

La Biologie Végétale Marine à Intechmer

Régis GALLON

2020-10-22

Table des matières

Préface	5
1 Histoire de l'utilisation des algues	7
1.1 La Préhistoire	7
1.2 L'Antiquité	7
1.3 Moyen-âge	12
1.4 XVII ^{ème} siècle : Début de l'industrialisation des algues	12
1.5 De nos jours	17
2 Usages, économie et réglementation	21
2.1 Intérêts et Usages	21
2.2 L'économie de l'algue	29
2.3 Réglementation de pêche et de récolte des végétaux marins	30
3 Classification et Diversité des algues	39
3.1 Quelques définitions	39
3.2 Qu'est-ce qu'une algue ?	40
3.3 Diversité des thallophytes	42
4 Diversité morphologique des algues	47
Quelques définitions	47
4.1 Structure du thalle	48
4.2 Les différentes ramifications	60
4.3 Les différentes fixations	61
4.4 Les particularités morphologiques	63

5 Diversité cytologique des algues	69
5.1 Introduction	69
5.2 Les plastes	69
5.3 La paroi cellulaire	74
5.4 Les flagelles et cils	76
5.5 Les organites originaux	81

Préface

Ce livre *La biologie végétale à Intechmer* est un support des cours présentiels réalisés au Cnam-Intechmer. J'ai écrit ce livre pour toi étudiant d'intechmer, pour toi étudiant d'un autre établissement ou pour toi petit curieux pour que vous puissiez avoir des notions en biologie végétale marine. **Ce livre ne se substitue pas aux cours et aux travaux pratique que je réalise en présentiel au Cnam-Intechmer.** Ce livre va évoluer au fur et à mesure des années en fonction de mes lectures et des commentaires que je recevrai.

Bonne lecture à toi.

Chapitre 1

Histoire de l'utilisation des algues

1.1 La Préhistoire

Les premières traces de l'utilisation des algues datent de la préhistoire. Dillehay et al. (2008), professeur d'anthropologie à l'Université Vanderbuilt (Tennessee, Nashville) et son équipe ont découvert à Monte Verde (Chili, *Figure 1.1*), dans d'anciens foyers et différents lieux du site, des restes de repas incluant une quarantaine de plantes, des ossements d'animaux, des mollusques d'eau douce ET **9 espèces d'algues** (*e.g. Gigartina sp., Porphyra sp., Durvillaea antarctica, Mazzaella sp, Macrocystis pyrifera,...*) (*Figure 1.2*). Ces restes ont été très bien conservés car les sols sont acides et ont limité la prolifération bactérienne. Ces algues sont d'excellentes sources d'iode, de fer, de zinc, de protéines, d'hormones et d'un grand panel d'éléments traces (cobalt, cuivre, bore). De plus, elles ont un effet bénéfique dans l'assimilation du calcium par les os, l'amélioration des capacités de l'organisme à lutter contre les infections.

D'autres traces d'utilisation des algues ont été découvertes sur le continent eurasien et datées de la période mésolithique (-7000 ans). Il a été montré par analyse isotopique que les peuples vivants sur le littoral récoltaient les algues échouées et nourrissaient leurs bétails (moutons) (Balasse et al., 2005).

1.2 L'Antiquité

Une trace écrite de l'utilisation des algues est décrite dans le "Classique de la médecine par les plantes" ou "Shennong bencaojing" (*Figure 1.3*) traitant des drogues végétales, animales et minérales (plus de 300 drogues sont décrites).



FIGURE 1.1 – Localisation du site archéologique de Monte Verde (Chili)



Porphyra spp.



Gigartina sp.



Mazzaella sp.



Sarcothalia pyrifera

FIGURE 1.2 – Espèces d’algues retrouvées dans les restes des foyers du site archéologique de Monte Verde (Chili)

Son origine est attribué à l'empereur Shennong qui vécu aux environs de -2800 ans. Toutefois, l'original du texte est perdu et l'histoire de sa reconstitution est un peu compliquée. L'empereur Shennong (*Figure 1.3*) est considéré comme le père des pharmaciens et des médecins. Il testa toutes les plantes pour connaître leurs propriétés et ordonna au peuple de prendre connaissance des espèces qu'on devait préserver. Certaines versions lui prétendent le pouvoir divin de mourir et revivre plusieurs fois au hasard de ses essais, alors que d'autres supposent que son action finit par lui coûter la vie en accentuant ainsi son esprit de sacrifice.



FIGURE 1.3 – Shennong goûtant une herbe médicinale ; les protubérances sur son crâne rappellent qu'on lui prêtait une tête de bovidé, la collerette de feuilles son rôle d'herboriste (www.art.com)

Toujours en Asie, des écrits datant du VI^{ème} avt.J.-C. montre que les algues furent des aliments réservés pour les hauts dignitaires (rois et invités distingués). > Sze Teu écrit :“Certaines algues sont un délice pour les hôtes les plus honorés, et pour le Roi lui-même.”

Au VII^{ème} apr. J.-C. au moins une douzaine d'algues était cultivée dont les trois plus communes la *Nori* (pour faire des sushis), le *Kombu* (dans les soupes), le *Wakame* (dans les soupes et les salades) (*Figure 1.4*).

Au V^{ème} siècle, Palladius auteur latin écrivit dans son traité sur l'agriculture ¹ que les algues produisent une fumure de qualité très favorable à l'amendement des sols agricoles.

¹. Son traité est rassemblé avec d'autres traités portant sur l'agriculture et la vie rurale dans le *De re rustica*

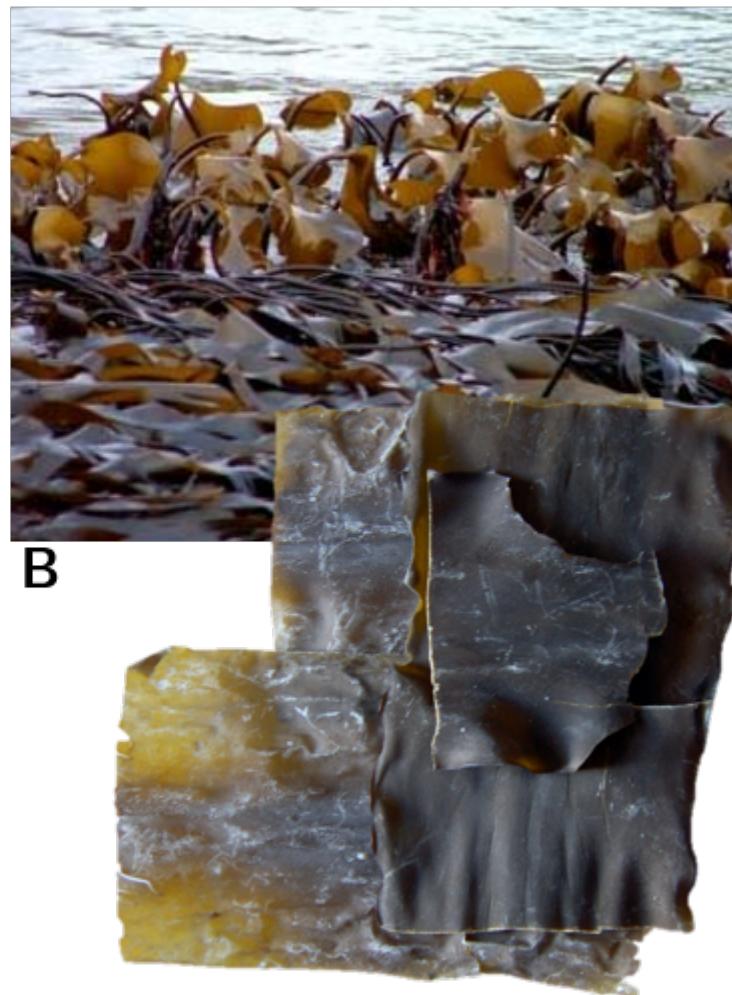


FIGURE 1.4 – A. Préparation des feuilles de Nori pour les sushis ; B. Feuilles de Kombu ; C. Feuilles de Wakame

1.3 Moyen-âge

Au Moyen-Âge, les algues représentent un usage traditionnel pour les populations côtières et insulaires. Elles sont utilisées dans l'agriculture comme alimentation pour le bétail et l'enrichissement des sols, dans l'usage domestique comme combustible pour le chauffage et l'alimentation humaine direct en temps de famine.

1.4 XVII^{ème} siècle : Début de l'industrialisation des algues

1.4.1 L'industrie du verre (17-18^{ème} siècle)

L'industrialisation des algues commence en Normandie par l'industrie du verre. En effet, les verriers utilisaient les cendres des algues récoltées sur l'estran pour abaisser le point de fusion de la silice facilitant la production de verre. Les algues étaient d'autant plus utilisées que le coût du bois était très élevé. Le fort intérêt économique des algues obligea Jean-Baptiste Colbert, ministre des finances de Louis XIV, de réglementer la récolte des algues : **Edit de Colbert (1681)**.

Titre X de l'ordonnance : Concernant la récolte des algues

- Article I - Les habitants des paroisses côtières se réuniront le premier dimanche du mois de janvier de chaque année, suivant la messe de la paroisse, afin de *déterminer les dates d'ouverture et de clôture de la récolte annuelle des algues trouvées dans la mer attenante à leur territoire*.
- Article II - L'assemblée sera convoquée par les gardes de l'église ou les trésoriers de la paroisse, et la décision de l'assemblée sera affichée à la porte principale de l'église. Ne pas le faire entraînera une amende de 10 livres.
- Article III - Il est, *interdit aux habitants de couper les algues pendant la nuit et à des moments autres que ceux déterminés par la communauté, de couper les algues ailleurs que sur la longueur de la côte de leur paroisse ou de le transporter vers d'autres territoires*. L'échec entraînant une amende de 50 livres et la confiscation de leurs chevaux et harnais.
- Article IV - Il est interdit à tous les seigneurs des propriétés côtières de s'approprier toute portion des rochers où poussent les algues, pour empêcher leurs vassaux de la recueillir pendant la saison d'ouverture, d'exiger quoi que ce soit d'eux en échange du droit de le recueillir , Ou pour permettre aux non-résidents de la paroisse de participer, l'échec entraînant une punition pour détournement.
- Article V - *Le droit de rassembler toutes les algues jetées sur la côte par les marées, et de les transporter là où elles le veulent, est accordé à tous*.

1.4. XVII^{ÈME} SIÈCLE : DÉBUT DE L'INDUSTRIALISATION DES ALGUES13

L'extraction de la soude commençait par le ramassage des algues échouées sur l'estran et par le séchage des algues en tas en haut de l'estran. Le tas d'algues devait être suffisamment compacte pour empêcher l'eau de pénétrer mais pas trop pour laisser l'air circuler pour le séchage. Une fois les algues suffisamment sèches, une fosse de cinq à six pieds de long et de deux pieds de large est creusée (*Figure 1.5*). Au fond de la fosse sont posés des branchages pour le feu et les algues sont posés successivement pour éviter une combustion trop rapide. La soude coule au fond de la fosse. Le feu éteint la soude refroidit en 2-3 jours formant des blocs très durs. [Plus d'informations](#)

L'industrie du verre pris énormément d'importance sous Louis XIV pour lutter contre l'hégémonie de l'industrie du verre vénitienne favorisant le prestige du roi et renforçant l'économie du pays. La Manufacture Royale des Glaces et des Miroirs (*Figure 1.6*) fut créée à Paris pour fournir des glaces à la Galerie des glaces. Des verriers vénitiens furent attirés en France contre argent et femmes, mais ils ne partageaient pas leurs savoirs et préféraient profiter de la distraction parisienne. Ainsi en 1667, la fabrication fut transférée à *La Glacerie* (Cherbourg). L'intégralité des miroirs de la galerie des Glaces (château de Versailles) a été fabriquée à *La Glacerie* entre 1683 et 1684 (*Figure 1.7*). À la fin du règne de Louis XIV, l'industrie miroitière avec à sa tête, la Manufacture royale de glaces de miroirs, exporte des glaces dans toute l'Europe pour un équivalent de 300 000 à 400 000 livres or par an. Le monopole vénitien est remplacé par le monopole français.

1.4.2 La production d'iode (19^{ème} siècle)

La découverte de l'iode en 1811 est attribuée à Bernard Courtois (1777-1838) salpétrier et chimiste français² vers la fin du 19^{ème} siècle (Guitard, 1922). Bernard Courtois travaillait dans une salpêtrière, *i.e.* lieu où l'on produit du salpêtre (nitrate de potassium) composant essentiel de la poudre à canon. La production de salpêtre devenant très chère en raison du coût du bois qui s'éleva sous la pression des industries consommatrice de bois et sous l'effet d'un blocus continental interdisant l'importation, Bernard Courtois eut l'idée d'utiliser les cendres d'algues pour permettre la transformation du nitrate de calcium et nitrate de potassium. La production de salpêtre entraîne la production d'un revêtement visqueux qui doit être nettoyé à l'acide. Un jour Bernard Courtois utilisa une solution d'acide plus concentrée et voit ses cuves se remplir de fumées violettes qui se cristallisent au contact des parois froides. Il réalise quelques études mais n'approfondira pas, il découvrit néanmoins que l'iode avec un fort pouvoir corrosif. Ce fut Louis-Joseph Gay-Lussac qui donna son nom à l'iode (du grec iodes qui veut dire violet). François Benoît Tissier, élève de Nicolas Clément (confrère chimiste de Bernard Courtois), développe un procédé industriel de fabrication de l'iode et l'adapte à la production de soude raffinée de l'usine Coudurier à Cherbourg (*Figure 1.8*). Il arrive à obtenir une production annuelle de 400kg

2. <https://plozevet.hypotheses.org/2905>



A



B

FIGURE 1.5 – A. Tas de goémon sec devant alimenter un four à soude ; B. Fours à Goémon le long du littoral breton utilisés pour le brûlage des algues ; C. Pains de soude

1.4. XVII^{ÈME} SIÈCLE : DÉBUT DE L'INDUSTRIALISATION DES ALGUES15



FIGURE 1.6 – Devanture de la Manufacture Royale des Glaces et des Miroirs



FIGURE 1.7 – Galerie des glaces du château de Versailles

en 1825. Apprenant qu'en Bretagne les algues étaient plus abondantes, il entre chez "Guilhem" grande fabrique de soude dans le Finistère et augmente la production d'iode. La production de l'iode à base d'algue prendra fin vers la fin du XX^{ème} siècle avec l'essor de la chimie de synthèse.

$$\begin{aligned} 5-6 \text{ tonnes d'algues fraîches} &\Rightarrow 1 \text{ tonnes d'algues séchées} \Rightarrow 200 \text{ kg} \\ \text{de soude} &\Rightarrow 3 \text{ kg d'iode} \end{aligned}$$



FIGURE 1.8 – L'usine Tissier vers 1910

En parallèle de la production industrielle, on découvre des propriétés thérapeutiques de l'iode. Le pouvoir corrosif de l'iode fait que c'est un puissant anti-septique (seul désinfectant connu à l'époque). C'est également un oligo-élément indispensable dans l'alimentation humaine car il assure le bon fonctionnement de la glande thyroïdienne siège de la régulation hormonale.

Encore actuellement, la carence en iode est un problème de santé mondiale, plus d'une 1/4 de la population mondiale souffre de carence en iode en principalement en Asie, Afrique, Amérique de sud,... (*Figure 1.9*). Cela peut s'exprimer par l'apparition d'un goitre chez certaines populations (goitre endémique des population des hauts plateaux de la Tanzanie), arriération mentale, altérations de la reproduction, désordres mentaux et psychiques.



FIGURE 1.9 – Localisation des zones où les habitants sont carencés en iodine

1.4.3 La production d'hydrocolloïdes (fin du 19^{ème} siècle)

Hydrocolloïdes : matière constituée de nano et microparticules (2 - 200 nm) dispersées dans un liquide ou un gel formant une solution plus ou moins épaisse. Les principaux colloïdes extraits des algues sont des polysaccharides.

Dans les années 1800, des extraits de *Chondrus crispus* (Irish moss) contenant des carraghénanes sont utilisés comme agent épaississant. Dans les années 1930, c'est au tour des alginates extraits des algues brunes d'être vendu comme gélifiant et épaississant. Cette filière permis aux goémoniers de continuer leur activité de récolte à la fin des industries du verre et de l'iode. Après la 2^{nde} guerre mondiale, il y a eu un essor rapide de l'utilisation des extraits d'algues dans l'agroalimentaire et la pharmaceutique. Cette essor fut si rapide que la production fut limitée par la disponibilité des ressources naturelles. Ainsi, dès les années 70, de nombreuses industries et institutions de recherches se sont intéressées aux cycles de vie des algues pour pouvoir maîtriser la culture et approvisionner en continu la production d'hydrocolloïde.

1.5 De nos jours

La plus grande consommation d'algue se concentre entre la Chine, le Japon et la Corée. En moyenne, un asiatique mange 5kg d'algue/an. Comme nous l'avons vu précédemment la consommation d'algue en Asie à débuter très tôt, c'est devenue une tradition. Des chercheurs de l'Université de Pierre et Marie Curie

et de la station biologique de Roscoff ont montré qu'au fil du temps, les japonais ont acquis la capacité de dégrader la porphyrane (sucre de la paroi des algues rouges) par transfert de gène entre des bactéries marines vers des certaines bactéries peuplant les intestins des Japonais ([Hehemann et al., 2010](#)). Toutefois en Europe la consommation est indirect, on retrouve des extraits d'algues dans les aliments, les boissons, le textiles,... . Nous aborderons cet aspect dans le cours sur la biochimie des algues.



