

# Diversité et position systématique des macroalgues

*Université Pierre et Marie Curie  
Station Biologique de Roscoff*

**Juillet 2011**

**Christophe Destombe**

# Rappels

## La systématique:

Méthode de classification biologique des êtres vivants fondée sur les **ressemblances** entre individus

*Postulat:* le monde vivant n'est pas un assemblage au hasard d'individus mais est constitué de **groupes** d'individus distincts, plus ou moins facilement reconnaissables, et qui peuvent être **hiérarchisés**.

Initialement basée sur des critères morphologiques [classification de Linné], elle prend en compte aujourd'hui l'évolution des espèces [systématique phylogénique].

# La systématique

## Définition :

*Science des êtres vivants ayant pour objet leur classification **rationnelle** et l'établissement d'une **nomenclature** aux règles **universelles** et fixes. Le rang d'un groupe dans la systématique se reconnaît à la désinence de son nom. Pour un groupe de même extension, cette désinence est trop souvent différente selon qu'il s'agit des animaux ou des plantes.*

*Librairie Larousse (1980)*

## ❖ Carl von Linné (1750)

- ↪ **nomenclature binominale**
- ↪ **notion de rangs**



# ***Le code de nomenclature botanique***

**(Voss 1983)**

<b><i>Rangs</i></b>	<b><i>désinences</i></b>
<b>Division-Embranchement- Phylum</b>	<b>.....phyta</b>
<b>Classe</b>	<b>....phyceae</b>
<b>Sous classe</b>	<b>....phycidae</b>
<b>Famille</b>	<b>.....aceae</b>
<b>Ordre</b>	<b>.....ales</b>
<b>Genre, espèce</b>	

# Historique

*Quelques précurseurs de la classification.....*

❖ de Candolle (1813)

↪ taxonomie

(80 000 espèces)



❖ Aristote (- 355)

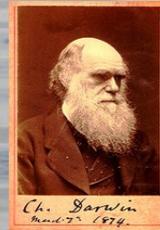
↪ classification



❖ Lamarck (1809)



❖ Darwin (1872)



↪ évolution (filiation)

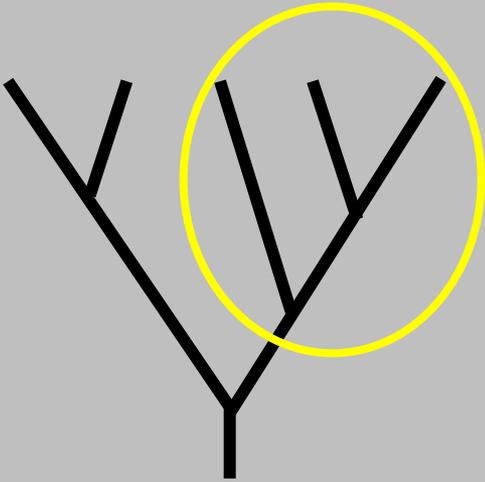
↪ systématique phylogénétique  
(cladogrammes)

Les **classifications modernes** sont « phylogénétiques », c'est-à-dire qu'elles distinguent des groupes – dits **monophylétiques** – qui réunissent chacun un ancêtre commun et toute sa descendance. Cette méthode tente de retrouver le **scénario historique de l'évolution**.

# Systematique phylogénétique

L'histoire du vivant est souvent représenté sous la forme d'arbres phylogénétiques, où des noeuds représentent des espèces ancestrales qui ont divergé en deux rameaux, portant chacun les espèces qui en sont issues.

**groupe monophylétique**



**Les arbres sont par nature mouvants suivant le degré de connaissance du clade étudié**

Cette vision rend compte de nombreux cas de spéciation, mais elle omet le rôle de phénomènes qui impliquent la fusion de matériels génétiques provenant d'espèces différentes.

.....

- classification arbitraire....

↳ critères et caractères utilisés

↳ ....les taxons de même rang n'ont rien en commun

exemple: le genre *Homo* (1 seule espèce vivante) et *Drosophila*  
(plus de 1500 espèces)

↳ les bactéries: un critère moléculaire

# Les algues?

- « *Algae: organismes fixés au substrat et vivant en milieu aquatique* » Linné (1758)
  - les algues... mais aussi les éponges, les coraux et les hépatiques...
  - Pas de classification à l'intérieur du groupe des algues !
- *Classification des algues d'après leur couleur* (Lamouroux 1813)
  - Idée reprise par (Harvey 1836)*
    - Melaospermae (**brun noir**)
    - Rhodospermae (**rouge**)
    - Chlorospermae (**vert**)
    - Diatomaceae (**doré**)



**Cette classification sera utilisée jusque dans les années 1970**

- ***Exemple: la classification de Pascher (1931)***

Algues rouges

Rhodophyta

Algues brun doré

Chromophyta

Cryptophyta

Algues vertes

Chlorophyta

Algues bleues

Cyanophyta

↳ procaryotes

# Les algues dans les classifications du vivant d'après les critères morphologiques

## Classification de Linné: 2 règnes

(basée principalement sur les mouvements):

Plantes **V**, **B**, **R**, **BI**

Animaux

## Classification de Copeland (1956): 4 règnes

(présence de noyau et complexité morphologique)

Monères **BI**

Protoctistes **V**, **B**, **R**

Plantes

Animaux

## Classification de Whittaker (1969): 5 règnes

(présence de noyau et complexité morphologique, mode de nutrition)

Monères **BI**

Protistes **B**, **V**

Plantes **V**, **B**, **R**

Champignons

Animaux

# Les algues dans les classifications du vivant d'après les critères morphologiques

## Classification de Margulis (1988): 5 règnes

(présence de noyau et complexité morphologique, mode de nutrition)

Monères **BI**

Protistes **B, V**

Plantes **V, B, R**

Champignons

Animaux



## Classification de Leedale (1974): 13 règnes

(Grand nombre de caractères morphologiques, cytologiques, biochimiques etc.)

**Monères**

**Algues rouges**

**Plantes**

**Euglénoides**

**Myxomycetes**

**Champignons**

**Eustigmatophytes**

**Haptophytes**

**Cryptomonades**

**Hétérocontes**

**Dinoflagellés**

**Mesozoaires**

**Animaux**

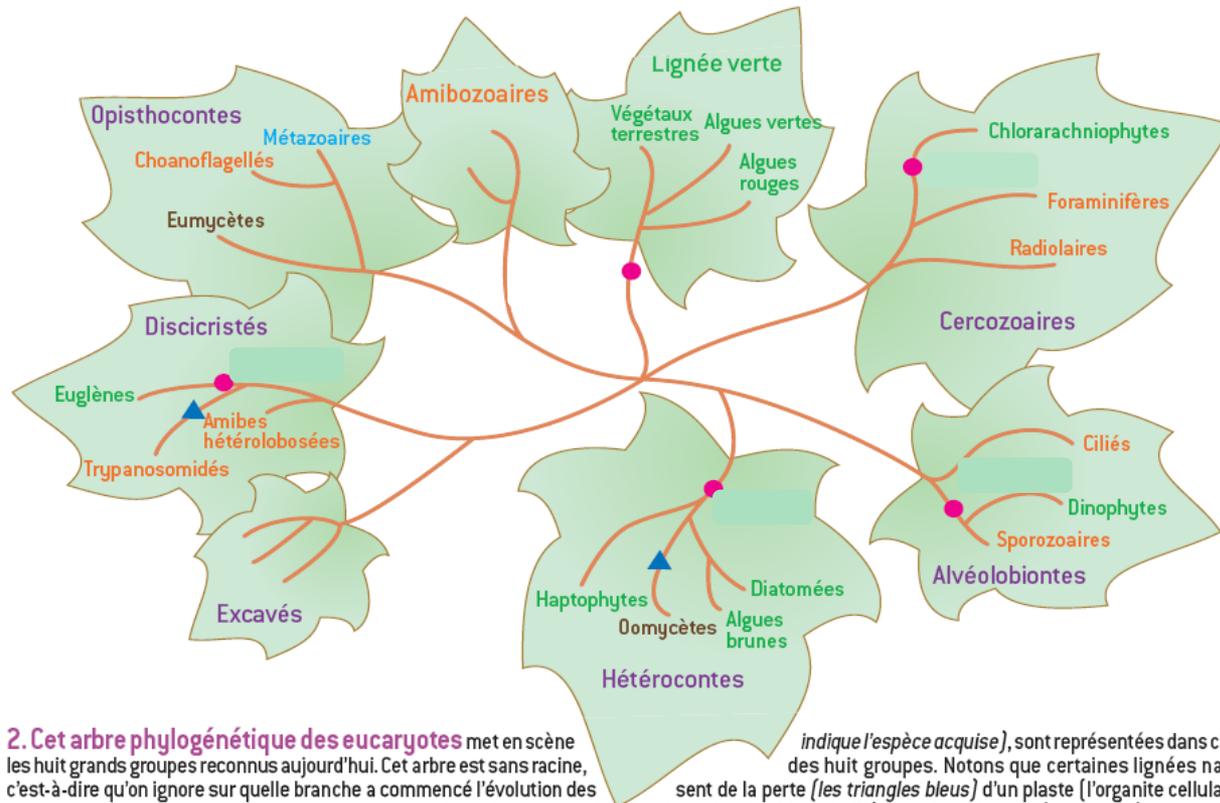
↪ Eucaryotes

8/12 (66%)

↪ **Reflet de la complexité des algues**

# Les algues dans les classifications des eucaryotes d'après la systématique moléculaire

(ADN ribosomique: marqueur nucléaire)



8 grands groupes

5 groupes  
photosynthétiques  
(62.5%)

2. Cet arbre phylogénétique des eucaryotes met en scène les huit grands groupes reconnus aujourd'hui. Cet arbre est sans racine, c'est-à-dire qu'on ignore sur quelle branche a commencé l'évolution des eucaryotes. On constate que les termes végétaux, champignons et animaux ne correspondent pas à un groupe monophylétique (un ancêtre et tous ses descendants). Ainsi, les lignées qui ont « adopté » la photosynthèse (en vert), par suite d'endosymbiose (les ronds roses, le nom

indique l'espèce acquise), sont représentées dans cinq des huit groupes. Notons que certaines lignées naissent de la perte (les triangles bleus) d'un plaste (l'organite cellulaire qui contient la chlorophylle). Les champignons (en marron) sont constitués de deux lignées éloignées. Enfin, les animaux regroupent traditionnellement les métazoaires (en bleu) et les protozoaires (en orange), qui sont éparpillés dans l'arbre.

Selosse 2006 Pour la science

Les algues ne forment pas un groupe monophylétique

# La théorie endosymbiotique



1905

Konstantin Mereschkowsky

Théorie de la « symbiogenèse » selon laquelle la fusion de deux organismes est le moteur de l'évolution.

Faute de preuves, cette théorie tombe ensuite en désuétude.



1970

Lynn Margulis

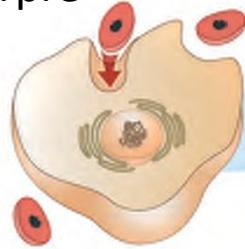
*L'origine des cellules eucaryotes*

Certaines parties des cellules eucaryotes sont des bactéries qui vivaient en symbiose dans les cellules (relation réciproquement bénéfique avec leur hôte) ; elles seraient transmises de génération en génération.

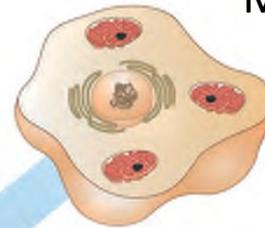
Cette théorie « endosymbiotique » est aujourd'hui largement acceptée.

# La théorie endosymbiotique

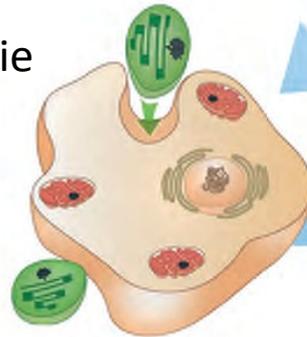
Bactérie *alpha* pourpre



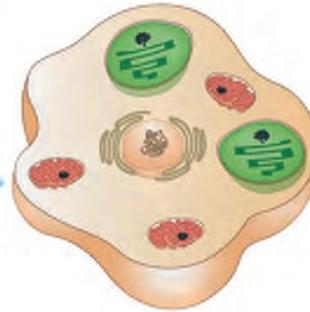
Mitochondrie



Cyanobactérie



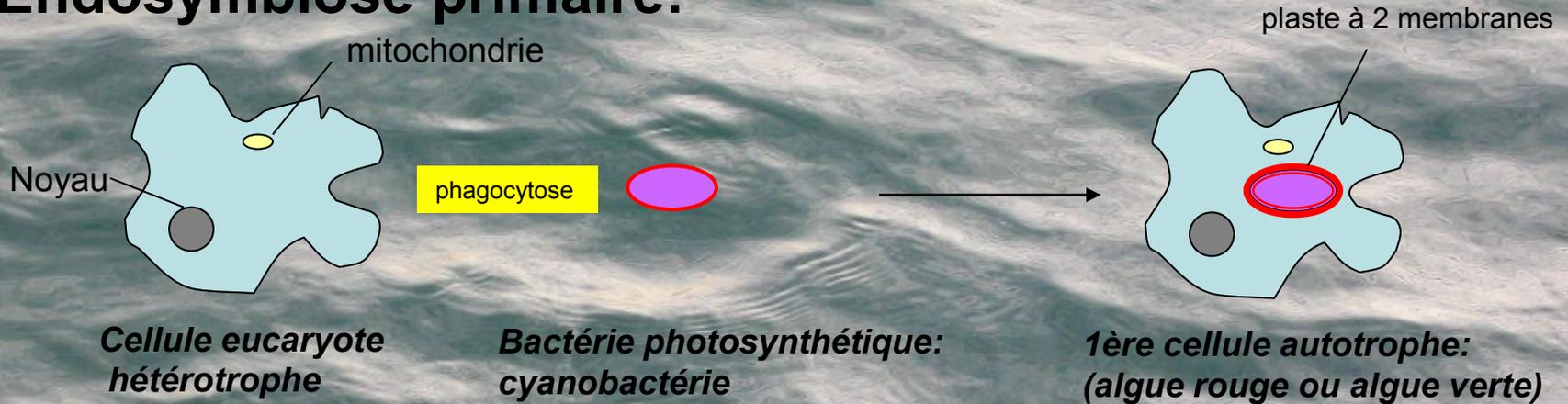
Chloroplaste



*D'après Selosse 2011 Pour la Recherche*

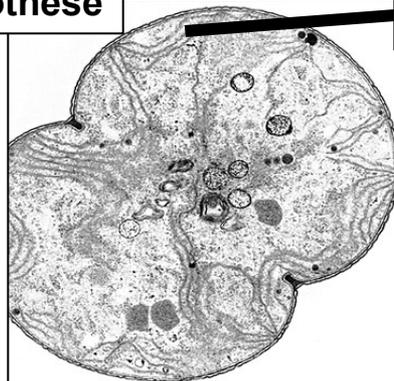
# Les hypothèses endosymbiotiques

## Endosymbiose primaire:



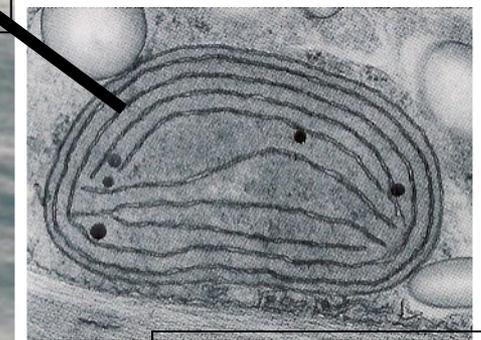
### Arguments en faveur de cette hypothèse

- bipartition (Schimper 1883)
- membranes photosynthétiques: thylakoïdes avec phycobilisomes
- même photosynthèse
- ADN dans le plaste (1 à 100 fois moins que les cyano)
- double membrane entourant le plaste
- Biologie moléculaire (même zone promotrice)
- nombreuses symbioses



