

2. Royaume des Chromista

Les Chromistes (Chromista) sont un règne d'organismes uni- et pluricellulaires eucaryotes regroupant des taxons historiquement considérés comme des protozoaires (Foraminifères, Radiolaires, Ciliés, etc.), comme des champignons (Oomycètes, Labyrinthulomycètes, etc.) et des algues (Algues brunes, Diatomées, etc.).

Chromista est un royaume biologique polyphylétique, et composé d'espèces eucaryotes unicellulaires et pluricellulaires qui partagent des caractéristiques similaires dans leurs organites photosynthétiques (chloroplastes). Les membres de Chromista sont des eucaryotes unicellulaires et pluricellulaires ayant essentiellement l'une ou l'autre, voire les deux, des caractéristiques suivantes :

- Tous les eucaryotes dont les plastes contiennent de la chlorophylle c et sont entourés de quatre membranes
- Des cils avec des poils tubulaires rigides tripartites ou bipartites.

Si l'ancêtre possédait déjà des chloroplastes dérivés par endosymbiose à partir d'algues rouges, tous les Chromista non photosynthétiques ont perdu secondairement la capacité de photosynthèse.

Ce royaume comprend une diversité d'organismes, des algues aux parasites du paludisme (*Plasmodium*). Les preuves moléculaires indiquent que les plastes des chromistes ont été dérivés des algues rouges par symbiogenèse secondaire lors d'un événement unique. En revanche, les plantes ont acquis leurs plastes à partir de cyanobactéries par symbiogenèse primaire. Ces plastes sont désormais enfermés dans deux membranes cellulaires supplémentaires, formant une enveloppe à quatre membranes, ce qui leur a permis d'acquérir de nombreuses autres protéines membranaires pour le transport de molécules à l'intérieur et à l'extérieur des organites.

Nous nous intéressons aux organismes chlorophylliens du règne Chromista (les Chromophytes (grade évolutif paraphylétique regroupant tous les organismes du règne Chromista possédant de la chlorophylle-c)).

2.1 Les diatomées (*Bacillariophycées*)

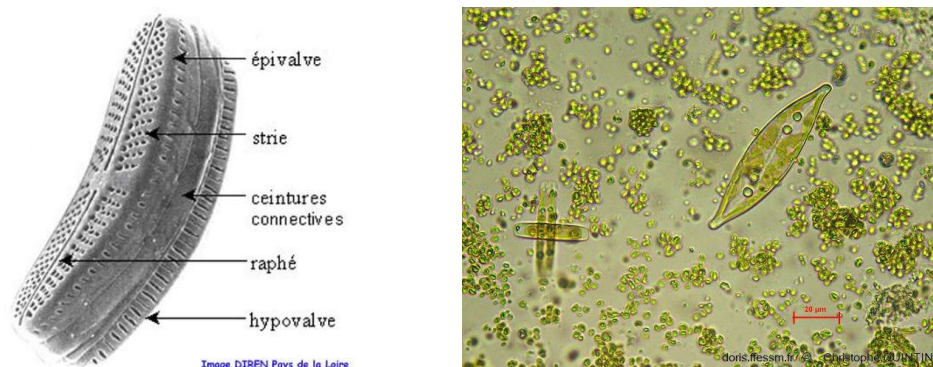


Figure 4.1: Structure d'une diatomée (à gauche) et observation microscopique (à droite).

Les diatomées sont des organismes unicellulaires : elles se présentent soit sous forme de cellules solitaires, soit en colonies, qui peuvent prendre la forme de rubans, d'éventails, de zigzags ou

d'étoiles. La taille des cellules individuelles varie de 2 à 200 micromètres. La caractéristique unique des diatomées est qu'elles sont entourées d'une paroi cellulaire constituée de silice (dioxyde de silicium hydraté), appelée frustule. Ces frustules produisent une coloration structurale, ce qui les fait désigner comme des "joyaux de la mer" et des "opales vivantes". Comme les plantes, les diatomées convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique par photosynthèse, mais leurs chloroplastes ont été acquis de différentes manières.

