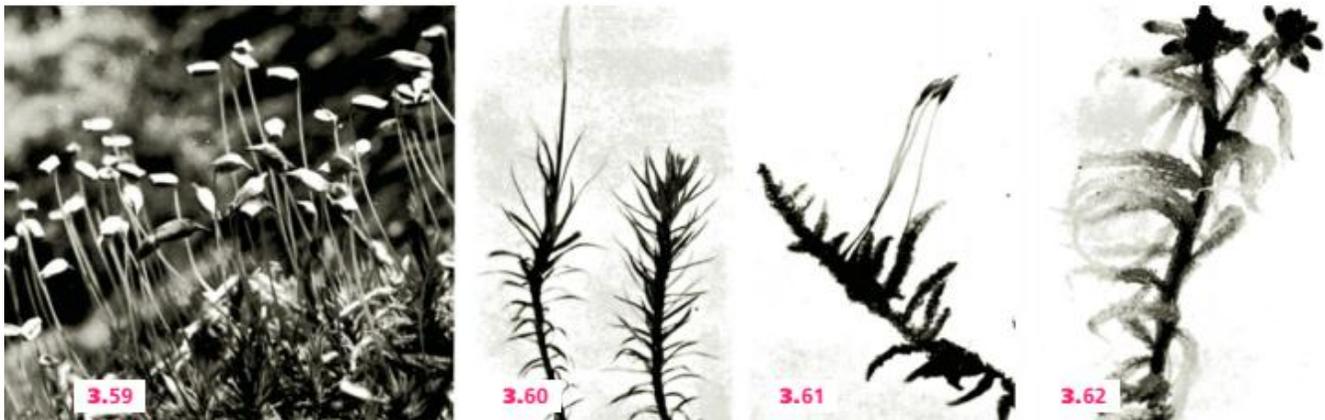


Figure 101: Mousse acrocarpe, (*Polytrichum*), mousse pleurocarpe, (*Hypnum*) et *Sphaigne*

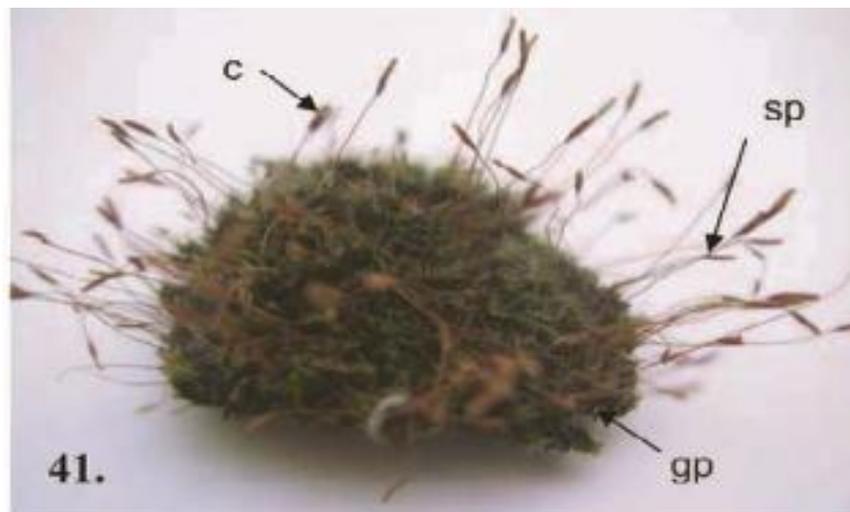


Figure 102: Mousse constituée de gamétophytes mâles et femelles haploïdes (gp), ces derniers pourtant des sporophytes (ou sporogones) diploïdes (sp). c, capsule du sporophyte.

3.3.3.1. Cycle de reproduction d'une mousse de type Bryophyte *sensu stricto* (*Polytrichum*)

✓ Le gamétophyte et fécondation

Le gamétophyte est un axe feuillé ne dépassant pas quelques centimètres de hauteur, comportant à sa base des poils absorbants, les rhizoïdes. Il est dépourvu d'épiderme, de vaisseaux conducteurs et de racines. Le sommet du gamétophyte porte un involucre protecteur constitué de feuilles plus grandes que les autres. Dans ce réceptacle, les gamétanges sont groupés en bouquets, mêlés de filaments stériles, les paraphyses.

Les anthéridies, en forme de massue pédicellée, comportent une seule assise protectrice de cellules stériles entourant un massif de quelques dizaines de cellules-mères de gamètes mâles ou cellules spermatogènes, qui se différencient chacune à maturité en un anthérozoïde hélicoïdal biflagellé. A ce moment, par temps humide, l'anthéridie éclate à son sommet et libère les anthérozoïdes dans la pellicule d'eau qui recouvre la plante.

Les archégonies, en forme d'amphore, comportent une partie basale renflée en ampoule, le ventre, surmonté d'un cylindre creux très allongé, le col. Le ventre abrite une grosse cellule macronucléée, sans membrane cellulosique, non flagellée : le gamète femelle ou oosphère. L'archégonie comporte au niveau du ventre plusieurs assises de cellules stériles, mais une seule au niveau du col où elles forment un cylindre dont le canal est d'abord occupé par une file de cellules dites de canal du col. A maturité leurs parois se lysent et leur contenu se gélifie et forme un mucilage hydrophile.

Selon les espèces, les gamétanges mâles et femelles sont portés par le même individu (monoécie) ou par des individus différents (dioécie), mais dans ce dernier cas, les gamétophytes mâle et femelle ne sont pas morphologiquement distinguables (pas de dimorphisme sexuel, sauf chez quelques espèces). Les anthérozoïdes, attirés par un chimiotactisme positif vis-à-vis du saccharose et d'autres molécules du mucilage archégonial, nagent jusqu'à l'archégonie et parcourent le canal du col; l'un d'eux fusionne avec l'oosphère.

✓ **Le sporophyte**

L'oeuf se développe sans phase de repos à l'intérieur de l'archégonie. Plusieurs archégonies peuvent être fécondés sur le même pied, mais un seul oeuf se développera sur chaque pied. Les mitoses successives de l'oeuf engendrent en quelques semaines une masse fusiforme qui s'accroît rapidement à ses deux extrémités. Sa pointe inférieure s'enfonce dans le sommet du gamétophyte et y forme un haustoire (suçoir) permettant l'absorption d'eau et de sels dissous. Le jeune sporophyte en croissance déchire bientôt l'archégonie : la base de celui-ci subsiste sous forme d'une petite gaine au pied du sporophyte tandis que le sommet de l'archégonie constitue la coiffe qui surmonte longtemps le sporophyte.

A maturité, le sporophyte atteint quelques centimètres de longueur. Il est constitué d'une soie capillaire portant une capsule renflée. Cette capsule est un sporange, de structure plus complexe que le sporocyste des algues. Elle comporte plusieurs assises de cellules stériles, dont l'externe est un épiderme pourvu de stomates typiques. Elle renferme un massif de cellules-mères de spores qui subissent chacune une méiose.

Les méiospores qui en sont issues s'entourent d'une paroi imperméable. A maturité, la capsule s'ouvre par un opercule apical et libère les spores qui seront dispersées par le vent. Les spores germent immédiatement si elles rencontrent des conditions d'humidité et de luminosité favorables, mais peuvent rester dormantes plusieurs mois dans le cas contraire. La germination produit un filament vert ramifié multicellulaire, le protonéma, étroitement appliqué sur le substrat, auquel il est ancré par des rhizoïdes. Le protonéma produit de place en place de courtes ramifications verticales feuillées, qui seront à l'origine d'autant de gamétophytes de seconde génération.

Chez les espèces dioïques où la détermination du sexe est haplogénotypique, c'est-à-dire due à la répartition de chromosomes sexuels à la méiose, tous les gamétophytes d'un même protonéma sont du même sexe. Au contraire, chez certaines espèces dioïques, la détermination du sexe est phénotypique de sorte qu'un même protonéma peut produire des gamétophytes des deux sexes.

En conclusion, le cycle est digénétique haplodiploïde à gamétophyte dominant. Le gamétophyte est éventuellement pérenne, effectue la photosynthèse et se fournit en eau et sels minéraux dans le milieu extérieur. Le sporophyte, éphémère, est dépourvu de feuilles et de racines et ne mène pas d'existence indépendante: il est parasite du gamétophyte.

La fécondation est une oogamie.

Les Bryophytes sont le seul embranchement de Métaphytes ayant un cycle à gamétophyte dominant. C'est aussi l'embranchement montrant les gamétanges les plus complexes et comportant le plus grand nombre de cellules.

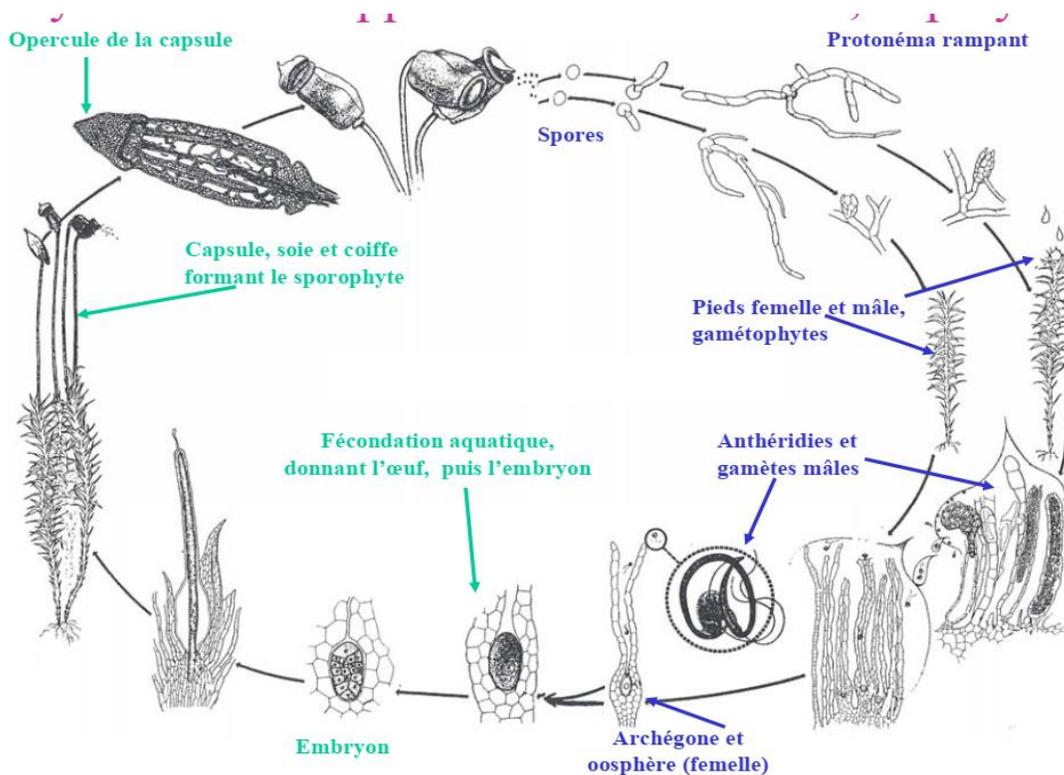


Figure 103: Cycle de développement d'une mousse, le polytric

Chapitre 4: Les Ptéridophytes

4.1.Morphologie

Par comparaison avec les Bryophytes, les Ptéridophytes (du gr. *pteris* = fougère) montrent un appareil végétatif plus différencié et adapté à la vie aérienne. Trois organes sont désormais mis en place : *feuilles* et *tiges* sont bien individualisées et des *racines*, rencontrées ici pour la première fois, permettent absorption et fixation. Ces trois organes constituent le *cormus*, c'est-à-dire l'appareil végétatif caractéristique des embryophytes.

La différenciation cellulaire aboutit à des *tissus* spécialisés et diversifiés, en particulier des *tissus conducteurs* (phloème et xylème avec éléments lignifiés typiques : les trachéides à ponctuations scalariformes) : les Ptéridophytes sont des **Plantes Vasculaires** ou **Trachéophytes**. Les tissus conducteurs assurent des corrélations à longue distance et permettent l'individualisation d'organismes de plus grandes dimensions. La lignine est un composé aromatique dont la formation résulte d'une voie métabolique nouvelle. Elle incruste certaines parois en leur donnant une dureté et une capacité de résistance accrues. Ces parois jouent le rôle d'une sorte de squelette qui permet de lutter contre la gravité et d'acquiescer un port érigé en milieu terrestre. Les tissus conducteurs sont disposés en *stèles* (*stèle* = colonne) et l'*anatomie* des organes devient très caractéristique. La morphogénèse résulte de l'activité des *cellules initiales* situées à l'extrémité des tiges et des racines.

Les différenciations affectent le sporophyte qui devient beaucoup plus développé que le gamétophyte qui, lui, est microscopique (*prothalle*). Par rapport au cycle de développement des Bryophytes, il y a donc *inversion de l'importance des phases haploïdes et diploïdes*. Les modalités de la reproduction sexuée, en revanche, restent proches des groupes précédents dans la mesure où la fécondation est encore tributaire du milieu aquatique, les spermatozoïdes ciliés et mobiles étant libérés dans le milieu extérieur. Il n'y a pas de fleur et les appareils reproducteurs restent peu apparents : les Ptéridophytes sont des **Cryptogames Vasculaires**. 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.



Figure 104 : Les Ptéridophytes

4.2. Reproduction des différents embranchements

a- multiplication asexuée

Elle se fait essentiellement par fragmentation du rhizome à croissance indéfinie. Certaines espèces ne se reproduisent que par cette méthode (ex. *Pteridium aquilinum* ou Fougère aigle).

b-Multiplication sexuée

Le cycle biologique des ptéridophytes est typiquement digénétique, diplohaplophasique avec une forte prédominance de la génération sporophytique sur la génération gamétophytique. Chez la plupart des fougères, on parle de cycle homosporé ou isosporé et d'homothallie ou isothallie (Fig.105). Dans ce cas, 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 anthéridies et les archégonies arrivent à maturité à des moments différents pour assurer une fécondation croisée.

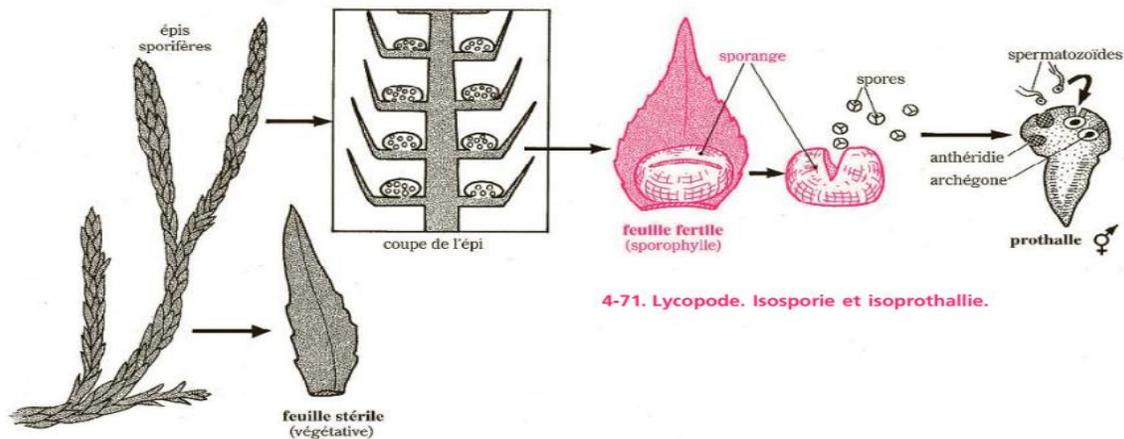


Figure 105: Lycopode. Isosporie et isoprothallie.

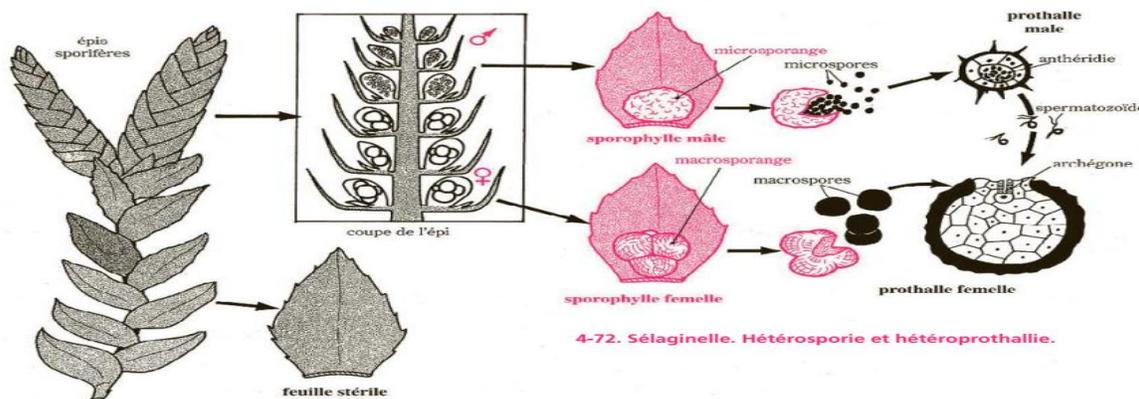


Figure 106: Sélaginelle. Hétérosporie et hétéroprothallie.

Les anthérozoïdes ciliés sont contenus dans des *anthéridies* très semblables à celles des bryophytes, mais non pédonculées. L'*oosphère* est contenue dans un *archégone*, là encore en forme de bouteille mais de structure simplifiée, par rapport aux bryophytes et dont la partie renflée, ou ventre, est enfoncée dans les tissus du prothalle. L'évolution est ici simplificatrice.

En présence d'eau, les anthérozoïdes mûrs nagent jusqu'à l'*archégone* et l'un d'eux féconde l'*osphère*.

L'œuf formé, à 2n chromosomes, se divise *immédiatement* et se transforme sur place en un *embryon*, sorte de petite fougère en miniature, composée :

- d'une ébauche de racine;
- d'une ébauche de feuille;
- d'un bourgeon qui donnera la tige;
- et d'un organe transitoire, le *ped*, qui assure sa fixation ainsi que sa nutrition *par parasitisme* du prothalle.

Lorsque la première feuille et la première racine sont devenues suffisamment grandes, la jeune fougère peut s'alimenter; elle est devenue autonome : le prothalle disparaît et la plante feuillée grandit.

Quand la plante est adulte, les feuilles les plus âgées portent des *sporanges*, presque toujours réunis en plages arrondies, réniformes ou linéaires (sores) qui sont situées généralement à leur face inférieure et protégées par une lame très mince (l'*indusie*¹) – ou simplement par le rebord de la feuille.

Les sporanges ont généralement une forme de massue avec un pédicelle et une partie renflée contenant les spores. L'ouverture du sporange se fait par un anneau de déhiscence dont les cellules sont épaissies en U; la face externe de ces cellules, restée mince, se rétracte sous l'influence de la dessiccation et fait éclater les sporanges.



Figure 107: Sores et sporange (*Polypodium vulgare* L.)

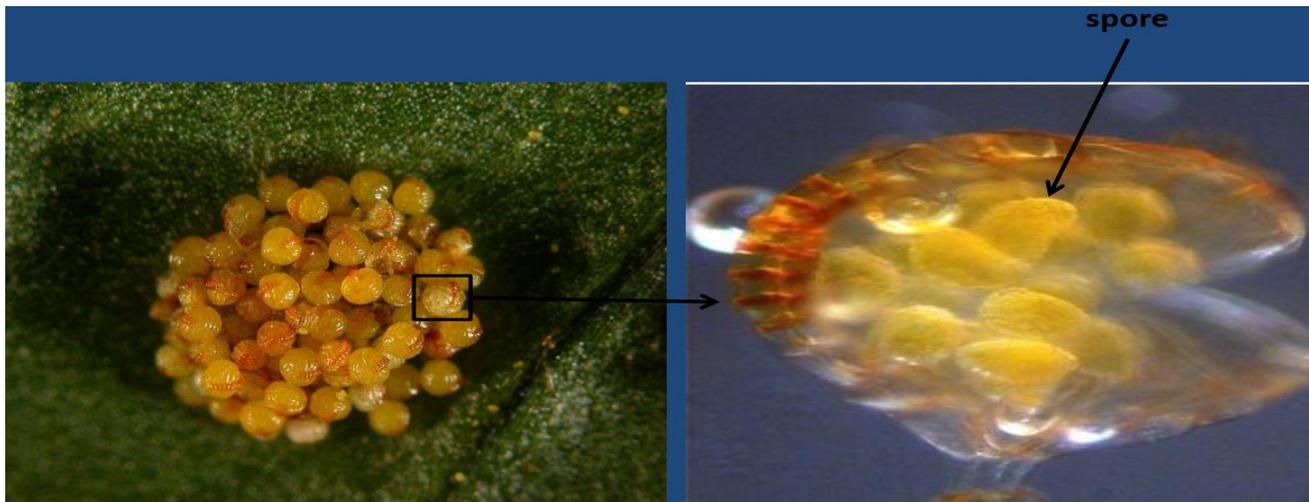


Figure 108 : Sporange et spores (*Polypodium vulgare* L.)

De très nombreuses spores – plusieurs centaines de millions – ovales ou tétraédriques s'échappent. Elles ont été formées avec réduction chromatique et ne contiennent plus que n chromosomes. Leur structure est semblable à celle des spores des bryophytes. Placées dans des conditions favorables, elles germeront à nouveau. Le « cycle vital » est fermé.

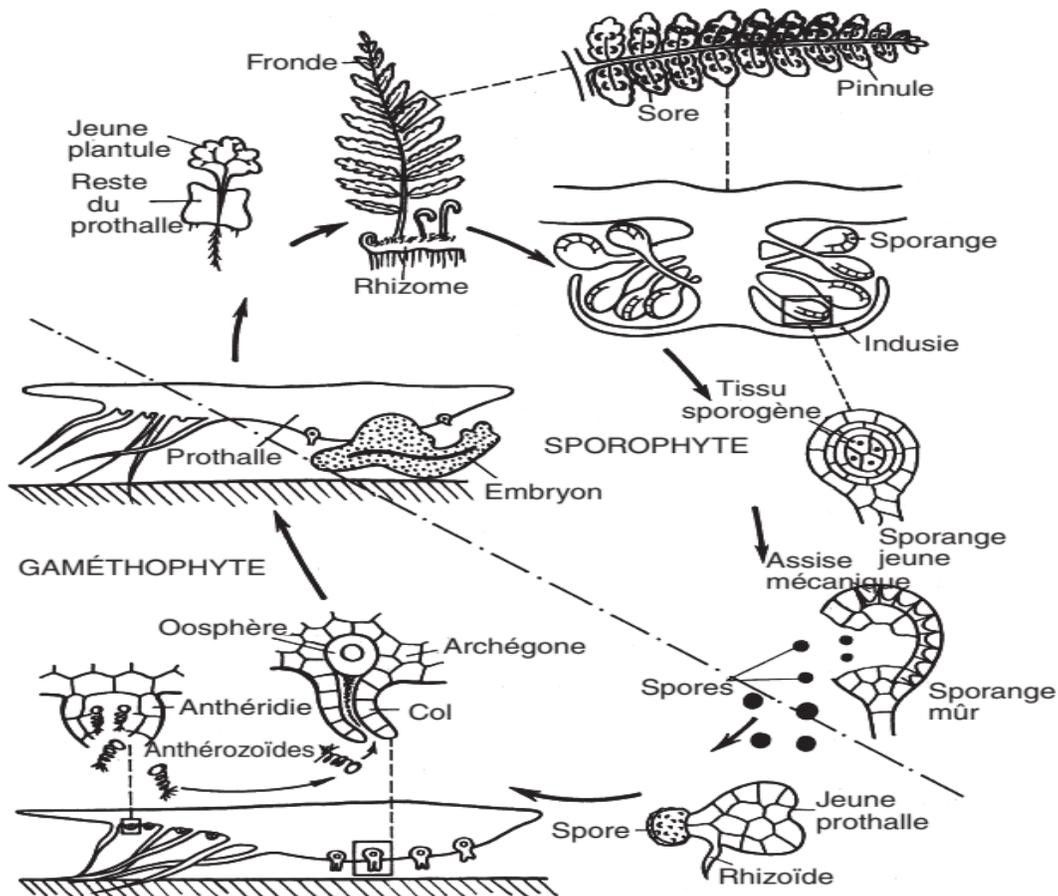
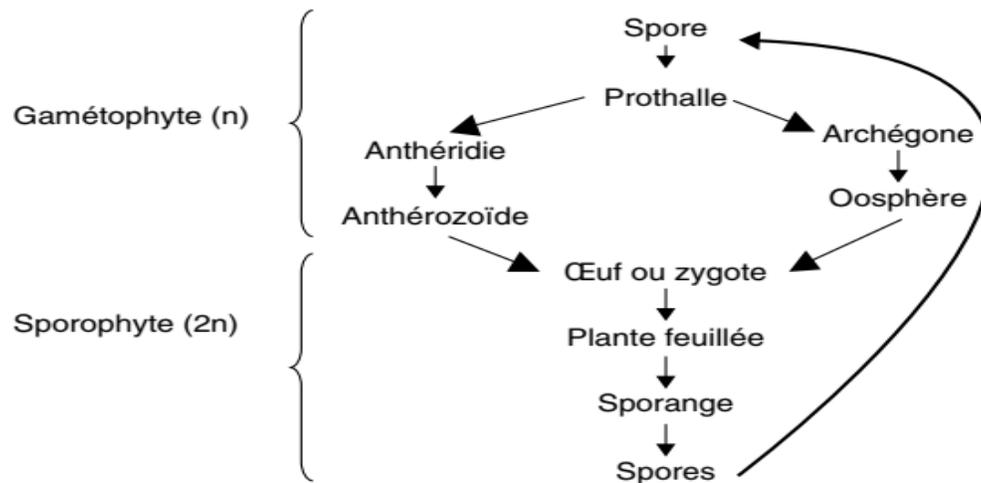


Figure 109: Cycle de développement de la Fougère mâle.

On peut le schématiser ainsi :



4.3. Variantes évolutives

Ce cycle correspond très précisément au développement des « Fougères » proprement dites telles que le Polypode, la Fougère mâle, les Scolopendres, les Capillaires.

Quelques variations, correspondant à une évolution plus avancée, se retrouvent chez les espèces alliées des Fougères.

1. La différenciation sexuelle des éléments mâles et femelles qui, dans le cycle précédent, se fait au niveau du prothalle, peut être plus précoce (fig. 110).

Chez les *Prêles*, encore appelées Queues de Cheval en raison de leurs ramifications en verticilles, 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.

Chez les *Sélaginelles*, certaines *Fougères aquatiques*, le caractère mâle et femelle du gamétophyte apparaît dès les spores (hétérosporie) et se traduit même sur la plante feuillée ou sporophyte par des sporanges morphologiquement différents :

-ainsi certains sporanges produisent des spores mâles, petites et très nombreuses : on les appelle des *microspores* et le sporange qui leur a donné naissance est un *microsporange*;

- d'autres sporanges, les *macrosporangies* donnent un petit nombre de spores de grande taille appelées *macrospores*. Il y en a généralement quatre (correspondant aux quatre cellules filles provenant d'une cellule mère avec réduction chromatique; voir la formation des tétraspores chez les Mousses aux dépens des cellules mères diploïdes), mais l'évolution tend généralement à *réduire ce nombre à un seul*.

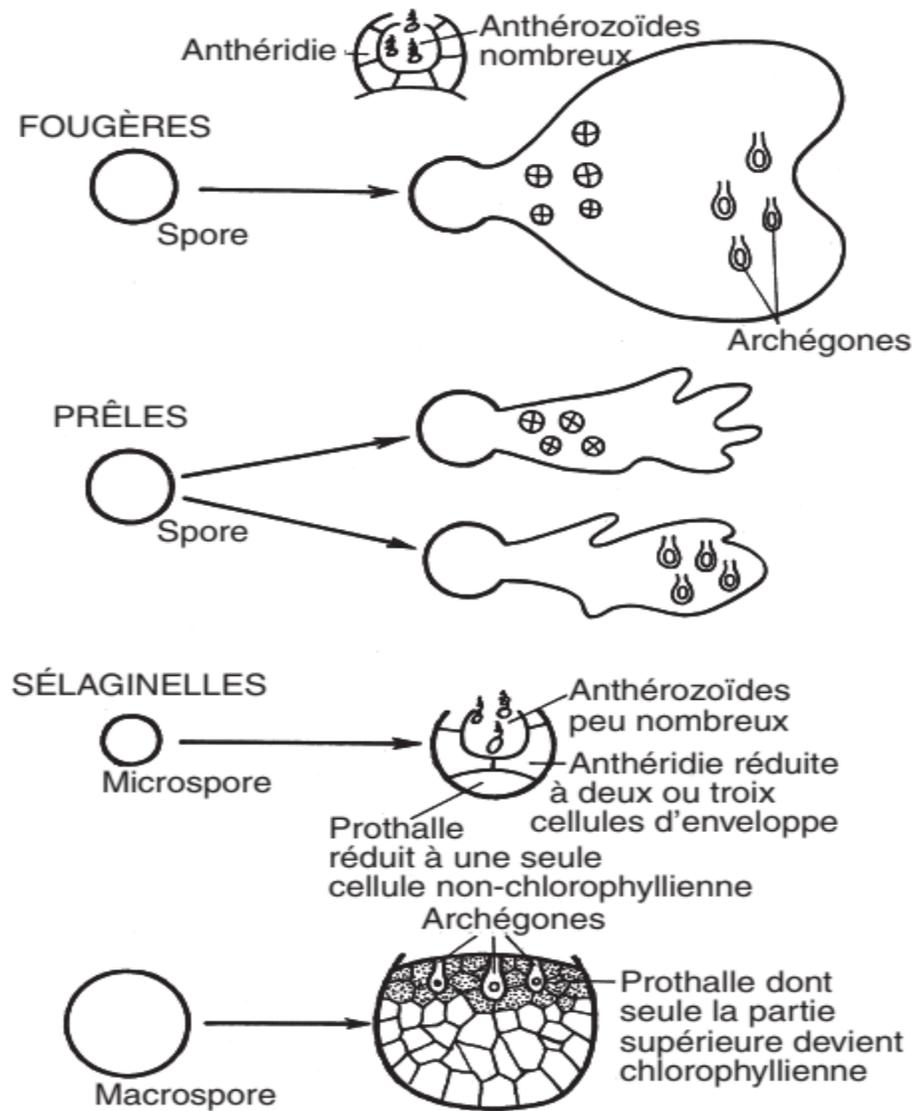


Figure 110: Réduction des prothalles chez les ptéridophytes.

On remarquera que la réduction des prothalles et la sexualisation vont de pair.

Cette sexualisation, de plus en plus précoce (fig. 111), est un *progrès*, car elle répond aux exigences différentes des spores mâles et femelles : ces dernières, qui doivent accumuler des réserves pour subvenir aux premiers besoins de l'œuf, tendent à devenir plus volumineuses, donc peu mobiles et à être produites en moins grand nombre.

Inversement, les spores mâles, produites en grand nombre, petites et très légères, faciles à entraîner par le vent, atteindront des spores femelles. Cette sexualisation permet en outre un *brassage* des gènes : chez les espèces dont les prothalles sont unisexués, les possibilités sont moindres pour que s'unissent un anthérozoïde et une oosphère provenant d'un même parent, donc génétiquement semblables.

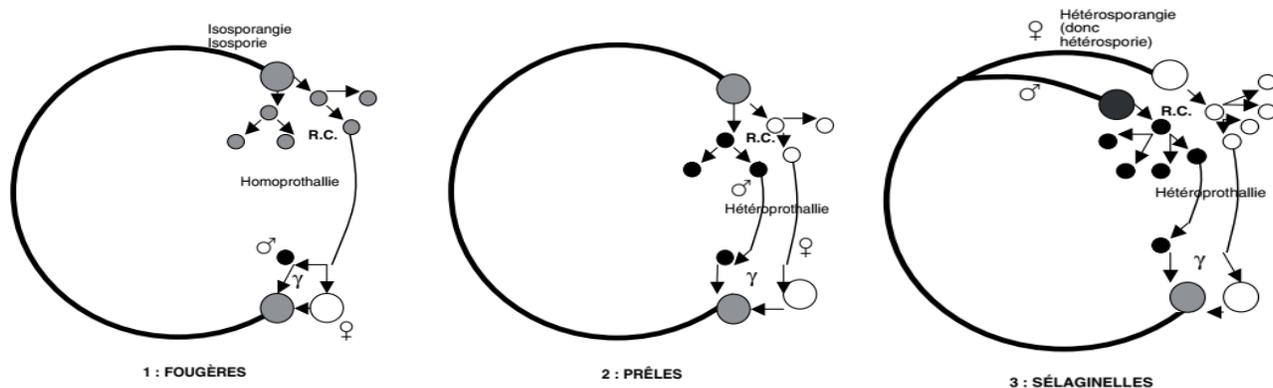


Figure 111 : Évolution de la sexuation chez les ptéridophytes.

En 1, cas des Fougères : sexuation tardive, par apparition d'anthéridies et d'archégonies 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 microsporangie – R.C., méiose; traits gras : phase sporophytique, traits fins : phase gamétophytique, γ : gamètes.

2. Une deuxième tendance évolutive consiste en la spécialisation des feuilles portant les sporanges.

Chez les Fougères proprement dites, ce sont les feuilles normales, assimilatrices, qui portent sur leurs faces inférieures les sporanges. Chez leurs alliées, les Lycopodes, Sélaginelles, Prêles, des *feuilles particulières* apparaissent dont le seul rôle, sexuel, est de porter les éléments reproducteurs. Elles se *groupent* alors et forment des *épis sporangifères*.

3. Une troisième tendance évolutive, particulièrement remarquable parce qu'elle s'amplifiera chez les Spermaphytes, consiste en une *réduction progressive des prothalles* qui restent alors *inclus* dans la paroi éclatée de la spore.

Ainsi, chez les *Sélaginelles*, certaines Fougères aquatiques, la microspore ne contient plus à maturité qu'une cellule prothallienne, deux ou trois cellules d'enveloppe – vestige de l'anthéridie très dégradée – et un petit nombre d'anthérozoïdes; la macrospore contient un prothalle réduit à un petit massif cellulaire : la partie qui, après éclatement de la spore est en contact de l'atmosphère, *verdit* et porte quelques archégonies dont un seul se développera.

Chez quelques espèces de Sélaginelles *dites vivipares*, il arrive que les prothalles se développent sur la plante mère, à l'intérieur de l'épi sporangifère, donnant naissance à de jeunes embryons qui tombent et s'enracinent. Si l'on suppose que l'embryon, au lieu d'être disséminé, « *s'enkyste* » en s'entourant de réserves et d'un tégument protecteur, nous aurions ce que l'on appelle la graine (voir p. 41 et 42) chez les plantes supérieures.

D'un point de vue plus général, on observe, chez les Fougères, un *asynchronisme marqué* entre l'évolution de l'appareil végétatif et celui de l'appareil reproducteur. Les Fougères proprement dites

sont caractérisées par une faible évolution de l'appareil reproducteur à peu près limitée, si l'on excepte le taxon très particulier des Fougères aquatiques, à la spécialisation des feuilles (sporocarpes) portant les sporanges : regroupement des sporanges en *sores*, protection des sores par une *indusies*, apparition de *frondes spécialisées* chez quelques espèces...; par contre, l'appareil végétatif est très diversifié et montre de nombreux caractères évolués : fronde de grande taille, tendance à la latéralisation des ramifications, appareil vasculaire de structure moderne.

Chez les Lycopodes, Sélaginelles et Prêles l'inverse s'observe : appareil végétatif archaïque, appareil reproducteur évolué, marqué par une forte différenciation sexuelle et une nette tendance à la réduction des prothalles.

Nous en retiendrons que le degré d'évolution des divers organes et appareils d'un taxon peut être, pour chacun d'eux, très différent.

4.5. Classification des Ptéridophytes

Les Ptéridophytes sont classées en quatre sous-divisions de plantes actuelles :

- Les équisétophytes (Equisetophyta) /sphénophytes (Sphenophyta) (ex: les prêles)
- Les filicophytes (Filicophyta) /polypodiophytes (Polypodiophyta)(ex: les fougères)
- Les lycopodiophytes (Lycopodiophyta)(ex: les lycopodes)
- Les psilophytes (Psilophyta)(ex: les psilotums)

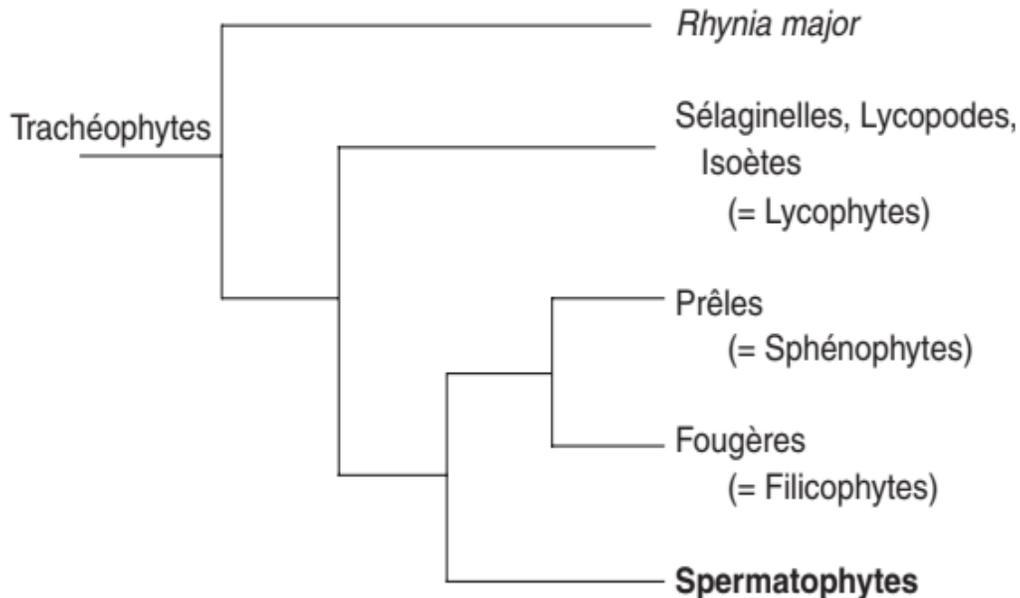


Figure 112:Cladogramme des ptéridophytes.