*Cyanobactérie*

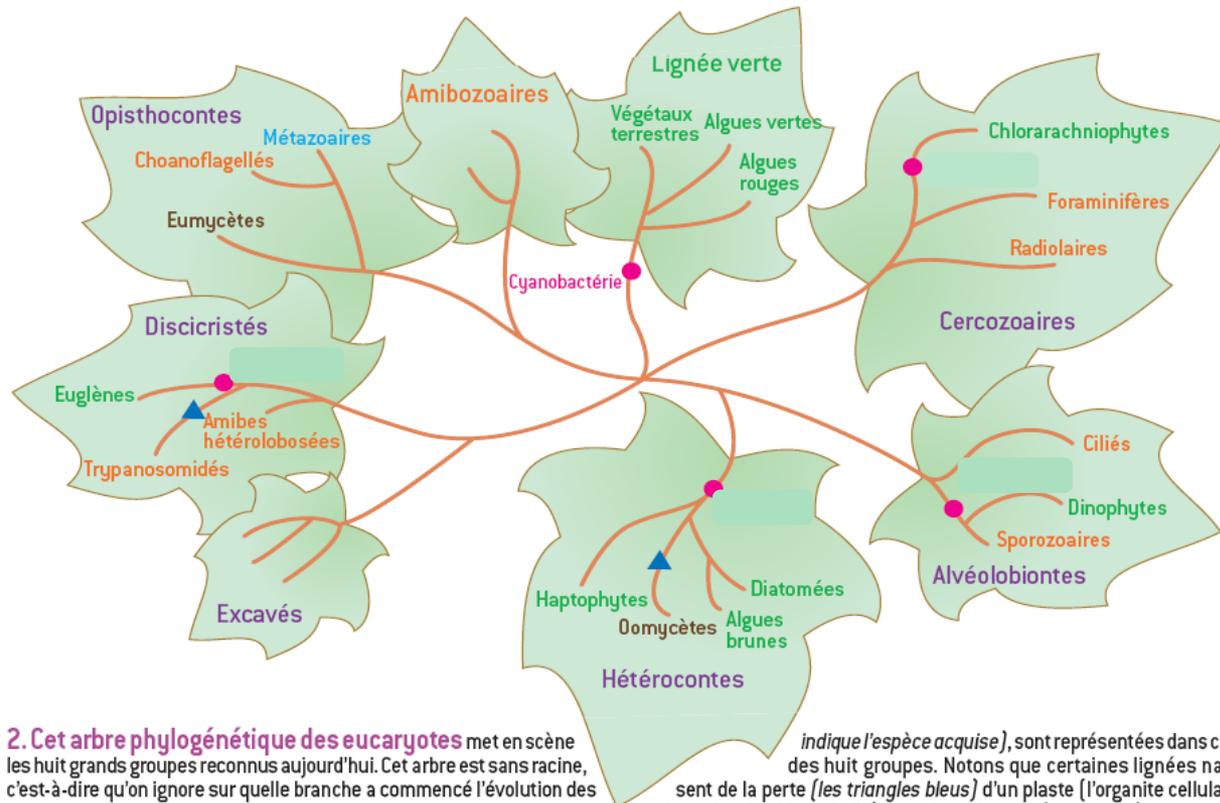
thylakoïde



*Plaste d'algue rouge*

# Les algues dans les classifications des eucaryotes d'après la systématique moléculaire

(ADN ribosomique: marqueur nucléaire)



8 grands groupes

5 groupes  
photosynthétiques  
(62.5%)

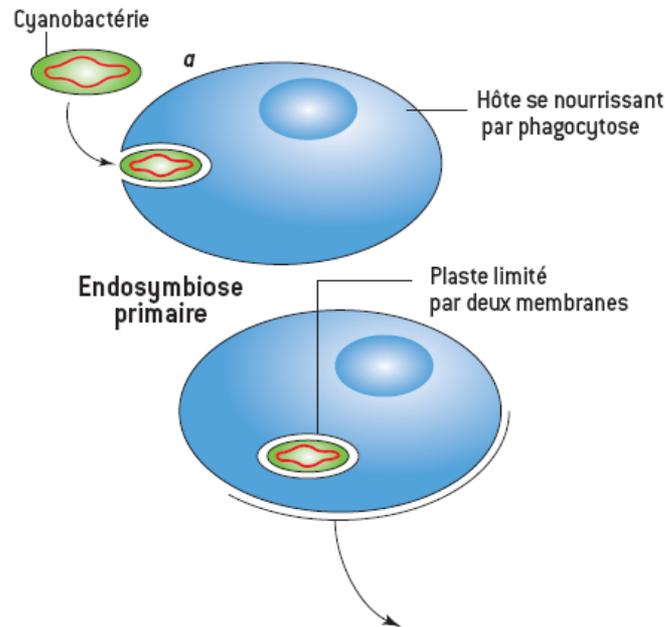
2. Cet arbre phylogénétique des eucaryotes met en scène les huit grands groupes reconnus aujourd'hui. Cet arbre est sans racine, c'est-à-dire qu'on ignore sur quelle branche a commencé l'évolution des eucaryotes. On constate que les termes végétaux, champignons et animaux ne correspondent pas à un groupe monophylétique (un ancêtre et tous ses descendants). Ainsi, les lignées qui ont « adopté » la photosynthèse (en vert), par suite d'endosymbiose (les ronds roses, le nom

indique l'espèce acquise), sont représentées dans cinq des huit groupes. Notons que certaines lignées naissent de la perte (les triangles bleus) d'un plaste (l'organite cellulaire qui contient la chlorophylle). Les champignons (en marron) sont constitués de deux lignées éloignées. Enfin, les animaux regroupent traditionnellement les métazoaires (en bleu) et les protozoaires (en orange), qui sont éparpillés dans l'arbre.

Selosse 2006 Pour la science

Endosymbiose primaire à l'origine de la lignée verte

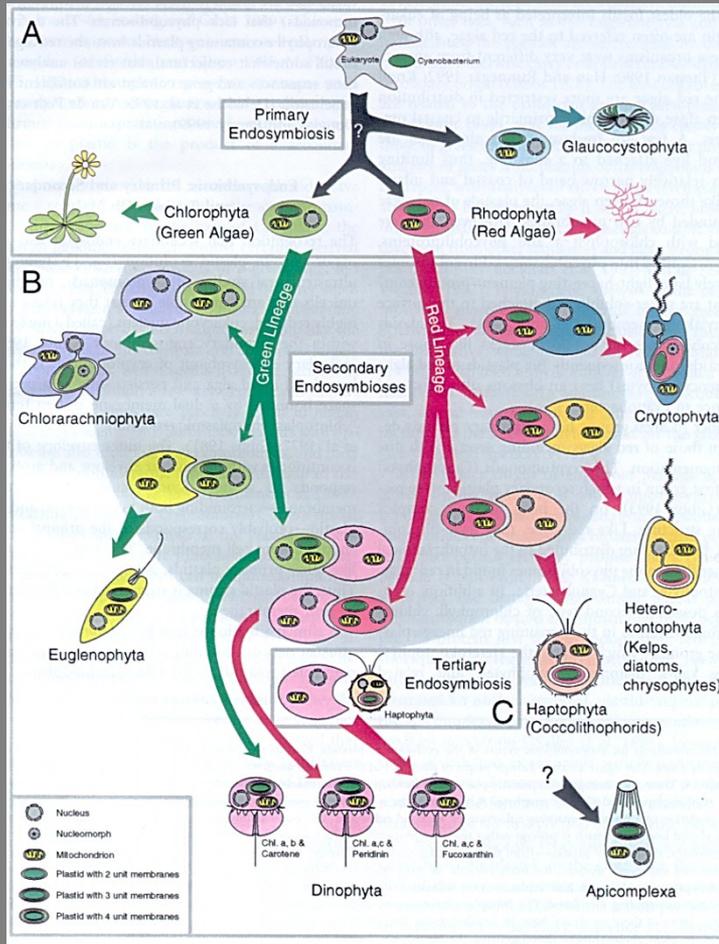
# Les différentes endosymbioses



**3. L'endosymbiose** est le processus par lequel une cellule photosynthétique est incorporée à l'intérieur d'une autre et devient un plaste, c'est-à-dire un organe de celle-ci. Ce phénomène s'est produit à diverses reprises chez les eucaryotes, notamment par l'internalisation de cyanobactéries (*a*, en rouge son génome) : c'est l'endosymbiose primaire, à l'origine de la lignée verte (dont les végétaux terrestres). Cependant, d'autres ont pu phagocyter des cellules eucaryotes déjà pourvues

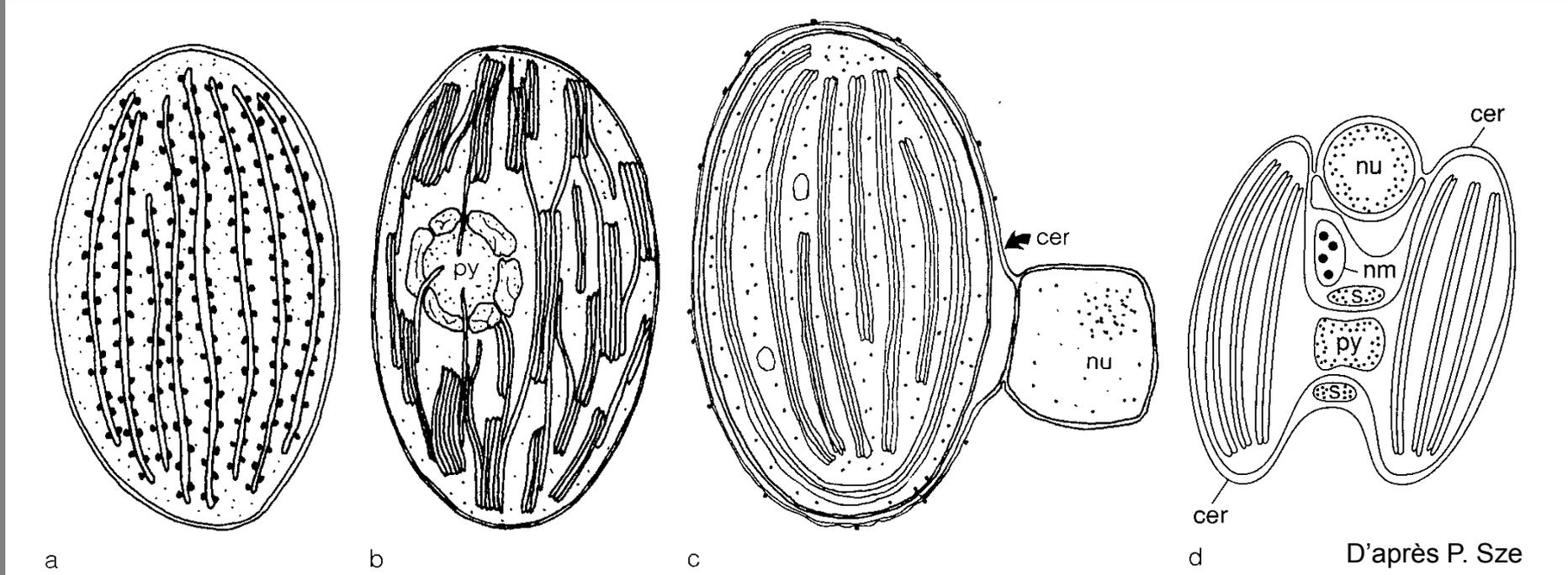
d'un plaste (*b*, on parle d'endosymbiose secondaire). Les hétérocontes et les euglénophytes sont apparus de cette façon. Enfin, dans le cas d'une endosymbiose tertiaire (chez certains dinophytes), un des eucaryotes précédents a été internalisé à son tour pour devenir le plaste d'une autre cellule. À chaque fois, le génome de la cyanobactérie d'origine est conservé, du moins en partie. Par ailleurs, certaines membranes des plastes sont parfois éliminées : trois ou quatre demeurent.

*D'après Selosse 2011 Pour la Recherche*



Delwiche (1999) *The American Naturalist* 154 suppl.: 164-177

# Principaux types de plastides chez les algues



D'après P. Sze

**Rhodophyta**  
Algues rouges

**Chlorophyta**  
Algues vertes

Algues brunes

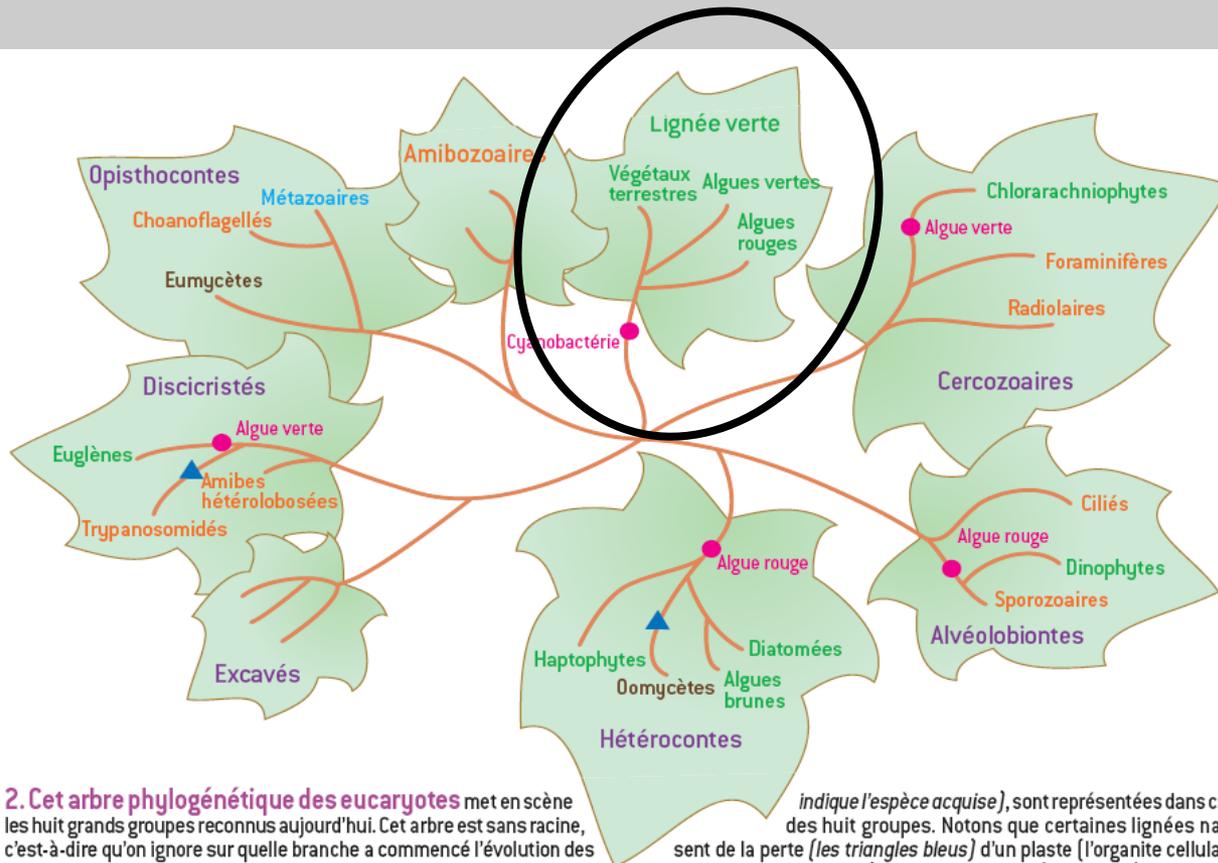
**Cryptophytes**

Endosymbiose I

Endosymbiose II

# Les algues dans les classifications des eucaryotes d'après la systématique moléculaire

(ADN ribosomique: marqueur nucléaire)



2. Cet arbre phylogénétique des eucaryotes met en scène les huit grands groupes reconnus aujourd'hui. Cet arbre est sans racine, c'est-à-dire qu'on ignore sur quelle branche a commencé l'évolution des eucaryotes. On constate que les termes végétaux, champignons et animaux ne correspondent pas à un groupe monophylétique (un ancêtre et tous ses descendants). Ainsi, les lignées qui ont « adopté » la photosynthèse (en vert), par suite d'endosymbiose (les ronds roses, le nom

indique l'espèce acquise), sont représentées dans cinq des huit groupes. Notons que certaines lignées naissent de la perte (les triangles bleus) d'un plaste (l'organite cellulaire qui contient la chlorophylle). Les champignons (en marron) sont constitués de deux lignées éloignées. Enfin, les animaux regroupent traditionnellement les métazoaires (en bleu) et les protozoaires (en orange), qui sont éparpillés dans l'arbre.