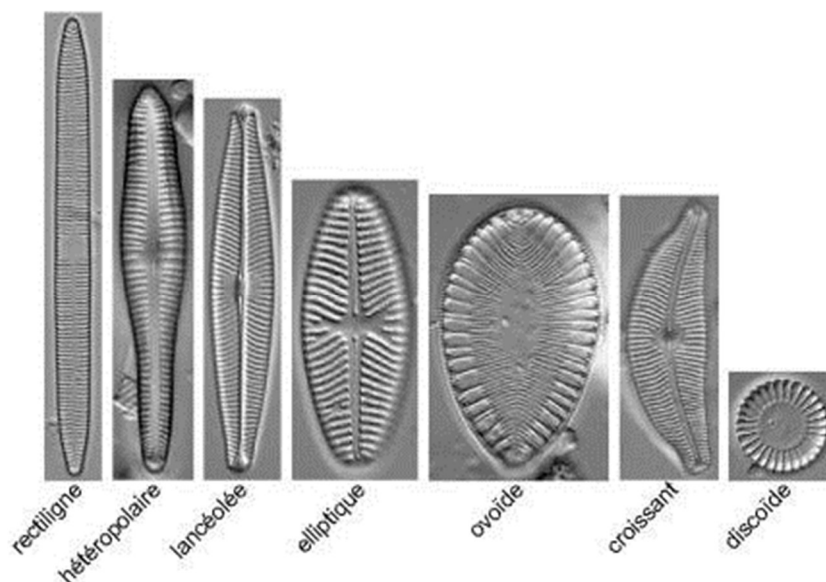


Figure 4.2: Quelques formes générales des diatomées

Leurs chloroplastes jaunâtres-brun, le site de la photosynthèse, sont typiques des hétérocontes, ayant quatre membranes cellulaires et contenant des pigments tels que la fucoxanthine, un caroténoïde. Les individus manquent généralement de flagelles, mais ils sont présents dans les gamètes mâles des diatomées centriques et présentent la structure hétéroconte habituelle, comprenant les poils (mastigonèmes) caractéristiques des autres groupes.

2.1.1 Ecologie

Présentes dans les océans, les voies navigables et les sols du monde entier. Les diatomées vivantes représentent une part significative de la biomasse terrestre : elles produisent environ 20 à 50 pour cent de l'oxygène produit sur la planète chaque année, absorbent plus de 6,7 milliards de tonnes de silicium chaque année dans les eaux où elles vivent, et constituent près de la moitié de la matière organique présente dans les océans. Les coquilles des diatomées mortes peuvent atteindre une profondeur allant jusqu'à 800 m sur le fond marin, et tout le bassin amazonien est fertilisé chaque année par 27 millions de tonnes de poussière de coquilles de diatomées transportées par les vents transatlantiques depuis le Sahara africain, une grande partie provenant de la dépression de Bodélé, qui était autrefois composée d'un système de lacs d'eau douce.

La famille des Rhopalodiaceae possède également un endosymbiote cyanobactérien appelé corps sphéroïde. Cet endosymbiote a perdu ses propriétés photosynthétiques, mais a conservé sa capacité à effectuer la fixation de l'azote, permettant à la diatomée de fixer l'azote atmosphérique. D'autres diatomées en symbiose avec des cyanobactéries fixatrices d'azote sont parmi les genres *Hemiaulus*, *Rhizosolenia* et *Chaetoceros*.

