

BCPST2

SV-K1/2 Les mécanismes de l'évolution

SV-K1/2 TPK2 : Reconstitution d'un scénario évolutif à partir de la phylogénie des Algues

**RECONSTITUTION DE SCÉNARIS ÉVOLUTIFS
A PARTIR DE LA PHYLOGÉNIE DES ALGUES****Objectifs méthodologiques :**

- *Réaliser des observations macroscopiques et microscopiques, avec ou sans coloration, afin de mettre en évidence des caractères des algues exploitables dans le cadre d'une analyse phylogénétique*
- *Exploiter des données biochimiques et des clichés de microscopie électronique d'algues pour discuter*

Objectifs cognitifs :

- *Identifier et expliquer des convergences évolutives*
- *Argumenter la théorie endosymbiotique des plastes ainsi que les endosymbioses primaires et secondaires des plastes.*
- *Exploiter des données afin de discuter l'histoire évolutive d'un groupe, sa place dans l'arbre phylogénétique ou la signification évolutive d'un caractère.*

Exemples de sujets proposés à l'épreuve de travaux pratiques sur cette partie du programme:

→ *Légender les photos (MET et MEB) de l'algue considérée et dire à quel groupe phylogénétique elle appartient à partir de l'arbre fourni.un arbre donné.*

→ *Construire une matrice de distance à partir de l'étude de séquences*

La biodiversité actuelle est la conséquence d'une histoire évolutive démarrée il y a au moins 3,5 milliards d'années. Reconstituer l'histoire du vivant est complexe et s'appuie à la fois sur des données fossiles et sur des données issues des organismes actuels.

La comparaison de ces données permet la reconstitution d'arbres phylogénétiques qui reconstituent les liens de parenté entre les organismes et permet de reconstituer des scénari évolutifs.

Dans le langage courant le groupe des Algues désigne des organismes vivant dans l'eau ou dans un milieu humide, chlorophyllien et qui n'ont ni tige, ni racine, ni feuille, c'est à dire constitués d'un thalle.

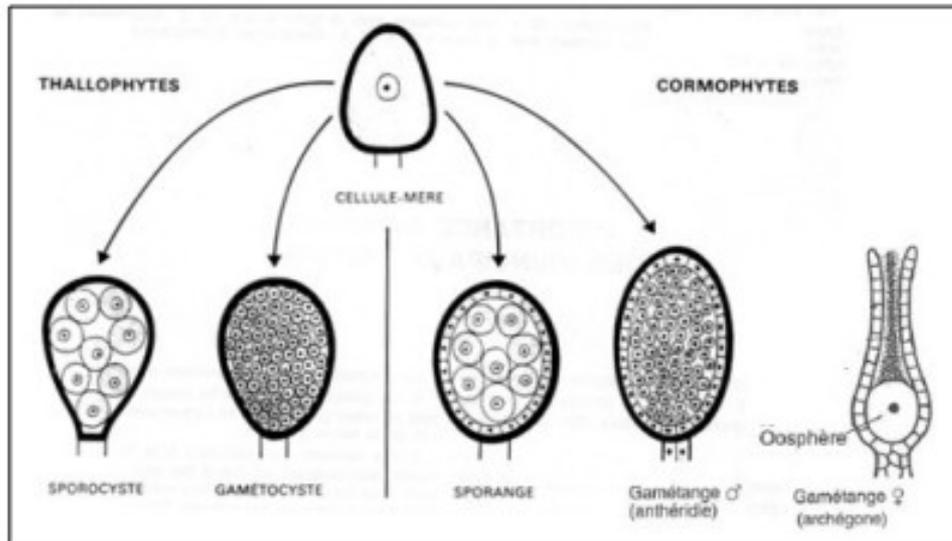
Ce groupe « Algues » est donc défini en prenant compte de critères écologiques, trophiques et morphologiques.

Le thalle étant défini comme une structure végétative sans tige, ni feuille, ni racine, constitué de cellules jointives qui ne forment pas de tissus mais des filaments pouvant s'accoler alors en pseudo-tissus comme chez les algues pluricellulaires. Les Algues ont donc été pendant longtemps classées dans un groupe plus large, celui des Thallophytes regroupant tous les « végétaux » au sens du terme « non animal » ayant un appareil végétatif simple, non différencié par opposition aux Cormophytes qui regroupaient les organismes chlorophylliens ayant un appareil végétatif différencié constitué d'un cormus c'est à dire un axe formé de tige et de feuilles avec, souvent des racines.

On regroupait donc parmi les Thallophytes : les algues, les champignons et les lichens.



D'un point de vue reproducteur, on oppose également ces 2 groupes :



– Chez les **Thallophytes**, les structures de dissémination sexuées (gamètes) ou non (spores) sont produites à l'intérieur de **gamétocystes** ou de **sporocystes** respectivement. Ces structures sont délimitées par la paroi de la cellule mère ayant subi la méiose (cas des spores) ou non (cas des gamètes).

Document 1 : structure schématique comparée des organes reproducteurs des Thallophytes et des Cormophytes

Chez les **Cormophytes**, les spores sont produites à l'intérieur de **sporange** et les gamètes à l'intérieur de **gamétanges**. Ces structures possèdent une paroi propre faite de plusieurs couches cellulaires et mises en place au cours des premières divisions de la cellule-mère. La cellule sexuelle femelle, unique est contenue dans un gamétange femelle ou **archégone**. Les Cormophytes sont donc des **Archégoniates**.

Problématique :

Les Algues et plus largement les Thallophytes constituent ils des groupes monophylétiques et qu'elle est l'origine de leurs plastes ayant permis l'acquisition de leur type trophique ?

Il s'agit donc ici de reconstituer l'histoire évolutive des Algues au travers de l'étude de deux traits de caractères : l'acquisition des plastes et l'état pluricellulaire sous forme de thalle.

Il faut donc s'appuyer sur l'observation de différentes algues et d'analyser différents caractères permettant de reconstituer une phylogénie et donc un scénario évolutif.

I. Etude macroscopique et microscopiques de quelques Algues appartenant à différents taxons

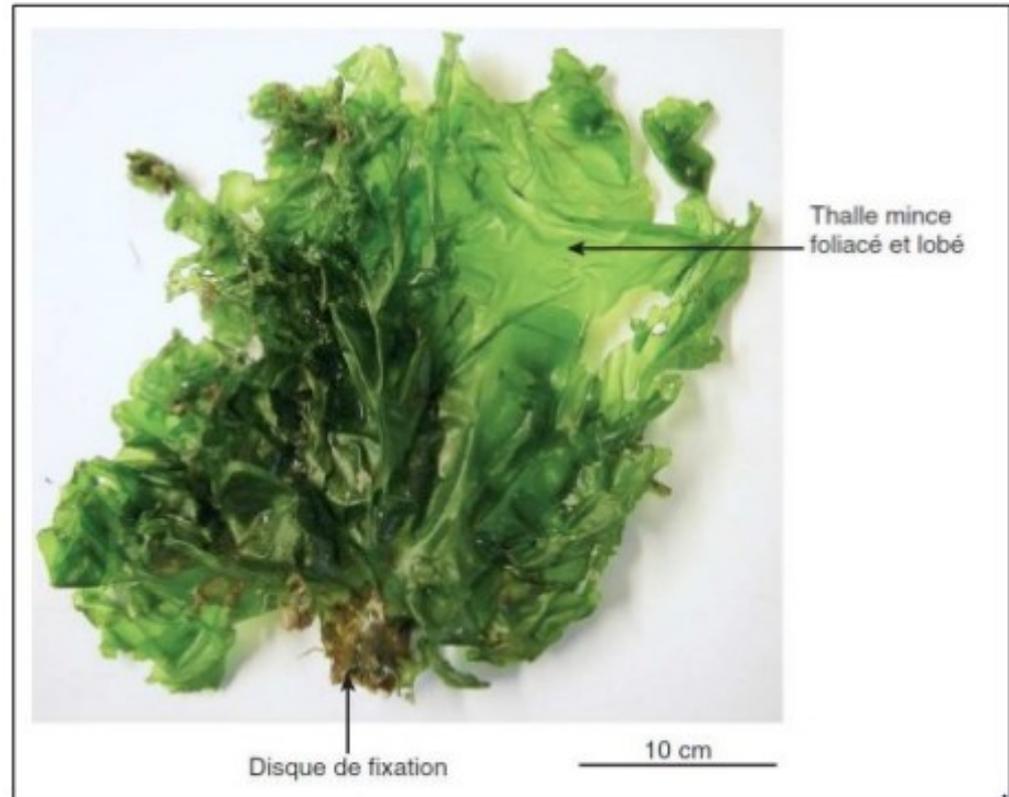
1. Observation de quelques algues vertes

1.1 organisation de l'appareil végétatif d'une algue verte pluricellulaire, *Ulva lactuca*.

L'ulve laitue ou « laitue de mer » (*Ulva lactuca*) est une algue verte appartenant au clade des Chlorophytes de la Lignée Verte.

Il s'agit d'une algue marine vivant dans la zone de balancement des marées. Sa morphologie aplatie lui donne un aspect foliacé à l'origine de son nom latin et vernaculaire. Cette espèce est très **tolérante** aux excès de sulfates et de nitrates, ce qui lui permet de se développer dans ces milieux, par exemple dans les ports.

La **lame foliacée** présente à sa base un **disque de fixation** permettant à l'algue de se fixer son substrat rocheux.



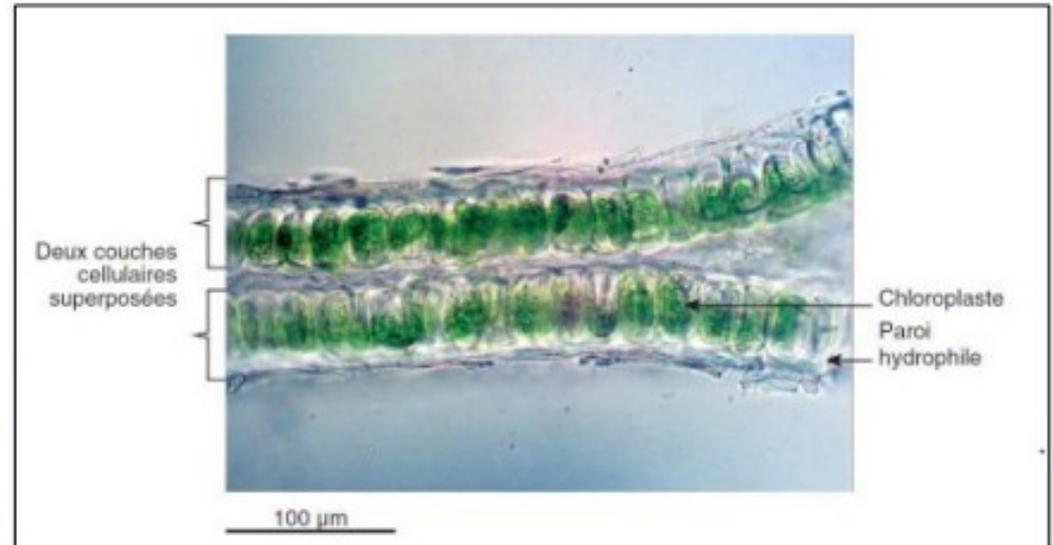
Document 2 : thalle foliacée d'*Ulva lactuca*

Activité 1 :

- Observer une Ulve dont la lame foliacée a été préalablement déployée
- Réaliser un montage entre lame et lamelle d'un petit fragment de thalle en coupe transversale dans une goutte d'eau et un 2^e montage d'un autre fragment aplati dans une goutte de lugol.
- Observer au microscope et réaliser un dessin légendé.