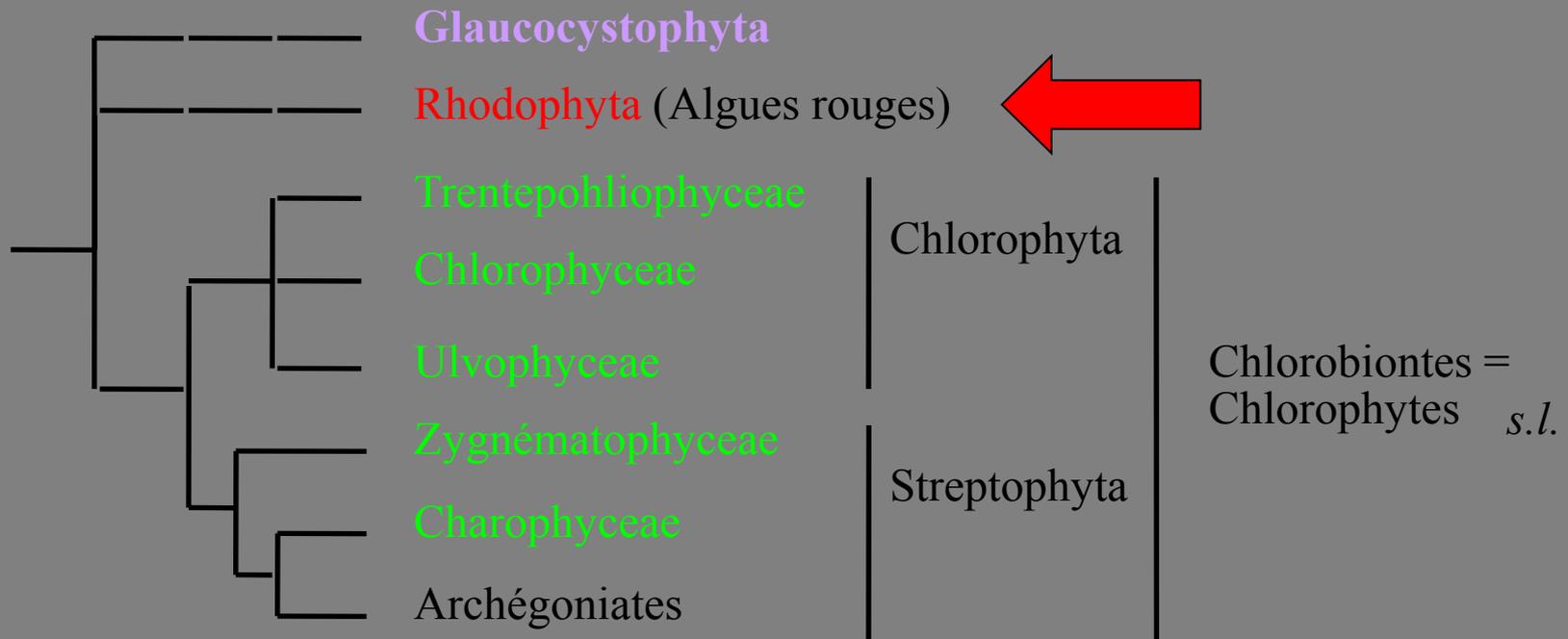
Selosse 2006 Pour la science

8 grands groupes

5 groupes  
photosynthétiques  
(62.5%)

Endosymbioses secondaires et tertiaires: grande diversité des algues

# Chlorobiontes et Rhodobiontes





# Division RHODOPHYTA

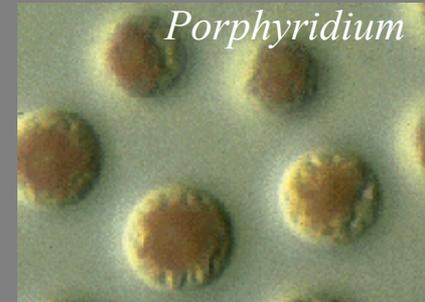
## Rhodophytes

600 genres

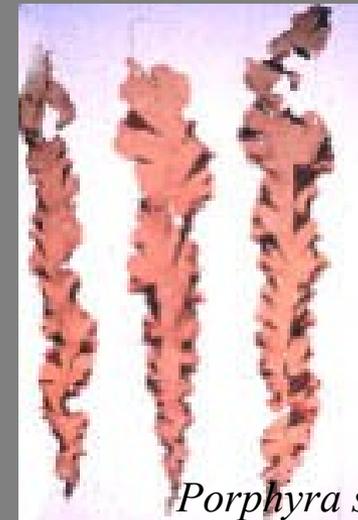
**Bangiophyceae**

**Prophyridiales**

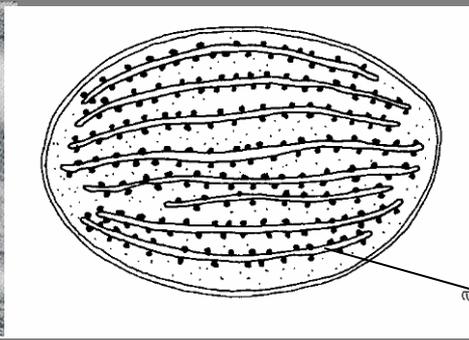
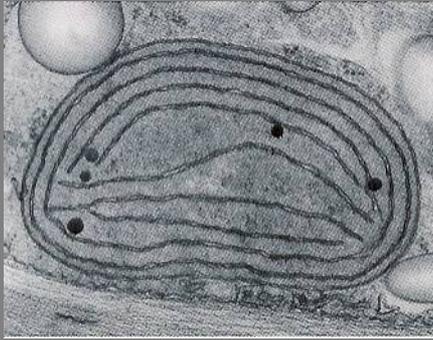
**Bangiales**



**Florideophyceae**



# Plaste d'algue rouge



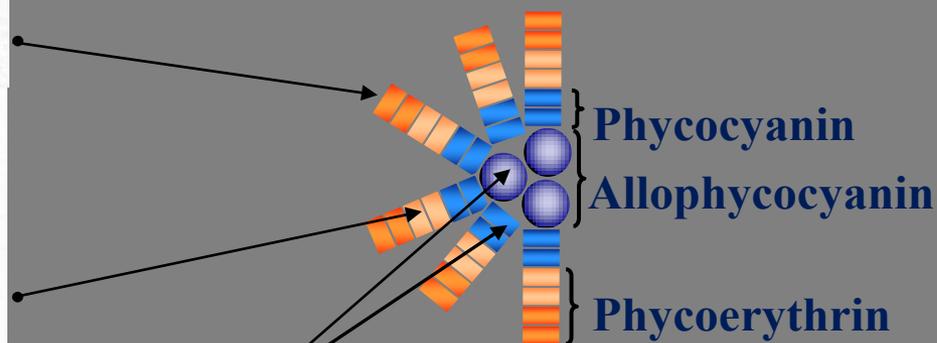
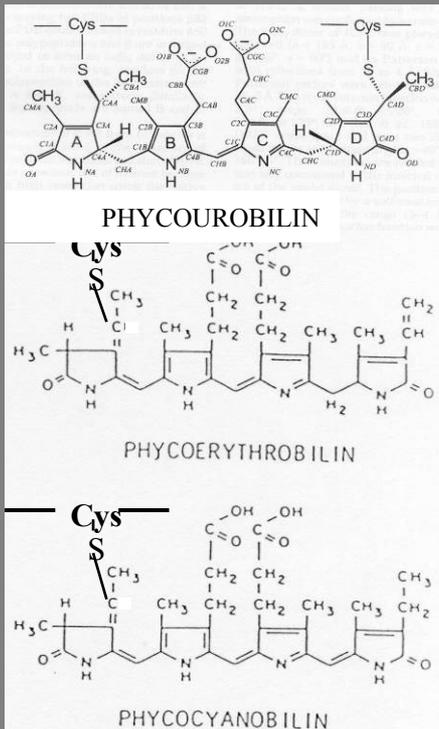
Phycobilisome

## Pigments

- Chlorophylle a
- Carotènes  $\alpha, \beta$
- Lutéine
- Zeaxanthines
- Pigments hydrosolubles

Thylacoïdes: libres

## Pigments liés aux Phycobilisomes (*Rhodophyta* et *Cyanophyta*)



# *Caractéristiques des algues rouges*

## Groupe très ancien

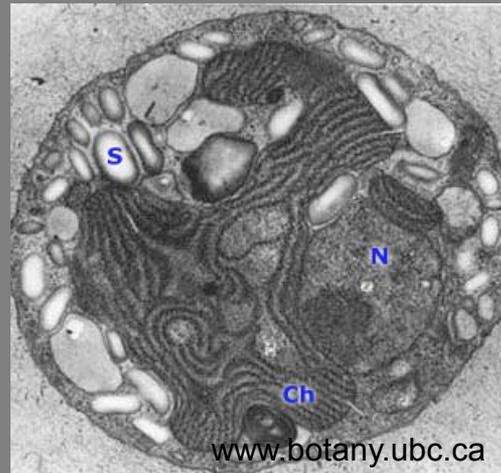
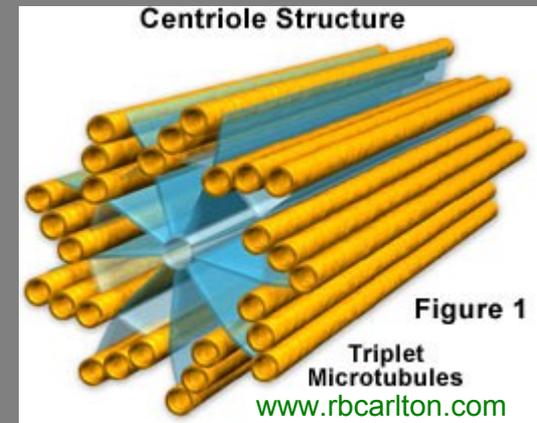
- très grande diversité

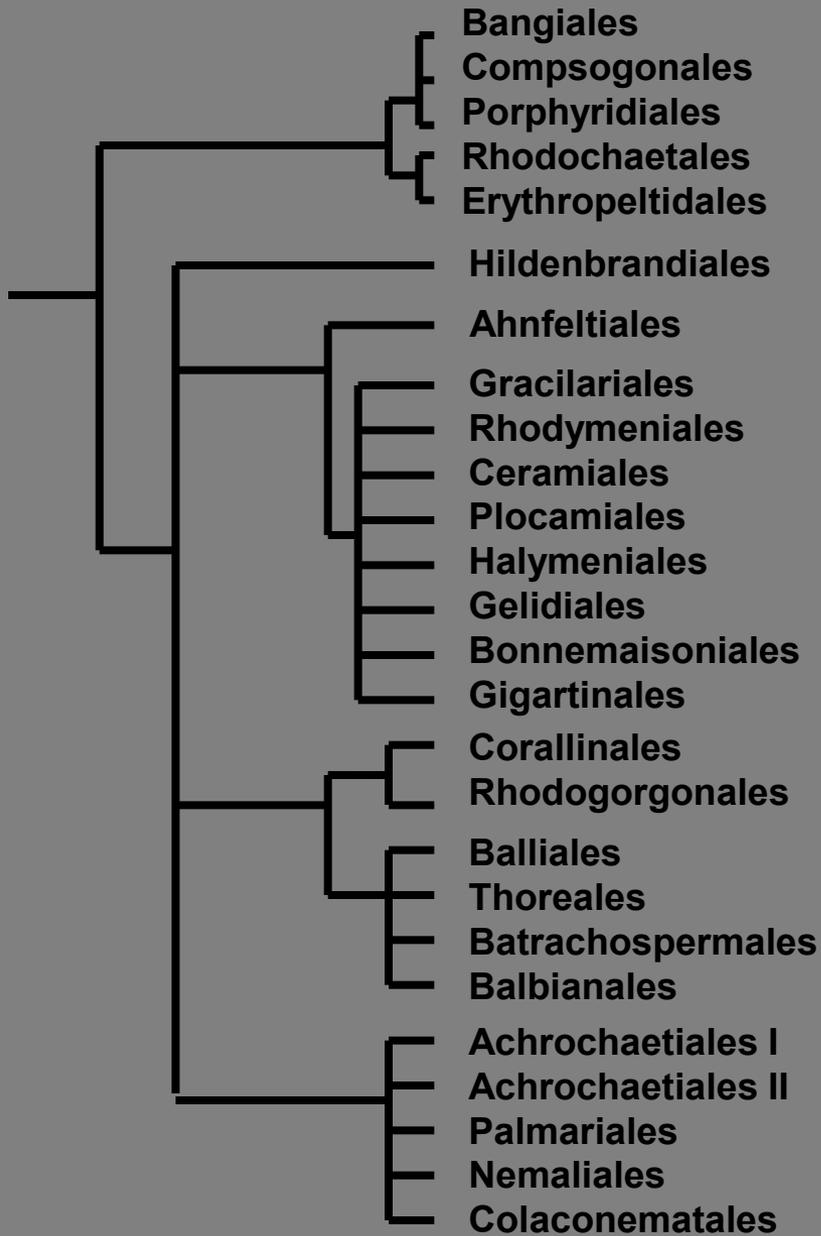
## Absence de flagelle

- absence de centriole

## Réserves

- amidon floridéen (semi liquide)
- dans le cytoplasme





*Bangiophyceae*

*Florideophyceae*

Phylogénie des Rhodophytes à partir du gène du 18S rADN (d'après de Reviers 2003)



*Porphyra* sp.

# *Culture du Nori au Japon*

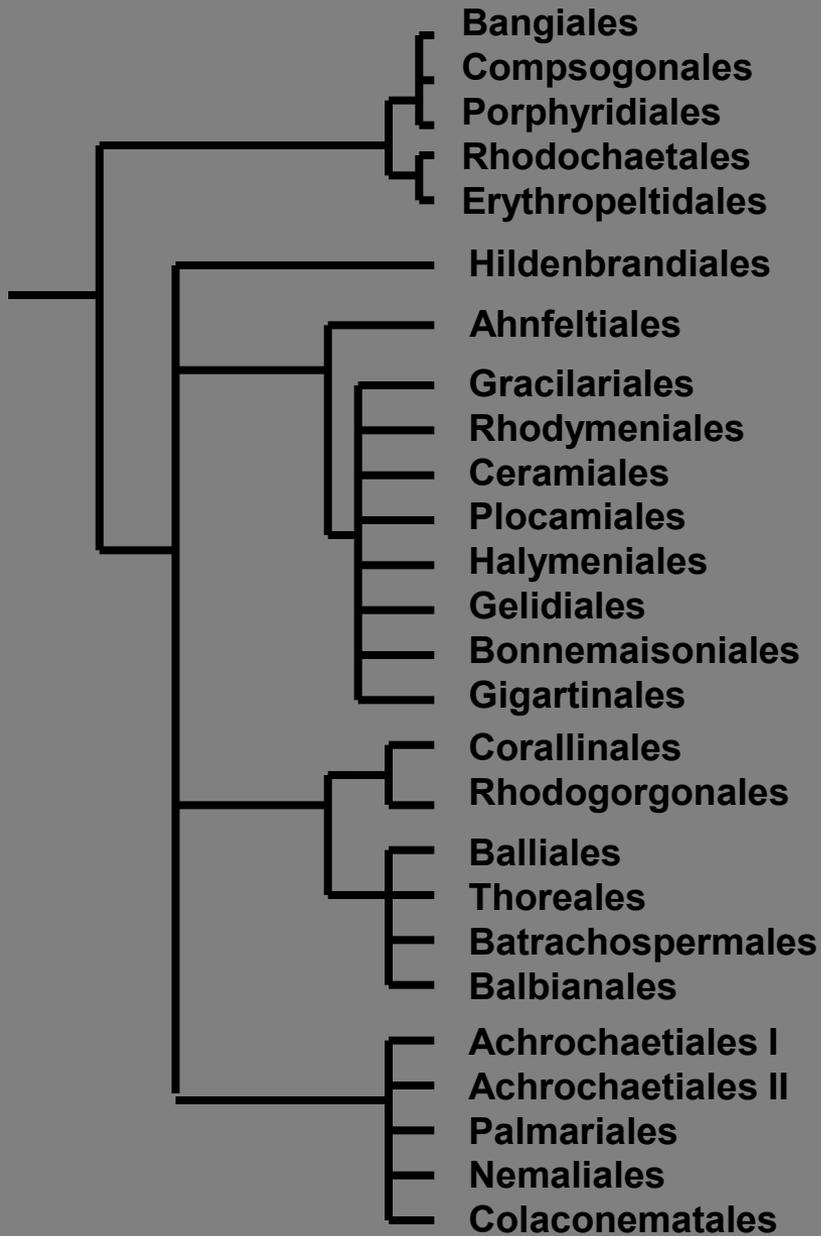


# *Porphyra* sp.



Le *makizushi* (巻き寿司), est obtenu en prenant une [feuille](#) d'algue séchée ([nori](#)) en étalant dessus une couche de riz et sur le tout du poisson et des légumes. Il suffit alors de rouler l'ensemble et de « coller » la feuille d'algue en l'humidifiant. Le rouleau est ensuite découpé en tranches. Le modèle de petit diamètre s'appelle *hoso-makizushi* (2 cm), des variantes de plus gros diamètres sont dénommées *naka-makizushi* (3 cm) et *futo-makizushi* (4 cm). (Wikipédia)





