

3. Le royaume Plantae

Les plantes sont des eucaryotes qui forment le règne Plantae ; elles sont principalement photosynthétiques. Cela signifie qu'elles obtiennent leur énergie du soleil, en utilisant des chloroplastes dérivés de l'endosymbiose avec des cyanobactéries pour produire des sucres à partir du dioxyde de carbone et de l'eau, en utilisant le pigment vert chlorophylle. Les exceptions sont les plantes parasites qui ont perdu les gènes de la chlorophylle et de la photosynthèse, et qui obtiennent leur énergie à partir d'autres plantes ou champignons.

Historiquement, comme dans la biologie d'Aristote, le règne végétal englobait tous les êtres vivants qui n'étaient pas des animaux, et comprenait les algues et les champignons. Les définitions se sont affinées depuis lors ; les définitions actuelles excluent les champignons et certaines algues.

Image wikipédia



Selon la définition utilisée dans ce cours, les plantes forment le clade Viridiplantae (plantes vertes), qui comprend les algues vertes et les embryophytes ou plantes terrestres (anthocérotes, hépatiques, mousses, lycopodes, fougères, conifères et autres gymnospermes, et plantes à fleurs). Une définition basée sur les génomes inclut les Viridiplantae, ainsi que les algues rouges et les glaucophytes, dans le clade Archaeplastida.

En 2015 plus de 400 000 espèces décrites, dont la grande majorité sont des plantes à fleurs (369 000 espèces répertoriées), sachant que près de deux mille nouvelles espèces sont découvertes chaque année. Elles varient en taille, des cellules uniques aux arbres les plus grands. Les plantes vertes fournissent une proportion substantielle de l'oxygène moléculaire de la planète ; les sucres qu'elles créent fournissent l'énergie pour la plupart des écosystèmes terrestres et des autres organismes, y compris les animaux, qui consomment soit directement les plantes, soit des organismes qui le font. Depuis le début du 20^{ème} siècle, trois espèces de plantes disparaissent chaque année, principalement victimes de la déforestation. Une plante sur cinq serait menacée d'extinction.

Les céréales, les fruits et les légumes sont des aliments de base pour les humains et ont été domestiqués depuis des millénaires. Les gens utilisent les plantes à de nombreuses fins, telles que les matériaux de construction, les ornements, les matériaux d'écriture, et, dans une grande variété, pour les médicaments. L'étude scientifique des plantes est connue sous le nom de botanique, une branche de la biologie.

a) *Caractéristiques principales*

Le règne Plantae, ou règne végétal, est caractérisé par plusieurs traits distinctifs qui le distinguent des autres règnes du vivant. Voici une liste exhaustive des principales caractéristiques du règne Plantae :

- ☞ **Organisation cellulaire** : Les plantes sont des organismes eucaryotes, ce qui signifie qu'elles possèdent des cellules dotées d'un noyau membraneux et d'organites internes. Les cellules végétales sont entourées d'une paroi cellulaire rigide composée principalement de cellulose, qui confère structure et support aux plantes.
- ☞ **Chloroplastes et photosynthèse** : Les plantes possèdent des organites spécialisés appelés chloroplastes, qui contiennent la chlorophylle principalement a et b (d pour les rodophytes) et sont responsables de la photosynthèse. Les plantes sont principalement photosynthétiques, capables de convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique grâce à la chlorophylle présente dans les chloroplastes.
- ☞ **Tissus et organes spécialisés** : Les plantes développent des tissus et des organes spécialisés, tels que les racines, les tiges, les feuilles, les fleurs et les fruits, qui remplissent des fonctions spécifiques telles que l'absorption d'eau et de nutriments, la photosynthèse, et la reproduction.
- ☞ Les végétaux sont des organismes généralement fixés au sol par leurs racines (mais il y a des exceptions), ce qui les rend très dépendants des conditions de leur environnement ; cet état est lié à la nature cellulosique des parois cellulaires, aux tissus de soutien de la plante (collenchyme et sclérenchyme) et à certaines molécules particulières comme la lignine qui rend les tissus rigides.

b) *Les tissus végétaux*

Les tissus végétaux sont des groupements de cellules ayant une même origine embryologique et une fonction spécifique dans la plante. Ils sont classés en deux types : les tissus simples, constitués de cellules identiques, et les tissus complexes, composés de différents types cellulaires. Les méristèmes sont des centres de divisions cellulaires qui génèrent les cellules nécessaires à la croissance et au développement des plantes.

- ☞ **Les méristèmes primaires**, tels que les méristèmes apicaux, sont responsables de la croissance en longueur des tiges et des racines.
- ☞ **Les méristèmes secondaires**, comme le cambium et le phellogène, assurent la croissance en épaisseur chez certaines plantes, produisant des tissus de conduction et de protection.
- ☞ **Les tissus conducteurs**, tels que le xylème et le phloème, sont présents chez les plantes vasculaires et permettent le transport de la sève brute et de la sève élaborée à travers la plante. Les tissus conducteurs sont absents chez les bryophytes et les algues.
- ☞ **Les tissus superficiels** comprennent l'épiderme et le suber, qui assurent la protection de la plante contre les agents externes. **Les tissus parenchymateux** remplissent des fonctions diverses telles que la photosynthèse, le stockage des réserves et le soutien structurel. **Les tissus de soutien**, tels que le sclérenchyme et le collenchyme, renforcent la structure de la plante. Enfin, **les tissus sécréteurs** produisent et stockent des substances telles que le latex, les résines et les essences parfumées.

c) Phénomène de totipotence

La totipotence est la capacité d'une cellule à se différencier en n'importe quelle cellule spécialisée et de se structurer en formant un être vivant multicellulaire. Elle peut ainsi permettre de reconstituer un organisme au complet à partir d'une cellule.

Les cellules végétales peu spécialisées sont totipotentes. C'est le cas par exemple des méristèmes et des jeunes cellules qu'ils ont produites, les cellules de parenchyme, les jeunes cellules de la moelle, les cellules compagnes des tubes criblés mais pas ces derniers. Dans le cas du greffage, dans un premier temps, ce sont essentiellement les cellules du parenchyme qui, en se dédifférenciant sous le contrôle du facteur de transcription WIND1, produiront un cal, c'est-à-dire amas de cellules indifférenciées et totipotentes.

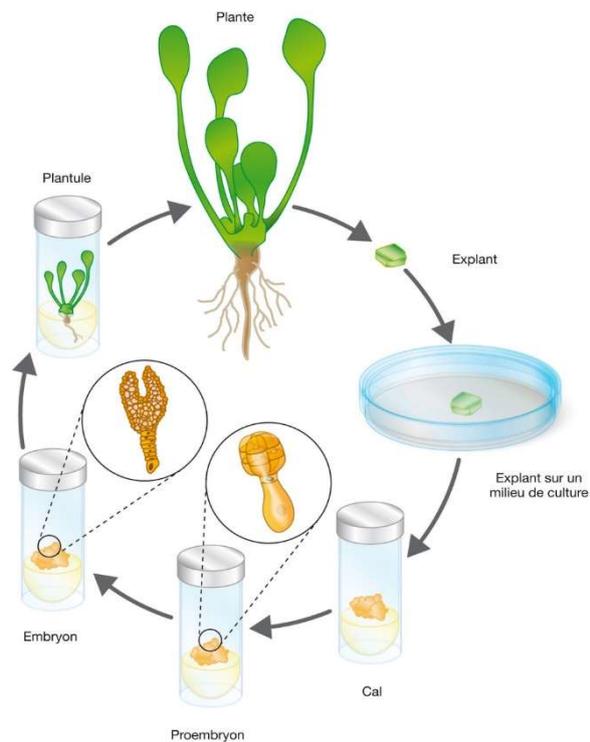


Figure 5.1: Totipotence et culture cellulaire végétale.
(<https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=121409&demande=desc>)

C'est une multiplication végétative très commune chez les embryophytes (les individus issus de la multiplication sont génétiquement identiques).

d) L'immobilisme

Les végétaux, contrairement aux animaux, ne peuvent pas se déplacer activement d'un endroit à un autre. Cependant, ils ont développé divers mécanismes pour coloniser de vastes territoires et se propager dans leur environnement.

Certains végétaux présentent une certaine mobilité au niveau de certaines parties de leur structure, telles que les fleurs, les feuilles ou les vrilles. Par exemple, les fleurs peuvent se déplacer pour mieux capter la lumière ou attirer les pollinisateurs, tandis que les feuilles peuvent s'orienter pour optimiser l'absorption de la lumière.

La dispersion des végétaux se fait principalement à travers la propagation de leurs spores, de leurs graines ou de leurs fruits. Les Bryophytes et les Ptéridophytes, par exemple, libèrent des spores qui peuvent être transportées par le vent ou d'autres moyens pour coloniser de nouveaux habitats. Les Spermaphytes, quant à eux, produisent des graines qui contiennent tout ce dont la plante a besoin pour germer et pousser dans un nouvel endroit. Les Angiospermes, avec leurs fruits, utilisent souvent les animaux pour disperser leurs graines.

En plus de ces méthodes de dispersion sexuée, les végétaux peuvent également se propager par fragmentation de leur appareil végétatif. Cela signifie que des parties de la plante, telles que des tiges ou des racines, peuvent se détacher et donner naissance à de nouvelles plantes.

Enfin, certains végétaux utilisent des structures spéciales telles que les rhizomes (tiges souterraines) ou les stolons (tiges rampantes s'enracinant) pour coloniser de nouveaux territoires. Par exemple, le muguet se propage grâce à ses rhizomes, tandis que le fraisier produit des stolons qui s'enracinent pour former de nouvelles plantes.

L'immobilisme est compensé par une chimie très développée.

e) *Le métabolisme des plantes*

On l'a déjà mentionné, la majorité des plants sont autotrophes, toutefois des exceptions existent

- ☞ **Plantes carnivores** (ou plutôt insectivores) autotrophes mais complément azoté et minéral à partir de la digestion d'insectes
- ☞ **Végétaux parasites**
 - Parasitisme : vie aux dépens d'un autre être vivant pas de chlorophylle donc pas de photosynthèse (ex. cuscute)
 - Végétaux semi ou hémiparasites chlorophylle donc photosynthèse mais pas de racines (ex. gui)
- ☞ **Symbiose** "association à bénéfices réciproques" entre 2 ou plus de 2 êtres vivants (ex. orchidées, légumineuses). 80% des Angiospermes réaliseraient une symbiose avec des champignons au niveau de leurs racines (Mycorrhizes).

➤ *Le métabolisme primaire*

Un métabolite primaire est un type de métabolite qui est directement impliqué dans la croissance, le développement et la reproduction normale d'un organisme ou d'une cellule. Ce composé a généralement une fonction physiologique dans cet organisme, c'est-à-dire une fonction intrinsèque. Un métabolite primaire est souvent présent dans de nombreux organismes taxonomiquement éloignés. Il est également désigné par métabolite central, qui prend même le sens plus restrictif de métabolite présent dans tous les organismes ou cellules en croissance autonome.

Ces métabolites comprennent des composés tels que les glucides (comme le glucose et le saccharose), les acides aminés (constituants des protéines), les acides gras (qui constituent les lipides), les nucléotides (éléments constitutifs des acides nucléiques tels que l'ADN et l'ARN). Les métabolites primaires sont produits dans les voies métaboliques fondamentales présentes dans toutes les cellules vivantes. Les plantes sont autotrophes pour ces métabolites grâce à la photosynthèse.

➤ *Le métabolisme secondaire*

Les métabolites secondaires sont historiquement plus spécifiques aux plantes, bactéries et champignons, mais on découvre également des métabolismes spécifiques à certains groupes animaux, que l'on peut donc qualifier des métabolismes secondaires. On les retrouve dans des compartiments particuliers ou à des moments précis de la vie.

Contrairement aux métabolites primaires, ils ne participent pas directement à l'assimilation des nutriments et donc, au développement de l'organisme (la plante, typiquement). Cependant, ces composés ne sont pas totalement différents des métabolites primaires. En effet, ils dérivent parfois des mêmes voies de biosynthèse et certains, comme la chlorophylle et la lignine ont des fonctions indispensables pour la croissance de la plante, et pourraient donc faire partie des métabolites primaires.

Les métabolites secondaires participent à la vie de relation de la plante (ou de leur organisme hôte), et ils ont des rôles très variés. Ils peuvent servir de défense (sécrétions amères ou toxiques pour les prédateurs) ou au contraire, attirer certaines espèces ayant des rôles bénéfiques (pollinisateurs). Ils peuvent également permettre la communication entre les plantes, par des messages d’alerte par exemple, ou faire partie de la structure de la plante (tanins et lignine).

Les métabolites secondaires se classent en de nombreux groupes, dont trois grands groupes chez les plantes :

- de type phénol : tanins, lignine, flavonoïdes
- de type azoté : alcaloïdes, bétalaïne, hétérosides cyanogènes et glucosinolates
- de type terpène : hémiterpènes (C5), monoterpènes (C10), sesquiterpènes (C15), diterpènes (C20), triterpènes (C30), tétraterpènes (C40) et polyterpènes (+ que C40).

f) *Phylogénie du règne Plantae*

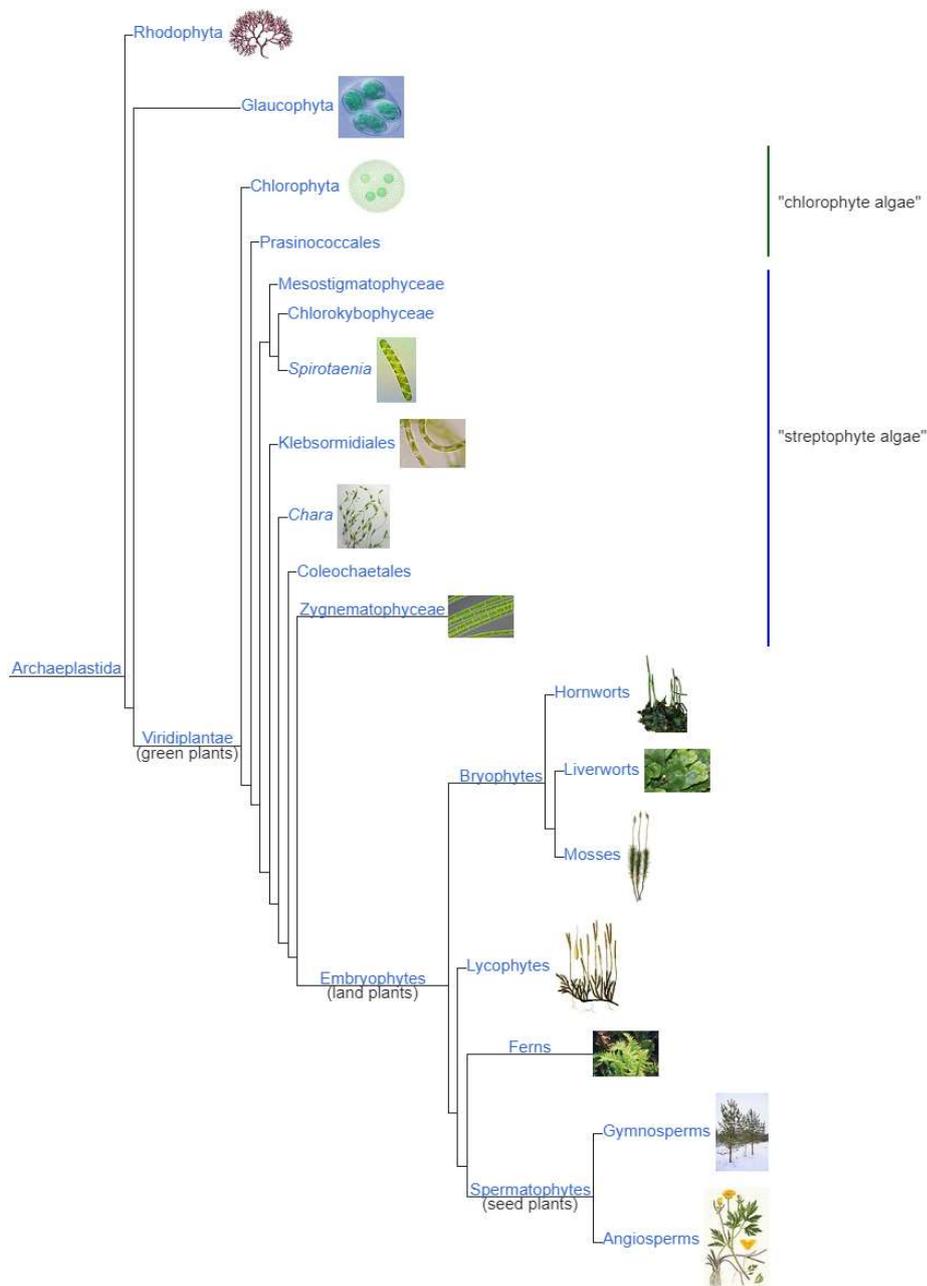


Figure 5.2: Arbre phylogénétique du règne Plantae. (Wikipédia)

En 2019, une étude phylogénétique exhaustive basée sur les génomes et transcriptomes de 1 153 espèces végétales a été réalisée. Cette étude a fourni des informations précieuses sur les relations évolutives entre différents groupes de plantes. Un aspect notable de cette phylogénie était le placement des groupes d'algues, qui a été soutenu par le séquençage des génomes de Mesostigmatophyceae et Chlorokybophyceae.

De manière intéressante, l'analyse a révélé que tant les "algues chlorophytes" que les "algues streptophytes" étaient traitées comme des groupes paraphylétiques. Cela signifie qu'elles ne forment pas de clades monophylétiques distincts, comme traditionnellement admis. La présence de groupes paraphylétiques indique que les relations évolutives entre ces organismes sont plus complexes que ce qui était précédemment pensé.

De plus, la classification des Bryophyta, qui comprend les mousses, les hépatiques et les anthocérotes, a été soutenue à la fois par l'étude de 2019 et par des analyses phylogénétiques impliquant le séquençage des génomes d'anthocérotes. Cela confirme les liens évolutifs de ces plantes non vasculaires et leur position au sein du règne végétal. Dans l'ensemble, ces avancées dans le séquençage génomique et l'analyse phylogénétique ont considérablement amélioré notre compréhension de l'évolution et de la taxonomie des plantes.

g) Diversité des plantes (tableau wikipedia)

Diversity of living green plant (Viridiplantae) divisions by number of species

Informal group ↕	Division name ↕	Common name ↕	No. of described living species ↕
Green algae	Chlorophyta	Green algae (chlorophytes)	3800–4300 [21][22]
Green algae	Charophyta	Green algae (e.g. desmids & stoneworts)	2800–6000 [23][24]
Bryophytes	Marchantiophyta	Liverworts	6000–8000 [25]
Bryophytes	Anthocerotophyta	Hornworts	100–200 [26]
Bryophytes	Bryophyta	Mosses	12000 [27]
Pteridophytes	Lycopodiophyta	Clubmosses	1200 [28]
Pteridophytes	Polypodiophyta	Ferns, whisk ferns & horsetails	11000 [28]
Spermatophytes (seed plants)	Cycadophyta	Cycads	160 [29]
Spermatophytes (seed plants)	Ginkgophyta	Ginkgo	1 [30]
Spermatophytes (seed plants)	Pinophyta	Conifers	630 [28]
Spermatophytes (seed plants)	Gnetophyta	Gnetophytes	70 [28]
Spermatophytes (seed plants)	Angiospermae	Flowering plants	258650 [31]

I. Les Rhodophytes (*Rhodophyta*) ; Algues rouges

Les algues rouges (division *Rhodophyta*) regroupent environ 6 000 espèces d'algues principalement marines, souvent trouvées attachées à d'autres plantes du littoral. Leur gamme morphologique comprend des thalles filamenteux, ramifiés, plumeux et en forme de feuille. La taxonomie du groupe est controversée, et l'organisation de la division *Rhodophyta* peut ne pas refléter avec précision la phylogénie (relations évolutives) de ses membres.

Les Rhodophycées seule classe de l'embranchement des Rhodophytes, comprend deux sous-classes assez différentes l'une de l'autre à bien des égards : les Bangiophycidées et les Floridéophycidées ou Floridées.

1. Morphologie

1.1 Pigmentation

Les rhodophytes contiennent des pigments rencontrés chez les autres végétaux, la chlorophylle a et des caroténoïdes, mais leur originalité consiste dans la présence de phycobilisomes comprenant les phycobiliprotéines : allophycocyanine (bleu), phycocyanine (bleu) et phycoérythrine qui donne la couleur rouge. Le chloroplaste peut alors être appelé rhodoplaste. L'organisation du chloroplaste est la suivante : les thylakoïdes sont libres et ne forment pas de grana (ceci est lié à la présence des phycobilisomes à la surface des thylakoïdes), ils sont répartis concentriquement dans le chloroplaste mais occupent tout l'espace, contrairement à ceux des Glaucophytes et des Cyanobactéries.

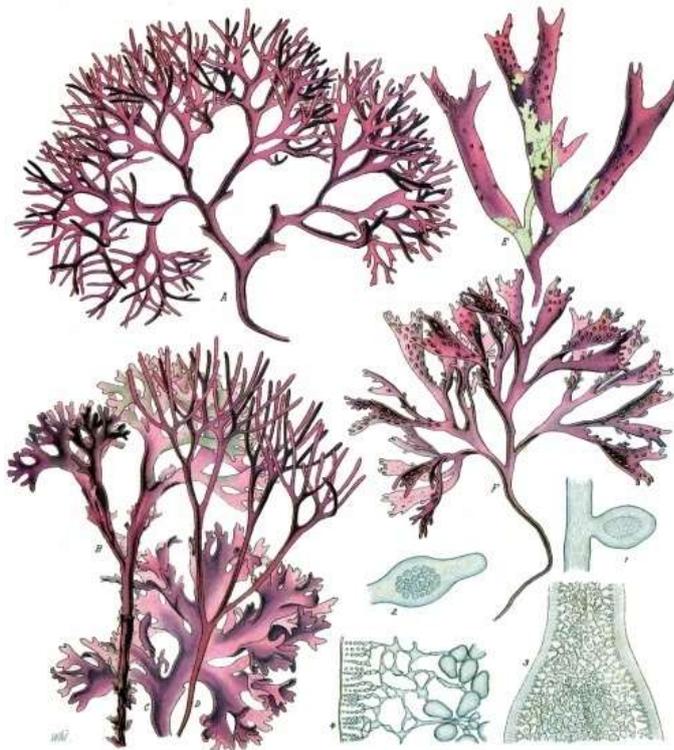


Figure 5.3: Différentes formes de deux espèces d'algues rouges : *Chondrus crispus* et *Gigartina mamillosa*. Les lettres A, B, C, D représentent différentes formes de *Chondrus crispus*, tandis que les lettres E et F représentent des formes de *Gigartina mamillosa*. Les chiffres 1 à 4 décrivent des sections transversales et longitudinales de parties des thalles et des cystocarpes de ces algues, agrandies pour une meilleure observation.

Köhler's Medizinal-Pflanzen

La pigmentation (rapport des pigments présents) dépend à un degré remarquable de la longueur d'onde de la lumière qui atteint l'algue. En profondeur, les algues accumulent une grande quantité de phycoérythrine, pigment qui peut absorber la lumière à cette profondeur. Si les algues sont en surface, ce pigment rouge diminue, elles deviennent plus vertes malgré leur appellation. Cependant les quantités de chlorophylles demeurent inchangées que l'algue soit en surface ou en profondeur ; on parle alors d'adaptation chromatique.

Nota bene, La chlorophylle d a longtemps été décrite comme étant présente dans les chloroplastes des algues rouges ; en réalité, elle se trouve seulement dans les cyanobactéries épiphytes.

1.2 Organisation cellulaire

Les algues rouges ont des parois cellulaires doubles. Les couches externes contiennent les polysaccharides agarose et agaropectine qui peuvent être extraits des parois cellulaires sous

forme d'agar par ébullition. Les parois internes sont principalement constituées de cellulose. Les génomes plastidiaux des algues rouges sont également les plus riches en gènes connus.

La structure cellulaire des algues rouges ne comprend ni flagelles ni centrioles pendant tout leur cycle de vie. Les caractéristiques distinctives de la structure cellulaire des algues rouges incluent la présence de fibres fusoriales normales, de microtubules, de membranes photosynthétiques non empilées, de granules de pigments phycoblines, de connexions intercellulaires en fosse, de genres filamenteux, et l'absence de réticulum endoplasmique chloroplastique.

L'amidon est stocké sous forme de vésicules dans le cytoplasme (et non dans le plaste comme chez les plantes et algues vertes) : l'amidon floridéen (aussi appelé rhodamylon).

1.3 Ecologie

Les rhodophytes, ou algues rouges, sont des organismes marins présents dans une variété d'habitats, allant des côtes rocheuses aux récifs coralliens. Leur rôle écologique est crucial, fournissant habitat, nourriture et protection à de nombreuses espèces marines. Certaines algues rouges sont abondantes dans les récifs de coraux. Les Corallinaceae produisent une enveloppe extracellulaire de carbonate de calcium et peuvent participer à la construction du récif de corail.