FIGURE 1.10 – Les algues se retrouvent cachées dans notre alimentation

Chapitre 2

Usages, économie et réglementation

2.1 Intérêts et Usages

A l'échelle mondiale, les algues sont principalement destinées à l'alimentation humaine (85%), 14% sont utilisées pour extraire des hydrocolloïdes (alginates, agar agar et carraghénanes). 1% de la production mondiale alimente l'industrie pharmaceutique, la cosmétique, la bioépuration et l'agriculture en amendement (*Figure 2.1*).

2.1.1 L'alimentation humaine

En France, c'est le Conseil Supérieur Hygiène Publique qui autorise la commercialisation d'aliment. L'algue n'étant pas un aliment traditionnel, pour être consommée elle doit bénéficier d'une autorisation. Les algues comestibles doivent avoir des teneurs d'iode, de métaux lourds inférieurs aux normes définies par l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments.

Voici les normes définies par l'AFSSA (2007) :

TABLE 2.1 : Teneurs maximales en métaux lourds et en iode pour l'autorisation de consommation (Saisine AFSSA n° 2007-SA-0007)

Concentration en mg.kg ⁻¹ d'algues sèches	
Arsenic minéral	3
Cadmium	0.5
Mercure	0.1

Concentration en mg.kg ⁻¹ d'algues sèches	
Plomb	5
Etain	5
Iode	2000

A l'heure actuelle en France, 24 algues dont 3 microalgues sont utilisées comme légumes ou condiments.

TABLE 2.2 : Algues autorisées pour l'alimentation humaine par le CSHP

Nom scientifique	Nom vernaculaire
Algues brunes (8)	
- <i>Ascophyllum nodosum</i>	Ascophylle
- <i>Fucus serratus + vesiculosus</i>	Fucus
- <i>Himanthalia elongata</i>	Spaghetti de mer
- <i>Undaria pinnatifida</i>	Wakamé
- <i>Laminaria digitata + japonica</i>	Kombu
- <i>Saccharina latissima</i>	Kombu royal
- <i>Alaria esculenta</i>	Wakamé d'Atlantique
Algues rouges (11)	
- <i>Palmaria palmata</i>	Dulse
- <i>Porphyra umbilicalis</i>	Nori
- <i>Porphyra tenera</i>	Nori
- <i>Porphyra yezoensis</i>	Nori
- <i>Porphyra dioica</i>	Nori
- <i>Porphyra purpurea</i>	Nori
- <i>Porphyra laciniata</i>	Nori
- <i>Porphyra leucosticta</i>	Nori
- <i>Chondrus crispus</i>	Pioca
- <i>Gracilaria verrucosa</i>	Ogo-nori
- <i>Phymatolithon calcareum</i>	Maërl
Algues vertes (2)	
- <i>Ulva sp.</i>	Laitue de mer
- <i>Enteromorpha sp.</i>	Aonori
Microalgues (3)	
- <i>Arthrospina sp.</i>	Spiruline
- <i>Odontella aurita</i>	
- <i>Chlorella sp.</i>	Chlorelle

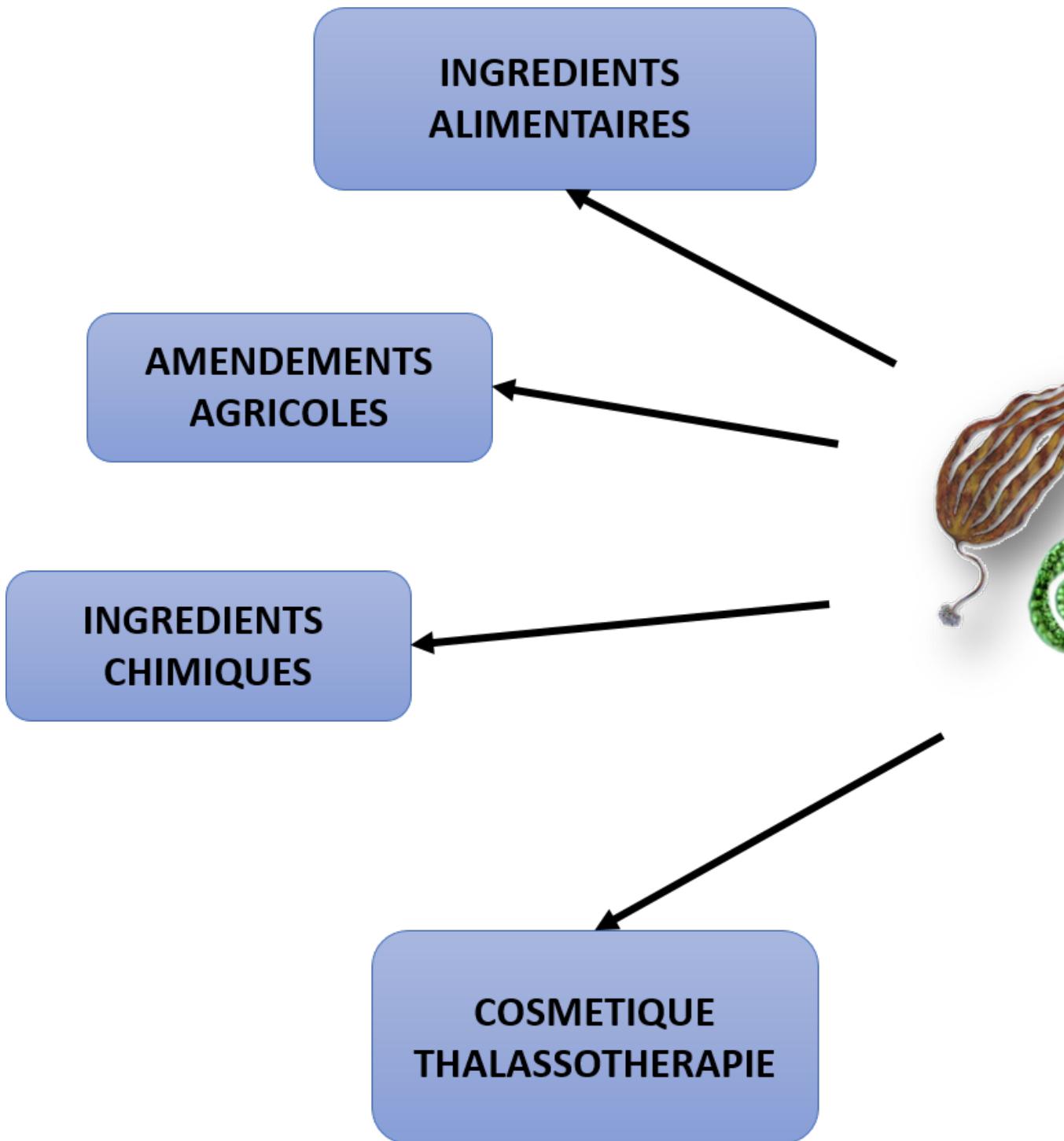


FIGURE 2.1 – Domaines d’application des micro et macroalgues à l’échelle mondiale.

2.1.2 Agriculture

Les algues peuvent être utilisées comme engrais et amendement des sols. Pour maintenir une production des sols, il est indispensable de contrôler l'acidité. La concentration des ions aluminium dans la solution du sol croît fortement avec la baisse du pH et ceux-ci deviennent toxiques à partir d'un certain seuil de pH eau, toujours inférieur à 5,5 mais très variable selon la nature du sol et l'espèce cultivée. Ces composés provoquent une forte réduction de la croissance des racines qui s'épaissent, brunissent et se ramifient peu. Elles ne sont plus alors capables d'assurer convenablement l'alimentation minérale et hydrique des plantes. Le *Maërl* est une algue calcaire qui était fréquemment utilisée pour chauler les sols et ainsi augmenter le pH des sols (*Figure 2.2*). Néanmoins, les bancs de maërl constituent des habitats remarquables Natura 2000 accueillant une richesse importante de crustacés, d'annélides et de mollusques. A l'heure actuelle, l'exploitation des gisements de maërl a fortement impacté ces habitats et par conséquent l'extraction est interdite pour mettre à la ressource de se renouveler.



FIGURE 2.2 – Maërl dans son habitat naturel formant des bancs. Seule la surface du banc est composée d'algues vivantes.

Certaines substances extraites des algues peuvent servir d'éliciteurs, *i.e.* des substances qui déclenchent alors chez la plante toute une série de réactions cel-

lulaires, avec notamment la production de molécules destinées à renforcer la résistance des parois, mais aussi d'antibiotiques végétaux tels que des phytoalexines ou des protéines de défense. La laminarine qui est un polysaccharide de réserve dans les algues brunes a une structure qui se rapproche d'éliciteurs glucaniques fongiques. Son utilisation est certifiée sur le blé contre l'oïdium, le piétin-verse et la septoriose.¹

2.1.3 Zootechnologie

Des études *in vitro* et *in vivo* ont montré que les polysaccharides sulfatés (PS) des macroalgues présentent un large panel d'activités biologiques (anticoagulante, antimicrobienne, antitumorale, immunomodulatrice,...). Olmix Group, par exemple, a extrait des (PS) à partir de l'algue verte *Ulva armoricana* et a montré que ces extraits stimulaient la production de médiateurs de l'immunité intestinale par l'activation du récepteur cellulaire intestinal TLR4 et ferait intervenir la voie de signalisation PI3K/Akt ainsi que le facteur de transcription NF- κ B.(Berri et al., 2016, Berri et al. (2017))

2.1.4 Bio-carburant et Bio-plastique

Les biocarburants sont fabriqués à partir de microalgues, certaines espèces peuvent être cultivées en mode hétérotrophe à l'abri de la lumière et avec une alimentation en sucres. Cultivées dans certaines conditions (*e.g.* carence en azote) elles peuvent se mettre à produire et accumuler des lipides, principalement des triglycérides, dont la teneur peut atteindre jusqu'à 80 % de la matière sèche. Les algues sont récoltées régulièrement et l'huile est extraite selon différents méthodes (centrifugation, traitement au solvant, lyse thermique, etc.). Ensuite deux types de conversion de l'huile en biocarburant sont mis en oeuvre (*Figure 2.3*) :

- *La transestérification*, qui fait réagir l'huile algale avec du méthanol ou de l'éthanol, produit un ester d'huile algale ou biodiesel, tout à fait comparable à celui obtenu à partir des autres types d'huiles végétales. Il peut être mélangé au gazole en proportion limitée à une 10^{aime}% de volume.
- *L'hydrogénéation catalytique* qui fait réagir l'huile en présence d'hydrogène, suivie d'un hydrocraquage, produit des hydrocarbures qui peuvent être incorporés en quantité importante au gazole ou au kérosène.

La production de carburant à partir de microalgues reste toutefois coûteuse, *le prix actuel est de 5€/L.*

Depuis quelques années, les bioplastiques se démocratisent de plus en plus car ils sont biodégradables. Un ingénieur a réussi à faire de même avec des algues

1. <http://www.goemar.com/fr/historique-activites>

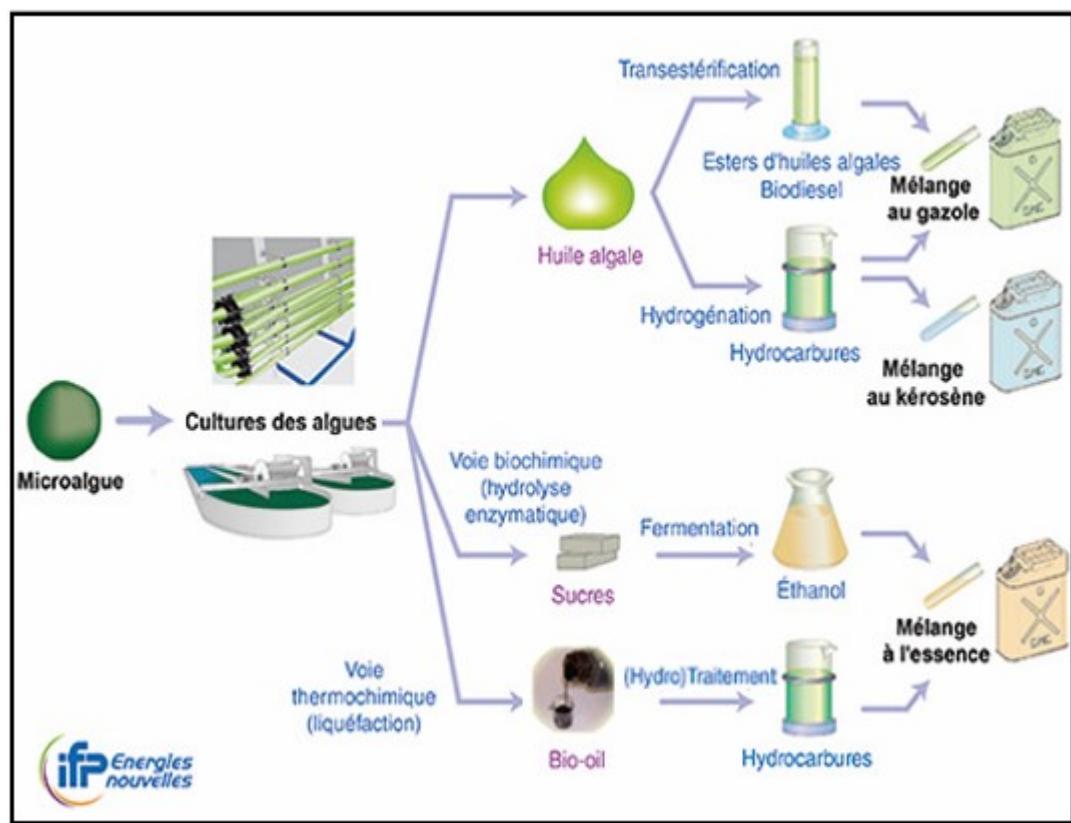


FIGURE 2.3 – Processus de production de biocarburant à partir de microalgues

(exclusivement des algues brunes) en créant “algopack” : « La matière se dégrade en 12 semaines en terre. Cela permet de retrouver l'une des fonctions historiques de l'algue : c'est un fertilisant naturel » (*Figure 2.4*). La tonne de granulés d'Algopack est vendue 1 200 €, lorsqu'une tonne de PVC ou PET est vendue 1 000 € et une tonne de polyéthylène ou polypropylène environ 1 300 €. Les algues utilisées pour fabriquer ces produits sont des algues brunes.



FIGURE 2.4 – Bioplastiques produits à partir d'algues brunes

2.1.5 Cosmétique et santé humaine

Beaucoup de métabolites secondaires issus des algues sont connus pour être bénéfique pour la peau (protection anti-UV, anti-rides, raffermissant,...). L'effet ‘anti-âge’ est du à la présence de composés anti-oxydants (caroténoïdes). Le nombre de produits cosmétiques utilisant des extraits d'algues augmentent de jours en jours car ils utilisent des produits naturels et non issu de la pétro-chimie (*Ariede et al., 2017*) (*Figure 2.5*)

Algae	Form of use in the formulation	Extraction Solvent	Percentage in formulation (%)	Galenic form
Genus <i>Porphyra</i> and <i>Wakame</i>				
<i>Spirulina</i> sp.	Protein and peptides (dry powder)	Organic solvents	0.01–10	Skin lotion Milky lotion Skin cream Body soap Shampoo Rinse Bath agents
<i>Chlorella</i> sp.				Emulsion Lotion Powder product
Coccoid and Filamentous	Extract	—	0.1–2.5	Cream Emulsion Aqueous Emulsion-Gel
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Extract	Isopropanol or polar Solvent (Ethanol) with later use of Aqueous-Ethanolic and Heptane	0.1–10	Liquid Crystal Cream Hydrogel Hair Mask
<i>Fucus vesiculosus</i>	Extract	Polar solvents	0.1–10	Gel, Emulsion (Water/Oil and Oil/Water)
<i>Chlamydocapsa</i> sp.	Lipsomal Extract	—	3.0	Cream Sun Creams and lotions, Shampoo lipsticks
Genus <i>Spirulina</i>, <i>Donaliella</i>, <i>Hematococcus</i>, <i>Nannochloropsis</i>, <i>Tetraselmis</i>	Cell algae	—	1.0–20	Cream Sun Creams and lotions, Shampoo lipsticks
<i>Cyanobacteria</i>	Extract	Methanol and acetone	0.001–25	Cream, soap, lotion, Shampoo, facial wash
<i>Chlorogloeopsis</i> spp.	Extract	Water	0.05–20	
Genus <i>Prototheca</i>, <i>auxenochlorella</i>, <i>Chlorella</i> or <i>Parachlorella</i>	Cell algae or Extract	Water	1.0–90	

FIGURE 2.5 – Exemples d'application des algues [@arieude2017]

2.2 L'économie de l'algue

2.2.1 Le marché mondial

Comme nous l'avons vu précédemment, l'industrie de la transformation des algues a débuté après la seconde guerre mondiale et s'est fortement accentuée dans les années 70. A cette époque, le tonnage d'algues récoltées et cultivées était très proche (*Figure 2.6*). En 40 ans, la production d'algues a augmenté en moyenne de 29% par an, on remarque une nette augmentation de la production à partir de 1990. Aujourd'hui, la production d'algues s'élève à plus de 23 millions de tonnes dont 95% proviennent des fermes d'algocultures. Cette exploitation d'algue concerne environ 35 pays de l'hémisphère nord et sud, de zone tempérée ou tropicale : Chine, Japon, France, Norvège, Brésil, Chili,