Les diatomées sont utilisées pour surveiller les conditions environnementales passées et présentes, et sont couramment utilisées dans les études sur la qualité de l'eau. La terre de diatomées (diatomite) est une collection de coquilles de diatomées présente dans la croûte terrestre. Ce sont des roches sédimentaires molles contenant de la silice qui se brisent facilement en une poudre fine et ont généralement une taille de particule de 10 à 200 μm . La terre de diatomées est utilisée à diverses fins, notamment pour la filtration de l'eau, comme abrasif doux, dans la litière pour chats et comme stabilisateur de dynamite.

2.1.2 Cycle de Vie

Les Diatomées ont un cycle de vie essentiellement diplophasique. Les cellules diploïdes se multiplient par mitose pendant plusieurs mois, voire plusieurs années. Chacune des valves de la cellule parente devient l'épithèque d'une cellule-fille, qui secrète l'hypothèque correspondante. En conséquence, l'une des deux diatomées-filles est de taille inférieure à la diatomée initiale, alors que l'autre fille est de même taille. Par conséquent, au cours des divisions successives, des Diatomées plus petites apparaissent et l'une des lignées de descendantes voit sa taille diminuer à chaque génération (figure).

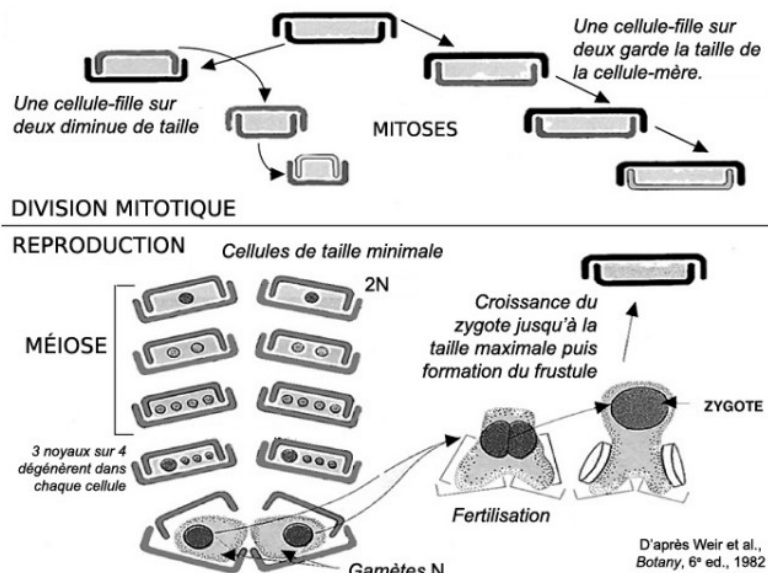


Figure 4.3: Reproduction sexuée et asexuée chez les diatomées.

Cette diminution ne dure pas indéfiniment. En dessous d'un certain seuil ($\sim 30\%$ de la taille initiale), ces cellules entrent en méiose et produisent des gamètes (le gamète mâle est la seule cellule flagellée du cycle), dont la paroi cellulaire ne comporte pas de frustule siliceux. Le zygote issu de la fusion des gamètes (auxospore) croît jusqu'à la taille maximale propre à l'espèce ou à la population avant de former un nouveau frustule (figure).

2.2 Les Dinophyta (Dinoflagellés ; Dinoflagellata)

Les dinoflagellés sont un groupe monophylétique d'eucaryotes unicellulaires constituant le phylum Dinoflagellata actuellement classées dans le règne Chromista. Les dinoflagellés sont principalement du plancton marin, mais ils sont également communs dans les habitats d'eau douce. Leurs populations varient en fonction de la température de surface de la mer, de la salinité et de la profondeur. De nombreux dinoflagellés sont photosynthétiques, mais une grande

fraction d'entre eux sont en fait mixotrophes, combinant la photosynthèse avec l'ingestion de proies (phagotrophie et myzocytose).

Certains dinoflagellés produisent des stades de repos, appelés kystes de dinoflagellés ou dinocystes, dans le cadre de leur cycle de vie ; cela se produit chez 84 des 350 espèces d'eau douce décrites et un peu plus de 10 % des espèces marines connues.