Ce cladogramme repose surtout sur des données moléculaires, les données morphologiques (par exemple, microphylls ou mégaphylles) n'apparaissant pas discriminantes. Les ptéridophytes forment un ensemble paraphylétique.

Tableau 9: Les principaux groupes de ptéridophytes.

	Lycophytes	Sphénophytes	Filicophytes
Types de plantes	Terrestres, épiphytes ou aquatiques de quelques cm	terrestres de quelques cm à >1 m	terrestres parfois épiphytes ou aquatiques de quelques cm à plusieurs mètres.
Tige	Ramification dichotomique	articulée souvent à rameaux verticillés.	Tiges généralement souterraines, horizontales et longuement rampantes (= rhizomes).
Feuilles	Microphylls.	Microphylls écailleuses verticillés	frondes développées (macrophylls ou mégaphylls), entières ou diversement divisées, enroulées en crosse en jeune âge
Sporanges	Portés isolément Sur la face supérieure des sporophylls	Portés par les sporangiophores formant l'épi sporifère ou strobile.	Sporanges sur la face inférieure des sporophylls généralement regroupés le long des nervures en sores recouverts, par une fine membrane (indusie).
Spores	Isosporie ou hétérosporie	Isosporie mais hétéroprothallie.	Isosporie ou hétérosporie
Familles	Lycopodiaceae Selaginellaceae, Isoetaceae	Equisetaceae	Polypodiaceae, Marsileaceae Osmondaceae, Dicksoniaceae, etc.

4.5.1. Lycophytes

Les Lycophytes, avec les Sphenopsida, étaient les groupes dominants dans la forêt du Carbonifère. Les espèces actuelles sont herbacées. En Europe, les Lycopodes et les Sélaginelles comptent une vingtaine d'espèces, toutes rares et en régression.

L'intérêt principal de ce groupe réside dans le fait que les Sélaginelles sont les seules fougères montrant deux caractères évolués qui préfigurent les Spermatophytes : l'hétérosporie et l'endoprothallie. Pour cette raison, ce groupe illustre une transition évolutive majeure au sein des plantes vasculaires.

Bien que ne possédant pas de vraies racines, on suppose que c'est dans cette classe que se trouvent les ancêtres des plantes à fleurs. 3 ordres ;

* Lycopodiales

Ce sont des Plantes isosporées, jadis plus diversifié, remontant au Carbonifère et ne comptant plus aujourd'hui que 2 genres dont le plus important est *Lycopodium*.

* Selaginellales

Remontant au Carbonifère, représenté actuellement par le genre *Selaginella* qui est hétérosporé et supposées être à la source des végétaux actuels.

* Lepidodendrales

Arbres fossiles hétérosporés atteignant 30 m de haut, apparus au Dévonien et disparus au Permien avec un maximum d'extension au Carbonifère supérieur. 2 genres principaux : *Lepidodendron* et *Sigillaria*. Les feuilles sont simples, étroites, ligulées et caduques.



Figure 113: *Lycopode en massue.*

À droite, port; à gauche, feuille isolée de l'épi sporangifère, esp, portant le sporange à sa face supérieure (f, fente transversal de déhiscence); en haut, à gauche, spore tétraédrique vue sous deux angles, l'un permettant de voir une face plane unique, l'autre, les trois autres faces de plus petite taille formant une pyramide.

- Cycle d'un Lycopodophyte hétérosporé : *Selaginella spinulosa*
- ✓ Le sporophyte

L'extrémité de certains axes végétatifs se différencie en un épi sporifère. Dans ces épis, les feuilles, ou sporophylles, sont plus rapprochées les unes des autres que les feuilles végétatives et chacune porte sur sa face adaxiale (supérieure) un sporange. Il existe deux types de sporanges différant par la taille et le nombre des spores qu'ils produisent.

A la base de l'épi, les sporophylles (mégasporophylles) portent des mégasporanges. Un mégasporange, outre son assise de cellules stériles, ne contient qu'une seule cellule-mère de spores et ne produit par conséquent que quatre mégasporangies de grande dimension ($\pm 250 \mu\text{m}$ de diamètre). Les feuilles de la partie supérieure de l'épi sporifère, ou microsporophylles, portent chacune un microsporange qui produit plusieurs dizaines de microspores ($\pm 30 \mu\text{m}$ de diamètre). Comme chez les Filicophytes, les spores sont dispersées après déchirure des sporanges grâce à un anneau mécanique.

(N.B. Chez un petit nombre d'espèces, néanmoins, les mégasporangies ne quittent pas les sporanges; cette situation exceptionnelle préfigure celle qui est de règle chez les Spermatophytes).



Figure 114 : Sélaginelle (*Selaginella* sp.).

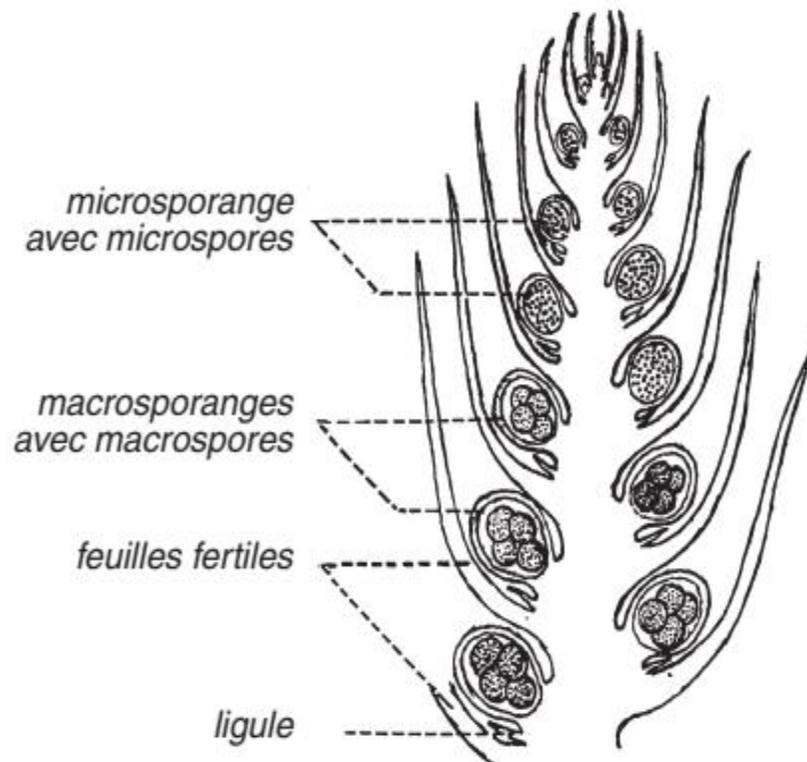


Figure 115: Coupe longitudinale d'un épi fertile (Sélaginelle.).

✓ V.1.2. Les gametophytes

* Gamétophyte male

Les mitoses successives du noyau de la microspore aboutissent à la formation d'un minuscule prothalle inclus dans la paroi sporique. Ce prothalle est réduit à une cellule végétative supportant une seule anthéridie constituée de 8 cellules stériles entourant 4 cellules spermatogènes. A maturité, ces dernières se différencient en un grand nombre d'anthérozoïdes biflagellés. Ainsi, ce gamétophyte mâle qui se développe exclusivement aux dépens des réserves contenues dans le cytoplasme de la microspore et reste contenu dans la paroi de celle-ci est dit endosporique; cette situation est appelée endoprothallie, par opposition l'exoprothallie de règle chez les Filicophytes.

* Gamétophyte femelle

Les mitoses successives du noyau de la mégaspore génèrent d'abord un prothalle cénocytique qui ne tarde pas à se cellulariser à partir du pôle aperturé (= percé d'un pore germinatif) de la mégaspore. A cet endroit se différencient des rhizoïdes qui font saillie hors de la mégaspore et des archégonies à col très court. Les cellules du prothalle voisines de l'aperture sporique sont chlorophylliennes, mais celles du pôle opposé du prothalle femelle, non pigmentées, constituent un tissu nourricier riche en amidon, qu'utilisera le sporophyte de deuxième génération. Ce gamétophyte femelle tout entier inclus dans la paroi sporique (sauf ses rhizoïdes) est dit endosporique.

Les modalités de la fécondation et du développement du zygote sont semblables à celles des Filicophytes.

Le cycle est digénétique haplodiploïde à sporophyte dominant. Les deux différences essentielles par rapport aux Filicophytes sont l'hétéroprothallie (différenciation de 2 catégories de prothalles de sexe opposé et de morphologie très contrastée) et l'endoprothallie. Les gamétophytes ne sont plus photosynthétiques et leur développement dépend entièrement des réserves accumulées dans les spores. Leur structure s'est encore simplifiée par rapport à celle des Filicophytes.

Chez le gamétophyte femelle, une partie de ces réserves sert encore à subvenir aux besoins du jeune sporophyte de deuxième génération, avant qu'il n'élabore des feuilles et des racines fonctionnelles. A ce titre, les Sélaginelles marquent une étape importante dans la spécialisation sexuelle des gamétophytes et de la réduction de l'haplophase chez les Métaphytes.

4.5.2. Sphenophytes (= Equisétinées) Les Prêles

C'est, comme la précédente, une classe qui a eu une grande extension dans le passé et dont il reste des vestiges fossiles nombreux. Actuellement il ne subsiste qu'un seul genre *Equisetum* (*equus* = cheval, *seta* = crin) ou Prêle.

La prêle des champs (*Equisetum arvense*) très commune dans les endroits ombragés et humides en fournit le type. Elle présente un rhizome souterrain vivace qui chaque année produit des tiges dressées de deux types, les unes stériles, les autres fertiles. Les *tiges stériles* sont vertes et assimilatrices. Elles sont constituées par une suite d'articles cannelés unis au niveau de nœuds où s'insère une collerette de

courtes feuilles. Des verticilles de rameaux secondaires prennent naissance à chaque nœud ; ils donnent à ces pousses végétatives un aspect touffu qui justifie le nom de « queue de cheval » souvent utilisé pour désigner les prêles.

La comparaison avec le crin est renforcée par le contact rugueux des tiges, dû à la présence de dépôts de silice (opale) à la surface des parois de l'épiderme (le nom prêle est une déformation de asprêle, venant de *asper* = âpre, rude au toucher). La présence de granules durs de silice explique que pendant longtemps les tiges réduites en poudre aient été utilisées pour le polissage des bois et des métaux. Les *tiges fertiles* ne sont pas chlorophylliennes et n'ont pas de rameaux secondaires. Elles portent à leur extrémité un épi sporifère constitué par la juxtaposition d'écussons hexagonaux sous lesquels se trouvent les sporanges.

Les prêles produisent des spores toutes semblables morphologiquement mais potentiellement sexuées car elles germent d'ordinaire en prothalles soit mâles, soit femelles.



Figure 116 : Prêle des champs. Sporophyte

4.47 et 4.46. Tiges stériles à deux stades successifs

4.47. Tige fertile. e, écusson à sporanges; vf, verticille de feuilles non chlorophylliennes

4.5.3. Filicophytes

Ce sont les fougères. Ce sont des plantes macrophytes à tiges réduites; les feuilles sont organisées en fronde, Feuilles consistant en frondes, c'est-à-dire enroulées en crosse dans leur jeune âge, souvent de grandes dimensions et profondément découpées, portant, souvent à la face inférieure, des sporanges groupés en sores. Beaucoup d'espèces sont arborescentes.

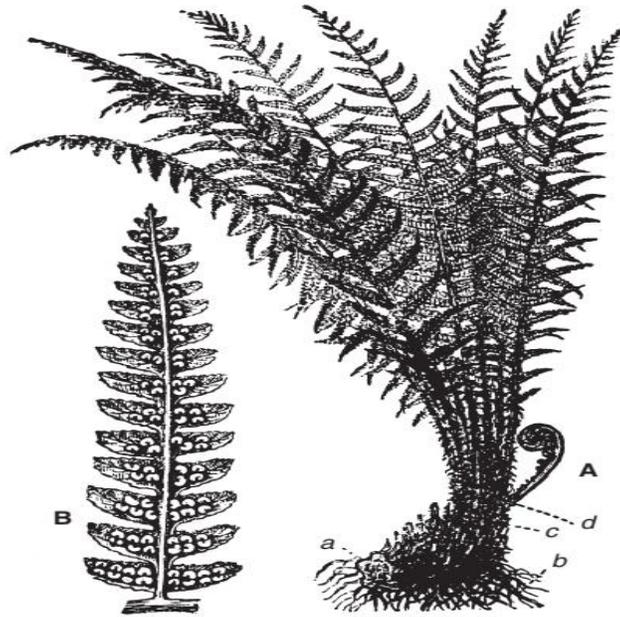


Figure 117: Fougère mâle.

A : aspect général de cette espèce (a, rhizome coupé transversalement; b, racines; c, base des feuilles, d, jeune fronde encore enroulée en crosse).

B : face inférieure d'une penne, portant des indusies réniformes recouvrant les sores.



Figure 118 : Fougère aigle (*Pteris aquilinum*)).

4-1. Fronde en sous-bois.

- **Cycle de reproduction de *Polypodium vulgare***

Dans le langage courant, le terme "Fougère" ne désigne en réalité que la phase diploïde, sporophytique, du cycle de reproduction. La phase haploïde du cycle est représentée par un organisme de très petite taille qui passe le plus souvent inaperçu: le prothalle.

* Le sporophyte

Un pied de Polypode comprend une tige souterraine (le rhizome), vascularisée (c'est-à-dire comportant des cellules spécialisées dans la conduction de la sève brute, les trachéïdes), produisant des frondes (feuilles) pennatiséquées et des racines. Il s'agit donc d'un CORMUS typique, plus complexe que l'appareil végétatif des Bryophytes. Vers la fin du printemps, des sporanges groupés en sores, apparaissent à la face inférieure des frondes. Chez beaucoup de fougères, mais pas le Polypode, chaque sore est protégé par une écaille, l'indusie.

Chaque sporange est pédicellé et comprend 16 cellules mères de spores enveloppées dans une assise protectrice de cellules stériles. Celle-ci est munie d'un anneau mécanique constitué d'une file de cellules à faces interne et latérales épaissies. Lorsque le sporange est mûr et que survient une période de sécheresse, la déshydratation des cellules de l'anneau mécanique entraîne une dépression de la paroi externe; cette déformation tend à raccourcir le bord convexe de l'anneau mécanique et, par conséquent, à redresser celui-ci vers l'extérieur du sporange. La tension qui en résulte provoque la déhiscence brutale du sporange et l'expulsion des 64 spores ($\pm 20\mu\text{m}$) anémochores.

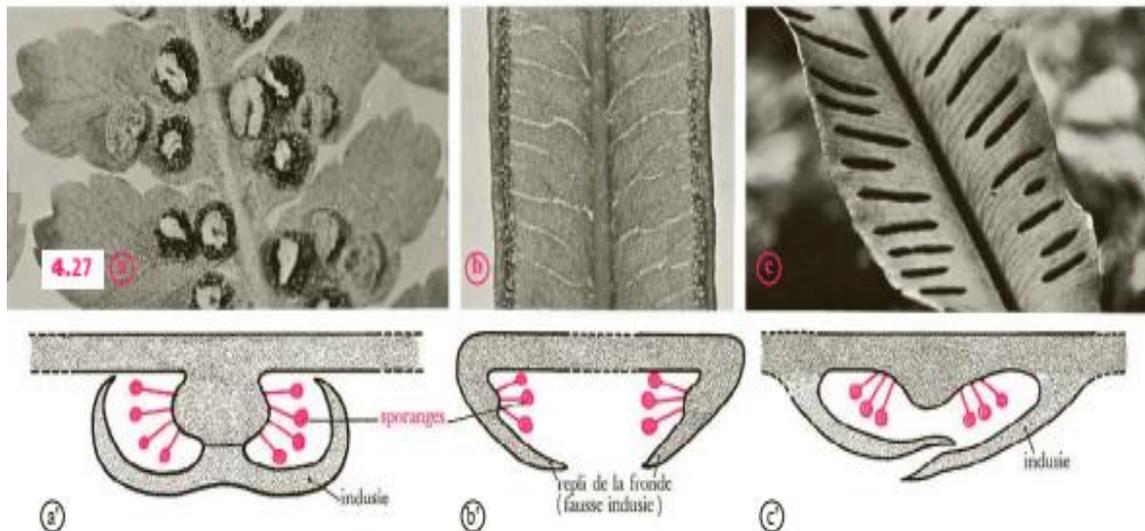


Figure 119: Différents types de protection des sporanges.

a et a'. indusie en forme de rein couvrant les sores de sporanges (fougère mâle) ; b et b'. repli marginal de la fronde ou fausseindusie (Pteris) ; c et c'. membrane latérale (scolopendre)

* Le gametophyte

La germination de la spore produit d'abord un filament puis un thalle chlorophyllien rudimentaire en forme de lamelle unistrate au bord et pluristrate au niveau d'un coussinet médian. Ce prothalle en forme de cœur porte sur sa face inférieure des anthéridies et des archégonies respectivement dans sa partie postérieure et antérieure, ainsi que de nombreux rhizoïdes. Les anthéridies, sessiles et subsphériques produisent chacune 32 anthérozoïdes hélicoïdaux multiciliés. Les archégonies ne comportent plus que 5 à 7 étages de cellules du col; leur ventre est incorporé dans la masse du prothalle.

Les modalités de la fécondation sont les mêmes que chez les Bryophytes. Le zygote entre en mitose immédiatement et différencie rapidement un pied, qui assure durant quelques jours sa nutrition aux dépens du prothalle, une jeune feuille primordiale et une jeune racine. Quand ces dernières ont acquis un développement suffisant, le jeune sporophyte de seconde génération mène une vie autonome et le prothalle ne tarde pas à mourir.

Le cycle est digénétique haplo-diploïde. Le gamétophyte présente une taille beaucoup plus réduite que le sporophyte et sa durée de vie est beaucoup plus courte. Seul le sporophyte a la structure d'un cornus typique et possède des vaisseaux conducteurs. Le sporophyte est donc la phase dominante du cycle. Il n'est parasite du gamétophyte que de façon transitoire.

Par rapport aux Bryophytes, le gamétophyte manifeste une tendance à la simplification, particulièrement sensible chez les gamétanges, dont le nombre de cellules est beaucoup plus limité.

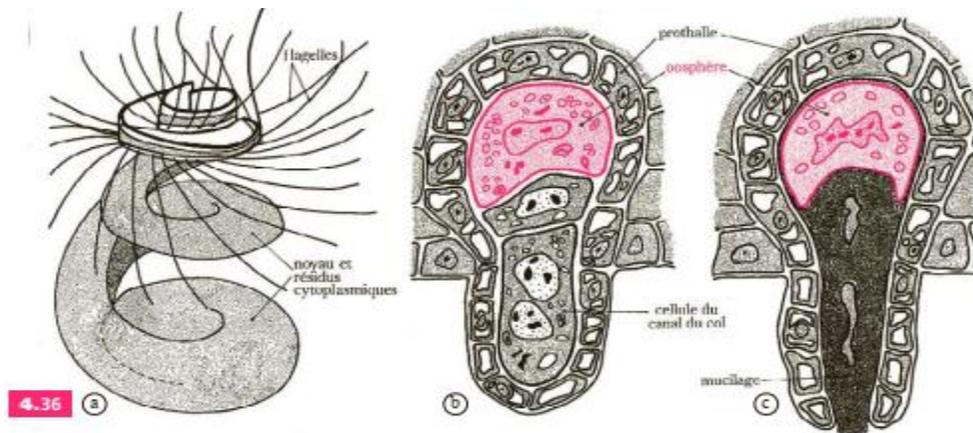


Figure 120 : Gamètes de fougères

a. Spermatozoïde multiflagellé, b. Archégone jeune, c. Archégone mur. Canal ouvert par fonte des cellules axiales

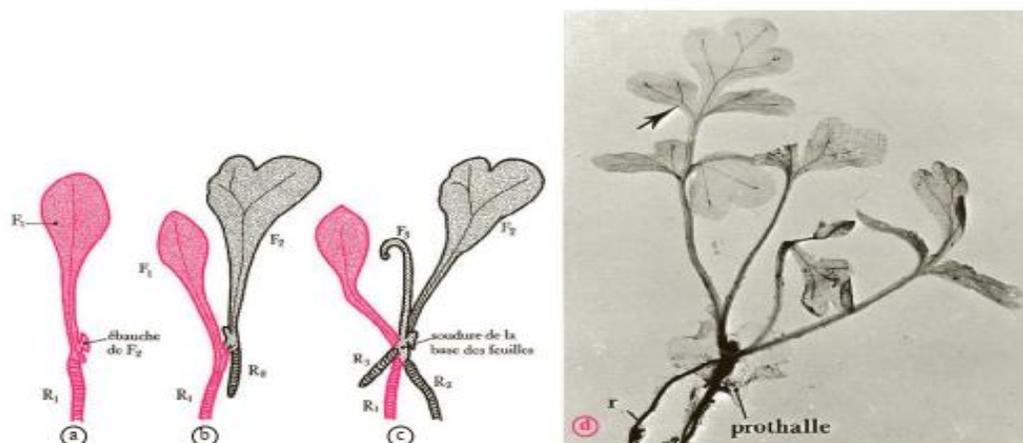


Figure 121: Début du développement du sporophyte sur le prothalle.

a à c. Schémas d'interprétation montrant la coalescence d'unités successives et la formation de la tige par soudure de la base des feuilles. F, feuille ; R, racine.

d. Stade à 4 feuilles. Remarquer la nervation dichotomique (flèche). r, racines. (× 3).

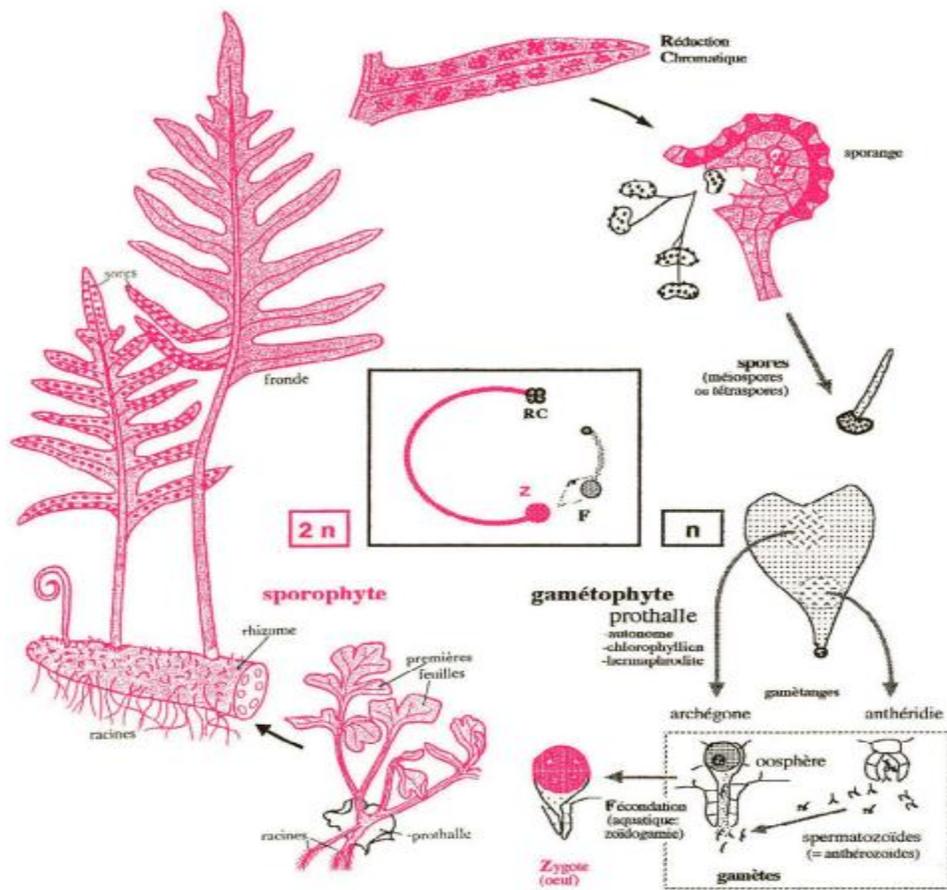


Figure 122: Cycle de développement du polypode. Fougère isosporée

Chapitre 5: Les Gymnospermes sensu lato

Les Spermatophytes (du grec *sperma*, graine) comprennent les végétaux les plus perfectionnés : les plantes à graines. 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*.

5.1. Caractères généraux des Spermatophytes

✓ Grain de pollen

Le grain de pollen *est à lui seul le gamétophyte mâle*. De façon à permettre un transfert facile – ou *pollinisation* – des organes mâles aux organes femelles, par le vent et, plus tard, par les insectes, sa taille est forcément réduite. Il en résulte que le gamétophyte mâle, miniaturisé, est réduit à quelques cellules prothalliennes et seulement à *deux anthérozoïdes*. *Les microsporanges sont désormais appelés sacs polliniques* et les microsporophylles prennent le nom d'*étamines*.

✓ Ovule

À l'ensemble formé par le *microsporange* [devenu indéhiscent et plus ou moins entouré d'écaille(s) ou feuille(s) protectrice(s)] et par la *macrospore prothallisée* on donne le nom d'ovule (du latin *ovum*, œuf)

✓ Graine

L'ensemble macrosporange-macrospore prothallisée-jeune embryon, on donne le nom de *graine*. La graine résulte de la transformation de l'ovule après la fécondation : les téguments ovulaires se lignifient, l'oosphère fécondée donne le zygote, puis un embryon qui se développe aux dépens des réserves accumulées dans le prothalle.

Excepté quelques spermatophytes primitifs (Cycas, Ginkgo...) chez lesquels le développement de l'embryon se fait dans l'ovule fécondé tombé à terre (oviparie), celui-ci se réalise au sein d'un ovule resté sur la plante mère (viviparie). D'ailleurs, chez les Angiospermes, les réserves destinées à la nourriture de l'embryon ne sont mises en place qu'*après* la fécondation, ce qui ne peut se faire que si l'ovule reste sur la plante.

✓ Pollinisation et fécondation

Transportés par le vent (*pollinisation anémophile*, du grec *anemos*, vent et *philos*, ami), les grains de pollen, sont retenus au niveau de l'ovule par des sécrétions collantes et sucrées provenant de la sève

élaborée. Cette nouvelle source de nourriture est à l'origine du transport par les insectes, qui deviendra prépondérant chez les Angiospermes. Par exemple, parallèlement au transport par le vent, des charançons qui vivent sur les cônes mâles des Cycadales visitent les cônes femelles à la recherche des sécrétions et véhiculent du pollen.

Les grains de pollen germent au sommet du micropyle en donnant un tube pollinique qui s'y enracine, puis libère les anthérozoïdes encore ciliés qui gagnent les oosphères à travers les tissus plus ou moins liquéfiés surmontant le gamétophyte (fig. 125). Il y a là un progrès fondamental: la fécondation s'est *affranchie de l'eau extérieure* et peut se réaliser en période de relative sécheresse.

Ce n'est que chez les clades les plus évolués, les Pinophytes, les Gnétophytes et les Angiospermes que se réalisent de véritables *tubes polliniques* conduisant les anthérozoïdes – désormais *dépourvus de cils locomoteurs* et appelés *gamètes* directement aux oosphères. Toutefois, il est vraisemblable que le tube pollinique des Pinophytes-Gnétophytes ne soit pas homologue de celui des Angiospermes.

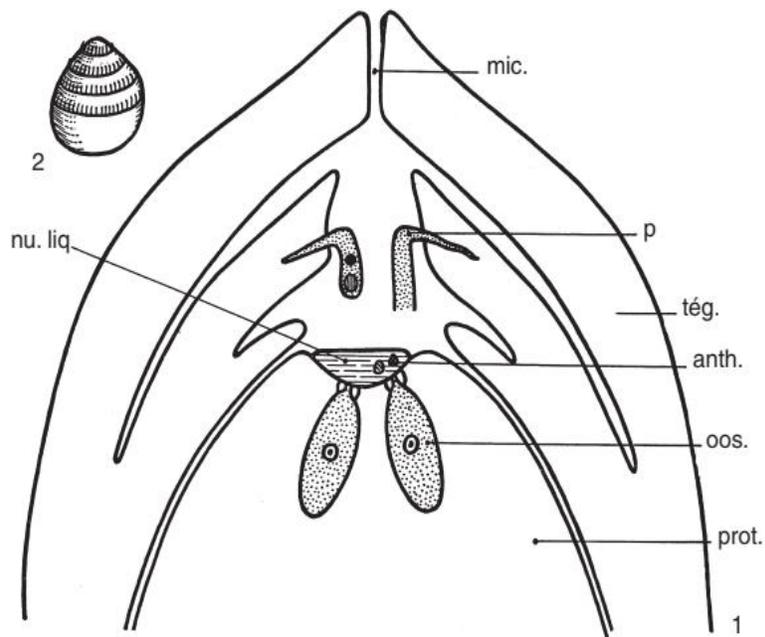


Figure 123: Fécondation chez les Cycadales.

En 1, schéma général; mic, micropyle; p, grains de pollen germés « enracinés » dans le nucelle du sporange; anth, anthérozoïdes; oos, oosphère; prot, prothalle (endosperme); nu. liq., nucelle liquéfié. – En 2, anthérozoïde grossi montrant la couronne de cils. En réalité, chez les Cycas et le Ginkgo, les cils ne sont plus fonctionnels : les anthérozoïdes ne « nagent » pas dans le nucelle liquéfié, mais descendent par gravité. Comme plusieurs grains de pollen germent, il se trouve toujours un anthérozoïde pour tomber à l'aplomb de l'une des oosphères.

✓ **Groupement des feuilles sporangifères, notion de fleur**

Les feuilles sporangifères mâles et femelles sont réunies en ensembles bien individualisés, épis, cônes, dans lesquels certains voient – au moins pour le cône mâle – une véritable fleur. Chez les Angiospermes, la fleur sera habituellement protégée par une enveloppe spécialisée, le périanthe

✓ **Appareil végétative**

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); 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.

5.2. Les Gymnospermes sensu lato

Caractères généraux

Les Gymnospermes (du grec *gymnos*, nu et *sperma*, graine) ont des *ovules* nus, portés par une écaille plane dite *ovulifère* ou *séminale*; les grains de pollen, véhiculés par le vent, atteignent le micropyle et germent au sommet du nucelle. Dans la graine, le tissu de réserve est représenté par le prothalle femelle ou *endosperme*, formé *avant* la fécondation. L'embryon *dicotylé* peut devenir *secondairement* polycotylé chez certaines espèces, (par exemple on compte jusqu'à 15 cotylédons chez le Pin parasol).

Les Gymnospermes sont toutes *ligneuses*, à cycle de développement s'étalant sur plusieurs années. Leur longévité peut être élevée; le Pin longue-vie (*Pinus longaeva*) vit plus de 4 000 ans. On distingue des Gymnospermes archaïques, les Cycadophytes et Ginkgophytes, des Gymnospermes types, les Conifères ou Pinophytes et trois genres surévolus, Ephédre, Gnétum et Welwitschia, réunis dans un clade, les Gnétophytes (fig. 124).

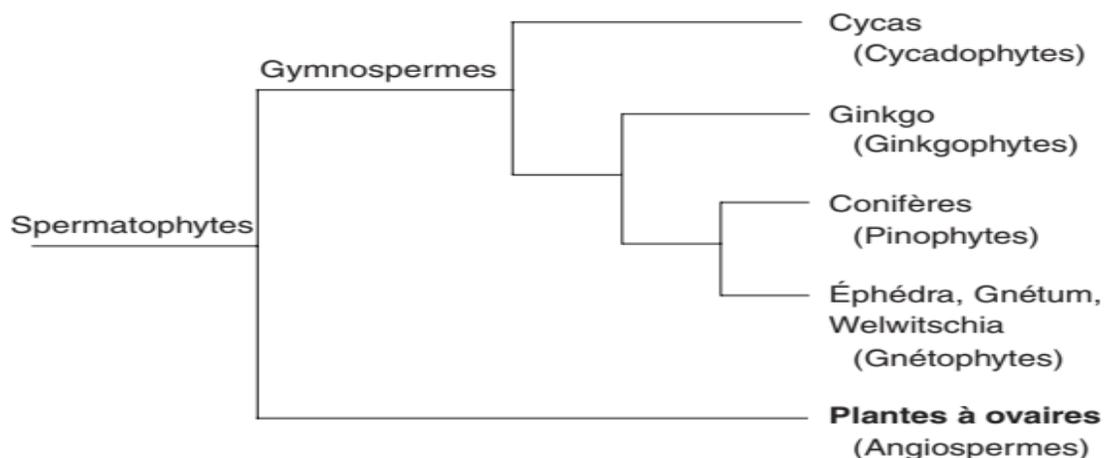


Figure 124: Cladogramme des Gymnospermes.

Les Gnétophytes, d'abord considérées comme un clade-frère des Angiospermes, sont rapprochées des Pinophytes.

5.2.1. Les Cycadophytes: notion d'ovule

Les Cycadophytes rappellent les palmiers et se rencontrent principalement dans les régions tropicales et subtropicales. Elles sont apparues il y a au moins 250 millions d'années, au permien. La plupart des Cycadales sont des plantes d'assez grande taille (jusque 18m de hauteur). Les structures reproductrices des cycadales sont des feuilles plus ou moins réduites portant des sporanges, lâchement ou étroitement réunies en sorte de cônes aux environs de l'apex de la plante. Avant la fécondation, la portion basale du gamétophyte mâle se dilate et s'allonge, amenant les anthérozoïdes au voisinage des oosphères. Cette portion se rompt ensuite et les anthérozoïdes multiciliés libérés nagent vers les oosphères.

- **Le genre *Cycas***

D'origine tropicale, les cycas sont souvent cultivés comme plantes ornementales en serre ou en pleine terre dans le sud (Côte d'Azur, où on les prend parfois pour de jeunes palmiers).

Il existe des pieds mâles et des pieds femelles distincts : ce sont des sporophytes. Le cycle comporte bien une phase gamétophytique mais elle est encore plus réduite que celle des Ptéridophytes hétérosporées type sélaginelle. Le prothalle Y constitue un massif cellulaire haploïde restant inclus ou endosperme (phénomène d'endoprothallie). Dans celui-ci se différencient, sur place, des archégonies avec chacun un très gros oosphère (visible à l'œil nu). Endosperme et nucelle sont protégés par de forts téguments et l'ensemble constitue un ovule. Les macrosporophylles sont des organes désormais entièrement spécialisés dans la reproduction femelle et auxquels on donne le nom de carpelles. Les cônes mâles sont des groupes de microsporophylles qui produisent des microspores ou grains de pollen dont le contenu haploïde est à l'origine du gamétophyte mâle.



Figure 125 : Cycas revoluta

Plusieurs faits essentiels caractérisent le mode de fécondation :

1. dans le nucelle s'est formée, par résorption cellulaire locale, une chambre pollinique qui se remplit de liquide ;
2. l'ovule est volumineux car endosperme et oosphères se sont chargés de réserves avant et indépendamment de la fécondation ;
3. chaque gamétophyte σ , très réduit, produit deux spermatozoïdes flagellés qui nagent dans la chambre pollinique vers les oosphères. Malgré la situation aérienne de l'ovule, grâce à cette « micropiscine » la fécondation reste typiquement aquatique (zoïdogamie) ;
4. l'embryon peut se développer dans des ovules détachés de la plante-mère ; il n'y a pas nécessairement de relation trophique ou hormonale entre sporophyte et embryon comme dans une graine authentique. Il n'y a pas non plus de forte déshydratation finale ni d'entrée en vie ralentie. L'ovule est donc une prégraine dont le développement illustre bien un phénomène d'oviparité.

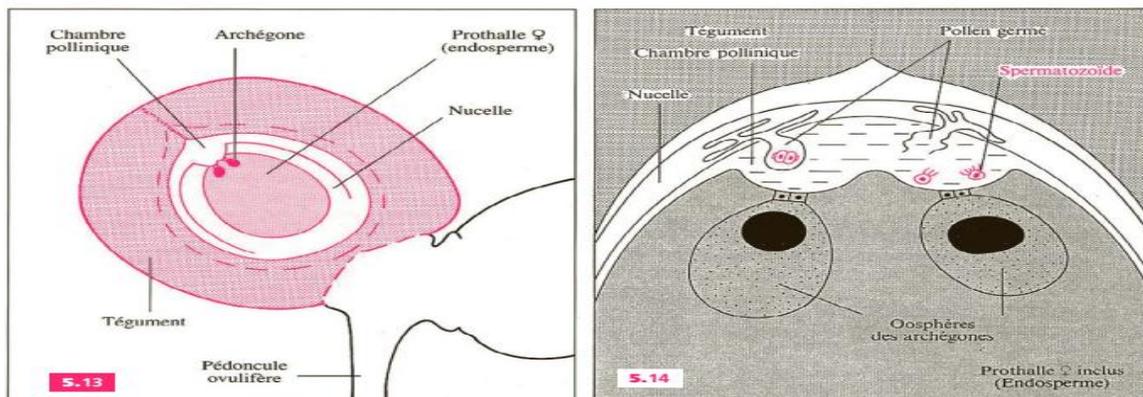


Figure 126: Organisation de l'ovule.