Le thalle de l'Ulve est ce qu'on appelle un **nématothalle**, c'est à dire qu'il est constitué d'un ensemble de filaments, dans son cas accolés (mais pouvant être ramifié chez d'autres algues) où les cellules (à l'inverse des algues filamenteuses constituées d'un archéthalle pluricellulaire) communiquent par des ponts cytoplasmiques.

L'observation en coupe transversale montre que ce thalle est réduit à deux couches de cellules, toutes semblables. La **matrice extracellulaire** possède des **caractéristiques communes avec celle des Embryophytes** puisqu'elle est composée de **cellulose**. Sa teneur est cependant réduite et cette paroi est également riche en **polyosides sulfatés**, molécules particulièrement hydrophile qui donnent un aspect gélifié. Cette organisation de la paroi est à mettre en relation avec la vie intertidale (= dans la zone de balancement des marées): elle permet de subir les courants et les marées en se déformant sans se déchirer et retenir l'eau à marée basse dans le thalle, ce qui limite la dessiccation.

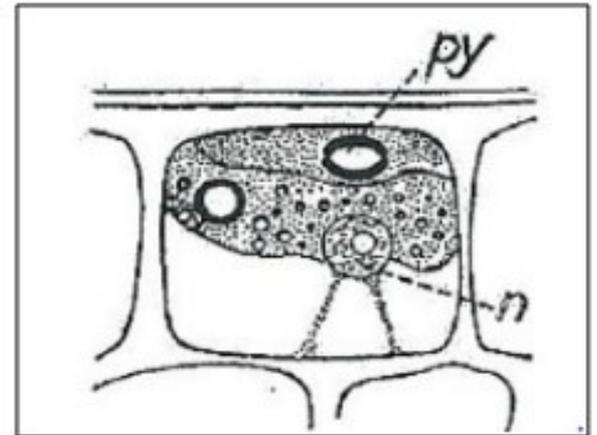


Document 3 : organisation histologique du thalle foliacé d'*Ulva lactuca*

L'observation des cellules montre la présence d'un **unique chloroplaste par cellule**, à l'origine de la couleur verte de l'algue et surtout de son autotrophie au carbone et à l'azote. Les thylakoïdes contiennent de la chlorophylle a et b ainsi que des caroténoïdes.

Un ou deux **pyrénoïdes**, points denses se trouvant dans le chloroplaste, renferme la **RubisCO** ainsi que des anhydrases carboniques, ce qui permet de réduire la photorespiration et d'améliorer ainsi le rendement de la photosynthèse. Les pyrénoïdes sont fréquemment entourés de **grains d'amidon** qu'il est alors possible de mettre en évidence par coloration à l'eau iodée.

Le noyau peut être visible mais se retrouve fréquemment masqué dans la préparation par le chloroplaste.



Document 4 : schéma d'interprétation de l'organisation structurale d'une cellule

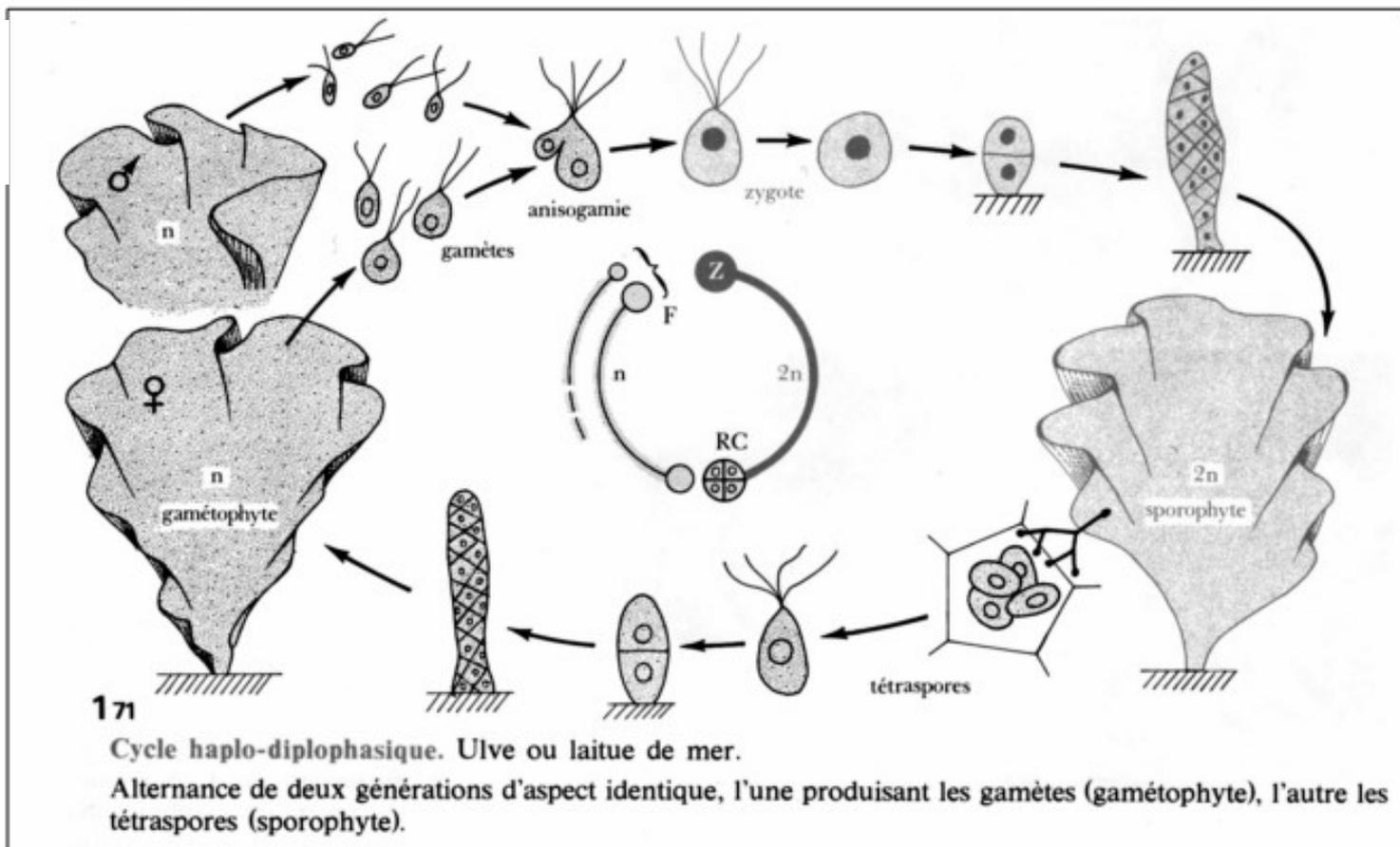
On n'observe pas de différenciation cellulaire, chaque cellule du thalle peut se diviser d'où la croissance diffuse du thalle en lame.

Il existe une exception à l'absence de différenciation des cellules : les cellules situées sur la marge du thalle sont impliquées dans la reproduction sexuée et forment des gamétophytes ou des sporophytes en fonction de la phase du cycle de développement.

En effet, l'Ulve a un cycle de développement haplo-diplophasique isomorphe c'est à dire que le gamétophyte et le sporophyte ne peuvent être distingués que par la nature des produits émis (gamètes ou spores).

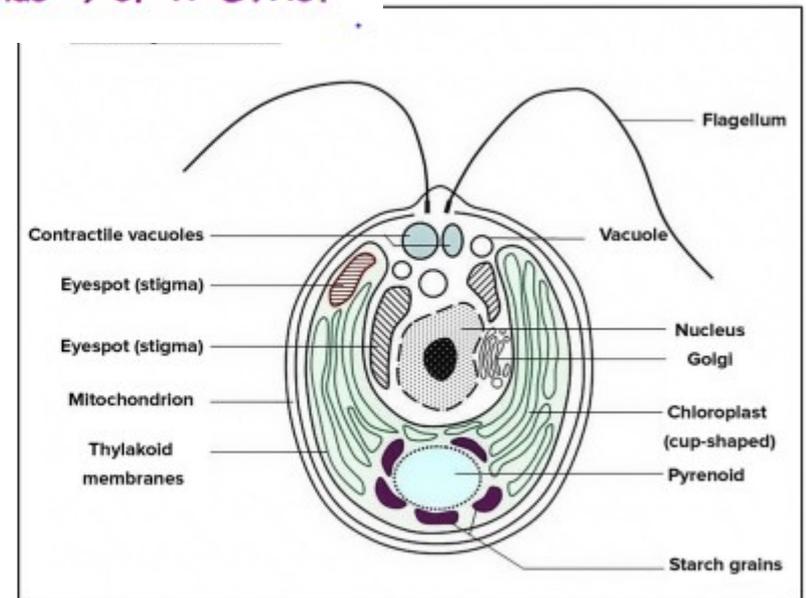
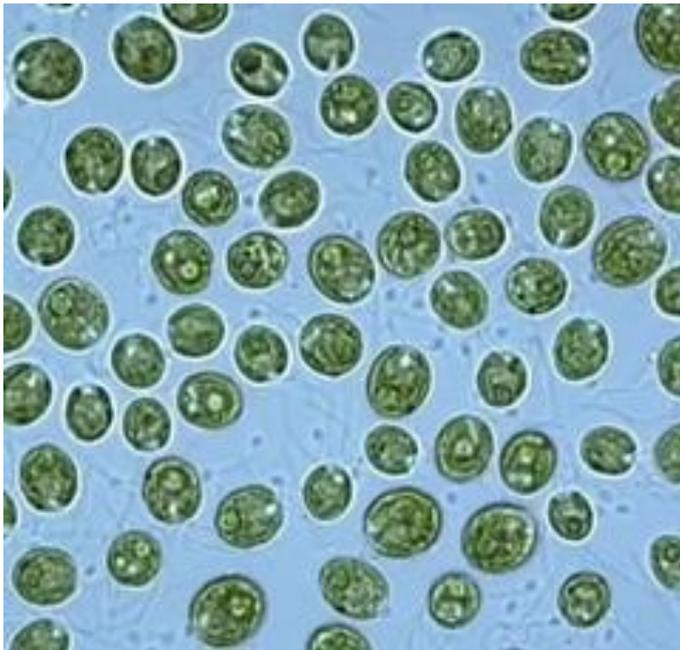
Il est à noter que les cellules reproductrices sont flagellées, les gamètes possèdent deux flagelles égaux alors que les spores en possèdent 4. On observe également une hétérogamie, les gamètes mâles étant plus petits que les femelles et une sexualisation des spores produisant des gamétophytes mâles et des gamétophytes femelles.