2.2.1 La morphologie

Chez beaucoup d'espèces, la cellule est protégée par une thèque constituée de plaques rigides de cellulose incrustée de silice.

Les flagelles reposent dans deux sillons superficiels : le transversal ou équatorial, appelé « cingulum », le longitudinal, appelé « sulcus » (du latin cingulum, ceinture, et sulcus, sillon) .

Le sillon équatorial sépare la cellule en une partie supérieure (l'épicône) et une partie inférieure (l'hypocone). postérieur (hyposome), et, si une thèque est présente, ces deux parties sont appelées respectivement « épithèque » et « hypothèque ».

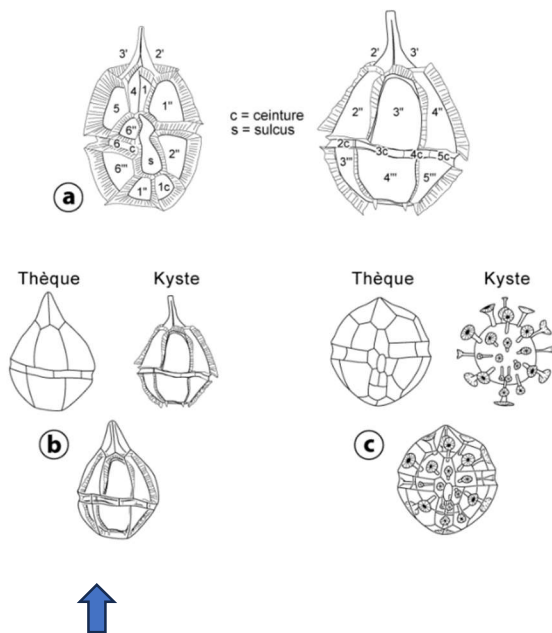


Figure 4.5: a) Schéma d'un kyste de Dinoflagellé fossile ; b-c) Paratabulation du kyste reflétant b) directement ou b) indirectement la tabulation de la thèque (d'après W.A.S. SARJEANT, adapté par E. MASURE).

2.2.2 Écologie

En termes de nombre d'espèces, les dinoflagellés sont l'un des plus grands groupes d'eucaryotes marins, bien qu'ils soient nettement moins nombreux que les diatomées. Certaines espèces sont des endosymbiontes d'animaux marins et jouent un rôle important dans la biologie des récifs coralliens. D'autres dinoflagellés sont des prédateurs non pigmentés d'autres protozoaires, et quelques formes sont parasites (par exemple, *Oodinium* et *Pfiesteria*).

Les dernières estimations suggèrent un total de 2 294 espèces de dinoflagellés vivants, comprenant des dinoflagellés marins, d'eau douce et parasitaires.

Une accumulation rapide de certains dinoflagellés peut entraîner une coloration visible de l'eau, communément appelée marée rouge (une prolifération d'algues nuisibles), qui peut provoquer

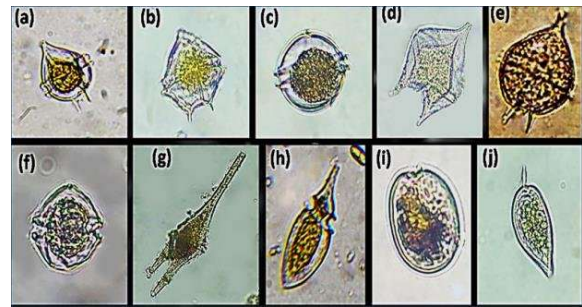


Figure 4.4: Observation microscopique : (a) *Protoperidinium granii*; (b) *P. leonis*; (c) *P. minutam*; (d) *P. claudicans*; (e) *P. cerasus*; (f) *Alexandrium fundyense*; (g) *Ceratium furca*; (h) *Oxyphysis oxytoxoides*; (i) *Prorocentrum lima* and (j) *P. gracile*

un empoisonnement par les fruits de mer si les humains consomment des fruits de mer contaminés. Certains dinoflagellés présentent également une bioluminescence, émettant principalement une lumière bleu-verte. Ainsi, certaines parties de l'océan s'illuminent la nuit en émettant une lumière bleu-verte.