Certaines algues rouges sont très résistantes à des conditions extrêmes et sont donc extrémophiles : par exemple, *Cyanidium caldarium* vit à un pH inférieur à 1 dans les sources acides.

Chondrus crispus et *Mastocarpus stellatus* (*Gigartina stellata*) sont souvent associées et vivent fixées au rocher. Ces deux espèces sont récoltées afin d'extraire les carraghénanes utilisés comme gélifiant dans l'industrie agroalimentaire.

L'agar-agar est un polymère de galactose (galactane) contenu dans la paroi cellulaire de certaines espèces d'algues rouges appartenant aux familles des Gelidiacées (*Gelidium* et *Pterocladia*) et des Gracilariacées (*Gracilaria*). L'agar-agar est largement utilisé en cuisine et dans diverses méthodes biologiques.

1.4 Cycle de vie

☞ La reproduction asexuée

La reproduction asexuée peut se faire par la production de spores et par des moyens végétatifs tels que la fragmentation, la division cellulaire ou la production de propagules.

Chez certaines Bangiophycidées, la reproduction s'effectue uniquement par voie végétative, par fragmentation du thalle en cellules isolées. Chez d'autres, ainsi que chez certaines Floridées, il existe une reproduction indépendante du cycle sexué, par spores mitotiques (monospores et paraspires) qui redonnent directement une génération identique à celle qui les a produites.

☞ La reproduction sexuée

Les gamétophytes sont en majorité dioïques. La cellule femelle (carpogone) ne libère pas de gamète ; elle demeure fixée au gamétophyte et est pourvue d'une papille (Bangiophycidées) ou d'un long poil appelé trichogyne (Floridées) permettant la fécondation. Le carpogone résulte parfois (Acrochaetiales) de la transformation d'une cellule végétative quelconque du thalle, mais, plus souvent, il se trouve au sommet d'un court rameau adventif, en général de deux à

cinq cellules : le rameau carpogonial ; chez les Cryptonémiales (Dudresnaya), celui-ci est lui-même porté par un rameau adventif différencié, le gonophore carpogonial, qui joue un rôle important lors du développement du zygote.

Les gamètes mâles proviennent, chez les Bangiophycidées, de la division répétée d'une cellule végétative par des cloisonnements successifs, perpendiculaires les uns aux autres, en petites cellules incolores, libérées par gélification des parois. Chez les Floridées, les cellules mâles se forment isolément dans des spermatocystes souvent groupés en bouquets (exemple : Polysiphonia). Dans tous les cas, les cellules mâles, ou spermaties, sont de petites cellules, immobiles et dépourvues de paroi cellulaire. Elles sont transportées passivement par les mouvements de l'eau, au voisinage d'un trichogyne sur lequel l'une d'elles se fixe et déverse son contenu dans le trichogyne, le noyau mâle fusionnant ensuite avec celui du carpogone.

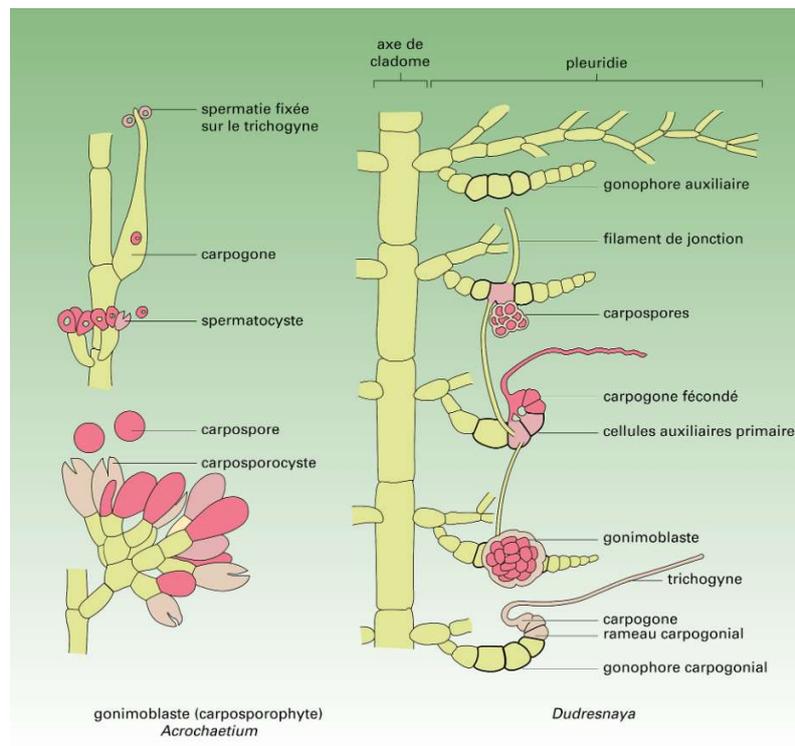


Figure 5.4: Reproduction sexuée et développement du carposporophyte.

☞ Développement du zygote : le carposporophyte

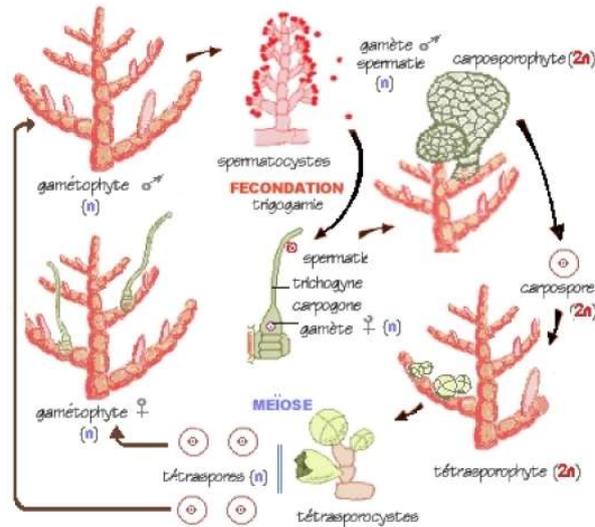
Le zygote né du carpogone fécondé demeure sur le gamétophyte. Chez les Porphyra, il se divise en un certain nombre de spores (carpospores) qui sont ensuite libérées. Chez les Floridées, il se développe en un tissu diploïde (gonimoblaste) qui produira des carpospores ; il représente une génération distincte, le carposporophyte.

Chez les Floridées inférieures, le carposporophyte, constitué de cellules à plastes pigmentés, n'est pas totalement parasite ; par contre, chez les formes les plus évoluées, le carposporophyte, dépourvu à l'état jeune de pigments assimilateurs, est devenu un parasite obligatoire du gamétophyte. Ce parasitisme se manifeste notamment par la fusion de filaments issus du zygote, donc diploïdes, avec des cellules particulières du gamétophyte. Les cellules qui hébergent ainsi un noyau parasite diploïde constituent des cellules auxiliaires ; elles vont permettre à ce noyau de se multiplier pour donner finalement naissance à des groupes de carpospores.

☞ Une reproduction à cycle trigénétiqes

Trois générations se succèdent dans le cycle trigénétiqes car la phase diploïde se déroulent en deux périodes distinctes : la première (carposporophyte) est issue du zygote et se développe en parasite sur le gamétophyte femelle, elle disséminera des carpospores (spores mitotiques diploïdes) donnant la deuxième génération diploïde : le tétrasporophyte.

Figure 5.5: Cycle de vie d'Antithamnion.



2. Les Glaucophytes

Les glaucophytes sont des êtres eucaryotes unicellulaires qui vivent dans les lacs, les mares ou les marécages des régions tempérées, parmi la végétation (ils font partie du plancton). Ils sont structurés dorso-ventralement. Ainsi, leur face dorsale est arrondie, tandis que leur ventre est plat et présentant deux flagelles de longueurs inégales. Ils constituent un groupe d'algues d'eau douce, de diversité réduite : seules 14 espèces ont été décrites et sont actuellement acceptées.



Figure 5.6: *Glaucocystis* sp. vu au microscope.

Les chloroplastes présents dans ces cellules ont la particularité d'être bleu-vert, à cause de la présence de phycocyanine et d'allophycocyanine dans les phycobilisomes. Il s'agit de pigments dits accessoires. De plus la présence d'« alvéoles » sous la membrane plasmique sous-tendues par des microtubules.

La reproduction se fait par fission binaire longitudinale chez les mastigotes, par plusieurs mastigotes ou des cellules reproductrices immobiles chez les membres capsalean et coccoides. La sexualité n'a pas encore été rapportée.

3. Les algues vertes

Les algues vertes sont un groupe d'eucaryotes autotrophes contenant de la chlorophylle, comprenant les phylums Chlorophyta et les Streptophyta. Les algues vertes comprennent des flagellés unicellulaires et coloniaux, la plupart avec deux flagelles par cellule, ainsi que diverses formes coloniales, coccoides et filamenteuses, et des macroalgues multicellulaires

macroscopiques. Il existe environ 22 000 espèces d'algues vertes, dont beaucoup vivent la majeure partie de leur vie sous forme de cellules uniques, tandis que d'autres forment des coénobies (colonies), des filaments longs ou des macroalgues hautement différenciées.

Les algues vertes ne forment pas un groupe évolutif complet et cohérent ; elles sont représentées par différents taxons qui ne sont pas phylogénétiquement apparentés. L'origine et la date d'apparition des différents groupes d'algues vertes sont encore très discutées.

3.1 Structure cellulaire

Les algues vertes ont des chloroplastes contenant de la chlorophylle a et b, leur donnant une couleur verte vive, ainsi que des pigments accessoires, le bêta-carotène (rouge-orange) et les xanthophylles (jaune) dans les thylakoïdes empilés. Les parois cellulaires des algues vertes contiennent généralement de la cellulose, et elles stockent les glucides sous forme d'amidon.

Toutes les algues vertes ont des mitochondries avec des crêtes plates. Lorsqu'elles sont présentes, les flagelles appariés sont utilisés pour déplacer la cellule. Ils sont ancrés par un système en forme de croix de microtubules et de filaments fibreux.

3.2 La reproduction des algues vertes

Les algues vertes sont un groupe d'organismes photosynthétiques eucaryotes comprenant des espèces avec des cycles de vie haplophasique et diplophasique (cycle cytologique). Les espèces diplophasique, telles que *Ulva*, suivent un cycle reproductif appelé alternance de générations, dans lequel deux formes multicellulaires, haploïdes et diploïdes, alternent, et peuvent ou non être isomorphes (ayant la même morphologie).

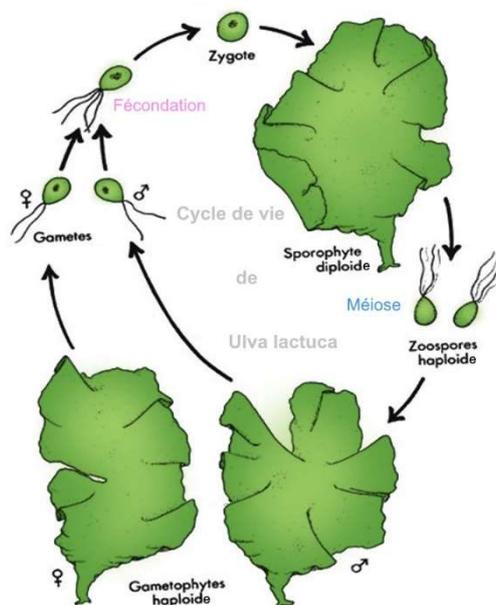


Figure 5.7: Cycle trigénétique de la laitue de mer (*Ulva lactuca*).

Chez les espèces haplophasiques, seule la génération haploïde, le gamétophyte, est multicellulaire. L'œuf fécondé, le zygote diploïde, subit la méiose, donnant naissance à des cellules haploïdes qui deviendront de nouveaux gamétophytes. Les formes diplophasiques, qui ont évolué à partir d'ancêtres haplophasique, ont à la fois une génération haploïde multicellulaire et une génération diploïde multicellulaire. Ici, le zygote se divise de manière

répétée par mitose et se développe en un sporophyte diploïde multicellulaire. Le sporophyte produit des spores haploïdes par méiose qui germent pour produire un gamétophyte multicellulaire.

Les algues vertes diplophasiques comprennent des formes isomorphes et hétéromorphes. Chez les algues isomorphes, la morphologie est identique dans les générations haploïdes et diploïdes. Chez les algues hétéromorphes, la morphologie et la taille sont différentes chez le gamétophyte et le sporophyte.

La reproduction varie de la fusion de cellules identiques (isogamie) à la fécondation d'une grande cellule non mobile par une plus petite et mobile (oogamie). Cependant, ces caractéristiques présentent une certaine variation, notamment chez les algues vertes basales appelées prasinophytes.

Les cellules algues haploïdes (ne contenant qu'une seule copie de leur ADN) peuvent fusionner avec d'autres cellules haploïdes pour former des zygotes diploïdes (Cycle monogénétique haplophasique). Lorsque les algues filamenteuses font cela, elles forment des ponts entre les cellules et laissent derrière elles des parois cellulaires vides qui peuvent être facilement distinguées au microscope optique. Ce processus est appelé conjugaison et se produit, par exemple, chez *Spirogyra*.

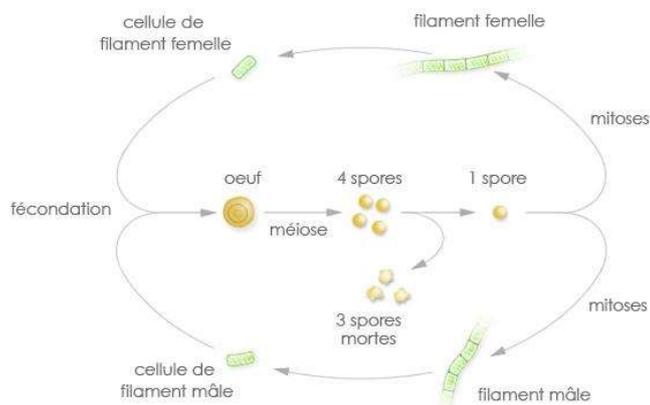


Figure 5.8: Cycle de vie (monogénétique haplophasique).

Cycle biologique de développement du spirogyre

(l'oeuf est la seule cellule diploïde, toutes les autres cellules sont haploïdes)
doris.ifassm.fr © Dagmar DAUGY

3.3 Ecologie

☞ Habitats aquatiques

- Les algues vertes sont présentes dans les eaux douces, telles que les lacs, les rivières, les étangs et les marais.
- Elles colonisent également les milieux marins, notamment les littoraux, les estuaires et les récifs coralliens.
- Certaines espèces d'algues vertes se trouvent dans des environnements extrêmes, comme les sources chaudes et les eaux saumâtres.

☞ Habitats terrestres

- Les algues vertes peuvent coloniser une grande variété de substrats terrestres, tels que le sol, les rochers, l'écorce des arbres et les surfaces humides.

- Elles sont souvent présentes dans les milieux humides, tels que les marécages, les tourbières et les prairies humides.
- Certaines algues vertes sont des organismes pionniers, colonisant les sols nus ou perturbés, contribuant ainsi à la succession écologique.

☞ **Associations symbiotiques**

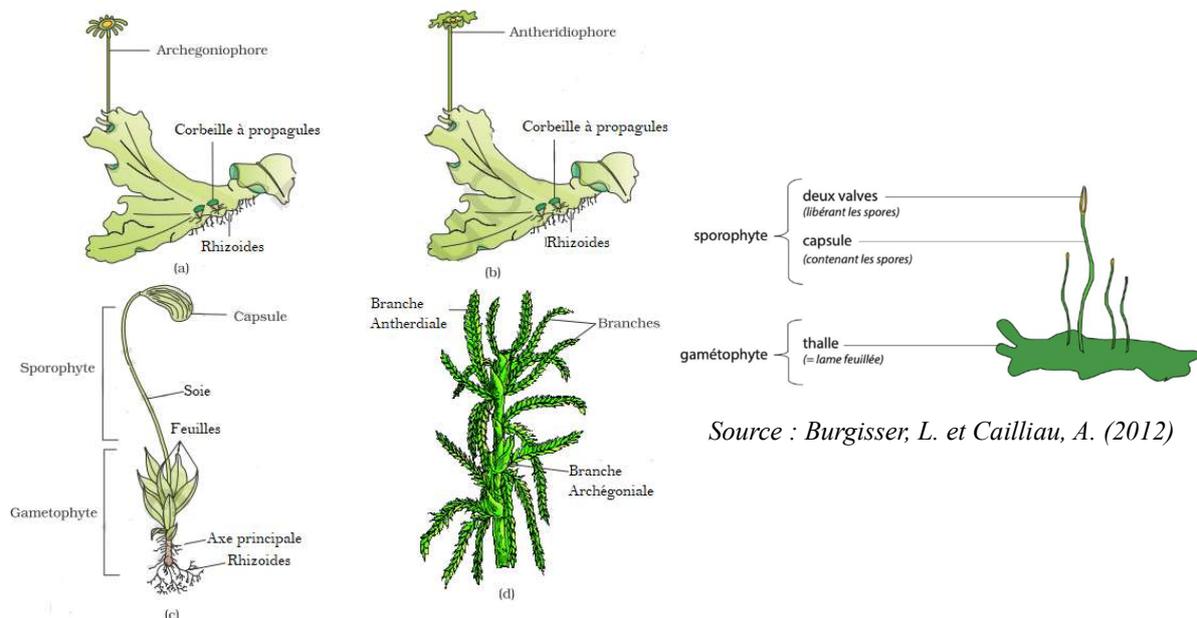
- Les algues vertes peuvent former des associations symbiotiques avec d'autres organismes, tels que les champignons pour former des lichens, les protozoaires, les cnidaires et même certains invertébrés aquatiques.
- Elles peuvent également être des symbiontes dans les tissus de certains animaux, tels que les coraux, les hydres et les plathelminthes.

☞ **Rôle écologique**

- Les algues vertes sont des producteurs primaires essentiels dans de nombreux écosystèmes aquatiques, fournissant de la nourriture et de l'oxygène à de nombreuses autres formes de vie.
- Elles contribuent à la stabilisation des sols, à la fixation de l'azote et à la filtration de l'eau dans les écosystèmes terrestres et aquatiques.
- Certaines espèces d'algues vertes sont considérées comme des bioindicateurs de la qualité de l'eau en raison de leur sensibilité aux changements environnementaux.

4. Les bryophytes

Les bryophytes sont des plantes terrestres thalloïdes ou feuillées non vascularisées. Parmi les plantes actuelles, les bryophytes terrestres et les bryophytes aquatiques sont celles qui ont conservé le plus de caractères des premières plantes ayant colonisé la terre ferme. Les ancêtres de toutes les plantes terrestres, donc des bryophytes, sont des algues vertes, Charophyceae.



Source : Burgisser, L. et Cailliau, A. (2012)

Figure 5.9: Bryophytes *sensu lato*

Une hépatique : *Marchantia* (a) Thalle femelle (b) Thalle mâle
 Mousses : (c) *Funaria*, gamétophyte et sporophyte (d) Gamétophyte de sphaigne.
 Anthocérotes : à droite.

Même si certaines structures anatomiques leur permettent de résister à la dessiccation, les Bryophytes sont encore extrêmement dépendantes de l'eau ou des milieux humides, ou en tout

cas d'une hygrométrie minimale au moment de leur reproduction. Cette exigence n'empêche pas une grande plasticité écologique qui leur permet de vivre dans toutes les régions du globe, de l'équateur jusqu'aux pôles.

Pris au sens large, c'est-à-dire celui des classifications traditionnelles, le terme « bryophyte » s'applique aux trois embranchements de plantes terrestres qui ne possèdent pas de vrai système vasculaire : les Marchantiophyta (hépatiques), les Bryophyta *sensu stricto* (mousses, sphaignes) et les Anthocerotophyta (anthocérotes), regroupés dans le sous-règne des Bryobiotina du règne des Chlorobiota. Au sens strict de la botanique, l'embranchement des Bryophyta ne concerne donc que les mousses et les sphaignes (à l'exception donc des Marchantiophyta et des Anthocerotophyta).

Avec près de 25 000 espèces de mousses et sphaignes, 9 000 espèces d'hépatiques (Marchantiophyta) et 300 espèces d'anthocérotes, les bryophytes constituent le second groupe de végétaux terrestres, après les Dicotylédones.

4.1 La reproduction chez les bryophytes

☞ Reproduction végétative

Les bryophytes peuvent se reproduire de manière végétative, notamment par fragmentation, où des parties de la plante se détachent et donnent naissance à de nouvelles individus. Certaines hépatiques ont développé des structures spécialisées de dispersion appelées propagules, tandis que des structures telles que les gemmules et les bulbilles sont présentes chez certaines mousses. Ces éléments de dispersion sont principalement transportés par le vent, bien que des vecteurs animaux tels que les chauves-souris, les fourmis et les limaces puissent également être impliqués. L'allocation des ressources, c'est-à-dire la manière dont les nutriments sont répartis, reflète des compromis évolutifs entre la reproduction sexuée, favorisée pendant les phases de colonisation, et la reproduction asexuée, favorisée au sein des colonies matures.

☞ Reproduction sexuée

Comme pour les algues vertes et les plantes vertes, le cycle de vie des mousses implique une alternance entre des sporophytes et des gamétophytes. Les anthérozoïdes (ou spermatozoïdes) et les oosphères sont protégés et formés respectivement par des anthéridies et des archégonies, caractéristiques partagées avec les plantes vasculaires. Les organes sexuels, tels que les anthéridiophores et les archégoniophores, portent les structures fertiles (anthéridies et archégonies) qui renferment les gamétanges. Les anthérozoïdes ciliés sont libérés de l'anthéridie et transportés par l'eau vers l'oosphère pour la fécondation. L'embryon résultant est nourri et protégé par le gamétophyte. Le sporophyte reste attaché au gamétophyte et ne devient jamais indépendant. Les spores sont protégées par une paroi contenant de la sporopollénine pour éviter la dessiccation lors de la dissémination. Le cycle de vie est haplodiplophasique avec prédominance du gamétophyte sur le sporophyte. La fécondation peut entraîner la production d'un ou plusieurs sporophytes à partir d'une ou plusieurs oosphères.

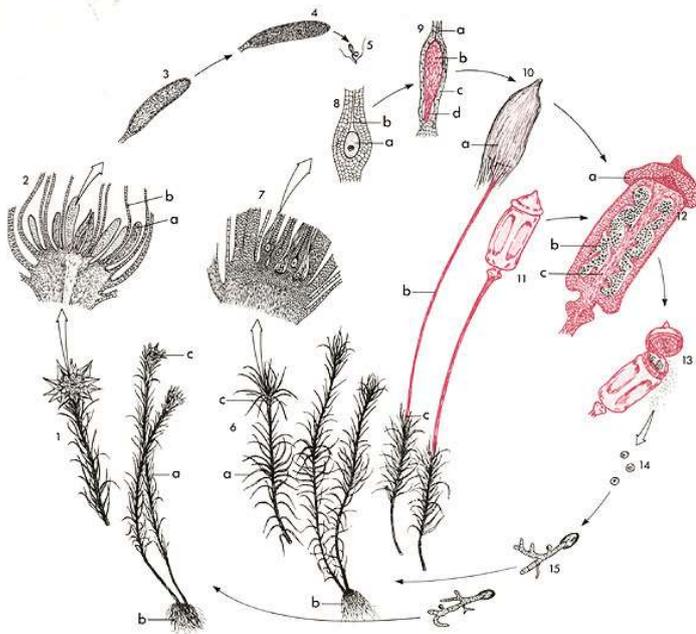


Figure 5.10: Cycle de vie d'une mousse du genre *Polytrichum*. Les structures diploïdes sont dessinées en rouge.

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1 Gamétophyte feuillé, mâle | 9 Archégone |
| a Feuilles | a O(v)osphère |
| b Rhizoïdes | b Embryon (sporophyte) |
| c Anthéridiophore | c Ventre de l'archégone |
| 2 Anthéridiophore | d Pied |
| a Anthéridie | 10 Sporophyte porté sur le gamétophyte |
| b Paraphyse | a Coiffe |
| 3-4 Anthéridie | b Soie |
| 5 Anthérozoïde | c Pied |
| 6 Gamétophyte feuillé, femelle | 11 Capsule (coiffe emportée) |
| a Feuilles | 12 Capsule |
| b Rhizoïdes | a Opercule |
| c Archégoniophore | b Spores |
| 7 Archégoniophore | c Cellules-mères de spores |
| 8 Archégone | 13 Sporophyte déhiscent |
| a O(v)osphère | 14 Spore |
| b Col de l'archégone | 15 Protonéma |

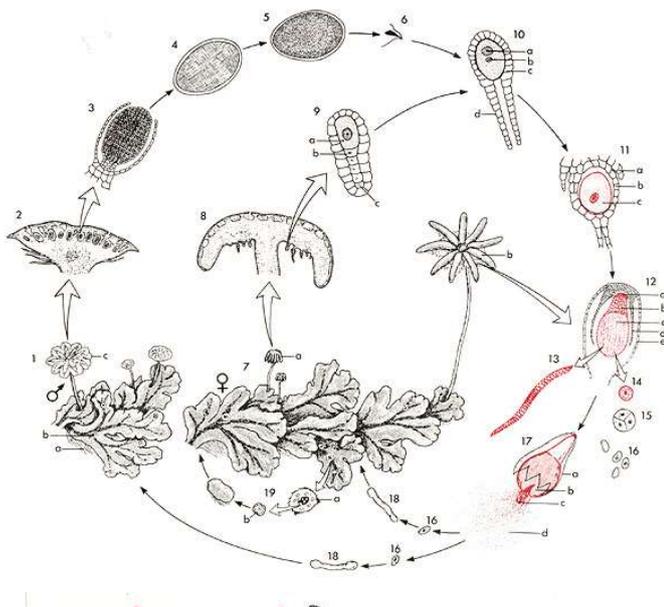


Figure 5.11: Cycle de vie de l'hépatique *Marchantia polymorpha*. Les structures diploïdes sont dessinées en rouge.

- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1 Thalle (gamétophyte) | a Coiffe (involucre) |
| a Rhizoïdes | b Ventre |
| b Corbeille à propagules | c Zygote |
| c Anthéridiophore | 12 Archégone développé |
| 2 Anthéridiophore | a Pied |
| 3-5 Anthéridie | b Soie |
| 6 Anthérozoïde | c Capsule |
| 7 Thalle (gamétophyte) | d Ventre |
| a Jeune archégoniophore | e Coiffe (involucre) |
| b Archégoniophore mature | 13 Elatère |
| 8 Archégoniophore | 14 Cellule-mère de spore |
| 9 Archégone | 15 Tétrade |
| a O(v)osphère | 16 Spores |
| b Cellule ventrale du canal du col | 17 Sporophyte déhiscent |
| c Cellule apicale du canal du col | a Coiffe (involucre) |
| 10 Archégone | b Capsule |
| a Noyau de l'o(v)osphère | c Elatères |
| b Noyau de l'anthérozoïde | d Spores |
| c Ventre de l'archégone | 18 Spore germant |
| d Col de l'archégone | 19 Cycle de reproduction asexuée |
| 11 Archégone | a Corbeille à propagules |
| | b Propagule |

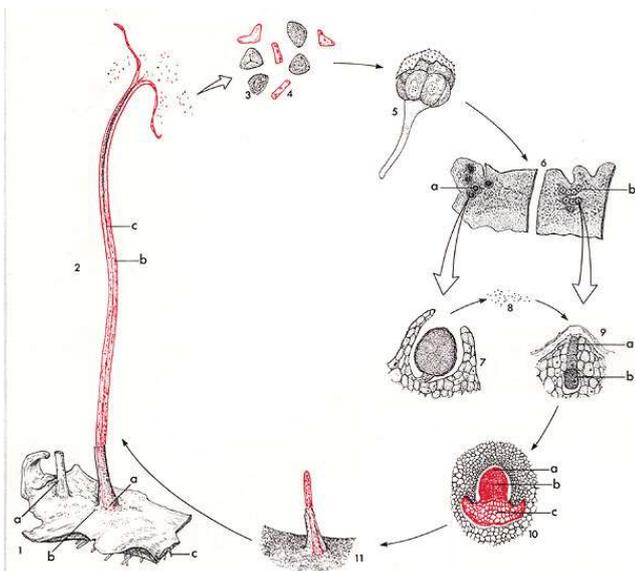


Figure 5.12: Cycle de vie d'une anthocéroïte du genre *Anthoceros*. Les structures diploïdes sont dessinées en rouge.

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1 Gamétophyte | 7 Anthéridie |
| a Involucre tubulaire | 8 Anthérozoïdes |
| b Thalle | 9 Archégone |
| c Rhizoïdes | a Cellules du canal du col |
| 2 Sporophyte | b O(v)osphère |
| a Pied | 10 Jeune sporophyte dans le thalle |
| b Epiderme | a Amphithecium |
| c Columelle centrale | b Endothecium |
| 3 Spores | c Pied |
| 4 Elatères | 11 Jeune sporophyte émergant de l'involucre |
| 5 Spore germant | |
| 6 Gamétophyte: face dorsale | |
| a Anthéridie | |
| b Archégone | |

4.2 Ecologie

Les bryophytes sont des organismes ubiquistes, présents dans une grande variété d'habitats terrestres, mais absents des milieux marins et des environnements très arides. Grâce à leurs adaptations, ils ont colonisé presque tous les types de terres jusqu'aux zones subpolaires. Ils se développent sur le sol, dans l'humus, les milieux tourbeux, sur les rochers, les bois morts et même en tant qu'épiphytes. Leur capacité à retenir l'eau, notamment chez les sphaignes, est remarquable, ce qui en fait des éléments clés des écosystèmes, contribuant à la rétention et à la régulation de l'eau.

Les bryophytes sont principalement autotrophes grâce à la photosynthèse, mais quelques espèces, comme *Cryptothallus mirabilis*, sont non chlorophylliennes et dépendent de symbioses avec des champignons pour leur nutrition. Malgré leur importance écologique, ils sont peu consommés par les herbivores en raison de la synthèse de composés défensifs peu digestes. Néanmoins, ils jouent un rôle crucial dans les écosystèmes en fournissant des microhabitats pour une grande diversité d'organismes, en offrant de la nourriture à certaines espèces, et en participant à la décomposition de la matière organique.

Les bryophytes fournissent également de nombreux services écosystémiques aux humains, tels que l'utilisation dans l'industrie, l'agriculture, la médecine et la construction. Ils sont utilisés comme indicateurs de la qualité de l'air et de la contamination métallique, ce qui en fait des outils précieux pour la biosurveillance environnementale. Leur capacité à accumuler certains polluants en fait également des agents importants dans la détoxification des milieux contaminés.

5. Les Ptéridophytes

Les ptéridophytes comprennent les prêles et les fougères. Ce sont les premières plantes terrestres à posséder des tissus vasculaires : le xylème et le phloème. Les ptéridophytes se trouvent dans des endroits frais, humides et ombragés, bien que certains puissent bien s'épanouir dans des conditions de sol sablonneux. Les ptéridophytes sont en outre classés en quatre classes : Psilopsida (*Psilotum*) ; Lycopsida (*Selaginella*, *Lycopodium*), Sphenopsida (*Equisetum*) et Pteropsida (*Dryopteris*, *Pteris*, *Adiantum*).

Alors que chez les bryophytes, la phase dominante du cycle de vie est le corps végétal gamétophytique, chez les ptéridophytes, le corps végétal principal est un sporophyte qui se différencie en vraie racine, tige et feuilles (Figure 5). Ces organes possèdent des tissus vasculaires bien différenciés. Les feuilles des ptéridophytes sont petites (microphylles) comme chez *Selaginella* ou grandes (macrophylles) comme chez les fougères.

Les ptéridophytes sont utilisées à des fins médicinales et comme liants du sol. Ils sont aussi fréquemment cultivés comme plantes ornementales.

Le groupe des Pteridophyta est paraphylétique : il regroupe dans un même taxon les Lycopodiopsida et les Polypodiopsida, alors que phylogénétiquement, au sein des Tracheophyta (les plantes vasculaires), les Polypodiopsida sont plus proches des Spermatophyta (les plantes à graines) que des Lycopodiopsida.

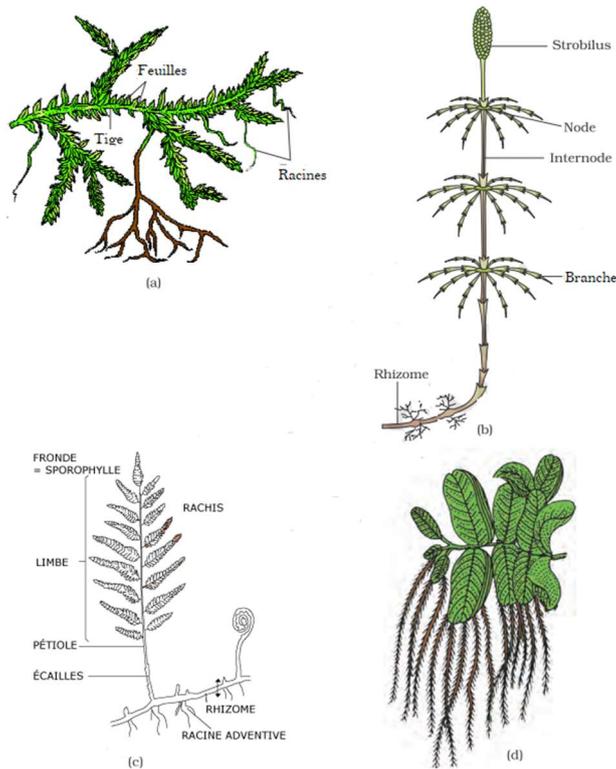


Figure 5.13: Ptéridophytes

(a) *Selaginella*(b) *Equisetum*

(c) Fougère

(d) *Salvinia*

5.1 La reproduction chez les ptéridophytes

Les sporophytes portent des sporanges qui sont sous-tendus par des appendices en forme de feuille appelés sporophylles. Dans certains cas, les sporophylles peuvent former des structures compactes distinctes appelées strobiles ou cônes (*Selaginella*, *Equisetum*). Les sporanges produisent des spores par méiose dans les cellules mères des spores. Les spores germent pour donner naissance à des gamétophytes thalloïdes discrets, petits mais multicellulaires, libres, principalement photosynthétiques, appelés prothalle. Ces gamétophytes ont besoin d'endroits frais, humides et ombragés pour se développer. En raison de cette exigence restreinte spécifique et du besoin d'eau pour la fertilisation, la propagation des ptéridophytes vivants est limitée et restreinte à des régions géographiques étroites.

Les gamétophytes portent des organes sexuels mâles et femelles appelés respectivement anthéridies et archégones. L'eau est nécessaire pour le transfert des anthérozoïdes - les gamètes mâles libérés des anthéridies vers l'embouchure de l'archégone. La fusion du gamète mâle avec l'œuf présent dans l'archégone entraîne la formation du zygote. Le zygote produit ensuite un sporophyte multicellulaire bien différencié qui est la phase dominante des ptéridophytes.

Dans la majorité des ptéridophytes, toutes les spores sont de types similaires ; ces spores sont appelées homosporées. Des genres comme *Selaginella* et *Salvinia*, qui produisent deux types de spores, les macro (grandes) et les micro (petites) spores, sont appelés hétérosporées. Les mégaspores et les microspores germent et donnent respectivement naissance à des gamétophytes femelles et mâles. Les gamétophytes femelles de ces plantes sont retenus sur les sporophytes parents pendant des périodes variables. Le développement des zygotes en jeunes embryons a lieu au sein des gamétophytes femelles.

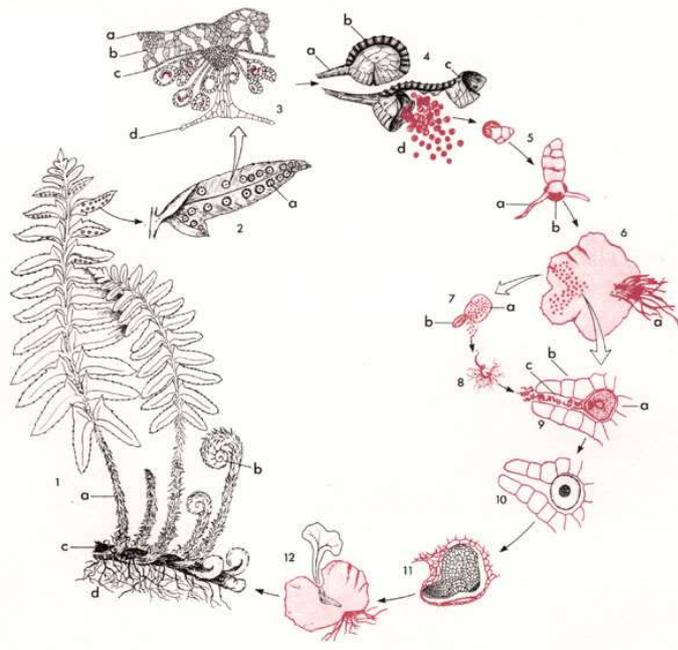


Figure 5.14: Cycle de vie d'une fougère. Les structures haploïdes sont dessinées en rouge.

- | | |
|---|------------------------------------|
| 1 Sporophyte mature | 5 Jeune prothalle (= gamétophyte) |
| a Pétiole | a Rhizoïdes |
| b Fronde circinée (= enroulée) | b Paroi de la spore |
| c Rhizome | 6 Prothalle mature (= gamétophyte) |
| d Racines adventives | a Rhizoïdes |
| 2 Face inférieure d'un segment ou penna | 7 Anthéridie |
| a Sore | a Cellule annulaire |
| 3 Sore en coupe | b Cellule operculaire |
| a Epiderme supérieur | 8 Anthérozoïdes |
| b Tissus spongieux | 9 Archégone avec o(v)osphère |
| c Epiderme inférieur | a Ventre |
| d Indusie | b Col |
| 4 Sporange | c Cellule du col |
| a Pédoncule | 10 Zygote dans l'archégone |
| b Anneau mécanique | 11 Sporophyte embryonnaire |
| c Cellule de la lèvres | 12 Sporophyte sur le gamétophyte |
| d Spores | |

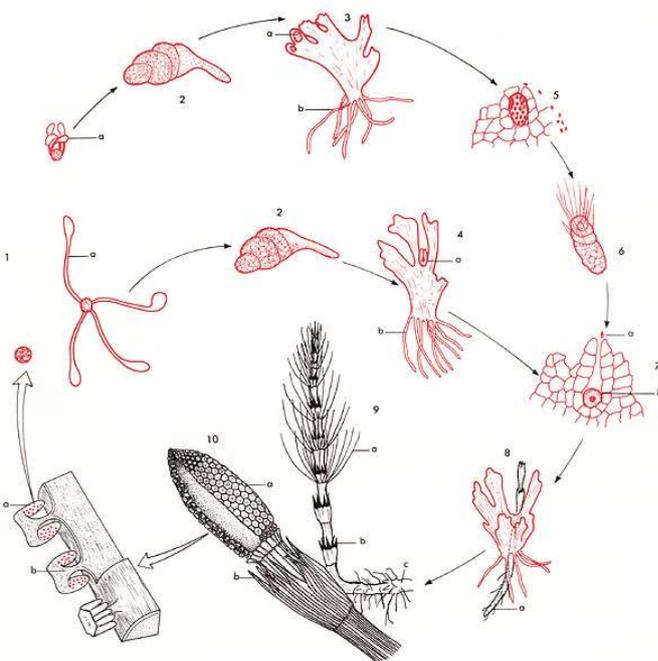


Figure 5.15: Cycle de vie d'une prêle du genre *Equisetum*. Les structures haploïdes sont dessinées en rouge.

- | | |
|------------------|--|
| Gamétophyte: | Sporophyte: |
| 1 Spores | 8 Jeune sporophyte sur gamétophyte |
| a Elatères | a Racine primaire |
| 2 Spores germant | 9 Pousse végétative |
| 3 Prothalle | a Verticilles |
| a Anthéridie | b Ecaille foliaire |
| b Rhizoïdes | c Rhizome |
| 4 Prothalle | 10 Pousse fertile |
| a Archégone | a Strobile |
| b Rhizoïdes | b Ecaille foliaire |
| 5 Anthéridie | 11 Portion de strobile avec 3 sporophylles |
| 6 Anthérozoïde | a Sporange |
| 7 Archégone | b Sporangiophore |
| a Anthérozoïde | |
| b O(v)osphère | |

5.2 Ecologie

Au vu des connaissances disponibles, dans leurs habitats, ce groupe taxonomique semble être caractérisé par quelques caractéristiques inhabituelles dans le monde du vivant :

- des interactions relativement réduites avec les autres espèces ; la reproduction et la dispersion de leurs spores se font en général sans intervention d'autres espèces (pas ou peu de zoochorie).
- une position particulière dans le réseau trophique : En raison de leur toxicité ou autres moyens de défense, elles ne sont pas consommées par les herbivores.
- elles semblent pouvoir accumuler de grandes quantités de métaux toxiques sans mourir.

6. Les spermatophytes

Les Spermatophytes ou Spermaphytes (super-division des Spermatophyta, ou sous-division des Spermatophytina, ou classe des Spermatoopsida), anciennement appelées phanérogames, sont un grand groupe de plantes vasculaires produisant des graines, d'où leur appellation vernaculaire de plantes à graines.

6.1 Les gymnospermes

Les gymnospermes (gymnos : nus, sperma : graines) sont des plantes dont les ovules ne sont enfermés par aucune paroi ovarienne et restent exposés, aussi bien avant qu'après la fécondation. Les graines qui se développent après la fécondation ne sont pas couvertes, c'est-à-dire qu'elles sont nues. La division comprend *les conifères*, *les cycadales*, *le Ginkgo* et *les gnétophytes* (étant considérées comme des sous-divisions dans ce cours).

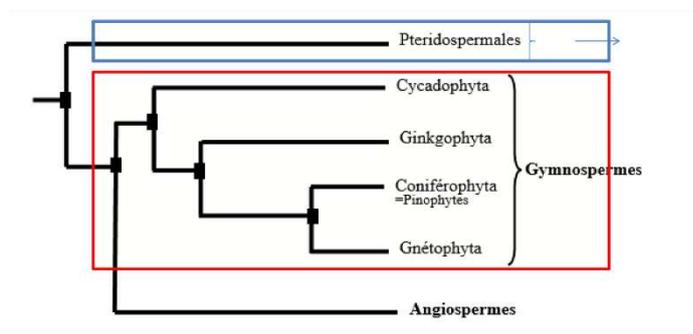


Figure 6.1: Arbre phylogénétique actuel des gymnospermes.

Les gymnospermes comprennent des arbres de taille moyenne ou de grande taille et des arbustes. L'un des gymnospermes, le séquoia géant est l'une des espèces d'arbres les plus hautes. Les racines sont généralement des racines pivotantes. Les racines de certains genres ont une association fongique sous la forme de mycorhizes (Pinus), tandis que dans d'autres (Cycas), de petites racines spécialisées appelées racines coralloïdes sont associées à des cyanobactéries fixatrices d'azote. Les tiges sont non ramifiées (Cycas) ou ramifiées (Pinus, Cedrus). Les feuilles peuvent être simples ou composées. Chez Cycas, les feuilles pennées persistent pendant quelques années. Les feuilles des gymnospermes sont bien adaptées pour résister aux températures extrêmes, à l'humidité et au vent. Chez les conifères, les feuilles en forme d'aiguille réduisent la surface. Leur cuticule épaisse et leurs stomates enfoncés contribuent également à réduire la perte d'eau.

6.1.1 Les Cycadophyta

Les cycas sont des plantes à graines caractérisées par leur tronc robuste et ligneux, surmonté d'une couronne de grandes feuilles dures, rigides, généralement pennées. Elles se reproduisent de manière dioïque, ce qui signifie que les individus d'une espèce sont soit mâles, soit femelles. Les cycas varient en taille, allant de quelques centimètres à plusieurs mètres de hauteur. Leur croissance est généralement lente et elles ont une longue durée de vie. Malgré leur ressemblance superficielle, elles ne sont pas étroitement liées aux palmiers ou aux fougères.

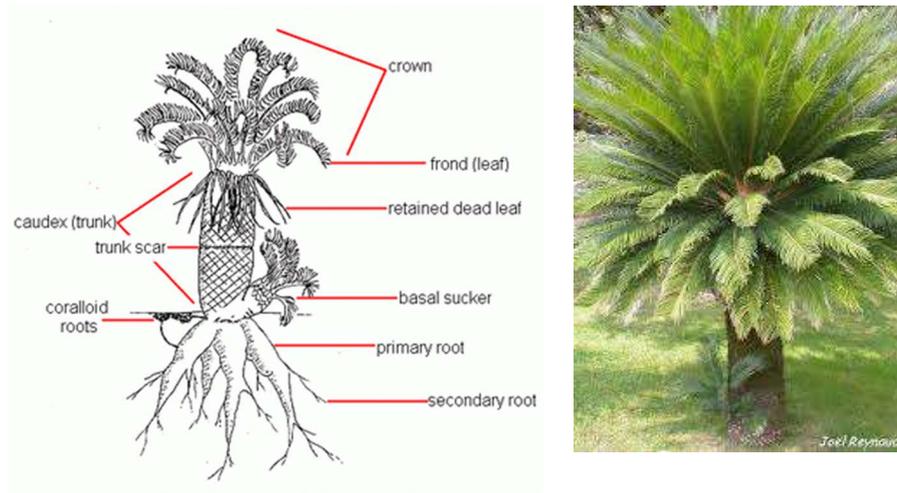


Figure 6.2: Port général des cycadophyta

☞ Morphologie

Les cycadophyta sont des plantes d'assez grande taille à l'aspect voisin de celui des palmiers. Comme les pinophytes et contrairement aux palmiers, ils présentent une croissance secondaire en épaisseur à partir d'une assise cambiale qui est lente.

Ils ont un tronc cylindrique qui ne se ramifie généralement pas, bien que certaines espèces puissent avoir des troncs ramifiés. Les feuilles poussent en rosette directement à partir du tronc, formant une couronne au sommet. Elles sont généralement grandes par rapport à la taille du tronc et peuvent être composées ou incisées. Les feuilles sont pennées, avec des "côtes" parallèles émergeant de chaque côté de la tige centrale. Certaines espèces présentent des feuilles bipennées, où chaque foliole a ses propres sous-folioles.

Les structures reproductrices sont des cônes aux environs de l'apex de la plante. Les Cycadales sont dioïques ; c'est-à-dire qu'il existe des plants portant uniquement des cônes mâles et d'autres uniquement des cônes femelles.

☞ Reproduction

Les ovules se développent sur des mégasporophylles dans des mégastrobilis, sauf chez le genre *Cycas* où ils se développent sur des mégasporophylles individuels, dans ce qui est considéré comme un arrangement primitif. Les microspores se développent en microstrobiles.

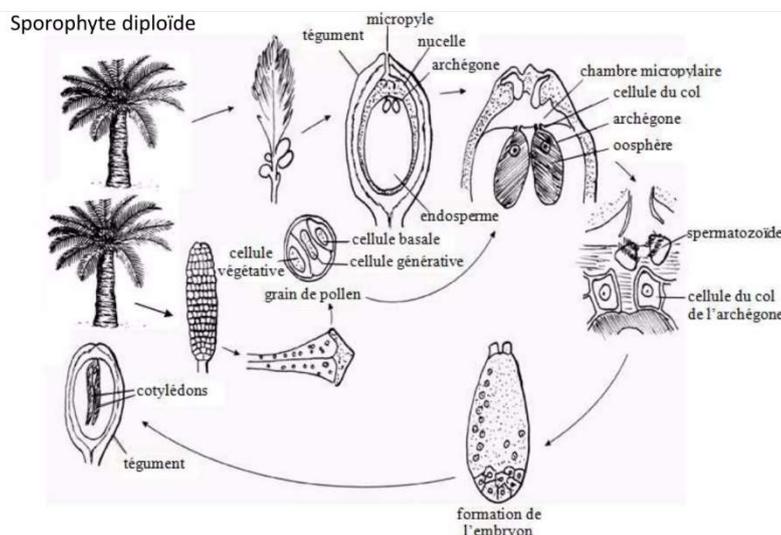


Figure 6.3: Cycle de développement de *Cycas revoluta*

Les microspores atteignent le stade à trois cellules du gamétophyte mâle avant d'être libérées en tant que grains de pollen des microsporangies. Au moment de la pollinisation, chaque ovule sécrète une gouttelette mucilagineuse, le droplet de pollinisation, à travers le micropyle ; certains des grains de pollen sont engloutis dans cette gouttelette et sont attirés dans l'ovule.

L'intervalle entre la pollinisation et la fécondation est de plusieurs mois chez les cycas. Les cellules spermatiques sont multiflagellées et parmi les plus grandes (environ 300 µm, ou 0,01 pouce) du règne végétal. Chaque tube pollinique peut contenir de 2 à 22 cellules spermatiques, selon le genre. Les tubes polliniques, qui se développent à partir des grains de pollen, cheminent à travers le mégasporange de l'ovule jusqu'aux archéogones du gamétophyte femelle. La fécondation des œufs des différents archéogones est suivie du développement précoce de plusieurs embryons (polyembryonie), dont un seul survit dans les graines matures. Les embryons de cycas produisent deux cotylédons. Les graines sont de couleur vive (jaune ou écarlate) et recouvertes d'une couche externe charnue et d'une couche dure de l'intégrument. Les graines de certains cycas peuvent germer dans le mégastrobile sans période de dormance.

☞ *Ecologie*

Les Cycadales vivent sur tous les continents, sauf en Europe, dans des habitats de zones tropicale ou subtropicale. Sensibles aux attaques fongiques, elles poussent généralement sur des sols bien drainés. Certaines espèces peuvent tolérer le gel tel que le *Cycas revoluta* (-8 °C) et le *Cycas panzhihuaensis* (-15 °C) qui ont les tolérances au froid les plus fortes.