*Bangiophyceae*

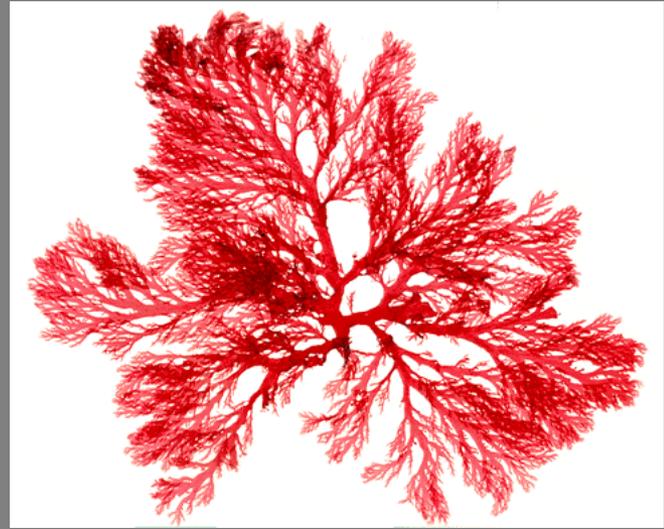
*Florideophyceae*

Phylogénie des Rhodophytes à partir du gène du 18S rADN (d'après de Reviers 2003)

# Florideophyceae thalles complexes



*Heterosiphonia sp.*



*Bonnemaisionia sp*



*Lomentaria  
sp*



Le maerl (Coralinales)  
*Lithotamnion corallioides* (jaune)  
*Phymatolithon calcareus* (bleu)  
(Photo: Marlin)



*Chondrus crispus* (Pioka)  
⇒ Carraghénanes





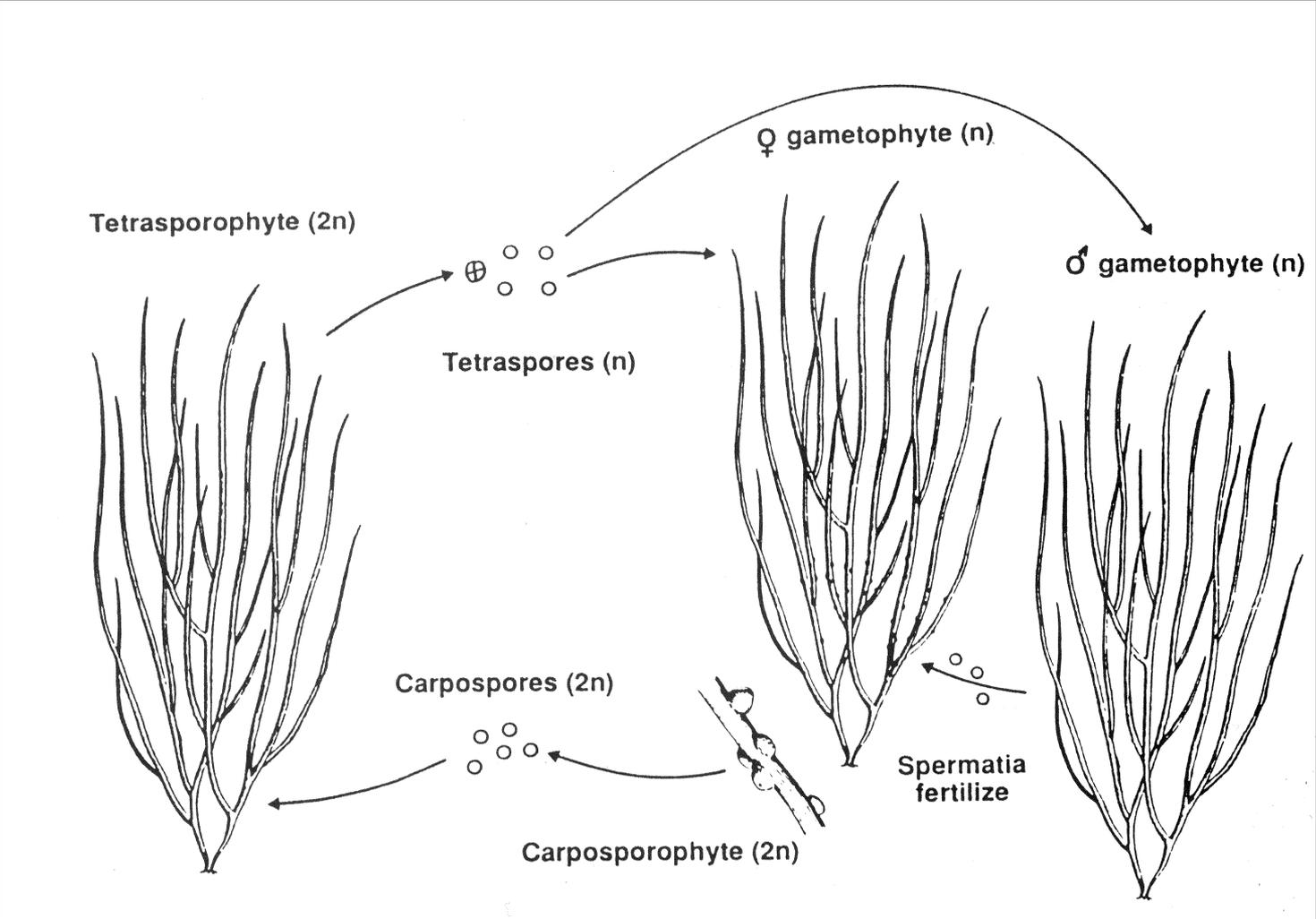
*Une ferme de Gracilaria chilensis à Chiloe*

# *Gracilaria gracilis*

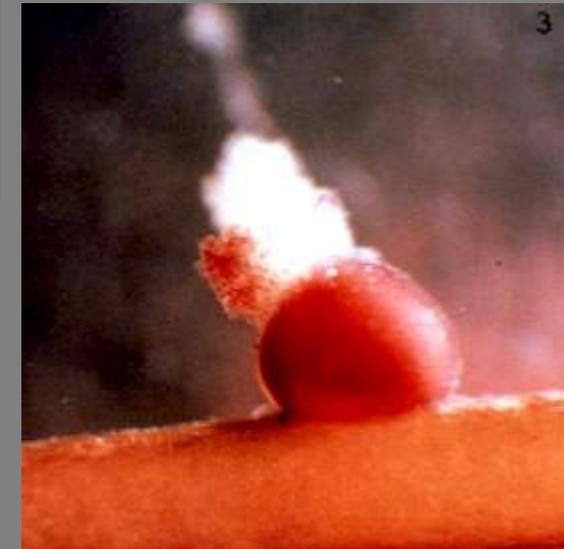
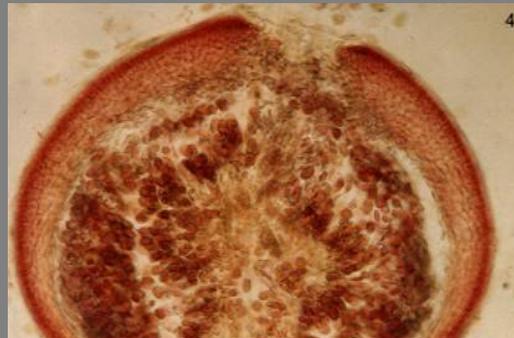
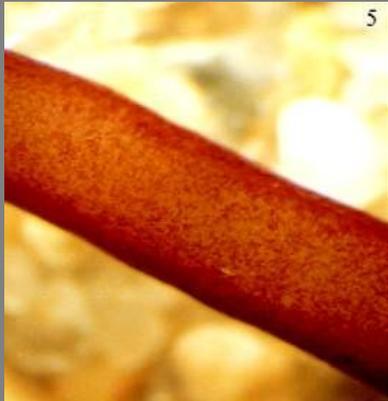
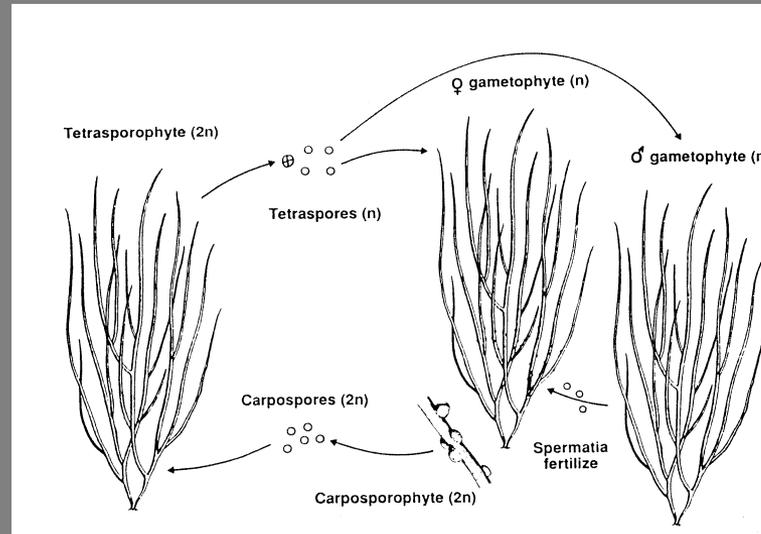
⇒ agar-agar