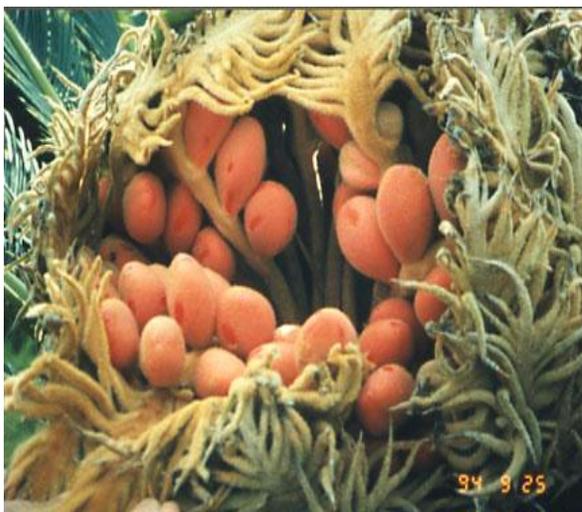


Figure 127 : Ovules sur feuilles fertiles



Figure 128: Microsporangies

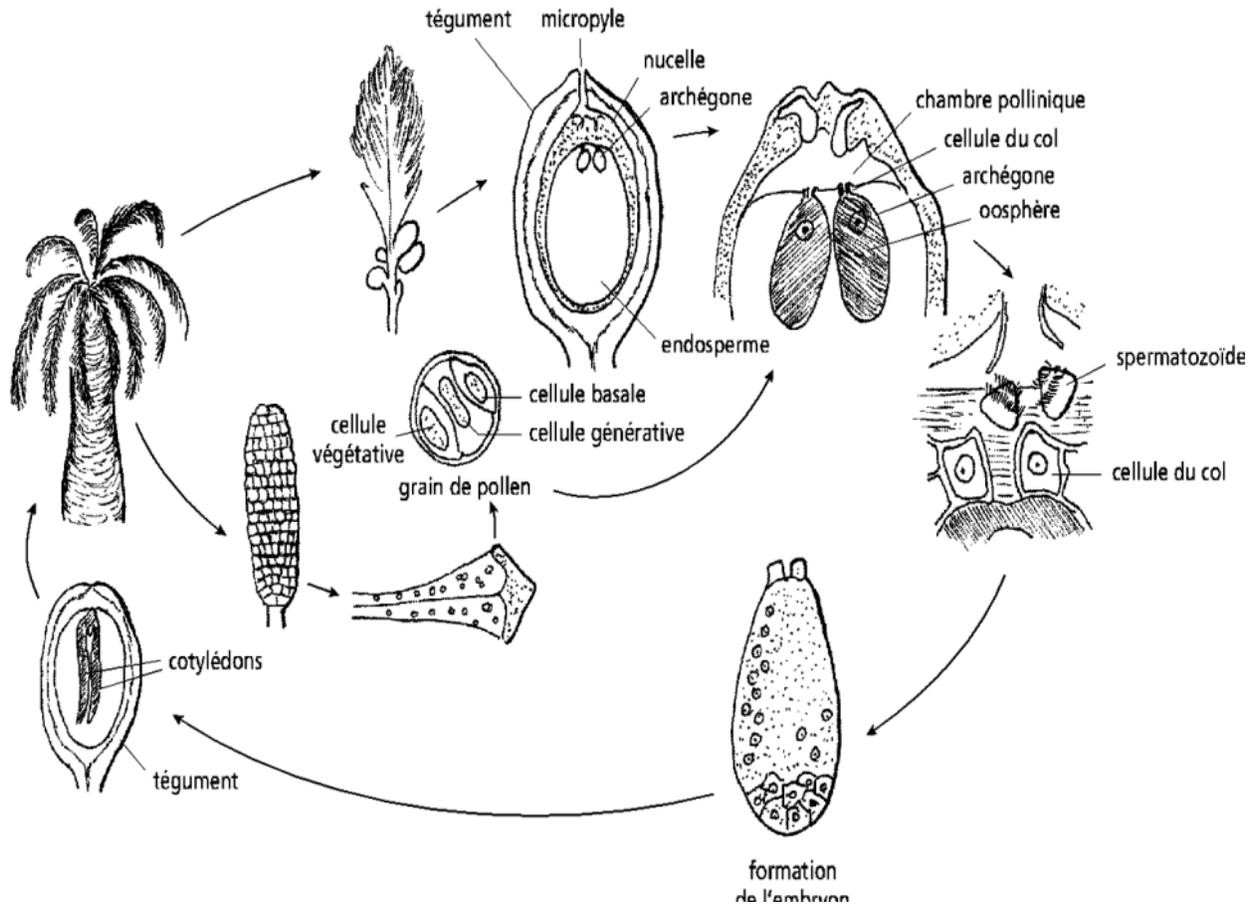


Figure 129 : Cycle de développement du *Cycas revoluta*

5.2.1.1. Classification des Cycadophytes :

Embranchement : **Cycadophyta**

Comporte une seule classe : **Cycadopsida**, divisée en 03 Ordres.

a/ Ordre des PTERIDOSPERMALES

Ils constituent un groupe très varié avec des formes primitives, évoluées et même sur-évoluées, ce qui indique une existence sur une assez longue durée.

b/ Ordre des BENNETTITALES :

Il s'agit d'un ordre qui a complètement disparu, mais bien connu à l'état fossile

c/ Ordre des CYCADALES :

Comportent une centaine d'espèces regroupées en 3 familles (Zamiaceae, Cycadaceae et Stangeriaceae.

) et 11 genres. Les Cycas forment un genre qui comporte 20 espèces. Une seule espèce *Cycas revoluta*

Les Cycadales actuelles se répartissent en 2 groupes :

1- Cycadales occidentales d'Amérique

Genre ZAMIA : originaire d'Amérique tropicale. Petit tronc court. Croissance définie de la tige (comme Ceratozamia).

Genre DIOON : *D. edule* : du Mexique. Graine amylocée comestible.

Genre CERATOSAMIA : du Mexique. Peut atteindre 16 m de haut.

Genre MICROCYCAS : de Cuba. Plus de 10 m de haut.

2- Cycadales orientales ou africaines :

Genre CYCAS

C. revoluta : c'est le sagou du Japon. Japon et Chine sud orientale.

C. circinalis : sagou de Nouvelle Hollande. En Indonésie et aux Philippines.

Genre MACROZAMIA : endémique d'Australie. Peut atteindre 20 m de haut.

Genre ENCEPHALARTOS : Endémique d'Afrique du Sud. 10 m de haut. Pollinisé par les insectes. Feuilles coriaces.

Genre BOWENIA : endémique d'Australie

Genre STANGERIA : endémique d'Afrique du Sud. Du Cap.

S. paradoxa : du Natal. Unique représentant archaïque

Le genre *Cycas revoluta*

Position systématique

Règne **Plantae**

Sous-règne **Tracheobionta**

Division **Cycadophyta**

Classe **Cycadopsida**

Ordre **Cycadales**

Famille **Cycadaceae**

Genre *Cycas*

Espèce *Cycas revolute*

5.2.2. Les Ginkgophytes

Ginkgo biloba est le seul représentant des Ginkgophytes. C'est l'unique survivant d'un genre qui a peu varié depuis 150 millions d'années. Les ovules du Ginkgo apparaissent par paires à l'extrémité de court pédoncule et produisent, en mûrissant des graines entourées d'une enveloppe charnue. La fécondation ne se réalise qu'après la chute des ovules.

- **Le ginkgo**

C'est un arbre asiatique qui a été introduit en France au 18^{ème} siècle.



Figure 130 :Ginkgo biloba

A\ Le sporophyte à 2N

1\ L'appareil végétatif:

C'est une espèce dioïque (mâle ou femelle). Ses feuilles sont caduques avec deux sortes de rameaux. On a les pousses longues, à entre-nœuds allongés et à croissance indéfinie : ce sont les auxiblastes. On a ensuite les pousses courtes, qui sont sexuées et à croissance définie : ce sont les mésoblastes.

2\ L'appareil reproducteur mâle (à fleurs mâles). Les fleurs sont constituées par des bouquets d'étamines situés à l'aisselle des feuilles. Les étamines sont formées par un filet portant deux sacs polliniques. A maturité, il y a ouverture du sac par la fente longitudinale : c'est la libération du pollen. Les sacs polliniques proviennent de la différenciation d'un massif d'archéspores (à 2N) se divisant et donnant une assise nourricière (le tapis) et les cellules mères des microspores à 2N.

3\ L'appareil reproducteur femelle (à fleurs femelles). Ces fleurs sont situées à l'extrémité des rameaux courts. Elles sont sur un axe (le pédicelle), qui porte deux ovules, dont une qui avortera en formant une cupule. Les ovules (ou, masses cellulaires, ou nucelle) sont entourés par un tegument interrompu, au sommet, par le micropyle.

B\ Les gamétophytes.**1\ Le gamétophyte mâle.**

Il est dans le sac pollinique. Les archéspores à 2N subissent la réduction chromatique pour donner des microspores qui vont évoluer en grains de pollen. Un grain de pollen est composé de deux cellules prothalliennes protégées par l'exine, d'une cellule gamétogène, d'une grande cellule végétative protégée par l'intine. La partie végétative du grain de pollen est constituée par une cellule prothallienne et par les deux autres cellules non prothalliennes.

2\ Le gamétophyte femelle.

Dans le nucelle, l'archéspore donne une cellule mère qui subit la réduction chromatique et qui donne 4 mégaspores (seule la plus interne va se développer en donnant le gamétophyte femelle : l'endosperme). Cet endosperme va subir de nombreuses divisions et va être formé de deux parties : par un endosperme coenocytique (avec beaucoup de noyaux) et par un endosperme définitif qui est un ensemble de cellules où s'accumulent des réserves (amidon et lipides). Au sommet de l'endosperme, deux archégones se différencient.

C\ Pollinisation et germination.

Le pollen est disséminé par le vent au printemps alors que les ovules ne sont pas encore mûres. Il y a alors une sécrétion de liquide mucilagineux par le micropyle qui permet la fixation des grains de pollen. Il y a résorption de l'ensemble, liquid plus pollen, vers la chambre pollinique qui se referme. Le grain de pollen va germer pour donner un microprothalle, en se fixant dans le nucelle. La cellule gamétogène se divise et donne une cellule du pied (ou cellule du tube) et une cellule du corps (reproductrice). Cette cellule reproductrice donne deux anthérozoïdes (ou spermatozoïdes flagellés).

D\ Fécondation et formation de l'œuf et du sporophyte.

Libérés du grain de pollen, les spermatozoïdes nagent dans le liquide du nucelle et l'un d'eux va féconder l'oosphère (c'est une zoïdogamie à milieu interne à l'organisme liquide). Cette fécondation est suivie de la formation de zygote (ou œuf). Le noyau du zygote se divise immédiatement et donne un pré-embryon qui se différencie en deux zones. Une zone supérieure qui est un suspenseur (c'est aussi le col de l'archégone), et une zone inférieure méristématique : l'embryon qui, complètement différencié, est formé d'une radicule, d'une tigelle, d'une gémule et de deux cotylédons.

E\ Le développement de l'ovule fécondé.

A maturité, l'ovule donne une pré-graine dont le tégument se divise en trois couches. Le nucelle persiste en une mince couche. L'endosperme occupe toute la partie centrale. Les réserves sont dans l'endosperme avant la fécondation. Les ovules peuvent tomber avant d'être fécondés. Il n'y a pas de vie ralentie avant la germination. Chez le Ginkgo, on assiste à la première apparition d'un ovule (mégasporange) nu. Le gamétophyte n'a pas de vie autonome : le gamétophyte mâle est parasite du sporophyte et le gamétophyte femelle est réduit.

La fécondation est une zoïdogamie avec le liquide fourni par l'ovule. Le cycle est haplodiplophasique, il est surtout diplophasique car c'est la seule forme de vie autonome.

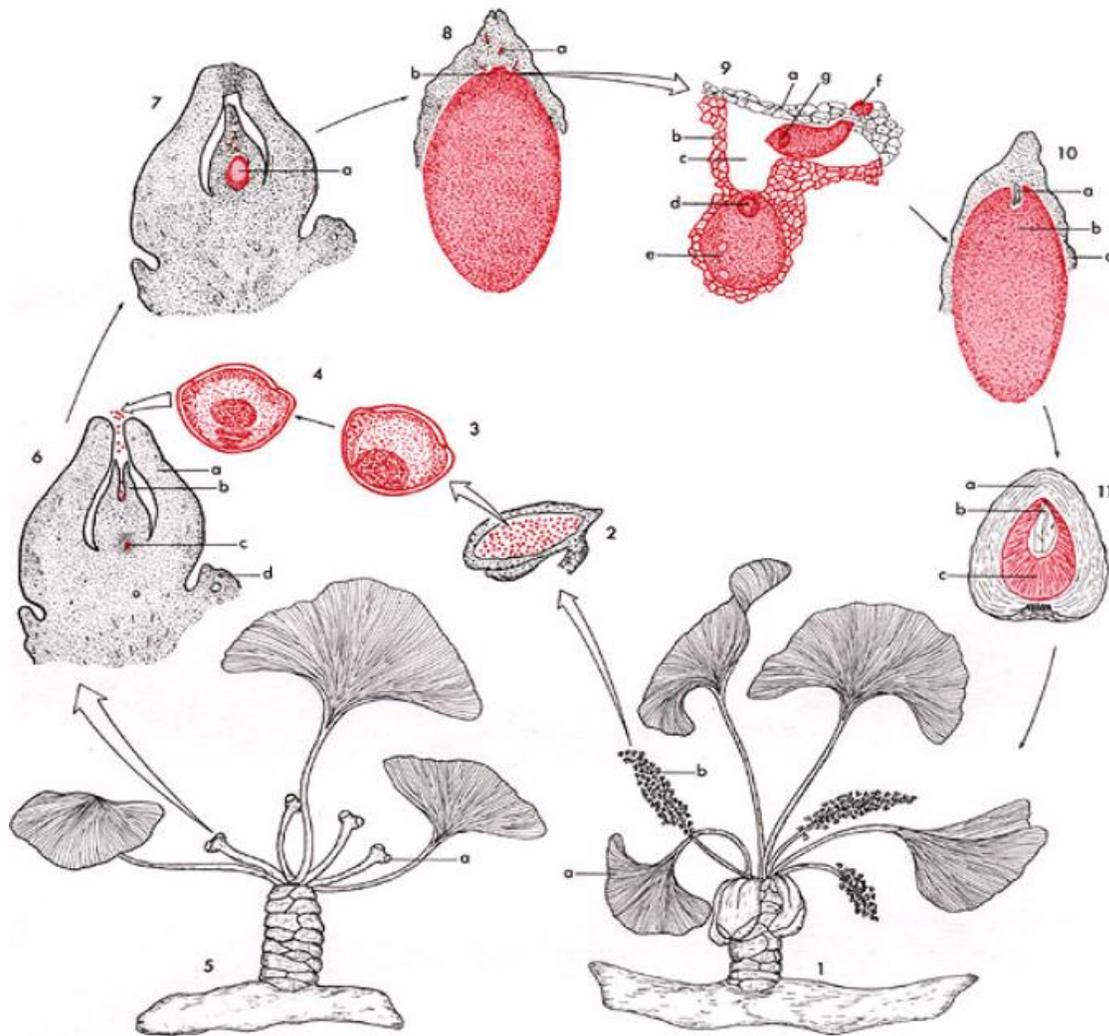


Figure 131 : Cycle de vie de l'arbre aux quarante écus *Ginkgo biloba*.

1. Pousse mâle avec étamines, 2. Microsporophylle, 3. Microspore, 4. Microgamétophyte (pollen)
 5. Pousse femelle avec ovules, 6. Ovule à la pollinisation, 7. Ovule, 8. Mégagamétophyte, 9. Archégonie après la fécondation, 10. Embryon, 11. Graine

5.2.2.1. Classification des Ginkgophytes

Embranchement : **Ginkgophyta**

Une seule classe **Cordaitopsida**, divisée en 02 Ordres :

- **Les Cordaitales** : Sont des Préphanérogames arborescentes
- **Ginkgoales** : Actuellement existe une seule espèce : ➤ *Ginkgo biloba*

5.2.3. Les Coniférophytes: notion de fleur, d'inflorescence et de graine

5.2.3.1. Caractères généraux

Les Pins – Pin sylvestre (fig. 133) – les Sapins sont de bons exemples de Conifères.

De façon générale, ce sont des *plantes ligneuses*, arbres essentiellement ou arbustes, à port conique caractéristique, la fixation au sol se faisant par une racine principale en pivot. Leurs tissus sécrètent des oléorésines, qui se rassemblent dans des canaux sécréteurs à résine, d'où le nom de « *résineux* » qui leur est donné par les forestiers (en opposition aux « *feuillus* »).

Leurs feuilles sont, soit en forme d'aiguilles comme chez les Pins et Sapins, soit en forme d'écaille, plus ou moins appliquées sur la tige, comme chez les Cyprès (fig. 134); parfois plates et lancéolées chez les *Podocarpus*, genre caractéristique de l'hémisphère Sud. Chez les Pins, écailles (devenues non chlorophylliennes) et aiguilles vertes coexistent, les premières couvrant les rameaux longs, les secondes groupées par 2 à 5 (selon les espèces) sur des rameaux courts. La figure 133, relative au Pin sylvestre, montre des aiguilles réunies par deux.



Figure 132: Rameaux de différents conifères

Ces feuilles vivent plusieurs années (2 à 4 ans, parfois plus) : aussi les Conifères, à quelques exceptions près (Mélèze, Cyprès chauve) sont des arbres *toujours verts*. Ces feuilles, généralement coriaces et vernissées, résistent à la sécheresse et au gel : elles assimilent le dioxyde de carbone par des températures basses, en dessous de zéro degré. Cela explique que les Conifères soient dominants dans les régions froides et les montagnes. Leurs organes sexuels sont groupés en *cônes unisexués*, soit mâles, soit femelles, généralement portés par un même pied (espèce *monoïque*, du grec *mono*, un seul et *oïka*, habitat). Ces cônes, en particulier le cône femelle, ont un aspect caractéristique d'où le nom de Conifères (du latin *conus*, cône et *fero*, je porte).

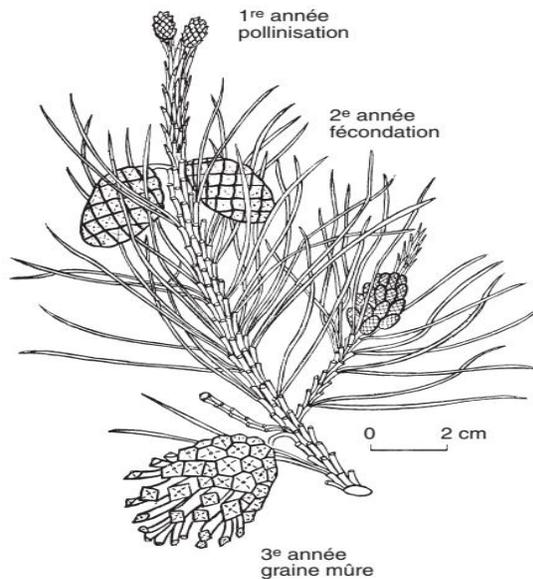


Figure 133: Pin sylvestre.

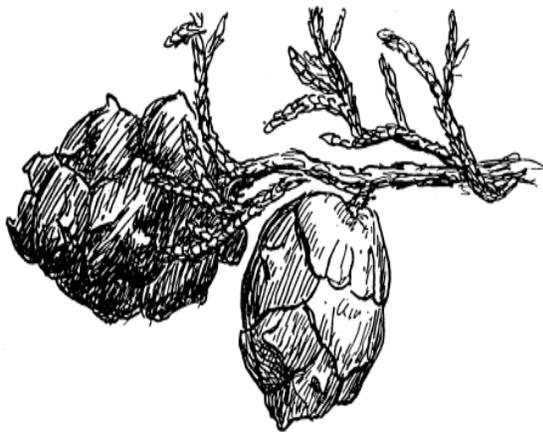


Figure 134: Cyprès.

Rameau recouvert de feuilles en écailles et porteur de cônes femelles.

✓ Cycle de développement

Description

Celui du Pin sylvestre (fig. 133) sera pris à titre d'exemple.

* Appareil reproducteur male

Au printemps apparaissent sur les plus jeunes rameaux les organes reproducteurs. De petits cônes agglomérés en épis denses représentent les éléments mâles :

- chacun comporte un axe simple autour duquel sont disposées suivant une spirale très serrée de nombreuses, feuilles sporangifères ou étamines (fig. 135);

- chacune porte à maturité deux sacs polliniques allongés qui s'ouvrent, comme chez les Fougères, par une assise mécanique (l'anneau de déhiscence), laissant échapper les microspores ou grains de pollen (à n chromosomes) que le vent entraîne. L'ensemble est très comparable à la partie mâle de l'épi sporangifère des Sélaginelles.

Le contenu de la microspore, d'abord uninucléée, se segmente et devient sans rupture de la paroi qui l'enveloppe, un petit prothalle comprenant :

- 2 cellules prothalliennes qui dégénéreront plus ou moins rapidement;
- 1 cellule initiale de l'anthéridie.

Les grains de pollen sont flanqués de deux ballonnets latéraux formés par le décollement de l'exine et qui les rendent très légers. L'exine évite la déshydratation du contenu vivant du grain de pollen lors de son transport dans l'atmosphère. La survie des grains de pollen est cependant toujours limitée.



Figure 135: Cônes mâles de pin

*Appareil reproducteur femelle

Les cônes femelles, groupés par deux ou trois, ont une structure plus complexe : ils sont également composés d'écaillés disposées en spirale, mais celles-ci ne sont pas, en fait, portées directement par l'axe, mais par des rameaux extrêmement courts, axillés chacun par une bractée. Les écaillés, dite ovulifères, correspondent aux feuilles sporangifères; chacune d'elles porte deux *macrosporangies* ou *ovules* (fig. 137).

Ceux-ci se trouvent directement au contact de l'atmosphère : on dit qu'ils sont *nus*, d'où le nom de Gymnospermes donné à l'embranchement. Les écaillés du cône sont, en fait, serrées les unes contre les autres et protègent très efficacement les ovules des intempéries.

Dans chaque ovule, il ne se forme que 4 macrospores dont 3 dégèrent rapidement; la *macrospore fertile* (à n chromosomes) donne naissance à l'intérieur même de cet ovule à un *prothalle interne* non chlorophyllien ou *endosperme* constitué de nombreuses cellules et entouré, comme chez les Sélaginelles, d'une puissante membrane *cutinisée*; mais celle-ci s'amincit ou même s'interrompt à la partie supérieure de l'organe, région où il se forme deux ou trois *archégones* réduits à un col très court surmontant une *oosphère* volumineuse.

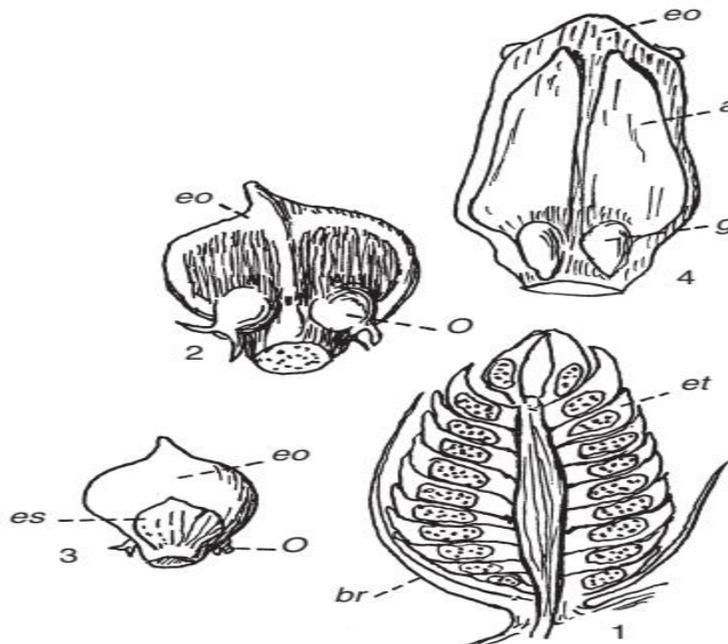


Figure 136: Pin sylvestre.

1, coupe d'un cône mâle

2, écaille ovulifère, *eo*, présentant la face supérieure ventrale portant les deux ovules; 3, face dorsale de l'écaille ovulifère, *eo*, ce qui permet de voir la bractée axillant l'axe qui la porte, *es*; on peut apercevoir la partie supérieure des ovules, *o*, disposés sur la face ventrale; 4, après maturation de la graine l'écaille, *eo*, porte deux graines, *g*, qui se détachent en entraînant chacune une aile, *a*.



Figure 137: cônes femelles immatures

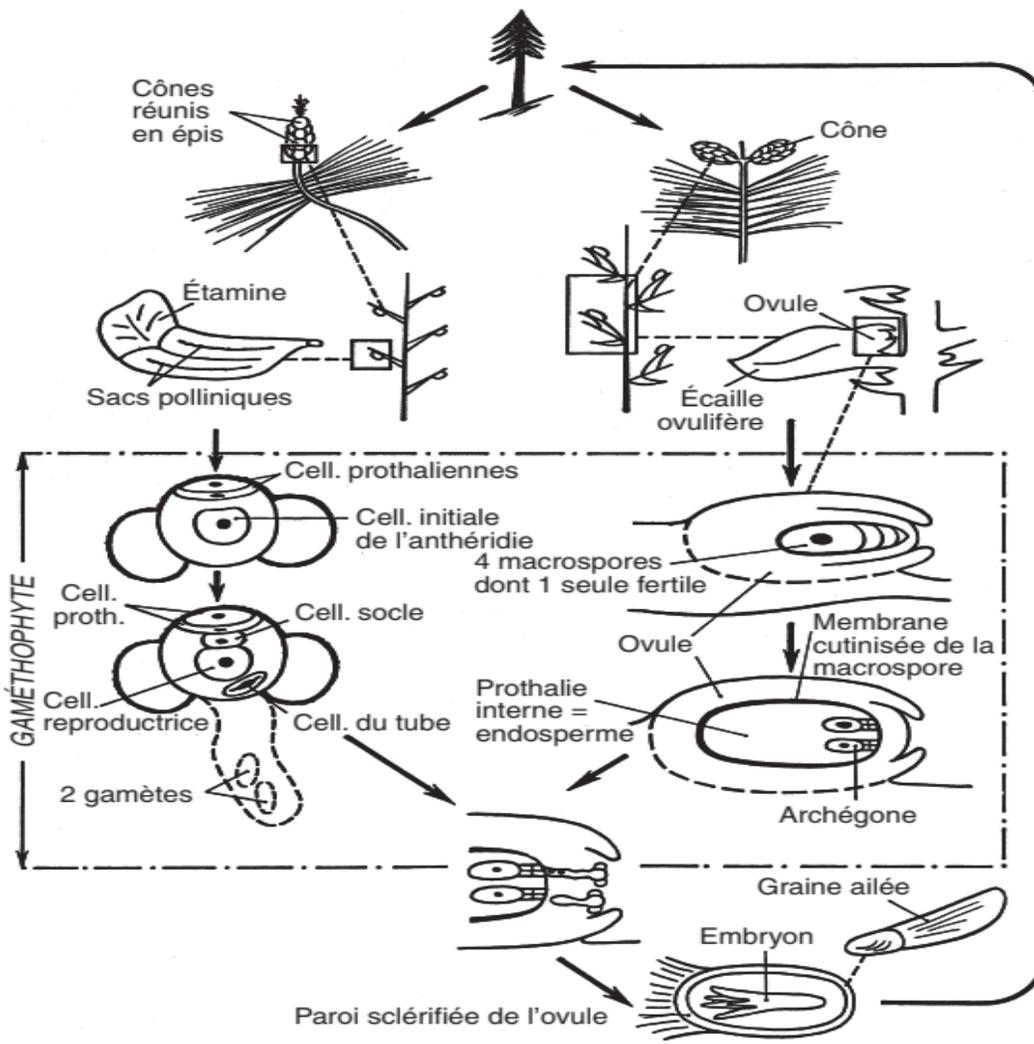


Figure 138: Cycle de développement du Pin sylvestre.

* Pollinisation et fécondation

Les grains de pollen sont dispersés par le vent : pollinisation anémophile; ils atteignent les cônes femelles, s'insinuent dans les interstices des écailles, arrivent au contact des ovules, sont retenus par une substance mucilagineuse excrétée par le sommet de l'ovule et germent : le prothalle subit de nouvelles divisions (cellule du tube, cellule socle, cellule reproductrice qui donne naissance à deux *anthérozoïdes dépourvus de cils* et appelés gamètes) puis émet un diverticule ou *tube pollinique*, formé aux dépens de l'intine, qui traverse les tissus de l'ovule et pénètre dans le col de l'archégone; l'extrémité du tube pollinique se rompt et le gamète le plus proche féconde l'oosphère tandis que l'autre dégénère1.

Deux ou trois oosphères sont ainsi fécondées mais finalement un seul embryon se développe et croît aux dépens des tissus de l'endosperme qui l'entourent : *l'embryon n'est ainsi à aucun moment en contact avec le milieu extérieur.*

Arrivé à un certain stade de différenciation (on distingue alors la première racine, le bourgeon terminal et les 2, 3, 4 premières feuilles ou cotylédons), la croissance de l'embryon cesse; l'ensemble des tissus formés par l'embryon, l'endosperme et les parois de l'ovule se déshydratent, entre à l'état de vie ralentie, tandis que les parties superficielles ou téguments se sclérifient en formant une enveloppe protectrice : **C'est une graine.**

Pourvue d'une aile membraneuse qui facilite sa dispersion (cette aile provient de la délamination de la partie supérieure de l'écaille, fig. 32-4), la graine *s'échappe* alors du cône qui, au cours de la formation de l'embryon, toujours lente (de l'ordre de plusieurs mois), s'est lignifié et desséché, prenant l'aspect classique de la pomme de Pin. Après un *certain temps de repos* (en général, il lui faut subir les froids de l'hiver), la graine germera dès qu'elle trouvera des conditions favorables, donnant une petite plantule qui, en quelques années, deviendra un pin adulte.

- **Caractères fondamentaux du cycle de développement**

Les gamétophytes restent inclus dans les spores mâles et femelles. L'évolution a accentué leur miniaturisation (facilitée par l'haploïdie, structure génétiquement vulnérable) :

- cellules prothalliennes mâles généralement réduites à deux et en état de dégénérescence;
- anthéridie réduite à quelques cellules d'enveloppe, deux chez les Pins et les Sapins;
- seulement deux gamètes;
- archégone très simplifié...

De façon générale, **la spécialisation** plus grande des parties sexuelles justifie l'emploi de **mots nouveaux**. On appellera :

- les épis sporangifères, des *cônes*;
- les feuilles sporangifères mâles, des *étamines*;
- les feuilles sporangifères femelles, des écailles ovulifères;
- les microsporangies, des *sacs polliniques*;

- les macrosporangies, des *ovules*1;
- les microspores, des *grains de pollen*2;
- le massif prothallien femelle, un *endosperme*.

Mais surtout ce cycle est totalement original sur deux points :

1. La macrospore ne doit pas tomber à terre pour permettre au prothalle de produire ses archéogones, mais elle reste incluse et se « prothallise » dans le macrosporangie ou ovule resté sur la plante feuillée (endoprothallie). Bien plus, *après la fécondation*, l'ensemble demeure en place jusqu'à la formation d'une jeune plante en miniature ou embryon

Il en résulte que le prothalle femelle, encastré dans les tissus de l'ovule, ne devient à *aucun moment chlorophyllien* et que les éléments nécessaires à la croissance de l'embryon sont fournis par la plante mère sur laquelle il vit *en parasite*.

Le cycle de développement peut être ainsi résumé :

Aux termes près, il est identique à celui des ptéridophytes hétérospores les plus évoluées, comme les Sélaginelles. *L'alternance des générations*, avec très forte prédominance du sporophyte, est ainsi fondamentalement la même pour les Fougères et les Gymnospermes. À maturité, c'est *l'ensemble macrosporangie-macrospore prothallisée-jeune embryon qui se détache de la plante mère et va assurer la dissémination de l'espèce* : c'est une graine, organe nouveau, absolument original.

Celle-ci introduit dans le cycle vital une *discontinuité*. En effet, la graine se dessèche avant d'être disséminée et *l'embryon s'y trouve dans un état de vie ralentie*. De plus, cette graine ne germera qu'après *une certaine période de repos*. Cette *période de repos ou dormance* n'existait pas chez les bryophytes et les ptéridophytes. Elle permet aux Conifères, qui vivent surtout dans les régions froides de s'adapter à l'alternance des saisons. On en conçoit toute l'importance.

La graine est le premier apport fondamental des Conifères à l'évolution.

2. *Le second* est d'avoir rendu *la fécondation indépendante de la présence d'eau* :

Le transport des gamètes mâles à *travers les tissus* qui surmontent les archéogones est assuré par un *tube pollinique*.

Il est à noter qu'à *aucun moment les gamètes* (réduits au noyau, à une mince couche cytoplasmique et à la membrane plasmique) ne sont en contact avec le milieu extérieur.

Enfin, si l'on compare *l'appareil végétatif* des ptéridophytes à celui des Conifères, on observe que ce dernier est plus *perfectionné* :

- Les vaisseaux, toujours imparfaits et à rôle de soutien, ont des ponctuations complexes, dites *aréolées* (du latin *area*, petite surface).

La ramification n'est plus de type dichotomique mais *latéral* et, généralement, le bourgeon apical a une croissance indéfinie. Il est à remarquer que cette *ramification* se traduit au niveau du cône femelle

par un axe ramifié, non comparable à l'axe simple de la portion femelle de l'épi des Sélaginelles. Cet axe ramifié annonce *l'inflorescence des Angiospermes*.

- La croissance en longueur n'est plus réalisée par une cellule apicale mais par un *méristème*.

- Les tiges et les racines peuvent s'élargir par le *jeu d'assises circulaires* apparaissant secondairement, lorsque la plante a acquis une certaine taille : ce sont les *formations secondaires*. Elles permettent aux arbres d'atteindre de grandes dimensions. De fait, les Gymnospermes, avec les Séquoias qui ont jusqu'à 120 mètres de haut, comprennent les arbres les plus grands au monde.

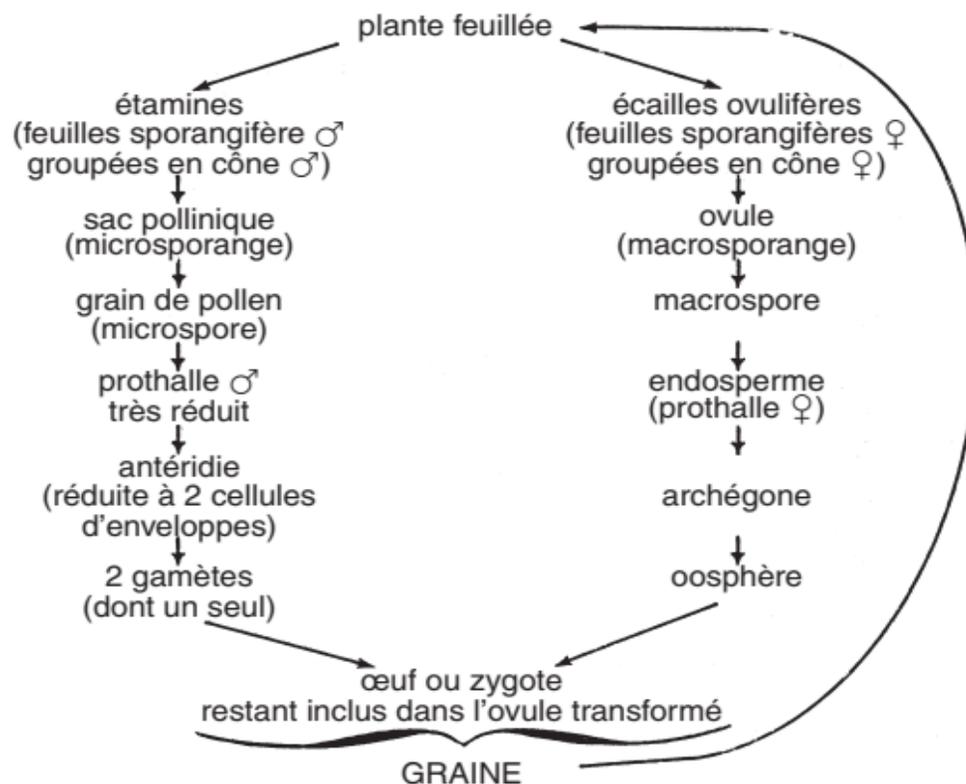
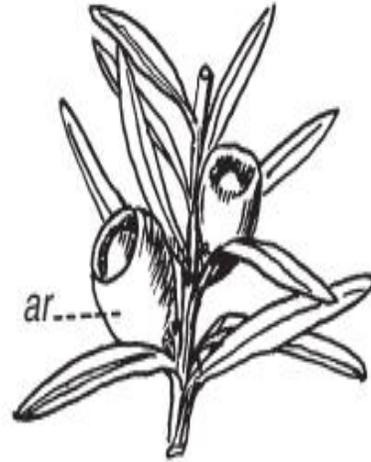


Figure 139: Cycle de développement des Conifères

- Principales variations

Les Conifères forment un ensemble homogène : les variations les plus intéressantes concernent le *cône femelle*. Nous mentionnerons seulement que : - les cônes mâles et femelles peuvent être portés sur des pieds différents (espèce dioïque); exemple : l'**If**;



*Figure 140: If. Fragment de branche portant la graine mûre
(ar, arille, expansion charnue de la graine)*

-l'écaille ovulifère et la bractée qui l'axille peuvent être libres (**Pin, Sapin**) ou plus ou moins concrescentes à maturité (**Cyprès**);



Figure 141: Pinus halepensis



Figure 142: *Abies alba* (Sapin)

- le cône femelle est réduit à quelques écailles ovulifères chez certaines espèces. Il peut alors devenir *charnu*, comme chez les Genévriers où les trois écailles portant les ovules deviennent concrescentes et molles et forment la *galbule* ou « baie » de Genièvre (fig. 143).