Selon the Gymnosperm Database, l'ordre des Cycadales comprend 353 espèces réparties en 2 familles :

- Famille Cycadaceae (115 espèces)
- Famille Zamiaceae (238 espèces)

Toutes les Cycadales sont toxiques pour les animaux, car elles contiennent notamment de la cycasine, neurotoxique, cancérigène et destructrice du foie, et de la bêta-N-méthylamino-L-alanine, neurotoxique produit par les cyanobactéries symbiotiques du *Cycas* puis réparti dans tous les organes du végétal. Cependant, l'amidon contenu dans certaines espèces de Cycadales, notamment dans les graines, est utilisé comme farine alimentaire sous le nom de "sagou", après lixiviation des toxines.

6.1.2 *Les Ginkgophyta*

La division des Ginkgophyta (formant traditionnellement, avec les Pteridospermatophyta et les Cycadophyta, les préspermatophytes) ne comprend aujourd'hui qu'une seule classe, les Ginkgopsida, elle-même composée d'un seul ordre, les Ginkgoales, et de deux familles connues, la famille actuelle des Ginkgoaceae, et la famille fossile des Trichopityaceae.

C'est une sous-division de gymnospermes (ancienne classification phylogénétique) apparu durant le jurassique supérieur dont le seul représentant actuel est l'espèce *Ginkgo biloba* (genre Ginkgo) dont on étudiera brièvement dans ce cours.



Figure 6.4: Feuilles, tige et ovules du *Ginkgo biloba*

☞ *Morphologie*

Le ginkgo est un grand arbre, atteignant généralement une hauteur de 20 à 35 mètres, avec certains spécimens en Chine dépassant 50 mètres. Une combinaison de résistance aux maladies, de bois résistant aux insectes et de la capacité à former des racines aériennes et des rejets rend les ginkgos durables, certains spécimens étant réputés avoir plus de 2500 ans.

Les feuilles sont uniques parmi les plantes à graines, étant en forme d'éventail avec des veines rayonnant dans la lame de la feuille, parfois bifurquant, mais ne formant jamais de réseau. Deux veines entrent dans la lame de la feuille à la base et se bifurquent à plusieurs reprises ; c'est ce qu'on appelle la nervure dichotomique. Les feuilles mesurent généralement de 5 à 10 cm, mais parfois jusqu'à 15 cm de long. Les ginkgos sont appréciés pour leur feuillage d'automne, qui est d'un jaune safran profond.

Les branches de ginkgo poussent en longueur par la croissance de pousses avec des feuilles régulièrement espacées, comme on le voit sur la plupart des arbres. Des "pousses latérales" (également appelées pousses courtes) se développent à partir des aisselles de ces feuilles sur la croissance de la deuxième année. Les pousses latérales ont de courts entrenœuds et leurs feuilles sont généralement non lobées. Elles sont courtes et noueuses, et sont disposées régulièrement sur les branches, sauf sur la croissance de la première année. En raison des courts entrenœuds, les feuilles semblent être regroupées à l'extrémité des pousses latérales, et les structures reproductrices ne se forment que sur celles-ci.

☞ *Reproduction*

Sa reproduction présente certaines caractéristiques communes avec la reproduction des fougères et d'autres communes avec celle des conifères et plantes à fleurs.

En effet, après avoir produit ses ovules, le ginkgo femelle reçoit du pollen que le ginkgo mâle produit en énorme quantité. Arrivé sur l'ovule, le grain de pollen germe et produit une substance hormonale qui provoque l'accroissement de l'ovule et l'accumulation de réserves. Elle n'est pas encore suivie de fécondation. En fin d'été les ovules mûrissent, jaunissent et forment « un noyau » dans lequel s'est formé un prothalle femelle constitué de tissus chlorophyllien haploïde et d'amidon. Le prothalle mâle évolue lui aussi lentement. En automne, après la chute des feuilles, les ovules jaunes et ridés tombent et commencent à pourrir sur le sol. En début d'hiver le prothalle mâle produit des spermatozoïdes flagellés qui fécondent l'oosphère située dans l'archégone. Au printemps, l'embryon fécondé sort de l'ovule et s'implante dans le sol. Il n'y a donc pas eu de phase de repos et aucune dessiccation contrairement à toutes les espèces à graines.

La différence essentielle avec les conifères et plantes à fleurs se fait essentiellement au niveau de la production de l'ovule. Chez les conifères et plantes à fleurs, l'ovule est très petit et grossit une fois la plante fécondée en accumulant des réserves de nourriture pour la future graine. Chez le Ginkgo, l'ovule est déjà plein de réserves nutritives même si celui-ci n'est pas fécondé, et dans ce cas, ils auront été produits « en pure perte » - à première vue. Ce qui semble être un gaspillage finit par profiter à la plante : toutes les plantes laissent une masse déchetuaire (racines, branches, fruit, pollen) qui font une litière. Cette dernière loge des organismes qui la décomposent et fabriquent l'humus, dans lequel les racines prélèvent leur alimentation : les éléments nutritifs sont remis dans le cycle alimentaire de l'arbre avec de surcroît la fabrication

d'humus. Une autre caractéristique du ginkgo est que l'ovule une fois fécondé n'a pas le pouvoir d'hibernation d'une graine et doit germer sans attendre.

La seule autre plante à ovules est le cycas.

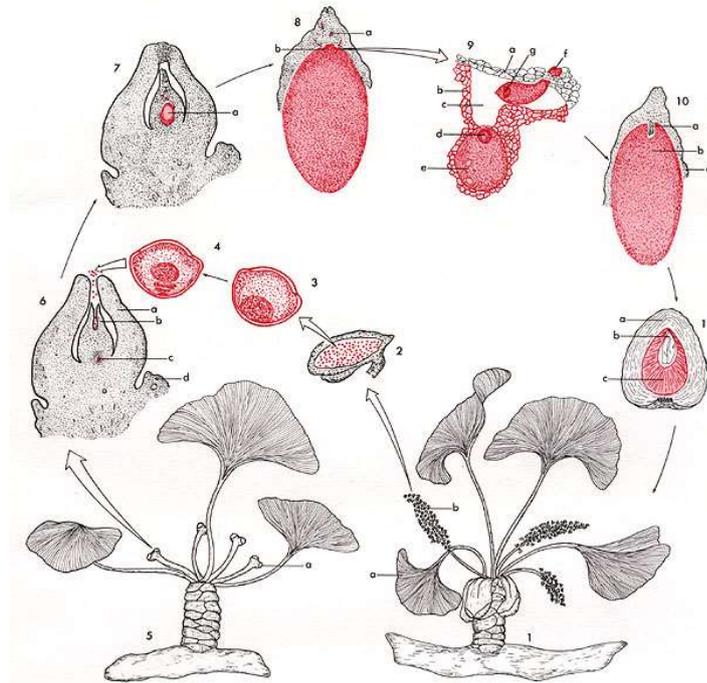


Figure 6.5: Cycle de vie de l'arbre aux quarante écus *Ginkgo biloba*. Les structures haploïdes sont dessinées en rouge.

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1 Pousse mâle avec étamines | 9 Archégone après la fécondation |
| a Nervation foliaire dichotomique | a Tissu du mégasporange |
| b Microstrobile | b Mégagamétophyte |
| 2 Microsporophylle | c Chambre de l'archégone |
| 3 Microspore | d Noyau de l'o(v)osphère |
| 4 Microgamétophyte (pollen) | e Archégone |
| 5 Pousse femelles avec ovules | f Tube pollinique |
| a Ovule | g Noyau de l'anthérozoïde |
| 6 Ovule à la pollinisation | 10 Embryon |
| a Tégument | a Embryon (nouveau sporophyte) |
| b Mégasporange | b Mégagamétophyte |
| c Tétrade de mégasporocytes | c Mégasporange |
| d Col (mégasporophylle?) | 11 Graine |
| 7 Ovule | a Vieux sporophyte |
| a Mégagamétophyte | b Embryon (nouveau sporophyte) |
| 8 Mégagamétophyte | c Mégagamétophyte |
| a Tube pollinique | |
| b Archégone | |

☞ **Ecologie**

Les cellules du ginkgo contiennent une algue endosymbiotique du genre *Coccomyxa*. À ce jour, ce type de symbiose, entre une microalgue et une plante, est unique.

6.1.3 Les Gnétophytes

Les Gnétophytes (Gnetophyta) sont une division de plantes vasculaires, ou la classe des Gnétopsides (Gnetopsida) dans les nouvelles classifications. Ce sont des plantes ligneuses sans canaux résinifères. Ce sont les seules gymnospermes ayant un bois hétéroxylé. Elles sont voisines des Pinales ou Pinacées, alors qu'elles ont pendant longtemps été considérées comme groupe frère des Angiospermes avec lesquelles elles constituaient le groupe monophylétique des Anthophytes. En effet, elles partagent plusieurs caractères en commun avec les plantes à fleurs, mais ceux-ci résultent de convergences évolutives (par exemple : la protection des sporophylles par des enveloppes bractéales ou encore l'existence de xylème à vaisseaux véritables...).



Figure 6.6: *Ephedra fragilis* (Native de la région ouest méditerranéenne). Algeciras (Espagne).

☞ *Classification*

Ces plantes formaient traditionnellement la division Gnetophyta Bessey, 1907. Dans la classification phylogénétique APG III (2009) elles correspondent à la sous-classe Gnetidae Pax, 1894. Les espèces actuelles sont classées en trois genres placés chacun dans leur propre famille et ordre.

Liste des genres actuels de la division Gnetophyta (super-division Spermatophyta)

- Ordre Ephedrales :
 - Famille Ephedraceae :
 - Ephedra, que l'on rencontre sur les bords des mers tempérées.
- Ordre Gnetales :
 - Famille Gnetaceae :
 - Gnetum, qui sont des lianes équatoriales.
- Ordre Welwitschiales :
 - Famille Welwitschiaceae :
 - Welwitschia, que l'on rencontre dans le désert du Namib. C'est une plante néoténique, c'est-à-dire une plante capable de se reproduire avant d'être devenue adulte.

☞ *Morphologie et Ecologie*

Contrairement à la plupart des groupes biologiques, il est difficile de trouver de nombreuses caractéristiques communes entre tous les membres des Gnétophytes.

Les deux caractéristiques les plus couramment utilisées sont la présence de bractées enveloppantes autour des ovules et des microsporangies, ainsi qu'une projection micropylaire de la membrane externe de l'ovule qui produit une gouttelette de pollinisation, bien que ces caractéristiques soient très spécifiques par rapport aux similitudes entre la plupart des autres divisions végétales. L. M. Bowe qualifie les genres de gnétophytes de "trio bizarre et énigmatique" car la spécialisation des gnétophytes à leurs environnements respectifs est si complète qu'ils ne se ressemblent presque pas du tout.

Les espèces de *Gnetum* sont principalement des lianes ligneuses dans les forêts tropicales, bien que le membre le plus connu de ce groupe, *Gnetum gnemon*, soit un arbre originaire de l'ouest de la Mélanésie. La seule espèce restante de *Welwitschia*, *Welwitschia mirabilis*, native uniquement des déserts secs de Namibie et d'Angola, est une espèce rampante avec seulement deux grandes feuilles en forme de lanières qui poussent continuellement depuis la base tout au long de la vie de la plante. Les espèces d'Éphédra (présentes en Algérie), ont de longues branches minces portant de minuscules feuilles en écailles à leurs nœuds.

Les infusions de ces plantes ont traditionnellement été utilisées comme stimulants, mais l'éphédrine est aujourd'hui une substance contrôlée dans de nombreux endroits en raison du risque de surdosage nuisible, voire fatal.

6.1.4 Les conifères

Les conifères constituent la division Pinophyta, également connue sous le nom de Coniferophyta ou Coniferae. La division contient une seule classe existante, les Pinopsida.

Ce sont des plantes vasculaires à graines portées par une structure en forme de cône (« conifères » veut dire « qui porte des cônes ») ayant exactement la même fonction que la fleur mais qui n'en est pas une. Elles sont apparues sur Terre il y a 300 millions d'années, bien avant les feuillus. Tous les conifères actuels sont des plantes ligneuses pérennes à croissance secondaire. La grande majorité sont des arbres, bien que quelques-uns soient des arbustes.

Les conifères les plus répandus sont les pins, cèdres, sapins, épicéas, pruches, douglas, mélèzes, cyprès, genévriers, araucarias, agathis, podocarpes, séquoias, thuyas et les ifs.

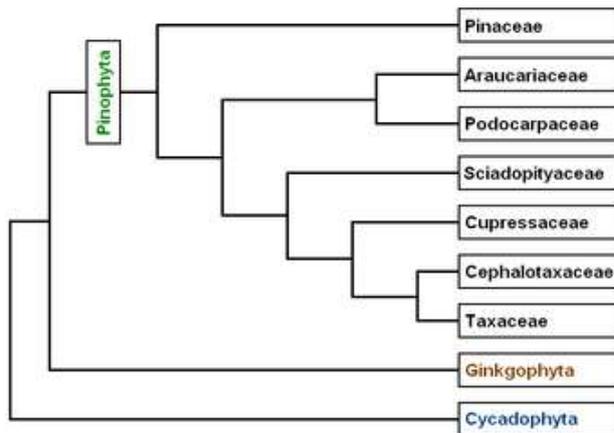


Figure 6.7: Arbre phylogénétique des conifères.

☞ Morphologie et Ecologie

Tous les conifères vivants sont des plantes ligneuses, et la plupart sont des arbres, la majorité ayant une forme de croissance monopodiale (un tronc unique et droit avec des branches latérales) avec une forte dominance apicale. De nombreux conifères ont une résine distinctement parfumée, sécrétée pour protéger l'arbre contre les infestations d'insectes et les infections fongiques des plaies. La résine fossilisée se transforme en ambre, qui a été historiquement exploitée commercialement (par exemple, dans l'industrie de la gomme de kauri en Nouvelle-Zélande au XIXe siècle).

La taille des conifères matures varie de moins d'un mètre à plus de 100 mètres de hauteur. Les arbres les plus grands, les plus épais, les plus anciens du monde sont tous des conifères. Le plus grand est un séquoia côtier (*Sequoia sempervirens*), avec une hauteur de 115,55 mètres. Le plus épais (c'est-à-dire l'arbre avec le plus grand diamètre de tronc) est un cyprès Montezuma (*Taxodium mucronatum*), de 11,42 mètres de diamètre. L'arbre le plus grand en volume tridimensionnel est un séquoia géant (*Sequoiadendron giganteum*), avec un volume



Figure 6.8: Le séquoia géant General Sherman dans le parc national de Sequoia (2008).

de 1486,9 mètres cubes. Le plus petit est le pin pygmée (*Lepidothamnus laxifolius*) de Nouvelle-Zélande, qui mesure rarement plus de 30 cm de haut à maturité. Le plus ancien arbre non clonal vivant est un pin des bruyères du Grand Bassin (*Pinus longaeva*), âgé de 4 700 ans.

Bien que le nombre total d'espèces soit relativement faible, les conifères sont écologiquement importants. Ils sont les plantes dominantes sur de vastes étendues de terre, notamment la taïga de l'hémisphère nord, mais aussi dans des climats frais similaires dans les montagnes plus au sud. Les conifères boréaux ont de nombreuses adaptations hivernales. La forme conique étroite des conifères du nord, et leurs branches tombantes, les aident à se débarrasser de la neige. Beaucoup d'entre eux modifient saisonnièrement leur biochimie pour les rendre plus résistants au gel. Bien que les forêts tropicales humides aient plus de biodiversité et de renouvellement, les immenses forêts de conifères du monde représentent le plus grand puits de carbone terrestre. Les conifères ont une grande valeur économique pour la production de bois d'œuvre et de papier à partir de bois résineux.

- **Feuillage**

Puisque la plupart des conifères sont des plantes à feuilles persistantes, les feuilles de nombreux conifères sont longues, minces et ont une apparence en forme d'aiguille, mais d'autres, y compris la plupart des Cupressacées et certains Podocarpaceae, ont des feuilles plates, triangulaires et en écailles. Certains, notamment *Agathis* dans les Araucariaceae et *Nageia* dans les Podocarpaceae, ont des feuilles larges et plates en forme de sangle. D'autres, comme l'*Araucaria columnaris*, ont des feuilles en forme d'épines. Dans la majorité des conifères, les feuilles sont disposées en spirale, les exceptions étant la plupart des Cupressacées et un genre dans les Podocarpaceae, où elles sont disposées en paires opposées décussées ou en verticilles de 3 (-4).

Dans de nombreuses espèces aux feuilles disposées en spirale, comme *Abies grandis*, les bases des feuilles sont torsadées pour présenter les feuilles dans un plan très plat afin de capturer un maximum de lumière. La taille des feuilles varie de 2 mm dans de nombreuses espèces à feuilles écailleuses, jusqu'à 400 mm de long dans les aiguilles de certains pins (par exemple, le pin d'Apache, *Pinus engelmannii*). Les stomates sont disposés en lignes ou en patches sur les feuilles et peuvent être fermés lorsqu'il fait très sec ou froid. Les feuilles sont souvent de couleur vert foncé, ce qui peut



Figure 6.9: Différentes feuilles de conifères

aider à absorber un maximum d'énergie du soleil faible aux latitudes élevées ou sous l'ombre de la canopée forestière.

Dans la grande majorité des genres, les feuilles sont persistantes, restant généralement sur la plante pendant plusieurs années (2 à 40) avant de tomber, mais cinq genres (*Larix*, *Pseudolarix*, *Glyptostrobus*, *Metasequoia* et *Taxodium*) sont caducs, perdant leurs feuilles en automne.

Les jeunes plants de nombreux conifères, y compris la plupart des Cupressaceae et les Pins dans les Pinaceae, ont une période de feuillage juvénile distincte où les feuilles sont différentes, souvent de manière marquée, par rapport aux feuilles adultes typiques.

- **Structure du bois**

Les cernes de croissance sont des enregistrements de l'influence des conditions environnementales, leurs caractéristiques anatomiques enregistrent les changements de taux de croissance produits par ces conditions changeantes. La structure microscopique du bois de conifères se compose de deux types de cellules : les parenchymes, qui ont une forme ovale ou polyédrique avec des dimensions approximativement identiques dans trois directions, et les trachéides fortement allongées.

Les trachéides représentent plus de 90% du volume du bois. Les trachéides de bois initial formées au début d'une saison de croissance ont de grandes tailles radiales et des parois cellulaires plus petites et plus minces. Ensuite, les premières trachéides de la zone de transition sont formées, où la taille radiale des cellules et l'épaisseur de leurs parois cellulaires changent considérablement. Enfin, les trachéides de bois tardif sont formées, avec de petites tailles radiales et une épaisseur de paroi cellulaire plus grande. C'est le schéma de base de la structure cellulaire interne des cernes de croissance des arbres conifères.

- ☞ **Reproduction des conifères**

La plupart des conifères sont monoïques, mais certains sont subdioïques ou dioïques ; tous sont pollinisés par le vent. Les graines de conifères se développent à l'intérieur d'un cône protecteur appelé strobile. Les cônes mettent de quatre mois à trois ans pour atteindre leur maturité et varient en taille de 2 à 600 millimètres de long.

Dans les familles Pinaceae, Araucariaceae, Sciadopityaceae et la plupart des Cupressaceae, les cônes sont ligneux, et lorsque mûrs, les écailles s'ouvrent généralement pour permettre aux graines de tomber et d'être dispersées par le vent. Dans certains cas (par exemple, les sapins et les cyprès), les cônes se désintègrent pour libérer les graines, et dans d'autres cas (par exemple, les pins qui produisent des pignons), les graines en forme de noix sont dispersées par les oiseaux (principalement les casse-noix et les geais), qui brisent les cônes plus mous spécialement adaptés. Les cônes mûrs peuvent rester sur la plante pendant un certain temps avant de tomber au sol; chez certains pins adaptés au feu, les graines peuvent être stockées dans des cônes fermés pendant 60 à 80 ans, ne se libérant que lorsqu'un incendie tue l'arbre parent.

Dans les familles Podocarpaceae, Cephalotaxaceae, Taxaceae et un genre de Cupressaceae (*Juniperus*), les écailles sont molles, charnues, sucrées et de couleurs vives, et sont mangées par des oiseaux frugivores, qui ensuite passent les graines dans leurs excréments. Ces écailles charnues sont (sauf chez *Juniperus*) appelées arilles. Dans certains de ces conifères (par exemple, la plupart des Podocarpaceae), le cône se compose de plusieurs écailles fusionnées, tandis que dans d'autres (par exemple, Taxaceae), le cône est réduit à une seule échelle de graine

ou (par exemple, Cephalotaxaceae) les plusieurs écailles d'un cône se développent en arilles individuelles, donnant l'apparence d'une grappe de baies.

Les cônes mâles ont des structures appelées microsporangies qui produisent du pollen jaunâtre par méiose. Le pollen est libéré et transporté par le vent vers les cônes femelles. Les grains de pollen des espèces de pinophytes vivantes produisent des tubes polliniques, tout comme ceux des angiospermes. Les gamétophytes mâles (grains de pollen) des gymnospermes sont transportés par le vent vers un cône femelle et sont attirés dans une petite ouverture sur l'ovule appelée micropyle. C'est à l'intérieur de l'ovule que la germination du pollen se produit. À partir de là, un tube pollinique cherche le gamétophyte femelle, qui contient des archégones avec un œuf, et si cela réussit, la fécondation se produit. Le zygote résultant se développe en un embryon, qui, avec le gamétophyte femelle (matière nutritive pour l'embryon en croissance) et son enveloppe externe, devient une graine. Finalement, la graine peut tomber au sol et, si les conditions le permettent, se développer en une nouvelle plante.

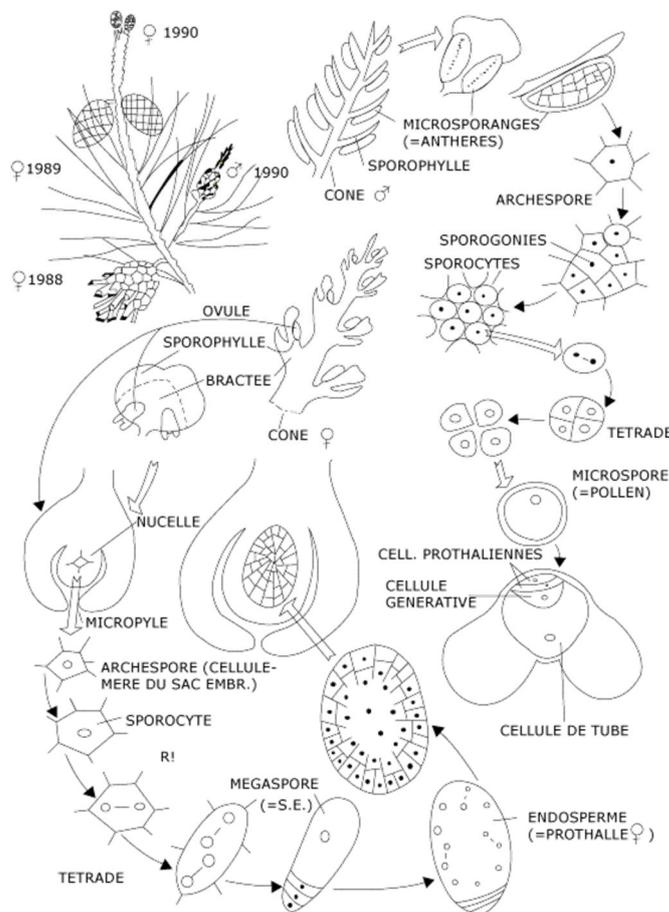


Figure 6.10: Cycle de développement du Pinus - Production des mégaspores et microspores et différenciation des gamétophytes femelle et mâle.

1. Pour fertiliser l'ovule, le cône mâle libère le pollen qui est transporté par le vent jusqu'aux cônes femelles.
2. Un gamète femelle fertilisé (appelé zygote) se développe en embryon.
3. Avec des cellules de téguments entourant l'embryon, une graine contenant l'embryon se développe.
4. Les graines mûres tombent sur le sol.
5. Les graines germent et se développent en arbres.
6. Une fois mûr, l'arbre adulte produit des cônes.

Contrairement aux bryophytes et aux ptéridophytes, chez les gymnospermes, les gamétophytes mâles et femelles n'ont pas d'existence indépendante et libre. Ils restent dans les sporanges retenus sur les sporophytes. Le grain de pollen est libéré du microsporange. Ils sont transportés par les courants d'air et entrent en contact avec l'ouverture des ovules portés par les mégasporophylles. Le tube pollinique portant les gamètes mâles se développe vers les archégonies dans les ovules et évacue leur contenu près de l'embouchure des archégonies. Après la fécondation, le zygote se développe en embryon et les ovules en graines. Ces graines ne sont pas couvertes.

6.2 Les angiospermes (*Magnoliophyta*)

Contrairement aux gymnospermes où les ovules sont nus, chez les angiospermes ou plantes à fleurs, les grains de pollen et les ovules se développent dans des structures spécialisées appelées fleurs. Chez les angiospermes, les graines sont enfermées dans les fruits. Les angiospermes sont un groupe exceptionnellement grand de plantes présentes dans un large éventail d'habitats. Leur taille varie du plus petit **Wolffia** aux grands arbres d'**Eucalyptus** (plus de 100 mètres). Ils nous fournissent de la nourriture, du fourrage, du carburant, des médicaments et plusieurs autres produits commercialement importants.