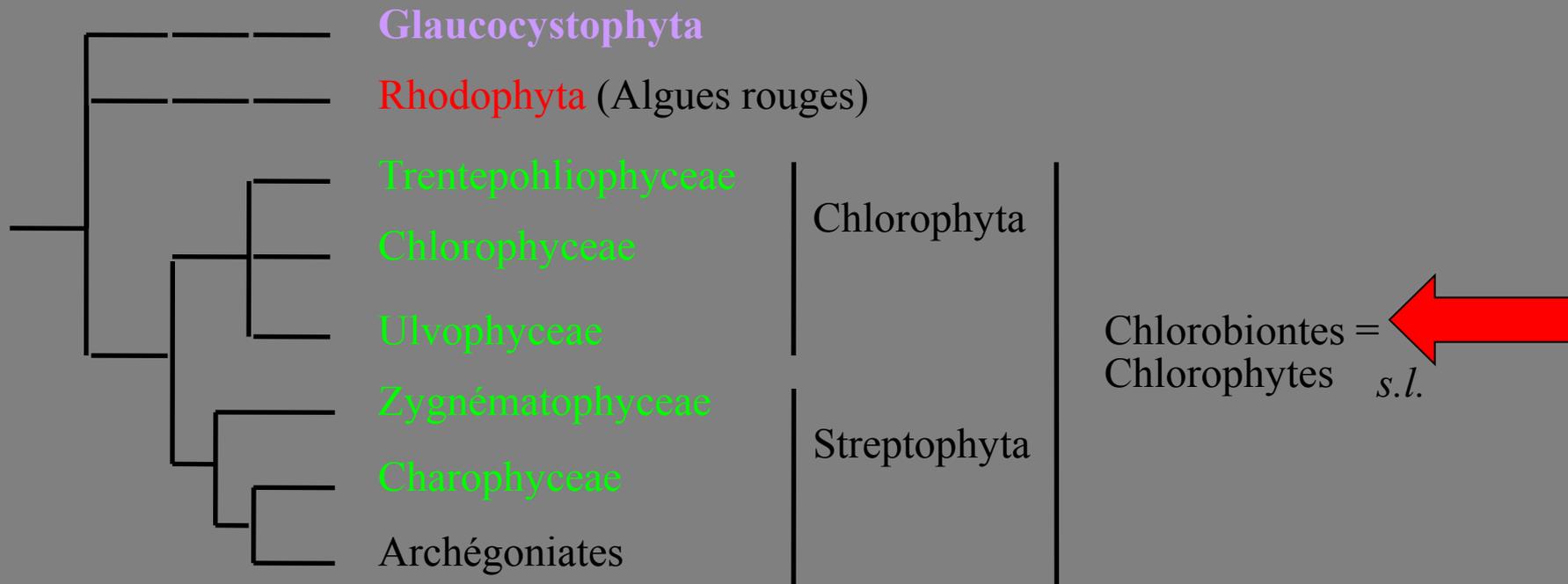
# Cycle de *Gracilaria gracilis*



# Cycle de *Gracilaria gracilis*



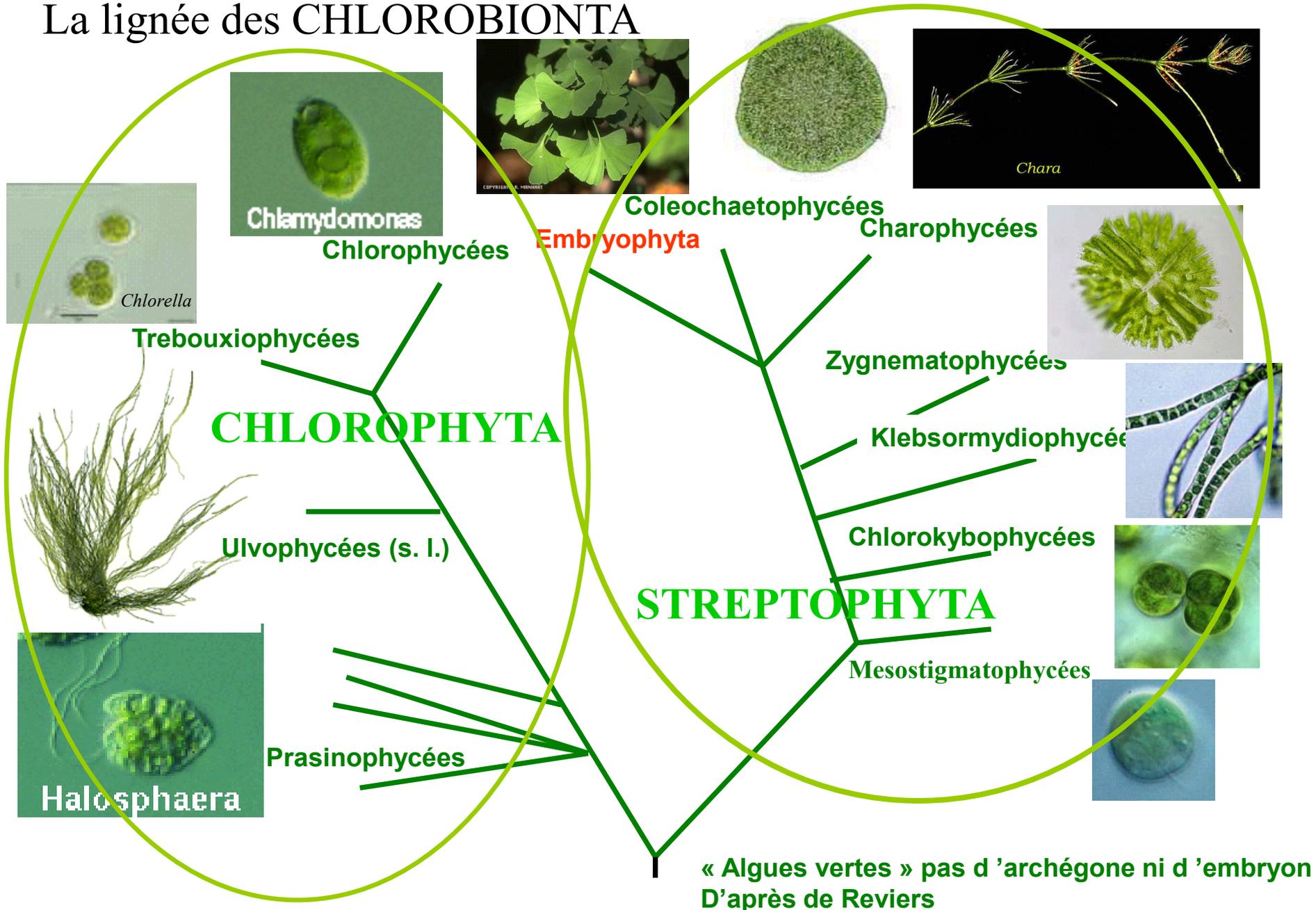
# Chlorobiontes et Rhodobiontes







# La lignée des CHLOROBIONTA

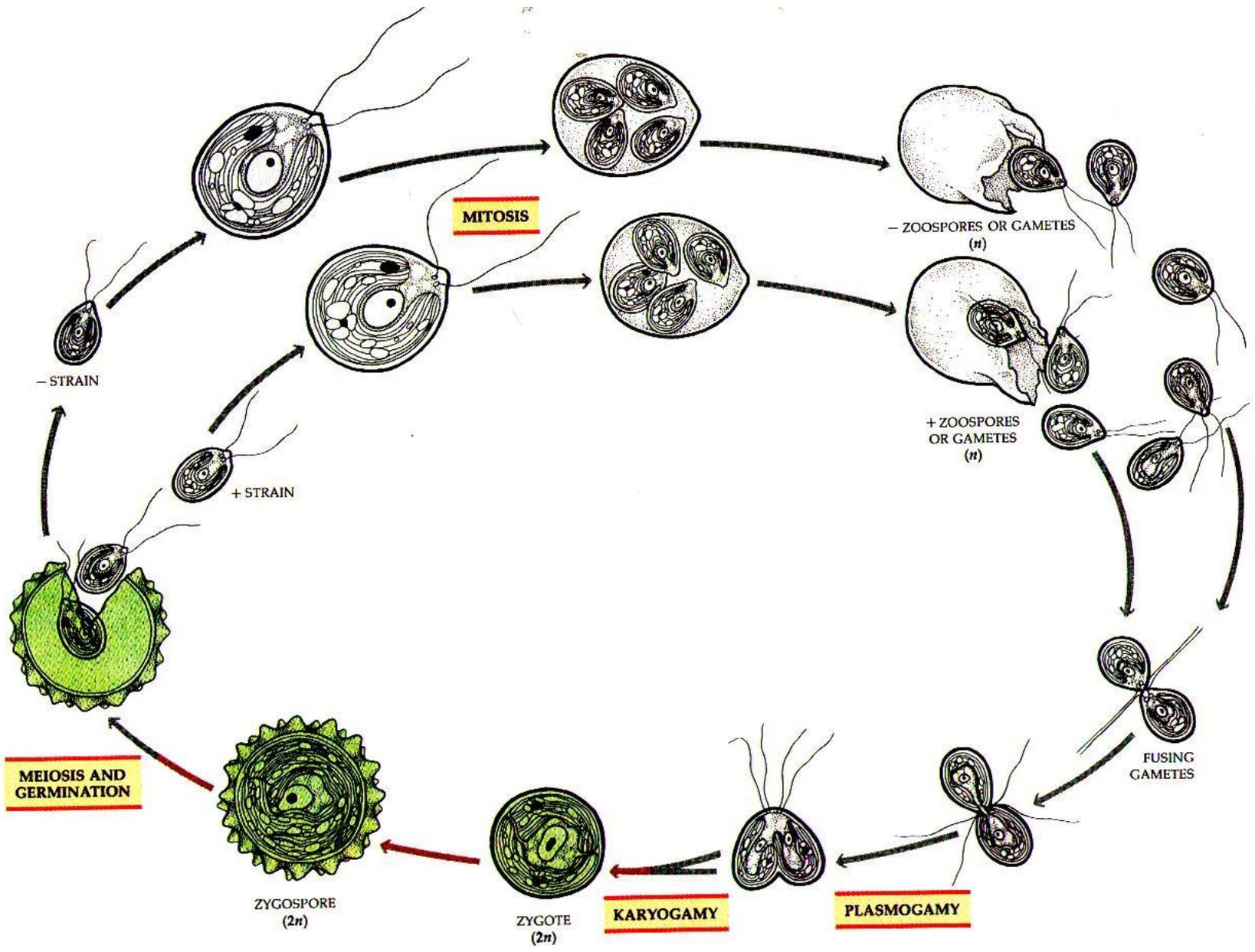


# Class Chlorophyceae

(Ulvobiontes)



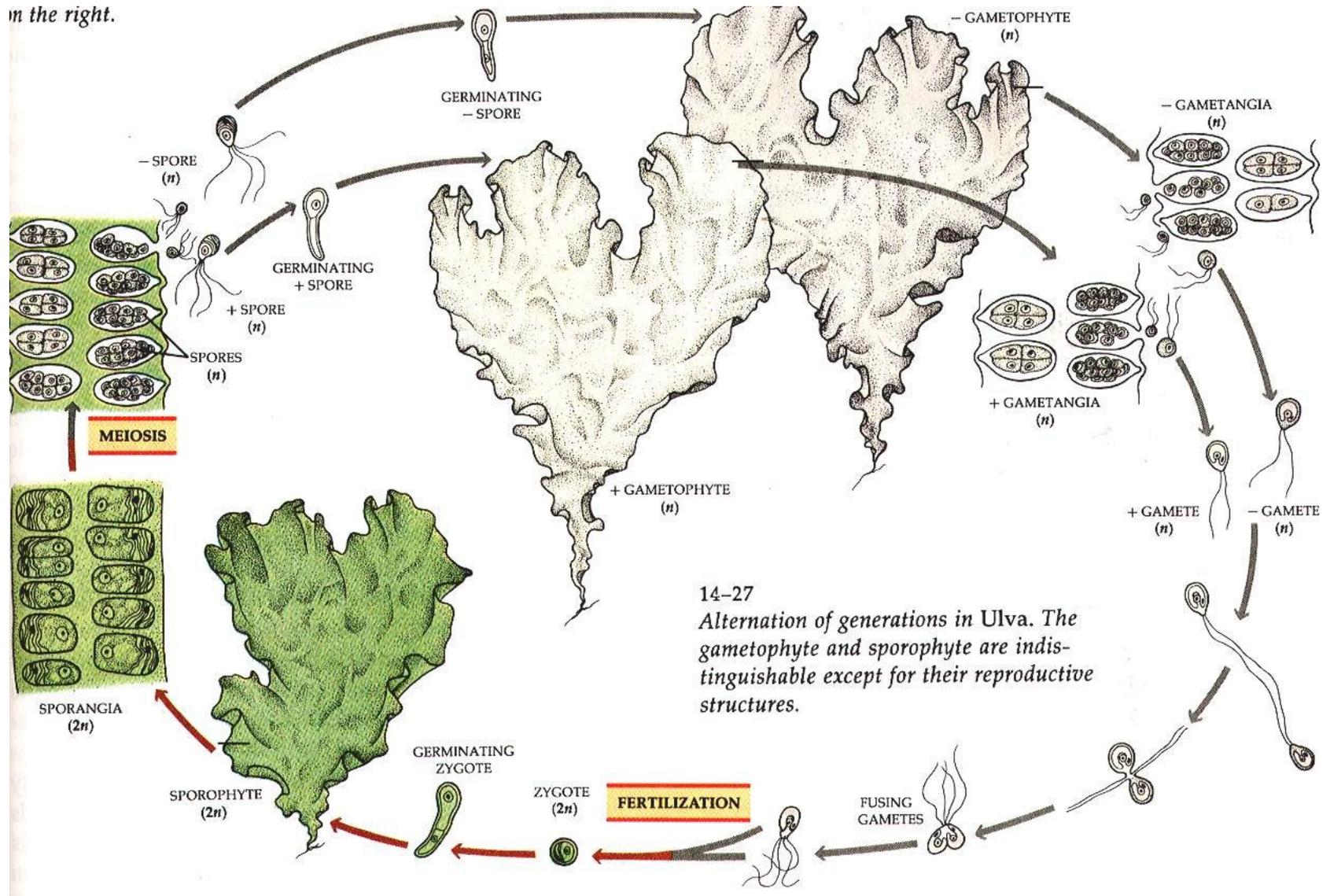
*Chlamydomonas*





*Ulva sp. au Chili*

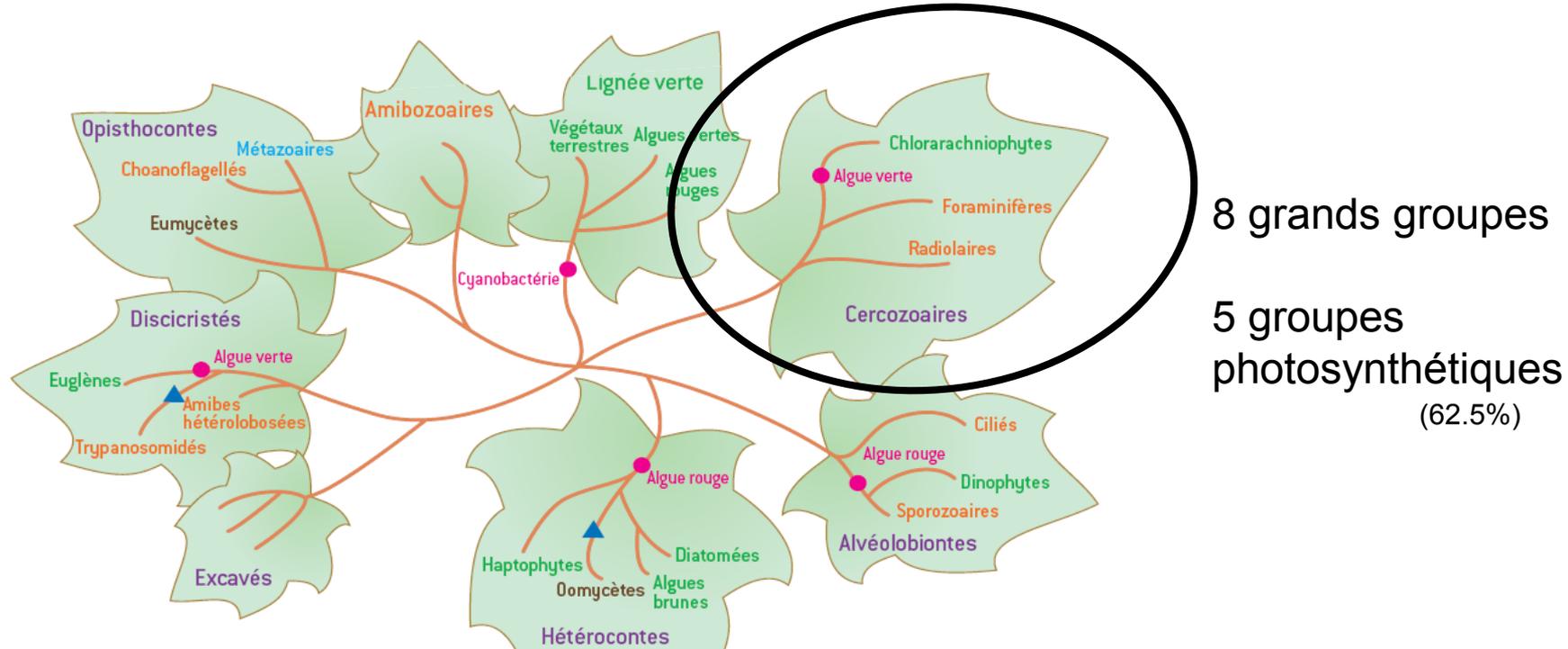
in the right.



14-27

Alternation of generations in *Ulva*. The gametophyte and sporophyte are indistinguishable except for their reproductive structures.

# Les algues dans les classifications des eucaryotes d'après la systématique moléculaire (ADN ribosomique: marqueur nucléaire)



2. Cet arbre phylogénétique des eucaryotes met en scène les huit grands groupes reconnus aujourd'hui. Cet arbre est sans racine, c'est-à-dire qu'on ignore sur quelle branche a commencé l'évolution des eucaryotes. On constate que les termes végétaux, champignons et animaux ne correspondent pas à un groupe monophylétique (un ancêtre et tous ses descendants). Ainsi, les lignées qui ont « adopté » la photosynthèse (en vert), par suite d'endosymbiose (les ronds roses, le nom

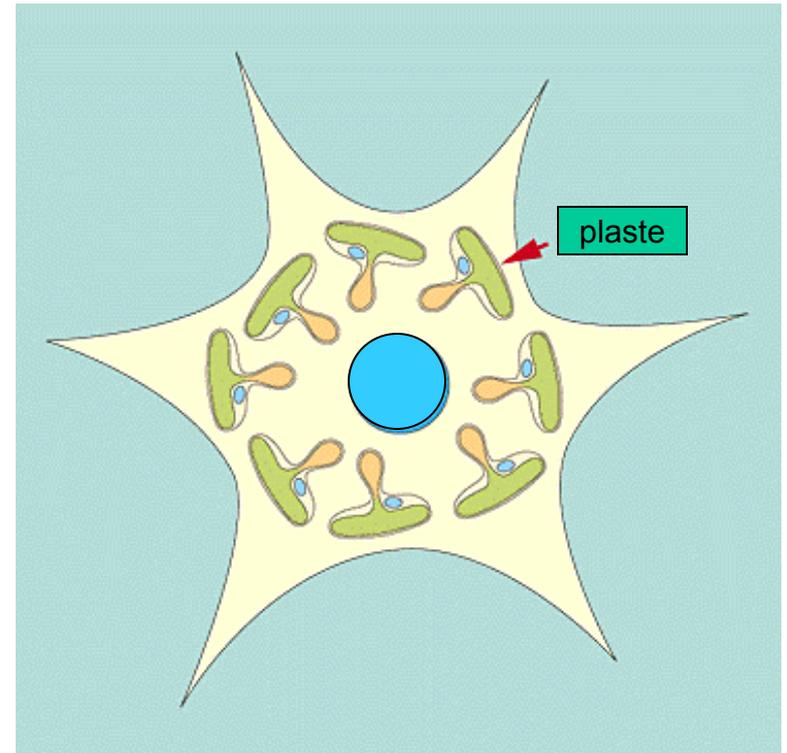
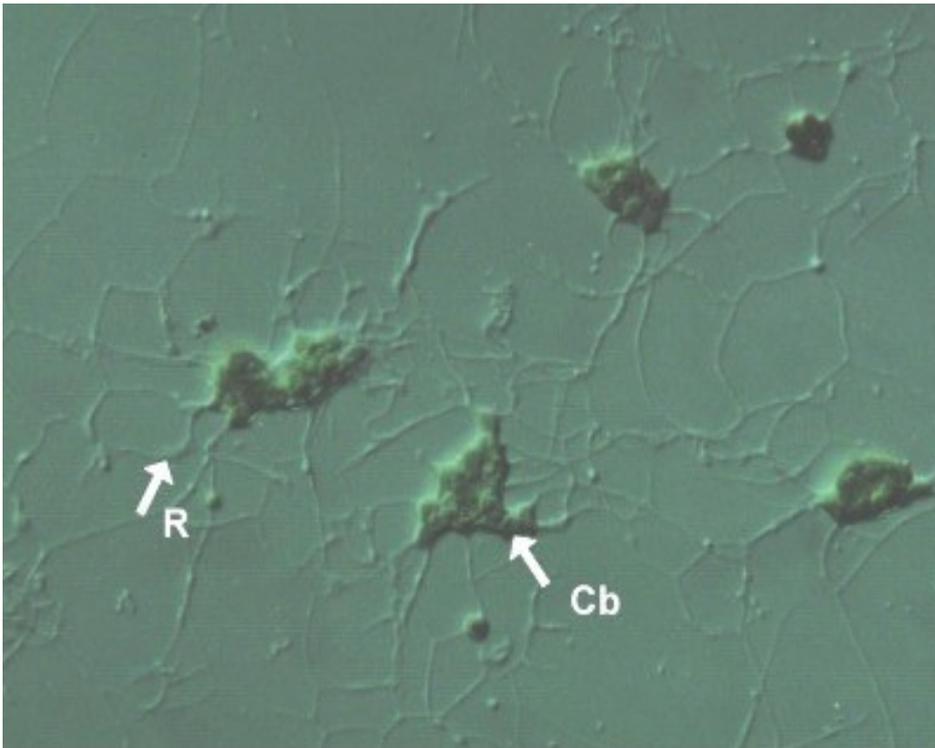
indique l'espèce acquise), sont représentées dans cinq des huit groupes. Notons que certaines lignées naissent de la perte (les triangles bleus) d'un plaste (l'organite cellulaire qui contient la chlorophylle). Les champignons (en marron) sont constitués de deux lignées éloignées. Enfin, les animaux regroupent traditionnellement les métazoaires (en bleu) et les protozoaires (en orange), qui sont éparpillés dans l'arbre.