Document 5 : cycle de développement de l'Ulve
(à ne PAS connaître mais à comprendre)



1.2 organisation d'une algue verte unicellulaire, *Chlamydomonas* → cf TP SVA3.

Chlamydomonas est une algue verte unicellulaire d'environ 10 μm appartenant aux **Chlorobiontes**, elle peut se déplacer activement dans l'eau douce grâce à **2 flagelles tracteurs** et par **phototropisme positif** du fait d'un granule de pigments, le **stigma**, dans son chloroplaste. Ce chloroplaste à 2 membranes (chlorophylles a et b) possède également un **pyrénoïde**.

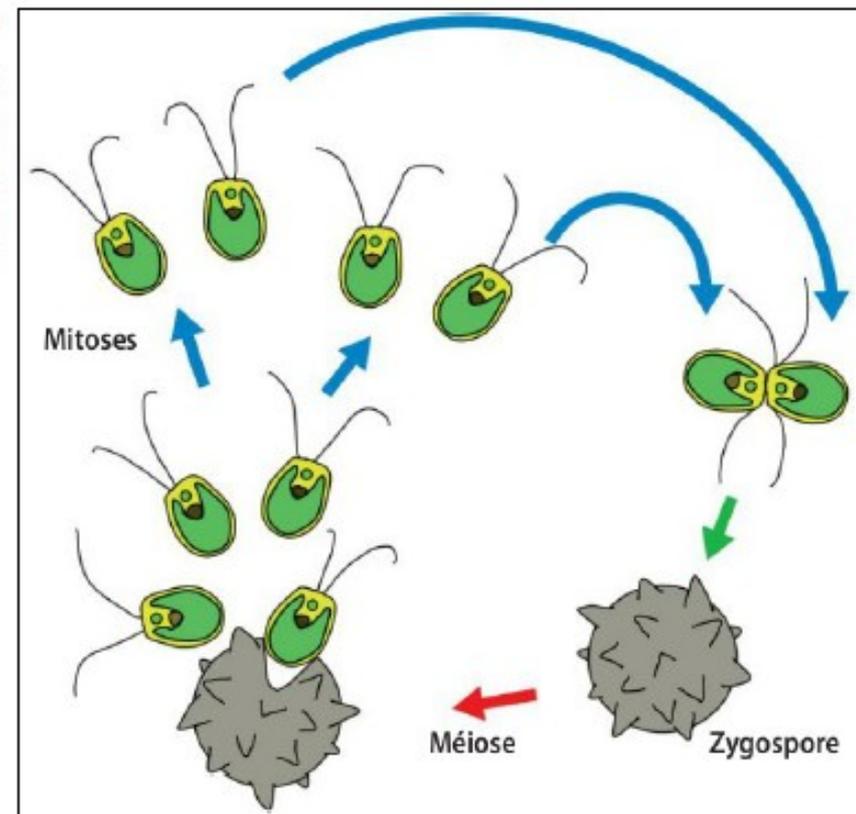


Document 26 : organisation cellulaire de *Chlamydomonas*



Chlamydomonas au MO

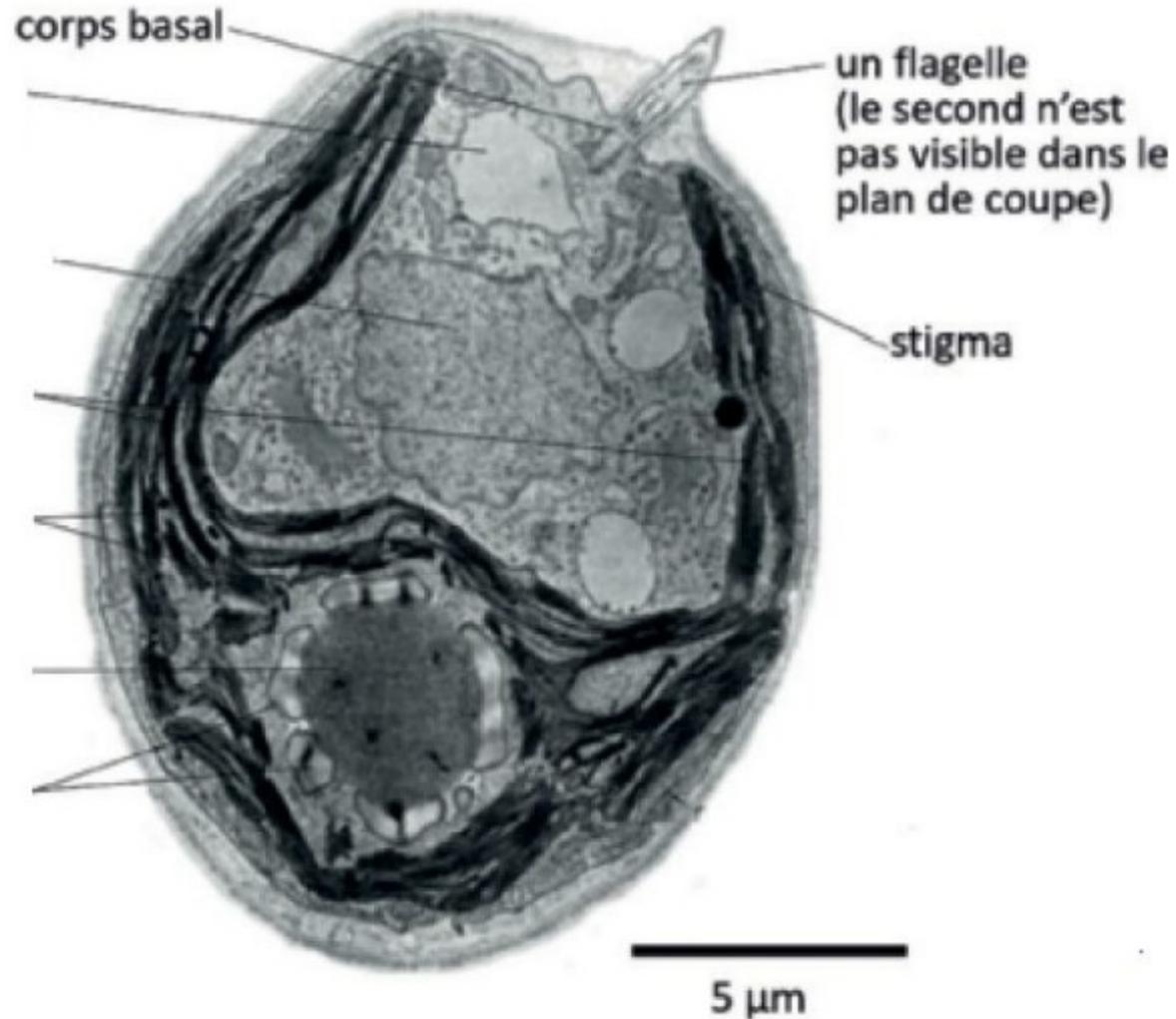
En environnement favorable, Chlamydomonas se multiplie par mitoses haploïde de manière asexuée, dans le cas dans environnement carencé, deux Chlamydomonas haploïdes peuvent fusionner pour former un zygote diploïde non flagellé qui subit directement une méiose pour reformer 4 nouvelles cellules haploïdes et flagellées.



Document 27 : cycle de développement de Chlamydomonas

Activité 14 :

→ *Légender l'électronographie ci-dessous*



2. Observation d'algues rouges

Les Algues rouges appartiennent au clade des Rhodophytes de la Lignée Verte. Elles présentent de **thalles de type cladomiens** ramifiés dérivant des nématothalles.

On distingue les **axes à croissance indéfinie**, les **cladomes**, des **axes à croissance limitée**, les **pleuridies**.

Sur un petit nématothalle, certains filaments prennent une importance particulière, ils s'allongent et augmentent de diamètre, constituant chacun l'axe d'un cladome primaire. Sur les côtés de ces axes, se détachent les pleuridies, bouquets de filaments courts abondamment ramifiés et disposés en verticilles.

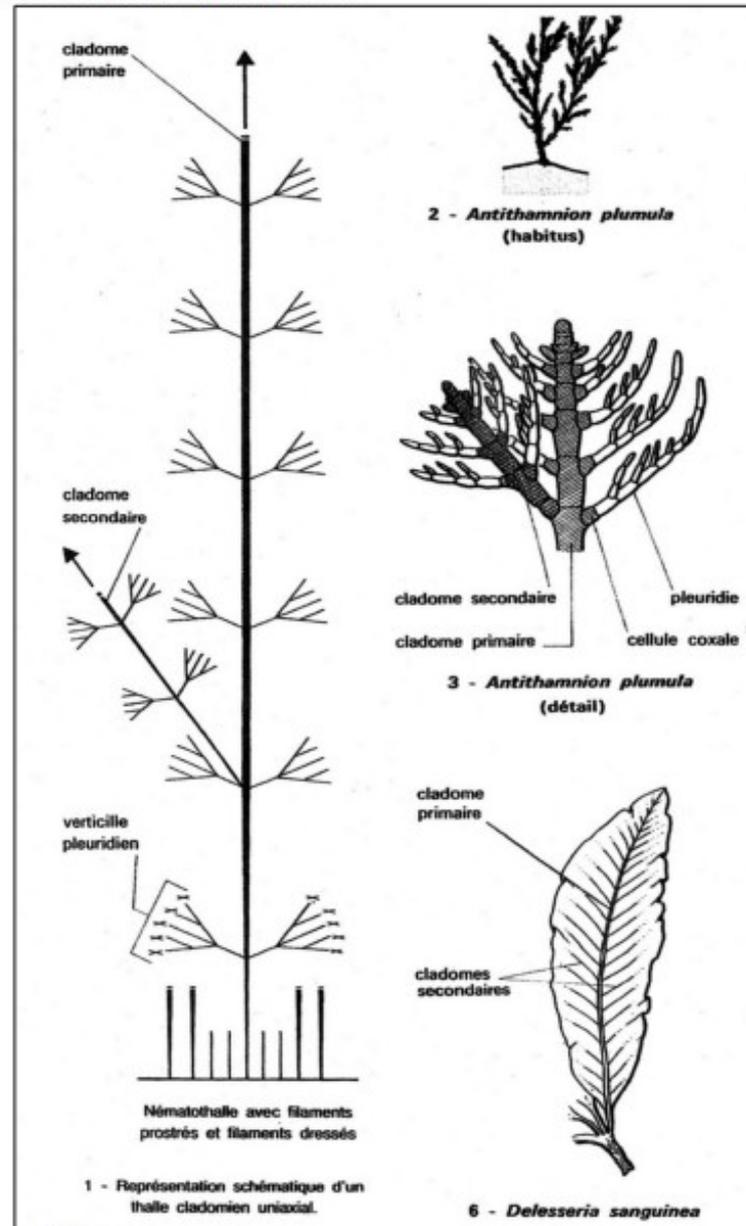
Chaque cladome primaire porte des cladomes secondaires de même constitution, remplaçant partiellement les pleuridies ou se formant à leur aisselle.