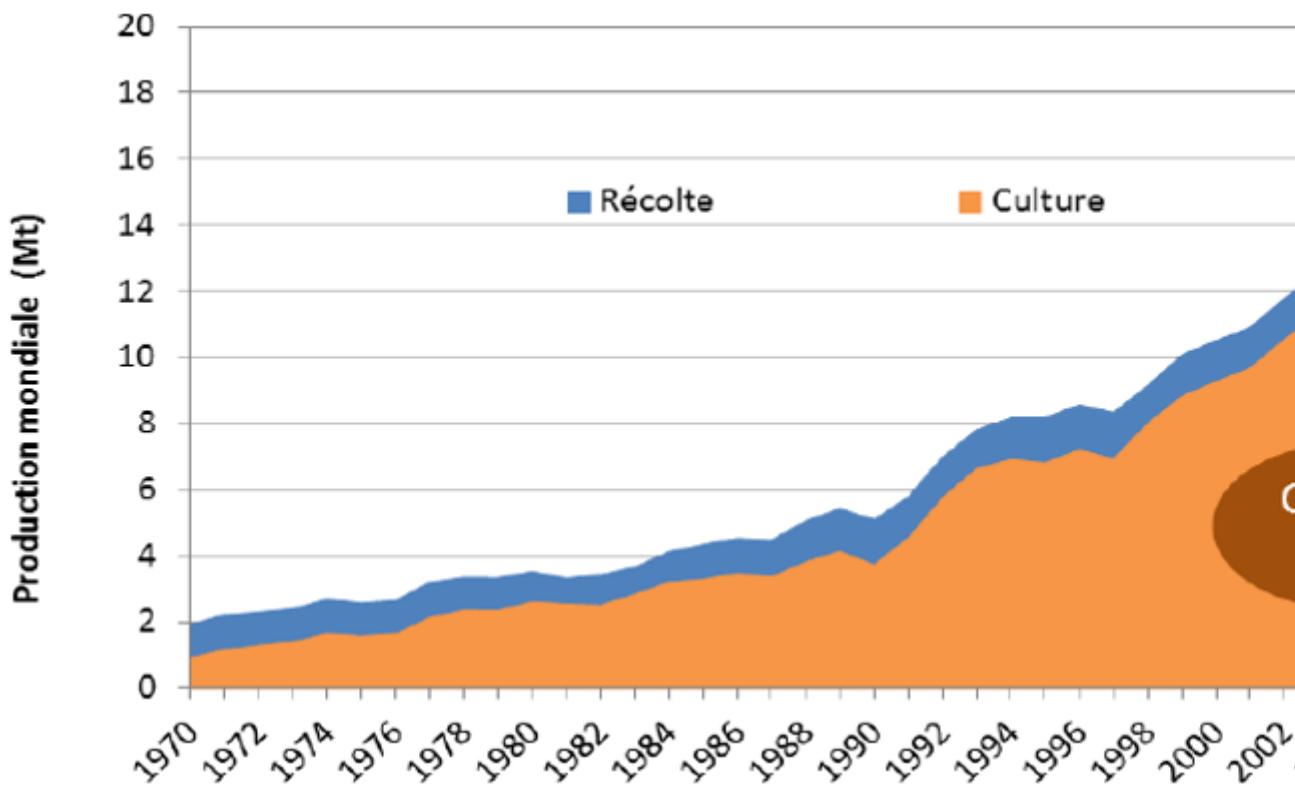


FIGURE 2.6 – Evolution de la production mondiale d'algues entre 1970 et 2010

La production mondiale est dominée par les pays asiatiques : Chine (52%), Indonésie (26%), Philippines (7%), Corée (7%) et Japon (3%). Dans ces pays, les

algues sont principalement cultivés à des fins d'alimentation humaine. L'Europe quant à elle participe à seulement 1% de la production mondiale soit 250 000t. 57% de la production européenne provient de la Norvège, 14% de France, 12% d'Irlande et 7% d'Islande.

2.2.2 Le marché français

La France se situe au 10^{ème} rang mondial et est le 2^{ème} producteur européen. Son schéma de production est au antipode du schéma mondial. En effet, 99% de la production d'algues provient de la récolte et non de la culture. 75% de la production française est extraite par des goémoniers, navires spécialisés dans la récolte des laminaires (12 tonnes /jour) et 25% est extraite manuellement (algues de rive).

L'économie est également opposée à l'économie mondiale de l'algue, 99% des produits à base d'algues sont à destination de l'agro-industrie (agroalimentaire et agro-fourniture), seulement 1% est orienté vers l'alimentation humaine directe. En effet 75% des algues récoltées sont des laminaires, algues riches en alginat (hydrocolloïde). Ces alginates sont très utilisés dans l'agroalimentaire comme agent épaississant. Ainsi les activités économiques liées aux macroalgues sont localisées principalement en Bretagne. La matière première est principalement orientée vers "la santé et le bien être" (45 entreprises), puis vers l'agrofourniture et l'alimentation (resp. 25 entreprises). Seule une dizaine d'entreprises transforment les macroalgues pour l'agroalimentaire, la chimie et la microbiologie (*Figure 2.9*).

L'engouement pour les algues tant alimentaires que non alimentaires se traduit par la multiplication du nombre de projets et initiatives visant à développer et à structurer la filière :

- NetAlgae
- Normand'Algues
- CEVA
- Idealg
- AlgMarBio

2.3 Règlementation de pêche et de récolte des végétaux marins

En France, la récolte des algues est réglementée par le décret ministériel du 11 août 1990 (N°90/719)² et complétée par des arrêtés préfectoraux pour les spécificités régionales. Il définit :

2. Décret n°90-719 du 9 août 1990 abrogé le 1 janvier 2015

*2.3. RÈGLEMENTATION DE PÊCHE ET DE RÉCOLTE DES VÉGÉTAUX MARINS*³¹



FIGURE 2.7 – Récolte manuel des algues de rive sous à une licence d'exploitation



FIGURE 2.8 – Goëmonier récoltant les laminaires

2.3. RÈGLEMENTATION DE PÊCHE ET DE RÉCOLTE DES VÉGÉTAUX MARINS33

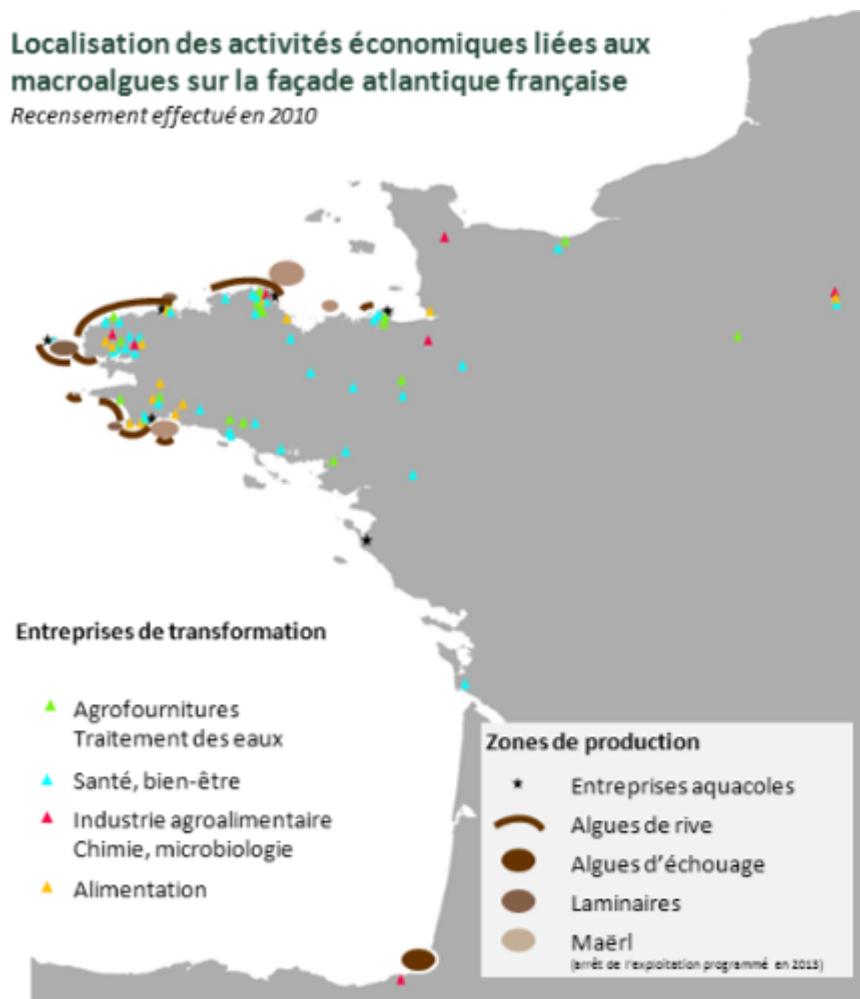


FIGURE 2.9 – Localisation des activités économiques liées aux algues (Programme NetAlgae)

- les espèces d’algues autorisées à la récolte
- les conditions de récoltes (engins, saisons, zones)
- les quantités (quotas/espèce/zone)
- les sanctions pour tous manquements à ce règlement (amende de 5^{ème} classe)

Ce texte de loi regroupe sous le terme **Goémons** tous les végétaux marins, algues, varech et plantes marines.

2.3.1 Le goémon de rive

“Algues fixées sur l’estran, récoltées à pied sur le rivage ou sur îlots inhabités”

Il est interdit de récolter ces algues sur des ouvrages maritimes (quais, berges, canaux) pour des raisons de sécurité pour les récoltants mais également pour des raisons sanitaires. Il est interdit de d’arracher le goémon, la récolte doit être réalisée au moyen d’une fauille pour permettre à la ressource de se renouveler. Il est également obligatoire de déclarer les algues récoltées pour suivre les stocks naturelles et éviter une sur-exploitation. La récolte du goémon de rive est autorisée tout au long de l’année à l’exception du *Chondrus crispus* dont la période de récolte se déroule du 1^{er} mai au 30 octobre.

- algues rouges : *Chondrus crispus*, *Gracilaria gracilis*, *Palmaria palmata*, *Porphyra sp*
- algues brunes : *Ascophyllum nodosum*, *Fucus serratus*, *Fucus vesiculosus*, *Himanthalia elongata*
- algues vertes : *Ulva sp*, *Ulva (Enteromorpha) sp*

Le guide “Récolte des algues de rive : Guide des bonnes pratiques”³ (*Figure 2.10*), rédigé par le Parc Naturel Marin d’Iroise en collaboration avec le CEVA,..., est à destination des particuliers et des professionnels pour expliquer les bonnes pratiques de récoltes des algues pour préserver les ressources. Il contient les règles de bonnes pratiques et des fiches pour chaque espèce autorisée à la récolte.

2.3.2 Le goémon de fond

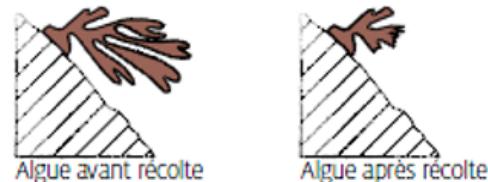
“Algues poussant en zone toujours immergée (algues de fond), non accessible à pied aux basses mers des marées d’équinoxes”

La récolte du goémon de fond implique d’utiliser des navires et des embarcations spécialisées qui sont déclarés au registre maritime (*Figure 2.11*). Les personnes qui pratiquent la pêche des goémons poussant en mer en action de nage ou de

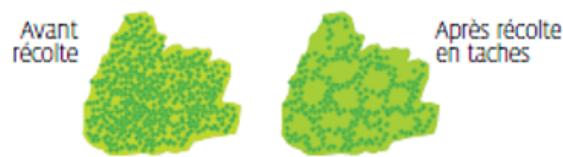
3. Lien guide de récolte des algues de rive

POUR ASSURER LE RENOUVELLEMENT DES CHAMPS, ET RÉCOLTER DES ALGUES DE BONNE QUALITÉ, CERTAINES PRATIQUES SONT À ADOPTER, D'AUTRES À ÉVITER...

Ne pas totalement récolter chaque algue : Laisser le crampon et un morceau de chaque algue accroché à son support, cela permet la repousse de l'algue.



Ne pas totalement récolter chaque champ : laisser des algues en place pour assurer leur reproduction ce qui permet la repousse de nouvelles algues pour l'année suivante. Comme les cellules de la reproduction des algues ne peuvent se disperser qu'à quelques mètres, en récoltant par petites taches, on assure ainsi les chances d'une recolonisation les années suivantes par la même espèce.



Pour les fucales (*Ascophyllum sp.* et *Fucus spp.*), laisser au moins un rameau en place pour chaque algue coupée afin de permettre la croissance par son extrémité. Elle poussera ainsi plus rapidement et formera de nouvelles cellules reproductrices.



Couper les algues au couteau plutôt qu'à la fauille ce qui permet de mieux contrôler la longueur de l'algue laissée sur le rocher.

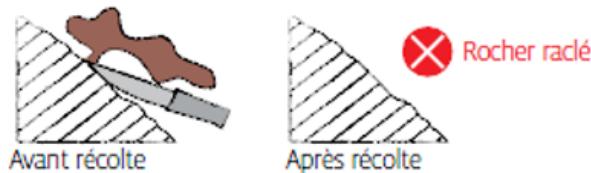


FIGURE 2.10 – Exemples de mauvaises et bonnes pratiques pour la récolte du goémon de rive

plongée par quelque procédé que ce soit ne peuvent le faire qu'à partir d'un navire ou d'une embarcation titulaire d'un rôle d'équipage de pêche. La récolte est autorisée du 15 avril au 31 décembre pour ne pas impacter la période d'émission des spores et des gamètes. Les zones de récoltes sont définies par les affaires maritimes (Direction des ressources marines) après concertations avec les comités des pêches et les instances scientifiques en charge de l'étude des stocks (IFREMER, MNHN, ...). Les instruments employés pour la récolte des goémoniers doivent être conçus et utilisés de manière à éviter l'arrachage des crampons ou bases de fixation.



FIGURE 2.11 – Récolte de **Laminaria hyperborea** par des goémoniers utilisant le peigne norvégien.

2.3.3 Le goémon épave

“Algues détachées par la mer, dérivant au grès des flots ou échouées sur le rivage.”

Le ramassage de ce type de goémon n'est pas assujetti à des restrictions pour les particuliers mais les professionnels doivent faire une demande d'autorisation auprès des affaires maritimes. Le ramassage est autorisé toute l'année au moyen de tout type d'engin : râteaux, pelles, pelleteuses,... (*Figure 2.12*).

2.3. RÈGLEMENTATION DE PÊCHE ET DE RÉCOLTE DES VÉGÉTAUX MARINS37



FIGURE 2.12 – Récolte du goémon épave : exemple de rammassage des ulves (marée verte)

Chapitre 3

Classification et Diversité des algues

3.1 Quelques définitions

Avant de rentrer dans le cœur de la classification et de savoir ce qu'est réellement une algue, il est important de mettre une définition sur des termes que certains d'entre-vous ont du entendre en cours de SVT.

La systématique : science de la classification des êtres vivants basée sur des données biologique, biochimique, moléculaire, génétique, écologique,... . Elle regroupe la taxinomie, la nomenclature, la classification.

La taxinomie : (grec *taxis* « placement », « classement », « ordre » et de *nomos* qui signifie « loi », « règle »). Elle a pour objet de *décrire les organismes vivants et de les regrouper* en entités appelées *taxons* afin de les identifier puis les nommer et enfin les classer et de les reconnaître via des clés de détermination dichotomiques. Le terme fut créé en 1813, sous la graphie de taxonomie, par le botaniste suisse Augustin Pyrame de Candolle (1778-1841) dans sa Théorie élémentaire de la botanique ou exposition des principes de la classification naturelle et de l'art de décrire et d'étudier les végétaux ([de Candolle and de Candolle, 1844](#)).

La nomenclature : est une discipline qui a pour objectif de définir et d'élaborer des règles permettant de former les noms de taxons des organismes. Ces règles sont revues tous les six ans et sont regroupées dans l'[*International Code of Botanical Nomenclature*](#) (ICBN).

Voici la nomenclature utilisée en systématique végétale :

TABLE 3.1 : Règles de nomenclature en botanique d'après l'*International Code of Botanical Nomenclature* (2012).

Rang taxinomique	Terminaison	Exemple
Règne	-ae/a	Plantae
Embranchement	-phyta	Rhodophyta
Classe	-phyceae	Florideophyceae
Ordre	-ales	Palmariales
Famille	-aceae	Palmariacae
Genre	-us, um, is, a, ium,...	Palmaria
Espèce		<i>Palmaria palmata</i>

Plusieurs critères vont être pris en compte pour décrire les organismes et ainsi les identifier :

- Morphologiques
- Cytologiques
- Biochimiques
- Génétiques et/ou moléculaires

La classification classique établit des taxons en fonction de critères de ressemblance, avec l'essor des outils génétiques et moléculaires, il est maintenant possible de regrouper les taxons en fonction des liens de parenté. Ainsi, un taxon regroupe des individus proche génétiquement mais il est possible qu'il n'y ait pas de ressemblances phénotypiques car l'environnement peut être différents (e.g. le polymorphisme chez les algues).

Nous aborderons ces différents critères au fur et à mesure des différents cours magistraux et travaux pratiques.

3.2 Qu'est-ce qu'une algue ?

Comme vous l'avez appris en SVT, les algues font partie du règne **végétal**, *i.e.* ce sont des eucaryotes unicellulaires / pluricellulaires **photosynthétiques**. Les cellules végétales possèdent *une paroi pectocellulosique*, *des vacuoles* et *des organites spécifiques*. Cette classification est toutefois un peu plus complexe, en effet lorsque l'on prend en compte les données moléculaires le groupe des végétaux apparaît comme polyphylétique (*Figure 3.1*). Ainsi, en systématique les termes chlorobionte, rhodophytes, hétérokontophytes, Euglénophytes sont préférés au terme général végétal car ils correspondent à des groupes monophylétiques.