Selosse 2006 Pour la science

Endosymbioses secondaires et tertiaires: grande diversité des algues

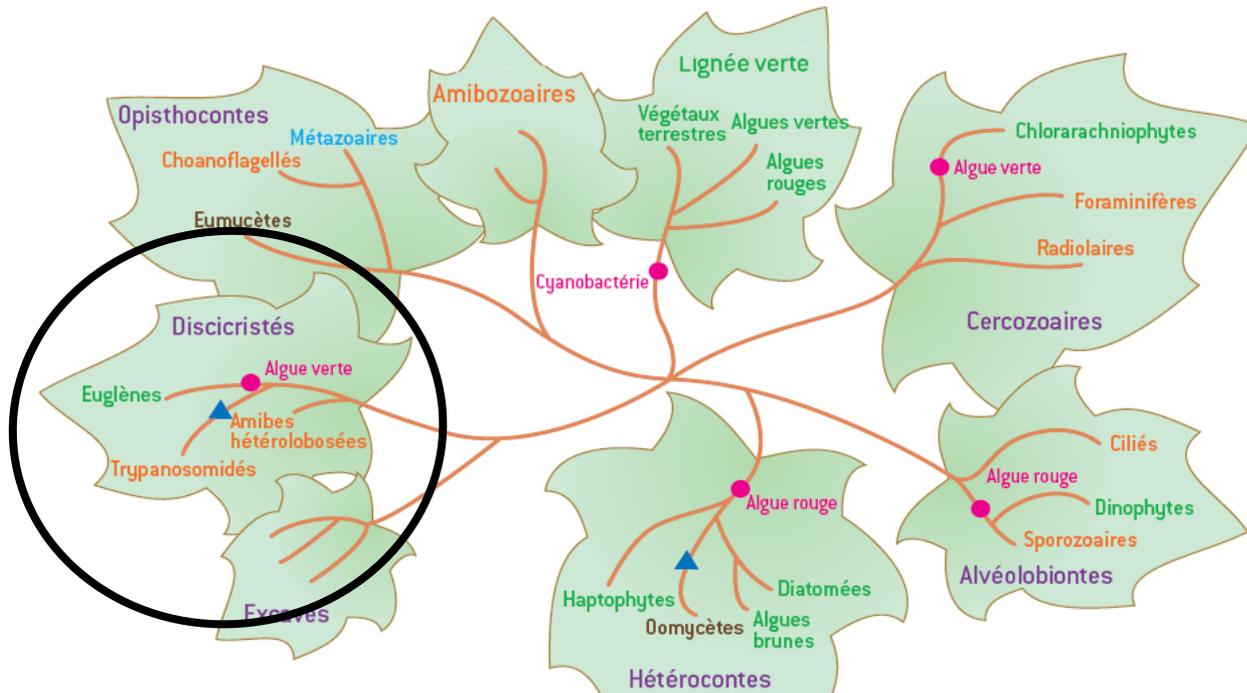
# Chlorarachniphyta

2 genres



Peut-être proches d'amibes à filopodes de la couronne terminale, les Euglyphina, dont *Euglyphina* et *Paulinella* avec lesquelles ils forment les Cercozoaires. Le plaste des Chlorarachniphytes est une algue verte régressée.

# Les algues dans les classifications des eucaryotes d'après la systématique moléculaire (ADN ribosomique: marqueur nucléaire)



8 grands groupes

5 groupes photosynthétiques (62.5%)

2. Cet arbre phylogénétique des eucaryotes met en scène les huit grands groupes reconnus aujourd'hui. Cet arbre est sans racine, c'est-à-dire qu'on ignore sur quelle branche a commencé l'évolution des eucaryotes. On constate que les termes végétaux, champignons et animaux ne correspondent pas à un groupe monophylétique (un ancêtre et tous ses descendants). Ainsi, les lignées qui ont « adopté » la photosynthèse (en vert), par suite d'endosymbiose (les ronds roses, le nom

indique l'espèce acquise), sont représentées dans cinq des huit groupes. Notons que certaines lignées naissent de la perte (les triangles bleus) d'un plaste (l'organite cellulaire qui contient la chlorophylle). Les champignons (en marron) sont constitués de deux lignées éloignées. Enfin, les animaux regroupent traditionnellement les métazoaires (en bleu) et les protozoaires (en orange), qui sont éparpillés dans l'arbre.

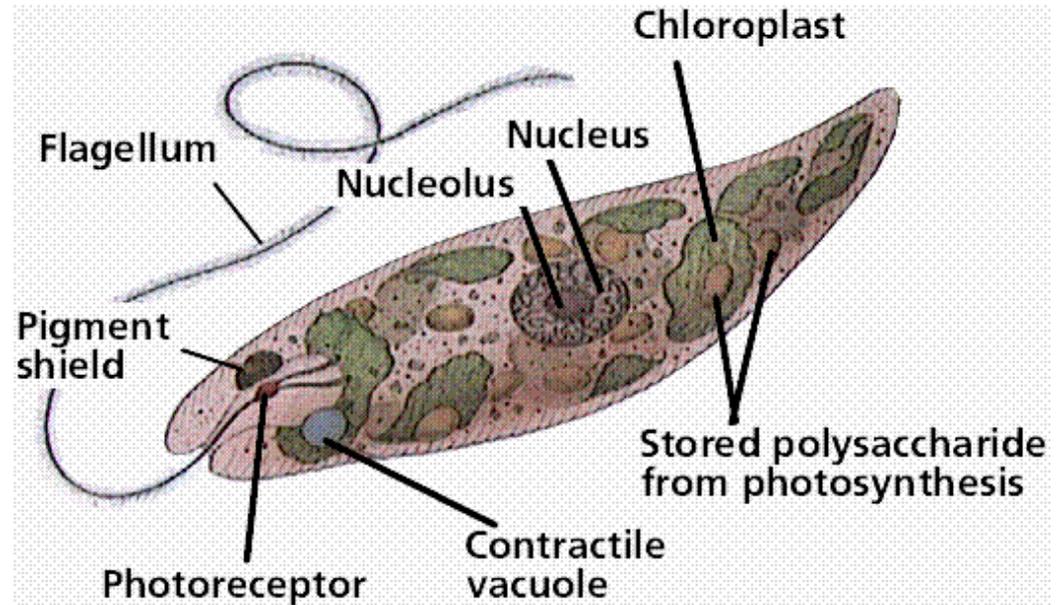
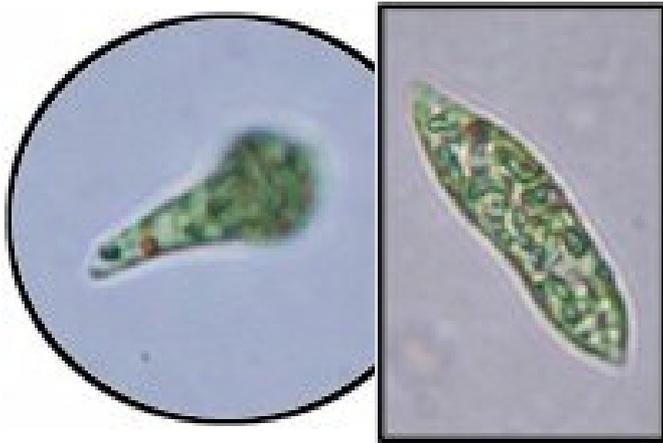
Selosse 2006 Pour la science

Endosymbioses secondaires et tertiaires: grande diversité des algues

# Discicristes: Euglenophytes

40 genres

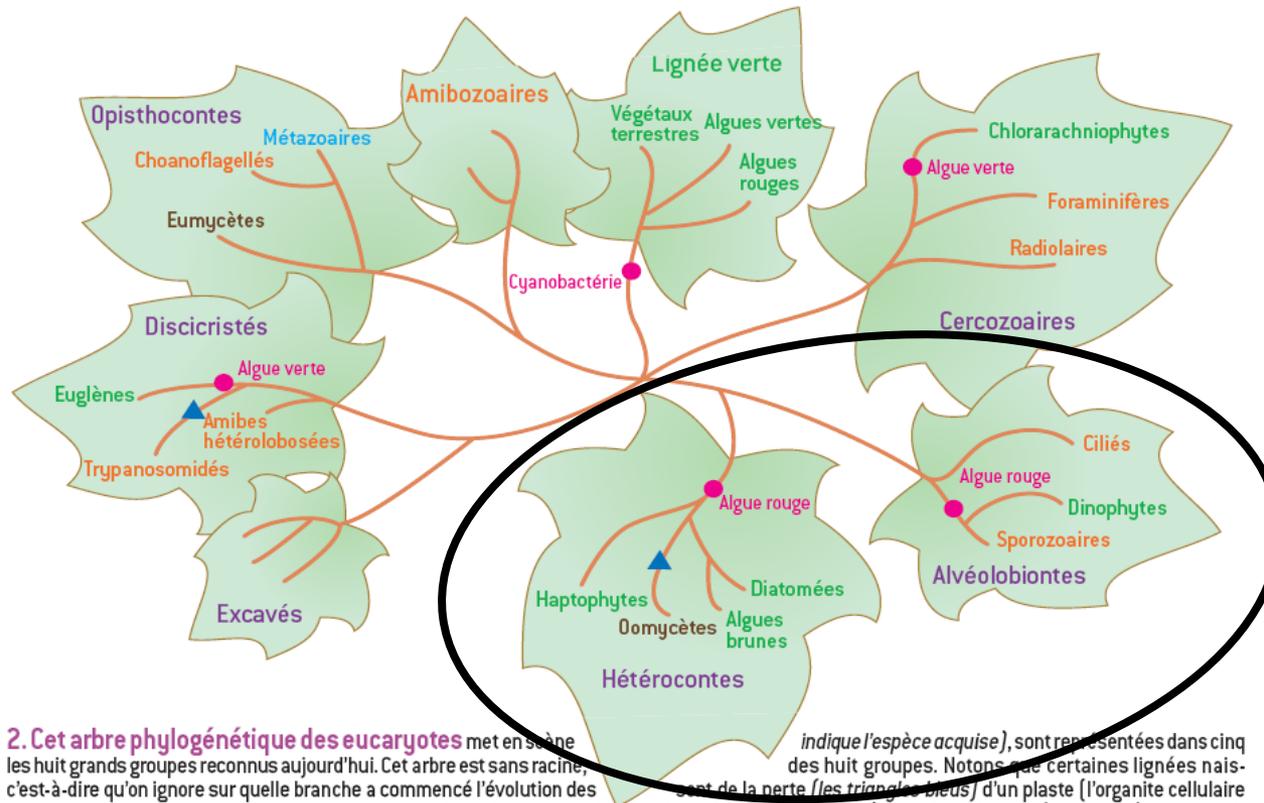
## Euglena



Le plaste dérive d'une algue verte régressée.

# Les algues dans les classifications des eucaryotes d'après la systématique moléculaire

(ADN ribosomique: marqueur nucléaire)



8 grands groupes

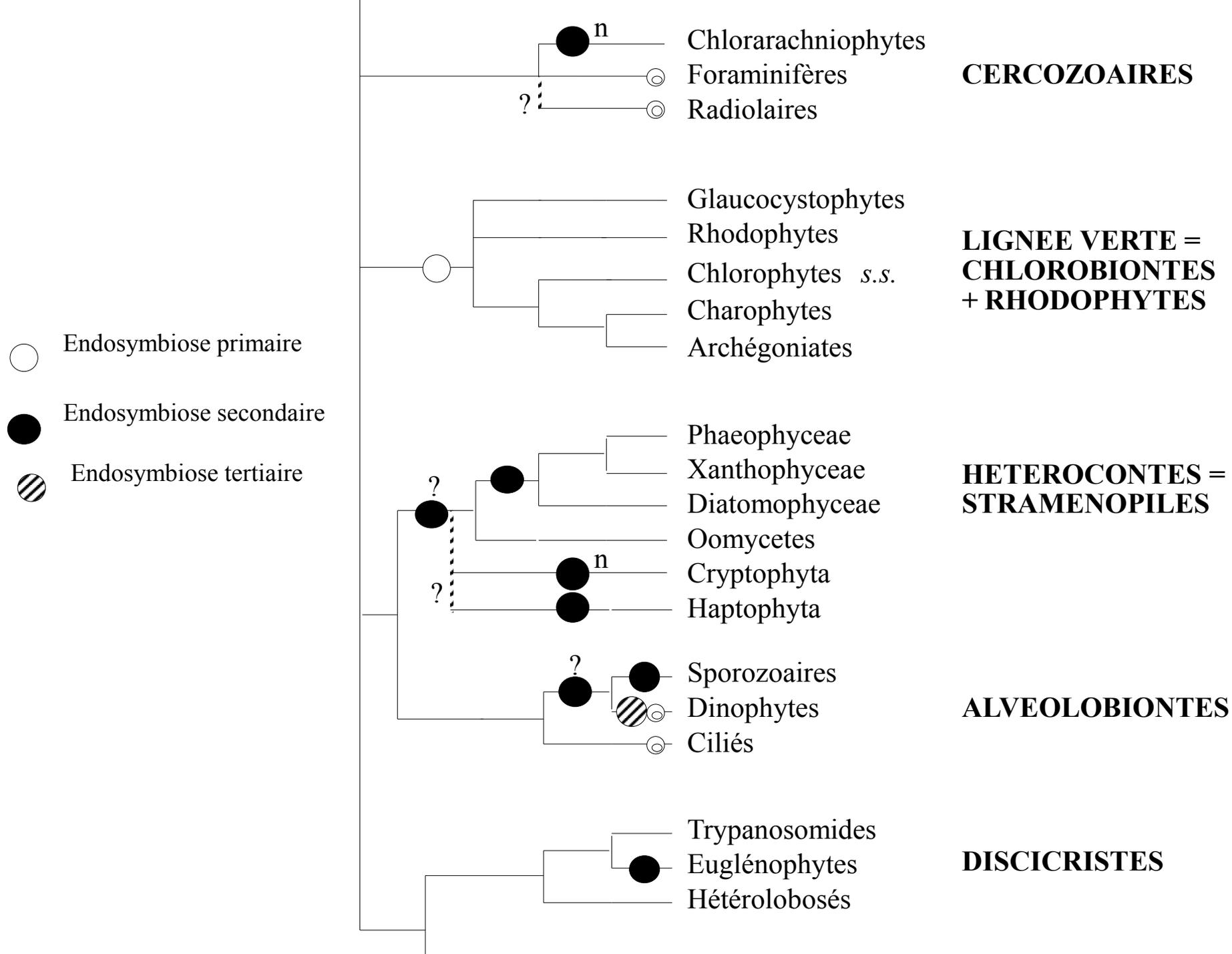
5 groupes  
photosynthétiques  
(62.5%)