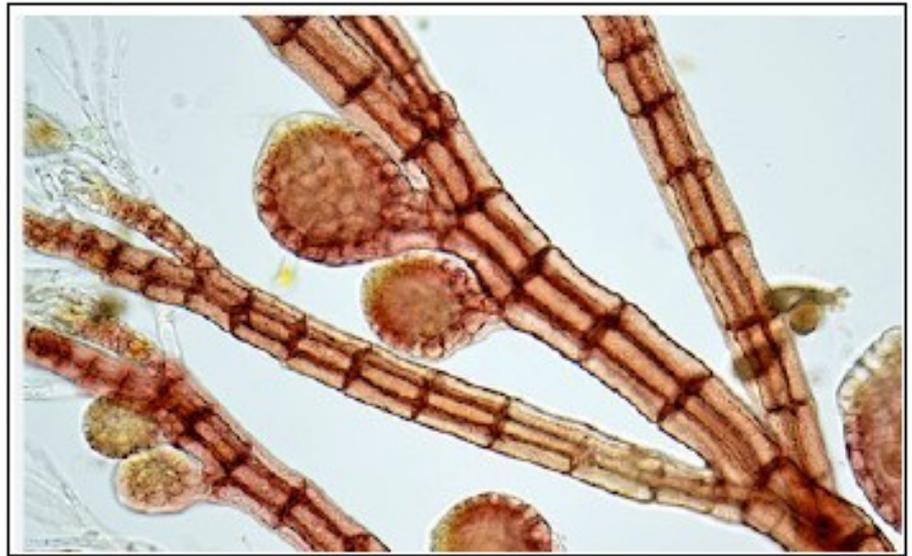
Il y a ici aussi **téломisation de la croissance**, seule la cellule apicale est responsable de la croissance, celle-ci se divise en une nouvelle cellule apicale et une cellule sous-apicale, qui se divise perpendiculairement pour être à l'origine des pleuridies.

On peut ainsi comparer l'architecture d'un thalle cladomien à celle d'une tige feuillée de Cormophyte :

- comparaison morphologique : le cladome primaire porte des cladomes secondaires situés à l'aisselle de pleuridies comme la tige porte les rameaux secondaires à l'aisselle de feuilles,
- comparaison physiologique : le cladome a une croissance indéfinie comme la tige et les rameaux, tandis que les pleuridies ont une croissance définie comme les feuilles.

Document 7 : les cladithalles de Rhodophytes





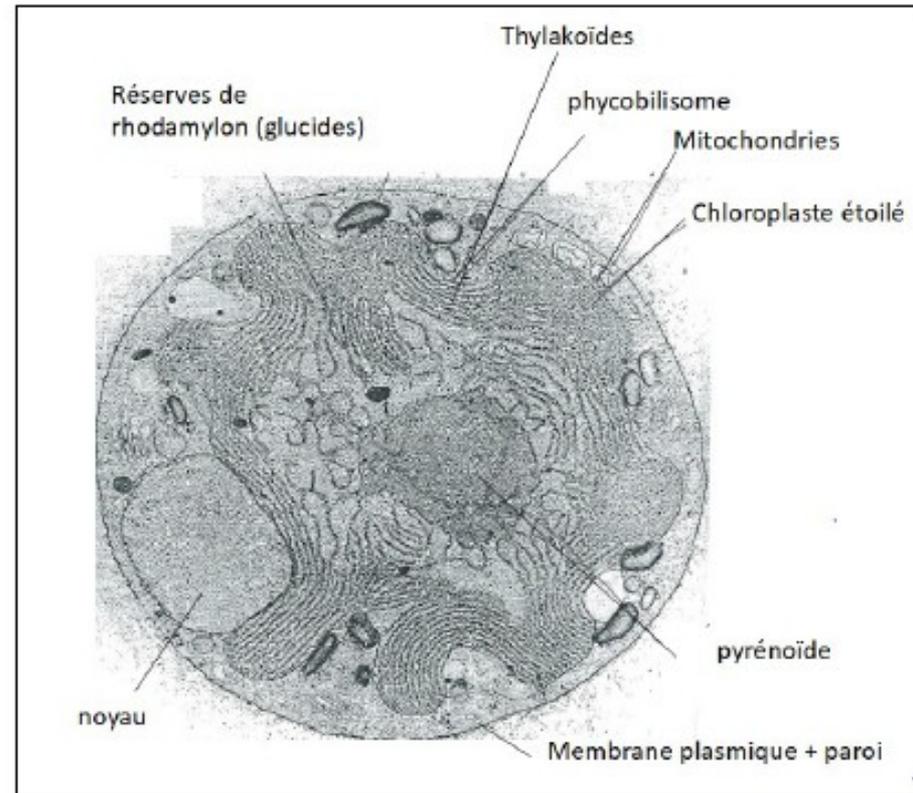
Document 7 : observation du thalle de Polysiphonia à l'œil nu et au microscope

Activité 2 :

- *Légender les photographies du document 6.*
- *Observer une Polysiphonia dont la lame foliacée à été préalablement déployée*
- *Réaliser un montage entre lame et lamelle d'un petit fragment de thalle dans une goutte d'eau et un 2^e montage d'un autre fragment aplati dans une goutte de lugol.*
- *Observer au microscope et réaliser un dessin légendé.*

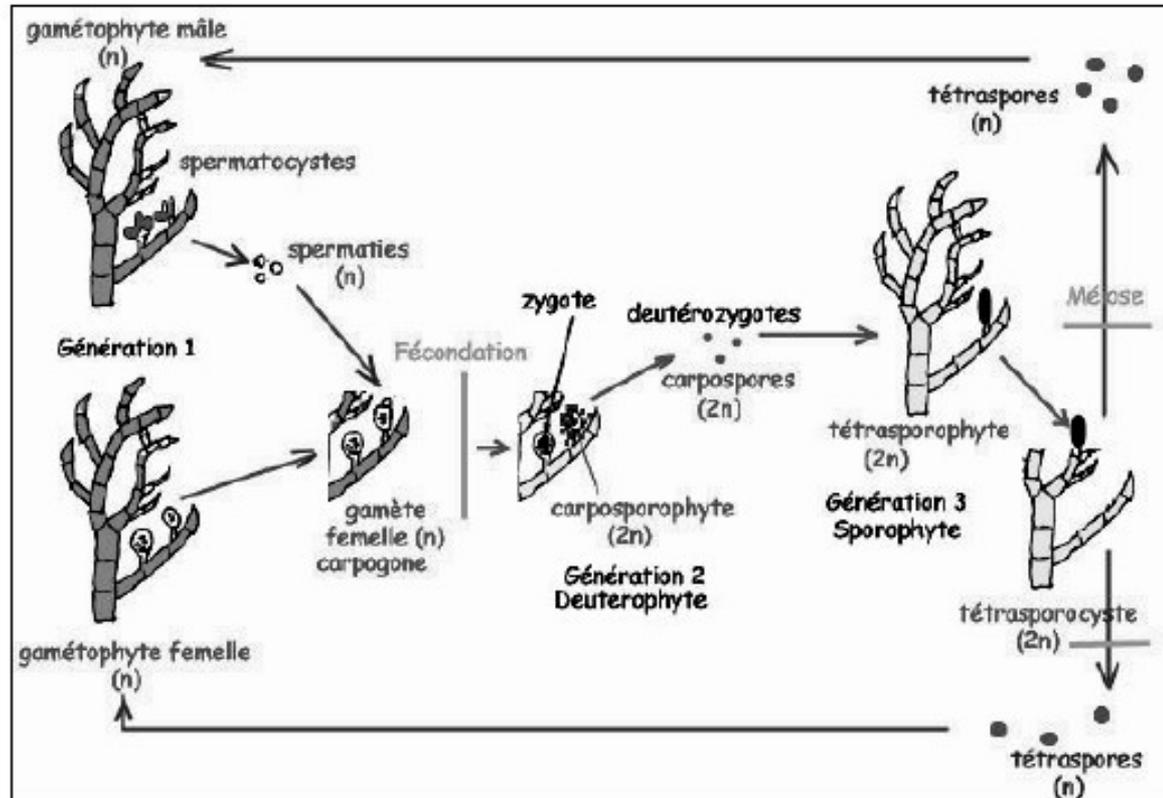
L'observation microscopique montre que les filaments sont constitués de rangées de cellules autour d'une **matrice extracellulaire formée de parois cellulaires gélifiées et transparentes**. La paroi est **très riches en alginate et en agar**, des polymères osidiques très hydrophiles à l'origine de la souplesse du thalle et de sa résistance à la dessiccation. Ces agars sont très utilisés dans l'industrie agro-alimentaire comme gélifiant.

L'observation permet également de mettre en évidence des **chloroplastes avec uniquement de la chlorophylle a**, mais la couleur verte est **masquée par un autre pigment, la phycoérythrine**, du groupe des phycobilines, des pigments retrouvés chez différentes algues et chez les cyanobactéries. Les **réserves sont stockées dans le cytoplasme sous une forme proche de l'amidon, le rhodamylon**, colorable également à l'eau iodée.



Document 8 observation au MET d'une cellule de Rhodophyte

Les cycles de développement des Rhodophytes peuvent être di ou trigénéétique comme celui d'Antithamnion ! Ces cycles comportent un carposporophyte entre le gamétophyte et le méiosporophyte, parasite du gamétophyte femelle.



Document 9 : cycle de développement d'Antithamnion (à ne PAS connaître mais à comprendre)

3. observation d'algues brunes

3.1 Observation d'une algue brune pluricellulaire, *Fucus vésiculosus*

Fucus vésiculosus appartient au clade des **Phéophytes** et plus largement à celui des **Straménopiles**.

Les algues brunes du genre *Fucus* se récoltent à marée basse et forment une partie du varech, source d'engrais utilisée pour les terrains agricoles près des côtes bretonnes et normandes.

Le thalle est un **cladothalle** plusieurs fois dichotomisé mais sans pleuridies distinctes, en forme de ruban.