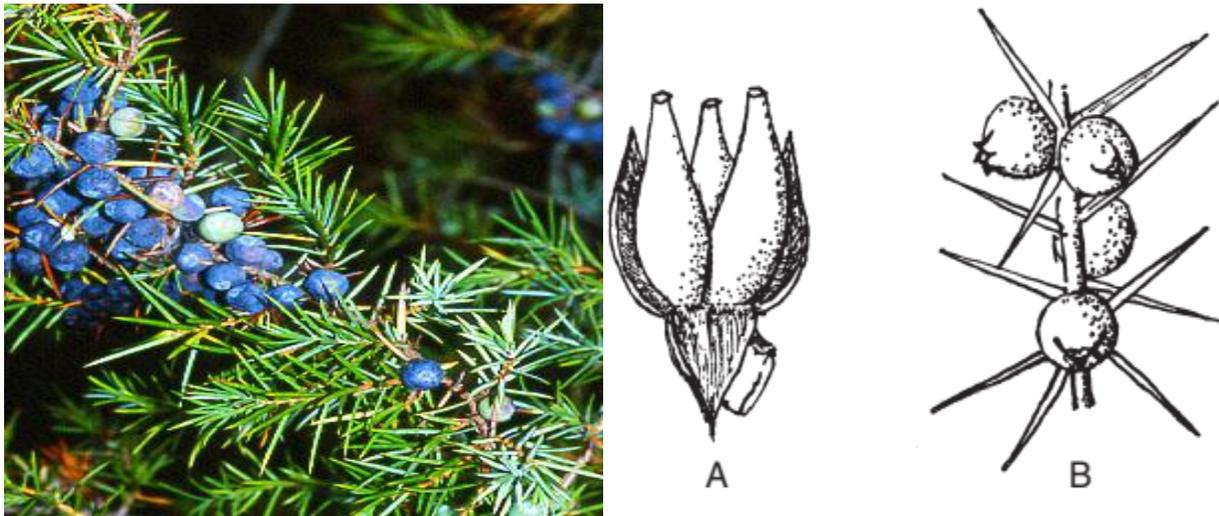


Figure 143: Cône de Genévrier.

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) sur un rameau feuillé; chaque cône est devenu un organe globuleux, charnu dont on distingue, au sommet, les pointes des trois feuilles ovulifères coalescentes qui le constituent.

Ou encore il ne comporte que une ou deux graines fertiles dont le tegument s'entoure à maturité d'une excroissance charnue ou *arille* (du latin *arillus*, grain de raisin) : c'est le cas de l'If où cette dernière est d'un beau rouge (fig. 140).

D'autres variations plus secondaires touchent le nombre des sacs polliniques. L'absence de ballonnets sur les grains de pollen, la réduction plus ou moins poussée des prothalles mâles... Par exemple, le pollen des Araucarias, espèces à caractères primitifs de l'hémisphère Sud, est dépourvu de ballonnets et possède encore une quarantaine de cellules prothalliennes.



Figure 144: *Araucaria columnnea*



Figure 145: *Araucaria Bidwili*

(Fragment de rameau)

5.2.3.2. Classification des Coniférophytes (pinophytes)

L'Embranchement des **Pinophyta** comporte une seule classe **Pinopsida** divisée en 05 Ordres :

- **Ordre des Bennettitales** : Ordre disparu.
- **Ordre des Pinales ou Abiétales**
- **Ordre des Araucariales.**
- **Ordre des Cupressales.**
- **Ordre des Taxales.**

➤ **Ordre des Pinales ou Abiétales**

Ordre le plus répondu actuellement des Gymnospermes avec 45 genres et 500 espèces. La famille la plus importante est la famille des *Pinaceae* ou *Abiétaceae*, avec 9 genres et 210 espèces

- **Famille des pinacées (abiétacées)** : Feuilles groupées par 2 ou par 3 entourées à la base par une gaine membraneuse et écailleuse transparente. Tissus sécréteurs : composés aromatiques=oléorésines ou térébenthines. Les genres les plus répondu sont : *Pinus*, *Cedrus*, *Abies*, *Larix*.

- **Genre PINUS**, le plus important des conifères. Il existe environ 120 espèces de pins, répartis autrefois par le nombre d'aiguilles par brachyblaste. Aujourd'hui, on a 10 sections basées sur les caractéristiques anatomiques. Ils ont des ports variés, mais tous ont des brachyblastes terminés par des aiguilles courtes ou longues, isolées ou en groupe de 2, 3, 4 ou 5.

Certains rangent des groupes en :

- halpostélés : une seule stèle libéro-ligneuse à l'intérieur des aiguilles
- diplostélés : 2 stèles

Chez les pins du groupe haplostélé, les gaines des aiguilles sont scarieuses, avec une membrane semi-transparente. Elles entourent la base du faisceau des aiguilles, elles sont caduques. Chez les pins du groupe diplostélé, ces gaines sont plus ou moins persistantes.

Les pins sont monoïques, leurs cônes mûrissent en 2 ans, rarement 3, et après leur ouverture, ils tombent. Il existe des cônes déhiscent et caduque ou déhiscent et persistant. Lorsque les cônes ne s'ouvrent que longtemps après la maturation, on parle de cônes indéhiscent. Les graines sont le plus souvent ailées.

P. sylvestris : Très large diffusion dans l'espace et dans les formes, qui affecte surtout le port de l'arbre et sa taille. On trouve toutes sortes de variantes dans les bois, en termes de qualité et de valeur. Entre 20 et 40 m de haut, écorce orangé saumon, rythidome écaillé devenant grisâtre en vieillissant. Cônes symétriques, aiguilles courtes fasciculées par 2, rigides et légèrement tordues, de couleur glauque, persistant 3 à 4 ans. Bourgeons roux et un peu résineux. Arbres monoïques, cônes petits, ovoïdes, écailles en écusson de forme variable. Les chatons mâles contiennent des bouquets d'étamines, on les trouve à l'extrémité des rameaux de l'année. L'inflorescence femelle a des cônes à l'extrémité des rameaux de l'année précédente, c'est vraiment une inflorescence. Chaque bractée ovulifère a à sa base 2 ovules.

Classification

Règne Plantae

Division Pinophyta

Classe Pinopsida

Ordre Pinales

Famille Pinaceae

Sous-famille Pinoideae

Genre *Pinus*

Espèce *Pinus sylvestris*

✓ *Pinus halepensis* :

Arbre d'environ 10-25 m, souvent penché et peu droit, la cime est assez écrasée, irrégulière et claire, les branches sont assez étalées. Il vit couramment 150 à 200 ans dans une majorité de son aire, et jusqu'à 250 ans au Maghreb. Les rameaux sont vert clair puis gris clair, assez fins, faisant souvent plusieurs pousses la même année sur les rameaux vigoureux (polycyclisme). Les bourgeons non résineux sont

ovoïdes, aigus, bruns, à écailles libres frangées de blanc. L'écorce est d'abord lisse et gris argenté, puis crevassée, écailleuse, gris brunâtre.

Les feuilles sont des aiguilles par deux, fines, aiguës souples, de 6 à 10 cm, vert grisâtre, appliquées le long des pousses la première année puis s'en écartant. Elles sont groupées en pinceaux à l'extrémité des rameaux faibles, dont la base est occupée par les fleurs mâles au printemps, mais sont disposées tout au long de la tige sur les rameaux forts. Elles persistent 2 à 4 ans, d'autant moins que les rameaux poussent rapidement.

Les cônes mâles sont jaunes teintés de rouge gorgés de pollen, oblongs, peu serrés ; les fleurs femelles sont pédonculées rose-violacé. Les cônes femelles sont gros de 6 à 12 cm, à pédoncules épais de 1 à 2 cm, souvent isolés mais pouvant être groupés par 2 à 4.



Figure 146: Pinus pinaster pin maritime



Figure 147: Pinus nigra



Figure 148: Pinus cembro



Figure 149: Pinus sylvestris



Figure 150: Pinus halepensis

- **Genre CEDRUS** : du grec *kedros* = très odorant. Pousse à l'état sauvage au Liban et dans les montagnes environnantes, dans l'Atlas, dans l'Himalaya et à Chypre. Actuellement représenté par 4 espèces de l'étage montagnard dans les régions méditerranéo-himalayennes, toutes dans l'hémisphère nord, en Afrique ou en Asie. Grands arbres à port imposant, à gros tronc conique, cime plus ou moins élargie avec tête pyramidale, globuleuse ou tabulaire. Le tronc a un rhytidome irrégulièrement crevassé, divisé en écailles qui restent appliquées. Les aiguilles sont raides, subtéragonales, soit insérées isolément sur les rameaux longs, avec une insertion décurrente, soit en bouquet sur des rameaux courts.

Floraison en fin d'été ou en automne généralement. Cônes généralement gros, ovoïdes, dressés, à écailles membraneuses, qui se désarticulent à maturité 2 à 3 ans après la floraison. Bractées naines incluses dans le cône. Chaque écaille porte 2 ovules qui donnent 2 graines à ailes membraneuses très développées. Chaque graine donne une plantule qui peut avoir de 1 à 10 cotylédons, avec un épicotyle bien développé.

C. atlantica : arbre pouvant atteindre 40 m de haut dans l'Atlas. Espèce du nord de l'Afrique, en particulier Maroc et Algérie. L'arbre ne fait que 20-25 m lorsqu'il est cultivé, en Europe. Introduit en Europe en 1840.

C. libani : dans la chaîne du Liban, en Turquie, surtout en Anatolie du sud, en Syrie, entre 1250 et 2000 m d'altitude. Peut vivre 2 à 3000 ans. Adapté au climat méditerranéen mais à hivers froids et précipitations faibles. Surtout à l'étage subalpin où il supporte des températures jusqu'à -30°. Introduit en Angleterre en 1638. C'est le seul cèdre qu'ait connu Linné.

C. brevifolia : considéré autrefois comme une sous-espèce de *C. libani*. C'est le cèdre de Chypre. Il a des feuilles courtes et son bois est précieux. Il forme des massifs entre 1400 et 1700 m. On le trouve en général avec un chêne endémique de Chypre, *Quercus alnifolia*. Ses aiguilles sont courtes à apex corné, avec 2 ou 3 rangées de stomates en dessus et en dessous.

C. deodara : cèdre de l'Himalaya. Il peut atteindre 70 m de haut. Ses pousses secondaires et terminales sont pendantes et recourbées. Aiguilles assez longues (3 à 5 cm), molles, vert clair. Grands cones arrondis



Figure 151: *Cedrus libani* (Cèdre du Liban)

- **Genre ABIES** : 80 espèces de sapins qui appartiennent aux régions tempérées et subtropicales de l'hémisphère nord. Le bois de ces espèces ne comporte pas de canaux résinifères, mais ceux-ci sont présents dans l'écorce. Les cônes sont dressés et se désarticulent à maturité. Les aiguilles sont insérées directement sur le rameau, sans coussinet. Les chatons mâles sont insérés isolément.

***A. alba* (ex *A. pectinata*)** : on le trouve dans les forêts de moyenne montagne d'Europe centrale et méridionale, à l'étage de moyenne montagne (800 – 1500 m), souvent associé au hêtre et à l'épicéa. La racine est d'abord pivotante quand le sapin est jeune, puis assez vite, elle disparaît au profit des racines secondaires. Les aiguilles sont disposées en 2 rangées sur un même plan, leur face inférieure montre 2 lignes parallèles qui sont 2 sillons longitudinaux vert argenté dans lesquels se situent les stomates. Elles vivent de 7 à 11 ans (adaptation à la sécheresse).

3 espèces ont des aires de répartition très vastes :

- ***A. alba***

- ***A. balsamea* (sapin baumier)** qui aime les terres humides mais pas l'eau stagnante. Il vieillit moins que *A. alba* car l'humidité entraîne la putréfaction de son tronc. Sa durée de vie est inférieure à 150 ans. Introduit en Europe : en Angleterre en 1697, puis un peu partout. Fournit le baume du Canada qui contient 70% de résine et 25% d'essence naturelle.

- *A. sibirica* : on le trouve de l'Oural à l'extrême Orient. Ses aiguilles sont en brosse, rabattues vers l'extrémité du rameau. Il peut atteindre 40 m de haut.



Figure 152: Sapin rouge

- **Genre LARIX** : le Mélèze. 12 espèces dont une en Europe, 3 en Amérique du Nord, 3 en Sibérie et 5 dans les montagnes d'extrême Orient. Régions froides, septentrionales ou en altitude élevée. C'est le plus important des conifères à feuilles caduques. Tige droite, cime conique, ramifications étalées. Porte 2 sortes de rameaux : des rameaux longs aux aiguilles insérées isolément, à base décurrente, et des rameaux courts insérés sur les rameaux longs, qui ont des aiguilles très rapprochées paraissant en rosette. Aiguilles linéaires à section quadrangulaire ou triangulaire, avec la face supérieure aplatie. Ces aiguilles sont molles, annuelles, caduques, et on en compte jusqu'à 30 par faisceau. Elles deviennent dorées et tombent à chaque automne.

L. decidua (= *europa*) : le mélèze d'Europe. Spontané dans la chaîne des Alpes, presque naturalisé dans les Pyrénées. Atteint 50 m de haut pour 2 de diamètre, et peut vivre 500 ans.

L. gmelini (= *dahurica*) : plus résistant aux grands froids. Dans la taïga, au Kamchatka, îles Sakhalines, îles Kouriles et Mandchourie. Peut faire 30 m de haut. Rameaux couverts de poils fins, écorce rouge sombre découpée en écailles.

L. griffithii : 20 m de haut environ. Unique mélèze himalayen qui possède des cônes allongés avec des bractées très saillantes et recourbées. Pâturages et moraines de la Sibérie centrale, au Kamchatka et en Corée du Sud.



Figure 153: Rameau et des cônes de mélèze

➤ **Ordre des Araucariales.**

Une seule famille appartient à cet ordre : **Famille Araucariaceae** :

- **Famille des ARAUCARIACEAE** : elle comporte les genres *Araucaria* et *Agathis*. Ce sont des arbres curieux dont on trouve de nombreuses espèces fossiles du Jurassique, du Crétacé et du Tertiaire, dans les deux hémisphères. Actuellement, on les trouve surtout dans l'hémisphère sud.

- **Genre ARAUCARIA** : c'est un groupe indépendant et isolé. Son aire d'origine est très étendue. Ce n'est qu'au tertiaire qu'il s'est confiné dans l'hémisphère sud. On le trouve aujourd'hui en Amérique du sud, Australie, Nouvelle Calédonie, et dans les îles Vanuatu. Ce sont des arbres majestueux avec des aiguilles toujours vertes, des cônes ovales, grands et sans tige. A maturité, ils se désarticulent. Les feuilles qui sont pratiquement des « aiguilles » peuvent être très pointues selon les espèces. Les aiguilles sont souvent formées différemment chez les plantes jeunes et chez les plantes âgées. Ces feuilles, qui sont des lames, des écailles ou des aiguilles, sont généralement insérées en spirale, persistantes, sur des rameaux verticillés raides et horizontaux, dépouillés sur une partie de leur longueur.

Par exemple, *A. roylei* découvert par le Capitaine Cook en Nouvelle Calédonie. Chez les vieux arbres, le tronc est largement dépourvu de branches et possède un cime aplatie. On les appelle des « arbres fil de fer ».

A. araucana (= *A. imbricata*) : c'est le « désespoir du singe ». Atteint 50 m de haut et peut durer 1000 ans. Dans les zones humides du Pacifique, climat tempéré

A. angustifolia : port typique en candélabre. Feuilles lancéolées, décurrentes, coriaces, en touffe à l'extrémité des rameaux. Climat sub-tropical à pluviosité uniforme. Au dessus de 800 m au sud du Brésil et en Argentine (territoire des missions) sur sol latéritique. Croissance rapide, atteint 40 à 50 m, mais ne vit que 300 ans maximum.

A. cunninghamii : espèce australienne et de Nouvelle Guinée, dans la zone des nuages, de 0 à 750 m. Dans les forêts de Podocarpus, sous un climat tropical humide qui totalise de 2000 à 4000 mm de pluies annuelles, il arrive à s'épanouir et peut faire plus de 50 m. Les feuilles ont une exsudation résiniforme peu fournie, formant une sorte de manchon à l'extrémité des branches. Silhouette pyramidale, écorce se desquamant en bandes horizontales.

A. bildwillii : d'Australie. 40 m de haut. Zones côtières du Queensland. Ecorce pourvue de protubérances, se détache en bandes horizontales enroulées sur le bord. Feuilles coriaces, lancéolées, pointues. Cônes énormes.

A. excelsa (=heterophylla) : c'est l'arbre du bonheur. Espèce endémique de l'île de Norfolk près de l'Australie. Chez nous, c'est un arbre d'ornement. Branches implantées en disposition régulière. Feuilles étroites à l'état jeune, devenant larges et ovales à l'état adulte. 60 m de haut et 2 m de diamètre.

- **Genre AGATHIS** : les espèces sont difficiles à déterminer. Asie du SE et Australie. Les arbres ont des « aiguilles » plates, coriaces et lancéolées, disposées en spirale, roses ou rougeâtres, devenant vertes. Elles ont une consistance comme du cuir, avec des nervures parallèles normalement. On en trouve de différentes formes sur le même arbre. Elles laissent une cicatrice en coussinet en relief lorsqu'elles tombent. Le cône femelle a des écailles à bords épais et des graines avec une aile bien différenciée.

Le bois est très résistant, et a une longue conservation. Le tronc exsude une résine, un liquide laiteux qui se solidifie à l'air. Ce sont les copals (ou gomme Damar, kauri). On la recueille par saignée. Mais on en trouve souvent sous forme de grands morceaux blancs à la bifurcation des branches, ou encore plus dans le sol là où se trouvaient les forêts d'Agathis (forme fossile).

A. damara : Indonésie et Philippines. Son copal, mis à nu est emporté par les rivières, on peut le trouver en grande masse dans certains endroits d'où on le sort en creusant (Copal de Manille).

A. robusta : Côte tropicale humide du Queensland. 50 m de haut, tronc largement dépourvu de branches. Feuilles ovales arrondies ou pointues.



Figure 154: Cônes femelles d'*Aghatis damara robusta*



Figure 155: *Aghatis robusta*

➤ **Ordre des Cupressales.**

Comprend deux familles : **Cupressaceae et Taxodiaceae.**

- Famille des cupressacées :

Cône charnu (galbule) formé de 3 à 6 écailles portant un seul ovule, feuilles aciculaires (écailles), graines non ailées -espèce :Juniperus oxycedrus = genévrier oxycèdre (espèce dioïque) : Feuilles verticilles par 3, effilées en une pointe piquante, cônes fructifères charnus issus de la soudure des 3 écailles ovulifères (fausse baie de couleur brun rouge=galbule)

✓ **Cupressus sempervirens :**

Cupressus sempervirens, encore appelé cyprès commun, cypress sempervirent, cyprès toujours vert, cyprès d'Italie, cyprès de Provence, ou encore cyprès méditerranéen est un arbre de la famille des Cupressaceae.

Il est originaire d'Asie mineure, mais il a été acclimaté dans tout l'hémisphère nord, et plus particulièrement autour du bassin méditerranéen. Il résiste à -20 °C et tolère une sécheresse relative. Il est aussi présent dans l'hémisphère sud comme à Antananarivo où il est commun.

Appareil reproductif : La « floraison » se produit en mars-avril en France. Les organes reproducteurs ne sont pas portés par des fleurs, mais par des cônes. Cette espèce est monoïque : les organes mâles et femelles sont séparés, mais ici, présents chez un même individu. Le cône mâle reste petit ; il a une forme oblongue. Le cône femelle, en forme d'œuf, peut atteindre une longueur de 4 cm, mais mesure généralement entre 2 et 3 cm de longueur. Il porte des écailles pentagonales ornées d'une pointe écaillée de petite taille.

La pollinisation est anémogame (pollen transporté par le vent). Le pollen de cette espèce est très allergène (indice 5/5). Des allergies croisées sont possibles avec le pollen du Thuya, du genévrier et du pêcher

Classification

Règne Plantae

Sous-règne Tracheobionta

Division Coniferophyta

Classe Pinopsida

Ordre Pinales

Famille Cupressaceae

Genre Cupressus

Espèce *Cupressus sempervirens*

Figure 156: Cupressus sempervirens

***Juniperus sp* Genévrier**

Plante aromatique, petit arbre ou arbuste; les feuilles sont des aiguilles piquantes. Les écailles de cône deviennent charnues à maturité: baies de genévrier;



Figure 157: Juniperus oxycedrus



Figure 158: Juniperus phoenicea



Figure 159: Juniperus thurifera

➤ **Ordre des Taxales :**

A une seule famille : Famille Taxaceae : On distingue 4 genres et 13 espèces.

- **Famille des taxacées :**

- anthères : de 3 à 8 sacs polliniques, feuilles linéaires, graines arillées. Les Ifs produisent des ovules isolés non intégrés dans des cônes, la plante entière est toxique sauf la prolifération charnue (arille) qui entoure la graine et qui simule un fruit rouge à maturité

-**Espèce :Taxus baccata = If commun**



Figure 160: If, le fruit

5.2.4. Les Gnétophytes: groupe charnière

5.2.4.1. Caractères généraux

*Ovule dans enveloppes non fermées (autrefois Saccovulées) avec micropyle allongé

*Pseudo-fleur unisexuée, étamines avec filet

*Pseudo-fruit

*Bois hétéroxylé : vaisseaux parfaits ou Trachées pour la sève (ponctuations aréolées) parenchyme ligneux pour soutien

Chez certaines Gnétophytes il existe un phénomène de double fécondation :

*Le tube pollinique déverse 2 gamètes mâles dans l'endosperme (gamétophyte femelle)

*Fusion de ces 2 gamètes avec 2 noyaux présents dans l'oosphère (gamète femelle)

*Une seule des cellules diploïdes formées donne un embryon, l'autre dégénère

La double fécondation n'est donc pas effective, elle n'est pas homologue de la double fécondation des Angiospermes (non héritée d'un ancêtre commun).

5.2.4.2. Classification des Gnétophytes :

Les Gnétophytes, groupe isolé dans la flore actuelle, se limitent à trois genres :

- **Les Ephèdres (Éphédracées)**, buissons à port de Prêle (environ 35 espèces), se rencontrent dans les zones sèches montagnardes et méditerranéennes. Sous arbrisseaux, rameau grêle, anguleux, feuilles réduites à des écailles, dioïque; l'ovule est protégé par des écailles rouges et charnues.



Figure 161: Ephedra altissima

- Les Gnétums (Gnétacées) sont des lianes tropicales (30 espèces).



Figure 162: Gnetum africanum

- Le *Welwitschia mirabilis* (Welwitschiacées), fig. 163, vit dans le désert du Namib (Afrique australe).

* plante acaule, 2 feuilles à croissance indéfinie (quelques cm/an) vivant plusieurs siècles, déserts du Sud de l'Afrique

Les Gnétophytes ont la particularité de protéger leurs micro- et macrosporophylles par des enveloppes bractéennes, ce qui rappelle la fleur des Angiospermes. De même les étamines sont pourvues d'un filet et parfois de nectaires. Mais les organes reproducteurs restent *unisexués* et très généralement dioïques. La présence de *vaisseaux parfaits* est un caractère évolué, de même qu'une ébauche de double fécondation chez les Ephédres.

Les données moléculaires rapprochent toutefois les Gnétophytes des Pinophytes et leurs caractères angiospermiens ne sont que des convergences.



Figure 163: Welwitschia mirabilis

Chapitre 06: Les Angiospermes

6. Les Angiospermes

- **Caractères généraux des angiospermes:**

C'est un *groupe immense* comprenant 200 000 à 250 000 espèces groupées en 400 à 500 familles et dont la morphologie – arbres, arbustes, herbes... – est des plus variables. À l'échelle du globe, exceptées quelques zones de végétation particulières (forêt de Conifères des régions froides, Lichens et Mousses des toundras, forêt tropicale à Fougères arborescentes...) les Angiospermes sont partout dominantes depuis le début du Tertiaire.

Les Angiospermes, par rapport aux Gymnospermes, sont fondamentalement définies par *trois caractères* :

- les organes reproducteurs se groupent en *fleurs* bisexuées;
- l'ovaire et le fruit : les écailles ovulifères ou *carpelles* (du grec *karpos* : fruit) forment un *ovaire* entourant complètement les ovules – d'où le nom d'Angiospermes donné à l'embranchement (du grec *aggeion*, petite urne) – et, après la fécondation, se transforment en *fruit*;
- le gamétophyte femelle, situé dans l'ovule et appelé *sac embryonnaire*, est le siège d'une *double fécondation*, l'une, classique, à l'origine de l'*embryon*, l'autre à l'origine de l'*albumen*, tissu de réserve des graines.

6.1. Structure de l'appareil végétatif

Chez les angiospermes et les cormophytes d'une façon générale, l'appareil végétatif est constitué de racines, de tige et de feuilles. Ces organes assurent la nutrition et la croissance. Ainsi au niveau des racines la plante absorbe l'eau et les sels minéraux qui constituent la sève brute. La sève brute est acheminée vers les feuilles via les vaisseaux conducteurs de la tige (xylème). Les feuilles sont le siège de la photosynthèse qui aboutit à la formation de la matière organique. La matière organique constitue une solution dite sève élaborée. La sève élaborée est distribuée sur les différents organes à travers un deuxième type de vaisseaux conducteur (phloème).

Les formes herbacées et annuelles sont nombreuses, avec pour conséquence une maturité sexuelle plus rapide (les arbres ne produisent des graines qu'au bout de plusieurs années), ce qui permet une reproduction accélérée de l'espèce et, par la suite, un brassage des combinaisons géniques favorables à la création de variétés ou même d'espèces nouvelles. C'est là un phénomène proche de la néoténie et correspondant à la possibilité de reproduction d'organismes juvéniles. Ces perfectionnements se concrétisent finalement par une extrême diversification des formes : des plantes bulbeuses aux plantes cactiformes, des plantes en coussinets aux troncs de plus de 100 m des Eucalyptus, des lianes de plus de 300 m de long aux herbes et aux plantes flottantes, tous les types se rencontrent chez les Angiospermes.

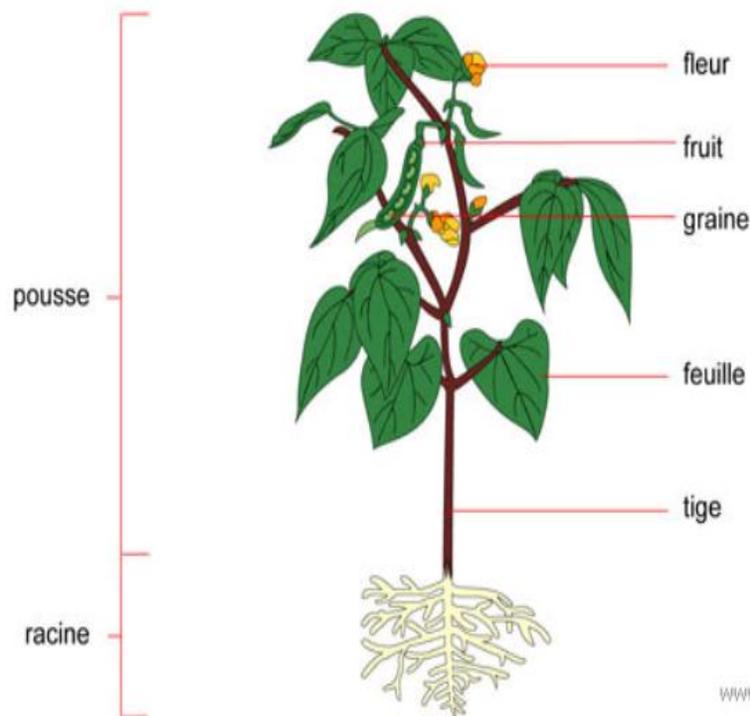


Figure 164 : Organisation générale de l'appareil végétatif des angiospermes herbacées

6.1.1. La racine

La racine est la partie souterraine de la plante, dont les principales fonctions sont **l'ancrage** de la plante dans le sol et **l'absorption** puis **la conduction** de l'eau et des sels minéraux. Elles doivent transporter l'eau et les sels minéraux vers les tiges et les feuilles, mais également importer les molécules organiques provenant des tiges et des feuilles. En plus de l'absorption et de la conduction, les racines produisent **des hormones** et d'autres substances qui régulent le développement et la structuration de la plante. **Les racines secondaires** issues du **péricycle** situé autour du faisceau conducteur, permettent d'accroître la surface d'absorption racinaire. Leur morphologie est comparable à celle de la racine principale. Les plus fines racines secondaires sont appelées **les radicules** et comportent généralement beaucoup de poils absorbants. La région qui sépare la racine de la tige porte le nom de **collet**.

On peut définir 4 parties dans une racine : la zone subéreuse, la zone pilifère, la zone d'accroissement et la coiffe

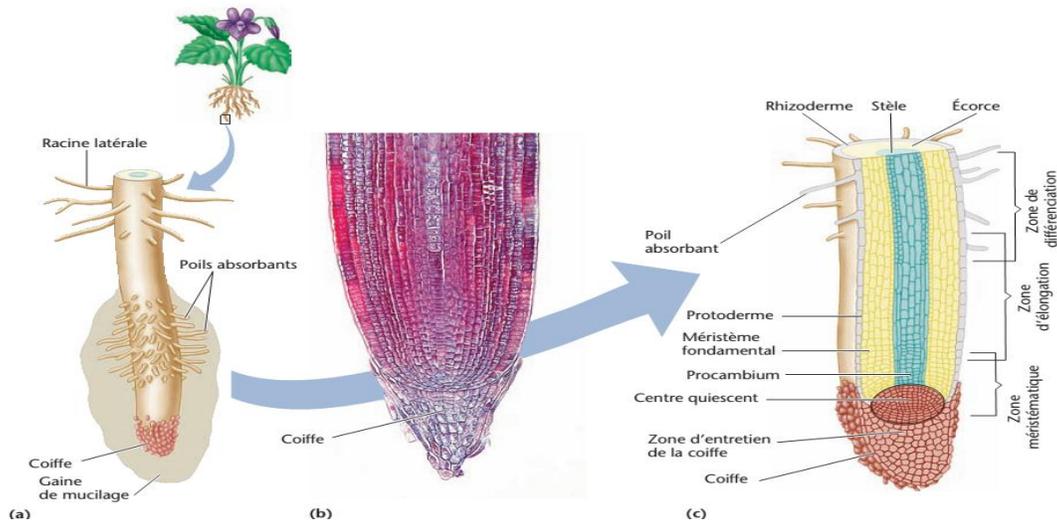


Figure 165: Coupe longitudinale dans une racine

6.1.1.1. Les différents systèmes racinaires : l'ensemble des racines d'une plante s'organise selon trois types de systèmes principaux et naturellement de tous les intermédiaires possibles :

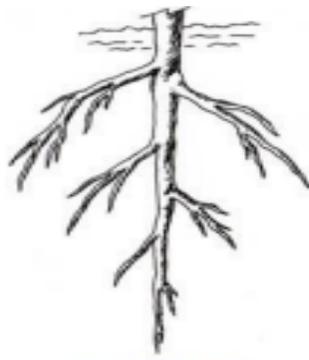
a. Le système pivotant : C'est principalement le cas chez les Dicotylédones (chez les arbres, ensemble des feuillus) et les Gymnospermes (les Conifères). Il existe une racine principale à « ravitropisme positif » et des racines secondaires latérales.

b. Le système fasciculaire : C'est principalement le cas chez de nombreuses Monocotylédones (les graminées comme le blé par exemple). Les nombreuses racines ne dérivent pas d'une racine principale mais ont une origine commune. Elles croissent parallèlement en faisceau.

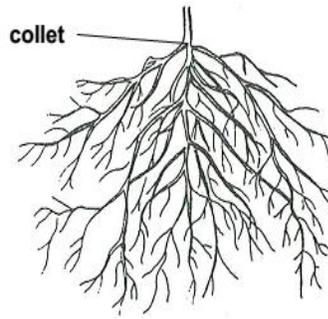
c. Les racines adventives : Dans certains cas, les racines peuvent apparaître sur des tiges, souvent au niveau des nœuds.

6.1.1.2. Les adaptations des racines (modifications des racines): en fonction du rôle particulier qu'elles sont amenées à remplir, certaines racines présentent des adaptations morphologiques :

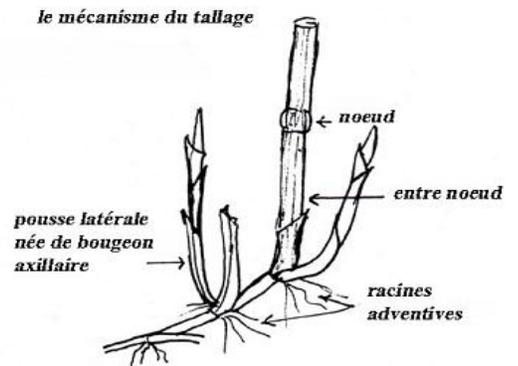
- **racines renflées en tubercules** jouant le rôle d'organes de réserve (Ex Carotte).
- **racines aériennes** permettant la fixation au support et l'absorption de l'humidité de l'air, notamment chez certaines Orchidées.
- **racines crampons:** qui fixent la plante à un support (Ex:Lierre).
- **racines échasses (ou racines contreforts) :** ce sont des racines adventives transformées pour étayer le tronc ou les branches de certains arbres à enracinement superficiel (exemple : pandanus, certains ficus).
- **pneumatophores :** racines verticales qui émergent de l'eau et permettent d'assurer les échanges gazeux chez certains arbres des marécages.
- **racines-suçoirs :** observées chez les plantes parasites comme le gui (*Viscum album*, Loranthacées).



racine pivotante

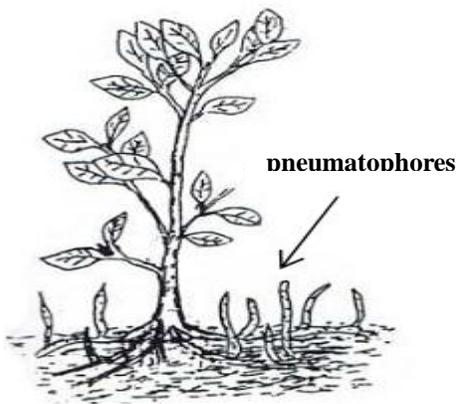


racine fasciculée

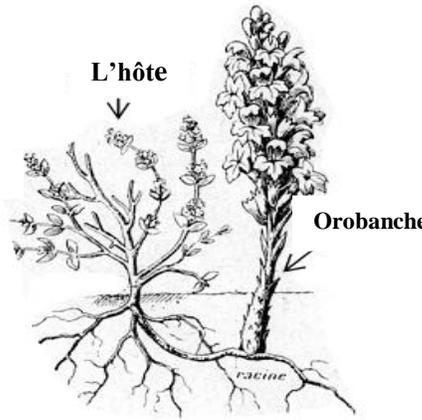


racine adventive

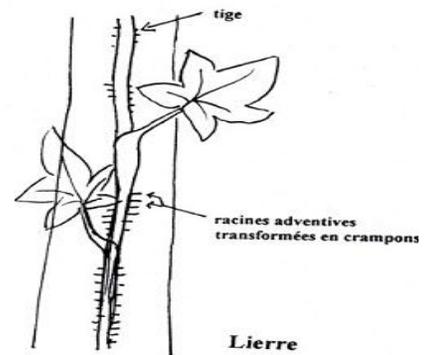
Figure 166 : Les différents systèmes racinaires



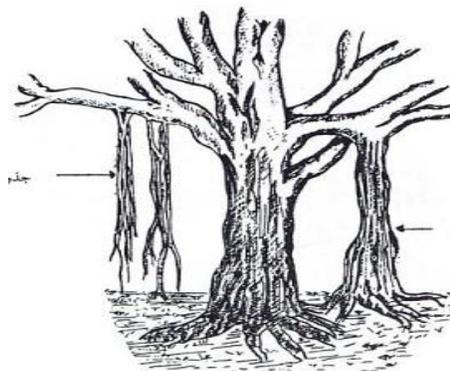
Pneumatophores (ou racines aérifères)



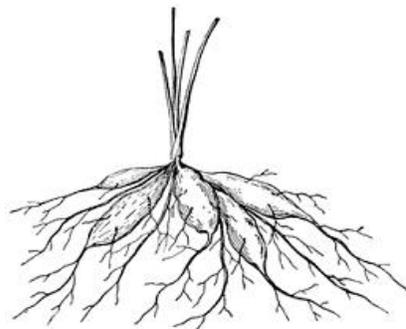
Racines suçoirs



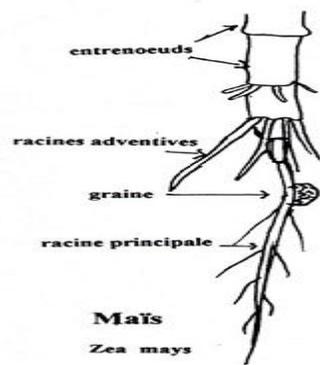
Racines-crampons aériennes.