Les angiospermes se divisent en deux classes : les Eudicotylédones et les monocotylédones (Figure 3.5). Les dicotylédones sont caractérisées par des graines ayant deux cotylédons, des nervures réticulées dans les feuilles et des fleurs tétramères ou pentamères, c'est-à-dire ayant quatre ou cinq membres dans chaque verticille floral. Les monocotylédones, quant à elles, sont caractérisées par des graines cotylédones uniques, des nervures parallèles dans les feuilles et des fleurs trimères ayant trois membres dans chaque verticille floral.

6.2.1 Appareil végétatif

Les appareils végétatifs sont, en principe, constitués de tiges, de feuilles et de racines. Les tiges et les feuilles se forment ensemble, à partir d'un tissu embryonnaire, ou méristème primaire, qui est déjà présent dans le bourgeon de la plantule, à l'intérieur de la graine.

Les plantes à fleurs se répartissent en quatre grandes catégories selon leur aspect général (on parle de port) et leur mode de croissance :

- ☞ Le port arborescent (arbres) qualifie les plantes dont la tige principale, fortement lignifiée, atteint une hauteur de plus de 2 ou 3 mètres (cette limite étant souple) et ne présente pas de ramifications dans sa partie inférieure.
- ☞ Le port buissonnant (buissons) désigne les plantes ligneuses ramifiées à la base et dont la hauteur est comprise entre 50 centimètres et 2 ou 3 mètres.
- ☞ Les plantes ligneuses (lianes) mais non autoportantes, c'est-à-dire qui utilisent d'autres plantes comme support pour croître, sont qualifiées de lianes.
- ☞ Les plantes herbacées, rassemble les plantes dont la partie aérienne est peu lignifiée et disparaît à la fin de la période de floraison. Les plantes herbacées peuvent être annuelles ou pérennes, leurs parties souterraines leur permettant dans ce dernier cas de subsister pendant la mauvaise saison.

6.2.1.1 Les racines

Les racines qui fixent la plante au sol et l'approvisionnent en eau et sels minéraux dissous ont également des types morphologiques assez divers selon les espèces ; les racines souterraines

se répartissent en deux grandes catégories :

- ☞ Les systèmes racinaires pivotants (une racine principale nettement plus développée que les racines secondaires) et les systèmes racinaires fasciculés (toutes les racines ayant la même importance).
- ☞ Le système fasciculé est fréquent chez les Monocotylédones, qui ne possèdent que des racines adventives (racines formées à partir d'organes autres que la radicule, qui est la forme embryonnaire de la racine principale d'une plante).

En plus de ces deux catégories on trouve :

- ☞ Les racines adventives : racine prenant naissance sur une tige aérienne ou souterraine ou tout autres parties du végétal (maïs, fraisier, lierre).
- ☞ Des racines « tubérisées » qui prennent la forme d'une grosse racine pivotante ou de tubercules de racines fasciculées spécialisées dans l'accumulation de réserve.

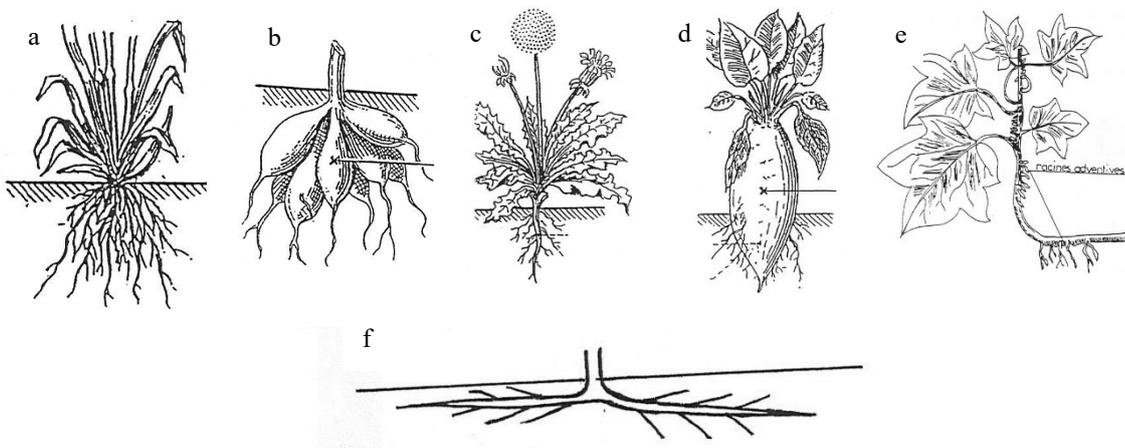


Figure 6.11: Différentes catégories de racines des angiospermes. a : Système racinaire fasciculé ; b : Système racinaire fasciculé tubérisé ; c : Système racinaire pivotant ; d : Système racinaire pivotant tubérisé ; e : Système racinaire adventives ; f : Système racinaire traçantes.

☞ *Interactions racines microorganismes*

Les racines forment fréquemment des associations avec d'autres organismes, appelées symbioses. Ces types d'associations sont bénéfiques pour les deux participants.

- Les mycorhizes : sont des associations établies entre des champignons et des racines. Elles fournissent à la plante les minéraux essentiels et la protègent contre diverses maladies. En contrepartie, la plante procure au champignon des sucres qu'elle fabrique par photosynthèse. Étant profitable aux deux partenaires, cette association constitue une véritable symbiose.

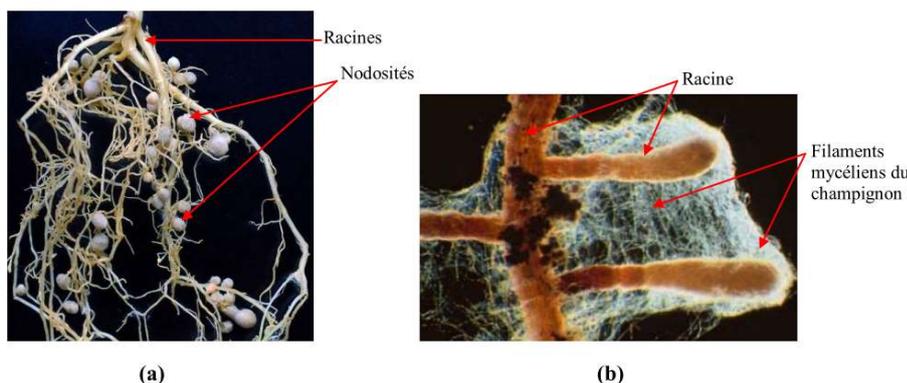


Figure 6.12: Nodosités (a) et mycorhizes (b) sur les racines de plantes.

- Les nodosités : sont de petites excroissances provoquées par la prolifération de bactéries capables de fixer l'azote de l'atmosphère. Elles contribuent à la nutrition azotée de la plante.

6.2.1.2 Tiges et feuilles

a) Les feuilles

La feuille est, en morphologie végétale, l'organe spécialisé dans la photosynthèse chez les plantes vasculaires. Elle est insérée sur les tiges des plantes au niveau des nœuds. C'est aussi le siège de la respiration et de la transpiration. Les feuilles peuvent se spécialiser, notamment pour stocker des éléments nutritifs et de l'eau.

Pour accomplir son rôle, une feuille est généralement formée d'une lame plate et fine aérienne, le limbe, qui lui permet d'exposer à la lumière un maximum de surface. Mais il existe aussi des feuilles transformées, pour lesquelles le limbe est très réduit et ne joue plus de rôle photosynthétique ; elles sont transformées en vrilles, cataphylles, écailles sur les bourgeons, aériens (épines, aiguilles de conifères) ou souterrains (comme dans les bulbes, cormes), feuilles succulentes. C'est le parenchyme palissadique, un type particulier de tissu de la feuille, qui effectue la photosynthèse grâce à ses cellules contenant les chloroplastes, et donne à la feuille sa couleur verte. La feuille présente une grande variété de formes, de tailles, de teintes, de textures ou encore d'ornementations dans le règne végétal. Ces particularités de la feuille sont souvent caractéristiques d'une espèce, ou au moins d'un genre.

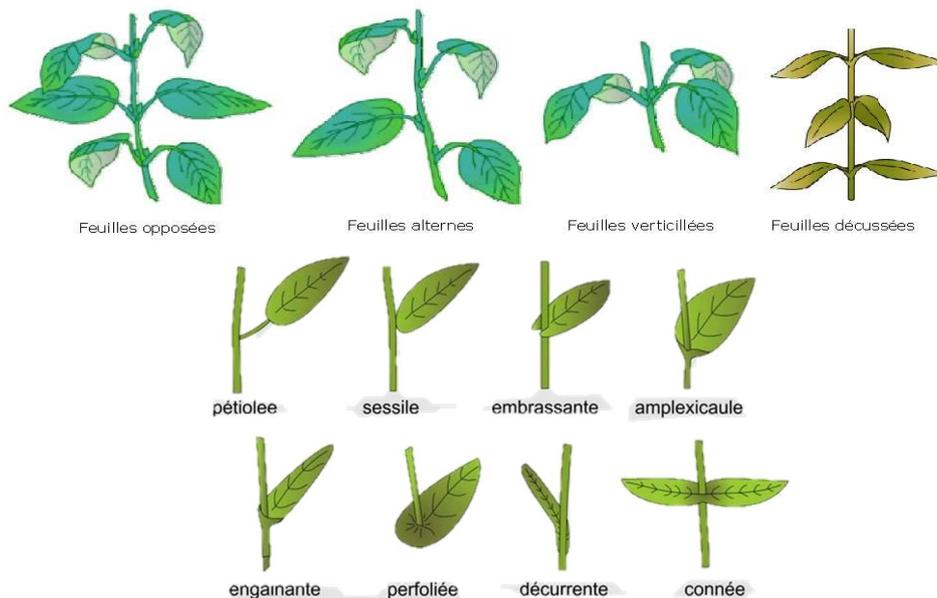


Figure 6.13: Disposition des feuilles (phyllotaxie)

Sur la tige, les feuilles peuvent être insérées isolément (alternes), par deux (opposées) ou plus de deux (verticillées). La distance entre deux points d'insertion est notable chez les plantes volubiles, minimale au contraire quand les feuilles sont en rosette. L'ordonnement des feuilles sur la tige, ou phyllotaxie, pose d'importants problèmes morphologiques. Les feuilles comportent, en principe, un limbe étalé, relié par un pétiole à la gaine basale, flanquée parfois de deux stipules ; elles peuvent être composées de folioles ou être simples, de dimensions et de formes très variées selon les groupes végétaux.

Les feuilles peuvent être simples ou composées de folioles. Dans le cas d'une feuille composée, il n'y a pas de bourgeon à l'aisselle des folioles, ce qui permet de faire la distinction entre une feuille (qui présente un bourgeon dit axillaire car situé à l'aisselle des feuilles) et une foliole.

Le limbe peut être entier ou découpé plus ou moins profondément. Le bord (marge) des feuilles peut présenter des dents ou des poils. La forme des feuilles est un caractère très utilisé pour identifier les arbres et distinguer les espèces proches entre elles comme les érables par exemple.

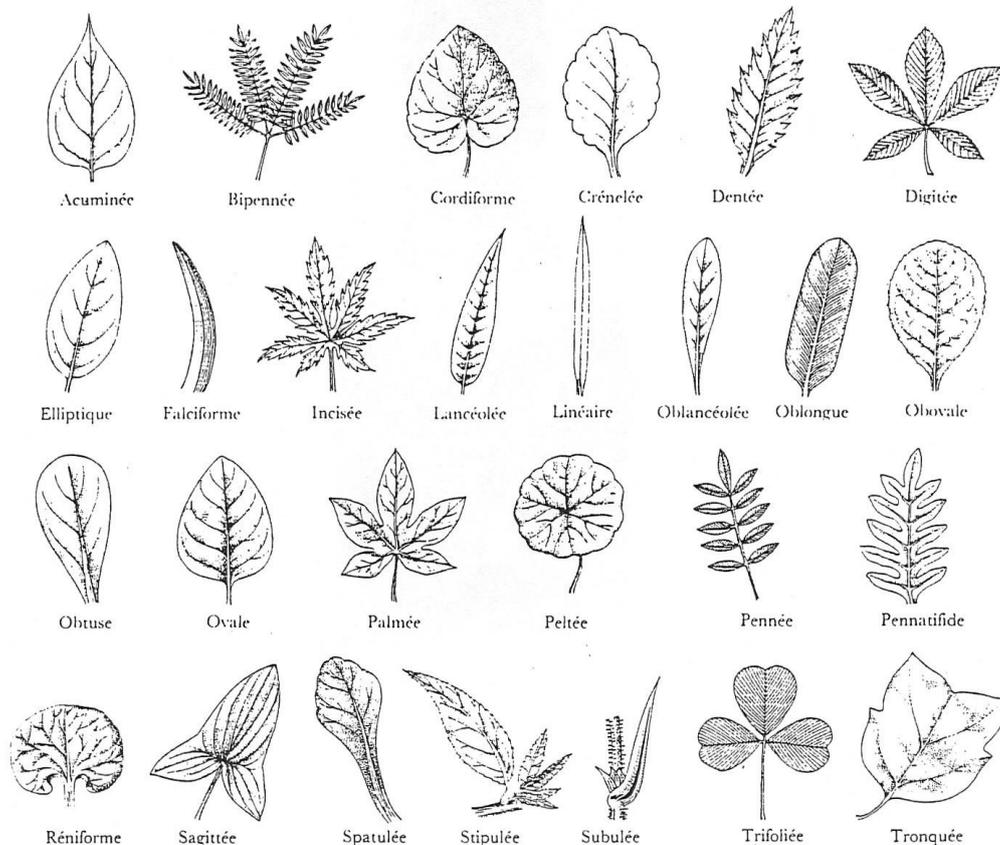


Figure 6.14: Formes de quelques feuilles (En fonction de la base, du bord et du sommet du limbe, une feuille a différentes formes)

b) Les tiges

La tige est chez les plantes, l'axe végétatif polarisé, généralement aérien ou souterrain (tubercule caulinare, rhizome), qui prolonge la racine et porte les bourgeons et les feuilles. La tige se ramifie branches et rameaux formant l'appareil caulinare. Chez les arbres et les plantes ligneuses, les botanistes distinguent le tronc, partie principale généralement dénudée à sa base, du houppier, formé de l'ensemble branches maîtresses et rameaux.

Les tiges sont de types très variés, elles peuvent être aériennes ou souterraines.

Les tiges aériennes présentent de multiples adaptations qui leur permettent de remplir différentes fonctions dans la plante. Parmi les tiges aériennes on sites les formes suivantes :

- ☞ **Dressée** : la tige est suffisamment robuste pour se développer à la verticale
- ☞ **Montante** : concerne souvent des plantes dont la souche est vivace et robuste mais dont les tiges aériennes sont grêles et herbacées.
- ☞ **Couchée ou rampante** : les tiges sont étalées au sol et ne montent pas ou peu. On parle également de plantes prostrées.
- ☞ **Grimpante** : se fixe sur un support par des crampons qui sont des racines adventives ou par des vrilles, qui sont des feuilles transformées.

- ☞ **Stolons** : sortes de tiges rampantes, sont des tiges horizontales qui s'allongent parallèlement au sol et donnent une nouvelle plante à leur extrémité. Ils proviennent souvent de bourgeons axillaires. Ils participent ainsi à la reproduction asexuée ou multiplication végétative de la plante. C'est le cas du fraisier.
- ☞ **Succulentes** : Sont des tiges charnues s'épaissent et accumulent d'importantes quantités d'eau. Elles sont souvent renflées et chlorophylliennes, et leurs feuilles sont fréquemment réduites à des épines. Ces plantes retiennent habituellement l'eau et peuvent survivre dans des climats arides ou des sols secs.

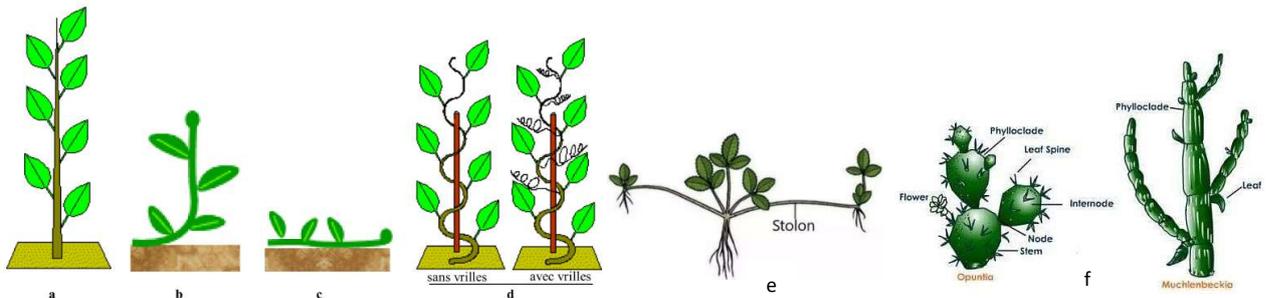


Figure 6.15: Tige dressée (a), montante (b), rampante (c), grimpante (d), stolon (e) et succulentes (f).

Les Tiges souterraines sont des tiges modifiées qui poussent dans le sol. Elles sont très différentes des racines, tant dans leurs structures (la présence des bourgeons) que dans leurs fonctions.

Par exemple, contrairement aux racines, les tiges souterraines ne participent pas à l'assimilation de l'eau et des sels minéraux du sol. Les tiges souterraines remplissent deux rôles principaux :

- L'accumulation de réserves nutritives.
- La propagation de la plante par multiplication végétative (reproduction par fragmentation de la plante, sans intervention de cellules sexuelles).

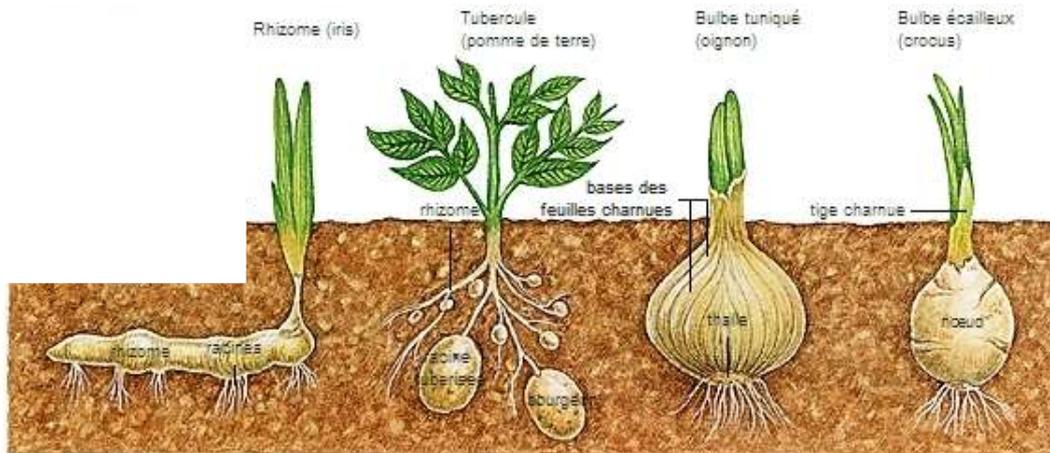


Figure 6.16: Tige souterraines, bulbe écailleux (corme). (Larousse)

Les principaux types de tiges souterraines sont :

- ☞ **Les rhizomes** : Tiges souterraines horizontales, généralement épaissies, souvent gonflée de réserves, émettant des tiges dressées et des racines ; qui forment annuellement de nouvelles pousses. Exemple : le gingembre.
- ☞ **Les tubercules** : Sont des organes de réserves, qui assure la survie des plantes pendant la saison d'hiver ou en période de sécheresse, et souvent leur multiplication par voie

végétative. Les yeux de la pomme de terre sont en réalité des bourgeons axillaires, disposés à la surface du tubercule selon une hélice.

- ☞ **Les bulbes** : sont des pousses souterraines verticales, portant des feuilles modifiées qui servent d'organe de stockage pour la plante, durant ses périodes de dormance. L'oignon est un bulbe feuillé, formé par la superposition de feuilles (écailles) chargées de réserves nutritives enfermant complètement la tige, très réduite (le plateau).
- ☞ **Les cornes** : Une corne ressemble visuellement beaucoup à un bulbe, à la différence les feuilles sont petites et fines et les réserves sont stockées dans la tige plutôt que dans les feuilles.

6.2.1.3 Tissus et organisation

Tiges, feuilles et racines sont parcourues intérieurement par les tissus conducteurs des sèves brutes et élaborée.

Par rapport aux Gymnospermes, les Angiospermes manifestent, à ce point de vue, l'avantage évident d'une plus grande spécialisation du travail : les éléments conducteurs de la sève brute sont des vaisseaux parfaits. Leur achèvement réside dans le fait que les cellules conductrices situées bout à bout, qui les constituent, résorbent leurs parois transversales contiguës, ménageant alors un conduit continu.

Le rôle de soutien qu'assument, en outre, les fibres aréolées des Gymnospermes est rempli par des fibres de sclérenchyme, des sclérites, des cellules de collenchyme qui n'ont rien de conducteur chez les angiospermes. Dans le tissu conducteur de sève élaborée, les tubes criblés possèdent leurs cribles, non pas sur les parois longitudinales comme c'est le cas chez les autres plantes vasculaires, mais transversalement. Cette double irrigation, assurée par les vaisseaux et les tubes criblés, parcourt richement les feuilles, grâce à un système de nervures dont les éléments les plus fins, selon les espèces, sont anastomosés entre eux ou débouchent librement dans les tissus foliaires.

À l'intérieur des jeunes tiges, vaisseaux et tubes criblés sont associés en faisceaux dont les vaisseaux occupent la partie interne ; les tubes criblés sont périphériques, sauf chez certaines familles qui en présentent aussi aux pôles internes des faisceaux (Cucurbitaceae, Convolvulaceae, Solanaceae...). Dans les racines jeunes, cependant, les faisceaux vasculaires alternent avec ceux des tubes criblés.

Il existe différents critères permettant de classer les plantes ; suivant leur consistance on distingue les plantes herbacées et les plantes ligneuses. En fonction de leur durée de vie, on distingue les plantes annuelles, bisannuelles et les plantes vivaces.

☞ **Plantes herbacées**

Celles dont la tige et les branches, ne produisant pas de bois, généralement périssent après quelques mois de végétation.

Botaniquement, les palmiers formant un stipe et non un tronc, sont des plantes herbacées, tout comme les bananiers ou encore les bambous. Ces plantes à grand développement pour certaines espèces restent malgré tout des herbacées.

☞ Les plantes ligneuses

Une plante ligneuse est une plante qui fabrique en grande quantité des lignines, macromolécules organiques donnant à la plante sa solidité, et dont le bois est le principal matériau de structure : en effet, les lignines sont avec la cellulose les constituants essentiels du bois (aussi appelé xylème secondaire).

Les plantes ligneuses sont classées selon leur taille et leur ramification :

Arbre : est une plante ligneuse capable de se développer en hauteur grâce à une structure formant un tronc qui se ramifie pour former des branches et des rameaux (ramifications ultimes).

Arbuste : est une plante ligneuse d'une taille inférieure à 8 m et à tronc marqué.

Arbrisseau : est souvent considéré comme synonyme d'arbuste, mais il s'en distingue par l'absence de tronc. La ramification se fait dès la base.

Sous-arbrisseau : est une plante constituée d'une base ligneuse surmontée de rameaux herbacés qui dépérissent chaque année et ne dépassant habituellement pas les 50 cm.

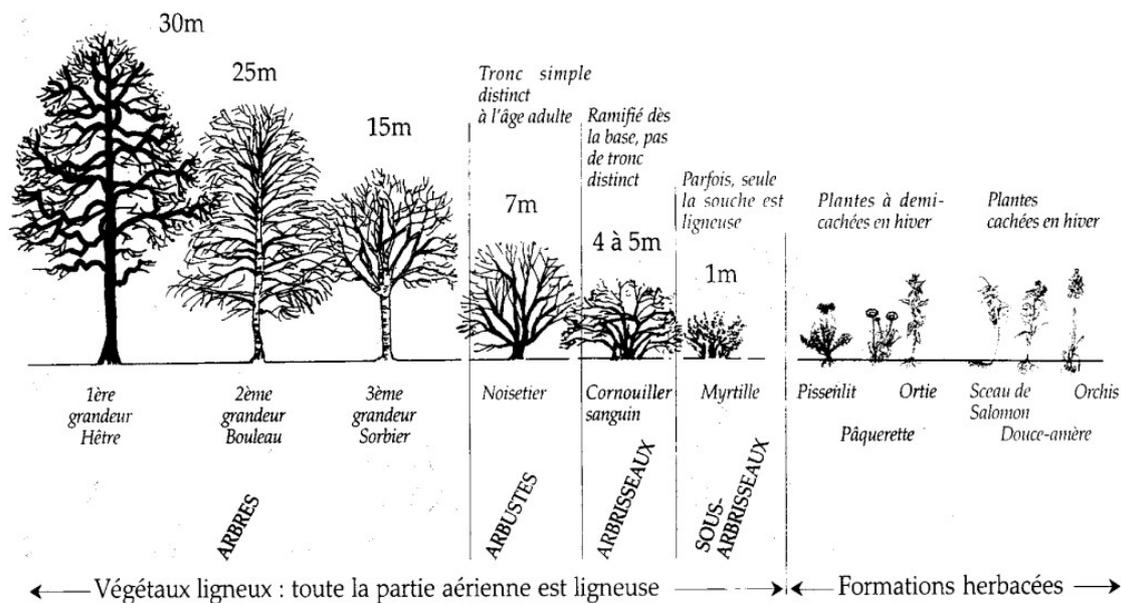


Figure 6.17: Port de la tige

6.2.2 Morphogénèse végétale

La morphogénèse végétale (du grec morphê/μορφή, forme, et genesis/γένεσις, naissance) constitue l'ensemble des mécanismes qui participent à l'édification d'une plante. Elle intervient de la germination de la graine jusqu'à la mort de la plante. Les mécanismes fondamentaux de la morphogénèse végétale sont communs à toutes les espèces végétales.