Comme le terme “végétal”, le terme “algue” réfère à un groupe polyphylétique communément appelé **thallophyte**. Les organismes appartenant à ce groupe partagent les caractères suivants :

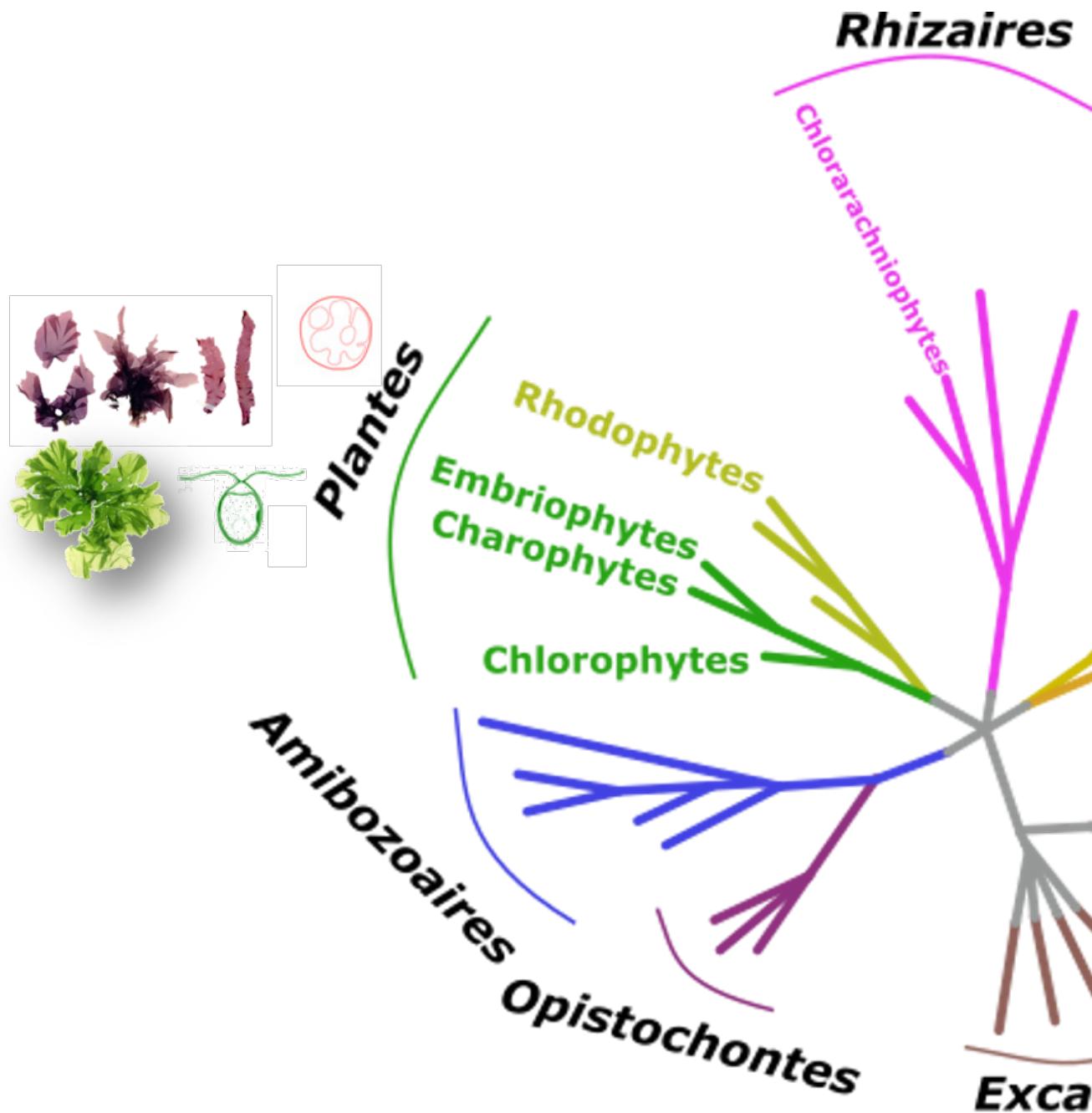


FIGURE 3.1 – Arbre phylogénétique représentant les principaux groupes eucaryotes basé sur des données moléculaires et structurales, @baldauf2003 modifié.

- non vascularisés
- sans feuilles, ni racine, ni tige
- appareil végétatif simplifié (*thalle*)
- photosynthétique
- cryptogames (les organes reproducteurs sont dissimulées à la différence des *phanérogames*)
- mode de vie aquatique (besoin absolu d'eau pour réaliser leur cycle de vie)

Le terme thallophyte inclut actuellement les champignons, les algues, les lichens et certaines bactéries (cyanobactérie).

3.3 Diversité des thallophytes

Les thallophytes regroupent une très grande diversité d'organismes *prokaryotes* (absence d'un "vrai noyau" avec une double membrane nucléaire) et d'*eucaryotes*.

3.3.1 Pélagique *versus* Benthique

Les algues peuvent être pélagique, *i.e.* elles subissent le mouvement de l'eau. Le **phytoplancton** rassemble des micro-organismes autotrophes dérivant au grès des courants. Ce phytoplancton est souvent défini comme l'un des poumons de la Terre. Il existe également des macroalgues pélagiques qui se développent en pleine mer et flottent à la surface de l'eau à l'aide de flotteurs (*Figure @ref{fig:sargasse}*). Ces algues s'accumulent dans des eaux calmes, sans courant pour former des îles flottantes. C'est le cas des sargasses pélagiques (*Sargassum fluitans* et *Sargassum natans*) fucacées qui flottent à la surface des eaux de la Mer des Sargasses. Cette zone de l'Atlantique nord-ouest est connue pour avoir des conditions climatiques très calmes favorisant l'accumulation des sargasses.

Les algues benthiques sont des organismes fixées sur un support au fond de l'eau. La majorité des macroalgues sont fixées sur un substrat rocheux par un système de fixation (crampon, disque, haptère). Les microalgues se déposent quant elles sur le substrat et forment un biofilm favorisant leur prolifération (*Figure @ref{fig:biofilm}*). On trouve beaucoup de biofilms bruns (dominés par les diatomées) dans les estuaires et les vasières après une période ensoleillée.

3.3.2 Microalgues *versus* Macroalgues

Les **microalgues** sont des organismes unicellulaires ou filamentueux de $0.8\mu\text{m}$ à $200\mu\text{m}$. On connaît la spiruline (*Arthrospira spp.*, *Figure @ref{fig:macroalgue}B*) vivant en eaux saumâtres très utilisées en agroalimentaire.



FIGURE 3.2 – Flotteurs de **Sargassum fluitans** et formation d'îles flottantes.

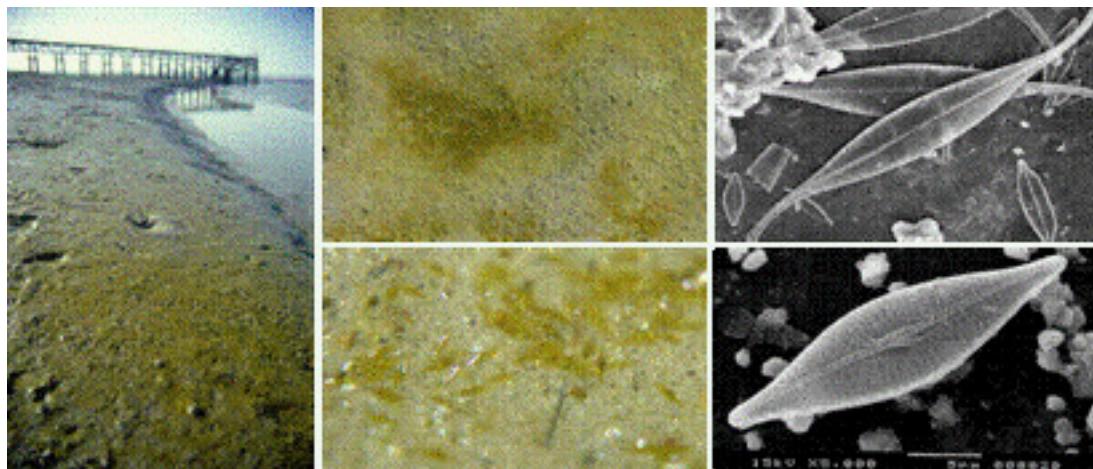


FIGURE 3.3 – Biofilms à la surface des sédiments composés de diatomés pennées.

Ostreococcus tauri (*Figure ??A*), apparue il y a 1.5 milliard d'années, est la plus petite cellule eucaryote avec un noyau de 20 chromosomes et un génome de 12 513 Mpb. Elle est dépourvue d'une paroi cellulaire (au sens végétal), de flagelles, mais possède un chloroplaste, un appareil de Golgi et un mitochondrie. Parmi les microalgues, 8 grands groupes rassemblent plus de 80% des espèces connues :

- Diatomées
- Chlorophytes
- Rhodophytes
- Cyanobactéries
- Euglénophytes
- Cryptophytes
- Haptophytes
- Dinophycés

Les macroalgues sont des organismes pluricellulaires compris entre 200 µm et 50m. *Macrocystis pyrifera* est la plus longue algue du monde, elle peut attendre jusqu'à 43 mètres de long formant des forêts sous-marines. Elle vit fixée sur le substrat rocheux grâce à de solides crampons (*Figure @ref{macrocystis}*).

Parmi les macroalgues, on distingue 3 groupes en fonction de leur composition pigmentaire. Ces trois groupes possèdent la chlorophylle a mais également des pigments sur-numéraires leur conférant une couleur caractéristique :

- **Rhodophytes** : Algues rouges
- **Chlorophytes** : Algues vertes
- **Phéophycées** : Algues brunes

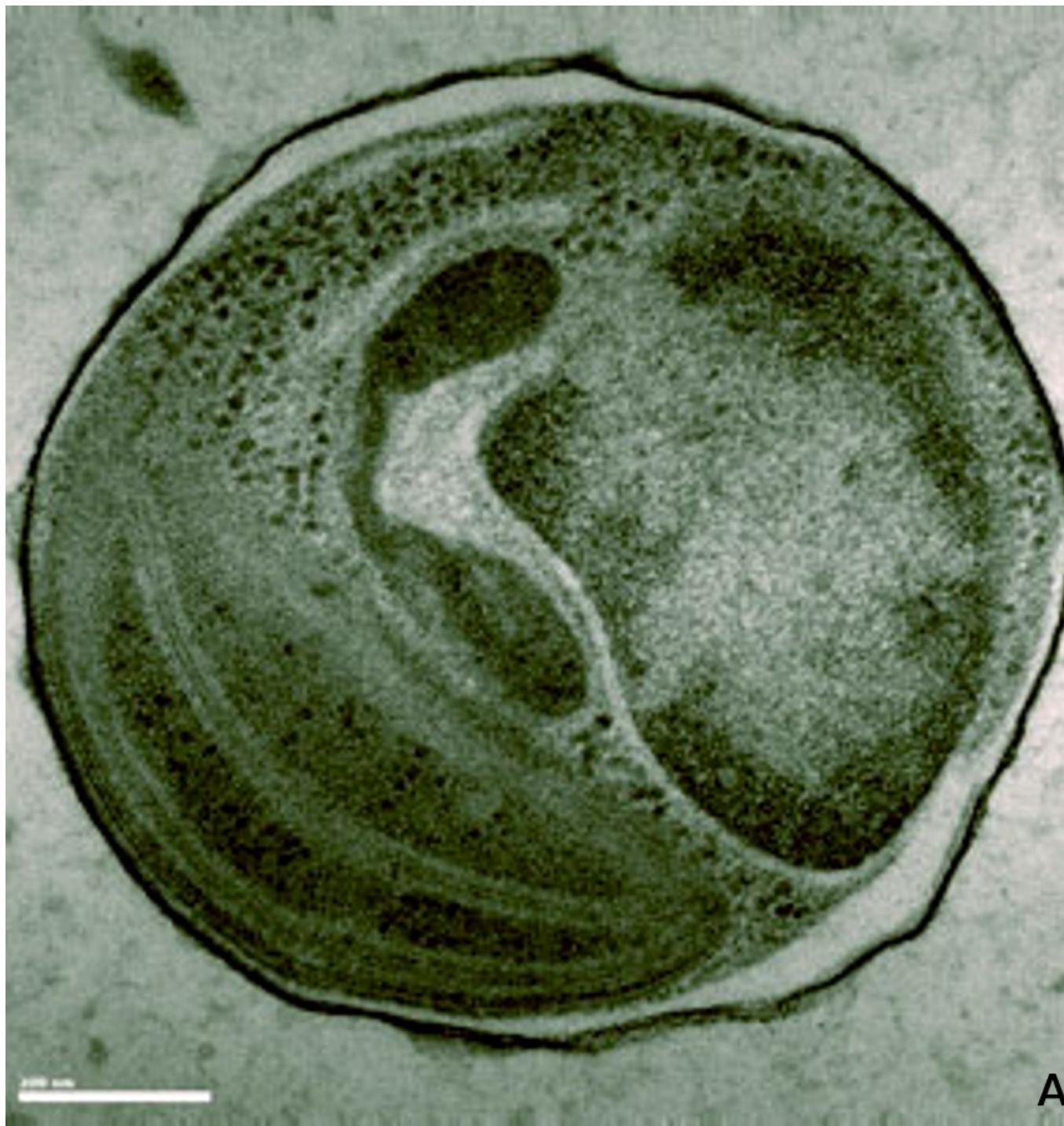


FIGURE 3.4 – Exemples de microalgues. A. **Ostreococcus tauri**; B. **Arthrosira platensis** (spiruline).

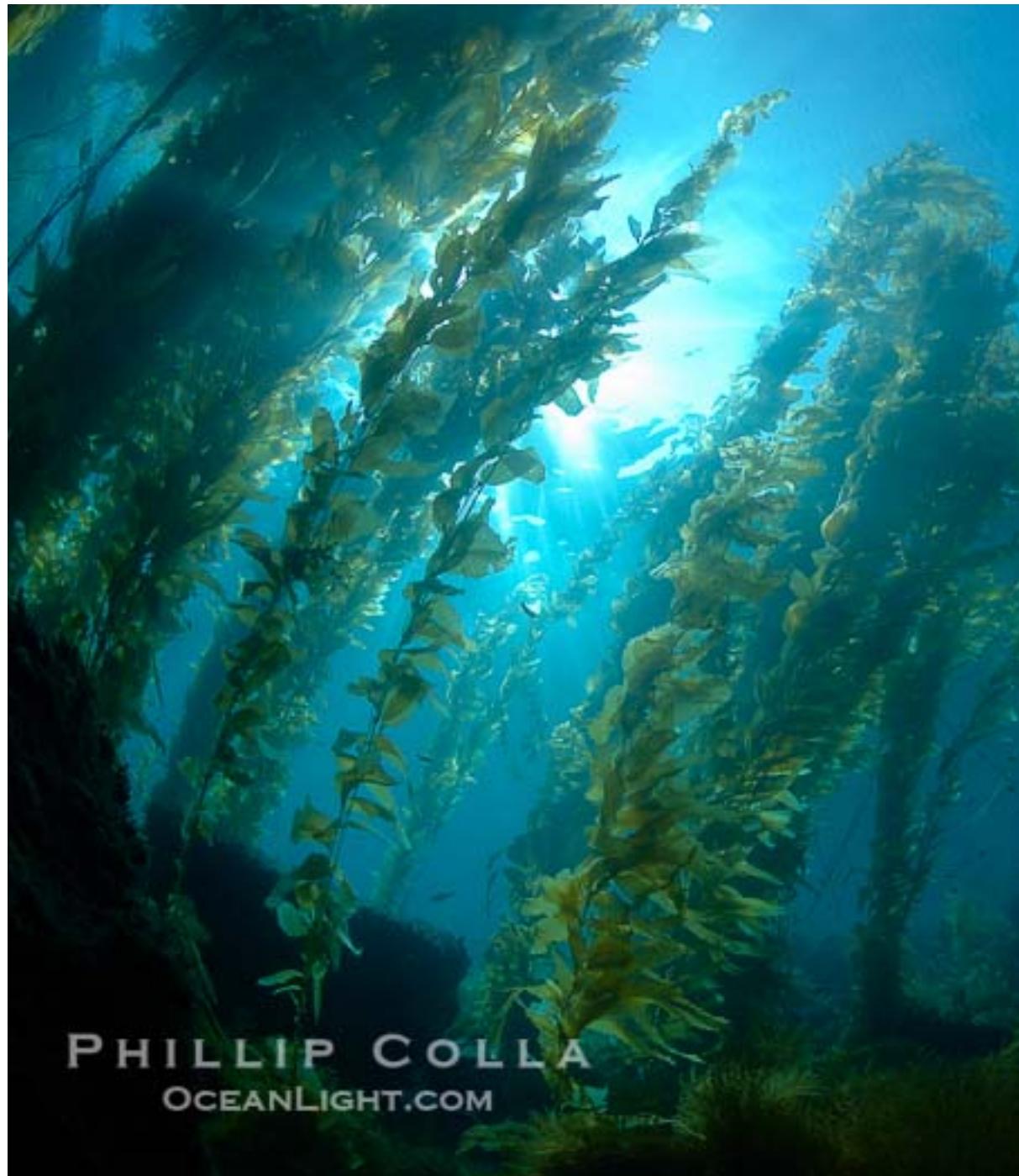


FIGURE 3.5 – Forêt sous-marine de **Macrocystis pyrifera** (Phillip Colla, OceanLighth.com).