Racines contreforts.



Racines tubereuses



Racines aériennes adventives du maïs (racines étauçons).

Figure 167: Racines modifiées

6.1.2. La tige

Les tiges constituent généralement la partie **aérienne** des plantes, ou pousse. Contrairement aux racines, les tiges sont divisées en **nœuds** et **entrenœuds**. Le nœud est la partie de la tige à laquelle sont attachées une ou plusieurs feuilles et l'entrenœud est la partie de la tige située entre deux nœuds successifs. Elle porte les feuilles, lieux de la photosynthèse, et les organes reproducteurs (fleurs, fruits et graines). Elle est également le lieu de transit de la sève brute et de la sève élaborée vers d'autres organes. Sa structure primaire est mise en place grâce au fonctionnement du **méristème primaire apical** ou **point végétatif**.

6.1.2.1. Types de tiges

(1). Les tiges aériennes

a. Tiges dressées : cas ordinaire.

b. Tiges rampantes: entre nœuds en général assez longs ; sur le sol ou même sous le sol (drageons et stolons).

- **Le stolon** est une tige adventive rampante dont le bourgeon terminal peut s'enraciner et donner naissance à un nouveau plant capable de produire des stolons; par exemple le fraisier.

c. Tiges grimpantes :

- **simples**: souvent avec crampons (racines adventives).

- **volubiles**: doivent leur mouvement à une courbure due à une irrégularité de croissance de chaque côté de la tige ; on dit que la tige subit une nutation.

- **à vrille(s)**: organe spécialisé dans la fixation ; l'enroulement de la vrille est conditionné par une sensibilité au contact : c'est un haptotropisme ; l'origine de la vrille peut être caulinaire (ex. la Vigne) ou foliaire (vrilles des Légumineuses).

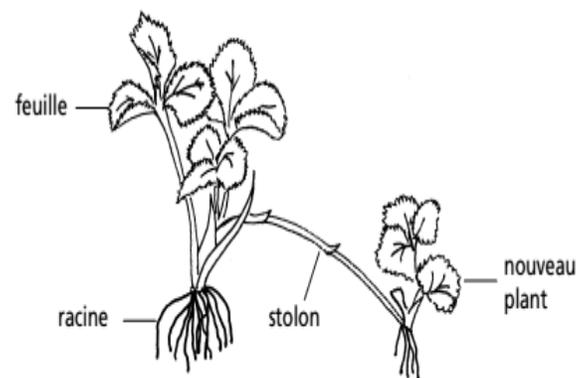
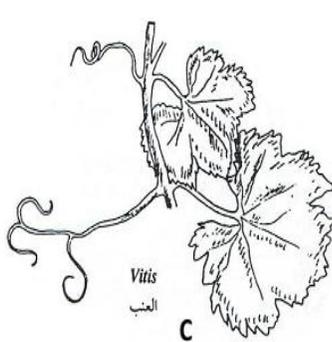
d. Les Cladodes (rameaux modifiés) : ce sont des rameaux courts constitués d'un seul entre-nœud aplati, forte ressemblance avec des feuille; Ex : cladode de Ruscus (=le fragon), la différence permettant de les distinguer des feuilles : les cladodes sont toujours axillés par des feuilles réduites et écailleuses.

e. Les rameaux-épineux ou dards : ce sont des rameaux à croissance limitée ; leur bourgeon terminal durcit, se transforme en épine (dard).Ex: chez les plantes des zones arides en général, l'aiguillons chez le genêt et le dard de rosier.

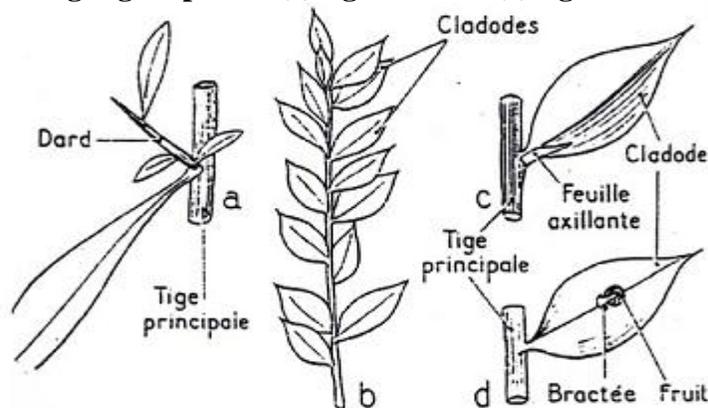
f. Les tiges succulentes : ce sont des tiges charnues et gorgées d'eau chez les plantes adaptées à la sécheresse ; ex : les cactacées, les crassulacées... La tige de ces plantes contient un tissu aquifère (contenant beaucoup d'eau), un épiderme dépourvu de stomates et possédant une cuticule très épaisse ; les feuilles sont absentes ou très petites (écailles), ou encore réduites à des épines, et cela pour empêcher l'évaporation de l'eau.

(2). Les tiges souterraines

- Collectivement les tiges souterraines sont connues sous la désignation de rhizomes. **Les rhizomes** demeurent près de la surface du sol et la suit horizontalement, ils ressemblent à une racine mais porte des nœuds, des feuilles écailleuses, des bourgeons et des racines adventives. Comme les fougères, le chiendent par exemple.
- **Le tubercule ou tige tubérisée**, par exemple la pomme de terre, est une tige souterraine gonflée de réserves et dont les entre-nœuds sont plus rapprochés que ceux du rhizome. Les yeux de la pomme de terre constituent les nœuds où se trouvent les bourgeons.
- **Un corne** est un rhizome épais et très court, souvent plus large que long. Il croît à la verticale (contrairement aux autres qui le font horizontalement). Souvent, des bourgeons et des racines se développent aux nœuds du corne. Après un certain temps les bourgeons forment d'autres cornes et le premier meurt par exemple; le glaïeul, le crocus et l'iris.
- **Les bulbilles** ressemblent à de petits bulbes, mais ils sont en fait des bourgeons ou des petits rameaux dont les parenchymes se sont épaissis à cause des réserves. C'est le cas de l'ail et du lys tigré.



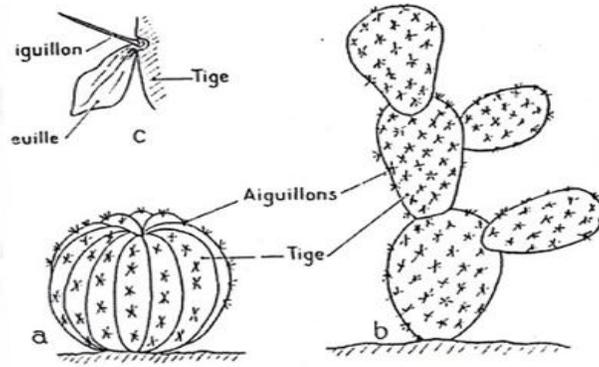
Les tiges grimpantes (c) tige à vrilles (e) tige volubiles



Cladodes

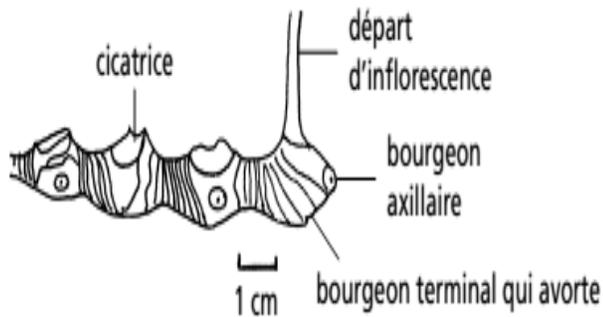


Dards

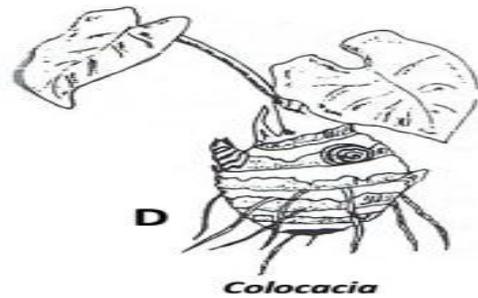


Tige succulente

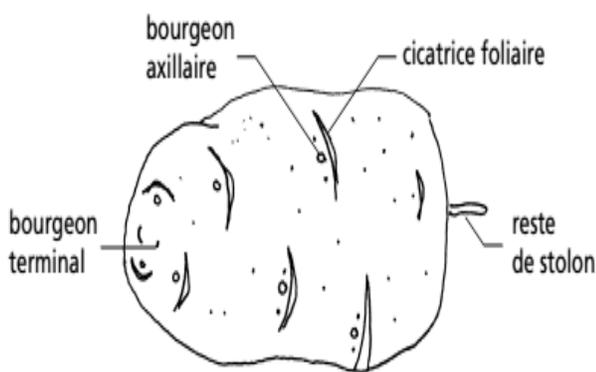
Figure 168 : Les tiges aériennes



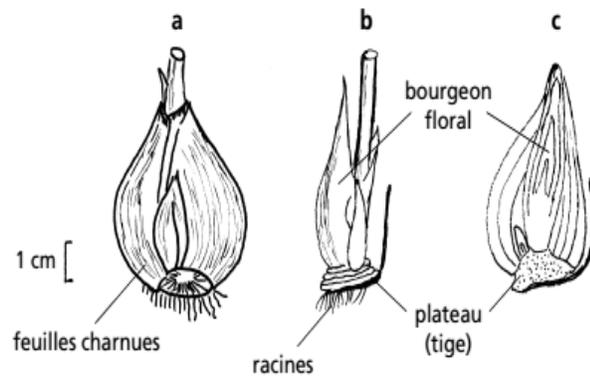
Rhizome du sceau de Salomon



Corme



Tubercule de pomme de terre



Bulbe de tulipe.

Figure 169: Les tiges souterraines

6.1.3. Feuilles

La feuille est un appendice latéral de la tige sur laquelle elle s'insère au niveau d'un nœud. Elle se met en place grâce au fonctionnement du **méristème caulinaire** situé à l'apex d'un **bourgeon**. Sa forme **aplatie** lui permet de capter un maximum de lumière ce qui permet **la photosynthèse** dans les chloroplastes des cellules du parenchyme. Une feuille simple est constituée d'une partie plane, **le limbe** et d'une partie plus fine intermédiaire entre le limbe et la tige, **le pétiole**. Le pétiole peut parfois s'élargir à sa base, il devient **une gaine** entourant plus ou moins la tige. Cette gaine se retrouve aussi chez certaines plantes dont les feuilles sont dépourvues de pétioles (maïs, commelina) Parfois, le limbe est découpé en plusieurs parties indépendantes, la feuille est alors **composée** de folioles.

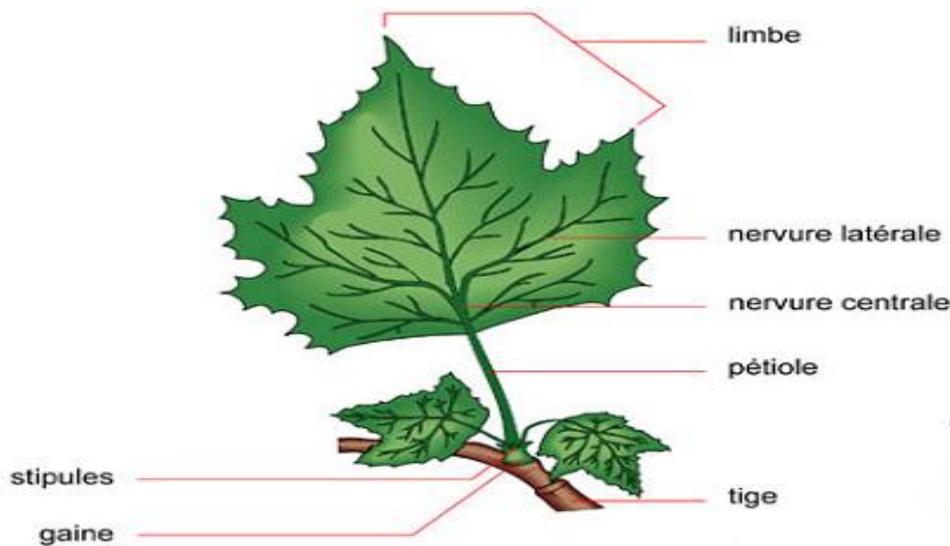


Figure 170 : Structure d'une feuille

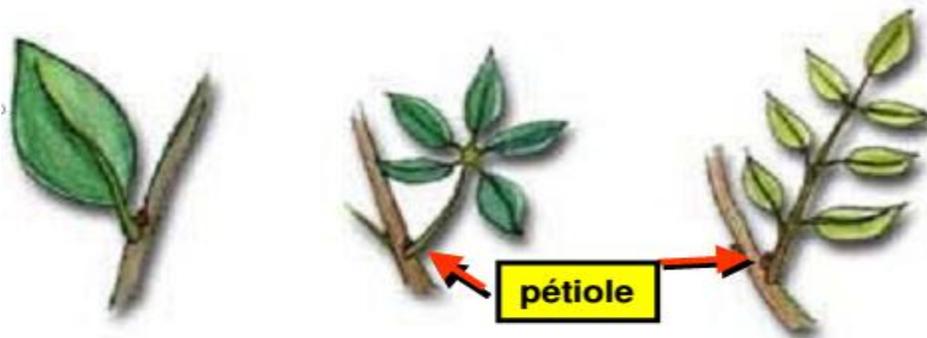
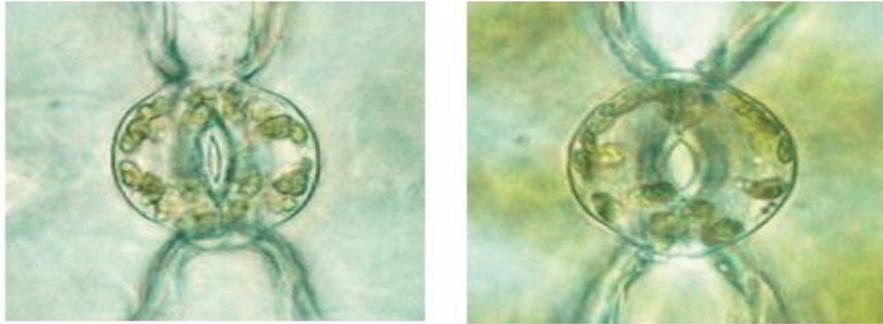


Figure 171 : Feuilles simples ou composées

Selon que l'on observe une **Monocotylédone** ou une **Dicotylédone** on remarque quelques différences morphologiques et anatomiques : nervation **parallèle**, stomates sur les faces **ventrale** et **dorsale**, mésophylle généralement **homogène** et **pas de côtes** très saillantes chez les Monocotylédones, nervation **réticulée**, stomates plus nombreux sur la face **dorsale**, mésophylle **hétérogène** et **côtes saillantes** chez les Dicotylédones.



Stomate fermé

Stomate ouvert

Figure 172 : Stomates

Les feuilles peuvent avoir une position **alternes**, une seule à chaque niveau (cerisier), ou **opposées**, 2 feuilles l'une en face de l'autre (lilas, troène), ou **verticillées** plusieurs feuilles à chaque niveau (catalpa).



Opposées

Alternes

Verticillées

Figure 173 : Disposition des feuilles

La forme du limbe chez les feuilles **dicotylédones**: entier, denté, lobé, très découpé, composé, tant pour les feuilles à nervation pennée que pour celle à nervation palmée. Les feuilles sont le plus souvent allongées, longilignes, rubanées. Chez les feuilles de **monocotylédones**.



Lancéolée

Ovale

Cordée

Triangulaire

Figure 174: Formes de feuilles

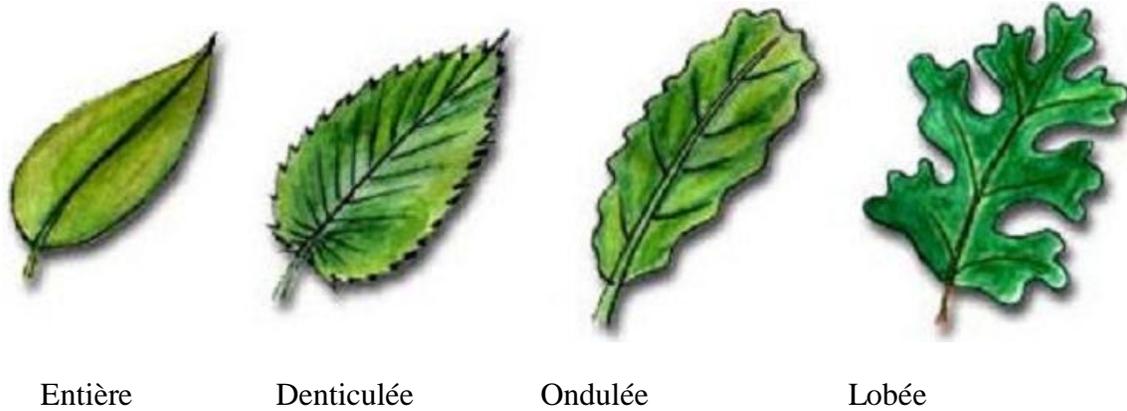


Figure 175 : Marges de feuilles

Les nervures visibles sur le limbe d'une feuille correspondent aux tissus conducteurs de la tige. Elles peuvent être disposées **parallèlement** (chlorophytum) ou être ramifiées en forme de **penne** (rosier), de **palme** (érable).

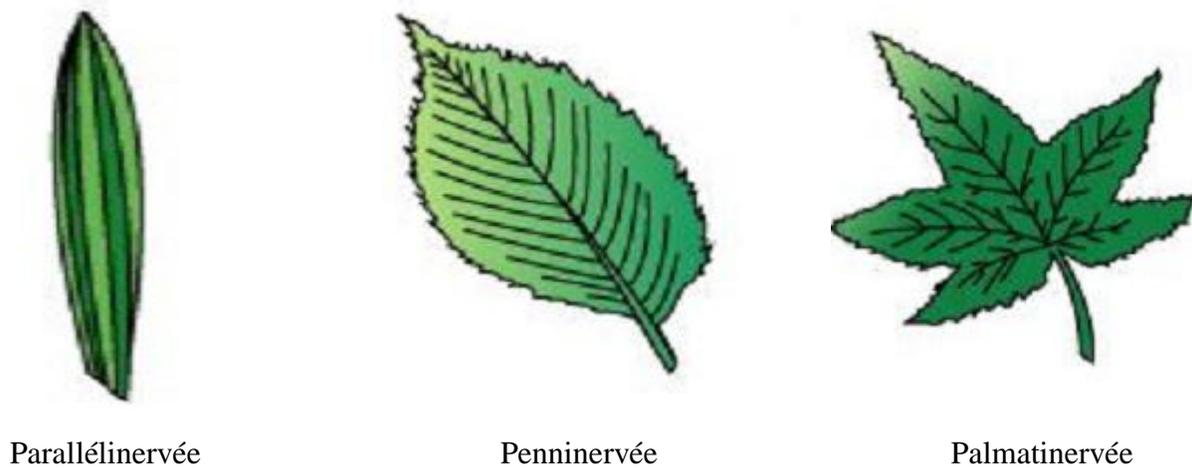


Figure 176 : Types de nervures

Les bords du limbe peuvent être entiers (lilas), dentés (rosiers), lobés (chêne). A la base du pétiole, se trouve parfois un élément ressemblant plus ou moins à une feuille, le stipule (aubépine.).

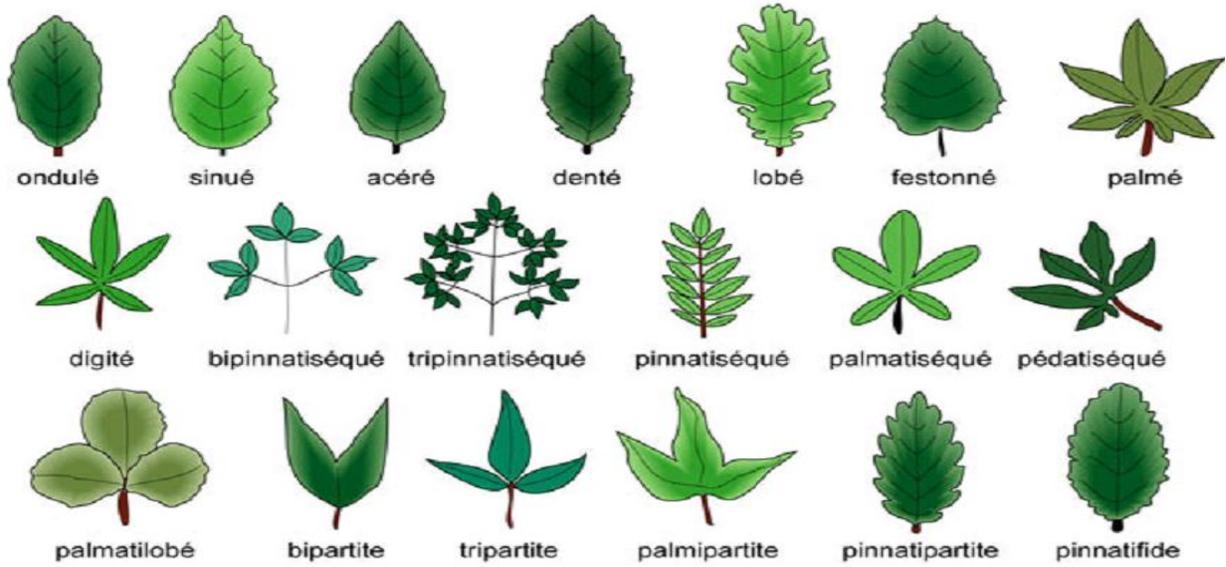


Figure 177 : Les bords des limbes

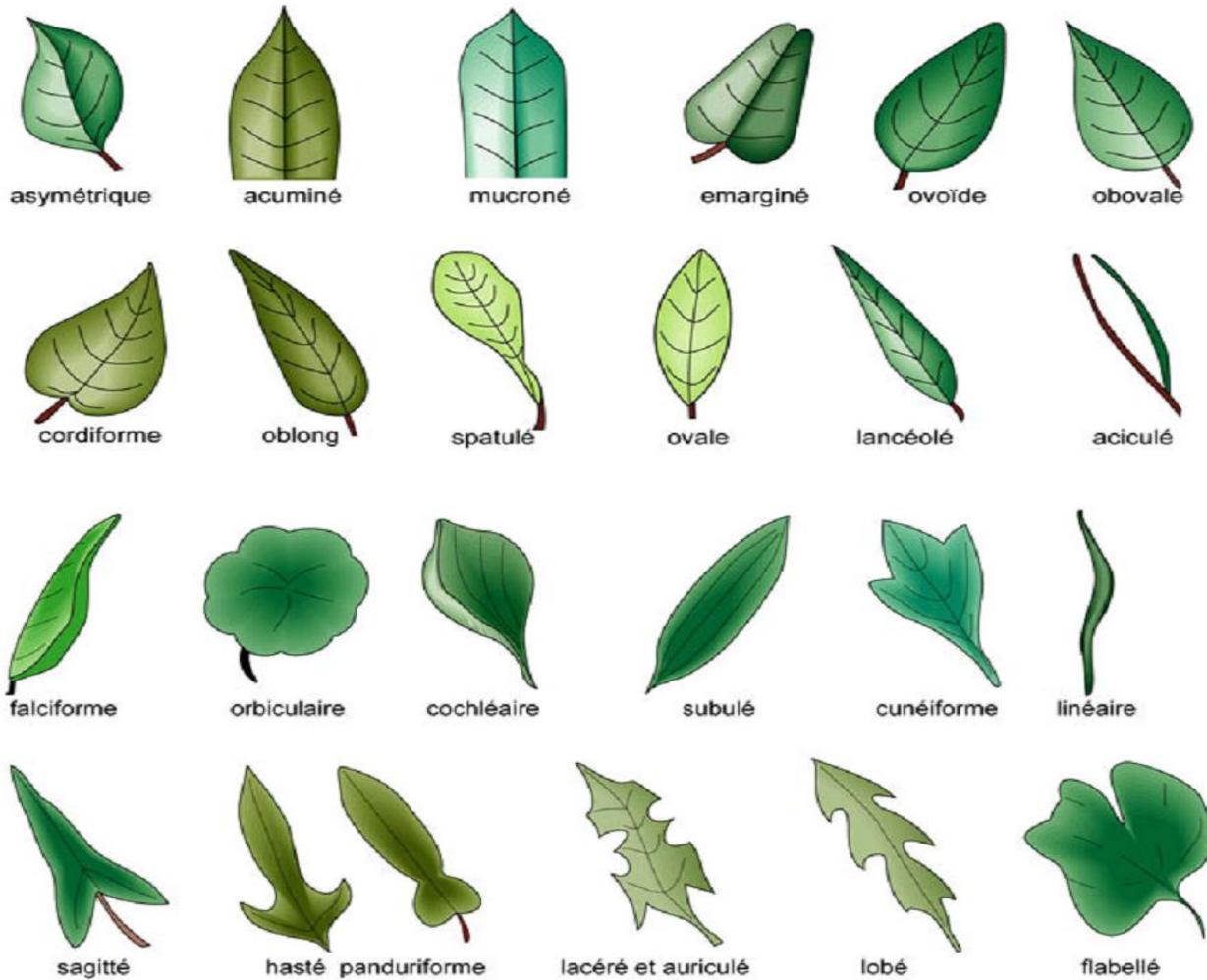


Figure 178 : Les différentes formes des limbes

6.1.3.1. Adaptations biologiques et écologiques de la feuille

Certaines contraintes du milieu ou l'accomplissement de fonctions spécifiques engendrent d'autres adaptations morphologiques des feuilles. On appelle par exemple feuilles **laciniées**, le limbe réduit aux seules nervures chez certaines plantes aquatiques comme la Renoncule aquatique. D'autres adaptations sont dictées par les carences en eau induites par un milieu sec. Ainsi, les sclérophytes ou xérophytes présentent des feuilles en forme **d'aiguilles** visant à diminuer la transpiration. C'est le cas de beaucoup de feuilles **charnues** de réserve présentes dans le bulbe de nombreuses plantes, comme l'Ail, l'Oignon, la Tulipe, le Lis...

Les feuilles peuvent aussi donner naissance à des **épines**. Chez le Houx, la marge des feuilles porte des épines foliaires, situées à l'extrémité des nervures. L'Épine-vinette ou Berbéris voit les feuilles des rameaux principaux se transformer entièrement en épines tandis que les rameaux axillaires présentent des feuilles normales mais au développement réduit.

6.1.4. Notion de morphogénèse: croissance des tiges, feuilles et racines

La morphogénèse : est l'ensemble des mécanismes (croissance, organogénèse) qui participent à la croissance des plantes. La croissance de la tige et des racines est réalisée par l'activité de leurs extrémités appelées **apex caulinaire (méristème caulinaire)** et **apex racinaire (méristème racinaire)** (figure 179) :

a. Le méristème caulinaire: le méristème caulinaire (de la tige) est responsable de l'édification de la partie aérienne de la plante, de lui, apparaissent des cellules qui en se multipliant et en se différenciant donneront les tiges, les feuilles, les bourgeons axillaires et les bourgeons floraux, il est donc histogène et organogène. De manière tout à fait répétitive et indéfinie, jusqu'à la mort de la plante. Le méristème caulinaire n'est pas constitué d'un simple empilement de cellules, mais en réalité de plusieurs zones sans limites très nettes. Chez les Angiospermes, ce méristème forme un dôme de 0,5 à 3 mm de diamètre, composé de cellules de petite taille.

b. Le méristème racinaire: le méristème apical de la racine est lui aussi formé durant l'embryogénèse. Il élabore les tissus de la racine et la coiffe: il est uniquement histogène. Il ne produit pas d'organes latéraux et n'est donc pas organogène. Les racines latérales se forment de manière endogène à quelque distance de l'apex à partir du péricycle (assise cellulaire située entre l'écorce et la stèle). Le péricycle initie les ramifications de la racine. La structure et le fonctionnement des ramifications sont identiques à celui du méristème apical de la racine.

L'observation des méristèmes caulinaires et racinaires montre donc que :

- dans les bourgeons la multiplication des cellules méristématiques permet la mise en place de nouveaux nœuds avec des ébauches foliaires et d'entre-nœuds très courts. Ceci permet la croissance terminale de la tige.
- la multiplication des cellules méristématiques de l'apex racinaire entraîne aussi une croissance terminale, mais sans construction de nouveaux organes, la racine étant toujours sans feuille.

• dans les deux cas, la persistance de méristèmes primaires aux points végétatifs permet une croissance théoriquement indéfinie. Il n'en est pas de même de la feuille, car son méristème a une vie limitée dans le temps. La feuille est un organe à croissance définie contrairement à la tige et à la racine.

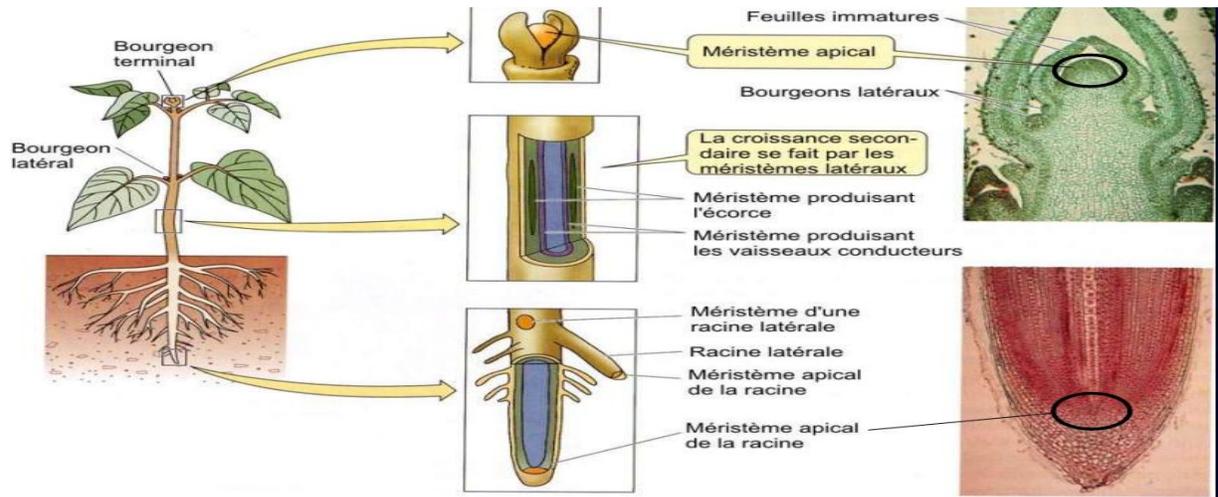


Figure 179 : Les mécanismes de la morphogenèse végétale

6.2. Morphologie florale (organisation de la fleur, inflorescences)

6.2.1. Organisation de la fleur

Une **fleur** est faite d'un ensemble de pièces correspondant à des feuilles très transformées au cours de l'évolution et insérées à l'extrémité d'un **pédoncule** (ou d'un pédicelle dans le cas d'un groupe de fleurs ou inflorescence) sur un **réceptacle**. La fleur présente soit une symétrie radiaire (comme une roue), dite **actinomorphe**, soit bilatérale (gauche-droite), dite **zygomorphe**. Dans la majorité des cas, la fleur possède à la fois un androcée et un gynécée : elle est dite **bisexuée** ou **hermaphrodite**.

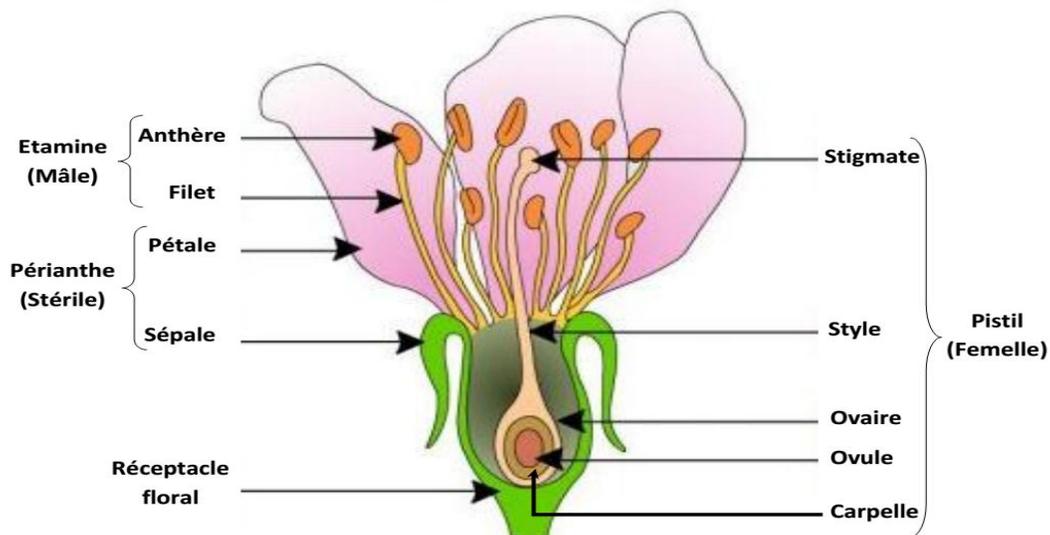


Figure 180 : Coupe longitudinale d'une fleur

6.2.1.1. Le réceptacle est l'extrémité renflée de l'axe floral où s'insèrent les pièces florales, en réalité c'est un axe dont les nœuds et entre-nœuds sont très rapprochés. Dans une fleur complète, le réceptacle porte les pièces florales, c'est-à-dire le périanthe composé du calice et de la corolle, l'androcée et le gynécée. Les pièces florales s'y insèrent en verticilles concentriques (**fleur cyclique**) ou parfois hélicoïdalement (**fleur acyclique** ou **spiralée**). Les fleurs dont une partie des pièces s'insère hélicoïdalement et l'autre est disposée en verticilles, sont dites **hémicycliques**.

Ce réceptacle prend différentes formes. On distingue schématiquement le réceptacle :

- **thalamiflore** : de forme conique ou convexe
- **caliciflore** : en forme de calice (concave ou en coupe)
- **disciflore** : comprenant un disque nectarifère

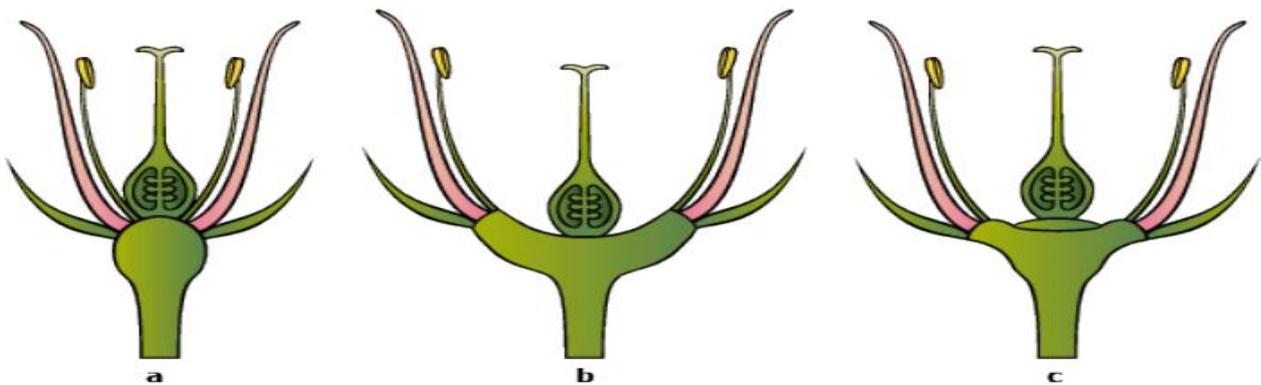


Figure 181 : Types de réceptacle : a. Thalamiflore - b. Caliciflore - c. Disciflore

6.2.1.2. Le périanthe

Partie stérile de la fleur comprenant le calice et la corolle, le périanthe est constitué, au plus, de **sépales** et de **pétales**, sans qu'il soit toujours possible de distinguer ces deux catégories de pièces florales. On parle alors de **tépales**. Sépales, pétales et tépales sont de taille très variable d'une espèce à l'autre (du millimètre à plusieurs dizaines de centimètres)

- **Calice**

Cette partie de la fleur, la moins variables de toutes, tend à disparaître chez certaines familles (Ombellifères), ou est disparue totalement (asépale de fleurs incomplètes). Partie habituellement la plus discrètes, il arrive quelquefois qu'elle soit plus voyante, tant la taille par la couleur des sépales. C'est le cas du Nymphaea lutea (Nymphaeacées). En effet, le Nénuphar jaune possède cinq grands sépales jaunes masquant de nombreux petits pétales minces. Le calice est **isomère** le plus fréquemment, **méiomère** ou **pléiomère** plus rarement. Par leur forme et leur teinte verte, les sépales rappellent, en plus simples, bractées et préfeuilles, mais sont pétaloïdes d'une manière générale chez les monocotylédones. Les sépales d'une fleur sont tous semblables (**homosépale**) ou, plus rarement, de type (**hétérosépale**). Les sépales sont libres (**dialysépale**) ou soudés entre eux sur des longueurs variables (**gamosépale**).