2.2.3 Cycle de vie

Les dinoflagellés ont généralement un cycle de vie monogénétique haplophasique. Le cycle de vie implique généralement une reproduction asexuée par mitose. Des cycles de vie plus complexes se produisent, en particulier avec les dinoflagellés parasites.

La reproduction sexuée se produit également, bien que ce mode de reproduction ne soit connu que chez un faible pourcentage de dinoflagellés. Cela se fait par fusion de deux individus pour former un zygote (Caryogamie), qui peut rester mobile de manière typique des dinoflagellés et est alors appelé un planozygote. Ce zygote peut ensuite former au stade de repos un cyste de dinoflagellé ou dinocyste. Après (ou avant) la germination du cyste, le nouvellement éclos subit une méiose pour produire de nouvelles cellules haploïdes.

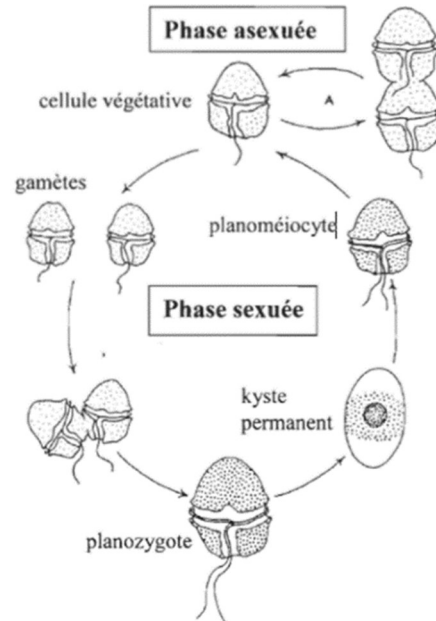


Figure 4.6: Cycle de vie simplifié des dinoflagellés (Fritz et al., 1989)

Les dinoflagellés semblent capables d'effectuer plusieurs processus de réparation de l'ADN qui peuvent traiter différents types de dommages à l'ADN.

2.3 Haptophyta

Les haptophytes, constituent une division (Règne Chromista) diversifiée d'organismes photosynthétiques unicellulaires appartenant au règne dissous des Chromalvéolates. Caractérisées par la présence d'un appendice particulier différent des flagelles, l'haptonème (appendice filiforme contenant des microtubules, dont la taille varie selon l'espèce, et qui permettrait l'adhésion à un substrat, le déplacement de particules voire la capture de proies). Les pigments principaux sont les chlorophylles a et c accompagnées aussi de xanthophylles, comme la fucoxanthine.



Figure 4.7: Exemple de forme et longueur d'haptonème (h) chez une algue de la division Haptophyta, avec certains enroulements hélicoïdaux et ici entre deux flagelles (f). Bien d'autres tailles et formes d'haptonèmes sont trouvés chez les algues de cette classe. Chez certaines espèces, il est vestigial ou inexistant.

Le nombre d'espèces actuelles est estimé à environ 500 dont beaucoup se caractérisent par des écailles de calcite (carbonate de calcium) qui recouvrent la cellule (coccolithes). De nombreuses

espèces sont tropicales, quelques espèces vivent en eau douce et de nombreux groupes fossiles existent.

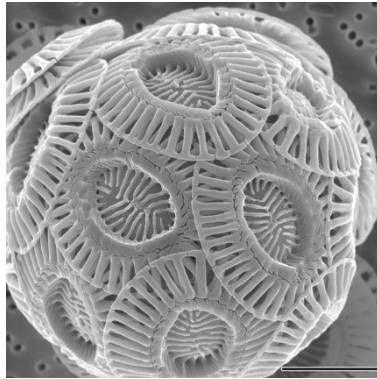


Figure 4.8: *Emiliana huxleyi* - single-celled marine phytoplankton that produce calcium carbonate scales (coccoliths). A scanning electron micrograph of a single coccolithophore cell.