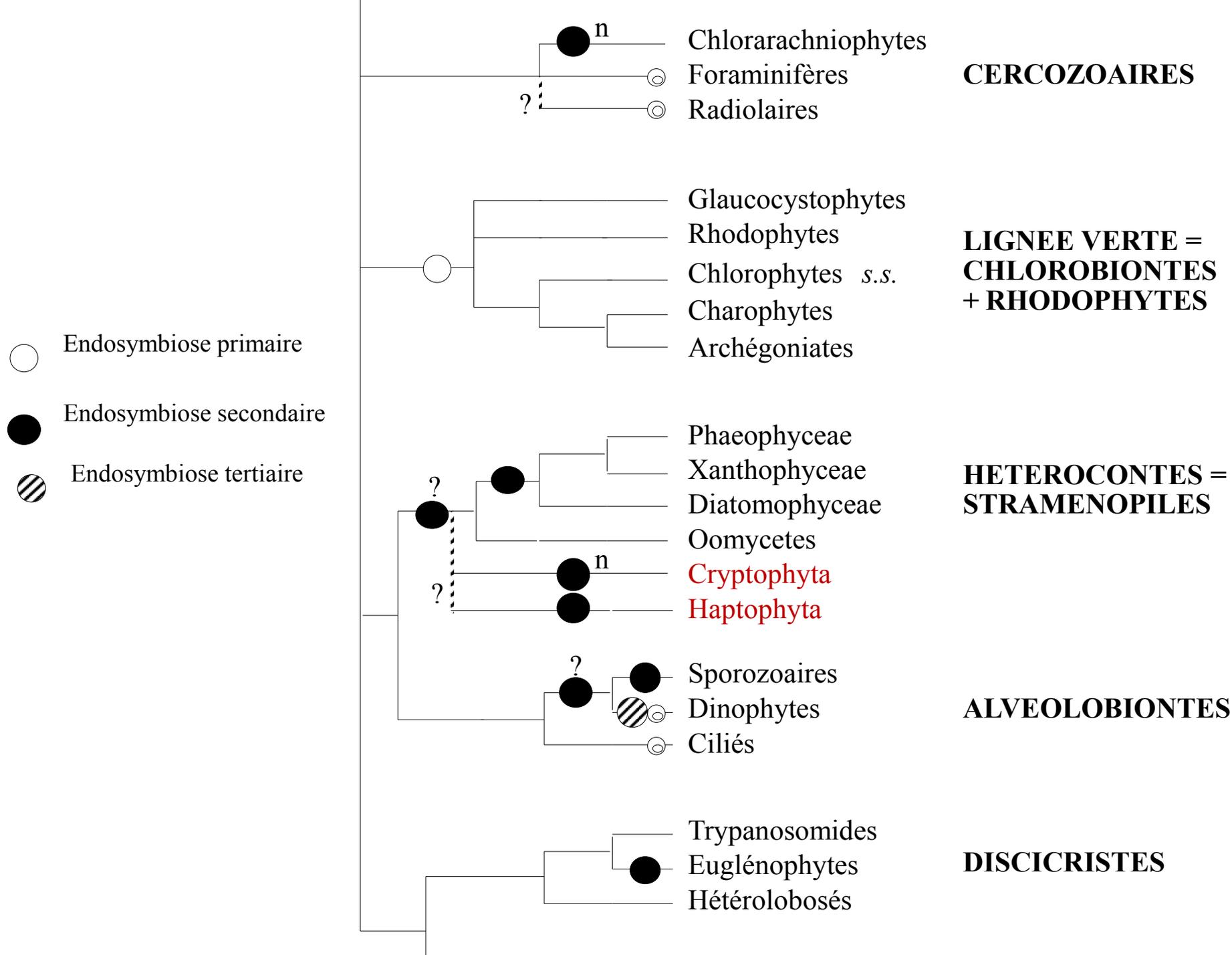
**2. Cet arbre phylogénétique des eucaryotes** met en scène les huit grands groupes reconnus aujourd'hui. Cet arbre est sans racine, c'est-à-dire qu'on ignore sur quelle branche a commencé l'évolution des eucaryotes. On constate que les termes *végétaux*, *champignons* et *animaux* ne correspondent pas à un groupe monophylétique (un ancêtre et tous ses descendants). Ainsi, les lignées qui ont « adopté » la photosynthèse (*en vert*), par suite d'endosymbiose (*les ronds roses, le nom*

*indique l'espèce acquise*), sont représentées dans cinq des huit groupes. Notons que certaines lignées naissent de la verte (*les triangles bleus*) d'un plaste (l'organite cellulaire qui contient la chlorophylle). Les champignons (*en marron*) sont constitués de deux lignées éloignées. Enfin, les animaux regroupent traditionnellement les métazoaires (*en bleu*) et les protozoaires (*en orange*), qui sont éparpillés dans l'arbre.

Selosse 2006 *Pour la science*

Endosymbioses secondaires et tertiaires: grande diversité des algues

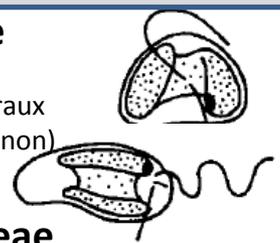




# HAPTOPHYTA

## Pavlovophyceae

- 1 plaste doré
- 2 flagelles inégaux latéraux
- **Haptonème** (visible ou non)
- Taille < 7 µm



## Prymnesiophyceae

- 2 plastes dorés
- 2 flagelles lisses égaux
- **Haptonème** (visible ou non)
- Ecailles organiques parfois calcifiées (coccolithophorales) sur corps cellulaire

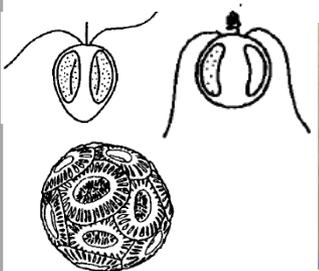
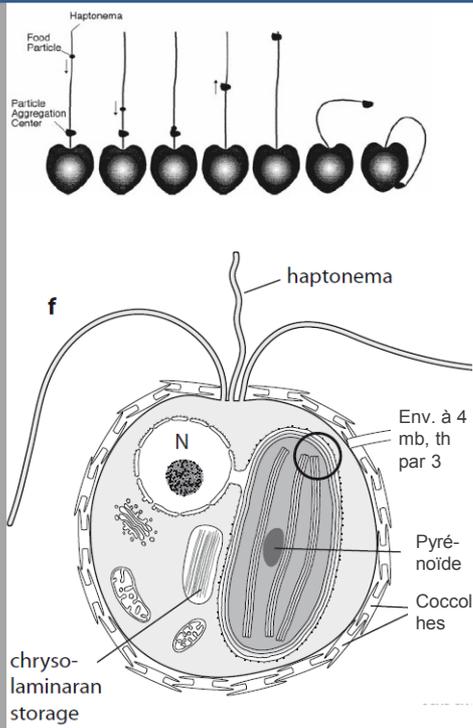


Photo : F. Jouenne



**PLASTE**

- Chl a, c2
- Fucoxanthine, hexanoyloxyfucoxanthine
- Enveloppe à 4 membrane
- Thylacoïdes par 3

**RESERVES**

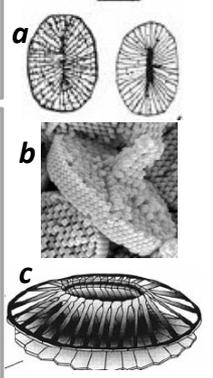
Chrysolaminarane dans cytoplasme

**FLAGELLES/HAPTONÈME**

- Haptonème de longueur variable (absent chez certaines espèces)
- **Pavlovophyceae** : 2 inégaux avec écailles en forme de clous et poils
- **Prymnesiophyceae** : 2 lisses et égaux

**PAROI**

- **Pavlov.** : écailles creuses
- **Prymnesio.** : écailles organiques non calcifiées (a) et calcifiées (chez les coccolithophorales : holo- (b) ou hétérococcolithes (c))





## Division HAPTOPHYTA

### Prymnesiophyceae

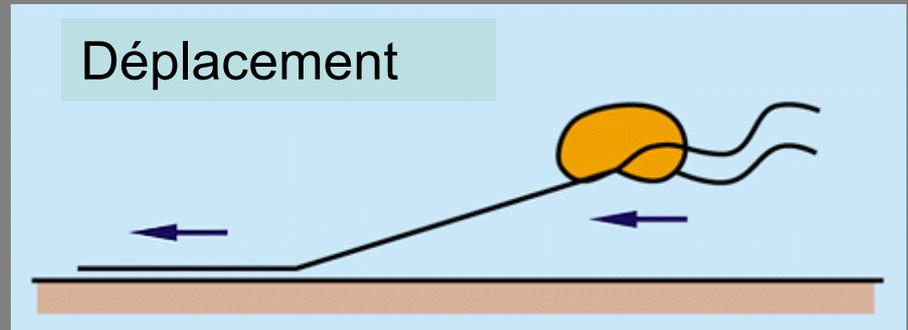
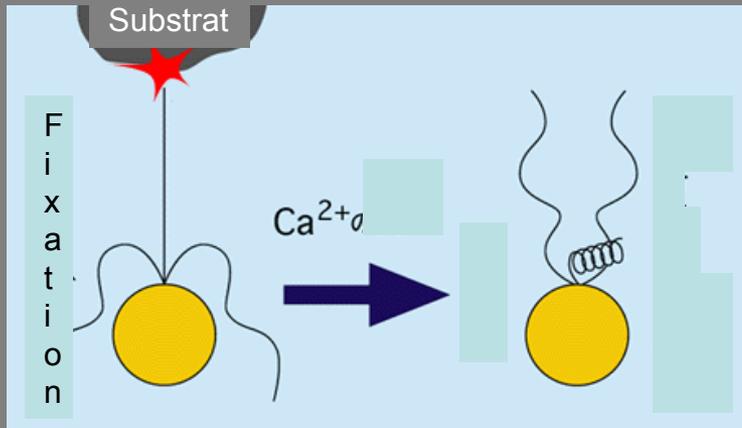
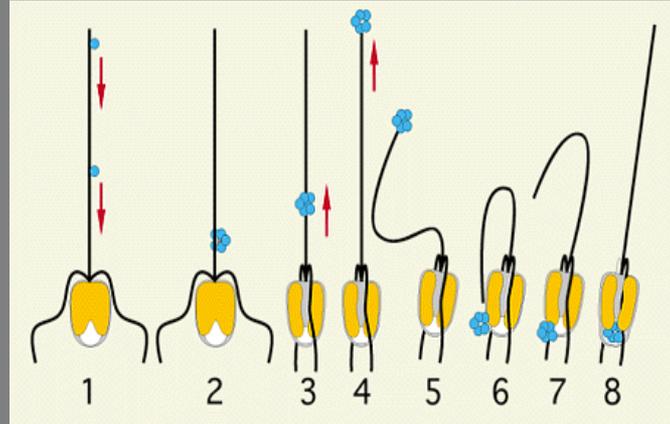
15 genres



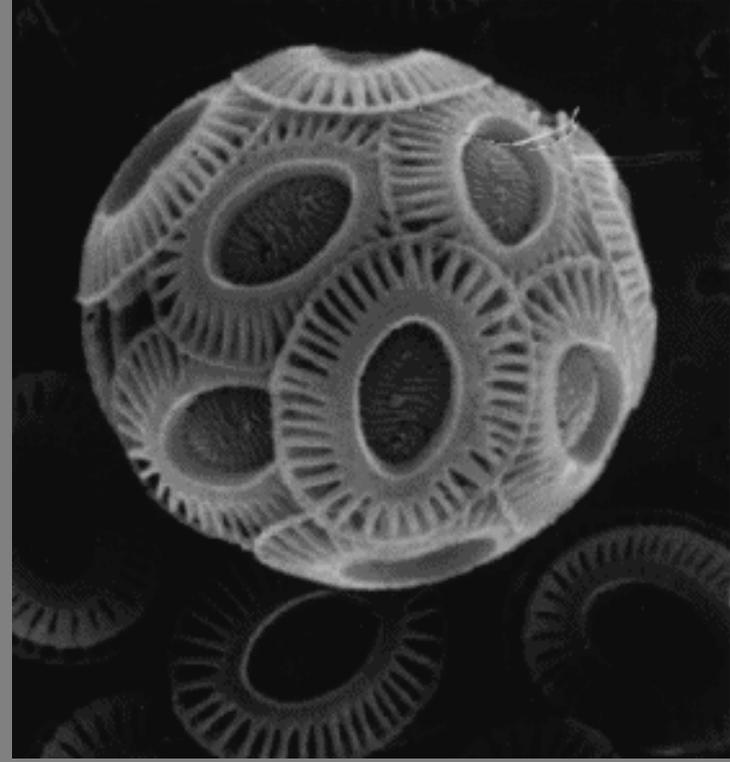
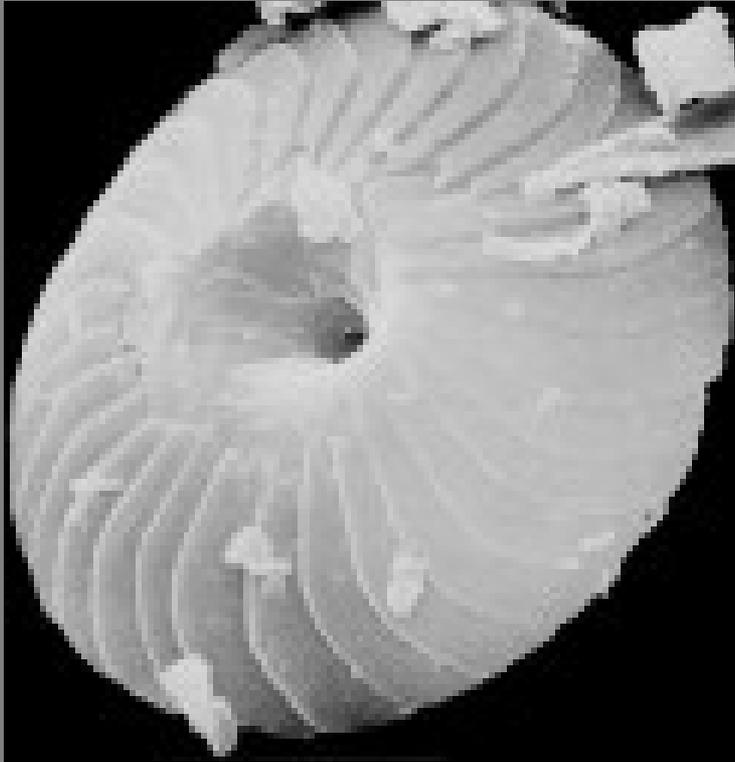
Chlorophylles *a* et *c*, pas d'amidon, haptonème entre les flagelles



## Rôle dans la nutrition

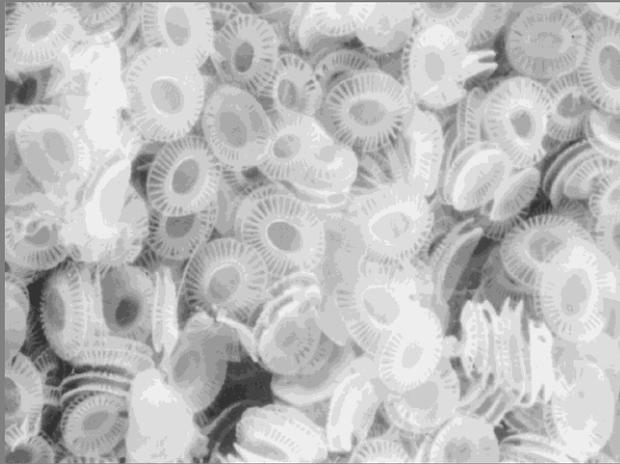


Haptonème : diverticule cellulaire filamenteux (contenant des microtubules entourés de réticulum), placé entre les flagelles. Selon les espèces, il sert à éviter les obstacles, adhérer au substrat ou même capturer des proies pour les espèces facultativement phagotrophes.



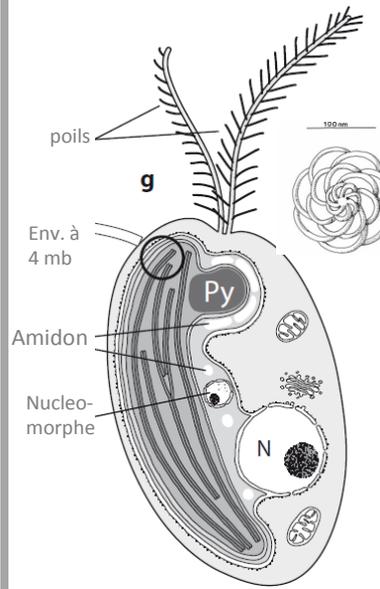
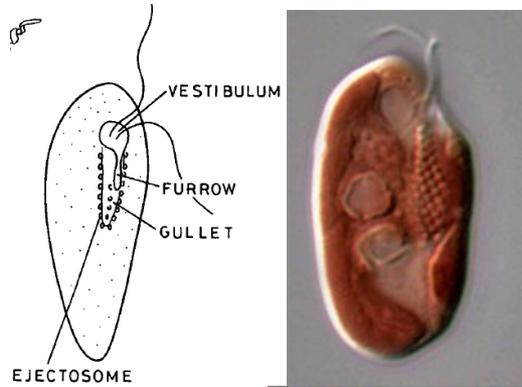
**Coccolites (Prymnesiophyceae)**

# *Emiliana huxleyi* Blooms



# CRYPTOPHYTA

- Cellule asymétrique
- 2 flagelles presque égaux, raides, insertion latérale
- 1 ou 2 plastes jaunes, rouges ou bleu/vert
- Vestibule avec rangées d'éjectosomes



## PLASTE

- Chl a, c2
- Phycoérythrine ou phycocyanine dans lumière des thylacoïdes
- Enveloppe à 4 membranes
- Thylacoïdes par 2
- Présence d'un nucléomorphe

## RESERVES

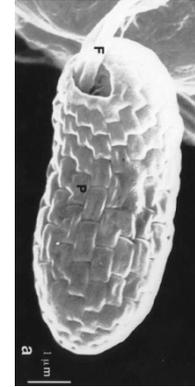
amidon dans l'espace périplastidial

## FLAGELLES

- Poils flagellaires tubulaires en 2 parties (1 ou 2 rangée)
- Ecailles présentes ou non

## PAROI = Pellicule

1 ou plusieurs plaques sous le plasmalemme)

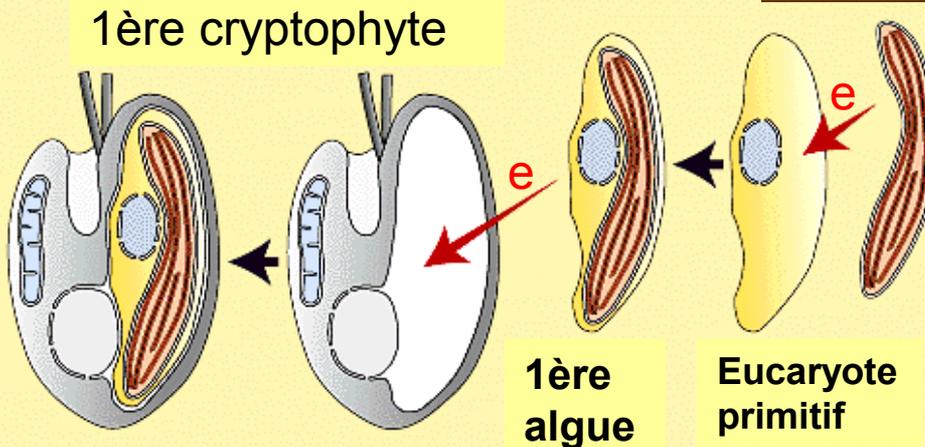




## Division CRYPTOPHYTA

20 genres

### Scénario endosymbiotique



Les plastes des Cryptophytes, limités par 4 membranes, dérivent d'algues rouges endosymbiotiques régressées (dont le noyau persiste à l'état vestigial).