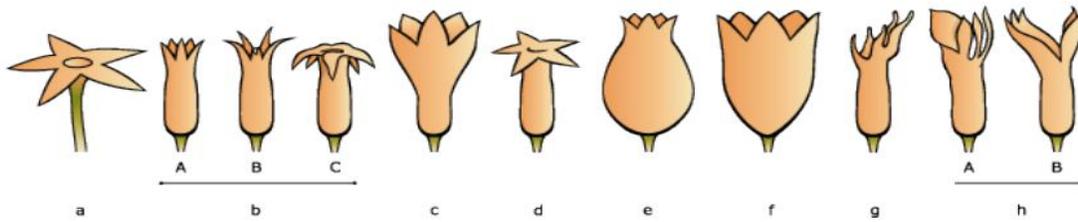


Figure 182 : Principaux types de calices

a-f : calices actinomorphes; g-h : calices zygomorphes. a : étoilé; b : tubuleux (A : à dents dressées; B : à dents étalées; C : à dents réfléchies); c : infundibuliforme; d : hypocrotéforme; e : urcéolé; f : campanulé; g : urcéolé-bilabié; h : bilabié (A : à lèvre supérieure entière et lèvre inférieure trilobée; B : à lèvre supérieure trilobée et lèvre inférieure bilobée)

- Corolle

Partie la plus visible du périanthe, sauf exceptions, la corolle est beaucoup plus diversifiée que le calice. Comme ce dernier, elle peut être absente, l'**apétalie** étant beaucoup plus répandue que l'**acépalie** chez les fleurs **incomplètes**. Comme le calice, la corolle est surtout **isomère**, mais il existe des exemples de **méiomérie** et de **pléiomerie**. Il est inutile d'insister sur la richesse extraordinaire des formes et des couleurs. Les pétales sont tous semblables (**homopétalie**) ou divers dans une même fleur (**hétéropétalie**). Comme les sépales les pétales sont libres (**dialyspétalie**) ou soudés entre eux (**gamopétalie**).

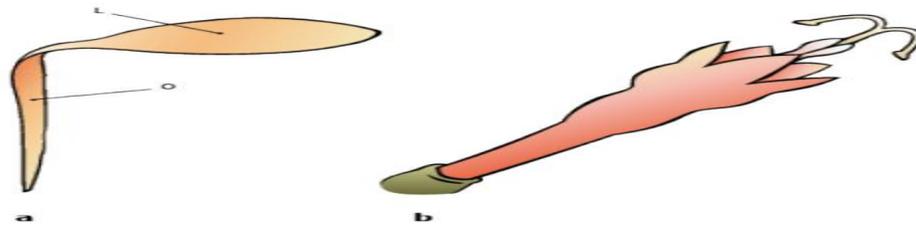


Figure 183 : Pétales libres (a. Dialyspétale) et soudés (b. Gamopétale)

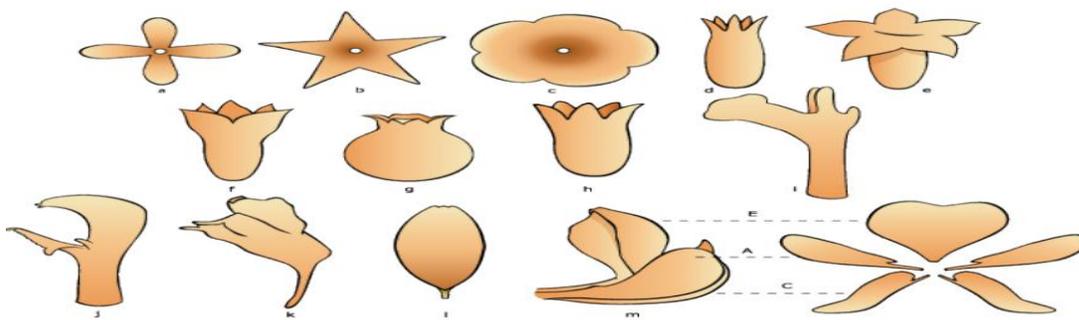


Figure 184: Principaux types de corolles

a-h : corolles actinomorphes ; i-m : corolles zygomorphes a : cruciforme; b : étoilée; c : rotacée; d : tubuleuse; e : infundibuliforme; f : hypocrotéforme; g : urcéolée; h : campanulée; i : unilabiée; j : bilabiée; k : personnée-éperonnée; l : ligulée; m : papilionacée (A : ailes; C : carène; E : étendard).

6.2.1.3. L'androcée

Alors que le périgone est constitué de pièces florales stériles, les étamines porteuses de pollen représentent la **partie male** de la fleur, tandis que le gynécée en est la partie femelle. Comme les sépales et les pétales, les étamines d'une même fleur ne sont pas toujours de la même taille. A maturité, une étamine est fréquemment constituée d'un **filet** généralement grêle et allongé assurant sa fixation sur le réceptacle et d'une partie terminale dilatée, l'**anthère**, comprenant deux loges polliniques unies par un prolongement du filet, le **connectif**. Les étamines sont libres (**dialystémone**) ou soudées entre elles (**gamostémone**) par leurs filets (synstémone des Malvacées, Papilionacées), ou plus rarement par leurs anthères. Si tous les filets sont soudés, l'androcée constitue un tout. Il est dit **monadelph** (Malvacées). Au contraire, il est **diadelph** (Papilionacées) quand les étamines forment deux groupes, **triadelph** pour trois groupes, etc.

-La **libération du pollen** se fait par déhiscence des anthères selon différentes possibilités

- la **déhiscence loculicide longitudinale** : via une fente longitudinale dans le sens de l'axe de la thèque.
- la **déhiscence loculicide transversale** : via une fente transversale à l'axe de la thèque. Cas plus rare.
- la **déhiscence valvaire** : ouverture par de petits clapets, généralement en position latérale.
- la **déhiscence poricide** : ouverture par un petit trou, généralement en position apicale.

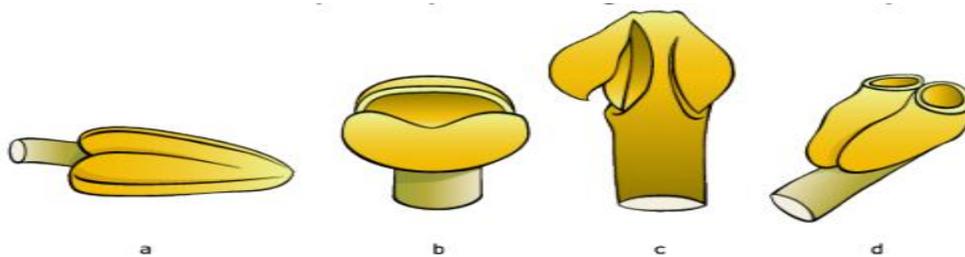


Figure 185 :Déhiscence des anthères : a. loculicide longitudinale - b. loculicide transversale - c. valvaire - d. poricide

-La **surface des grains de pollen** est très variable d'une espèce à l'autre. À titre illustratif, vous trouverez quatre formes différentes ci-contre.

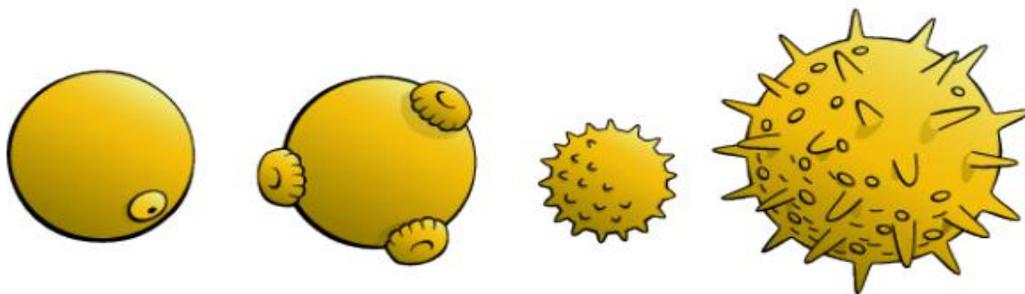


Figure 186 : Surface des grains de pollen

6.2.1.4. Le gynécée

Le gynécée ou pistil ou organe **femelle** est l'ensemble des **carpelles** d'une même fleur. Une partie importante du gynécée persiste après **la fécondation** et évolue en **fruit**. Le gynécée est parfois réduit à un seul carpelle. S'ils sont plusieurs, les carpelles sont **libres** ou **soudés** entre eux selon différents types d'organisation. Selon que les carpelles sont indépendants ou soudés et selon que chaque lame carpellaire est refermée sur elle-même ou forme **un ovaire** constitué de plusieurs lames, on distingue les principaux types de gynécées suivants :

- **Le gynécée apocarpe** : gynécée formé de carpelles indépendants ou d'un carpelle unique (**gynécée unicarpellaire**). Les gynécées apocarpes formés de plusieurs carpelles indépendants se rencontrent principalement chez les angiospermes primitives (magnoliacées, etc.). La présence d'un carpelle unique n'est pas considérée comme un caractère primitif, mais au contraire, comme la simplification d'un gynécée multicarpellé.

- **Le gynécée coenocarpe (ou syncarpe)** : gynécée formé de carpelles partiellement ou totalement soudés. On distingue plusieurs cas :

- **soudure peu intime** des carpelles (carpelles dits coalescents), limitée éventuellement à la base de ceux-ci.

- **soudure plus accentuée**, avec constitution d'un ovaire unique, les styles restant cependant toujours indépendants.

- **soudure affectant les ovaires et les styles** : il en résulte un ovaire et un style uniques, mais les stigmates restent autonomes, indiquant le nombre de carpelles.

-**soudure complète** : le pistil ne comprend donc plus qu'un ovaire, un style et un stigmate.

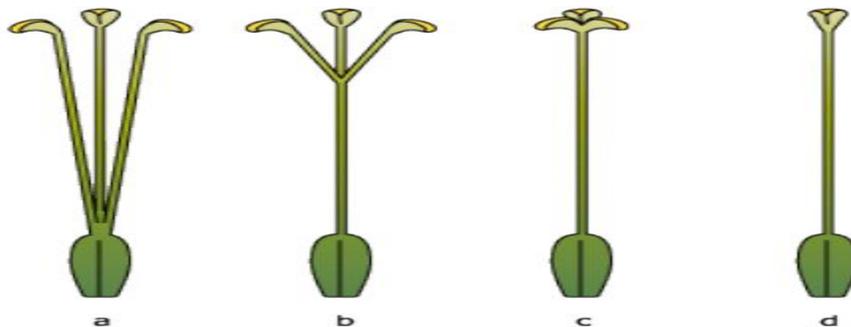


Figure 187: Gynécée syncarpe (ou coenocarpe)

a) union totale des ovaires, les styles demeurant indépendants - b) union totale des ovaires, union partielle des styles -c) union totale des ovaires et des styles, les stigmates demeurant libres - d) union totale des ovaires, styles et stigmates.

L'**union des carpelles**, ou plus précisément des **lamelles carpellaires**, varie également dans le cas des gynécées syncarpes :

- **les lamelles carpellaires** sont **fermées** sur elles-mêmes (**carpelles fermés**) et soudées entre elles par leurs faces dorsales, la cavité de l'ovaire comprend autant de loges que de carpelles délimités par des cloisons ou septums (ovaire biloculaire, triloculaire ou pluriloculaire).
- **les lamelles carpellaires** sont **ouvertes** et **soudées** par leurs bords, la cavité de l'ovaire ne comprend alors qu'une seule grande loge sans cloison mais formée par plusieurs carpelles (ovaire uniloculaire).

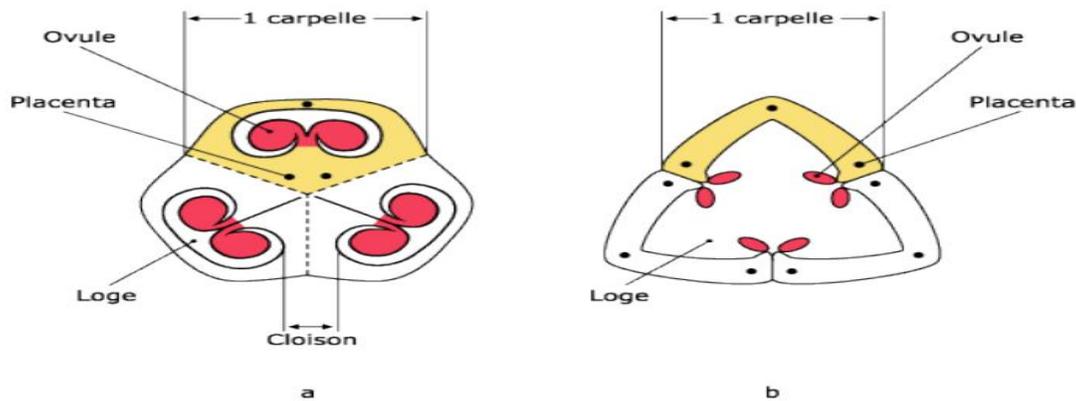


Figure 188: Cloisonnement de l'ovaire :

a. ovaire composé pluriloculaire (syncarpe) - b. ovaire composé uniloculaire (paracarpe)

a. **Le carpelle**, généralement vert, comprend typiquement de la base au sommet, une partie basilaire dilatée et creuse, nommée **ovaire** contenant un ou plusieurs **ovules**, une partie médiane, le **style**, et une partie terminale, le **stigmate** papilleux. Le stigmate est normalement un collecteur de **pollen** et le style, une voie de passage du **tube pollinique** vers la cavité de l'ovaire. Le style et le stigmate prennent différentes formes.

b. L'**ovaire** est dit **semi-infère** s'il est partiellement enfoncé et soudé dans le réceptacle, **infère**, s'il est totalement enfoncé et soudé et **supère**, s'il ne l'est pas du tout, que le réceptacle soit creusé ou non.

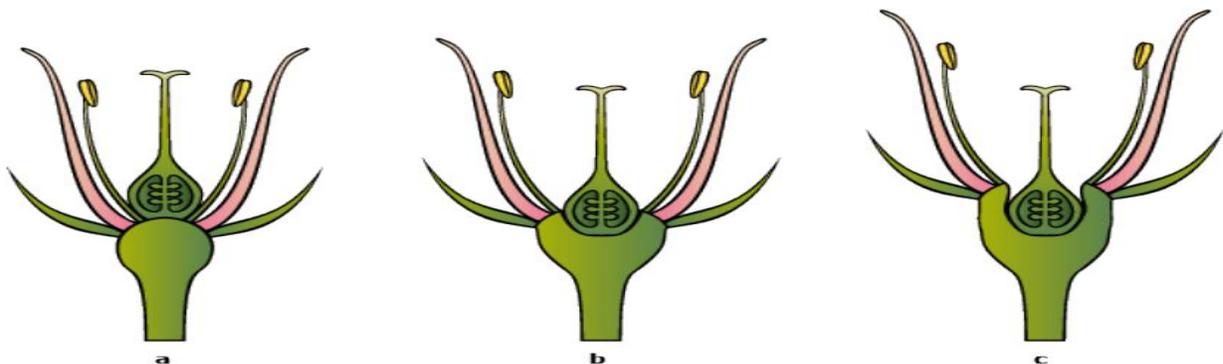


Figure 189: Position de l'ovaire : a. supère - b. semi-infère - c. infère

En ce qui concerne la **disposition des pièces florales** sur le réceptacle, on rencontre les cas suivants :

- (1) **disposition spiralée** ou acyclique ;
- (2) **disposition hémisspiralée** ou hémicyclique : certaines pièces ayant une disposition spiralée, les autres, généralement celles du périanthe, étant verticillées ;
- (3) **disposition verticillée** ou cyclique (cas le plus fréquent).

Le nombre de **pièces florales** par verticille varie également. On distingue les fleurs :

- (1) **trimères** ou fleurs constituées de verticilles successifs de 3 pièces chacun
- (2) **tétramères**, (3) **pentamères**, (4) **polymères**.

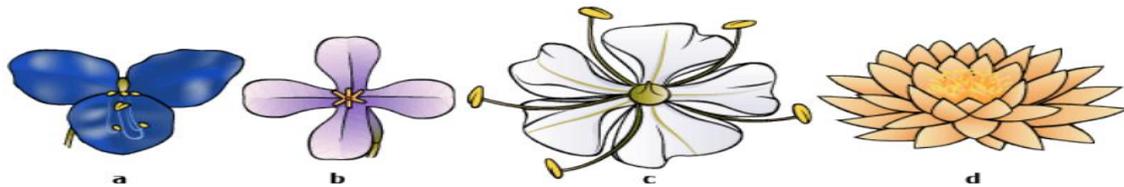


Figure 190 : Nombre de pièces florales par verticille

: a. trimère - b. tétramère - c. pentamère - d. polymère

6.2.1.5. Symétrie florale

On distingue des fleurs symétriques, et, plus rarement, des fleurs asymétriques :

Les fleurs symétriques : elles sont de deux types suivant qu'elles admettent un axe ou un plan de symétrie. Dans le premier cas, les fleurs sont régulières ou **actinomorphe**, dans le second cas les fleurs sont dites irrégulières ou **zygomorphes**.

Les fleurs asymétriques : L'absence d'axe ou de plan de symétrie est très souvent liée à l'avortement de certaines pièces florales (Valérianacées).

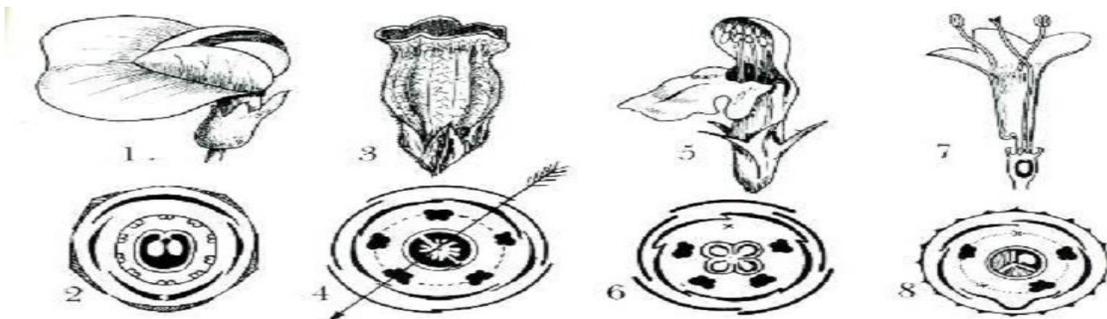


Figure 191: Principaux types de zygomorphies :

1-2. Symétrie médiane (Fabacée), 3-4. Zygomorphie transverse (Solanacée), 5-6. Symétrie médiane et corolle bilabiée (Lamiacée), 7-8. Fleur asymétrique de Valeriana (Valérianacée)

6.2.1.6. Organisation florale

Les espèces **hermaphrodit**es, c'est-à-dire munies à la fois d'un androcée et d'un gynécée, sont les plus nombreuses ; on distingue néanmoins des espèces **monoïques** (plante dont les organes reproducteurs mâles et femelles sont portés par le même individu) et des espèces **dioïques** (plante dont les organes reproducteurs mâles et les organes reproducteurs femelles sont portés par des individus différents).

Lorsqu'on passe au niveau des fleurs elles-mêmes, on qualifie de **monocline** les fleurs hermaphrodit

(1) **l'hermaphroditisme (= plante monoïque monocline)** : une espèce est dite hermaphrodite lorsque chacune de ses fleurs est-elle même hermaphrodite (monocline), c'est-à-dire munie à la fois d'un androcée et d'un gynécée, par opposition aux fleurs unisexuées. C'est le cas de la très grande majorité des angiospermes.

(2) **la monoécie (= plante monoïque dicline)** : dans ce cas, chaque individu produit, comme chez les espèces hermaphrodite, des étamines et des carpelles, mais ces organes sont portés par des fleurs unisexuées différentes sur le même individu. Une plante monoïque portera donc des fleurs mâles (fleurs staminées) et des fleurs femelles leurs pistillées) sur le même individu. Un même génotype est donc à l'origine des cellules reproductrices mâles et femelles (comme pour l'hermaphroditisme).

(3) **la dioécie (= plante dioïque dicline)** : une espèce est dioïque quand ses fleurs mâles et ses fleurs femelles sont portées par des pieds différents. Il existe des plantes mâles portant uniquement des fleurs staminées et des plantes femelles portant uniquement des fleurs pistillées. Les organes reproducteurs mâles et femelles sont donc portés par des fleurs unisexuées différentes sur des individus différents. Avec la dioécie, les cellules reproductrices mâles et femelles sont formées à partir de deux génotypes différents.

(4) **la polygamie** : les espèces polygames forment à la fois des fleurs hermaphrodit

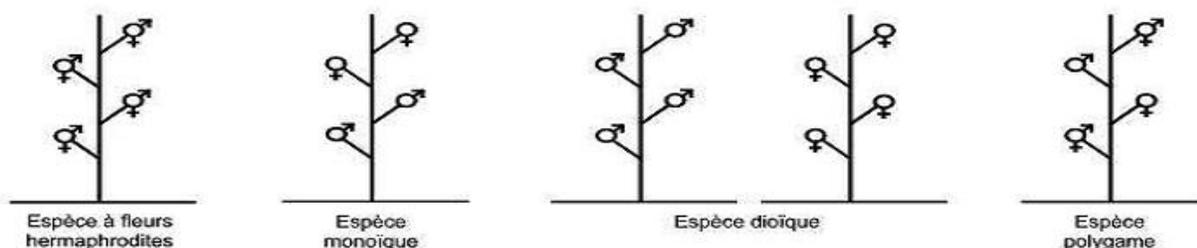


Figure 192: La répartition des sexes dans les fleurs, sur les individus et chez les espèces ; , fleur hermaphrodite ; , fleur mâle ; , fleur femelle

6.2.2. Les inflorescences

Les inflorescences paraissent très variées, mais en fait il s'agit d'une combinaison de deux types fondamentaux (qui correspondent aux deux modes principaux de croissance des tiges) :

(1)-**les inflorescences monopodiale ou racémeuse** : la croissance est indéfinie, le méristème terminant l'axe à un fonctionnement similaire à un point végétatif caulinare.

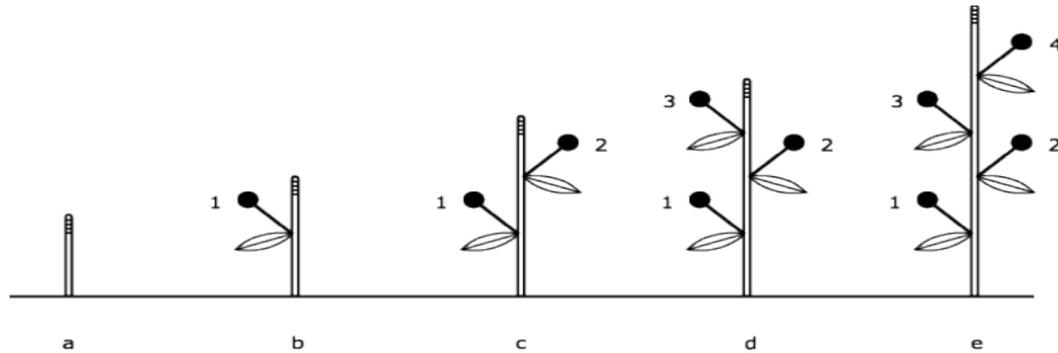


Figure 193: Formation des fleurs dans un racème (croissance indéfinie)

(2)- **les inflorescences sympodiale ou cymeuse** (la croissance est définie, une fleur occupe toujours le sommet de l'axe)

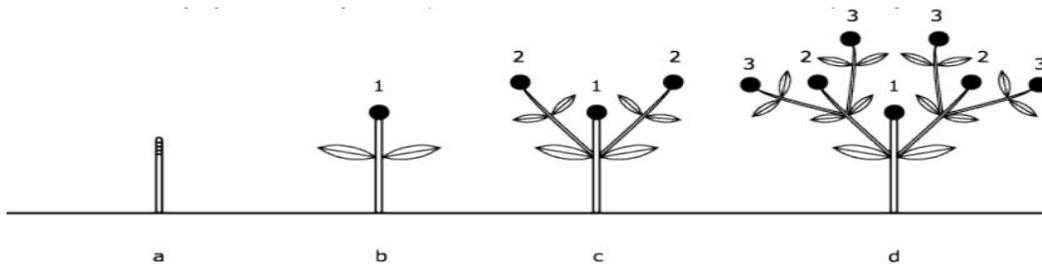


Figure 194: Formation des fleurs dans une cyme (croissance définie)

• **Cas des inflorescences simples monopodiales (ou racémeuses ou indéfinies).**

L'axe principal présente en principe une croissance prolongée et les pédicelles floraux naissent directement sur cet axe. La floraison est **acropète** ou **centripète**, c'est-à-dire qu'elle se fait progressivement de la base vers le sommet ou de l'extérieur vers l'intérieur. On distingue principalement dans cette catégorie :

(1) **le racème ou grappe** : l'axe allongé central porte des fleurs dont les pédicelles diminuent de longueur au fur et à mesure que l'on s'approche du sommet de l'axe.

(2) **l'épi** : qui est une grappe (racème) à fleurs sessiles (c'est-à-dire dépourvues de pédicelle).

(3) **le corymbe** : variante de la grappe (racème) dans laquelle les pédicelles floraux sont de longueur inégale, amenant toutes les fleurs à peu près au même niveau horizontal.

(4) **l'ombelle** : l'axe principal demeure extrêmement court et tous les pédicelles sont insérés pratiquement au même point, les bractées forment souvent des spathes ou des involucre.

(5) **le capitule** : l'axe raccourci mais en même temps plus ou moins élargi, souvent en forme de plateau, porte des fleurs sessiles, les bractées sont souvent disposées en involucre.

A côté de ces cas, il faut citer quelques variantes remarquables de l'épi :

- (1) **le chaton** : axe grêle et flexible, fréquemment pendant, portant des fleurs réduites unisexuées nues ou à périgone plus ou moins réduit (ex. : Salicaceae).
- (2) **le spadice** : axe charnu, portant des fleurs réduites, souvent associé à une spathe (ex. : Araceae).

•Cas des inflorescences simples sympodiales (ou cymeuses ou définies).

L'axe principal a une croissance **arrêtée** (avec souvent formation d'une fleur terminale), un, deux ou plusieurs rameaux latéraux se développent rapidement, dépassant l'extrémité de l'axe principal, à leur tour, ces rameaux voient en général leur croissance arrêtée et ils sont relayés par des rameaux latéraux de deuxième ordre et ainsi de suite. La floraison est **centrifuge**, c'est-à-dire qu'elle se fait progressivement de l'intérieur vers la périphérie. Toutes ces inflorescences portent le nom de **cymes**. Une **cyme** est donc une inflorescence ramifiée. On en distingue trois types fondamentaux :

(1) **la cyme bipare (ou dichasiale ou pseudo-dichotomique)** : sous une fleur terminale, apparaissent, à l'aisselle de deux bractées opposées (les bractées ne sont pas toujours présentes), deux fleurs de second ordre. Ce motif, se répétant de nombreuses fois forme la cyme bipare. La cyme bipare est donc constituée de deux rameaux latéraux par nœud.

(2) **la cyme unipare (ou monochasiale)** : un seul rameau continue la croissance de l'axe. La cyme unipare se décline en plusieurs variantes selon l'alternance ou l'alignement des ramifications de la cyme :

a. **cyme unipare hélicoïde** : les rameaux alternent régulièrement et sont en hélice. Ils miment un pseudo-axe.

b. **cyme unipare en éventail** : les rameaux alternent régulièrement mais sont dans un même plan.

c. **cyme unipare scorpioïde** : les rameaux se développent dans un même plan et du même côté. La cyme unipare s'enroule alors en spirale.

(3) **le glomérule** : cyme, généralement bipare, à ramifications raccourcies avec des groupes de fleurs sessiles insérées au même niveau. Deux variantes de glomérule :

a. **glomérule (cyme bipare)**

b. glomérule (cyme unipare)

Dans les **inflorescences composées**, l'axe principal de l'inflorescence porte non pas des fleurs mais des inflorescences secondaires (dites partielles). Ces dernières sont du même type que l'inflorescence principale (**inflorescence composées homogènes ou homomorphes ou homotactiques**) ou d'un type différent (**inflorescences composées mixtes ou hétérotactiques**).

Les principaux cas rencontrés parmi les **inflorescences composées homogènes** sont les suivants :

- (1) **la panicule** : racème composée de racèmes .
- (2) **l'ombelle composée** : ombelle composée elle-même de petites ombelles, appelées ombellules .
- (3) **le corymbe de corymbes**.
- (4) **l'épi d'épillets** (nombreuses Graminées).
- (5) **le capitule de capitule**.

Les principaux cas rencontrés parmi les **inflorescences composées mixtes** sont :

- (1) **le racème de cymes** (Vigne, Thyrses).
- (2) **le racème d'épillets** (Avoine).
- (3) **le corymbe de capitules** (Achillée millefeuilles).

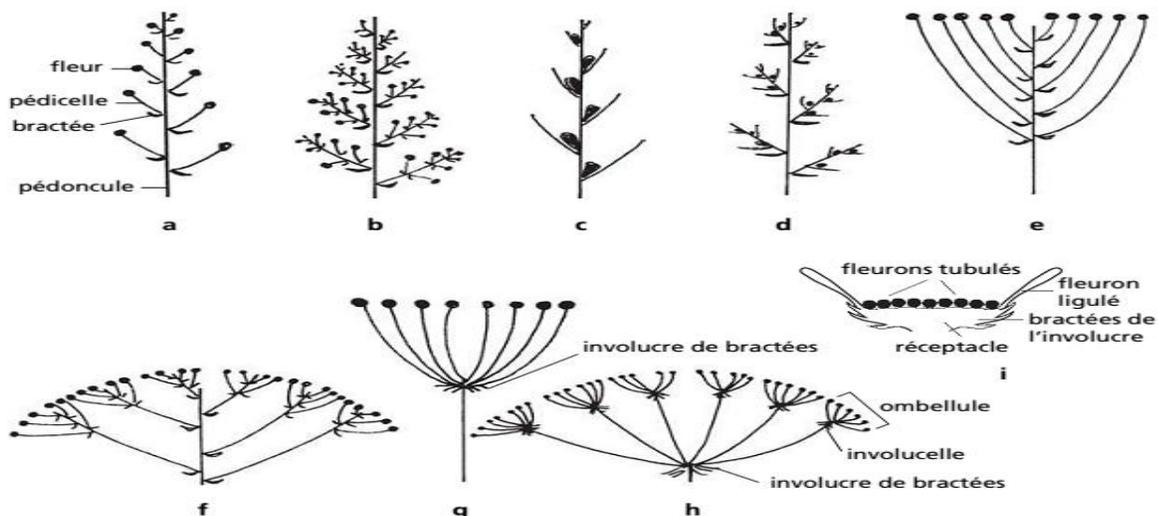


Figure 195: Inflorescences de type monopodiales.

a, grappe ; b, grappe de grappes ; c, épi ; d, épi d'épillets ; e, corymbe ; f, corymbe de corymbes ; g, ombelle ; h, ombelle d'ombellules ; i, capitule.

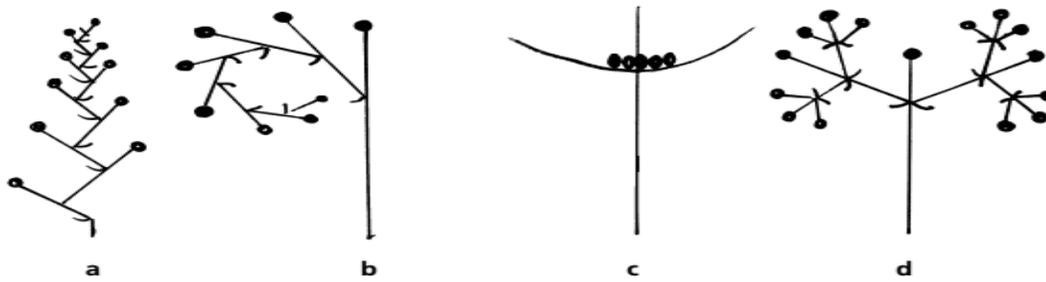


Figure 196 :Quelques exemples de cymes.

a, cyme unipare hélicoïdale ; b, cyme unipare scorpioïde ; c, glomérule ; d, cyme bipare.

6.3. Biologie florale: microsporogénèse et macrosporogénèse

La **gamétogénèse** est la formation des gamètes qui entre dans la reproduction sexuée des plantes, elle est différente selon le sexe de l'organe de la fleur qui produit le gamète. Si elle se produit dans les anthères des étamines, il s'agira alors de gamétogénèse mâle (aussi nommée **microgamétogénèse**). La gamétogénèse qui a lieu dans un ovule de la plante, à la base d'un carpelle, est appelée la gamétogénèse femelle (aussi nommée **macrogamétogénèse** ou **mégagamétogénèse**), le gamète femelle résultant de cette gamétogénèse sera l'oosphère contenu dans le sac embryonnaire.

6.3.1. L'appareil reproducteur mâle (les étamines)

* L'étamine :

Elle présente une partie allongée, le **filet** portant une masse renflée, l'**anthère**. Une anthère observée à la loupe, montre alors que les grains de pollen se sont échappés, les fentes de déhiscence, orientées normalement vers l'intérieur de la fleur. Ces fentes ont fait s'ouvrir à l'extérieur les loges polliniques elles-mêmes divisées en deux sacs contenant de petits grains : le **pollen**. Ainsi les loges polliniques situées de part et d'autre du prolongement du filet ou **connectif** constituent l'essentiel de l'anthère formée de **quatre** sacs polliniques.

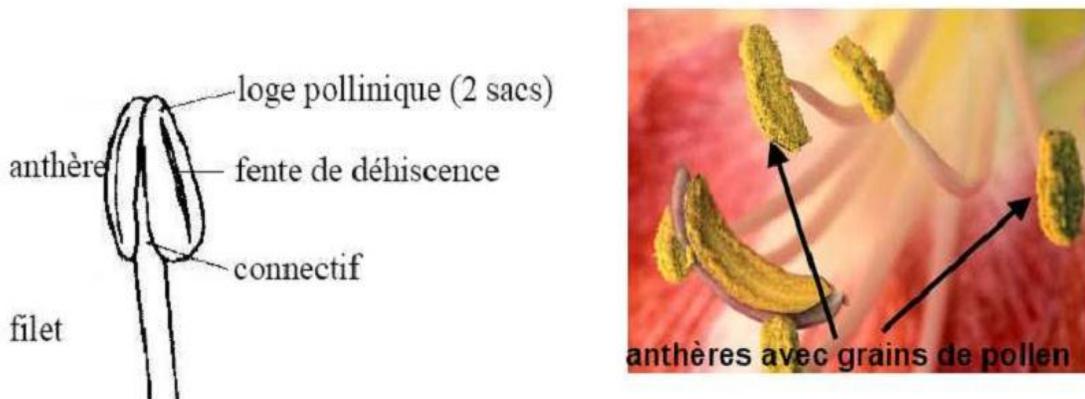


Figure 197 : Coupe longitudinale d'une étamine

* L'anthère

L'anthère présente toujours un faisceau de tissus conducteurs (parenchyme et faisceau libéro-ligneux) et un **épiderme** périphérique mais si l'étamine est mûre, les sacs polliniques occupés par les grains de pollen sont limités par une couche discontinue de cellules très différenciées : l'assise mécanique qui permet la déhiscence. Si l'étamine est très jeune, l'assise mécanique est formée de grandes cellules dont les parois internes ne sont pas encore épaissies et à l'emplacement des grains de pollen, on voit des cellules **polyédriques**, les cellules mères des grains de pollen entourées de cellules nourricières appelées à se résorber avec la maturité.

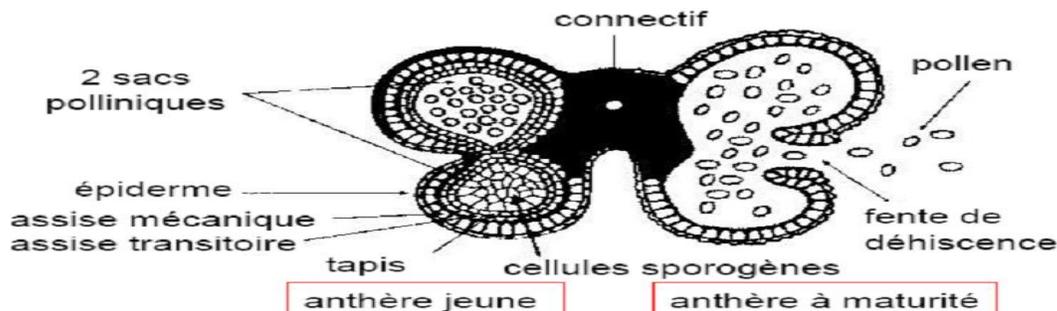


Figure 198 : Coupe transversale d'une anthère jeune (moitié gauche) et mûre (moitié droite).

* Grain de pollen

Lorsque la fleur est suffisamment avancée, les anthères sont couvertes d'une poudre jaune d'or, le **pollen** dont l'observation à « sec » ou mieux dans une goutte d'eau sucrée à 10% montre des grains plus ou moins **sphériques**, les grains de pollen. Ils sont limités par une membrane externe, épaisse, parfois perforée et toujours finement ouvragé (orné), l'**exine** qui est cutinisée, rigide, imperméable et doublée à l'intérieur d'une seconde enveloppe, l'**intine** plus mince, souple, lisse et cellulosique. La taille, la forme et l'ornementation des grains sont caractéristiques d'une espèce. Si nous écrasons avec la lamelle des grains de pollen montés dans une goutte d'eau iodée, on pourra constater qu'il sort des grains écrasés, du cytoplasme coloré en jaune et de nombreux grains d'amidon colorés en bleu. Ceux-ci constituent une réserve nutritive abondante. On pourra aussi voir que le cytoplasme de chaque grain de pollen contient une tache circulaire assez floue, le **noyau végétatif** qui est plus gros que le **noyau reproducteur** souvent légèrement aplati.