Ces rubans possèdent des **renflements** ou **aérocystes** jouant un rôle dans le port dressé à marée haute.

Document 10 : observation d'un thalle de *Fucus*

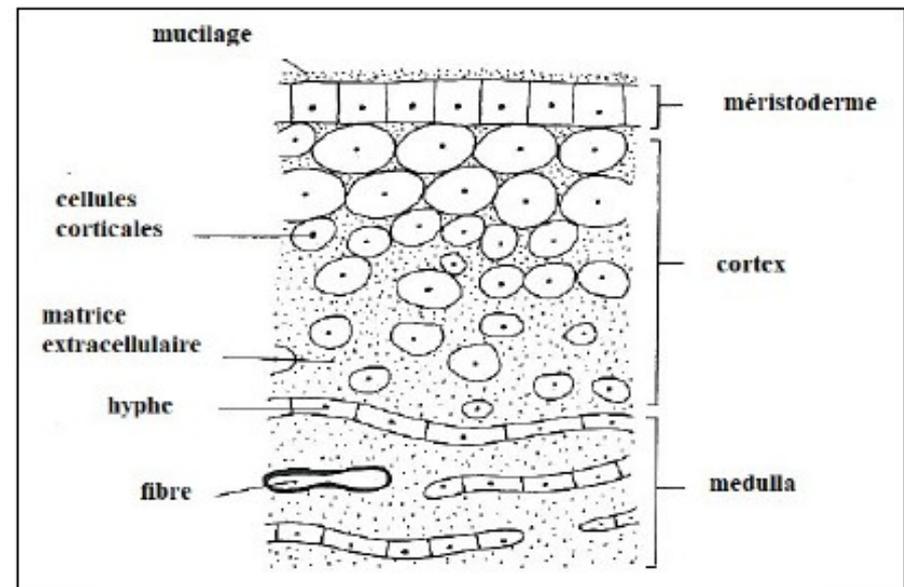


Activité 3 :

- Observer un *Fucus* dont le thalle à été préalablement déployé.
- Réaliser un montage entre lame et lamelle d'un petit fragment de thalle en coupe transversale dans une goutte d'eau et un 2^e montage d'un autre fragment aplatis dans une goutte de lugol.
- Observer au microscope et réaliser un dessin légendé à l'aide du document ci-dessous.

Le thalle présente un début de différenciation et une organisation relativement complexe. Une coupe transversale révèle un **méristoderme** épais et recouvert d'un **mucilage** hydrophile à rôle protecteur, suivi d'un **cortex** formé de cellules contenant de très nombreux chloroplastes. Ces chloroplastes contiennent des **chlorophylles a et c** ainsi que des **fucoxanthines** à l'origine de la couleur brune de l'algue. Les réserves ne sont pas visibles car ce sont ici des **polymères plus courts ou des polyalcools (ou polyols) solubles dans les vacuoles**. Ces cellules sont délimitées par des parois très épaisses. La zone médullaire est formée de cellules allongées formant des **hyphes** dans l'axe du thalle.

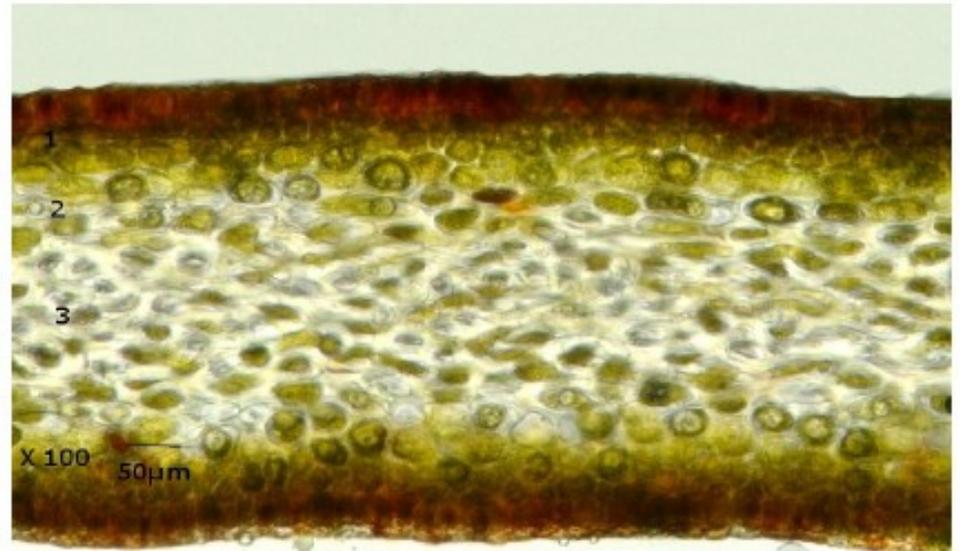
Ces contiennent peu d'organites dont quelques chloroplastes et possèdent des cloisons transversales perforées qui permettent la **conduction des sels minéraux**. Les cellules de la medula baignent dans une matrice extracellulaire gélifiée, l'ensemble formant un **plectenchyme**.



Document 11 : histologie du fucus

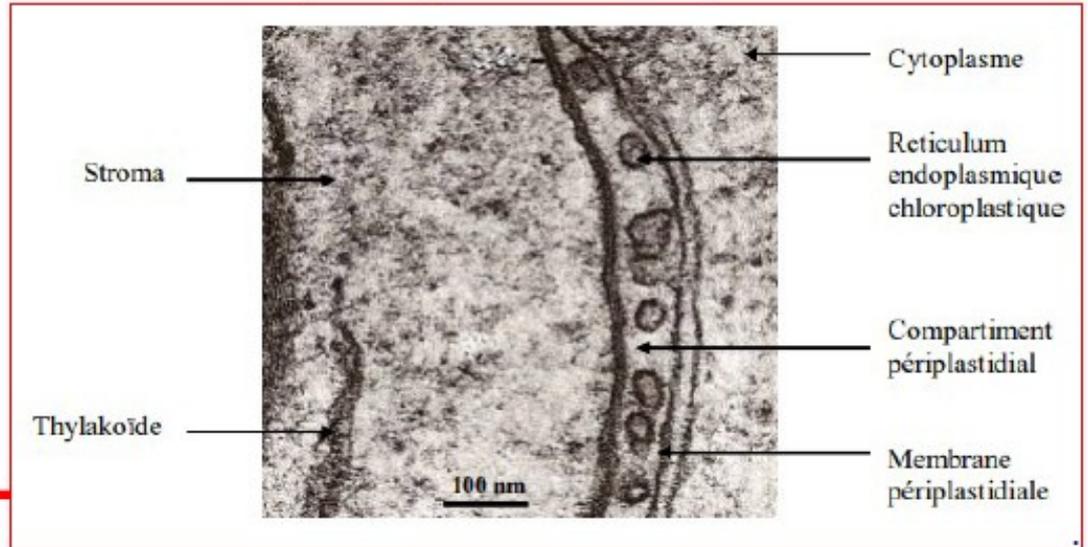
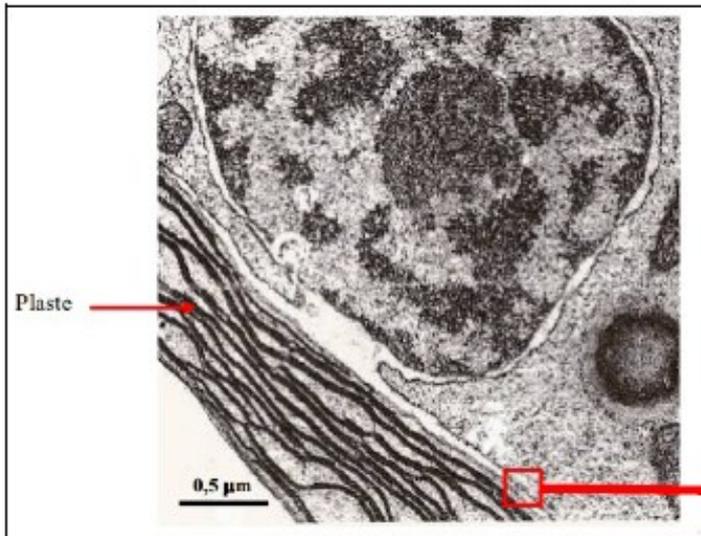
Activité 3 suite :

→ *Légender cette micrographie à l'inde du document 11*



Document 12 : observation en CT d'un thalle de Fucus

Les chloroplastes des Straménopyles présentent 4 membranes qui témoignent d'une endosymbiose secondaire.

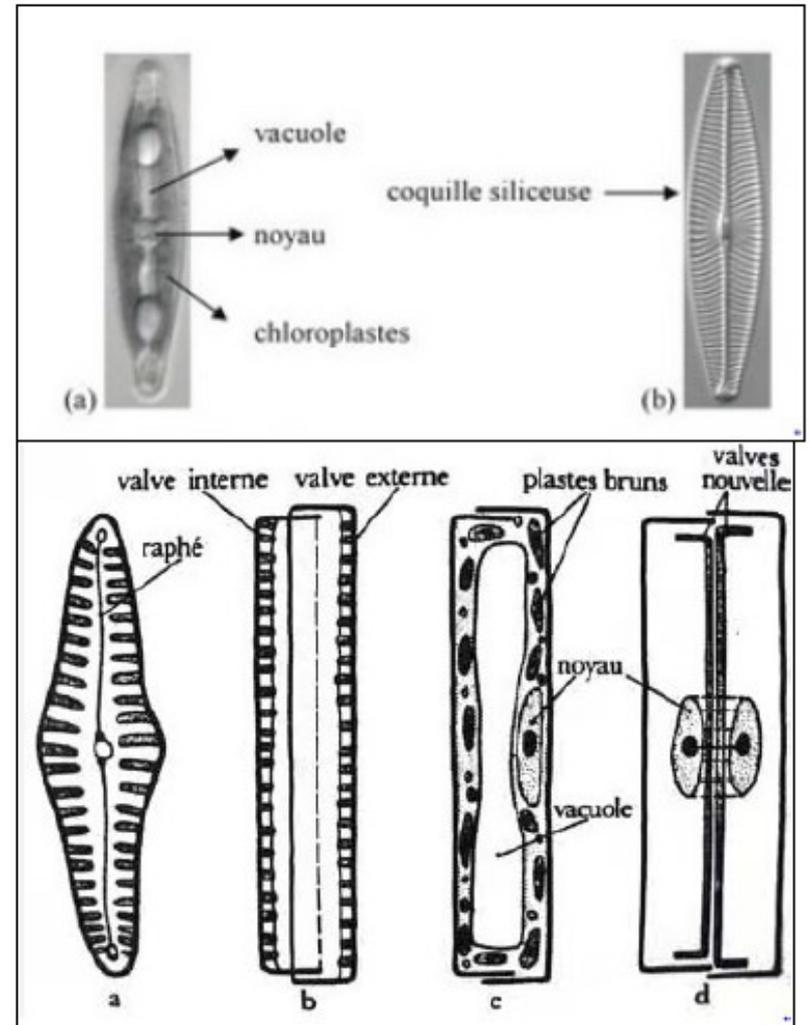


Document 13 : ultrastructure d'une cellule de Cryptophytes possédant des chloroplastes à 4 membranes comparables à ceux des Phéophytes et zoom montrant le détail des membranes plastidiales

3.2 Observation d'algues brunes unicellulaires, les Diatomées → cf TP SVA3.

Les Diatomées sont des **Eucaryotes unicellulaires photolithotrophes** appartenant au taxon des **Straménopiles de la Lignée Brune**. Elles se caractérisent par la présence de **chloroplastes à 4 membranes** qui témoignent d'une **endosymbiose secondaire**, possédant de la **chlorophylle a et c** et un **pyrénoïde**, analogue des carboxysomes de cyanobactérie, qui concentre grâce à l'anhydrase carbonique, le CO_2 à proximité de la Rubico.