Chapitre 4

Diversité morphologique des algues

Quelques définitions

Morphologie : science “descriptive” de la *forme externe et de la structure* des êtres vivants

Etudier la morphologie d'une algue implique de définir :

- sa structure
- le type de ramification
- le type de fixation
- les originalités du thalle

Anatomie : science qui s'intéresse à la *structure interne* des organismes

Polymorphisme : propriété qu'ont les individus d'une espèce de se présenter sous plusieurs formes différentes. Il s'agit de processus d'adaptation des individus aux conditions de milieux (*Figure 4.1*).

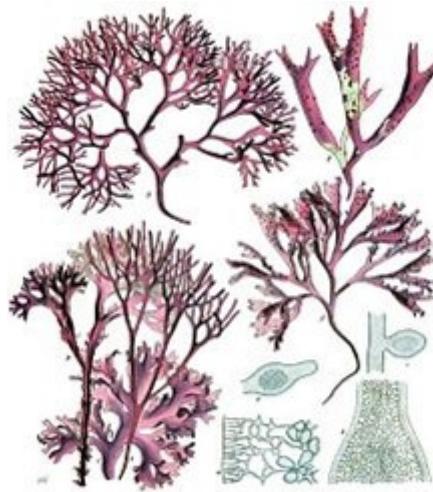


FIGURE 4.1 – Exemple de polymorphisme chez **Chondrus crispus**

A l'issu de ce cours, vous serez capable de déterminer les caractéristiques morphologiques des algues ceci dans le but de leur donner un nom d'espèce.

4.1 Structure du thalle

La structure des thalles est classée en fonction de sa compléxité (du moins au plus complexe) :

Archéthalle → Nématothalle → Cladomothalle

4.1.1 Archétalles

Thalle formé de cellules isolées (archéthalle unicellulaire) ou groupées (archéthalle pluricellulaire).

Toutes les cellules sont identiques et ont donc le même rôle, elles sont capables de se diviser par bipartition (mitose) ou de diviser leur contenu en spores mobiles ou non (méiose). *Dans le cas des archéthalles pluricellulaire, il n'y a pas de communications intercellulaires (Figure 4.2).*

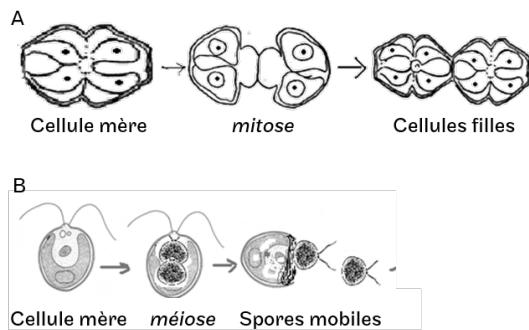


FIGURE 4.2 – A. Multiplication végétative par mitose d'un archéthalle unicellulaire ; B. Production de spores par méiose d'un archéthalle unicellulaire mobile

4.1.1.1 Cellules isolées

Thalle COCCOÏDE : Cellules isolées et immobiles (*Figures 4.3-4.4*)



FIGURE 4.3 – **Chlorella* sp.* (Chlorophycée)



FIGURE 4.4 – *Pleurosigma sp.* (Bacillariophycée)

Thalle MONADOÏDE : Cellules isolées et **mobiles** nageant à l'aide d'un ou plusieurs flagelles (*Figures 4.5-4.6*). Ces organismes sont appelés *monades* (e.g. *Chlamydomonas* sp., *Cryptomonas* sp.,)



FIGURE 4.5 – *Chlamydo**monas** sp.* (Chlorophycée)



FIGURE 4.6 – *Chlamydo**monas** sp.* (Chlorophycée)

4.1.1.2 Cellules groupées

Thalles pluricellulaires **d'une même espèce**, flagellés ou non, rassemblés dans une substance constituée de polysaccharides qui gonfle au contact de l'eau (**mucilage**). Le mucilage protège la colonie des agressions extérieures et des infections.

- **Colonne SARCINOÏDE** : quelques cellules sont réunies en amas dans un mucilage (Figure 4.7).

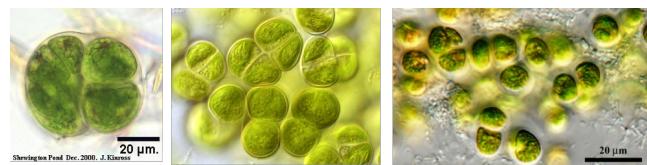


FIGURE 4.7 – *Chloro**sarcino**psis sp.* (Chlorophycée)

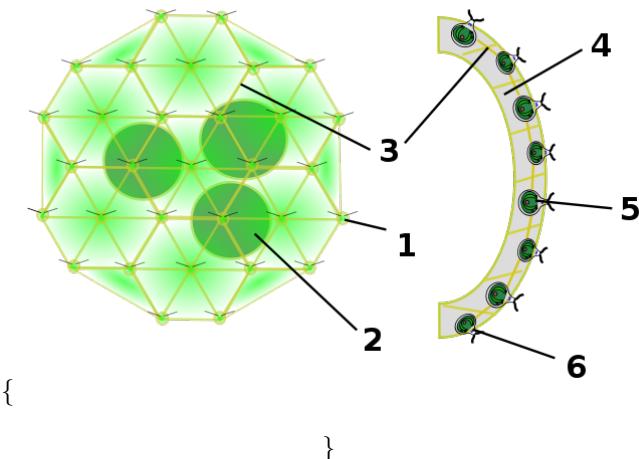
- **CŒNOBE** : Colonie dont le nombre de cellules est fixé génétiquement, lorsque le nombre de cellules maximal est atteint il n'y a plus de divisions possibles. La colonie est obtenue par bipartition des cellules et maintenue par un mucilage.
 - Le genre *Pandorina* (chlorophycée d'eau douce) Colonie constituée de 4 à 32 cellules selon les espèces, les cellules se divisent toutes en même temps un *nombre défini de fois*. La mitose peut parfois être incomplète formant des ponts entre les cellules. Chaque cellule possède *deux flagelles avec deux vacuoles contractiles à la base, un*

stigma et un chloroplaste pariétal avec au moins un pyrénoïde. Toutefois, seules les cellules en périphérie gardent leurs 2 flagelles, les cellules internes perdent leurs flagelles et réalisent uniquement la photosynthèse.

— Le genre *Volvox* (chlorophycée d'eau douce)¹

Colonne de 3000 à 50000 cellules formant une sphère creuse de 5mm de diamètre (*Figure 4.1.1.2*). Les cellules en périphérie sont biflagellées et unies entre elles par des connexions cytoplasmiques. Les colonies de cellules sont séparées i) cellules végétatives ou somatiques (petites et nombreuses) en périphérie et ii) grandes cellules reproductrices légèrement en retrait des cellules somatiques, en fonction des conditions elles vont soit se diviser activement pour former des colonies filles (reproduction asexuée), soit être à l'origine de la formation de gamètes mâle et femelle (reproduction sexuée).

\begin{figure}[H]



\caption{*Volvox sp.* (Chlorophycée) (Sundance Raphael, 2007) 1. Cellules biflagellées ; 2. Colonies filles ; 3. Ponts cytoplasmiques ; 4. Mucilage ; 5. Cellules reproductrices ; 6. Cellules somatiques} \end{figure}

Les genres *Pandorina* et *Volvox* montrent les débuts de la polarisation des colonies, en

Attention, les colonies de cyanobactéries (*Figure 4.8*) ne sont pas des coénobes car il y a une constante augmentation du nombre de cellules jusqu'à la fragmentation du thalle (multiplication végétative).

1. Volvox, structure et cycle de vie d'une algue verte originale, Planet-Vie, Mercredi 18 mai 2011



FIGURE 4.8 – Colonie de **Merismopedia glauca** (Cyanobactéries)

- **Colonie PALMELLOÏDE** : Cellules immobiles réunies dans un mucilage formant un amas. Il n'y a pas de connexions intercellulaires.

Beaucoup d'espèces formant ce type de colonie font partie de la famille des Palmellaceae (e.g. *Sphaerocystis sp.*, *Palmella sp.*, Figure 4.9A1, A2 et B). Parfois, ce type de colonie correspond à un stade de vie lors de la perte des flagelles (e.g. *Chlamydomonas sp.*, Figure 4.9C).

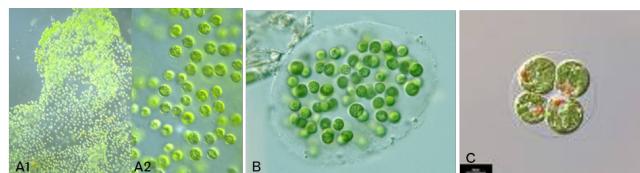


FIGURE 4.9 – Exemple de colonies palmelloïdes. A1. **Palmella sp.** en colonie ; A2. **Palmella sp.** en solitaire ; B. **Sphaerocystis sp.** ; C. **Chlamydomonas sp.**

- **Colonie DENDROÏDE** : Cellules réunies dans un mucilage de forme arbusculaire (Figure 4.10).

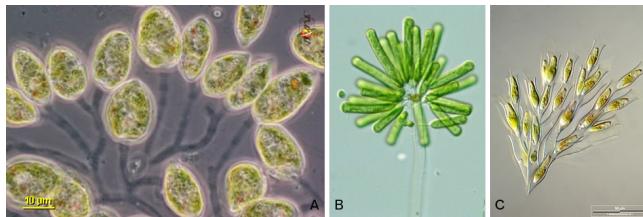


FIGURE 4.10 – Exemples de colonies dendroïdes. A. **Colacium* sp.* ; B. **Ophiocytium arbuscula** ; C. **Dinobryon divergens**

4.1.2 Nématothalles

4.1.2.1 Structure

Les nématothalles sont des thalles avec des cellules spécialisées et une zone spécifique de croissance (apicale ou diffuse). Ces thalles sont constitués de filaments rampants ou dressés / ramifiés ou non. Les cellules peuvent communiquer entre elles via des ponts cytoplasmiques ou des synapses bouchées par un bouchon synaptique.

4.1.2.2 Les filaments

Un filament est un thalle constitué de files de cellules qui forment des axes et des ramifications ayant un diamètre fin. C'est la construction pluricellulaire la plus simple. Pour former des filaments les cellules se divisent dans un même plan et ne s'individualisent pas à l'issu de la mitose, ainsi elles partagent la lamelle moyenne et forment des ponts cytoplasmiques.

- **Filaments unisériés (haplostiques)** : Une seule file de cellules séparées par des cloisons transversales (*Figure 4.11*).

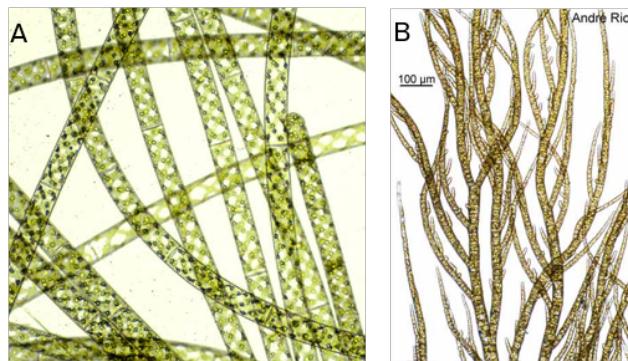


FIGURE 4.11 – Exemples filaments unisériés sans ramifications A. **Spyrogira* sp.* ; avec ramifications B. **Pylaiella* sp.*

- **Filaments plurisériés (polystiques) :** Plusieurs files de cellules séparées par des cloisons transversales et longitudinales (*Figure 4.12*).

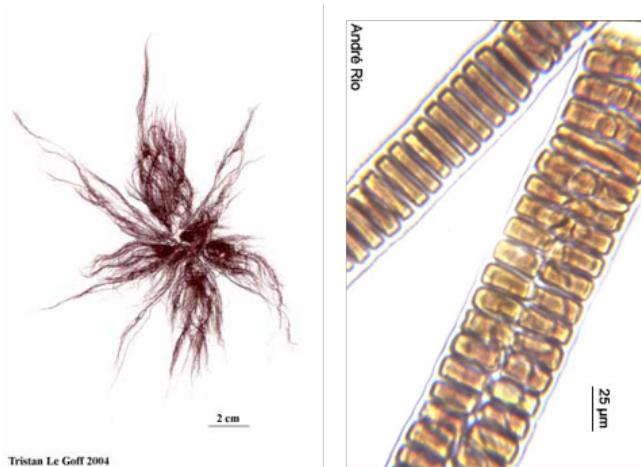


FIGURE 4.12 – Exemples filaments plurisériés **Bangia* sp.*

4.1.2.3 les thalles foliacés

Les cellules dans un thalle foliacé (*Figure 4.13*) peuvent se diviser à la fois sur le plan latéral et longitudinal formant des thalles monostromatiques, *i.e.* avec une seule couche de cellule (*Porphyra* sp.). Chez certaines algues, la lame peut être formée de deux couches (bistromatique, *Ulva* sp.) ou plus (pluristromatique, *Dilsea carnosa*).

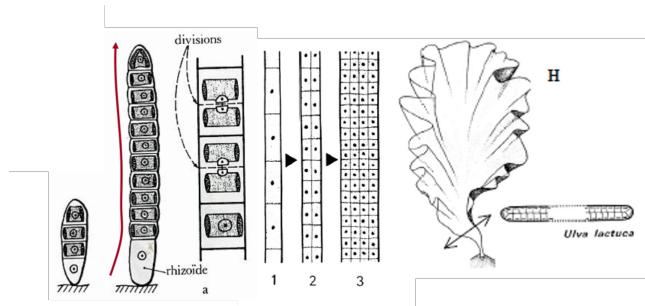


FIGURE 4.13 – Développement d'un thalle foliacé : **Ulva lactuca**^{*}

4.1.2.4 les thalles tubulaires

Ces thalles ont la particularité *d'être creux* entourés d'une ou plusieurs couches de cellules. Ils peuvent être tubulaire ou aplati (*Figure 4.14*).

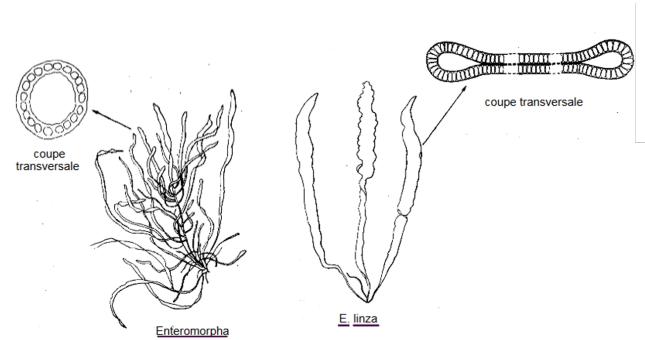


FIGURE 4.14 – Structure de thalles tubulaires. **Enteromorpha* sp.* et **Entomorpha linza** (FAO)

4.1.2.5 les cordons

Contrairement aux thalles tubulaires, les thalles en forme de cordon sont plein, remplis d'un parenchyme. Ce parenchyme est constitué de grandes cellules spécialisées dans le stockage des réserves.

4.1.2.6 les thalles encroûtants

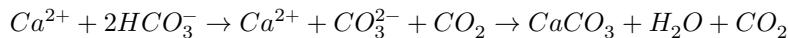
Les thalles encroûtants sont plus ou moins fixés sur le substrat, ils peuvent être calcaire ou non.

Processus de calcification chez les algues calcaires

La précipitation du carbonate de calcium ou calcite (CaCO_3) a lieu dans les parois des cellules qui sont totalement calcifiées par ces dépôts carbonatés, à l'exception des cellules reproductives et des cellules externes de l'épithélium.

Les thalles épais présentent une différenciation cellulaire ; les cellules de l'épithélium possèdent des pigments photosynthétiques alors que les cellules de réserves sans pigments photosynthétiques se situent dans la zone médullaire.

Le processus de précipitation du carbonate de calcium est chimiquement contrôlé par *l'état de saturation en carbonate de calcium de l'eau de mer nommé Ω* . Lorsque Ω est **supérieur à 1**, la **calcification** prévaut alors que lorsque Ω est **inférieur à 1**, c'est la **dissolution** qui est favorisée (Figure 4.15).



La présence de substrats organiques (polysaccharides et fibrilles) conditionne la précipitation des carbonates dans la paroi cellulaire suivant un modèle de calcification. Ces substrats organiques se lient avec des ions calcium (Ca^{2+}) pour former des sites de nucléation favorisant la calcification.

L'utilisation du CO_2 par la photosynthèse (induite par la diffusion du CO_2 ou la déshydratation du HCO_3^- en CO_2 par une anhydrase carbonique) et l'excrétion des H^+ par des pompes à protons déplacent l'équilibre des carbonates vers le CO_3^{2-} et favorise donc la précipitation du CaCO_3 .

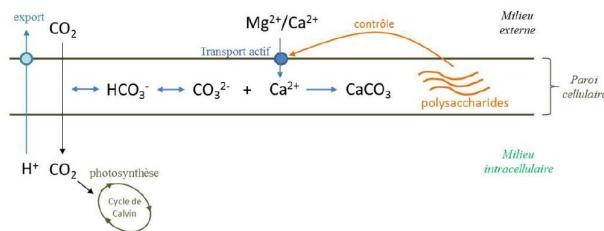


FIGURE 4.15 – Schéma récapitulatif des processus de calcification dans la paroi cellulaire des Corallinacées (d'après Noisette F., 2013)

4.1.3 Cladomothalles

4.1.3.1 Structure générale

Les thalles cladomiens sont les thalles les plus complexes possèdent des zones spécifiques de croissance. (Figure 4.16)

- La cellule initiale du cladome en se divisant va former le cladome I^{aire}
- Des cellules coaxiales vont former des cladomes II^{aire}
- Certaines cellules des cladomes I^{aire} et II^{aire} vont former des pleuridies.