2.3.1 Cycle de Vie

- ☞ Les haptophytes ont généralement un cycle de vie haplodiplophasique, alternant entre des phases haploïdes et diploïdes.
- ☞ La reproduction asexuée se produit généralement par division cellulaire mitotique.
- ☞ La reproduction sexuée implique la formation de gamètes haploïdes qui se fusionnent pour former un zygote diploïde.
- ☞ Le zygote peut ensuite subir une division cellulaire pour former des cellules haploïdes, renouvelant ainsi le cycle.

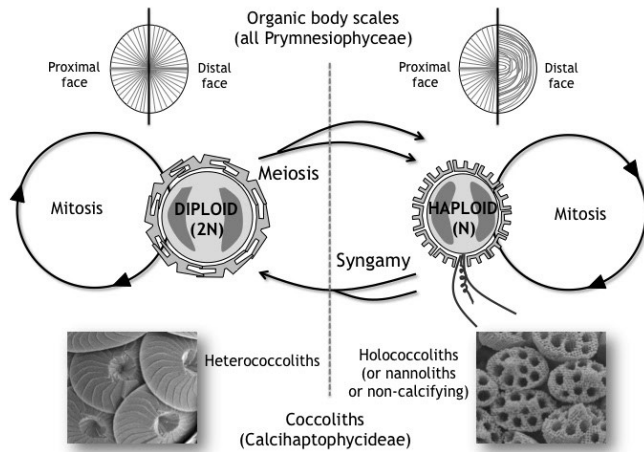


Figure 4.9: Cycle de vie d'une haptophyte.

2.4 Les phéophycées (Algues brunes)

Les algues brunes, aussi nommées Phaeophyceae ou Phéophycées, sont une classe d'algues de l'embranchement des Ochrophyta (règne des Chromista). Ce sont des algues qui utilisent comme pigment collecteur de lumière principalement de la chlorophylle c combinée à un pigment brun, la fucoxanthine. Leur taille varie de l'échelle microscopique à plusieurs dizaines de mètres.

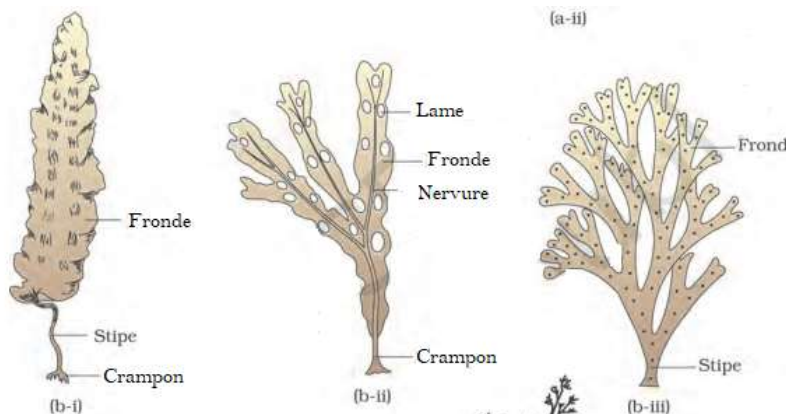


Figure 4.10: (b) Algues brunes (i) *Laminaria* (ii) *Fucus* (iii) *Dictyota*.

On désigne aussi parfois comme « algues brunes » des algues filamenteuses de couleur brune qu'il ne faut en aucun cas confondre avec les phaeophycées. Ce sont en réalité des colonies de cyanobactéries, notamment responsables de floccs bactériens (aussi dits brown slime dans les pays anglophones).