Les processus de morphogénèse et d'organogénèse ne sont pas limités, comme chez l'animal, au développement embryonnaire. Ils sont dévolus aux tissus méristématiques qui conservent, tout au long de la vie de la plante, la capacité de se diviser, de se différencier et d'établir une organogénèse permanente : ce sont les homologues des cellules souches des animaux. La manifestation la plus évidente en est la multiplication végétative par bouturage, c'est-à-dire la possibilité pour un méristème excisé de reconstituer une copie de la plante d'origine. Sur le plan

cellulaire, la présence d'une paroi semi-rigide autour de la cellule végétale interdit les mouvements et les migrations cellulaires au cours des processus de développement des plantes.

La morphologie des végétaux résulte de l'expression du génotype de l'espèce. Cette information génétique est portée par les chromosomes dans le noyau (rappelons que les cellules végétales sont eucaryotes). La réalisation du génotype est modifiée par les facteurs de l'environnement.

6.2.2.1 Les caractéristiques de la morphogénèse

La morphogénèse comporte de nombreuses caractéristiques observables, telles que les suivantes :

Division cellulaire : Les cellules se divisent pour créer de nouvelles masses cellulaires ; c'est ainsi que les tissus du corps se développent, ou comment les membres sont formés.

Adoption de forme : Les cellules se différencient dans une forme qu'elles adopteront une fois leur développement terminé ; c'est crucial pour la croissance des plantes car cela leur permet de se développer pleinement avant d'adopter une nouvelle forme.

Chronologie : La morphogénèse se produit à des moments spécifiques du processus de développement.

Fonction de forme : La forme est contrôlée par l'environnement pour s'assurer qu'elle fonctionne dans son ensemble ; cela est important pour que les morphogènes fonctionnent correctement.

Taille : Les changements de taille cellulaire sont une autre caractéristique de la morphogénèse. Cela permet aux cellules de croître et de se développer plus rapidement ou plus lentement selon les besoins de la plante.

☞ *Facteurs affectant la morphogénèse*

Les facteurs physiques tels que les conditions du substrat et le stress environnemental ont été démontrés comme affectant la morphogénèse des plantes. La morphogénèse des plantes est contrôlée par l'auxine, une phytohormone fabriquée à partir d'acides aminés. L'auxine agit comme une hormone, provoquant la croissance et la division des cellules. Il est important que les plantes puissent réguler la quantité d'auxine dans leurs cellules, car une trop grande quantité peut être mortelle, ou du moins nocive pour la plante. Si elle n'est pas contrôlée, cela peut conduire à des malformations dans le tissu en développement sans aucune malformation physique présente.

Les mutations jouent également un rôle important dans le développement des plantes. Les mutations affectent les cellules du corps, ainsi que le génome d'un organisme. Les mutations peuvent être causées par des facteurs environnementaux, mais peuvent aussi être spontanées ou héritées des parents d'un organisme. Par exemple, des mutations ont été trouvées pour provoquer des changements dans la formation des organes. Dans une étude, il a été constaté que des concentrations plus faibles d'auxine provoquaient des extrémités de feuilles arrondies et moins de pousses latérales.

6.2.3 La morphologie florale

La fleur, la structure reproductive caractéristique des angiospermes. Comme utilisé couramment, le terme "fleur" s'applique surtout lorsque tout ou partie de la structure reproductive est distinctive par sa couleur et sa forme.

Dans leur gamme de couleur, de taille, de forme et d'arrangement anatomique, les fleurs présentent une variété apparemment infinie de combinaisons. Elles vont de fleurs minuscules à des fleurs géantes. Dans certaines plantes, telles que le coquelicot, le magnolia, la tulipe et le pétunia, chaque fleur est relativement grande et voyante et est produite individuellement, tandis que dans d'autres plantes, telles que l'aster, l'anémis et le lilas, les fleurs individuelles peuvent être très petites et sont portées dans un groupe distinctif appelé *inflorescence*. Quelle que soit leur variété, toutes les fleurs ont une fonction uniforme, la reproduction de l'espèce par la production de graines.

6.2.3.1 Type et forme des fleurs

Essentiellement, chaque fleur se compose d'un axe floral sur lequel sont portés les organes essentiels de reproduction (étamines et pistils) et généralement des organes accessoires (sépales et pétales) ; ces derniers peuvent servir à la fois à attirer les insectes pollinisateurs et à protéger les organes essentiels.

L'axe floral est une tige fortement modifiée ; contrairement aux tiges végétatives, qui portent des feuilles, il est généralement contracté, de sorte que les parties de la fleur sont serrées ensemble sur l'extrémité de la tige, le réceptacle.

Les parties de la fleur sont généralement disposées en verticilles (ou cycles) mais peuvent aussi être disposées en spirale, surtout si l'axe est allongé. Il y a généralement quatre verticilles distincts de parties de fleurs : (1) un calice extérieur composé de sépales ; à l'intérieur se trouve (2) la corolle, composée de pétales ; (3) l'androécium, ou groupe d'étamines ; et au centre se trouve (4) le gynécée, composé des pistils. Les sépales et les pétales constituent ensemble le périanthe, ou enveloppe florale. Les sépales sont généralement verdâtres et ressemblent souvent à des feuilles réduites, tandis que les pétales sont généralement colorés et voyants. Les sépales et les pétales indiscernables, comme chez les lys et les tulipes, sont parfois appelés tépales.

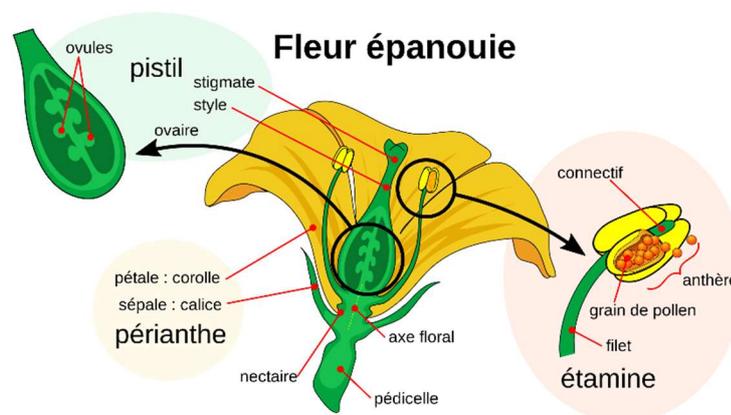
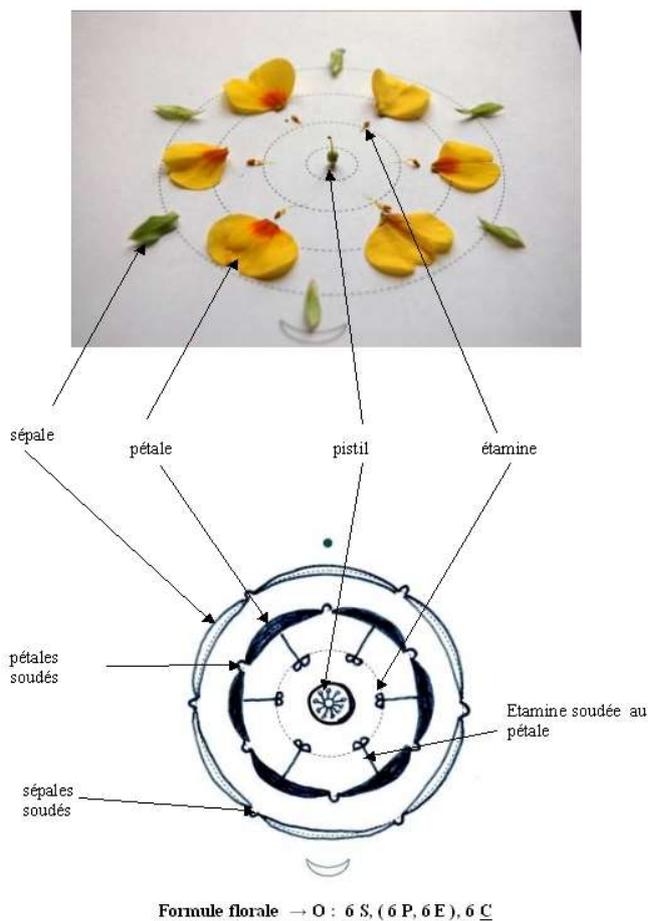


Figure 6.18: Structure d'une fleur simple

L'androécium, ou parties mâles de la fleur, comprend les étamines, dont chacune est constituée d'un filament de support et d'une anthère, dans laquelle le pollen est produit. Le gynécée, ou parties femelles de la fleur, comprend un ou plusieurs pistils, chacun étant constitué d'un ovaire,

avec une extension verticale, le style, sur le dessus duquel repose le stigmate, la surface réceptive au pollen. L'ovaire renferme les ovules, ou graines potentielles. Un pistil peut être simple, constitué d'un seul carpelle, ou feuille modifiée portant un ovule ; ou composé, formé de plusieurs carpelles soudés ensemble.

Le plan d'organisation d'une fleur peut être représenté sous la forme d'un **diagramme floral**. Il permet de positionner les différents verticilles et d'apporter quelques informations supplémentaires grâce à un code universel (soudure, position, loges...).



La formule florale indique le nombre de pièces florales constitutives de chaque verticille.

Les lettres donnent la nature des pièces florales : S pour sépales, P pour pétales, E pour étamines, C pour carpelle, et T pour tépales. Les chiffres présentent le nombre de pièces florales. Au-delà de 12, on note « n ».

Un X placé devant la formule florale indique qu'il s'agit d'une fleur zygomorphe, un O qu'il s'agit d'une fleur actinomorphe.

Lorsque le C est souligné, il s'agit d'un ovaire supère, lorsque le trait est placé au dessus du C, c'est un ovaire infère.

Figure 6.19: Diagramme et formule florale.

Une fleur peut être symétrique radialement, comme chez les roses et les pétunias, auquel cas elle est qualifiée de régulière ou actinomorphe. Une fleur symétrique bilatéralement, comme chez les orchidées et les mufliers, est irrégulière ou zygomorphe.

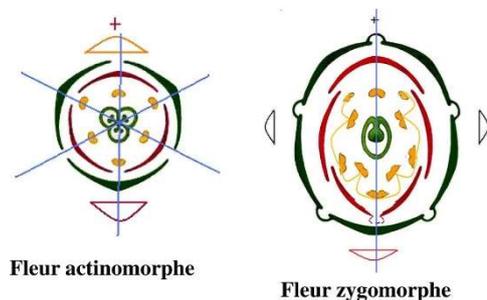


Figure 6.20: Symétrie florale.

Les étamines et les pistils ne sont pas présents ensemble dans toutes les fleurs. Lorsque les deux sont présents, la fleur est dite parfaite, ou bisexuée (**hermaphrodite**), indépendamment du manque d'une autre partie qui la rend incomplète. Une fleur qui manque d'étamines est pistillée, ou femelle, tandis qu'une fleur qui manque de pistils est dite étaminée, ou mâle. Lorsqu'une même plante porte des fleurs unisexuées des deux sexes, elle est dite **monoïque** (par exemple, bégonia tubéreux, noisetier, chêne, maïs) ; lorsque les fleurs mâles et femelles sont sur des

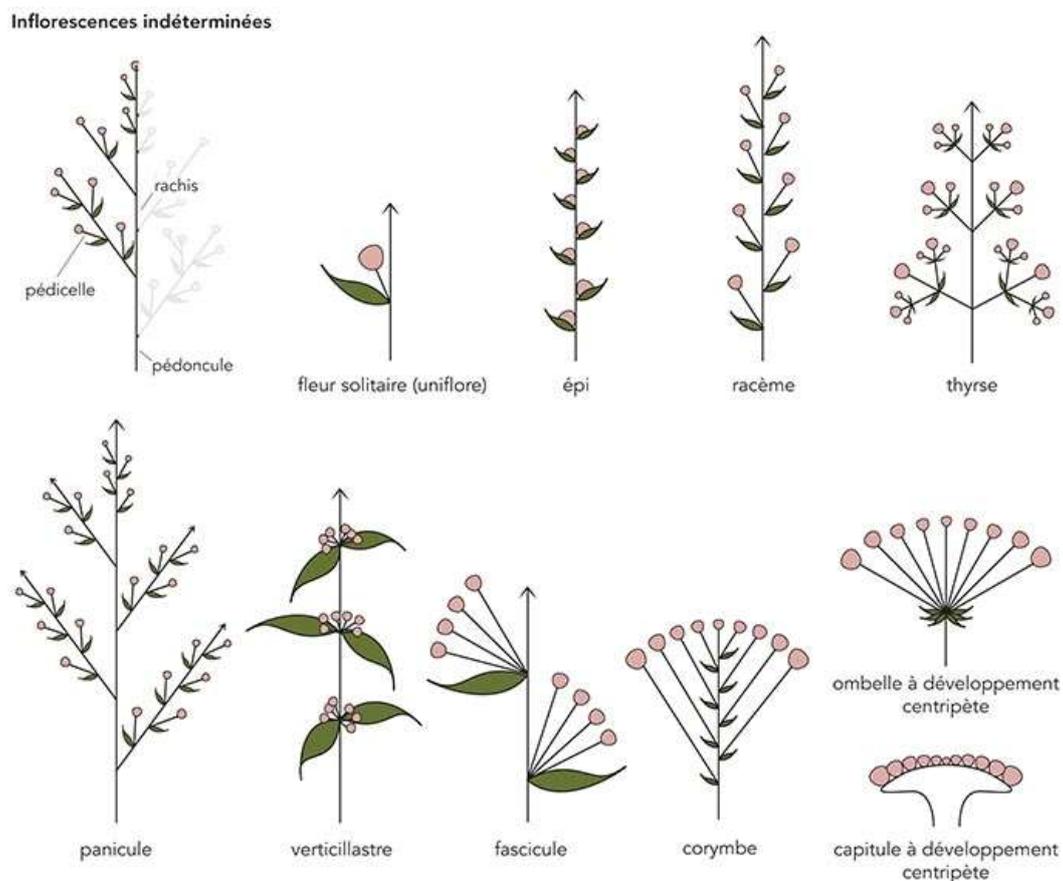
plantes différentes, la plante est **dioïque** (par exemple, datté, houx, peuplier, saule) ; lorsque des fleurs mâles, femelles et bisexuées sont sur la même plante, la plante est dite **polygame**.

6.2.3.2 Les inflorescences

Une inflorescence, chez une plante à fleurs, est un regroupement de fleurs sur une branche ou un système de branches. Une inflorescence est catégorisée en fonction de l'arrangement des fleurs sur un axe principal (pédicelle) et du moment de sa floraison (déterminée et indéterminée).

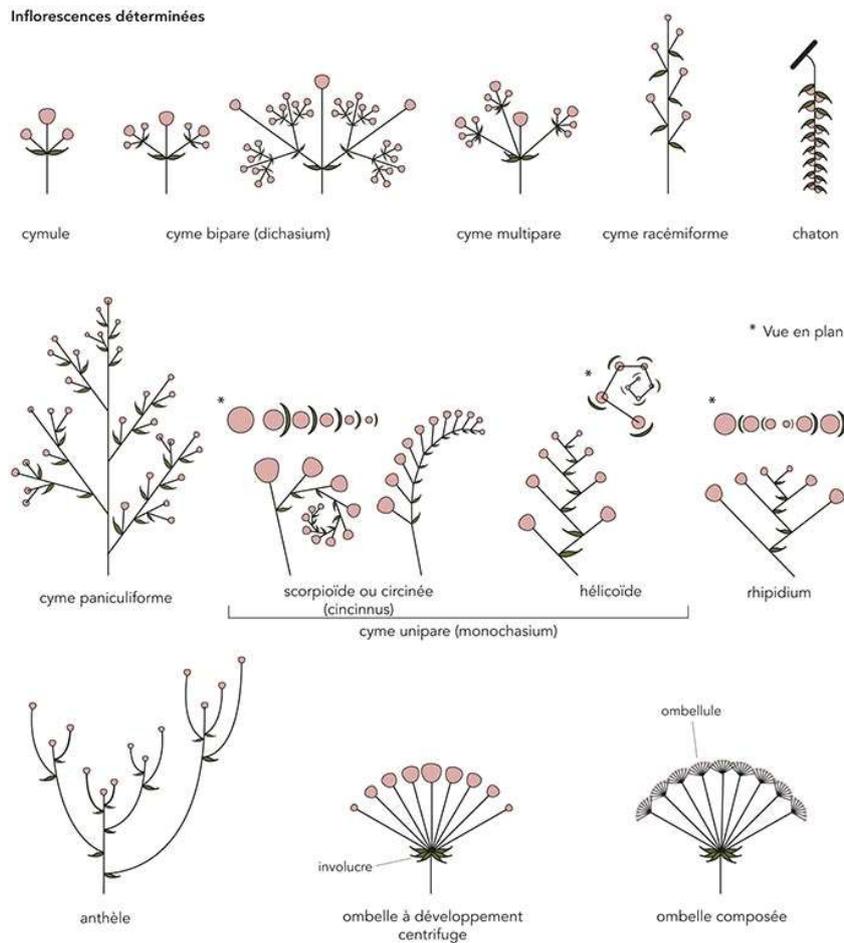
Dans **les inflorescences déterminées** (cymoses), les fleurs les plus jeunes se trouvent en bas d'un axe allongé ou à l'extérieur d'un axe tronqué. Au moment de la floraison, le méristème apical (le point terminal de la division cellulaire) produit un bourgeon floral, arrêtant ainsi la croissance du pédicelle.

Dans une **inflorescence indéfinie**, l'axe principal se termine par un bourgeon et s'allonge, en théorie indéfiniment, en émettant latéralement des fleurs ou des axes secondaires portant des fleurs. Ce sont les fleurs de la base qui s'ouvrent les premières, les autres fleurs s'ouvrent successivement de la base vers le sommet. Le type de l'inflorescence indéfinie est la grappe.



© Presses de l'Université Laval
Illustration tirée de *Flore nordique du Québec et du Labrador*, volume 1

Figure 6.21: Inflorescences indéterminées



© Presses de l'Université Laval
Illustration tirée de *Flore nordique du Québec et du Labrador*, volume 1

Figure 6.22: Inflorescences déterminées.

6.2.4 Biologie florale

6.2.4.1 La Microsporogénèse

La microsporogénèse ou méiose mâle des plantes à graines mène une cellule mère diploïde, le microsporocyte, à quatre microspores haploïdes disposées en tétrade et séparées par des parois de callose. Chacune d'entre elles devient ensuite un grain de pollen (gamétophyte mâle). C'est au cours de la microsporogénèse qu'est déterminé le type apertural des grains de pollen, défini par la forme, le nombre et l'arrangement des ouvertures à la surface pollinique.

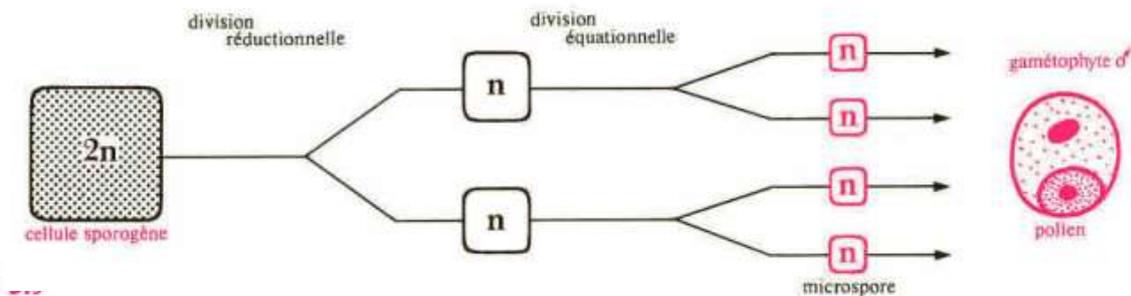


Figure 6.23: Du sporophyte au gamétophyte (grain de pollen).

Les quelques étapes de la microsporogénèse sont :

- Cellule mère diploïde entourée par une paroi de callose.
- La cellule procède aux divisions nucléaires.
- Les cytoplasmes sont progressivement séparés par des parois formées de callose.
- La division des cytoplasmes est achevée et donne quatre microspores haploïdes séparées par de la callose. Cet assemblage est appelé tétrade.
- La callose est dissoute, les microspores arrivent à maturité et donnent quatre grains de pollen.

6.2.4.2 La Mégaosporogénèse

Chez les Angiospermes, la formation de macrospores et la production du sac embryonnaire à partir d'une ou parfois plusieurs cellules de la couche cellulaire sous-épidermique dans l'ovule d'un ovaire fermé est connue sous le nom de macrosporogénèse.

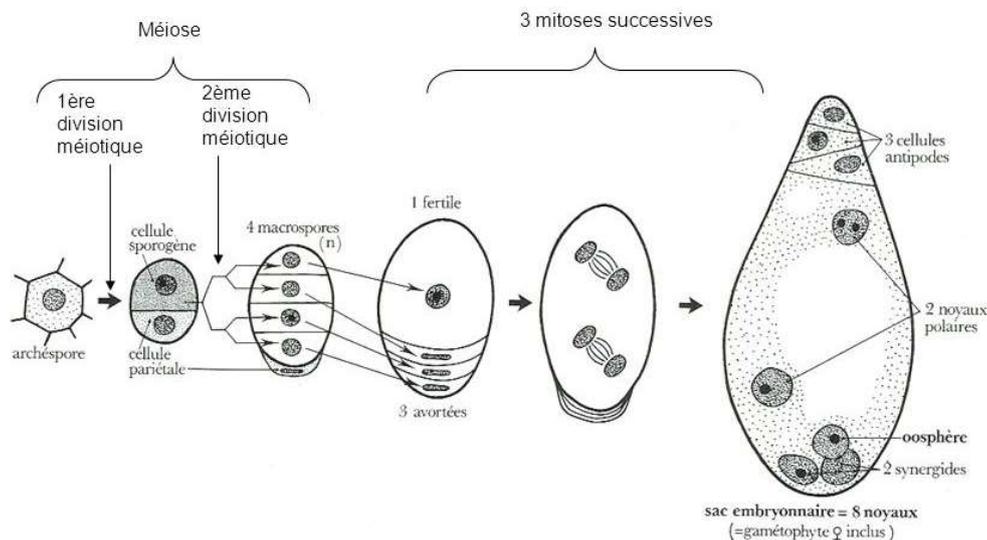


Figure 6.24: Formation d'un gamétophyte femelle ou sac embryonnaire monosporique.

En exemple, voici le déroulement du processus de macrosporogénèse et développement du macrogamétophyte de *Solanum tuberosum*.

- Une seule cellule de type archéspore, d'origine hypodermique, peut fonctionner comme une cellule mère macrospore. Fréquemment, cependant, une archéspore multiple est différencié des cellules hypodermiques et sous-hypodermiques du nucelle. Dans un tel cas, chaque cellule d'archéspore peut fonctionner comme une cellule mère de macrospore, mais généralement une seule d'elles fonctionne ainsi.
- Une rangée linéaire de quatre macrospores est formée. La macrospore de chalaze se développe en un sac embryonnaire; les trois autres spores se désintègrent.
- Les cellules du micropyle du nucelle se décomposent et le sac embryonnaire en développement entre en contact avec l'épiderme interne de l'intégument, qui fonctionne comme une couche nutritive.
- Dans le sac embryonnaire à 4 noyaux, le fuseau persiste entre chaque paire de noyaux soeurs, mais aucune plaque cellulaire n'est observée à ce stade.
- Un sac embryonnaire typique à 8 noyaux est formé, à chaque extrémité duquel les quatre noyaux sont reliés entre eux par des fibres de la broche de la troisième division ainsi que par des fibres de fuseau persistantes de la deuxième division.