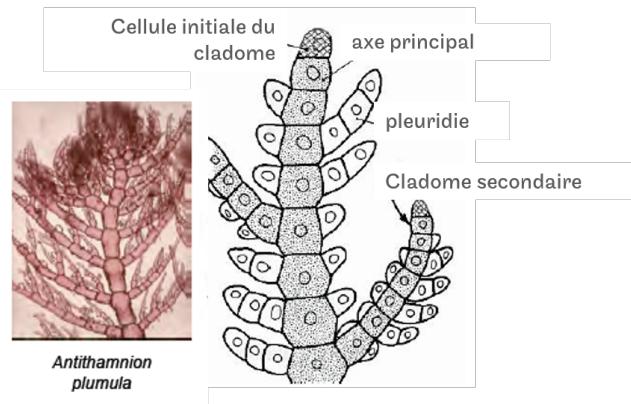


FIGURE 4.16 – Structure d'un thalle cladomien.

Les thalles peuvent être uniaxiaux, il n'y a donc qu'un seul cladome I^{aire} (*Figure 4.17A*) ou multiaxiaux, *i.e* que le thalle possèdent plusieurs cladomes I^{aire} (*Figure 4.17B*). Les pleuridies peuvent également fusionnées pour former des thalles foliacés, on parle alors de pseudo-nervures *Figure 4.18*.

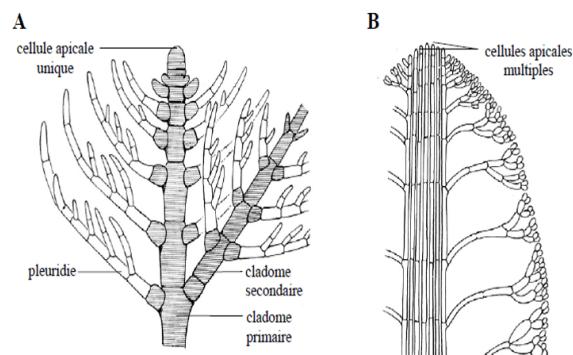


FIGURE 4.17 – Structure des thalles cladomiens. A. Cladome uniaxial d'**Antithamnion* sp.*; B. Cladome multiaxial de **Codium* sp.*

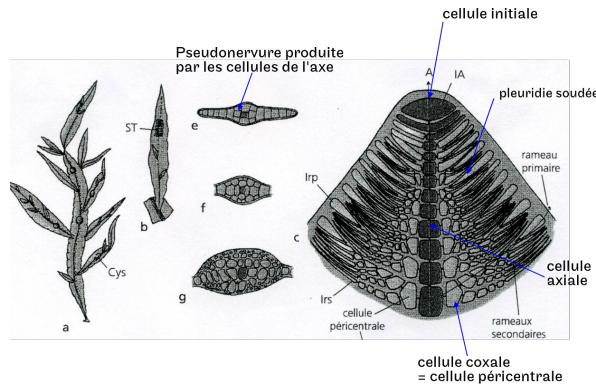


FIGURE 4.18 – Exemple d'un thalle cladomien avec fusion des pleuridies

4.1.3.2 Formation d'un thalle cladomien

4.1.4 Thalles fucoides

Les thalles fucoides sont propres aux algues brunes (*Figure 4.19*). Ces thalles sont divisés en trois parties :

- **La lame** (ou la fronde) est la partie la plus longue de l'algue et peu avoir des morphologies très variées (digitée, monolame, gaufrée, avec sous sans pseudo-nervure.)
- **Le stipe** cylindrique ou aplati peut être :
 - *rigide* permettant le maintien du port aérien de l'algue
 - *souple* conférant à l'algue une résistance aux forces hydrodynamiques
- **Le crampon** : permettant à l'algue de s'ancre sur le substrat plus ou moins irrégulier.

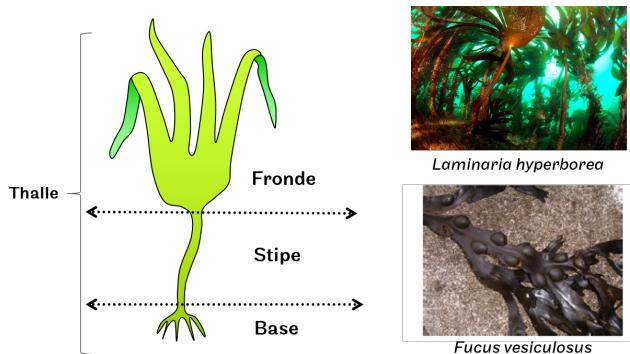


FIGURE 4.19 – Exemple d'un thalle cladomien avec fusion des pleuridies

4.2 Les différentes ramifications

Le type de ramification est un critère de morphologie important pour déterminer le nom d'une algue.

- **Dichotome** : La dichotomie est issue de la division latérale régulière de la cellule initiale du cladome (*Figure 4.20A*)
- **Pseudo-dichotomie** : La cellule initiale du cladome ne se divise pas régulièrement sur le plan latéral (*Figure 4.20B*)

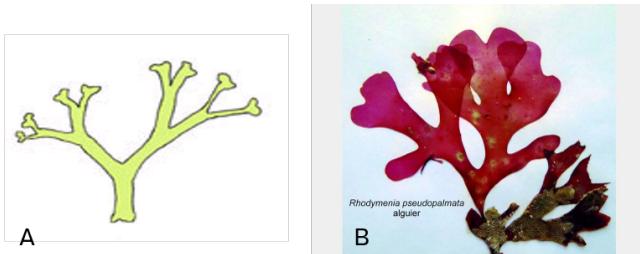


FIGURE 4.20 – Ramification dichotomique A. Régulière **Dictyota dichotoma** ; B. Irrégulière **Rhodymenia pseudo-palmata**

Opposée : Rameaux (filaments) latéraux insérés par 2 sur un même niveau de l'axe (*Figure 4.21A*)

Alternée : Alternance de l'insertion des rameaux latéraux (*Figure 4.21B*)

Verticilée : Sur l'axe principal sont insérés plusieurs filaments au même niveau. (*Figure 4.21C*)

Irrégulière : Rameaux latéraux insérés de façon irrégulière sur l'axe (alterne + opposée) (*Figure 4.21D*)

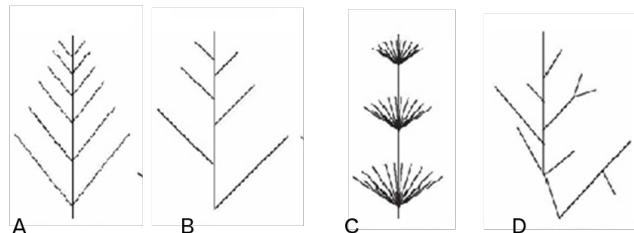


FIGURE 4.21 – Ramifications A. opposée ; B. alternée ; C. verticilée ; D. Irrégulièr

4.3 Les différentes fixations

Les algues présentes plusieurs types de fixation qui font partis des critères morphologiques importants pour déterminer le nom d'une espèce. Lors que vous échantillonnez des algues, il est **IMPORTANT** que vous préleviez la fixation.

Les disques : simple différenciation du thalle en base arrondie plus ou moins importante (*Figure 4.22*).

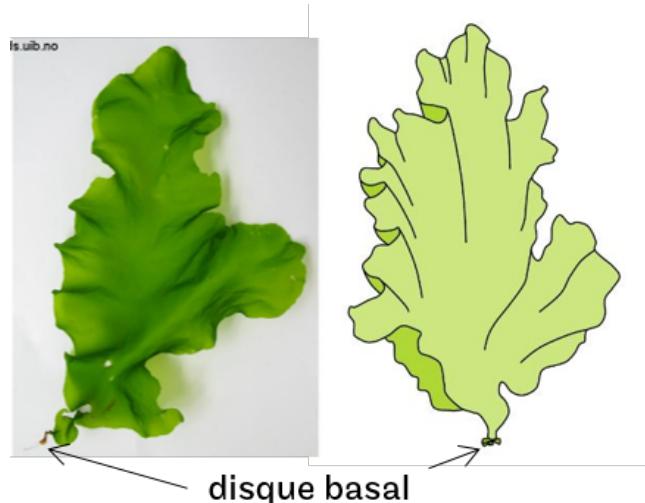


FIGURE 4.22 – Disque de fixation chez **Ulva* sp.*

Les rhizoïdes : Il peut être unicellulaire ou multicellulaire (*Figure 4.23*). Ce sont des cellules dont la différenciation a abouti à l'*apoptose*, qui sont donc des *cellules mortes*. Les rhizoïdes peuvent être assimilés à des racines mais n'en sont pas. En effet, les racines jouent un important rôle dans l'absorption minérale, ce qui n'est pas le cas des rhizoïdes (*les cellules mortes ne peuvent pas participer aux échanges*).

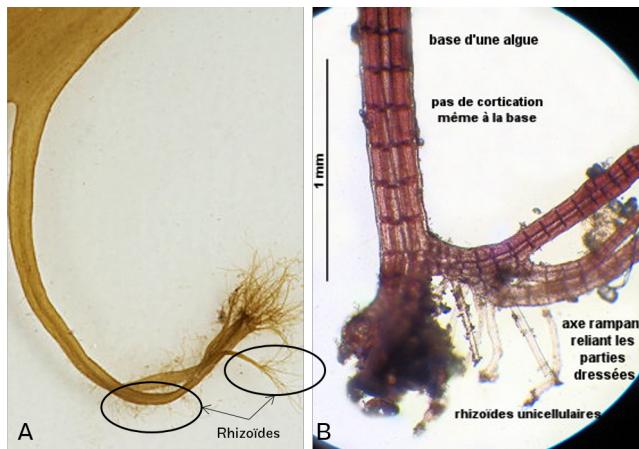


FIGURE 4.23 – Exemples de rhizoïdes chez A. **Desmarestia sp.**; B. **Polysophinia sp.**

Les stolons : Base de fixation enfouie dans le sédiment, elle correspond à la partie rampante portant des rhizoïdes sur laquelle se développent les axes dressés (*Figure 4.24*). Le stolon est donc la partie rampante, fixée par des rhizoïdes, sur laquelle se développent les axes dressés.



FIGURE 4.24 – Stolons chez **Caulerpa sp.**

Les crampons ou haptères : ce type de fixation concerne les thalles fucoides. Les crampons très efficaces qui permettent de maintenir l’algue accroché à son substrat avec un fort hydrodynamisme. Ils sont volumineux et peuvent abriter une forte richesse spécifique d’invertébrés benthiques et de

bactéries (J.-C. Leclerc, 2013).²

On distingue :

- Les haptères formés de ramifications qui s'insèrent dans les infractuaosité du substrat (*Figure 4.25A*)
- Les bulbes : le crampon formé de radicelles est recouvert d'un bulbe creux, épais et verruqueux. (*Figure 4.25B*)



FIGURE 4.25 – Exemples d' haptères chez **Laminaria digitata** (A.) et de bulbes chez **Sacchoriza polyschides** (B.)

4.4 Les particularités morphologiques

Certaines algues présentent des particularités morphologiques qui permettent de leur donner rapidement un nom. Il est *INDISPENSABLE* que vous connaissiez les algues ayant ces particularités.

4.4.1 Les aérocystes

Les aérocystes ou vésicules aérifères sont des vésicules plus ou moins volumineuses contenant un mélange gazeux ou de l'air participant à maintenant l'algue dressée lorsqu'elle est immergée. Ces vésicules ont alors le rôle de flotteur.

Ces vésicules peuvent être :

- dans l'axe du thalle (*e.g. Ascophyllum nodosum*, *Figure 4.26A*)

2. Jean-Charles Leclerc. Biodiversité, Structure et Fonctionnement Trophique des communautés à *Laminaria hyperborea*, en conditions naturelles et exploitées, en Bretagne. Sciences de l'environnement. Paris 6, 2013. Français.

- de part et d'autre de la pseudo-nervure (e.g. *Fucus serratus*, Figure 4.26B)
- latéral porté ou non par des pédoncules (e.g. *Sargassum muticum*, Figure 4.26C)



FIGURE 4.26 – Vésicules aérifères chez **Ascophyllum nodosum** (A.), **Fucus vesiculosus** (B.), **Sargassum muticum**(C.)

4.4.2 Les cils

Ce sont des protubérances formant des épines plus ou moins rigides sur la bordure ou sur l'intérieur du thalle (e.g *Calliblepharis ciliata*, Figure 4.27)



FIGURE 4.27 – Epines chez **Calliblepharis ciliata**

4.4.3 Les ramifications latérales

Certaines algues présentent des ramifications qui ne sont pas dans la continuité de l'axe principal, mais perpendiculaire ou sur la bordure du thalle, leur conférant une structure 3D.

- développement de thalles sur la bordure du thalle principal (*e.g. Palmaria palmata*, Figure 4.28A)
- développement de thalles le long de la pseudo-nervure (*e.g. Hypoglossum hypoglossoides*, Figure 4.28B)

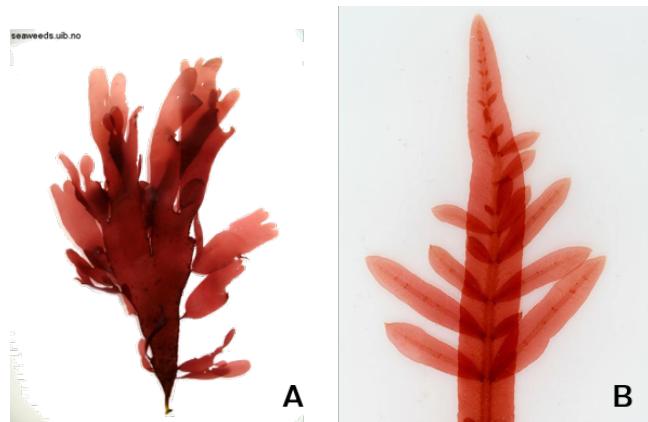


FIGURE 4.28 – Exemples de ramifications sur la bordure du thalle chez **Palmaria palmata** (A) et le long de la pseudo-nervure chez **Hypoglossum hypoglossoides** (B)

4.4.4 Les pseudo-nervures

Les pseudo-nervures sont spécifiques aux cladomothalles et aux thalles fucoïdes, elles correspondent à un épaississement autour des axes principaux et secondaires de croissances (Figure 4.29). Contrairement aux végétaux supérieurs, il n'y a pas de conduction de sèves dans les pseudo-nervures.

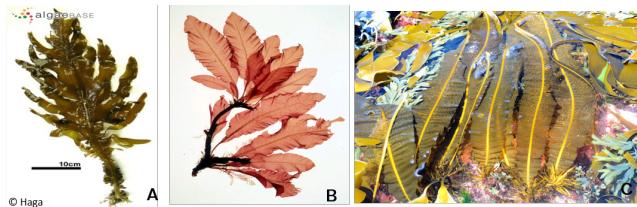


FIGURE 4.29 – Exemples de pseudo-nervures. A. **Undaria pinnatifida**; B. **Delesseria sanguinea**; C. **Alaria esculenta**

4.4.5 Les ramules

Une ramule est une petite ramifications d'un axe de croissance qui a subit une métamorphose ayant pour conséquence un arrêt de croissance du rameau. Il existe une grande diversité de forme des ramules :

- Crosse (e.g. *Acrosorium uncinatum*, Figure 4.30A-B)
- Harpon (e.g. *Asparagopsis armata*, Figure 4.30C-D)
- Crochets (e.g. *Ceramium sp.*, Figure 4.30E-F)
- Peignes (e.g. *Plocamium cartilagineum*, Figure 4.30G-H)
- Pinnules (e.g. *Caulerpa taxifolia*, Figure 4.30I-J)

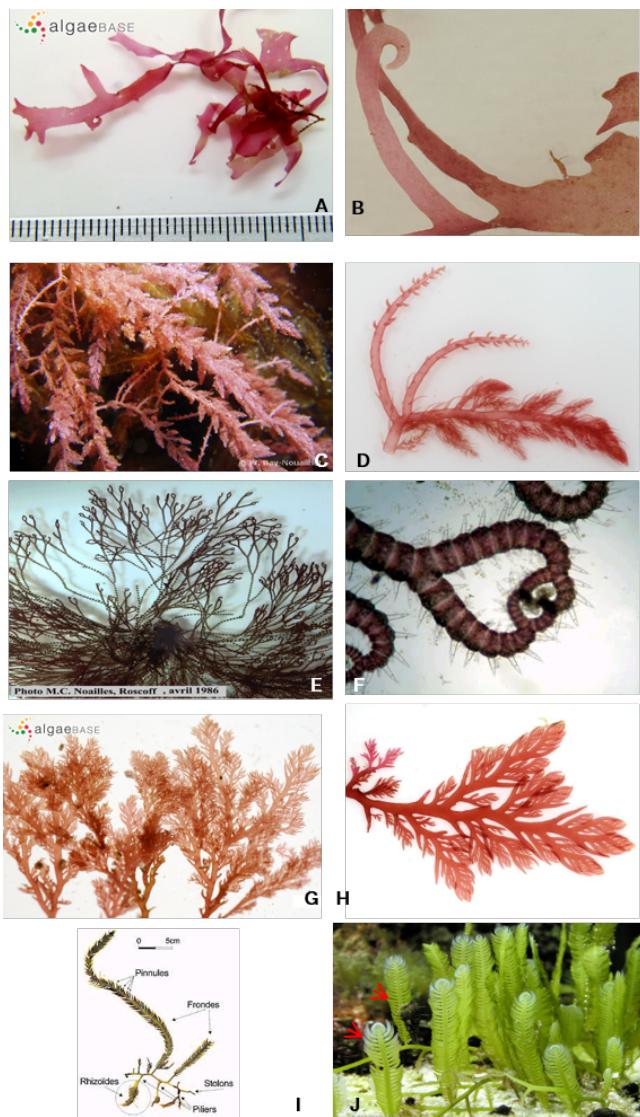


FIGURE 4.30 – Exemples de ramules chez différentes algues. A-B Crosses **Acrosorium uncinatum**; C-D **Asparagopsis armata**; E-F Crochets **Ceramium sp.**; G-H Peignes **Plocamium cartilagineum**; I-J Pinnules **Caulerpa taxifolia**

Chapitre 5

Diversité cytologique des algues

5.1 Introduction

5.1.1 Cellule animale *vs.* végétale

5.1.2 Les technique d'observation de la cellule

5.1.2.1 La microscopie optique

5.1.2.2 La microscopie à balayage

5.2 Les plastes

5.2.1 Qu'est-ce-qu'un plaste ?

Les plastes sont des organite spécifiques des cellules végétales concentrant des substances (pigments, lipides, protéines) qui possèdent **une double membrane et un ADN propre**.