Il existe environ 1 500 espèces de Phaeophyceae. Elles sont abondantes dans les mers tempérées et froides.

2.4.1 La morphologie

La morphologie générale des phaeophycées est celle des algues, c'est-à-dire celle d'êtres vivants aquatiques utilisant la photosynthèse et incapables de se soutenir hors de l'eau. Leur couleur varie du vert olive au brun.

Comme les autres algues, les phaeophycées ne possèdent pas de tissus aussi bien différenciés que les plantes vasculaires ni de parties que l'on puisse qualifier de racines, tiges ou feuilles. L'ensemble de l'organisme développé est appelé thalle. Néanmoins les algues brunes, plus que les autres algues, ont développé des organes spécialisés (figure) :

- des crampons composés d'haptères (rhizoïdes) permettant la fixation
- des pneumatocystes (flotteurs) assurant le maintien de l'algue près de la surface
- un stipe (fausse tige), très développé chez les laminariales, présentant un début de différenciation tissulaire il permet le transfert de nutriments
- des frondes (ou lames) évoquant des feuilles



Figure 4.11: Le *Fucus vesiculosus* produit de nombreux pneumatocystes (vésicules remplies de gaz) pour augmenter sa flottabilité.

2.4.2 Ecologie des Phaeophyceae

Les algues brunes, principalement marines, occupent une variété d'habitats allant des rivages marins jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Elles sont abondantes dans les zones côtières tempérées et froides, bien qu'elles puissent également être présentes dans les eaux tropicales et subtropicales. Les algues brunes sont souvent des éléments dominants dans les écosystèmes marins, jouant un rôle crucial en tant que producteurs primaires et fournissant un habitat pour de nombreuses espèces.

Certaines algues brunes, comme le Sargassum, peuvent atteindre de grandes tailles et former des habitats distincts, tels que les forêts sous-marines de varech. Elles sont également importantes dans les estuaires, où elles supportent des variations importantes de salinité, de température et de lumière. Malgré leur prédominance dans les mers tempérées et froides, certaines algues brunes ont également réussi à coloniser les eaux douces dans des circonstances rares.

Les algues brunes sont riches en glucides et en iode, avec certaines espèces capables d'accumuler de fortes concentrations d'iodure dans l'eau de mer. Les laminariales, en particulier, sont des accumulateurs d'iode très performants et ont un impact significatif sur la chimie de

l'atmosphère. Lorsqu'elles subissent du stress, elles libèrent rapidement de grandes quantités d'iode dans l'atmosphère, jouant ainsi un rôle dans la détoxification de l'ozone et d'autres oxydants.

2.4.3 Le cycle de vie

Les algues multicellulaires présentent divers cycles de développement. Les algues brunes possèdent 2 types de sporocystes (un sporocyste est une structure végétale qui produit et contient des spores) qui suivent soit la voie de la reproduction sexuée, soit la voie de la reproduction asexuée.

- ☞ Le premier type de sporocyste, le sporocyste pluriloculaire comprend plusieurs cellules souches produisant des zoospores diploïdes ($2n$ chromosomes) qui vont par la suite germer en sporophytes. C'est la voie de la multiplication asexuée¹⁷.
- ☞ Le second type, le sporocyste uniloculaire, comprend une seule cellule souche qui, par méiose, va produire 4 zoospores haploïdes (n chromosomes) germant en gamétophytes. On est en présence ici de la voie de la reproduction sexuée¹⁷.

Dans le détail, les cycles de vie les plus complexes se caractérisent par l'alternance de générations⁸. L'alternance de générations signifie qu'il y a une succession des formes haploïdes (n) et des formes diploïdes ($2n$). Ce terme d'alternance s'applique seulement lorsqu'on est en présence de cycles dans lesquels les stades haploïdes et diploïdes sont multicellulaires. Les algues brunes comportent différents types avec des cycles de reproduction spécifiques.