- f) La division cellulaire intervient par la formation de plaques cellulaires à travers les fuseaux des deuxième et troisième divisions dans le sac embryonnaire.
- g) Des changements impliquant une dégénérescence au sein de l'ovule peuvent survenir à tout moment pendant la macrosporogénèse et pendant le développement du macrogamétophyte.
- h) La macrosporogénèse peut s'accompagner d'irrégularités dans la distribution chromosomique. Des chromosomes, en retard sur le fuseau, ont été observés dans plusieurs cas dans les divisions hétérotypiques et homéotypiques.
- i) La dégénérescence du tissu microsporogène peut être associée à des modifications correspondantes des ovules. Si la dégénérescence survient tardivement dans les anthères, seule une petite proportion des sacs embryonnaires en développement donne une indication de dégradation.
- j) La dégénérescence des macrogamétophytes matures est fréquente.
- k) Les tubes polliniques n'ont pas été observés dans le style des pistils examinés.
- l) La dégénérescence au sein des ovules peut expliquer dans une certaine mesure l'échec de la formation de graines chez la pomme de terre.

6.2.5 La reproduction chez les angiospermes

☞ La double fécondation chez les angiospermes

La fécondation chez les angiospermes est appelée "**double fécondation**" et "triple fusion".

En règle générale, à mesure que le grain de pollen se développe, il contient une cellule végétative et deux cellules génératives qui se forment en gamète mâle. Dans quelques usines, le grain de poussière se répand comme condition à deux cellules. En cela, la cellule générative se divise en deux gamètes mâles en forme de tube pollinique.

La double fertilisation est un mécanisme de fertilisation complexe qui a évolué chez les plantes à fleurs ; implique la jonction d'un gamétophyte femelle avec deux gamètes mâles (spermatozoïdes).

L'oosphère haploïde qui donnera l'embryon diploïde et le noyau polaire diploïde qui donnera l'embryon accessoire ou albumen triploïde.

Une fois que le pollen s'est déposé sur le stigmate, il doit germer et se développer à travers le style pour atteindre l'ovule. Les microspores, ou pollen, contiennent deux cellules : la cellule du tube pollinique et la cellule générative. La cellule du tube pollinique se développe en un tube pollinique à travers lequel la

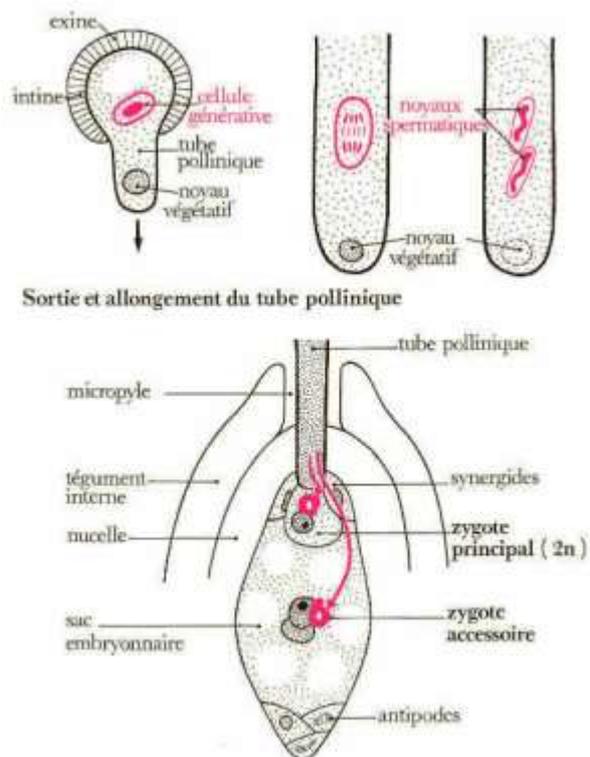


Figure 6.25: La double fécondation chez les angiospermes.

cellule générative se déplace. La germination du tube pollinique nécessite de l'eau, de l'oxygène et certains signaux chimiques.

En parcourant le style pour atteindre le sac embryonnaire, la croissance du tube pollinique est soutenue par les tissus du style. Au cours de ce processus, si la cellule générative ne s'est pas déjà divisée en deux cellules, elle se divise maintenant pour former deux spermatozoïdes. Le tube pollinique est guidé par les produits chimiques sécrétés par les synergides présentes dans le sac embryonnaire ; il pénètre dans le sac ovulaire par le micropyle.

Des deux spermatozoïdes, un spermatozoïde féconde l'ovule, formant un zygote diploïde ; l'autre spermatozoïde fusionne avec les deux noyaux polaires, formant une cellule triploïde qui se développe dans l'endosperme. Ensemble, ces deux événements de fécondation chez les angiospermes sont connus sous le nom de double fécondation. Une fois la fécondation terminée, aucun autre sperme ne peut entrer.

L'ovule fécondé forme la graine, tandis que les tissus de l'ovaire deviennent le fruit, enveloppant généralement la graine.

☞ *Embryogenèse végétale*

Après la fécondation, le développement embryonnaire commence. Le zygote se divise pour former deux cellules : la cellule supérieure (cellule terminale) et la cellule inférieure (cellule basale). La division de la cellule basale donne naissance au suspenseur, qui finit par se connecter avec le tissu maternel. Le suspenseur fournit une voie pour que la nutrition soit transportée de la plante mère à l'embryon en croissance.

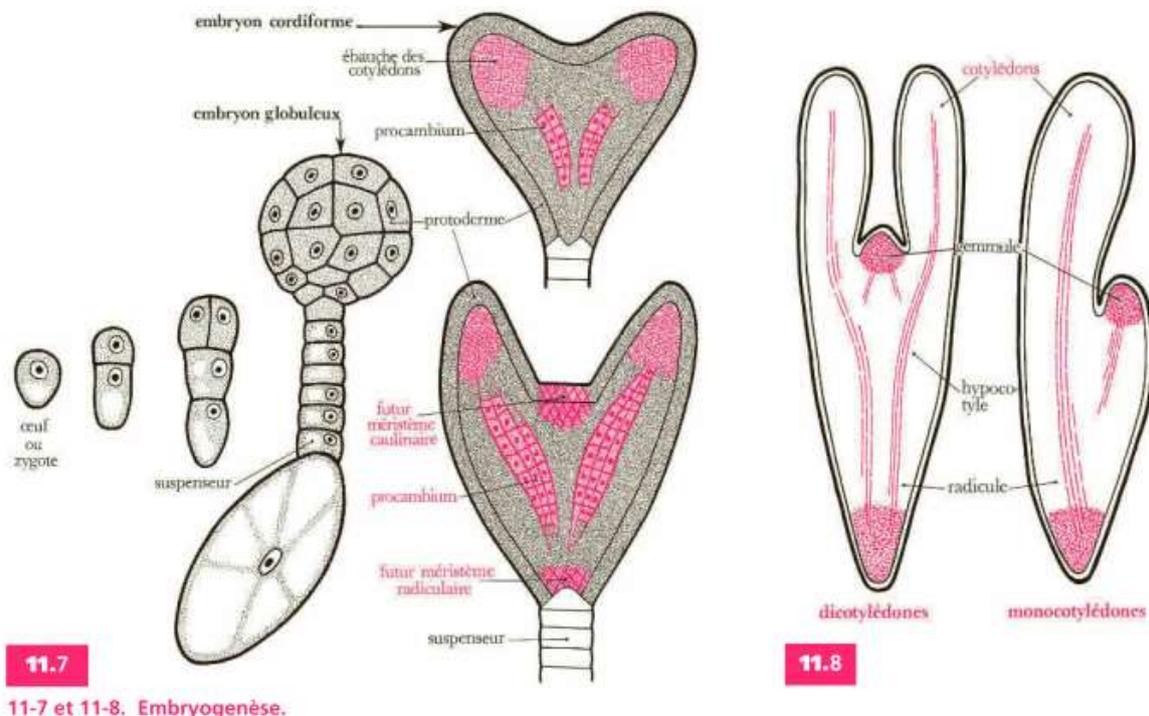


Figure 6.26: L'embryogénèse.

La cellule terminale se divise également, donnant naissance à un proembryon de forme globulaire. Chez les Dicotylédones (eudicotylédones), l'embryon en développement a une forme de cœur en raison de la présence des deux cotylédons rudimentaires. Chez les

dicotylédones non endospermiques, tels que *Capsella bursa*, l'endosperme se développe initialement, mais est ensuite digéré. Dans ce cas, les réserves alimentaires sont déplacées dans les deux cotylédons.

Au fur et à mesure que l'embryon et les cotylédons grossissent, ils deviennent entassés à l'intérieur de la graine en développement et sont forcés de se plier. En fin de compte, l'embryon et les cotylédons remplissent la graine, à quel point, la graine est prête pour la dispersion. Le développement embryonnaire est suspendu après un certain temps ; la croissance ne reprend que lorsque la graine germe.

Le plant en développement dépendra des réserves alimentaires stockées dans les cotylédons jusqu'à ce que la première série de feuilles commence la photosynthèse.

6.2.6 Les Graines

Dans le cycle de vie des « plantes à graines », appelées spermatophytes, la graine¹ est la structure qui contient et protège l'embryon végétal. Elle est souvent contenue dans un fruit qui permet sa dissémination.

La graine permet ainsi à la plante d'échapper aux conditions d'un milieu devenu hostile soit en s'éloignant, soit en attendant le retour de circonstances favorables.

Elle provient d'une transformation de l'ovule fécondé. De ce fait, elle est composée à la fois de parties provenant du sporophyte maternel (les enveloppes de la graine), du gamétophyte (les tissus de réserve de la graine) et du sporophyte de la génération suivante : l'embryon.

Elle a un rôle de protection du nouvel individu grâce à son enveloppe souvent durcie, et de nutrition grâce à des réserves de substances nourricières. Les graines ont en effet la propriété d'accumuler, sous une forme facile à conserver, des réserves destinées au développement futur de l'embryon. Elles constituent ainsi une source d'alimentation recherchée par les animaux (régime alimentaire granivore).

Les graines ont pris place dans l'alimentation humaine, et une place fondamentale au sein de nombreuses cultures, depuis l'invention de l'agriculture : céréales, légumes secs... Une graine sélectionnée pour être semée est une semence.

6.2.6.1 Structure

La graine est formée de l'extérieur vers l'intérieur par une enveloppe protectrice nommée tégument, entourant un tissu de réserves nutritives, et l'embryon.

Les tissus protecteurs constituent une des caractéristiques principales de la structure graine. L'embryon est tout d'abord entouré par un tissu de réserves nutritives plus ou moins important selon les espèces. L'origine de ce tissu est variable.

Chez les gymnospermes : il s'agit de l'endosperme, tissu haploïde (possédant n chromosomes) provenant de la différenciation du gamétophyte femelle.

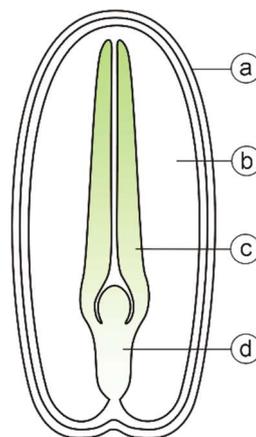


Figure 6.27:
Structure schématique d'une graine d'Angiosperme Dicotylédone.

a : tégument ; b : albumen ; c : cotylédon ; d : embryon

Agnieszka Kwiecień

Chez les angiospermes : les réserves sont stockées soit dans l'albumen, tissu triploïde (possédant $3n$ chromosomes) provenant de la fusion des deux noyaux polaires du sac embryonnaire et de l'un des deux spermatozoïdes du grain de pollen, soit dans le péricarpe, tissu diploïde (possédant $2n$ chromosomes) provenant du nucelle entourant le sac embryonnaire. Les graines à péricarpe sont peu courantes (les graines des Chénopodiacées par exemple).

L'albumen peut être plus ou moins développé dans la graine. Il peut contenir toutes les réserves nutritives, qui seront utilisées par l'embryon lors de la germination. Selon la répartition des réserves, on parle de :

- Graine exalbuminée : lorsque les réserves se situent seulement dans l'embryon.
- Graine albuminée : réserves dans l'embryon et l'albumen.
- Graine à péricarpe : réserves dans l'embryon, l'albumen et le péricarpe.
- La graine d'un fruit à noyau est entourée d'un péricarpe. C'est le cas chez l'amande, le fruit de l'amandier.

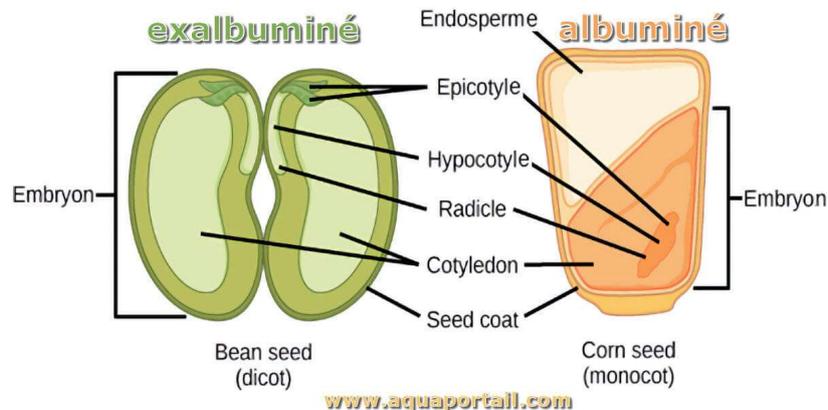


Figure 6.28: Graine exalbuminée (à gauche) et graine albuminée (à droite).

Autour des tissus de réserves se trouve le tégument qui constitue le tissu protecteur principal. Il est constitué d'une couche de plusieurs cellules et entoure complètement l'embryon et ses réserves. Il n'est ouvert que par un petit orifice, le micropyle, par où est rentré le tube pollinique pour permettre la fécondation, lors de la pollinisation.

L'embryon, quant à lui, peut être minuscule et constitué de quelques cellules seulement, ou déjà avec une gemmule développée en tigelle, radicule et cotylédons. Les différentes stratégies évolutives possibles donnent suivant les espèces des graines dont le poids varie de 2 microgrammes pour une orchidée (par exemple la Goodyère rampante) à une vingtaine de kilogrammes pour une arécacée, le coco-de-mer (*Lodoicea maldivica*).

6.2.7 Les fruits des angiospermes

Le fruit, en botanique, est l'organe végétal contenant une ou plusieurs graines. Caractéristique des Angiospermes, il succède à la fleur par transformation du pistil. La paroi de l'ovaire forme le péricarpe du fruit et l'ovule donne la graine. Le fruit favorise la reproduction de l'espèce, en protégeant la ou les graines et en favorisant leur dissémination.

La formation du fruit résulte de la transformation du pistil après la fécondation, ou parfois sans fécondation (on parle dans ce cas de *parthénocarpié*). C'est plus précisément la paroi de l'ovaire (partie du pistil qui renferme l'ovule) qui devient la paroi du fruit, appelée péricarpe, entourant les graines. L'épiderme externe de cette paroi devient l'épicarpe, le parenchyme devient le

mésocarpe, et l'épiderme interne, l'endocarpe. Selon les transformations de cette paroi, on obtient les différents types de fruits.

6.2.7.1 Structure générale des fruits

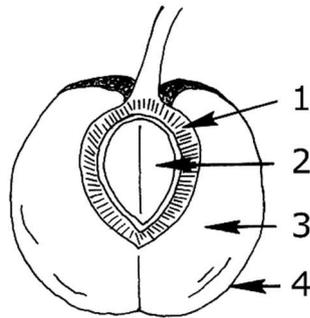


Figure 6.30: Section d'un fruit (drupe) : 1 : endocarpe ; 2 : graine ; 3 : mésocarpe ; 4 : épicarpe.

Le péricarpe est la paroi du fruit issue de la transformation après la fécondation de la paroi de l'ovaire. Pour les faux-fruits, il résulte de la transformation du réceptacle floral.

Le péricarpe est formé de trois couches :

- ☞ L'épicarpe, généralement coloré, usuellement nommé la peau ;
- ☞ Le mésocarpe, qui donne la partie juteuse des fruits charnus ;
- ☞ L'endocarpe, parfois lignifié et appelé noyau.

a) *Épicarpe*

- L'épicarpe ou exocarpe est en botanique la paroi extérieure d'un fruit.
- Il recouvre la couche appelée mésocarpe.
- Il est généralement coloré.
- Il est usuellement appelé peau ou écorce.
- Dans le cas particulier des agrumes, l'exocarpe se nomme flavédo.

b) *Mésocarpe*

- Le mésocarpe constitue la partie intermédiaire du fruit communément appelée pulpe quand il s'agit de fruits charnus.
- Il dérive de la transformation du parenchyme de la paroi de l'ovaire.
- Dans le cas particulier des agrumes, la partie externe du mésocarpe, blanche et spongieuse, se nomme albédo.

c) *Endocarpe*

L'endocarpe est le feuillet le plus interne du péricarpe, tissu du fruit entourant la graine. Il permet notamment de différencier une baie d'une drupe parmi les fruits charnus. S'il est sclérifié (durci), il forme un noyau autour de la graine (le fruit sera une drupe), s'il ne l'est pas, la graine sera nommée pépin (le fruit sera une baie).

Ainsi, en botanique, on considérera par exemple que l'avocat contient un pépin et la pêche un noyau.

6.2.7.2 Différents types

Il existe plusieurs types de fruits (le terme déhiscent désigne l'ouverture du fruit par une ou plusieurs fentes).

En botanique, **la déhiscence**, du latin *dehiscens*, « s'entrouvrir », est l'ouverture, spontanée et à maturité, d'organes végétaux clos (anthères, fruits) suivant des zones définies, pour libérer leur contenu (graines, pollen, spores, etc.).

L'indéhiscence est l'incapacité d'une telle ouverture. Les akènes (fruits secs) du tilleul, du noisetier, des fraisiers ou des pissenlits véritables ne s'ouvrent pas. Ils sont indéhiscents.

Tableau : Différents types de fruits (TelaBotanica).

Simples	Secs	indéhiscents = akènes	Fruit à une seule graine ne s'ouvrant pas (céréales, châtaignes). Cas rare : il existe des akènes à plusieurs graines
		déhiscents	Capsule : Fruit s'ouvrant par un couvercle (Coquelicot) ou par des pores. Gousse : 1 carpelle à 2 fentes de déhiscence (Haricot) Attention : rien à voir avec la gousse d'ail ! Follicule : 1 carpelle à 1 fente de déhiscence (Héllébore) Silique : 2 carpelles avec une fausse cloison (Crucifères). Silicule : silique courte de forme plus ou moins globuleuse.
	Charnus	Drupes	Une seule graine protégée par un noyau. (Abricot, cerise, olive,...). Il existe des drupes à plusieurs noyaux (moins courantes).
		Baies	Plusieurs graines directement dans la pulpe (Raisin, groseille, Orange)
Multiples (Constitués d'un ensemble de fruits)	Polyakènes		Ensemble d'akènes (Renoncule, potentille)
	Drupéoles		Ensemble de drupes (Framboise)
Complexes			Fruits (au sens gastronomique !) formés d'une partie de réceptacle, ou de gynécée et englobant les vrais fruits. (Fraise, cynorrhodon, pomme, poire)

☞ *Les faux-fruits (complexes)*

Dans certains cas, le « fruit » ne résulte pas de la transformation du pistil et peut avoir une origine plus complexe, c'est un faux-fruit. Sa formation peut résulter soit :

- de la transformation d'une autre partie de la fleur, le réceptacle floral. L'exemple le plus connu de faux-fruit est la pomme ou la fraise ;
- de la transformation d'une autre partie de la fleur, les carpelles, devenant des drupéoles. Ces fruits multiples sont donc des petites drupes agglomérées, on parle alors de polydrupes. C'est le cas de la framboise et de la mûre (fruit de la ronce) ;
- de la transformation de plusieurs fleurs d'une inflorescence que l'on appelle une infrutescence. C'est par exemple le cas de l'ananas, de la figue ou de la mûre (fruit du mûrier). Ils font aussi partie des faux-fruits.

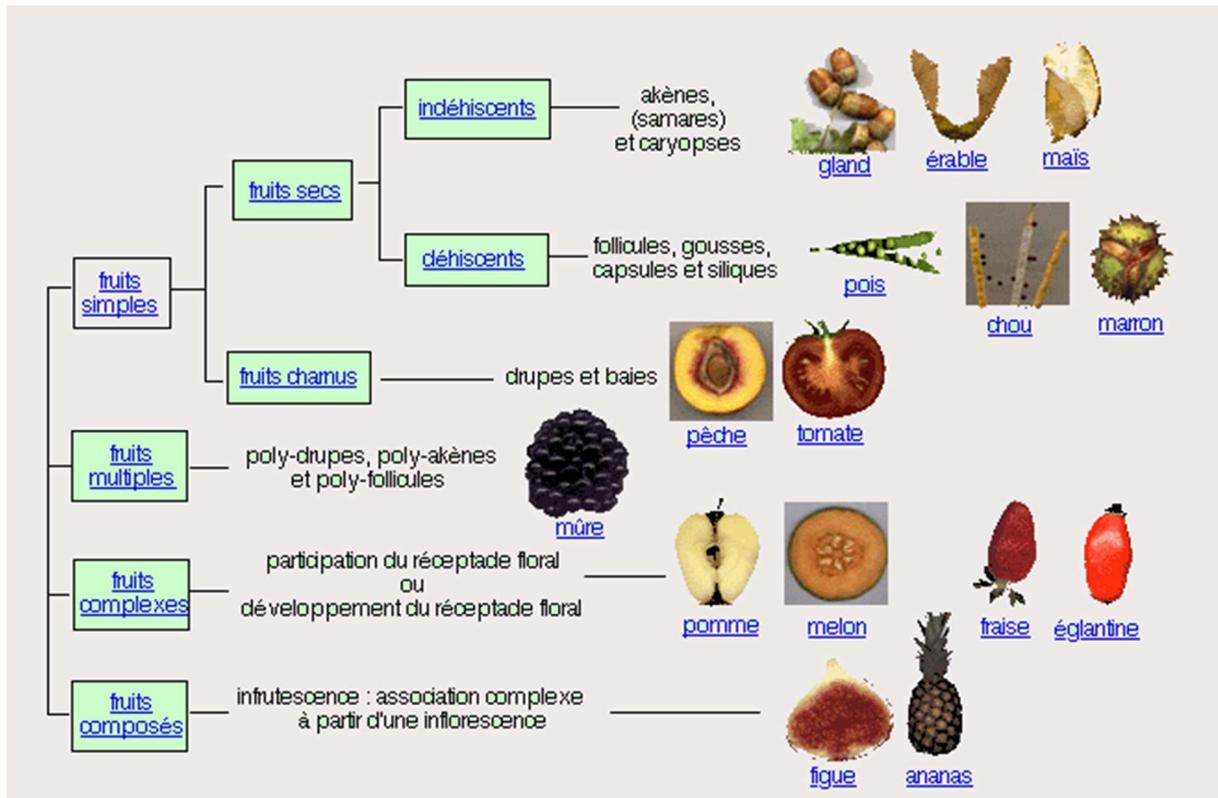


Figure 6.31: Différents types de fruits.

6.2.8 Systématique des angiospermes

Les 369 000 espèces sont réparties en 12 000 genres appartenant à environ 445 familles, elles-mêmes réunies en 56 ordres (contre seulement 700 espèces de Gymnospermes selon les estimations les plus larges). Elles dominent la flore terrestre.

On distingue différents ordres de divergences anciennes, et deux grands ensembles, les monocotylédones, qui incluent entre autres les graminées (blé, maïs, bambou), les dattiers ou les plantes à bulbes (jonquille, oignon, poireau), et les dicotylédones vraies, qui incluent aussi bien le chêne que la pomme de terre, les orties ou les artichauts. Les monocotylédones rassemblent près de 20 % des espèces et les dicotylédones près de 80 %.

6.2.8.1 La classification phylogénétique des angiospermes (Système APG)

Le système APG (de l'Anglais : *Angiosperm Phylogeny Group system*) ou classification phylogénétique, est une classification botanique des angiospermes. La première classification de l'APG fut en 1998, les suivantes étant la classification phylogénétique APG II (2003), puis APG III (2009) et la dernière version APG IV (2016). L'APG est une classification moderne de taxonomie des plantes angiospermes au sens strict, principalement à base moléculaire.

Par rapport au système APG III, le système APG IV reconnaît cinq nouveaux ordres (Boraginales, Dilléniales, Icacinales, Metteniusales et Vahliales), ainsi que quelques nouvelles familles, soit un total de 64 ordres d'angiospermes et 416 familles. En général, les auteurs décrivent leur philosophie comme « conservatrice », basée sur des modifications à partir de l'APG III uniquement lorsqu'un « besoin bien soutenu » a été démontré. Cela a parfois abouti à des placements qui ne sont pas compatibles avec les études publiées, mais où des recherches supplémentaires sont nécessaires avant que la classification puisse être modifiée (APG, 2016).