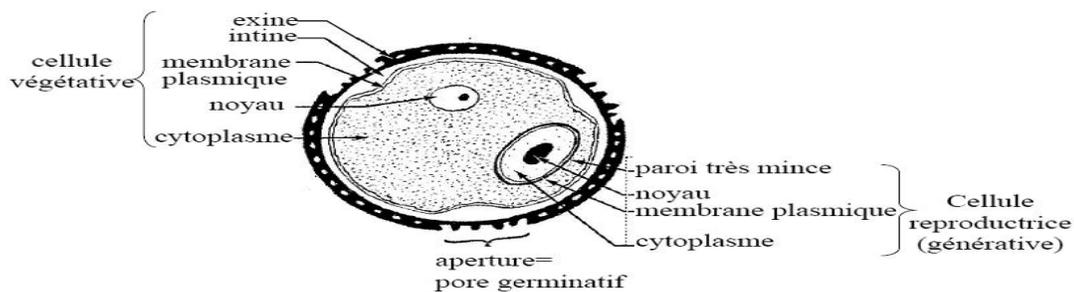


Figure 199: Structure d'un grain de pollen bicellulaire

* Formation des grains de pollen :

Dans le bouton floral, l'anthère d'une étamine jeune contient 4 massifs de larges cellules dont le noyau est volumineux et contient **2n chromosomes**. Ce sont les **cellules mères** des grains de pollen qui sont diploïdes. Chaque cellule mère subit ensuite deux divisions successives de méiose au cours desquelles a lieu une réduction chromatique. **La tétrade** de cellules provenant de cette façon d'une cellule mère est formée par 4 jeunes grains de pollen **uninucléés** et **haploïdes** car leurs noyaux ne contiennent chacun que n chromosomes. Les grains de pollen se chargent alors de réserve, dédoublent leur membrane en exine et intine, puis noyau se divise en deux, le **noyau végétatif** et le **noyau reproducteur**. Au cours de leur maturation les grains de pollen se sont séparés les uns des autres, ils se sont déshydratés et forment une poudre emplissant les sacs polliniques mûrs. La déhiscence de l'anthère libère alors le pollen.

6.3.2. L'appareil reproducteur femelle (le pistil)

Le pistil (du latin pistillum, « pilon »), appelé aussi gynécée est l'appareil reproducteur femelle des fleurs. Il est constitué de trois parties : **le stigmate**, **le style** et **l'ovaire**. L'ovaire est formé d'un ou plusieurs carpelles. Le carpelle est une enveloppe protectrice du pistil définissant une cavité contenant un ou plusieurs ovules. **L'ovule** est un organe qui renferme le gamétophyte femelle. C'est un macrosporange. Le gamétophyte femelle des angiospermes s'appelle « sac embryonnaire ». Il contient le gamète femelle : **l'oosphère**.



Figure 200 : Pistil et coupe au niveau d'un ovaire

6.3.2.1. Ovule et sac embryonnaire

-Structure de l'ovule :

L'ovule, malgré sa petite taille, présente une organisation relativement complexe. On distingue :

(1) **le funicule** : portion inférieure de l'ovule, attachant celui-ci au placenta. Le funicule forme bientôt un petit cordon, plus ou moins allongé suivant les espèces, au bout duquel est fixé ou suspendu l'ovule d'abord, puis la graine ensuite.

- (2) **la chalaze** : point où se ramifie le faisceau conducteur de l'ovaire.
- (3) **le nucelle** : partie interne de l'ovule qui contient le sac embryonnaire.
- (4) **le sac embryonnaire** : gamétophyte femelle qui, après fécondation, abritera un embryon diploïde et un albumen triploïde.
- (5) **le(s) tégument(s)** : enveloppes généralement au nombre de deux, un interne et un externe.

L'ouverture apicale étroite ménagée par le(s) tégument(s) porte le nom de micropyle.

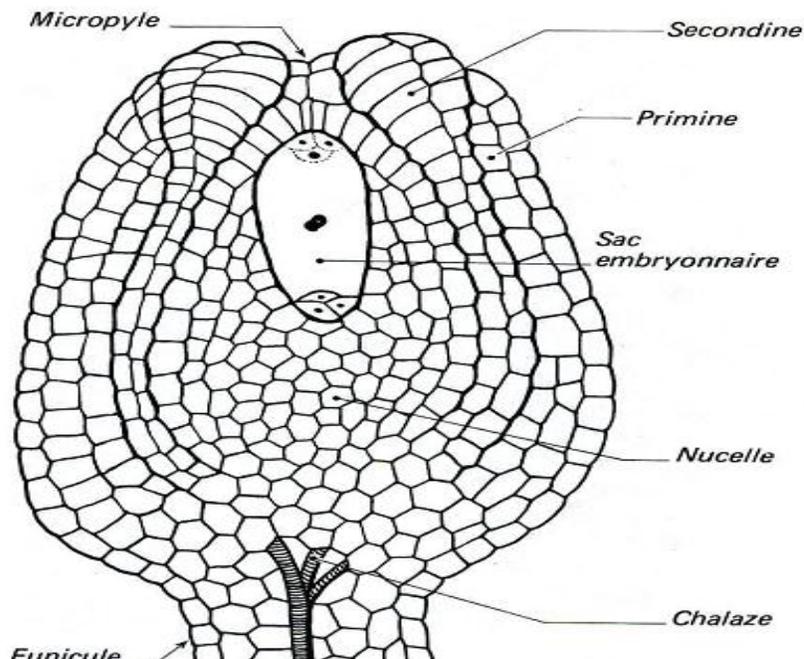


Figure 201 : Représentation schématique d'un ovule

6.3.2.2. Formation du sac embryonnaire

Dans les jeunes ovules, le **nucelle** ne contient pas de sac embryonnaire mais, on y distingue, au voisinage du **micropyle** une cellule volumineuse dont le noyau est diploïde : c'est la **cellule mère** du **sac embryonnaire**. Cette cellule à $2n$ chromosomes subit deux divisions successives ou **méiose** au cours desquelles a lieu une réduction chromatique. Ainsi se forment 4 cellules superposées, les **macrospores** ou mégaspores dont les noyaux sont haploïdes. Parmi ces 4 cellules, trois dégénèrent tandis que la 4^{ème} grossit et constitue un jeune **sac embryonnaire**. Par trois mitoses successives, le noyau du jeune sac embryonnaire donne **8 noyaux haploïdes**. Le sac embryonnaire prend ensuite son organisation définitive par cloisonnement de son cytoplasme. A son pôle micropylaire se disposent l'oosphère et les deux synergides au pôle opposé se groupent les trois cellules **antipodes** tandis qu'au centre dans un cytoplasme commun, les deux noyaux secondaires se placent l'un à côté de l'autre.

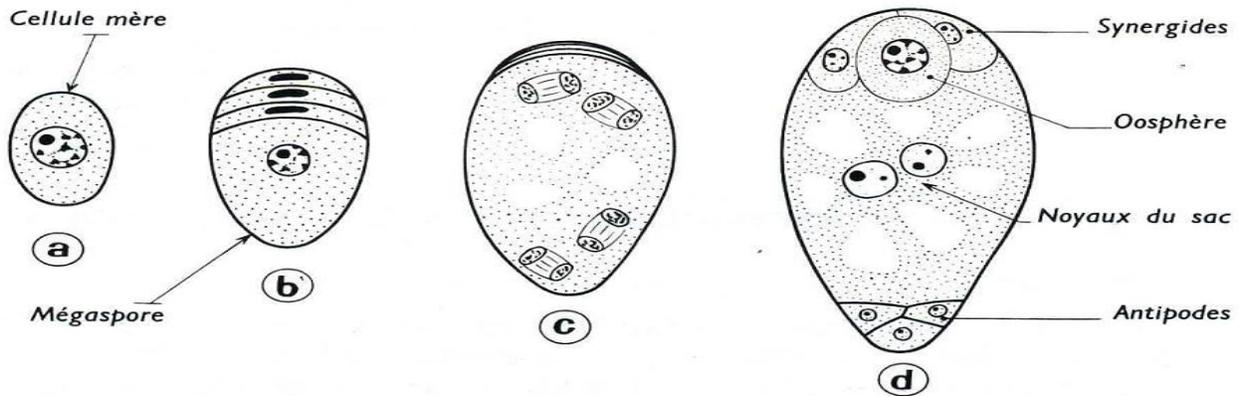


Figure 202 : Formation du sac embryonnaire

6.3.2.3. Différentes types d'ovules

L'ovule peut être:

- **droit** : on dit qu'il est **orthotrope** (ex. Noyer) , micropyle opposé au funicule.
- **renversé**, on dit qu'il est **anatrophe** (ex. Lys), micropyle près du funicule (dont les vaisseaux sont prolongés en presque un tour d'ovule)
- **plié à angle droit**, recourbé, on dit qu'il est **campylotrope** (ex. Pavot). Micropyle perpendiculaire à l'axe du funicule.

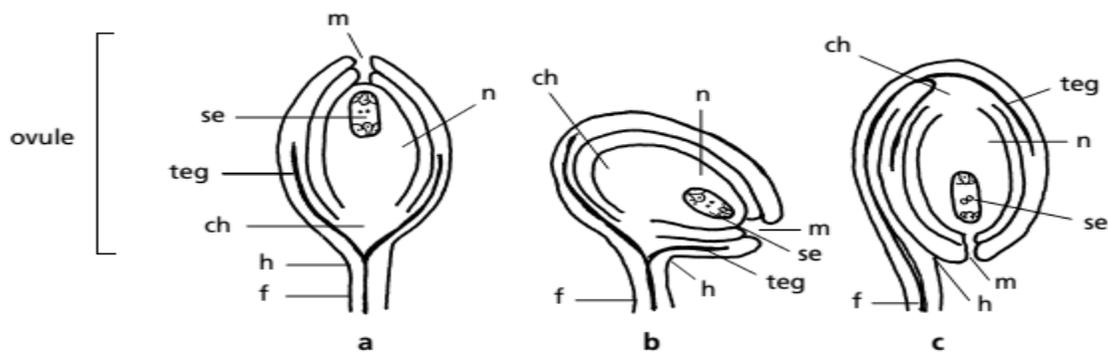


Figure 203 : Représentation schématique des différents types d'ovules.

a, orthotrope ; b, campylotrope ; c, anatrophe

m : micropyle, **teg** : téguments, **se** : sac embryonnaire, **n** : nucelle, **ch** : chalaze, **h** : hile, **f** : funicule

6.3.2.4. La placentation est la disposition des placentas, donc des **ovules**, à l'intérieur de l'**ovaire**. Les placentas apparaissent sur la paroi interne des carpelles ou sur un prolongement de l'extrémité de l'axe de la fleur.

Il existe 3 types de placentation (zone d'insertion des ovules sur l'ovaire) :

- **La placentation axile** : les carpelles clos sont soudés entre eux et forment une cloison. Les ovules sont insérés au centre. Il y a autant de loges que de carpelles.

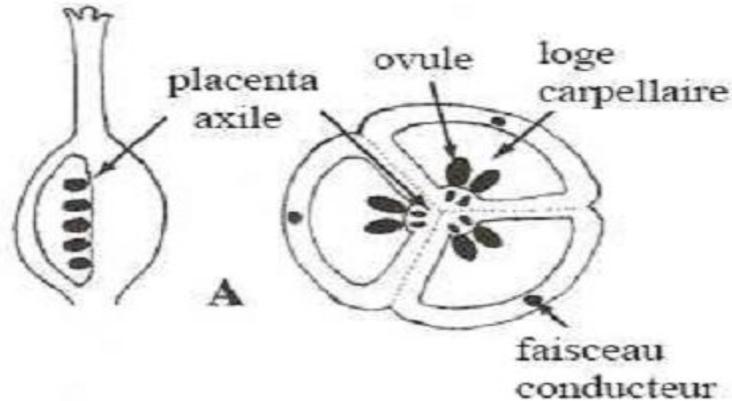


Figure 204 : Placentation axile

- **La placentation centrale** : les ovules sont au centre et il n'y a qu'une seule loge carpellaire. Les cloisons ont disparues après la soudure.

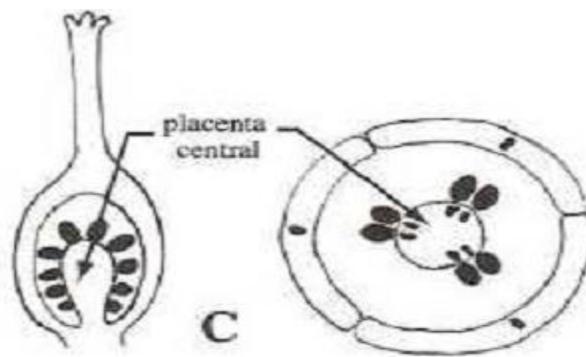


Figure 205 : Placentation centrale

- **La placentation pariétale** : les ovules sont insérés sur les parois de l'ovaire

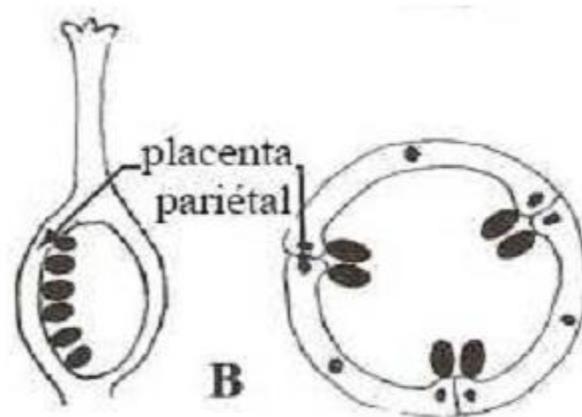


Figure 206 : Placentation pariétale

- **Pollinisation**

C'est le **transport** du **pollen** depuis **les étamines** qui l'ont produit, jusqu'à un **stigmate** de l'ovaire. Ce transport est assuré dans la plupart des cas par des agents de pollinisation. Rappelons que le **pollen** est l'élément mâle de la plante qui se réunit avec l'élément femelle de la fleur (**l'ovule**) et fécondera celle-ci pour donner le **fruit** ou la **graine**. Le pollen est produit dans les fleurs (pour les plantes dites supérieures, les phanérogames - dont l'appareil de reproduction est extérieur et visible) au niveau des **anthères**, petits sacs portés par une longue tige, le filet. L'ovule est produit dans les ovaires, logés dans une cavité interne de la fleur, appelée **le carpelle**. Le pollen peut être transporté par le vent, par les insectes ou par certains animaux.

(1). **Pollinisation par le vent**: on parle alors de **plantes anémogames** (en général chez les conifères tels que pins, épicéas,... mais aussi le riz,...), ces pollens **anémophiles** sont adaptés à leur mode de transport, ils sont lisses et légers, petits et produits en grand nombre pour pallier à un échange aléatoire dans l'espace.

(2). **Pollinisation par les insectes**: on parle de **plantes entomogames**, les pollens **entomophiles** sont transportés de façon plus ciblée vers la fleur, et " économise " la plante qui en produit moins de quelques milliers à une dizaine de milliers. Ces pollens entomophiles présentent souvent des moyens d'accrochage avec l'insecte (collant, aspérité adhérente,..).

(3). D'autres modes de pollinisation sont assurés par **les animaux** (les petits oiseaux) et par **l'eau** pour certaines plantes aquatiques.

- ✓ **Pollinisation directe ou autopolinisation**

Pour qu'il y ait autopolinisation (figure 103), il faut que la fleur soit **bisexuée**, que les **étamines** soient **mûres** en même temps que les **carpelles** et que le pollen soit capable de féconder les ovules de sa propre fleur, que les étamines soient situées au-dessus des carpelles, ce qui est facilité dans ce cas-là par le poids des étamines chargées de grains de pollens leur permettant de tomber directement sur le stigmate des carpelles. Il arrive que les étamines soient dans un plan inférieur aux carpelles. Dans ce cas, ce sont les stigmates qui se recourbent vers les étamines. Ce mode de pollinisation où le pollen se dépose sur le stigmate de la même fleur, appartient aux plantes dites **autogames** (autogamie: fécondation des fleurs d'un individu assurée par son propre pollen). Il est des cas où la pollinisation se fait après la germination du grain de pollen dans les sacs polliniques, ces plantes sont dites **cléistogames** (se dit d'une fleur ne s'ouvrant pas au moment de la reproduction et dans laquelle il y a autofécondation ex: la violette).

- ✓ **Pollinisation indirecte ou hétéropollinisation**

Le pollen d'une fleur se fixe sur le pistil d'une autre fleur (figure 208). On aura des plantes dites **hétérogames**. Le transport du grain de pollen dans la pollinisation indirecte se fait grâce à des agents tels que la pesanteur, le vent, l'eau, les insectes, les animaux et l'homme.

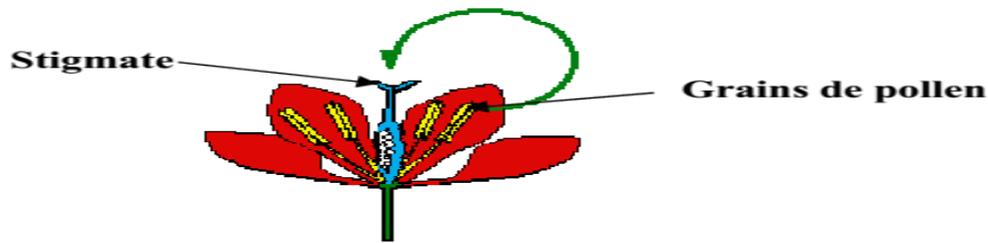


Figure 207: Pollinisation directe ou autopollinisation

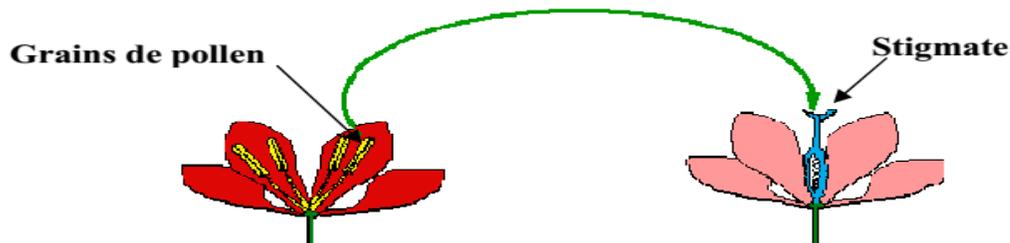


Figure 208: Pollinisation indirecte ou hétéropollinisation

- Germination des grains de pollen

Le grain de pollen germe après s'être déposé sur le stigmate. Ainsi il émet un tube dit pollinique ». Le **tube pollinique** est un prolongement de la cellule végétative. Il croît en traversant les tissus du style, et se dirige vers l'ovule. Durant cette croissance le **noyau végétatif** est toujours à l'extrémité du tube poursuivi par la cellule **reproductrice** qui, chemin faisant, subit une mitose et donne deux cellules **haploïdes**. Ce sont deux gamètes mâles. Les deux gamètes mâles sont dits **anthérozoïdes**. Lorsque le tube pollinique se rapproche de l'ovule le noyau végétatif dégénère.

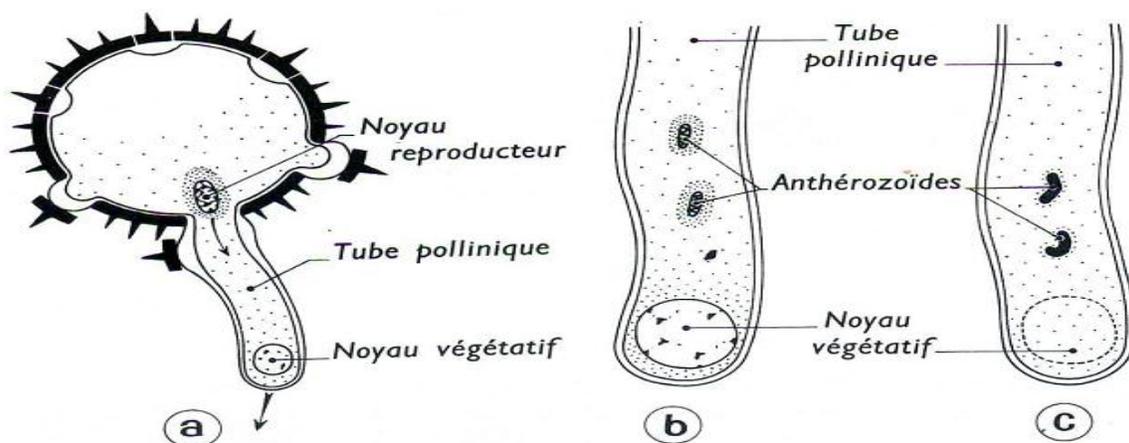


Figure 209 : Germination d'un grain de pollen

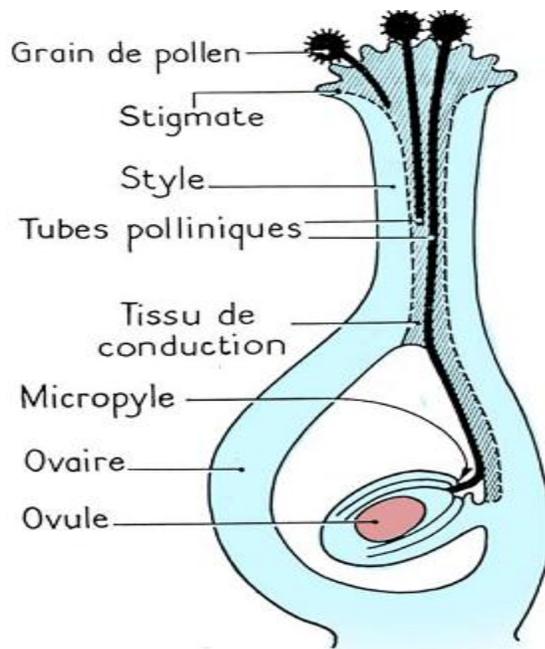


Figure 210 : Croissance et progression dans le style du tube pollinique .

- La fécondation
- ✓ Œuf et embryon

Le tube pollinique pénètre dans l'ovule à travers le **micropyle**. Il traverse le nucelle pour atteindre le **sac embryonnaire**. Au niveau du sac embryonnaire on assiste au phénomène de **la double fécondation**. Ainsi l'un des anthérozoïdes féconde l'oosphère pour donner l'**œuf principal** ($2n$). L'œuf principal est à l'origine de l'**embryon**. Le deuxième anthérozoïde fusionne avec les deux noyaux du sac pour donner l'**œuf secondaire** ($3n$) à l'origine de l'**albumen**. L'albumen est un tissu de réserves nutritives de la graine.

Après la fécondation les **synergides** et les **antipodes** dégèrent. L'ovaire se transforme en fruit ; l'ovule se transforme en graine. L'œuf principal se développe par mitose, pour donner l'**embryon** qui est constitué d'une radicule, d'une tigelle, de deux cotylédons et d'un bourgeon terminal (**gemmule**). L'**œuf secondaire** se développe par mitose pour donner l'**albumen**. Après la fécondation, le sac embryonnaire cède la place à l'embryon et l'albumen. Le nucelle régresse. Les téguments de l'ovule deviennent les téguments de la graine. L'essentiel du volume de la graine est occupé par les deux cotylédons pour certaines espèces, ou par l'albumen pour d'autres. L'albumen et les cotylédons sont des tissus riches en réserves nutritives. Ils assurent la nutrition de l'**embryon** au moment de la germination de la graine.

Les cotylédons sont les feuilles **primordiales** de l'embryon. Après l'accumulation des réserves, la graine subit une dessiccation et rentre dans une **vie ralentie**. Ainsi la graine est une forme de dissémination et de résistance. Durant la vie ralentie, les rythmes de la nutrition et de la respiration sont très faibles (faible niveau d'absorption de O_2 et faible niveau du rejet de CO_2).

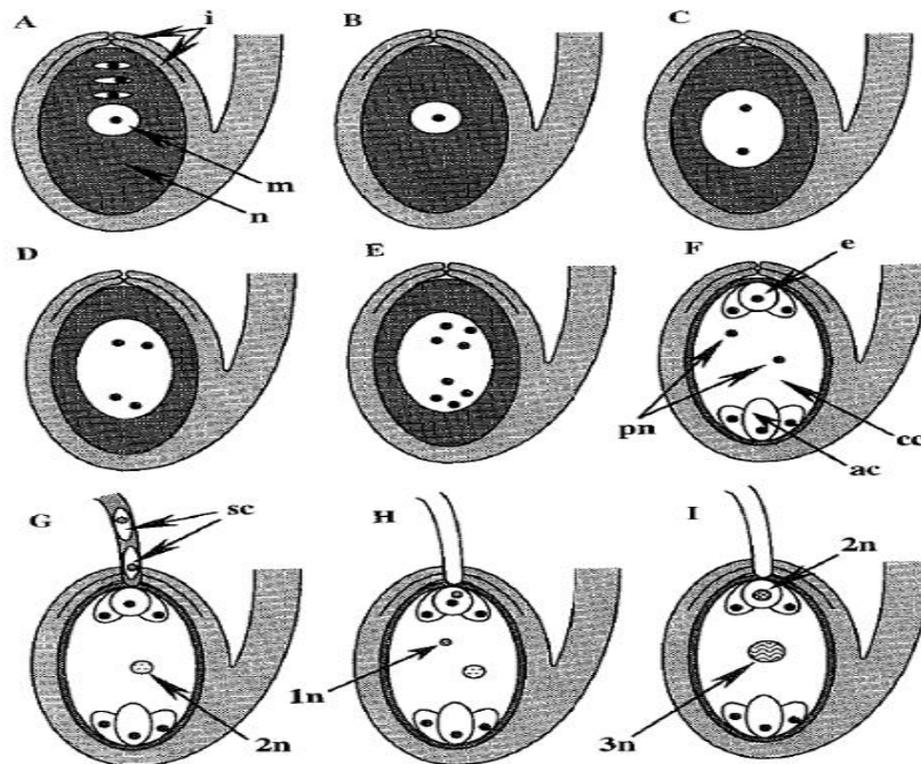


Figure 211 : Développement du sac embryonnaire et double fécondation

✓ Développement de l'embryon :

Le **zygote** principal va subir une première mitose transversale pour donner deux cellules superposées: une cellule basale située du côté du micropyle, qui, en se divisant, donne une file de cellules qui constituent le **suspenseur**, une cellule terminale qui, en se divisant, donne un petit massif méristématique : l'**embryon globuleux**. Cet embryon globuleux change de forme à mesure que ses organes se différencient. Il devient un embryon **cordiforme**.

Au cours de la différenciation de l'embryon, des ébauches d'organes se forment :

- du côté du **suspenseur**, il y a formation de la **radicule**.
- l'**hypocotyle** : ébauche de la **tigelle** qui prolonge la racine.
- une (Monocot) ou deux (Dicots) ébauches de **cotylédons** se forment. Les cotylédons sont les **premières feuilles** de la plantule.
- la **gemma** (bourgeon terminal) se forme du côté des cotylédons. C'est l'ébauche de la **tige feuillée**.

Progressivement, on reconnaît le **protoderme** et le **procambium** où se différencieront les premiers faisceaux vasculaires qui parcourent de part et d'autres cotylédons, hypocotyle et racine. Au niveau

de la radicule et de la gemmule, apparaissent des méristèmes primaires d'où dériveront la future racine et la future tige. Ces organes, en se développant, forment la **plantule**.

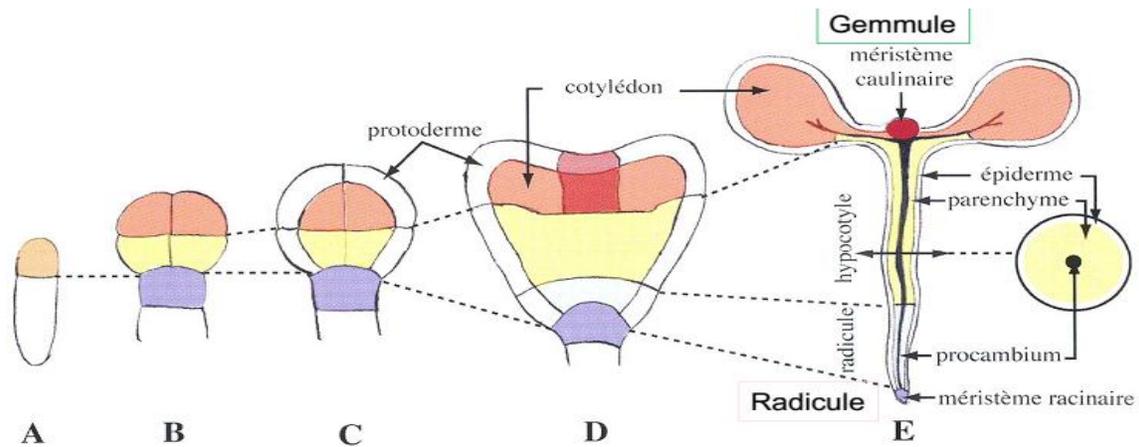


Figure 212 : Développement de l'embryon d'un Angiosperme dicotylédone

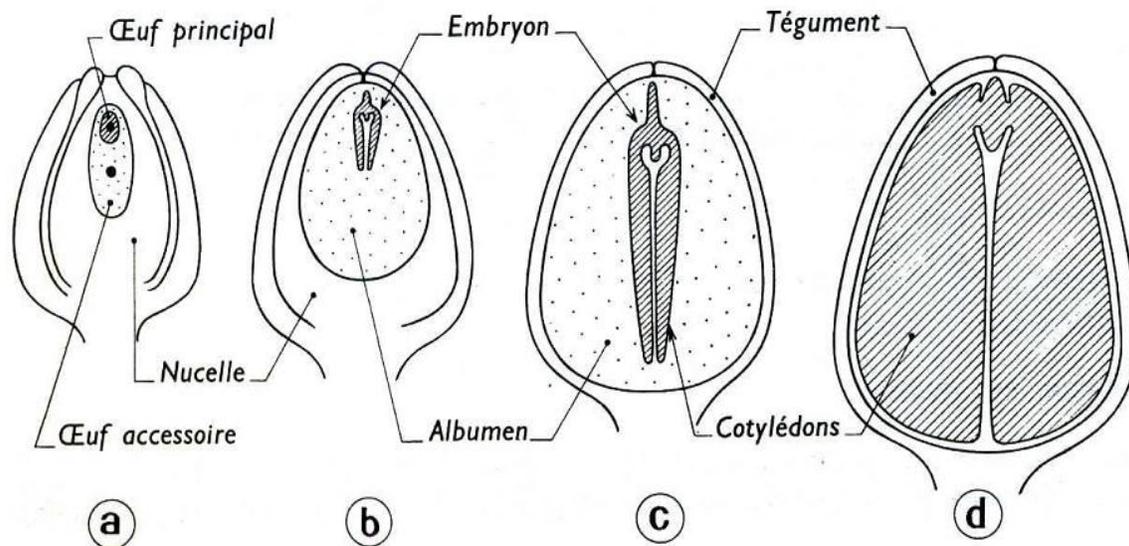


Figure 213: Développement de la graine :

- a : ovule fécondé ; b : début du développement de la graine (graine à périsperme) ;
 c : disparition du nucelle (graine à albumen) ; d : disparition de l'albumen (graine sans albumen).

6.4. Graines et fruits

6.4.1. Graines

Pendant que la paroi de l'ovaire s'est transformée en fruit, l'**ovule** se transforme en **graine** où l'embryon issu du zygote principal se nourrit aux dépens de **nucelle**. L'**embryon** se différencie à l'extrémité d'un filament suspenseur. La graine est entourée de **téguments** qui sont les téguments de l'ovule. La graine est un organe qui s'ébauche et se développe à partir d'un ovule fécondé et consécutivement à cette fécondation. Ces transformations qui suivent **la fécondation** comportent toujours la mise en réserve de matériaux fournis par la plante mère et la différenciation d'un tégument. Pendant toute la durée de ces phénomènes, il existe une continuité histologique et physiologique entre la plante mère et son produit.

Toute graine est constituée **d'une amande** entourée d'un ou de deux téguments. Chez les **Gymnospermes**, cette amande est toujours composée de l'embryon et de l'endosperme, le prothalle femelle s'étant gorgé de réserves après la fécondation. Celle **des Angiospermes** est, au contraire très variée :

-**Simple**, si elle ne comprend que l'embryon.

-**Double**, quand l'embryon est accompagné de l'albumen.

-**Triple**, quand, aux deux éléments précédents, s'ajoute un périsperme.

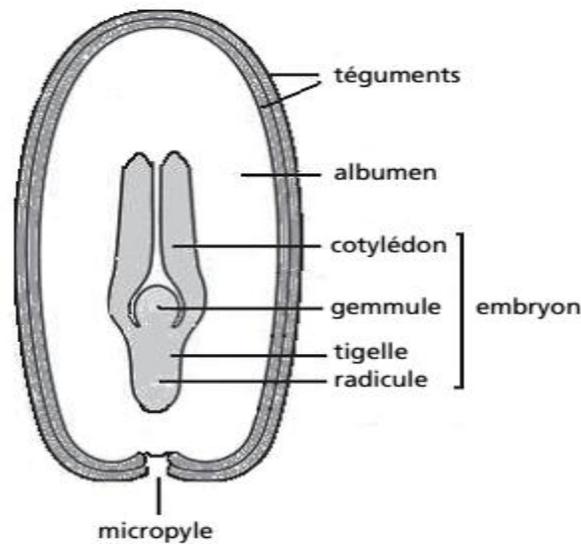


Figure 214 : Schéma d'organisation d'une graine théorique albuminée

D'Angiosperme dicotylédone.

6.4.1.1. Différents types de graines : Suivant la nature de l'amande, on distingue trois catégories principales de graines :

(1) **Les graines exalbuminées**

Bien que dépourvues d'albumen quand la transformation de l'ovule en graine est terminée, la double fécondation a conduit à la mise en place d'un albumen, mais sa croissance étant beaucoup plus lente que celle de l'embryon, ce dernier l'écrase et le digère, tandis que les cotylédons de la plantule emmagasinent les réserves et constituent la presque totalité de l'amande (Rosacées, Légumineuses, Composées, etc.).

(2) Les graines albuminées

Cette fois, au contraire, l'albumen se développant beaucoup plus vite que l'embryon et se chargeant de réserves, le second est de petite taille et ne présente qu'une faible partie de l'amande (Magnoliacées, Ombellifères, Palmiers, etc.).

(3) Les graines à périsperme

Alors que le nucelle disparaît rapidement dans les cas précédents, il n'est pas éliminé ici et s'hypertrophie même en accumulant une plus ou moins grande partie des réserves de la graine. Suivant l'importance du périsperme ainsi constitué, l'albumen est peu développé et même éliminé (Pipéracées, Saururacées, la plupart des familles de l'ordre des Centrospermales, celles des Scitaminales, etc.).

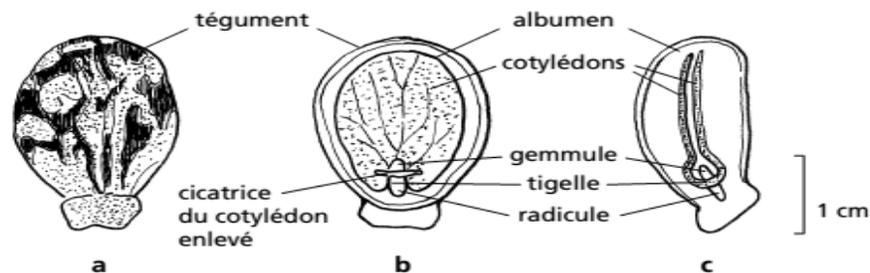


Figure 215 : Graine albuminée de ricin.

a, aspect extérieur ; b, un cotylédon et la plantule (coupe entre les 2 cotylédons) ;

c, coupe longitudinale au niveau de l'embryon.

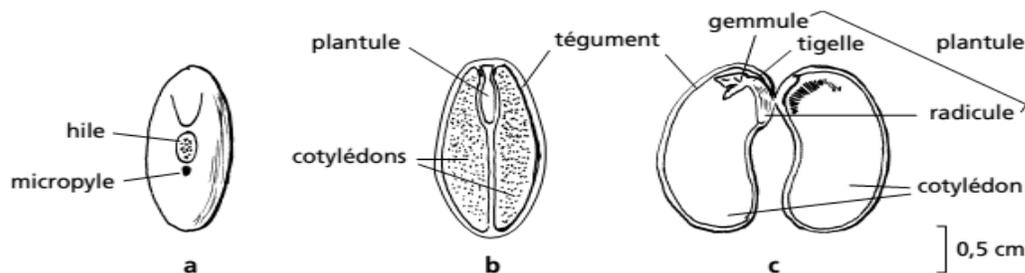


Figure 216 : Graine exalbuminée de haricot.

a, aspect extérieur ; b, coupe longitudinale montrant les deux cotylédons et la

plantule ; c, le haricot ouvert.

6.4.2. Fruits

Le fruit résulte de la transformation de l'**ovaire** après **fécondation**, les carpelles une fois fécondés, les ovules deviennent des **graines** et la fleur se transforme en **fruit**. Ce qui implique donc une **pollinisation**, en général. Cependant, il existe des espèces parthénocarpiques, elles peuvent produire des fruits sans qu'il y ait eu pollinisation, ce qui donne des fruits dépourvus de graine ; l'homme sélectionne parfois ces variétés (ex : la banane, mandarine sans pépins). Aussi oppose-t-on aux fruits d'origine carpellaire, de **pseudo-fruits** chez lesquels des parties accessoires se joignent aux carpelles.