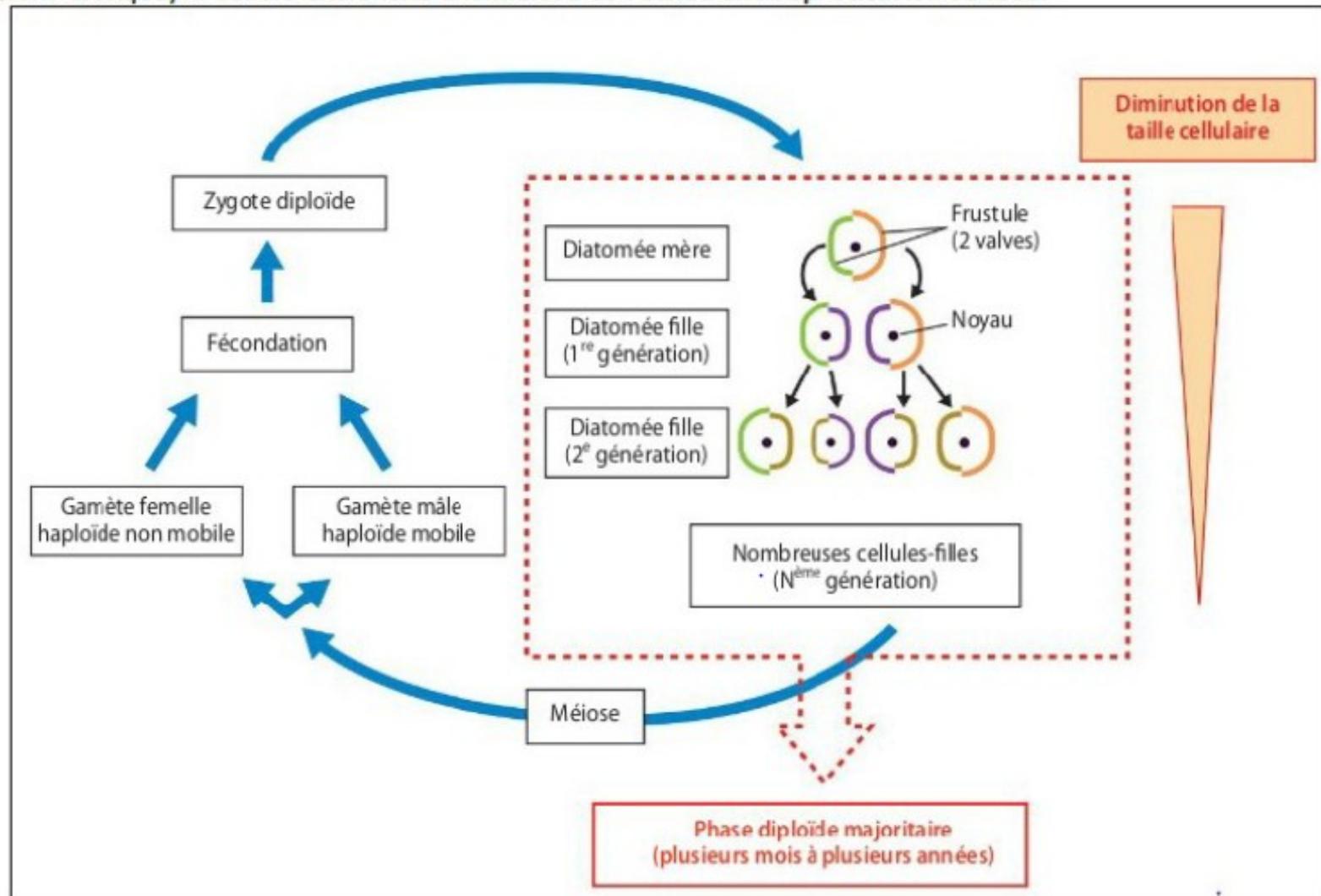
Elles sont présentes dans tous les milieux aquatiques avec une préférence pour les eaux froides. Elles peuvent vivre isolées ou en colonie, être libres ou fixées. Les formes pélagiques appartiennent au phytoplancton, les formes benthiques au microphytobenthos. Les diatomées sont un **constituant majeur du phytoplancton participant à 50 % de la production primaire océanique globale**. Les Diatomées se déplacent également par **phototactisme positif**, elles sont **capables d'adapter leur flottabilité** en faisant varier le volume de **globules lipidiques** dans leur cytosol, qu'elles utilisent également comme réserve énergétique.



Document 24 : observation et schéma de l'organisation des Diatomées

Les diatomées sont également caractérisées par le fait qu'elles sont les **seuls organismes unicellulaires à posséder un test siliceux** enveloppant la cellule, le **frustule**. Le frustule est **formé de deux valves emboîtées**.

Ce frustule conditionne le mode de reproduction de la cellule. En effet, les Diatomées se multiplie par mitoses mais les valves deviennent de plus en plus petites au fur et à mesure des divisions. Quand la taille de la diatomée devient critique, la cellule enclenche une méiose et réalise une reproduction sexuée.

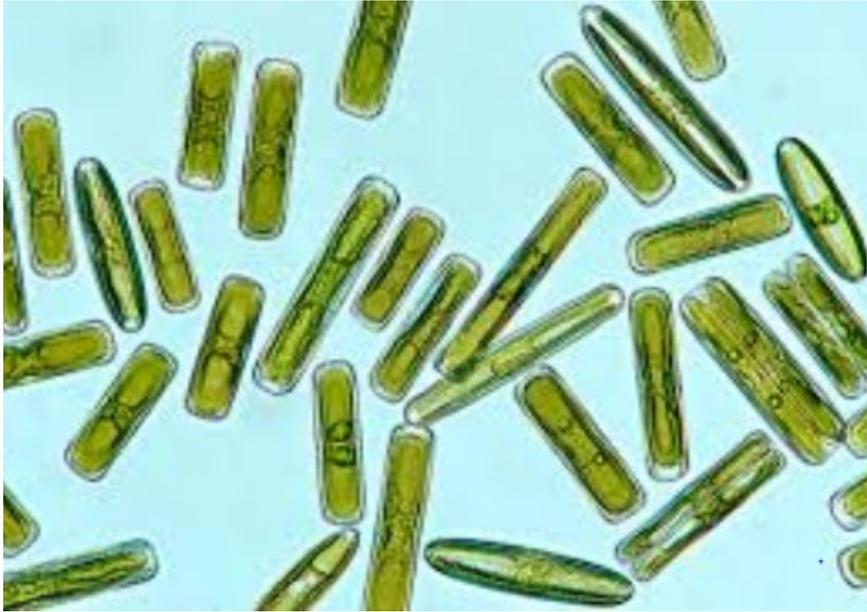


Document 25 : cycle de développement des Diatomées

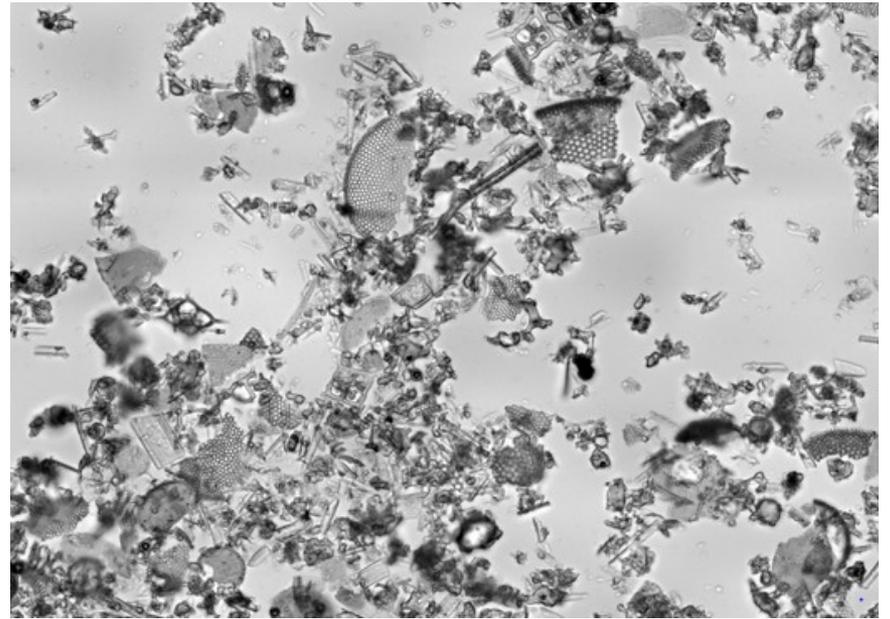
Activité 13 :

→ Réaliser un frottis de diatomite au dessus d'une lame et monter entre lamelle dans une goutte d'eau.