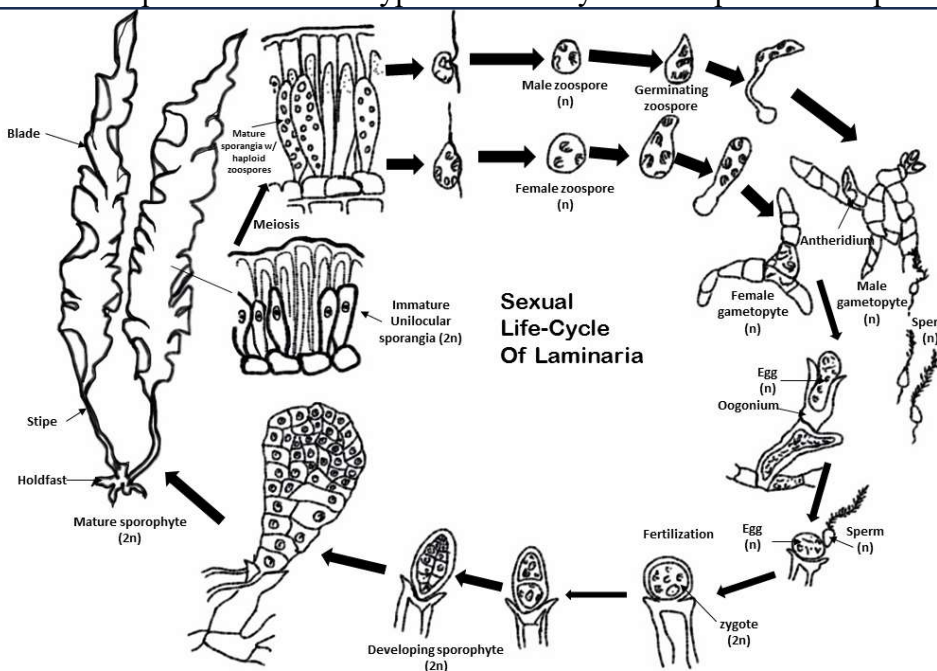


Figure 4.12: Cycle de vie d'une *Laminaria* sp.

Exemple : Cycle de vie d'une *Laminaria* sp.

- ☞ Tout d'abord, le cycle débute avec un individu diploïde ($2n$) qu'on nomme le sporophyte.
- ☞ Au début du printemps, la plus grosse partie de la croissance se termine et les cellules qui sont à la surface deviennent des sporocystes. Ce sont des structures qui produisent et qui contiennent des formes de multiplication asexuée.

- ☞ Ensuite, les sporocystes produisent des zoospores par méiose. Les zoospores sont identiques structurellement mais environ la moitié vont produire les gamétophytes mâles, et l'autre moitié les gamétophytes femelles.
- ☞ Le gamétophyte mâle libère les gamètes mâles ou anthérozoïdes et le gamétophyte femelle libère les gamètes femelles ou oosphères. Les gamètes sont des organismes haploïdes (n).
- ☞ Les oosphères restent sur le gamétophyte femelle et libèrent une substance chimique qui attirent les anthérozoïdes de la même espèce, ce qui permet d'avoir un meilleur taux de fécondation dans l'océan, puisque l'eau a tendance à les disperser et à rendre la fécondation très difficile.
- ☞ Il y a finalement fécondation de l'oosphère par le gamète mâle et formation du zygote qui est un organisme diploïde ($2n$).
- ☞ Pour terminer, le zygote va devenir un nouveau sporophyte et recommencer son cycle de vie, c'est une boucle. Dans ce cas-ci, les deux générations sont hétéromorphes, c'est-à-dire, que le sporophyte et le gamétophyte ont une structure différente et ne se ressemblent pas. D'autres algues présentent une alternance de générations isomorphes, ce qui signifie que le sporophyte et le gamétophyte semblent identiques morphologiquement, mais ne possèdent pas le même nombre de chromosomes.