6.4.2.1. Anatomie du fruit :

En même temps que se forment les graines, les parois de l'ovaire subissent des transformations importantes et évoluent en fruit. Dans un fruit, on reconnaît trois ensembles cellulaires qui forment le péricarpe:

- l'épiderme correspondant à l'épiderme externe du fruit.
- le mésocarpe (le tissu médian).
- l'endocarpe ou épiderme interne.

Mais ces transformations peuvent affecter, aussi, le réceptacle floral qui peut s'hypertrophier comme chez la pomme . Dans ce cas, on n'est plus en présence d'un fruit, sensu stricto, mais de quelque chose de complexe qui porte le nom de **pseudo-fruit**, ou **faux fruit**. On l'oppose donc au vrai fruit.

Ces notions de vrais et faux fruits sont à rattacher à la position de l'ovaire sur le réceptacle. Ainsi, l'ovaire supère donne de vrais fruits et l'ovaire infère, invaginé et protégé par les parois du réceptacle donne des faux fruits.

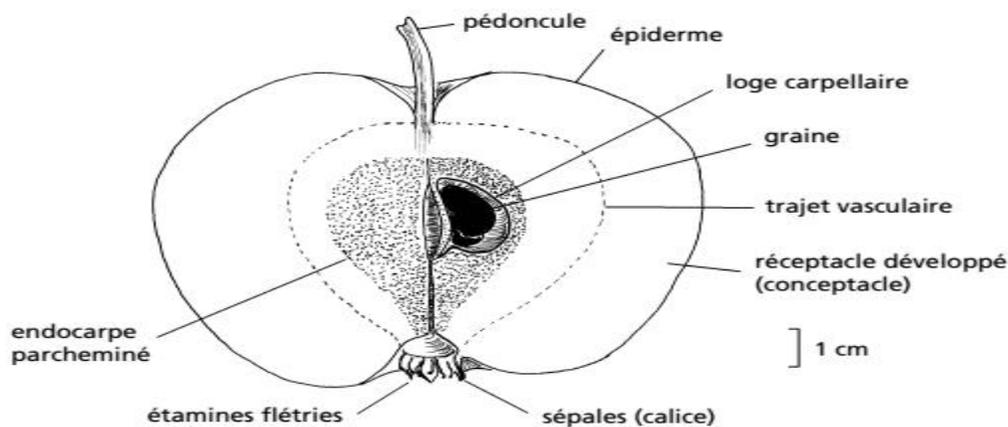


Figure 217: Coupe longitudinale d'un fruit

Lors de la transformation de la fleur en fruit :

- **le pédoncule** floral devient le pédoncule du fruit.

- le **réceptacle** floral devient le réceptacle du fruit.
- les pièces **périanthaires** peuvent parfois persister.
- la paroi **ovarienne** (+ la paroi du **conceptacle**) devient la paroi du fruit.

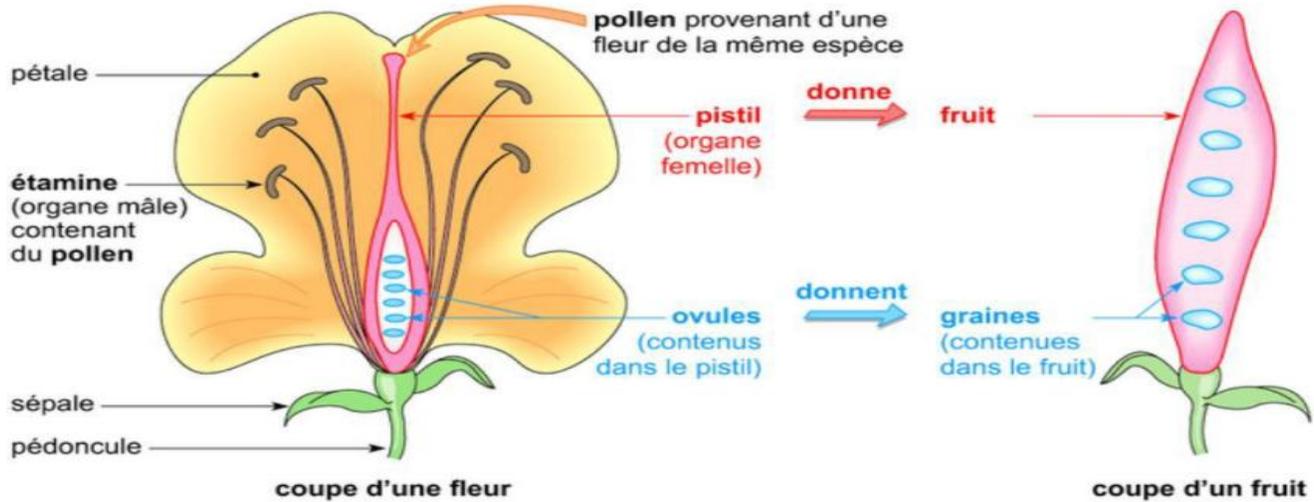


Figure 218: La transformation d'une fleur en fruit

6.4.2.2. Divers types de fruits : on distingue :

- les fruits qui dérivent d'un **ovaire unique**, simple ou composé. Les fruits sont **secs**, déhiscent ou indéhiscents, ou **charnus**, **baies** ou **drupes**
- les fruits qui dérivent de nombreux carpelles libres d'une même fleur
- les fruits **complexes** car ils sont formés de différentes parties qui ne sont pas forcément d'origine florale.

A) Les fruits simples

- **Fruits secs**

(1)- **indéhiscents** ou **Fruits akénoïdes** : qui ne s'ouvrent pas.

- **Akène**, au péricarpe membraneux, plus ou moins sclérifié (Composées)
- **Caryopse**, au péricarpe intimement uni à la graine (Graminées)
- **Samare**, akène ailé : Ormes (Ulmacées), Erables (Acéracées).
- **Nucule**, akène dont le péricarpe est fibreux ou ligneux: noisettes (Bétulacées).

- **Schizocarpes**: akènes qui proviennent d'ovaires pluricarpellés ; à maturité, ils se divisent en autant de parties que de carpelles constitutifs ; ex : les Malvacées, aussi certaines Apiacées (biakènes), aussi chez les Lamiacées (tétrakènes).

(2)- **Déhiscents ou Fruits capsuloïdes** : s'ouvrent (presque) toujours. Ils sont classés d'après leur mode de déhiscence (c'est-à-dire d'ouverture).

- **Gousse ou légume**: ouverture au niveau de la soudure carpellaire et la pliure de la feuille carpellaire ; ex : le haricot.

- **Follicule**: ouverture sur la ligne de suture ; ex : Ancolie, Hellébore.

- **Silique**: c'est le cas des Crucifères, on parle de silique quand le fruit est plus long que large.

- **Silicule**: aussi chez les Crucifères , quand le fruit est aussi large que long. Dans les 2 cas, il y a soudure de 2 feuilles carpellaires et il s'installe une fausse cloison : le replum. Il y a ouverture par une fente, de part et d'autre du replum. Ex : la Monnaie du Pape, qui est une silicule.

- **Pyxides**: "petite boîte" ronde avec une fente de déhiscence perpendiculairement. Par ex. les Campanulacées.

- **Capsules**: fentes à déhiscences diverses ; c'est un peu "tout le reste" ; il y a donc de nombreuses sortes de capsules : loculicides (fentes au milieu de la paroi de chaque carpelle ayant participé à l'élaboration de l'ovaire), denticides, poricides (des pores peuvent se différencier au sommet ou à la base), etc...

- **Fruits charnus**

L'épicarpe et le mésocarpe deviennent charnus et succulents (ainsi que parfois d'autres parties). Deux grandes catégories : **les baies** et **les drupes**. Pour les fruits charnus, la composition chimique change selon que le fruit est vert ou à maturité. Lorsqu'il est vert : amidon, tanins, acides organiques (dont de l'acide tartrique, malique, citrique). Cette composition se modifie pendant la maturation du fruit : ces substances tendent à disparaître. On voit apparaître plusieurs sucres : glucose, lactulose, saccharose. Il y a disparition de la chlorophylle et formation des nouveaux pigments dans les fruits murs, souvent des anthocyanes (ex; baie de Troène), des carotènes.

1- Baies ou fruits à pépins: un épicarpe plus ou moins cutinisé (en général), un mésocarpe charnu, et surtout un endocarpe "tendu", c'est-à-dire relativement fin et ténu. Ex. de baies : raisin, datte, orange, banane.

2- Drupes ou fruits à noyau: l'endocarpe est lignifié. Ex : olive, prune, cerise, noix de coco. Il y a des drupes multiples (associées) par ex. la framboise.

B) Les fruits multiples

Un fruit simple est formé uniquement par la paroi de l'ovaire. C'est le cas lorsque la fleur contient un ovaire constitué d'un carpelle ou de plusieurs carpelles soudés. Lorsque la fleur contient plusieurs carpelles libres, chacun d'entre-eux donne un fruit simple et la même fleur développe alors plusieurs

fruits simples. On peut alors distinguer des poly-akènes, des poly-drupes, des poly-follicules, selon le type de fruit unitaire. Il s'agit alors d'un fruit multiple.

C) Les fruits composés ou les infrutescences:

Proviennent d'inflorescences avec participation de l'ovaire et/ou du réceptacle floral (ou même d'autres parties). Ex. : la mûre du Mûrier ,l'anas composé de nombreuses baies parthénocarpiques associées à l'axe d'inflorescence .

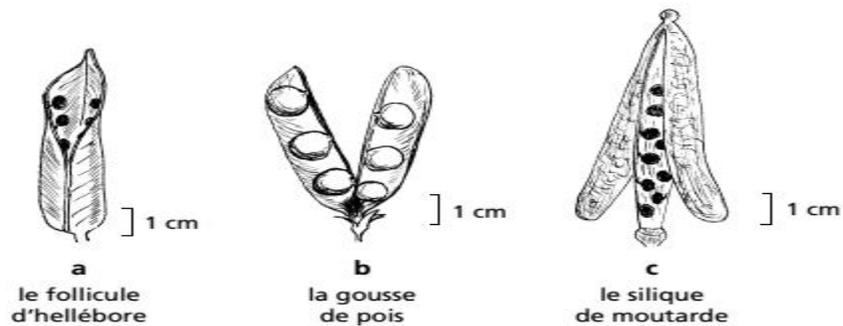


Figure 219 : Exemples de fruits secs déhiscents.

a, follicule de l'hellébore ; b, la gousse de pois ; c, la silique de la moutarde.

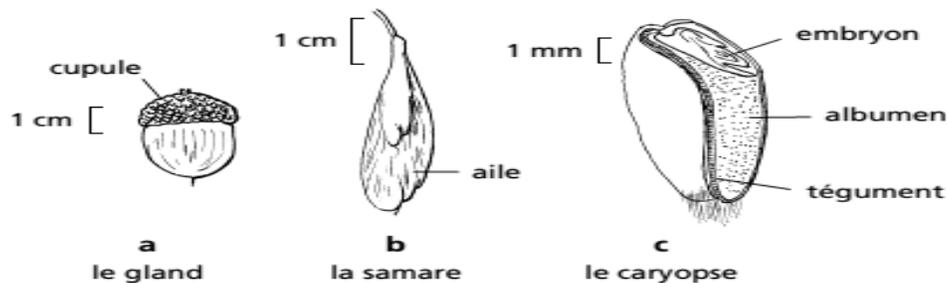


Figure 220 : Exemples de fruits secs indéhiscents.

a, le gland du chêne est un akène ; b, la samare du frêne ; c, le caryopse de blé (coupe).

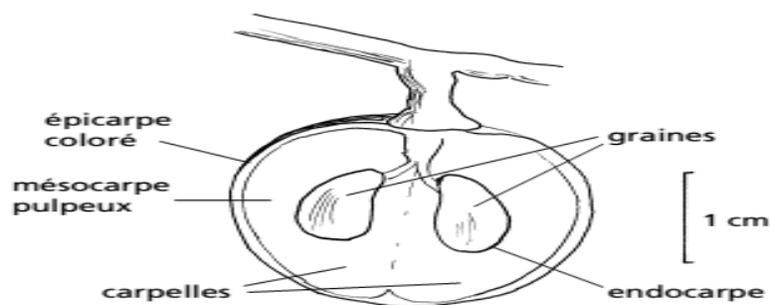


Figure 221 : La baie de raisin.

Elle est formée à partir d'un ovaire composé supère à deux loges carpellaires

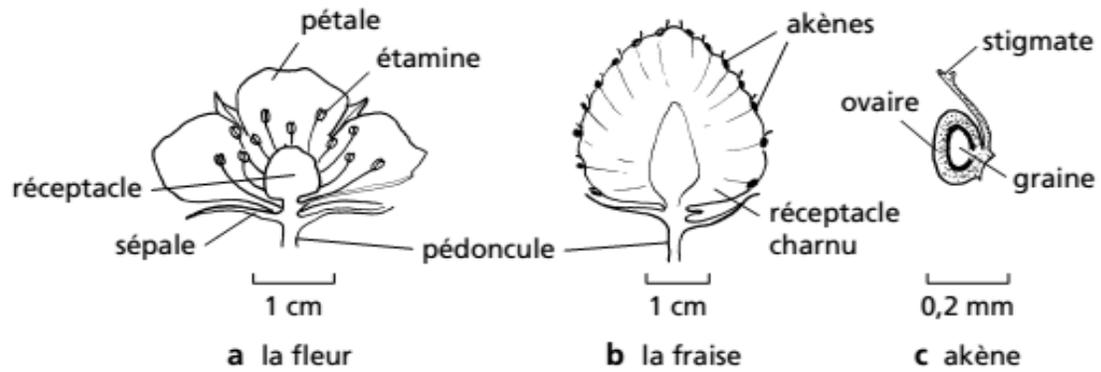


Figure 222: pseudo-fruits ou faux fruits Le fraisier.

a, coupe longitudinale de la fleur ; b, coupe longitudinale du « fruit » ; c, détail d'un akène.

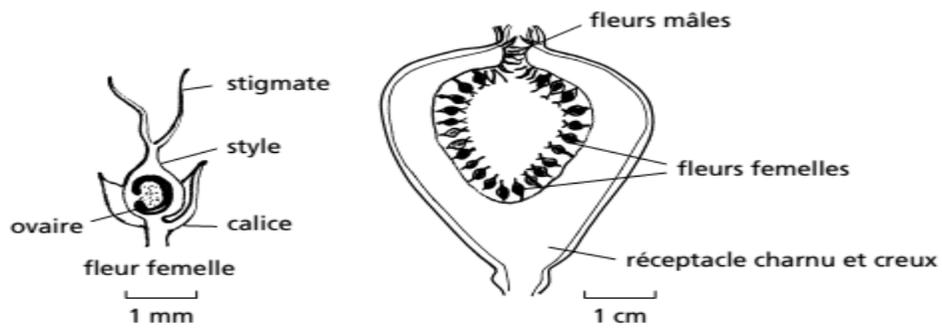


Figure 223 :Fruit composé (Le figuier).

a, détail de l'une des fleurs femelles ; b, coupe longitudinale du fruit (la figure est l'homologue d'un capitule invaginé).

6.5. Notion de systématique moderne, cladogénèse et principaux taxons. Présentation des classifications (Engler 1924, APG II)

L'histoire des classifications botaniques reflète parfaitement les rapports que l'homme a entretenus avec la nature : à l'intérêt des plantes pour la médecine ou l'alimentation a succédé la retranscription fidèle de l'observation minutieuse des végétaux. Au fur et à mesure des progrès scientifiques, l'analyse devenait plus fine et les caractères étudiés plus nombreux. Mais le véritable changement apparût lorsque l'homme renonça au fixisme et à l'anthropocentrisme pour considérer l'évolution des espèces.

Ainsi l'étude se porta petit à petit vers les liens de parenté entre les plantes étudiées sous leur forme morphologique puis moléculaire. Si la cladistique moléculaire fait aujourd'hui référence, ne perdons pas de vue que les conclusions actuelles peuvent être plus ou moins reconsidérées dans les années qui viennent en fonction des progrès futurs des sciences. Cependant on doit à la cladistique d'avoir permis à la classification de devenir une science : celle de la systématique.

L'étude au niveau moléculaire ainsi qu'au niveau morphologique (structure des grains de pollen le plus souvent) a permis à des chercheurs regroupés dans l'**Angiosperm Phylogeny Group (APG)** de mettre au point une classification des angiospermes qui est la référence actuelle.

La classification APG traduit les relations évolutives entre Angiospermes obtenues après plusieurs analyses cladistiques sur des critères moléculaires. Elle se veut le résultat d'un travail de réflexion de tout un groupe de chercheurs, d'où son nom « APG » pour Angiosperm Phylogeny Group. La version initiale de 1998 (APG I,) reconnaissait 462 familles rangées en 40 ordres supposés monophylétiques. Une version révisée (APG II) a été publiée en 2003, et la plus récente (APG III) est parue en 2009. Elle est améliorée en permanence par des travaux qui prennent simultanément en compte plusieurs séquences moléculaires, ce qui augmente la quantité d'informations phylogénétiques. Moore et al. (2010) ont par exemple récemment utilisé 83 gènes plastidiaux pour tenter de résoudre l'origine et la diversification des Eudicotylédones.

La classification APG III peut se résumer comme suit (seules les familles importantes ou caractéristiques sont mentionnées)

1. PROTO-ANGIOSPERMES :

- Amborellales
- Nymphéales ;
- Austrobaileyales (avec la famille des Schizandracées à laquelle appartient l'Anis étoilé) et les
- Chloranthales, probable groupe-frère des Magnoliidées

2. MAGNOLIIDÉES :

- Magnoliales (Magnoliacées, Annonacées) et Laurales (Lauracées, Monimiacées);

- Canellales et Pipérales (Pipéracées, Aristolochiacées)

3. MONOCOTYLÉDONES

- *Protomonocotylédones* : Acorales, s (Alismatacées, Aracées), Dioscoréales et *Liliidées* (groupe central des Monocotylédones)

- Liliales (Liliacées, Colchicacées, Smilacacées) ;

• Asparagales (Asparagacées incluant Agavacées et Convallariacées ; Iridacées ; Orchidacées ; Amaryllidacées incluant les Alliacées)

- *Commélinidées*)

- Arécales (Palmacées)

• Poales (Poacées, Cypéracées, Joncacées, Typhacées, Broméliacées)

• Commélinales (Commélinacées, Pontédériacées)

• Zingibérales (Musacées, Zingibéracées, Cannacées, Marantacées)

Les Proto-angiospermes et les Magnoliidées peuvent être rassemblées en un ensemble paraphylétique de « Dicotylédones primitives » qui partagent avec les Monocotylédones la présence de grains de pollen à une seule ouverture.

Les autres Angiospermes = Eudicotylédones ou Dicotylédones tri-aperturées) ont des grains de pollen à trois ouvertures.

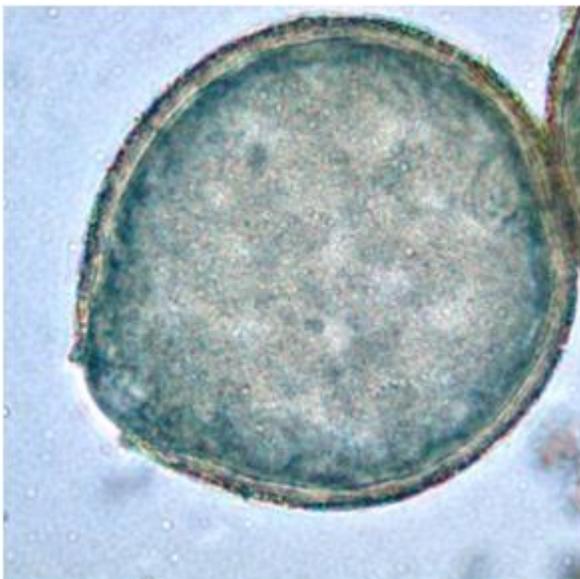


Figure 224: pollen mono aperturé

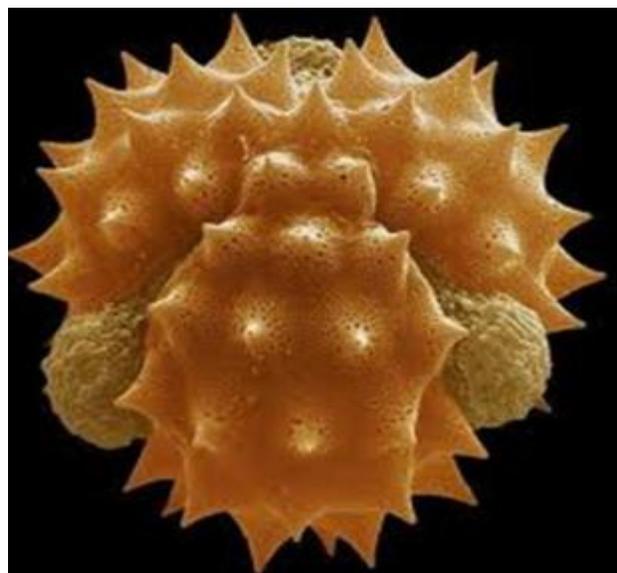


Figure 225: pollen tri aperturé

4. CÉRATOPHYLLALES

Groupe-frère de toutes les autres Eudicotylédones.

5. EUDICOTYLÉDONES BASALES = Proto-eudicotylédones = Eudicotylédones archaïques

- Renonculales (Renonculacées, Berbéridacées, Papavéracées incluant les Fumariacées, Ménispermacées)
- Protéales (Protéacées, Platanacées, Nélumbonacées, regroupées sur des critères moléculaires bien que morphologiquement très différentes)
- Buxales (Buxacées)
- Gunnérales

6. SUPER-ROSIDÉES = EUDICOTYLÉDONES CENTRALES

Ce super-clade regroupe les :

- Saxifragales (Crassulacées, Saxifragacées, Grossulariacées, Péoniacées, Hamamélidacées)
- Vitales (Vitacées)
- Rosidées : clade très vaste de 80 000 espèces comprenant deux sous-clades : les Fabidées et les Malvidées

FABIDÉES ou ROSIDÉES I

- Zygothyllales Célastrales (Célastracées) Oxalidales (Oxalidacées)
- Malpighiales (Malpighiacées, Linacées, Hypéricacées, Violacées, Euphorbiacées Fabales (Fabacées, Polygalacées, Quillajacées)
- Rosales (Rosacées, Rhamnacées, Urticacées-Moracées-Cannabinacées)
- Fagales (Bétulacées, Fagacées, Juglandacées) Cucurbitales (Cucurbitacées, Bégoniacées)

MALVIDÉES ou ROSIDÉES II

- Myrtales (Myrtacées, Mélastomatacées, Lythracées, Onagracées, Combrétacées) Géraniales (Géraniacées)
- Sapindales (Sapindacées, Rutacées) Malvales (Malvacées incluant les Tiliacées)
- Brassicales (Brassicacées, Capparacées, Résédacées, Caricacées, Tropéolacées)

7. SUPER-ASTERIDÉES = EUDICOTYLÉDONES EVOLUÉES

Ce super-clade regroupe les :

- *Les Pré-Astéridées*

- Santalales (Santalacées, Loranthacées)

- Caryophyllales (Amaranthacées, Caryophyllacées, Polygonacées, Cactacées, Aizoacées, Phytolaccacées, Portulacacées)

- *Les Proto-Astéridées* Cornales (Cornacées) Éricales (Théacées, Ericacées, Primulacées, Saracéniacées, Ébénacées, Sapotacées)

- *Les Astéridées* : clade très vaste de 91 000 espèces regroupées en 99 familles et deux sous-clades : les Lamiidées et les Campanulidées

LAMIIDÉES = ASTERIDÉES I

- Borraginales (Borraginacées) Gentianales (Gentianacées, Loganiacées, Apocynacées en incluant les Asclépiadacées, Rubiacées) Lamiales (Oléacées, Lamiacées, Verbénacées, Plantaginacées en incluant les Callitrichacées et les Hippuridacées, Scrofulariacées ; Orobanchacées, Gesnariacées, Acanthacées, Bignoniacées, Paulowniacées)

- Solanales (Solanacées, Convolvulacées)

CAMPANULIDÉES = ASTERIDÉES II. Groupe-frère des Lamiidées

- Aquifoliales (Aquifoliacées)

- Apiales (Apiacées, Araliacées, Pittosporacées)

- Dipsacales (Caprifoliacées incluant les Dipsacacées et les Valérianacées, Adoxacées)
 - Astérales (Ménéyanthacées, Campanulacées, Astéracées)

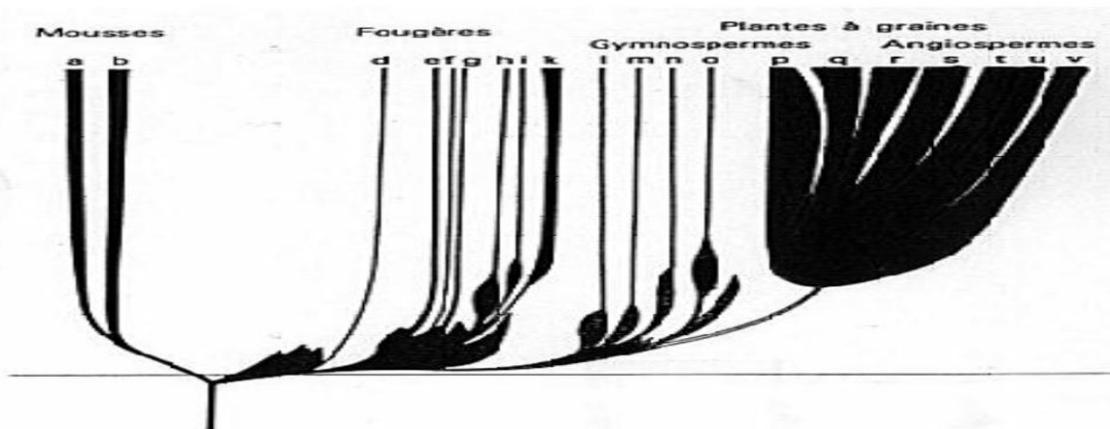


Figure 226: dendrogramme de la classification ancienne

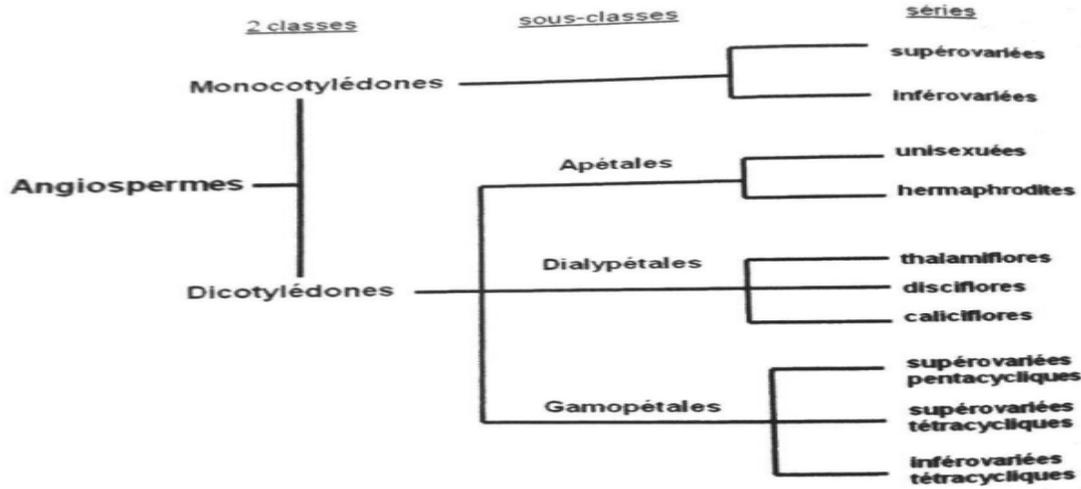


Figure 227 : La classification classique

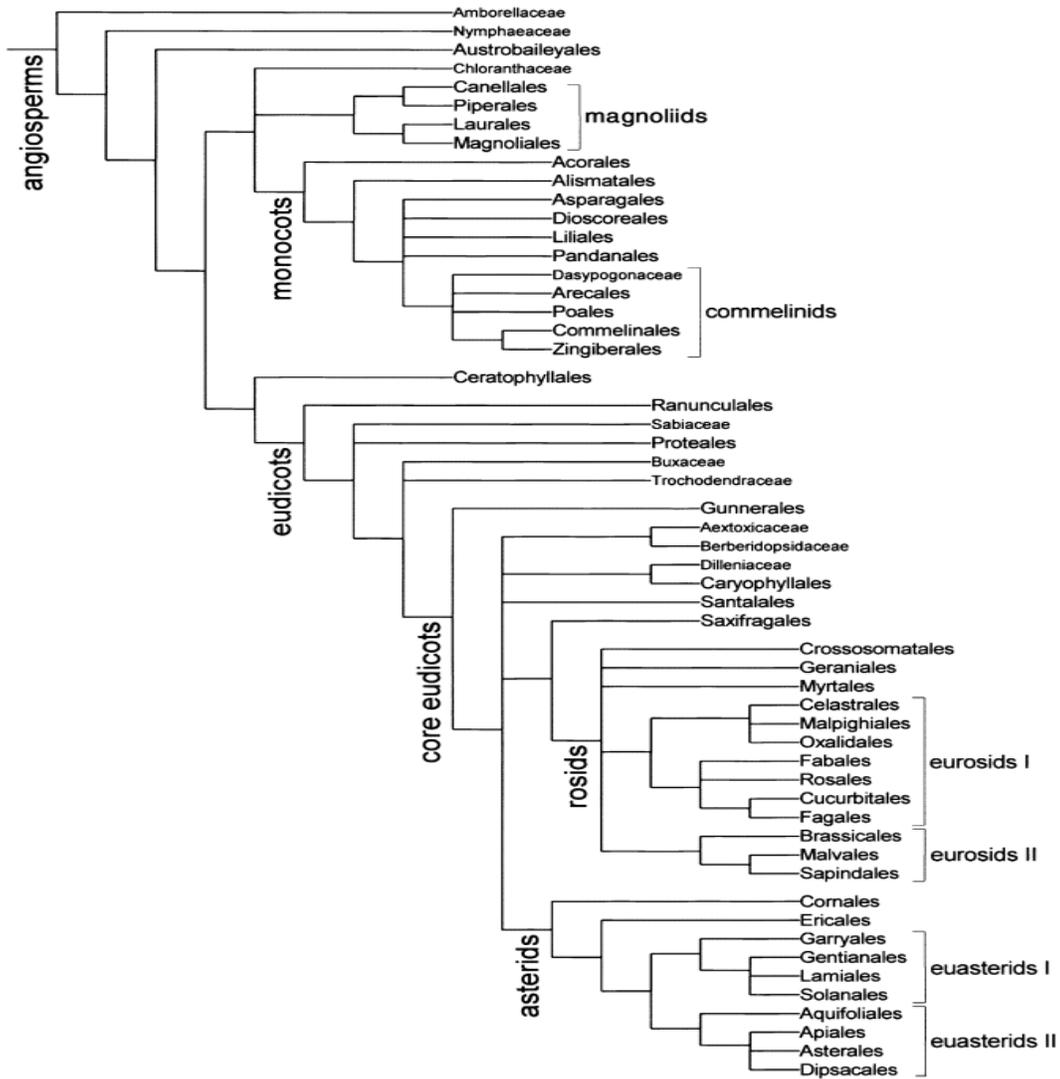


Figure 228: Classification actuelle des angiospermes d'après l'APG.

Références

-A-

Adanson M. (2004). Famille des plantes. Imprimeur-Libraire de Mgr le Comte de Provence, rue S. Severin. 278 pages

-B-

Botineau M. & Pelt J.M. (2010). Botanique, systématique et appliquée des plantes à fleurs. Ed. Lavoisier. 1315 pages.

Boullard B. 1990. Guerre et paix dans le règne végétal. Ed. Marketing Ed., 334 pages

Bourelly P., 1990. les Algues d'eau douce .Tome 1.Edition. N Boubée. Paris.569 pages

Busti D. (2007). Algues et Lignée verte. Edition Molaine S.A. Paris. p, 15-20.

-C-

Camefort H., Boué H.,(1999). Reproduction et biologie des végétaux supérieurs, bryophytes, ptéridophytes, spermaphytes, 2^{ème} édition, éd. Doin, paris, 435 pages.

Chassany V., Potage M., et Ricou M. (2019). Biologie végétale. L'essentiel du cours. Exercices corrigés. 3^{ème} édition, Dunod-Paris, 225 pages.

Chavoutier L. (2016) . Bryophytes sl. : Mousses, hépatiques et anthocérotes/Mousses, liverworts and hornworts. Glossaire illustré/Illustrated glossary. Inédit. 179 pages.

Chrétiennot-Dinet M.J. (1990). Atlas du phytoplancton marin. C.N.R.S., Paris.121 pages.

Clauzade G & Roux C., 1985. Likenoj de Okcidenta Eŭropo. Illustrita determinlibro. Bulletin de la Société Botanique du Centre-Ouest, 7, (Ed) BCO St-Sulpice-de-Royan. 893 pages.

-D-

Donadiou Y. (1985). Les algues thérapeutiques naturelles : Edition Molaine S.A. Paris, p.37-72

Douzet R. (2007). Petit lexique de botanique, a l'usage du débutant.Ed. ujf-grenoble. 42 Pages

Dupont F.et J.-L. Guignard, (2007). Botanique Systématique moléculaire 14^{ème} édition révisée. éd. Elsevier, Masson. 285 pages.

-G-

Genvès L. (1990). Biologie végétale, thallophytes, et microorganisme. Edition Biosciences Dunod. 159 pages.

Gorenflot R. (1997). Biologie végétale: Plantes supérieures : appareil reproducteur, 4^{ème} édition .éd. Masson. 278 pages

Gorenflot R. (1998). Biologie végétale: Plantes supérieures : appareil végétatif, 6^{ème} édition .éd. Masson, 352 pages.

-L-

Laberche J.C., (2010).Biologie végétale. 3^{ème} édition, Dunod-Paris, 305 pages.

Lambinon J. (1996). Eléments d'organographie des angiospermes. Publication supportée par le Fonds National de la Recherche Scientifique de Belgique. 70 pages

Leblond S. & Boucher A. (2011). Initiation à la bryologie. Ed. La hullothe. 43 pages.

-M-

Morot-Gaudry J.F., Prat R., Bohn-Courseau I., Jullien M., Parcy F., Perrot-Rechenmann C., Reisdorf-Cren M., Savouré A., Richard L. (2012). Biologie végétale: Croissance et développement. 2^{ème} édition. Dunod-Paris, 256 pages.

-N-

Nasraoui B. (2015). Les champignons et pseudo-champignons pathogenes des plantes cultivées. Biologie, Nouvelle Systématique, Interaction Pathologique. Centre de Publication Universitaire, Tunisie, 180 pages.

-O-

Ozenda P. 2000. Les végétaux. Organisation et diversité biologique. Éd. Dunod, Paris. 512 pages.

-P-

Pérez, R., Kaas, R., Campello, F., Arbault, S., Barbaroux, O. (1992). La culture des algues marines dans le monde. Ifremer. 614 pages.

Piroux A. (2002). Evolution des classifications botaniques: utilitaires, morphologiques, phylogéniques. Ed. Enssib. 49 pages

-R-

Raven P.H., Evert R.F., Eichhorn S.E., (2000). Biologie végétale. De Boeck-Université, 944 pages.

Raven P.H., Eichhorn S.E., Evert R.F. (2007). Biologie végétale. 2^{ème} édition. De Boeck-New York, 733 pages.

Raven P.H., Eichhorn S.E., Evert R.F. (2014). Biologie végétale. 3^{ème} édition. éd. De Boeck Supérieur, Bruxelles, 862 pages

Reviere, B. (2002). Biologie et phylogénie des algues. Édition par Belin ; Paris : Sup de Belin. p 352 pages.

Roland J.C. et Roland F. (2001). Biologie végétale : 2. Organisation des plantes à fleurs Atlas, éd. Dunod.Paris, 578 pages

Roland J.C., Roland F., El Maarroof-Bouteau H., Boutaeu F. (2008) .Atlas biologie végétale,2. Organisation des plantes à fleurs 9^{ème} édition, éd. Dunod, 144 pages.

Roland J.C., El Maarroof-Bouteau H., Boutaeu F. (2008) .Atlas biologie végétale, Organisation des plantes sans fleurs, algues et champignons 7^{ème} édition, éd. Dunod, 143pages.

-S-

Saber N.,(1980).Botany, Faculty of science, éd. Ain shams, Egypt, 822 pages.

Sosef M.S.M., Degreef J., Engledow H. & Pierre Meerts P. (2020). Classification botanique et nomenclature : une introduction. Ed. CIP Bibliothèque. 72 Pages

Sylvie M., Reeb C. Bosdeveix R. (2008). Botanique. Biologie et physiologie végétales. 2^{ème} édition. Maloine, Paris. 490 pages

-T-

Tievant, P., 2001. Guide des lichens_350 espèces de lichens d'Europe. Ed. Delachaux et Niestlé, Paris, 304 pages.

-V-

Van Haluwyn C., Lerond M., 1993. Guide des lichens. Paris : Lechevalier, 344 pages.

Van Haluwyn C., Asta J., 2009. Guide des lichens de France : lichens des arbres. Belin, 239 pages.