→ Observer les test de diatomées

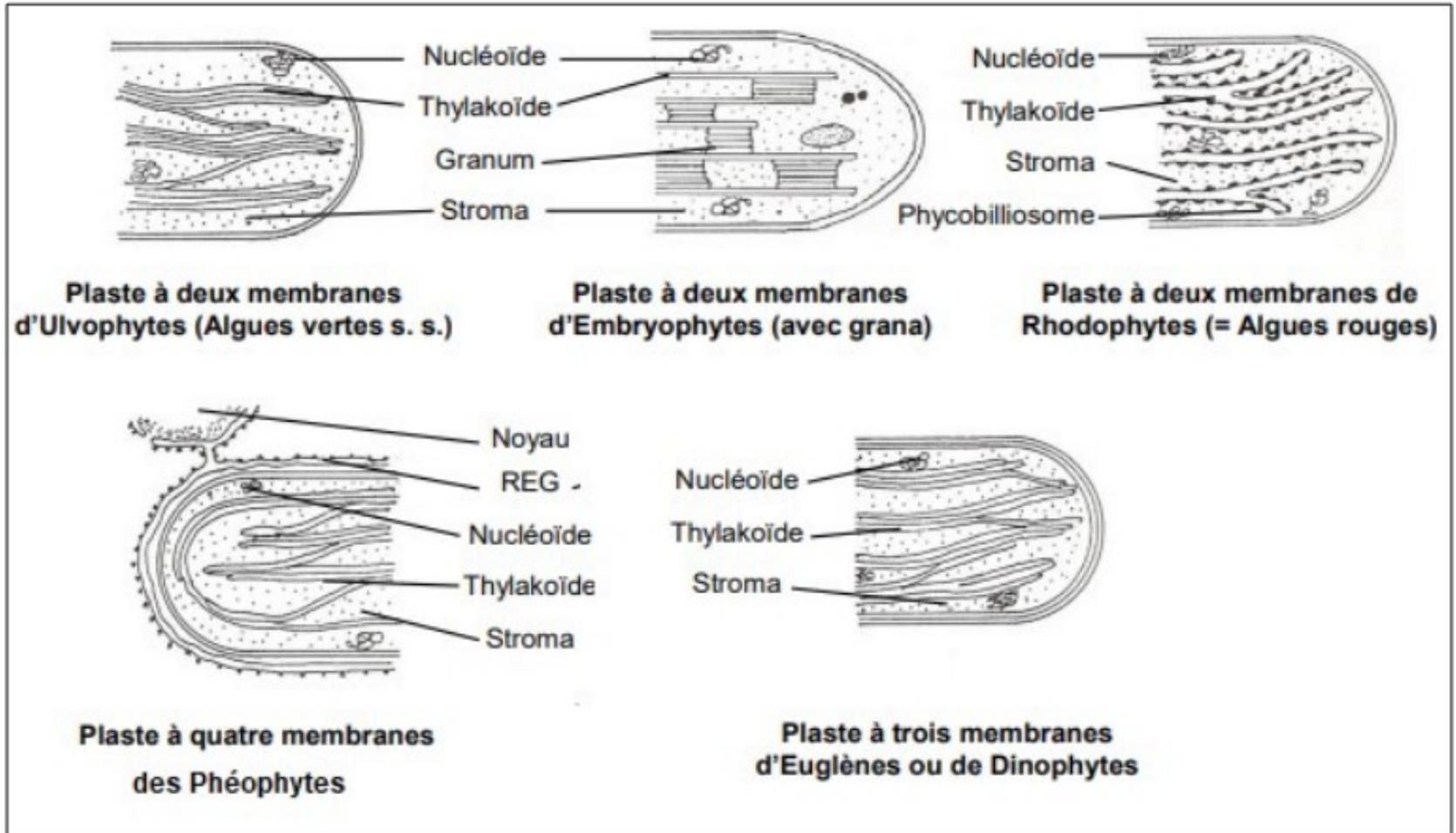


Diatomées vivantes au MO



Frottis de diatomite

4. bilan comparatif des plastes des différentes algues observées



Document 15 : diversité ultrastructurale des plastes des Algues et des embryophytes (pour comparaison)

		Chlorophytes	Rhodophytes	Phéophytes
Chloroplaste	L'enveloppe	2 membranes (endosymbiose primaire)	2 membranes (endosymbiose primaire)	4 membranes (endosymbiose secondaire d'une algue unicellulaire)
	l'agencement des thylakoïdes	groupés par 3 ou par 6, avec des thylakoïdes qui joignent les groupes entre eux.	isolés, avec phycobilisomes	par 3, en bandes séparées entre elles.
	les pigments	chlorophylle a et b, caroténoïdes	chlorophylle, phycobilines	chlorophylle a et c, nombreux caroténoïdes fucoxanthine chez le fucus
	Pyrénoïde*	Intrplastidial, parfois entouré d'amidon	intrplastidial, absent chez certaines	appendu au plaste (en saillie, forme de poire)
	Stigma*	Intrplastidial pour algues unicellulaires, présent dans les gamètes et spores de <i>Ulva lactuca</i>)	absent (pas de formes flagellées chez les Rhodophytes)	intra ou extraplastidial dans les gamètes de <i>Fucus vesiculosus</i>
produits de la photosynthèse		amidon intraplastidial	amidon floridéen (α 1-6 glucane proche de l'amylopectine) extraplastidial	polyosides solubles extraplastidiaux

Document 16 : caractéristiques structurales et biochimiques des trois grands clades d'Algues

II. Apports de données biochimiques et moléculaires dans la construction d'une phylogénie.

1. Les apports d'une chromatographie sur couche mince des pigments photosynthétiques

Une chromatographie peut être réalisée à partir des pigments des Algues. Il est essentiel de choisir un **solvant apolaire** car les pigments sont plus ou moins **hydrophobes** et donc enchâssés dans la membrane des thylakoïdes. La migration se fait sur du papier Whattmann généralement.

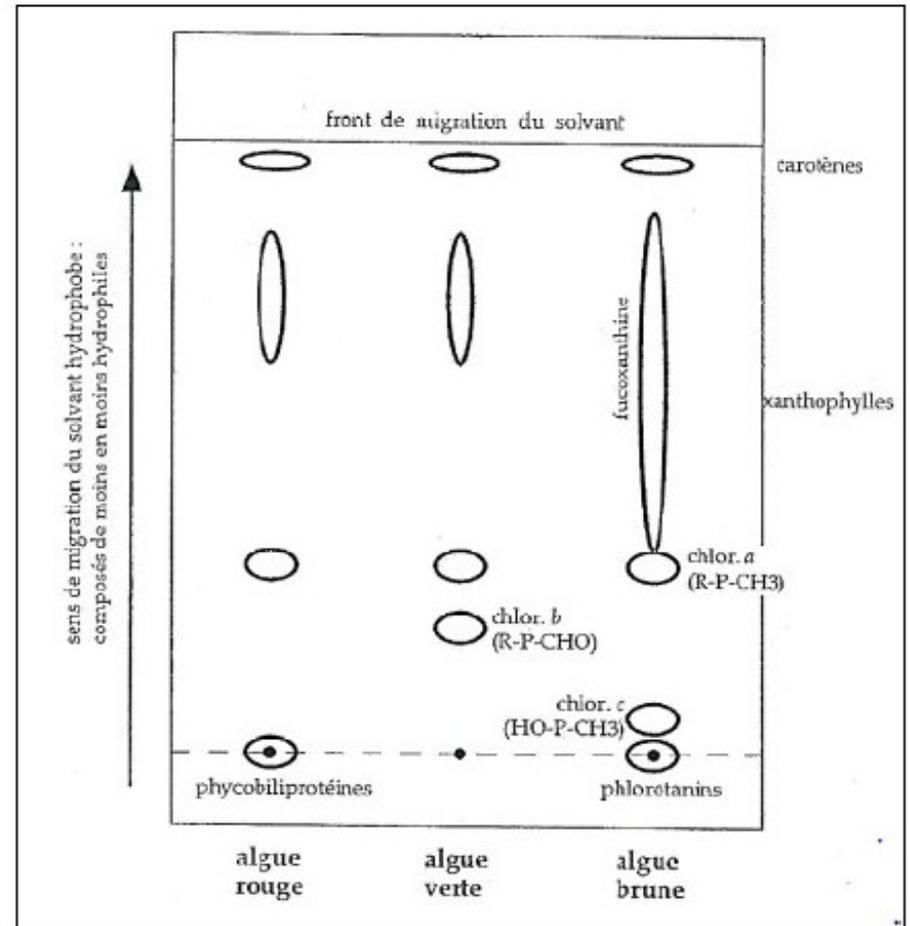
Activité 4 :

→ Déterminer le R_f de chaque pigment photosynthétique.

→ Sachant que les chlorophylles peuvent être utilisées comme critère moléculaires dans la réalisation de phylogénie, que suggère ces résultats concernant le lien de parenté entre les algues vertes, rouges et brunes.



Document 17 : chromatographie des pigments de différentes algues



2. Les apports de la phylogénie moléculaire

2.1 recherche des liens de parentés évolutive entre les chloroplastes et les Eucaryotes, les Eubactéries et les Archées.

L'ARN ribosomique (ou ARNr) 16S ou 18S de chaque espèce étudiée est soumis à une digestion partielle par l'ARNase T1. Les oligonucléotides produits par cette réaction sont séparés par électrophorèse bidimensionnelle. Chaque espèce peut donc être caractérisée par le profil de migration des oligonucléotides provenant de son ARNr 16S ou 18S.

En comparant les espèces deux à deux, on calcule un coefficient d'association entre les ARN des deux espèces, compris entre 0 et 1 et qui est d'autant plus grand que la ressemblance entre leurs ARNr est importante.

• Résultats

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	-												
2 <i>Lemna minor</i>	0,29	-											
3 Lymphocyte B humain	0,33	0,36	-										
4 <i>Escherichia coli</i>	0,05	0,10	0,06	-									
5 <i>C. vibrioforme</i>	0,06	0,05	0,06	0,24	-								
6 <i>Bacillus firmis</i>	0,08	0,06	0,07	0,25	0,22	-							
7 <i>C. diphtheriae</i>	0,09	0,10	0,07	0,28	0,22	0,34	-						
8 <i>Aphanocapsa</i>	0,11	0,09	0,09	0,26	0,20	0,26	0,23	-					
9 Chloroplaste (<i>L. minor</i>)	0,08	0,11	0,06	0,21	0,19	0,20	0,21	0,31	-				
10 <i>M. thermoautotrophicum</i>	0,11	0,10	0,10	0,11	0,06	0,11	0,12	0,11	0,14	-			
11 <i>M. ruminantium</i>	0,11	0,10	0,10	0,12	0,07	0,13	0,12	0,11	0,12	0,51	-		
12 <i>Methanobacter sp.</i>	0,08	0,13	0,10	0,07	0,06	0,06	0,09	0,10	0,10	0,25	0,25	-	
13 <i>M. barkeri</i>	0,08	0,07	0,07	0,12	0,09	0,12	0,10	0,10	0,12	0,30	0,24	0,32	-

Pour les **Eucaryotes** (lignes 1 à 3), on a analysé l'ARNr 18S.

Pour les **Procaryotes**, Eubactéries (lignes 4 à 8) et Archées (lignes 10 à 13) ainsi que pour le **chloroplaste** (ligne 9), on a analysé l'ARNr 16S.

Parmi les **Eubactéries**, *Aphanocapsa* est la seule cyanobactérie.

Tous les ARN 16S des stromas chloroplastiques étudiés précédemment donnent des résultats similaires à ceux obtenus avec les chloroplastes de l'Angiosperme *Lemna minor*, la lentille d'eau (ligne 9).

Activité 5 :

→ Analyser les résultats obtenus.