- Les leucoplastes sont des plastes de réserve, ils stockent lipides, protéines et amidon
- Les chromoplastes sont des plastes responsables de la pigmentation, ils stockent des pigments (notamment des caroténoïdes)
- Les chloroplastes sont le siège de la photosynthèse, ils convertissent la matière minérale en matière organique à l'aide de l'énergie lumineuse.

5.2.2 La théorie de l'endosymbiose

5.2.2.1 Parasitisme *vs.* symbiose

Dans le cas du parasitisme, le parasite va utiliser son hôte à ses propres fins pour se nourrir, se reproduire (*e.g.* les champignons parasites). Dès qu'il n'a plus besoin de l'hôte, il est capable de le tuer ou de l'abandonner mais l'hôte très affaibli ne pourra pas survivre.

Pour la symbiose c'est totalement différent, le symbionte va être absorber et non ingérer par l'hôte qui va se servir du symbionte. Néanmoins l'hôte va subvenir aux besoins du symbionte. C'est le principe de "donnant-donnant".

5.2.2.2 L'endosymbiose

Dès le début du XX^{ème} siècle, les chercheurs ont pensé que les plastes et les mitochondrie provenaient de bactéries ingérées par des cellules primitives. Ces bactéries non digérées et non assimilées vivraient à l'intérieur des cellules primitives en symbiose.

Suite à des études approfondies de l'ultrastructure des plastes et des mitochondries par des analyses protéomiques, génomiques et phylogénétiques dans des cellules eucaryotes. Il a été démontré que leur présence résulte de l'endosymbiose de bactéries archaïques :

1. Mitochondrie et chloroplastes possèdent de l'ADN qui codent pour des caractères qui leurs sont propres
2. Le code génétique n'est pas tout à fait identique à celui des eucaryotes, il est plus proches des procaryotes
3. Les ribosomes chloroplastiques et mitochondriaux sont phylogénétiquement plus proches de ceux des procaryotes.
4. La structure de la membrane interne de ces organites est très proche de celle d'une bactérie car très riche en protéines. Cette organisation laisse penser que les bactéries ont été phagocytées.

Toutes ces preuves étaient la théorie endosymbiotique découverte entre 1950 et 1960. Ceci est d'autant plus conforté par la forte ressemblance entre les chloroplastes de cellules eucaryotes photosynthétiques et des bactéries photosynthétiques (cyanobactéries). Les endosymbioses ont pu se réaliser à différents moments et de diverses façons, par absorption par une cellule (Procaryote ou Eucaryote) primitive d'une autre cellule (Procaryote ou Eucaryote). **On parle alors d'endosymbiose primaire ou secondaire.**

— L'endosymbiose I^{aire}

L'endosymbiose I^{aire} sera à l'origine des plastes des rhodophycées et des chlorophycées.

Lors de l'**endosymbiose I^{aire}**, une cellule eucaryote hétérotrophe va phagocytter une bactérie photosynthétique sans entraîner la lyse de la membrane bactérienne. Cette bactérie va devenir un **chloroplaste à deux membranes**, la membrane interne a une origine bactérienne et la membrane externe a pour origine la membrane plasmique de la cellule ayant phagocyté. Cette endosymbiose primaire est à l'origine de la lignée verte (Chlorophytes et plantes supérieures) et de la lignée rouge (Rhodophytes). Comme nous l'avons vu dans le cours d'introduction, rhodophycées et chlorophycées diffèrent par la composition en pigments accessoires et notamment les rhodophycées possèdent des phycobiloprotéines également présentes dans les cyanobactéries, ce qui conforte d'autant plus la théorie de l'endosymbiose. Pour les chlorophycées et les plantes supérieures, deux hypothèses subsistent concernant l'absence de phycobiloprotéines :

1. la cyanobactérie possédait une composition pigmentaire différente lors de l'absorption
2. au cours du temps les phycobiloprotéines ont disparu car elles n'étaient pas utiles.

— **L'endosymbiose II^{aire}**

Lors de l'**endosymbiose II^{aire}**, une cellule eucaryote hétérotrophe va phagocytter une cellule eucaryote autotrophe sans entraîner la lyse de la membrane plasmique. Le noyau et le cytoplasme dégénèrent, le chloroplaste est alors entouré de **4 membranes** (de l'intérieur vers l'extérieur du plaste) :

1. membrane bactérienne
2. membrane plasmique (endosymbiose I)
3. membrane plasmique (cellule phagocytée)
4. membrane plasmique (cellule phagocytant)

En fonction de la cellule autotrophe phagocytée appartenant à la lignée verte ou à la lignée rouge de nouveaux taxa sont apparus :

- **à partir de la lignée verte** : Chlorarachniophytes
- **à partir de la lignée rouge** : Cryptophytes, Hétérokontophytes, Haptophytes

Pour certains taxa (*Euglénophytes* et *Dinophytes*), le chloroplaste ne possède que 3 membranes et non 4 membranes. Deux hypothèses permettent de justifier ce phénomène :

1. Au cours de l'évolution, une membrane a disparu par fusion ou par lyse
2. La cellule autotrophe a été absorbée par *myzocytose*, i.e. la cellule qui absorbe va détruire la membrane plasmique de la cellule cible et va absorber le contenu cellulaire.

5.2.3 Ultrastructure

Le chloroplaste est un organite composé de deux membranes séparées par un espace inter-membranaire . Il contient un réseau membraneux constitué de sacs aplatis nommés thylakoïdes qui baignent dans le stroma (liquide intra-chloroplastique). Les thylakoïdes sont composés d'un lumen entouré d'une membrane et contiennent des pigments. Un empilement de thylakoïdes se nomme granum (au pluriel : des grana). Dans le stroma se trouve des réserves sous forme d'amidon. De plus, les chloroplastes contiennent de l' ADN regroupé en nucléoides. Les ribosomes (10) sont constitués d' ARNr, synthétisés dans les chloroplastes, et de protéines codées par les génomes nucléaires et chloroplastiques.

Chez les algues, les chloroplastes contiennent les chlorophylles a, b ou c ou d ou e, ce sont les pigments photosynthétiques, mais seule la chlorophylle a est capable de réaliser la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique et les ions minéraux (dioxyde de carbone notamment) en matière organique.

5.2.3.1 Structure archéoplastidiée

Une structure archéoplastidie se caractérise par la présence d'un seul chloroplaste plus ou moins lobé de grande taille.

La position du plastide peut être :

- *pariéral* : le plastide se situe le long de la paroi de la cellule
- *focal* : le plastide se situe au centre de la cellule
- *ceinturant* : le plastide entoure le noyau et d'autres organites

5.2.3.2 Structure mésoplastidiée

Une structure mésoplastidiée se caractérise par un réseau de territoires plastidiaux reliés par des trabécules. Chaque territoire peut posséder ou non un pyrénoïde. La forme en réseau est la seule forme existante.

5.2.3.3 Structure néoplastidiée

Une structure néoplastidiée se caractérise par de nombreux plastes avec ou sans pyrénoïdes répartis dans chaque cellule. Cette structure est présente dans la plupart des algues et des végétaux supérieurs. Les plastes peuvent être discoïdes ou rubannées. Chez les Chlorophytes on distingue *le type homoplastidié* correspondant à des plastes ayant tous la même structure et *le type hétéroplastidié* dans lequel il y a une différenciation entre des chloroplastes assurant la photo-synthèse et des amyloplastes assurant le stockage de l'amidon

5.2.4 Les thylakoïdes

Les thylakoïdes sont des “sacs” se situant à l’intérieur du chloroplaste et baignant dans le stroma. Ils sont le siège de la phase claire de la photosynthèse en convertissant l’énergie lumineuse en énergie chimique. L’agencement des thylakoïdes dans le chloroplaste peut être caractéristique de certains taxa.

5.2.4.1 Les thylakoïdes isolés

Cynabactéries : Les thylakoïdes sont isolés dans le cytoplasme en périphérie de la cellule. Ces bactéries portent des phycobilosomes, complexes de phycobiliprotéines formant des antennes collectrices de photons.

Rhodophytes : Les thylakoïdes sont également isolés dans le stroma du chloroplaste et porte des phycobilosomes.

Cette forte ressemblance entre cyanobactérie et rhodophyte corrobore la théorie d’endosymbiose toutefois le genre ou la famille de la cyanobactérie qui a été phagocytée n’est pas encore ellucidé.

5.2.4.2 Les thylakoïdes accolés par deux

Les prochlorophytes sont des bactéries photosynthétiques communément trouvé comme symbiose dans les récifs de corail, particulièrement dans les cellules d’ascidiaceae. Faisant partie du phylum des Cyanobactéries, la théorie endosymbiotique avait théorisé que Prochloron était le prédecesseur du chloroplaste des cellules végétales eucaryotes. Néanmoins, des études phylogénétiques ont réfuté cette théorie.

Les cryptophytes sont des organismes eucaryotes unicellulaires, photosynthétiques.

5.2.4.3 Les thylakoïdes accolés par trois

On trouve cet arrangement dans les groupes suivants :

- les Haptophyta
- les Chrysophyceae
- les Dinophyta
- les Chlorarachniophyceae
- les Euglenophyta
- les hétérokontophytes

Les hétérokontophytes ont une particularité, les chloroplastes présentent une lamelle périphérique faisant le tour du plastide.

5.2.4.4 Les thylakoïdes avec granum(a)

Les thylakoïdes sont empilés par 2 (et jusqu'à 7) sur toute la longueur ou sur une grande partie (granum). Cet arrangement est caractéristique des **chlorophytes**, des **streptophytes** (groupe frère des chlorophytes) et des **plantes supérieures**.

5.2.5 Les organistes complémentaires de la photosynthèse

Le pyrénoïde est une structure cellulaire interne aux plastes de certaines lignées végétales, qui concentre les enzymes responsables de la photosynthèse, notamment la RubisCO (qui fixe le dioxyde de carbone) et l'anhydrase carbonique (qui concentre le dioxyde de carbone à proximité de la RubisCO). Des grains d'amidon, ou une gaine d'amidon, viennent s'accorder à l'extérieur du pyrénoïde.

5.3 La paroi cellulaire

5.3.1 Ultra-structure

La paroi cellulaire constitue un cytosquelette externe, elle est constituée de :

- **La lamelle moyenne** : membrane pectidique qui est un support pour l'élaboration de la paroi primaire et de la paroi secondaire.
- **La paroi primaire** : paroi des plus jeunes cellules, elle est souple et hydrophile permettant aux cellules de croître et de se diviser. Cette paroi participe à la régulation de la croissance et également à l'équilibre hydrique.
- **La paroi secondaire** : paroi des cellules les plus âgées, elle a principalement un rôle de consolidation et de soutien en raison des parois plus rigides.
- **Les plasmodesmes** : Les plasmodesmes sont des communications intercellulaires qui traversent la paroi. Ils sont formés lors de la constitution de la paroi à la fin de la division cellulaire. Vue de profils, ils apparaissent comme des canaux complexes, limités par la membrane plasmique et traversés par un tractus en rapport avec le réticulum endoplasmique. Les communications ne sont pas une libre circulation passive mais sont très sélectives.
- **Les synapses** :

5.3.2 Composition

5.3.2.1 Lamelle moyenne

c'est la partie la plus externe de la paroi (dépourvu de cellulose) et elle est commune à deux cellules contiguës. C'est elle qui se forme la première et elle est constituée de matières pectiques seulement.

5.3.2.2 La paroi primaire

Les parois primaires contiennent des molécules de cellulose. Ces molécules de cellulose (chaînes de bêta glucose) sont associées sous forme de microfibrilles.

Elle est extensible, ce qui permet la croissance cellulaire

5.3.2.3 La paroi secondaire

elle apparaît lors de la différenciation de la cellule. Elle est constituée de cellulose et d'hémicellulose et est enrichie en composés phénoliques :

- lignine (pour renforcer la rigidité),
- cutine et subérine (pour l'imperméabiliser).

Cette différenciation s'observe pour les cellules conductrices de sève du xylème (le bois) et pour différents tissus de soutien (sclérenchyme) ou de protection (liège).

5.3.3 Mucilage et imprégnation

Au cours de l'évolution de certaines cellules, les parois peuvent subir des modifications plus ou moins importantes ; certaines en une transformation chimique en gommes ou mucilages ; d'autres en une incrustation de la paroi.

5.3.3.1 La minéralisation

La minéralisation correspond à un dépôt de silice (SiO_2) ou alors à un dépôt de calcaire (carbonate de calcium, CaCO_3) au niveau de tissus spécifiques de la plante.

- Le dépôt de silice s'appelle la silification et se fait au niveau de certaines plantes uniquement, non comestibles par les herbivores. Les Poacées et les Cypéracées possèdent des épidermes riches en silices ; on prendra pour exemple les poils urticants des orties.
- Le dépôt de calcaire s'effectue au niveau des poils en les rigidifiant.

5.3.3.2 Gélification par des mucilages

La gélification correspond à une hypertrophie de la lamelle moyenne, par des mucilages. Les mucilages sont des polysaccharides hétérogènes dont le poids moléculaire est inférieur à la cellulose. Ce sont des macromolécules hydrophiles colloïdales, c'est-à-dire qu'elles peuvent passer en solution dans l'eau sans être ionisées, et ceci en restant en suspension dans la solution. Elles ont la propriété de gonfler au contact de l'eau et de former des masses gélantineuses.

5.4 Les flagelles et cils

Les flagelles et les cils sont des structures piliformes provenant de différentes cellules. Ils sont relativement mince et ont un **diamètre constant** mais leur longueur varie entre 2 et 150 μm . Par convention, les flagelles sont plus long et moins nombreux alors que les cils sont courts et nombreux

5.4.1 Composition

Chaque flagelle possède une organisation interne précise que l'on retrouve chez tous les organismes eucaryotes flagellés :

- Un anneau externe de neuf parties de microtubules
- 2 microtubules au centre

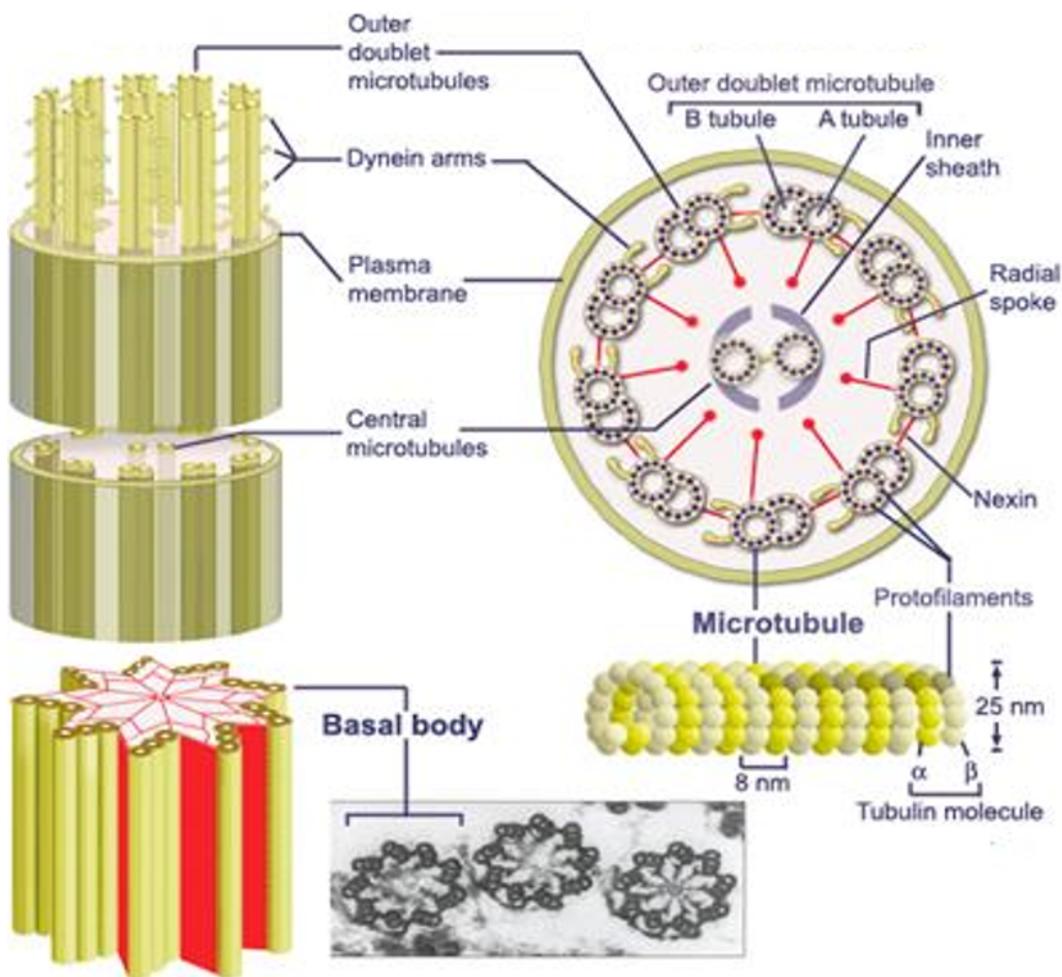


FIGURE 5.1 – Structure interne d'un flagelle d'eucaryote

Le mouvement est produit par le glissement des microtubules. Ce glissement est produit par des cycles d'attachement détachement de liaisons (bras de dynéine) qui contiennent des enzymes et se trouvent entre les paires voisines de l'anneau externe.