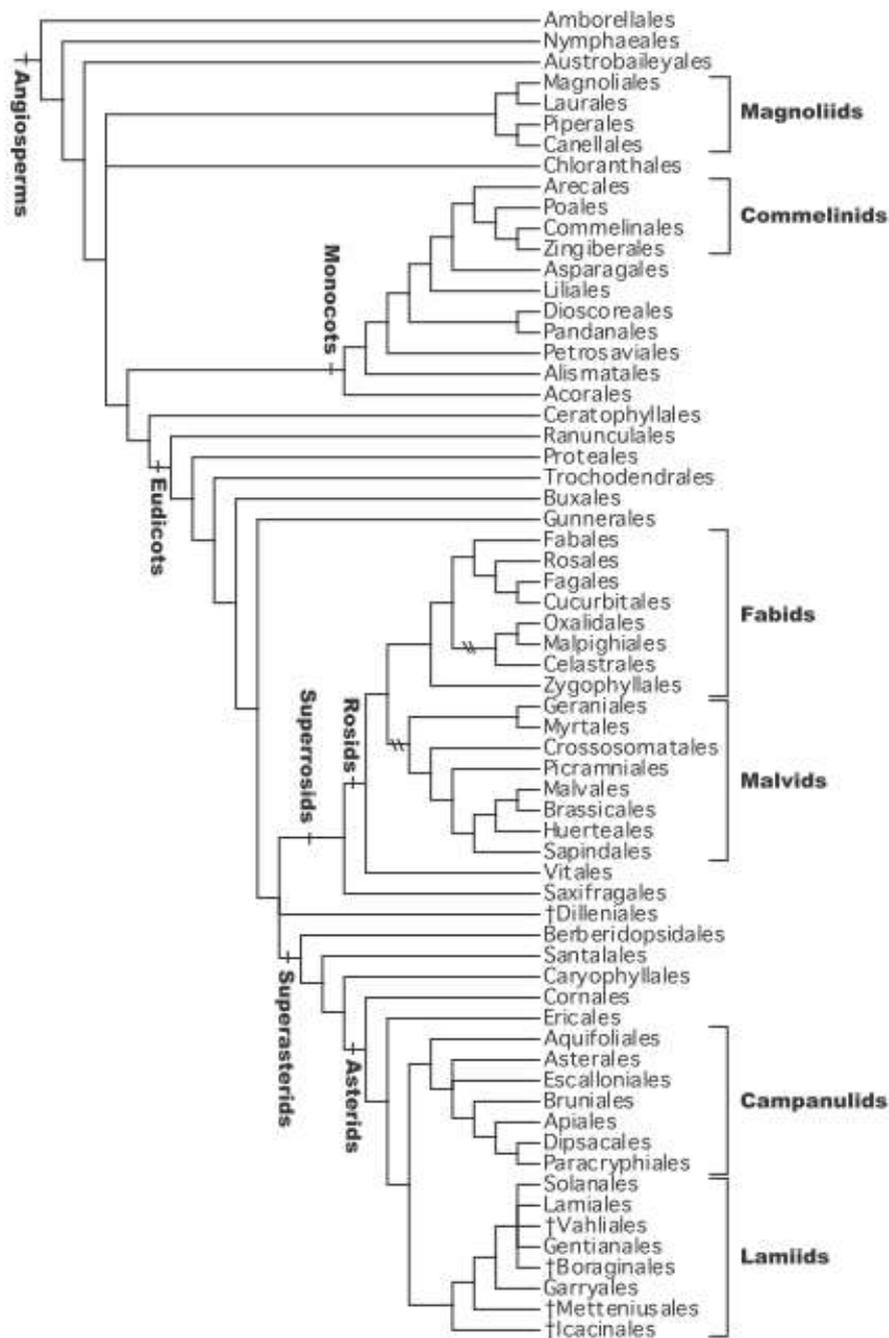


Figure 6.32: Interrelations des ordres APG IV et de certaines familles. Dans les analyses à grande échelle des angiospermes. Les emplacements alternatifs représentant une incongruité entre les résultats nucléaires/mitochondriaux et plastidiaux pour le clade Celastrales/Oxalidales/Malpighiales (COM) sont indiqués par des barres obliques (\\). †Ordres nouvellement reconnus dans APG.

6.2.9 Quelques angiospermes d'intérêt

Les Angiospermes ont une importance économique de premier ordre pour les sociétés humaines.

L'agriculture dépend presque entièrement des angiospermes, qui fournissent pratiquement tous les aliments à base de plantes, et fournissent également une quantité importante d'aliments pour le bétail. De toutes les familles de plantes, **les Poacées**, ou la famille des graminées (les céréales), est de loin la plus importante, fournissant l'essentiel de toutes les matières premières (riz, maïs, blé, orge, seigle, avoine, mil, canne à sucre, sorgho). **La famille des Fabacées**, ou légumineuses, vient en deuxième position. **La famille des solanacées** (pommes de terre, tomates et poivrons, entre autres) est également d'une grande importance ; **la famille des cucurbitacées** ou courges (y compris les citrouilles et les melons); **la famille des Brassicacées** ou moutardes (y compris le colza et les innombrables variétés de l'espèce de chou *Brassica oleracea* L.) ; et **la famille des Apiacées**, ou persil. Beaucoup de nos fruits proviennent de **la famille des rutacées**, ou rue (comprenant les oranges, citrons, pamplemousses, etc.), et de **la famille des rosacées**, ou roses (comprenant pommes, poires, cerises, abricots, prunes, etc.). (Zhang S, et al. 2017 ; Botanical Dermatology Database, 2019)

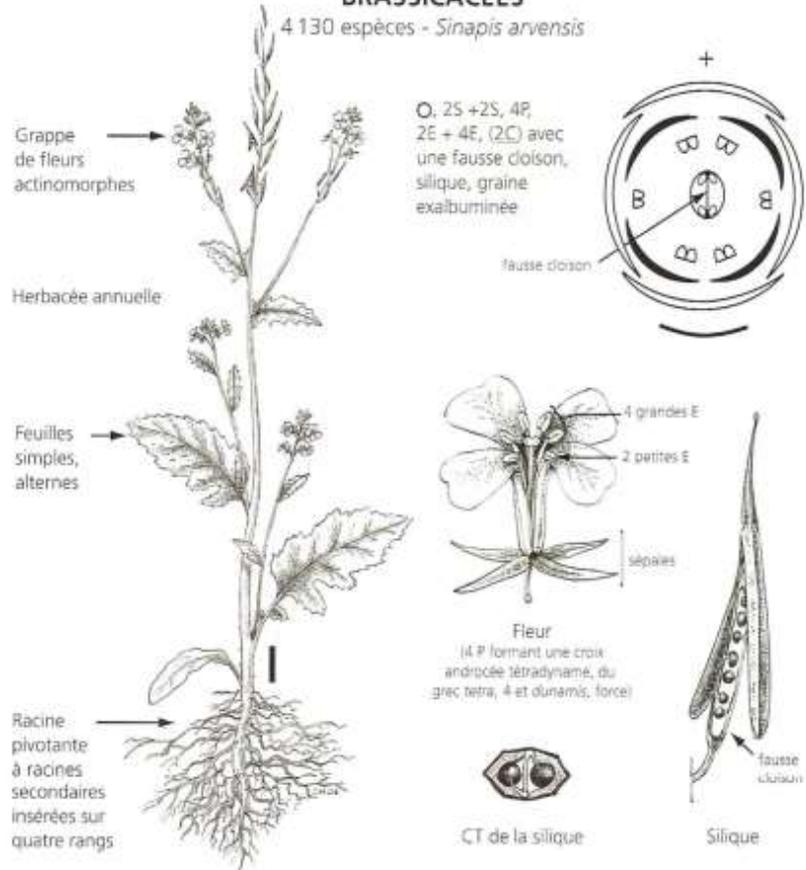
Dans certaines parties du monde, certaines espèces individuelles revêtent une importance primordiale en raison de leur variété d'utilisations, par exemple le cocotier (*Cocos nucifera*) sur les atolls du Pacifique et l'olivier (*Olea europaea* L.) dans la région méditerranéenne. (Loumou A, Giourga C, 2003).

Les plantes à fleurs fournissent également des ressources économiques sous forme de bois, de papier, de fibres (coton, lin et chanvre, entre autres), de médicaments (digitalis, camphre), de plantes décoratives et paysagères et de nombreuses autres utilisations. Le café et le cacao sont les boissons courantes obtenues à partir des plantes à fleurs. Le principal domaine dans lequel ils sont dépassés par d'autres plantes, à savoir les conifères (Pinales), qui ne fleurissent pas (gymnospermes), est la production de bois et de papier.

D'après MEYER *et al.* (2008)

BRASSICACÉES

4 130 espèces - *Sinapis arvensis*



Brassica napus ssp. *oleifera*, le colza. Cultivé pour l'huile extraite de ses graines.

Détail de la fleur de colza.



Détail des siliques de colza.

Mithalis inana, méthiole. Dures blanches.

Nasturtium officinale, le cresson de fontaine. Aquatique, souterr, à eau-douce. Cultivé pour consommation en salade. Détail de la fleur.

Diversité : arbres, buissons ou herbacées annuelles, parfois vivaces (grieffée *Erysimum*) ou bisannuelles (chou *Brassica*). Plantes à glycosides sulfurés (sénévois) anti-herbivores. Leur hydrolyse suite à une blessure est responsable de l'odeur de chou et de la saveur piquante. Cosmopolites.

Biologie : entomogamie (nectar), pollinisation par oiseaux ou chauve-souris chez les espèces tropicales (*Capparis*). Protogynie, mais autogamie fréquente. Absence de mycorhize.

Utilisation : alimentaire (chou *Brassica*, moutarde *Sinapis*, radis *Raphanus*, câprier *Capparis*, huile de colza *Brassica napus*). Ornementale (monnaie du pape *Lunaria*). Recherches en biologie moléculaire et génétique sur l'arabette (*Arabidopsis thaliana*), herbacée pionnière eurasiatique.



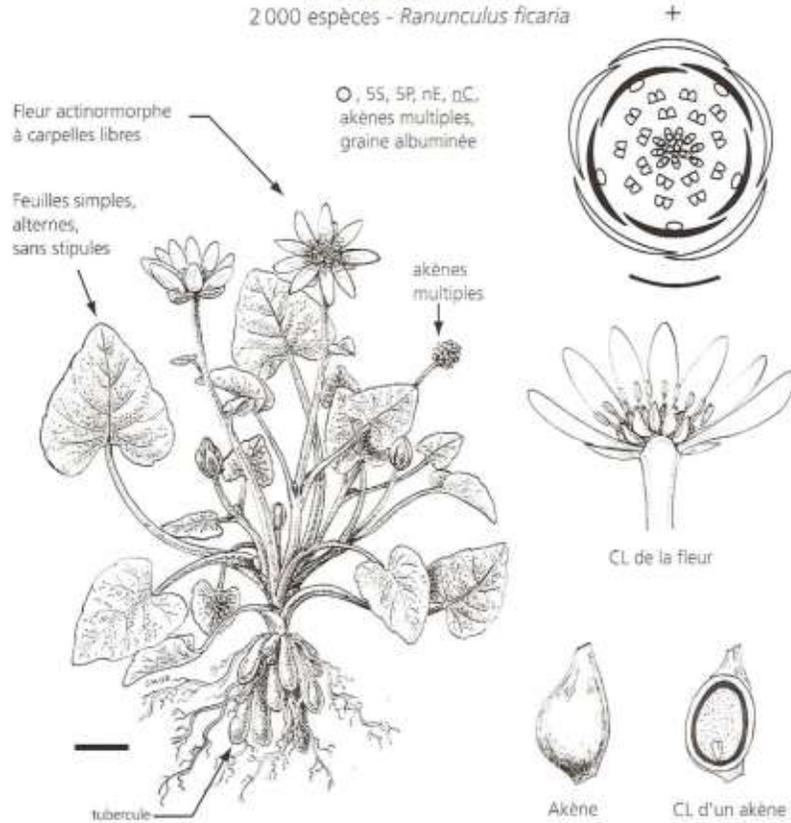
Brassica oleracea var. *gongylodes*, chou-rave. Tige tubérisée ou cime.



Arabis sp. Annuel, pionnière des rochers nus, murs, pelouses ouvertes.

RENONCULACÉES

2 000 espèces - *Ranunculus ficaria*

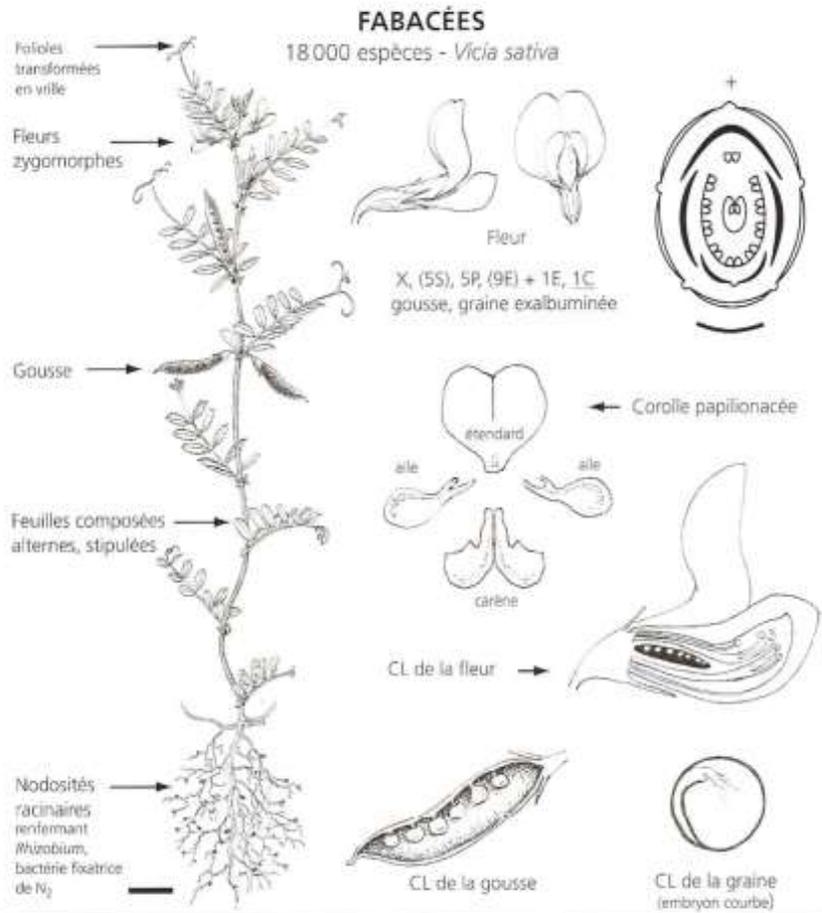


Diversité : herbacées généralement vivaces, parfois liane (clématite *Clematis*). Anatomie monocotyléide (peu de formations secondaires). Certaines espèces à fleur zygomorphe (aconit *Aconitum*). Carpelles libres donnant un fruit multiple (follicules multiples d'hellébore, akènes multiples de renoncule), rarement baie. Surtout dans les zones tempérées froides de l'hémisphère nord.

Biologie : entomogamie (nectar, pollen) ; quelques cas d'anémogamie (pigamon *Thalictrum*). Dissémination des fruits très variable selon les espèces. Plantes généralement toxiques (alcaloïdes).

Utilisation : médicinale (hépatique *Hepatica nobilis* vulnérable, pulsatille *Pulsatilla vulgaris* antibactérienne). Surtout ornementale (ancolie *Aquilegia*, popule *Caltha*, dauphinoise *Delphinium*).





Diversité : herbacées, arbustes, arbres ou lianes. Feuilles alternes ou opposées. Trois sous-familles : Mimosoideae (mimosa *Acacia*), Cesalpinoideae (arbre de Judée *Cercis*) et Faboideae (pois *Pisum*). Fleur à 10E soudées par les filets (E monadelphes, cas du genêt *Cytisus*) ou 9E soudées + 1E libre (E diadelphes, cas de la vesce *Vicia*). Cosmopolite.

Biologie : entomogamie. Fleurs cléistogames et gousse souterraine chez l'arachide (*Arachis hypogea*). Parfois myrmécochorie des graines (genêt). Autotrophie pour N_2 par symbiose avec *Rhizobium*.

Utilisation : alimentaire (pois, lentille, soja, haricot). Fourrage (trèfle, luzerne, vesce). Engrais vert à rôle d'amendement azoté du sol (trèfle, luzerne). Ornementale (mimosa *Acacia*, cytise *Laburnum*).



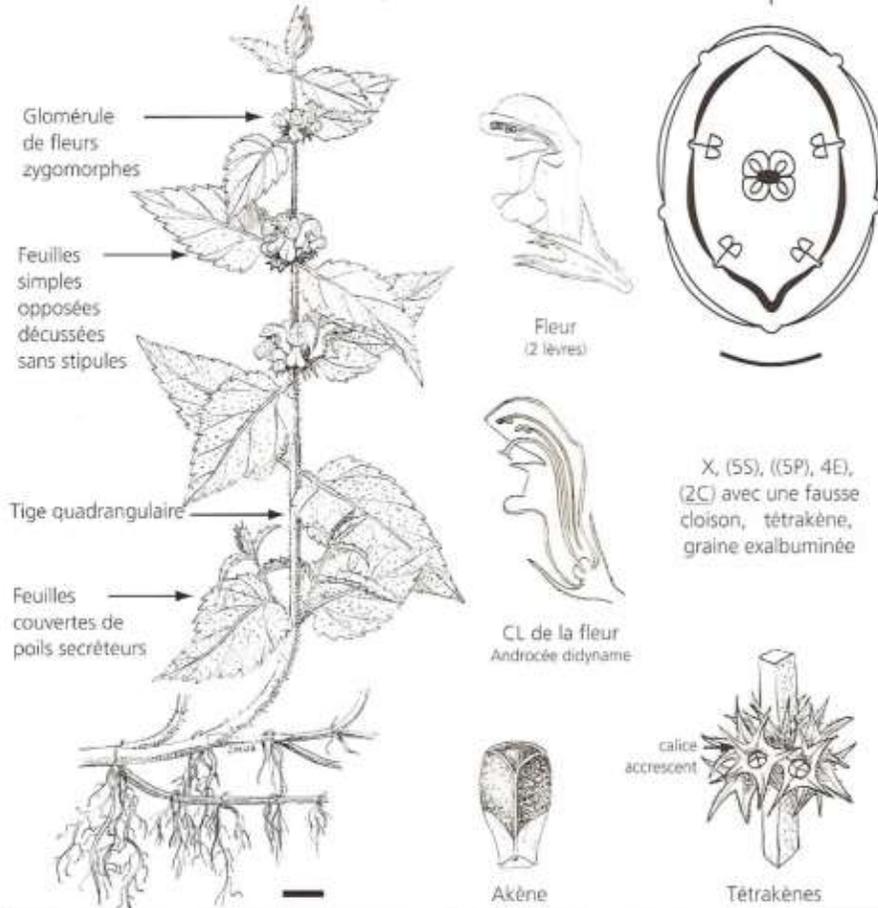
Ononis spinosa, l'ononis ligneux. Poinsier calcicole. Arbreaux des montagnes alpines.

Ononis rotundifolia, l'ononis à feuilles rondes. Détail d'une gousse. Fossiles et bois de montagne.

Ononis sativa, la luzerne cultivée. Plante fourragère, bords des chemins. Fiches. Gousse typique, ensilable.

LAMIACÉES

6970 espèces - *Lamium album*



Diversité : herbacées, buissons ou arbres. Fleur parfois à une lèvre (bugle *Ajuga*). Deux carpelles redivisés par une fausse cloison d'où ovaire à 4 loges. Cosmopolites, souvent en milieu ouvert.

Biologie : entomogamie (forme de la corolle), protandrie. Anémochorie, hydrochorie, ornithochorie.

Utilisation : alimentaire (crosne de *Stachys tubifera*). Aromates (menthe *Mentha*, basilic *Ocimum*, sauge *Salvia*, sarriette *Satureja*, thym *Thymus*, origan *Origanum*, romarin *Rosmarinum*). Bois (teck *Tectona*). Médicinale grâce aux huiles essentielles (lavande *Lavandula*, antiseptique ; mélisse *Melissa officinalis* digestif). Ornementale (*Salvia*, *Coleus*).



Thymus serpyllum, le serpolet. Sous arbrusseau. "Sous les pieds, derrière les portes calcaires."

Lamium purpureum, le lamier pourpre. Très commun, rudéral, néophyte.



Galium gallicolor, le galier jaune. Scarpins, Hérault.

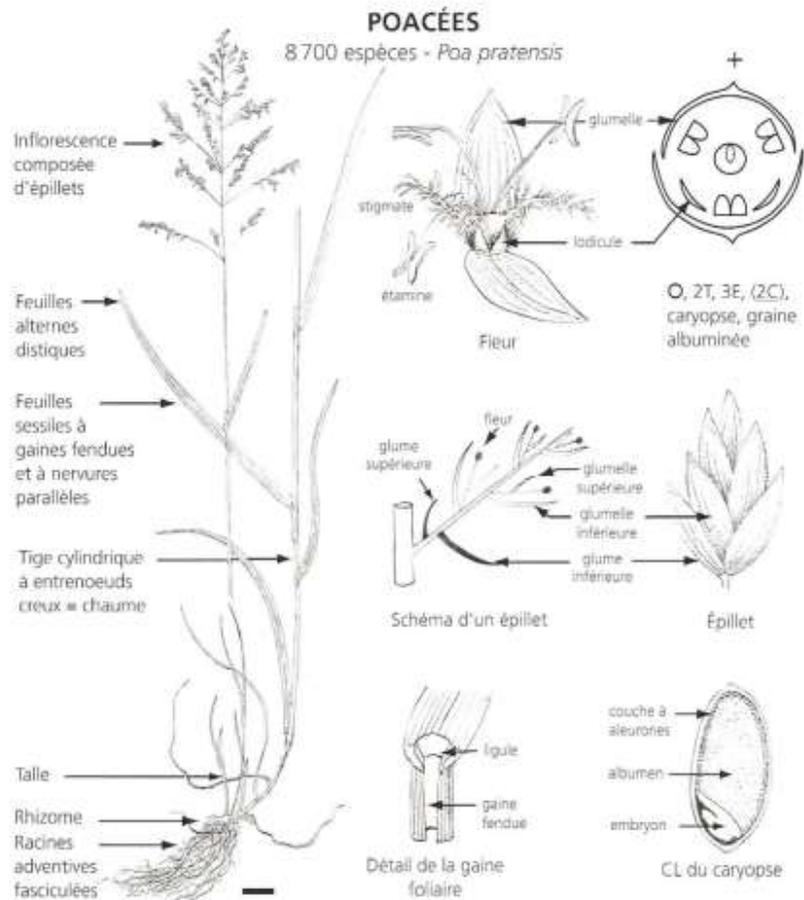
Lavandula stoechas, la lavande stoechas. Aromatique, Gers.

Rosmarinus officinalis, le romarin officinal. Arbrusseau aromatique à feuilles persistantes, Région méditerranéenne.



Mentha pulegium, la menthe pouliot. Bord des rivières, deux rivières. Arbrusseau.

Salvia pratensis, le sauge des prés. Prairies calcaires. Détail de la fleur entomogamie.



Diversité : herbacées annuelles ou vivaces rhizomateuses (certains bambous arborescents).
Reconnaissance des espèces par l'organisation des épillets (présence ou non d'arêtes) : Cosmopolites ;
constituent des formations typiques (prairies, steppe, pampas, savane, jungle de bambous).

Biologie : anémogamie et anémochorie. Espèces C4 en régions tropicales chaudes (maïs *Zea mays*,
sorgho *Sorgho sp.*). Multiplication végétative par tallage (une taille : pousse latérale à partir du collet).

Utilisation : alimentation (blé, orge, seigle, riz, canne à sucre, maïs, avoine), fourrage (dactyle) ;
bière (orge germé). Engrais (tourteaux à partir des feuilles de maïs). Construction (bambous).



Phragmites australis, le roseau. Vue d'une touffette (ensemble monospécifique de roseaux, bord des eaux).



Zea mays, le maïs. Monocotyle à épis terminaux. Plante C4. Céréale, cultivée pour ses caryopses. Forte demande en eau (irrigation souvent nécessaire).



Zea mays. Vue des stigmates de l'épi femelle.



Avena barbata, l'avoine barbue. Panicules sèches, méditerranéennes.



Triticum aestivum, le blé tendre. Épillets solitaires sur chaque dent de l'axe. Céréale, cultivée pour ses caryopses.



Bromus erectus, le bromus érigé. Panicules sèches calcinées, chemins.



Sorghum pennsylvanicum, le sorgho pennsylvanien. Glumelle terminée par une arête plumée. Panicules sèches, steppiques.



Lolium perenne, l'ivraie. Caryopse toxique (sialicoïde) provoque l'ivresse. Plante fourragère. Néophile. Pres, pâturages, chemins.



Anzhosartum odoratum, le fleuve odorant. Plante fourragère. Odorante (cas maritime). Prairies acaliphiles, sols durs.

Références Bibliographique

<https://www.britannica.com/science>

<https://chat.openai.com>

<https://en.wikipedia.org>

<https://www.aquaportail.com>

<https://www.researchgate.net>

<https://www.universalis.fr/encyclopedie>

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca>

<https://www.maxicours.com>

<https://fr.slideshare.net/RahmaLionne1/spermatophytesetgymno-20201pptx>

<https://www.frontiersin.org>

Julie Sannier. Diversité et évolution de la microsporogénèse chez les palmiers (Arecaceae) en relation avec la détermination du type apertural. Biologie végétale. Université Paris Sud - Paris XI, 2006. Français.