2.2 établissement d'une phylogénie des plastes de la lignée Verte

On cherche à préciser les modalités d'acquisition, au cours de l'évolution, des chloroplastes par les eucaryotes photosynthétiques. On se limite aux Eucaryotes possédant des plastes à deux membranes

Les plastes à deux membranes se rencontrent dans la **lignée verte**, qui regroupe les Glaucophytes, les Chlorobiontes et les Rhodophytes.

On dispose des séquences partielles des gènes d'ARNr 16S du stroma de plastes d'organismes de la lignée verte ou du cytoplasme de cyanobactéries. Les résultats sont présentés sur le document 19.

Pour faciliter la lecture, les séquences sont données sous la forme d'un tableau dans lequel la séquence d'*Arabidopsis thaliana* sert de référence

A partir de ce document, on construit une **matrice de distance**.

Dans la matrice, on constate que la **plus petite distance** entre deux taxons est entre *Arabidopsis* et *Porphyra*. On peut donc proposer un début d'arbre phylogénétique où la **taille des branches** est la **distance au nœud**, soit $12,00/2 = 6,00\%$:



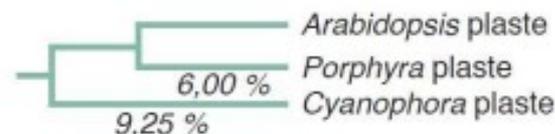
Arbre phylogénétique en construction (1^{er} étape)

On construit ensuite une **nouvelle matrice** en calculant la **distance** entre les taxons non placés sur l'arbre (*Anabaena*, *Cyanophora*) et le groupe déjà formé (*Arabidopsis* + *Porphyra*). On calcule alors, pour le groupe *Arabidopsis* + *Porphyra*, des **distances moyennes**. Par exemple, la distance entre *Anabaena* et le groupe *Arabidopsis* + *Porphyra* est égale à la moyenne de la distance entre *Anabaena* et *Arabidopsis* et de la distance entre *Anabaena* et *Porphyra*, soit : $(38,00 + 31,00)/2 = 34,50\%$. Suivant cette méthode, on peut donc proposer la matrice suivante :

Taxons \ Taxons	<i>Arabidopsis</i> + <i>Porphyra</i>	<i>Anabaena</i>	<i>Cyanophora</i>
<i>Arabidopsis</i> + <i>Porphyra</i>	-	-	-
<i>Anabaena</i>	34,50	-	-
<i>Cyanophora</i>	18,50	29,00	-

Nouvelle matrice de distance en pourcentages

La **distance la plus courte** est maintenant la distance entre *Cyanophora* et le groupe *Arabidopsis* + *Porphyra*. On peut donc placer *Cyanophora* sur l'arbre (**distance au nœud** : $18,50/2 = 9,25\%$) :



Arbre phylogénétique en construction (2^{ème} étape)

On peut enfin réaliser une dernière **matrice** où on calcule la distance entre le dernier **taxon restant** (*Anabaena*) et le groupe *Arabidopsis* + *Porphyra* + *Cyanophora* en appliquant la même règle en **moyennant** à nouveau les **distances** : $(34,50 + 29,00)/2 = 31,75\%$. Cela permet de proposer cette dernière matrice :

Taxons \ Taxons	<i>Arabidopsis</i> + <i>Porphyra</i> + <i>Cyanoph.</i>	<i>Anabaena</i>
<i>Arabidopsis</i> + <i>Porphyra</i> + <i>Cyanophora</i>	-	-
<i>Anabaena</i>	31,75	-

Dernière matrice de distance en pourcentages

On peut donc placer *Anabaena* sur l'arbre (la **racine** sera placée à $31,75/2 = 15,88\%$) et proposer l'**arbre final** suivant :



Arbre phylogénétique (phylogramme) obtenu.

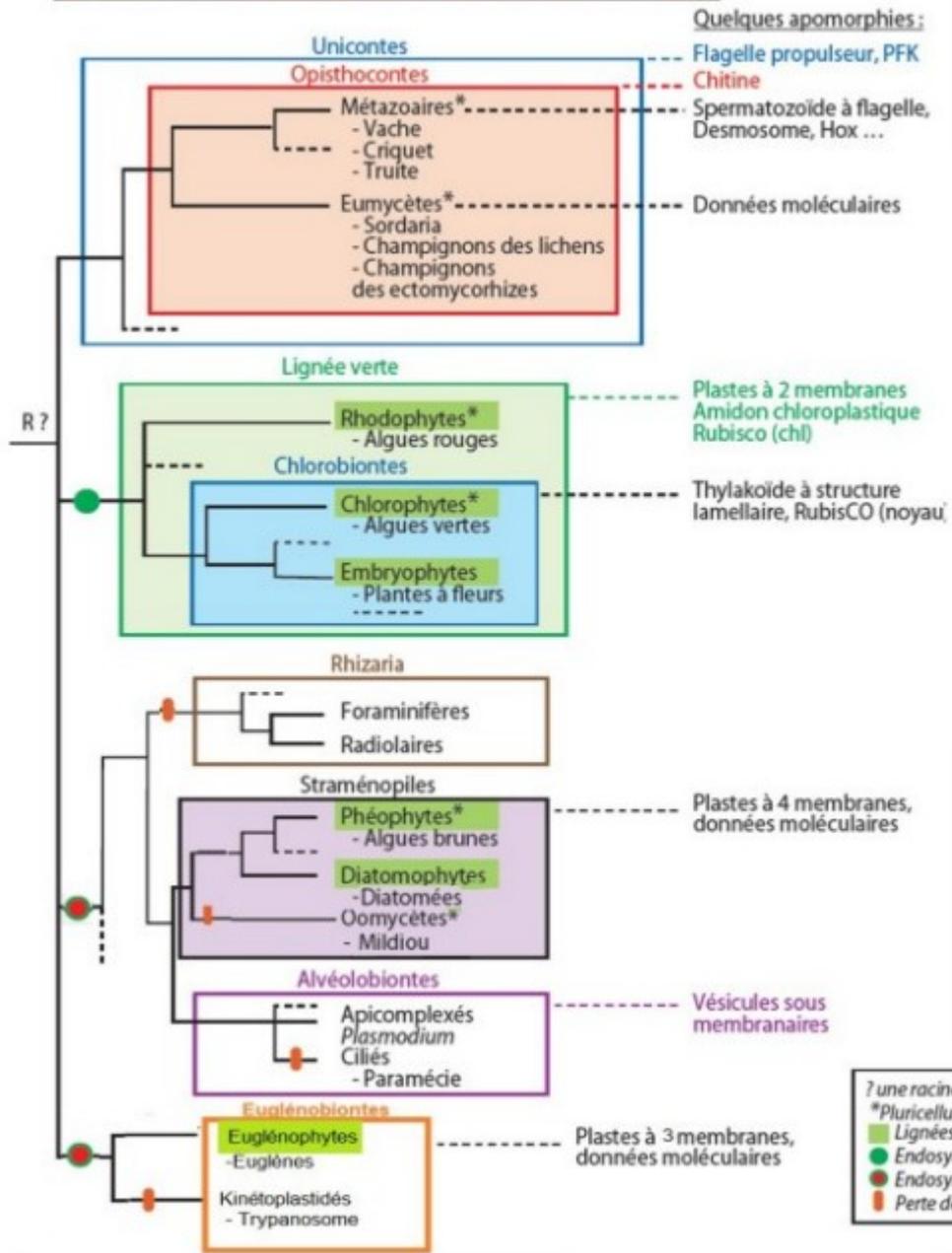
Notons qu'avec le WPGMA, on produit des arbres racinés.

III. En conclusion,

Activité 7 :

→ *A partir de l'ensemble des données, et en utilisant l'arbre phylogénétique simplifié des Eucaryotes (à la page suivante, expliquer en quoi les Algues constituent un groupe polyphylétique et résumer à l'aide d'un schéma les endosymbioses à l'origine des différents plastes des Algues étudiées.*

ARBRE PHYLOGÉNÉTIQUE SIMPLIFIÉ DES EUCARYOTES



Quelques apomorphies :

Flagelle propulseur, PFK

Chitine

Spermatozoïde à flagelle, Desmosome, Hox ...

Données moléculaires

Plastes à 2 membranes
Amidon chloroplastique
Rubisco (chl)

Thylakoïde à structure lamellaire, RubisCO (noyau)

Plastes à 4 membranes, données moléculaires

Vésicules sous membranaires

Plastes à 3 membranes, données moléculaires

? une racine sujette à discussion

*Pluricellularité

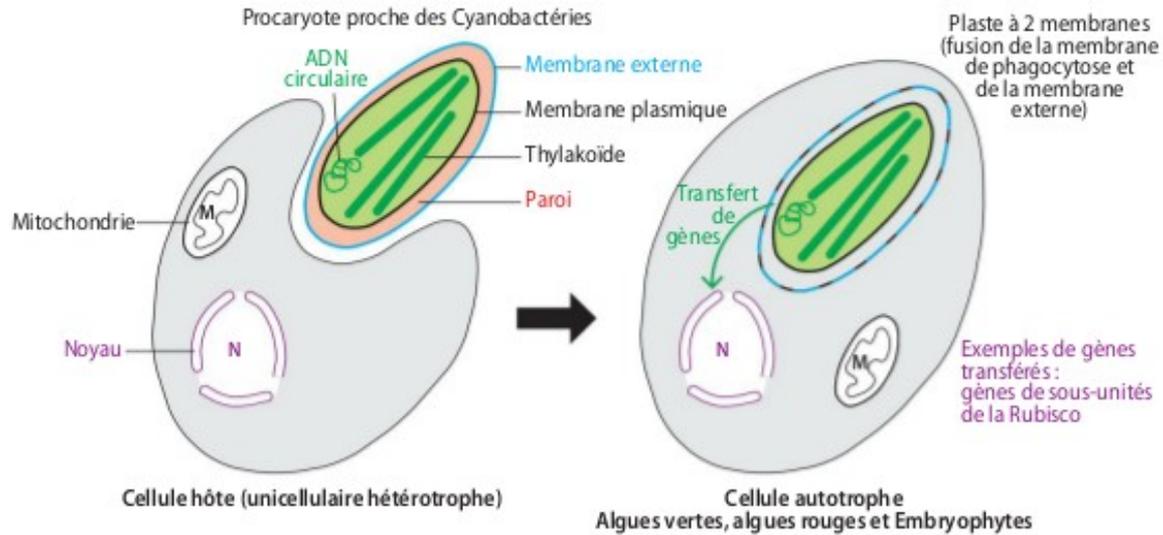
■ Lignées photosynthétiques

● Endosymbiose primaire

● Endosymbiose secondaire

■ Perte des plastes

A L'endosymbiose primaire fait apparaître les plastides de la lignée verte



B L'endosymbiose secondaire fait apparaître les plastides des algues brunes