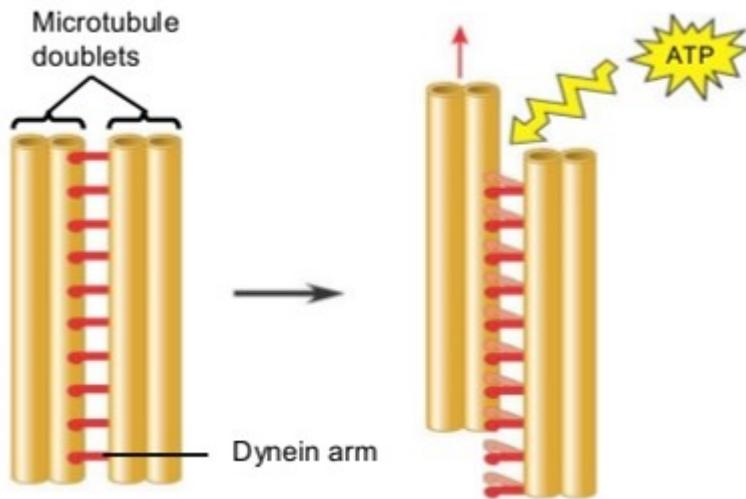


FIGURE 5.2 – Mouvement entre deux paires de microtubules dans un flagelle d'une cellule eucaryote

5.4.2 Structure

Le nombre de flagelle est variable, majoritairement on en dénombre 1,2 ou 4 mais certaines cellules peuvent en avoir beaucoup plus.

Il existe une grande diversité structurale externe des flagelles. En effet, ils peuvent être lisses ou porter des expansions latérales fibrillaires appelées des mastigonèmes.

- Si le flagelle possède une rangée de mastigonèmes, on parle de **flagelle stichonématés**
- Si le flagelle possède deux rangées de mastigonèmes, on parle de **flagelle pleuronématés**

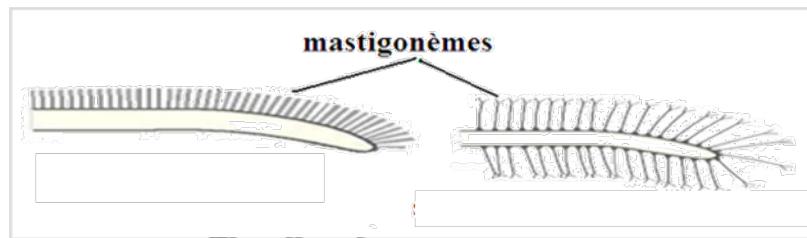


FIGURE 5.3 – Les mastigonèmes présents sur les flagelles. A gauche un flagelle stichonématés et à droite un flagelle pleuronématés

Selon la structure et l'aspect des flagelles, nous pouvons distinguer :

- La cellule **isokontée** : les flagelles possèdent la même longueur et la même structure
- La cellule **anisokontée** : les flagelles ont une longueur différente mais leur structure est identique
- La cellule **héterokontée** : Les flagelles ont une longueur et une structure différente
- La cellule **stéphanokontée** : Les flagelles sont nombreux et sont répartis en couronne ou sur toute la surface de la cellule

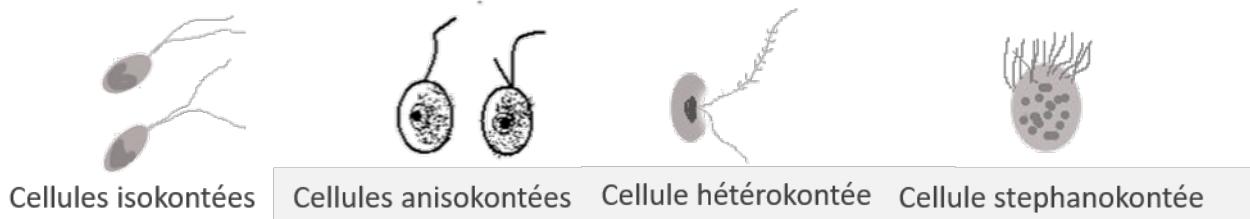


FIGURE 5.4 – Différentes structures flagellaires chez les eucaryotes

Il faut également distinguer la zone d'insertion des flagelles :

- Cellule **acrokontée** : insertion en position apicale. La cellule est donc tractée
- Cellule **basikontée** : insertion en position basale. La cellule est donc propulsée
- Cellule **pleurokontée** : insertion en position latérale.

Cas particulier des dinoflagellés

Les deux flagelles sont insérés dans 2 sillons perpendiculaires l'un à l'autre. Le flagelle dans le sillon transversal assure la propulsion et le flagelle longitudinal dirige la nage.

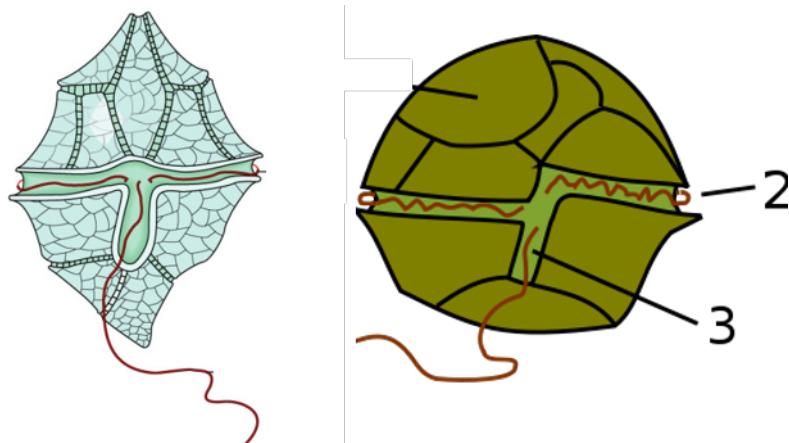


FIGURE 5.5 – Organisation flagellaire chez des dinoflagellés

5.4.3 L'haptonème

Chez certaines algues unicellulaires flagellées, on observe un appendice, + ou – long, qui émerge de la cellule entre deux flagelles que l'on nomme l'haptonème. Ce n'est pas un flagelle car il ne possède pas le même nombre de microtubule et par conséquent il possède une plus grande mobilité. Il peut aussi bien prendre la forme d'un tire-bouchon ou d'un ressort que d'un harpon ou d'un crochet).

L'haptonème est présent uniquement chez les **Haptophytes** (*e.g.* cocolithophoridées)

L'haptonème jouerait au moins trois rôles importants :

- **Rôle sensoriel de détection d'obstacle**; chez certains cocolithophores, l'haptonème est atrophié et quand il est présent semble de même nature morphologique que chez les espèces proches, mais moins fonctionnel que chez d'autres espèces⁶. On a cependant observé que chez ces espèces, quand l'haptonème touche un obstacle, la cellule inverse rapidement son mouvement de natation et recule⁶. On ignore si c'est une fonction ancienne qui a été conservée, ou si c'est une fonction nouvellement acquise alors que d'autres ont été perdues.
- **rôle d'ancre** (sur un substrat ou une « proie »).
- **rôle dans la nutrition cellulaire** (collecte de particules nutritives dans le milieu)

5.5 Les organites originaux

Certains taxa possèdent des organites originaux permettant de s'adapter à l'environnement.

5.5.1 Les physodes chez les algues brunes

Les physodes des Phéophycées sont des globules ou des vésicules, à contenu principalement phénolique (phlorotannins) ou tanoïde, qu'on observe en grande abondance dans les cellules de ces Algues. Les phlorotanins sont classés en fonction de l'arrangement de leur monomères de phloroglucinol. Plus de 150 composés sont connus, dont la masse moléculaire varie de 126 Da à 650 kDa.

La plupart font entre 10 et 100 kDa.

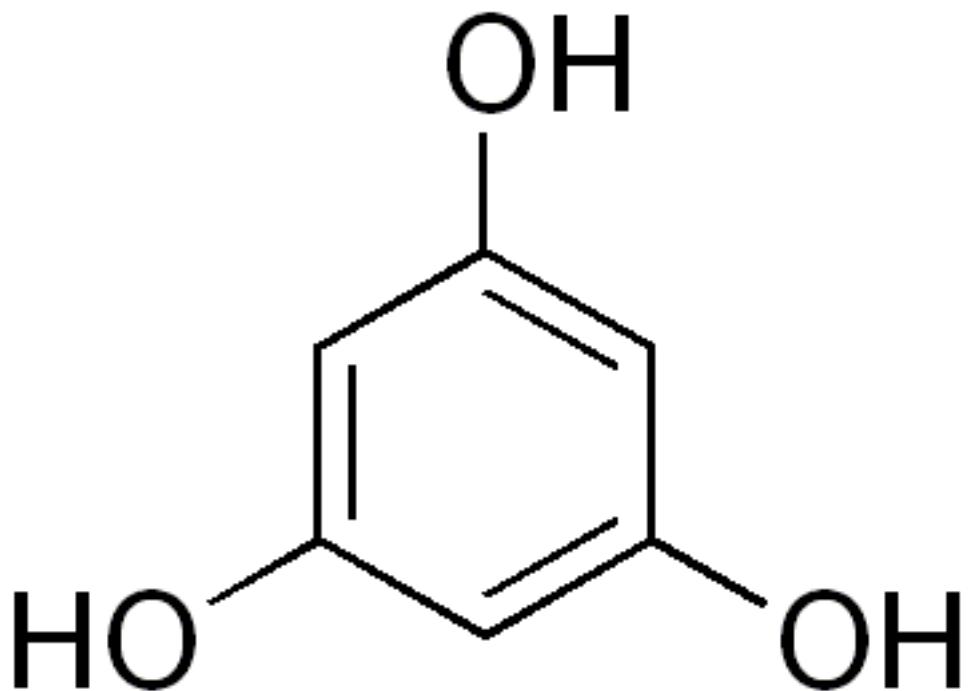


FIGURE 5.6 – Structure du phloroglucinol

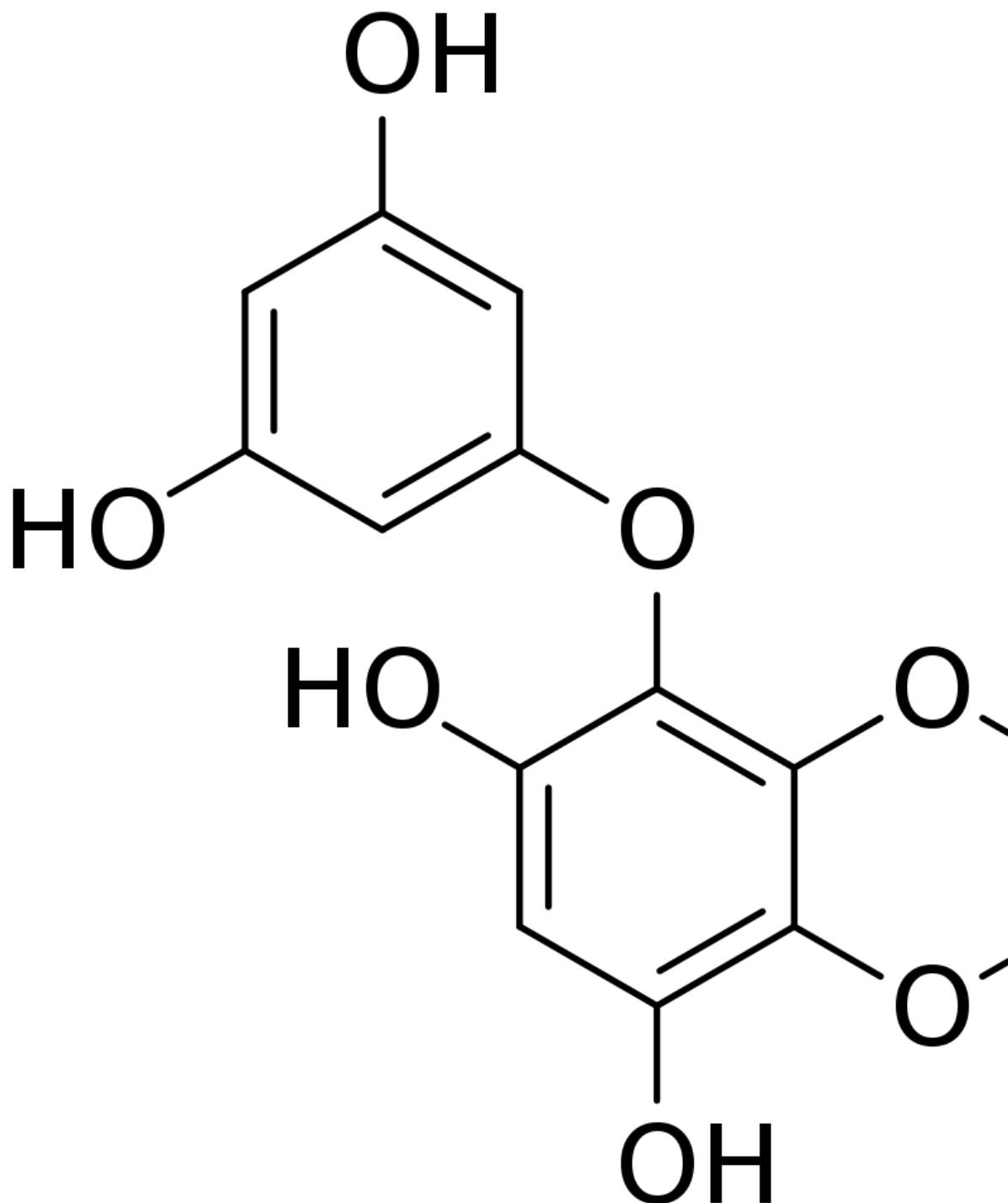


FIGURE 5.7 – Molécule d'eckol, phlorotanin présent chez les espèces du genre *Ecklonia*.

Les physodes peuvent être mises en évidence par coloration au bleu de Crésyl ou par observation sous lumière UV en microscopie à épi-fluorescence.

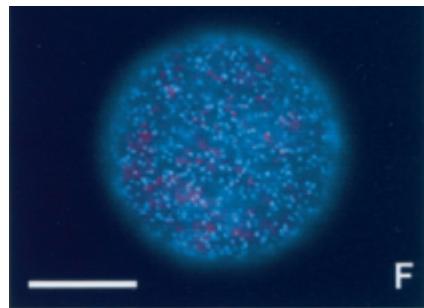


FIGURE 5.8 – Observation sous lumière UV d'un zygote de *Fucus*

Ces physodes permettent par la présence de phlorotannins :

- une résistance/défense contre les rayonnements UV,
- anti-broutage par les herbivores
- un rôle structurel dans la paroi cellulaire
- un rôle reproductif en contribuant à la formation de la paroi cellulaire du zygote (issu de la fécondation)

5.5.2 Les vacuoles pulsatiles chez les algues d'eau douce

5.5.3 les corps mucifères

5.5.4 Trichocystes

5.5.5 L'iridescence

5.5.6 Les cellules spécialisées

Bibliographie

- Ariede, M. B., Candido, T. M., Jacome, A. L. M., Velasco, M. V. R., de Carvalho, J. C. M., and Baby, A. R. (2017). Cosmetic attributes of algae-a review. *Algal research*, 25 :483–487.
- Balasse, M., Tresset, A., Dobney, K., and Ambrose, S. H. (2005). The use of isotope ratios to test for seaweed eating in sheep. *Journal of Zoology*, 266(3) :283–291.
- Berri, M., Olivier, M., Holbert, S., Dupont, J., Demais, H., Le Goff, M., and Collen, P. N. (2017). Ulvan from *ulva armoricana* (chlorophyta) activates the pi3k/akt signalling pathway via tlr4 to induce intestinal cytokine production. *Algal research*, 28 :39–47.
- Berri, M., Slugocki, C., Olivier, M., Helloin, E., Jacques, I., Salmon, H., Demais, H., Le Goff, M., and Collen, P. N. (2016). Marine-sulfated polysaccharides extract of *ulva armoricana* green algae exhibits an antimicrobial activity and stimulates cytokine expression by intestinal epithelial cells. *Journal of applied phycology*, 28(5) :2999–3008.
- de Candolle, A. P. and de Candolle, A. (1844). *Théorie élémentaire de la botanique, ou, Exposition des principes de la classification naturelle et de l'art de décrire et d'étudier les végétaux*. Roret.
- Dillehay, T. D., Ramírez, C., Pino, M., Collins, M. B., Rossen, J., and Pino-Navarro, J. (2008). Monte verde : seaweed, food, medicine, and the peopling of south america. *science*, 320(5877) :784–786.
- Guitard, E.-H. (1922). L.-g. toraude, bernard courtois et la découverte de l'iode. *Revue d'Histoire de la Pharmacie*, 10(34) :48–49.
- Hehemann, J.-H., Correc, G., Barbeyron, T., Helbert, W., Czjzek, M., and Michel, G. (2010). Transfer of carbohydrate-active enzymes from marine bacteria to japanese gut microbiota. *Nature*, 464(7290) :908–912.