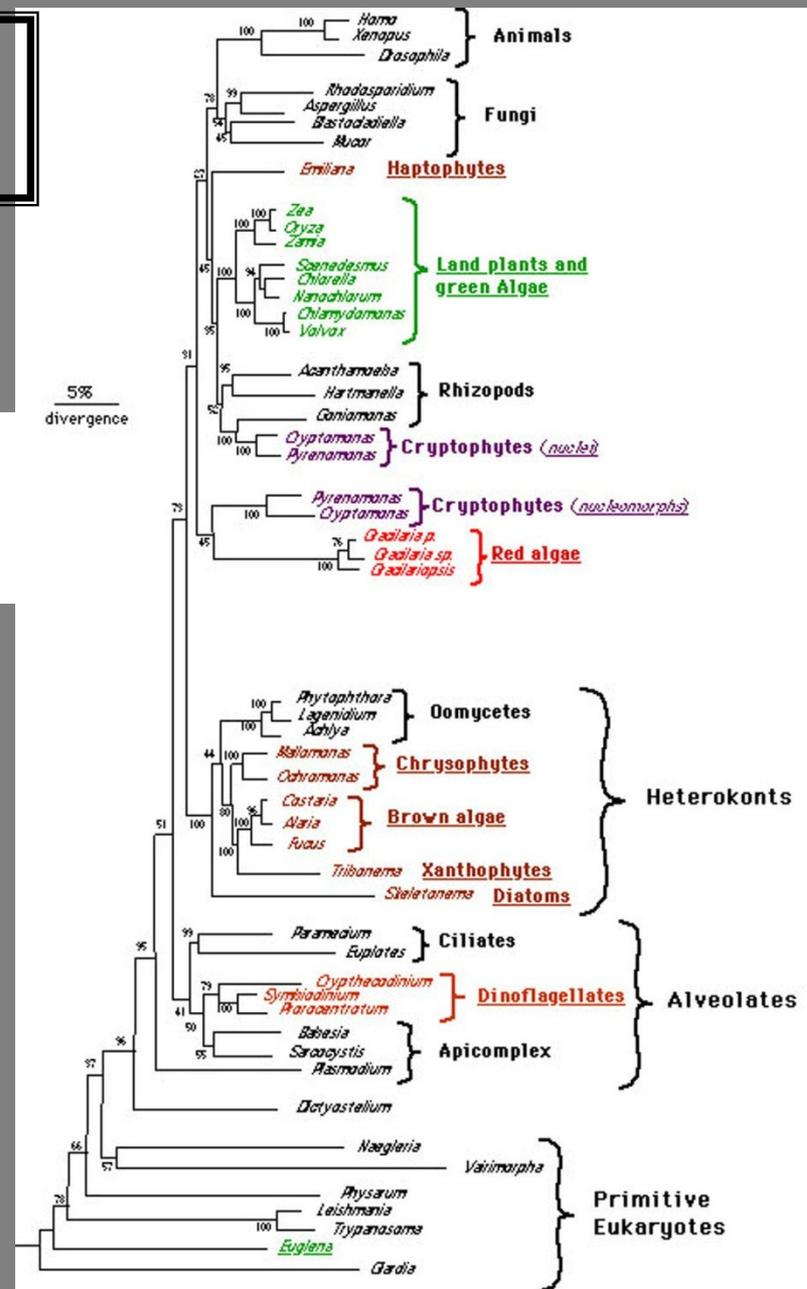
# Arguments phylogénétiques en faveur de l'endosymbiose II

Nucléomorphe = noyau vestigial

**Hypothèse:** nucléomorphe phylogénétiquement proche du noyau d'une cellule hôte d'une endosymbiose I

**Pour vérifier:** Étude des gènes homologues: exemple l'ARN r 18 S

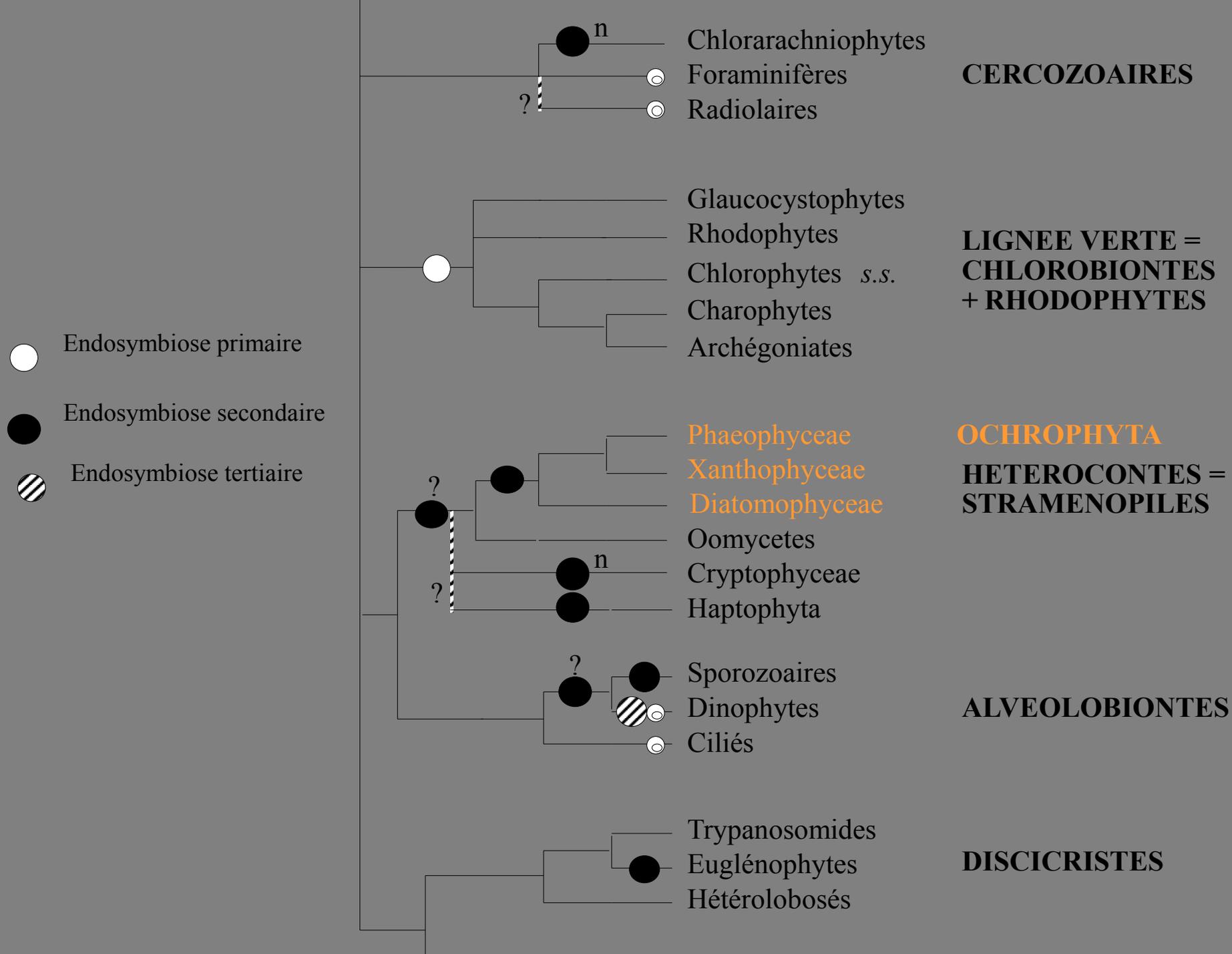
**Résultats:** les nucleomorphes des cryptophytes et les algues rouges sont monophylétiques (Douglas 1985)



Phylogeny of eukaryotes based on small-subunit rRNA sequence comparisons. The tree was inferred by neighbour-joining from a Jukes-Cantor distance matrix and has the same topology as the consensus of 100 bootstrap replicates. It has been redrawn from: Mc Fadden *et al.* 1994, *Eur. J. Phycol.*, 29: 29-32.



*Cryptomonas*



600 genres

## Ochrophyta

= Chromophyta

= Heterocontophyta

Groupe monophylétique comprenant les autotrophes unicellulaires et filamenteux avec des plaste à 4 membranes probablement dérivé d'une algue rouge endosymbiotique.

Caractéristiques:

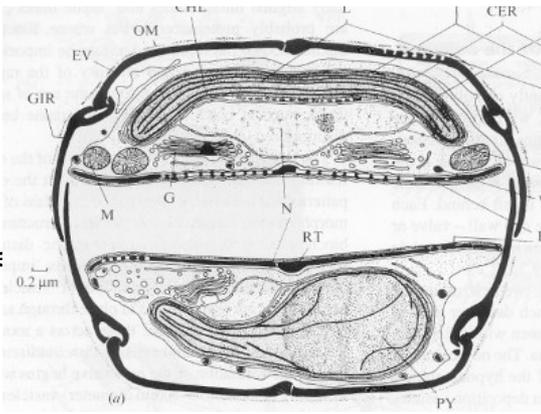
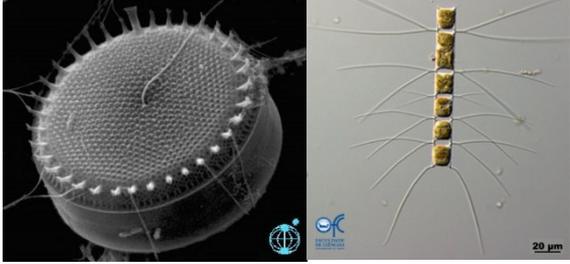
- fucoxanthine : "Lignée Brune"
- une paroi cellulosique,
- des réserves sous forme de  $\beta$ -1-3 glucanes solubles (laminarines stockées dans les vacuoles),
- des mitochondries à crêtes tubulaires
- un appareil cinétique à deux flagelles dissemblables.

De nombreux picoeucaryotes (= de taille micrométrique) appartiennent à ce groupe, soit dans des clades connus, soit dans des clades inconnus à ce jour (notamment un clade-frère des oomycètes). Des travaux récents suggèrent que ce groupe pourrait être un groupe-frère des Alvéolobiontes (qui ont comme eux des mitochondries à crêtes tubulaires).

# OCHROPHYTA – DIATOMOPHYCEAE (Diatomées)

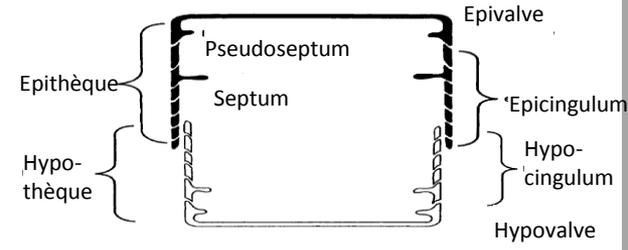
## Caractères généraux / classification

- Unicellulaires ou colonnies
- Plastés dorés
- **Pas de flagelles** (1 chez certains gamètes)
- Paroi en silice hydratée: **le frustule**
- **Formes variées du frustule : critère taxinomique**

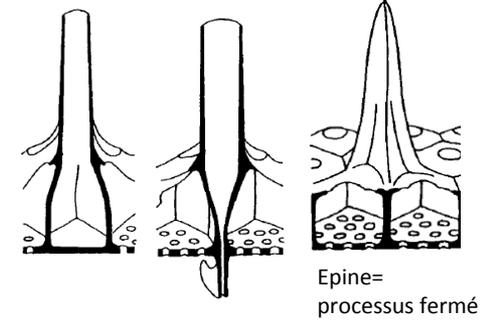


## PAROI : LE FRUSTULE

### Terminologie des composants du frustule



### Les processus : projections à parois silicifiées



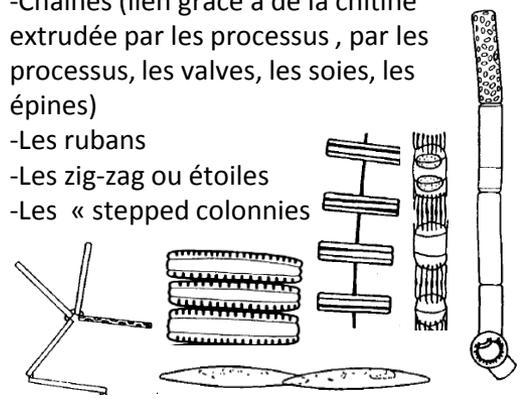
**PLASTE**

- Chl a, c2
- Fucoxanthine, hexanoyloxyfucoxanthine
- Enveloppe à 4 membrane
- Thylacoïdes par 3

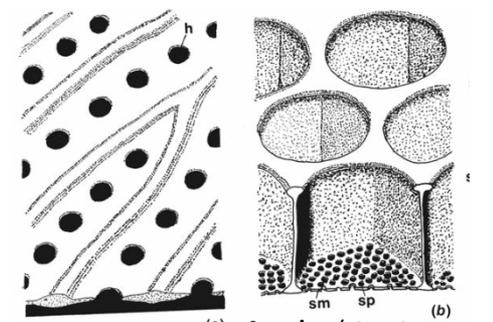
**RESERVES**  
Chrysolaminarie dans cytoplasme

## LES COLONNIES

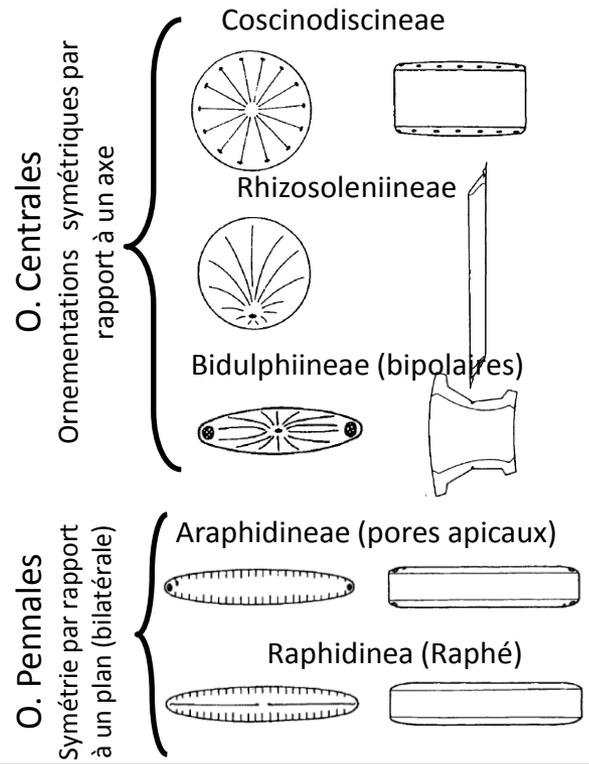
- Chaines (lien grâce à de la chitine extrudée par les processus, par les processus, les valves, les soies, les épines)
- Les rubans
- Les zig-zag ou étoiles
- Les « stepped colonnies »



## Différents types de perforation du frustule



Simples « pores » (a)  
Areolae (structure polygonale complexe) avec ici loculus vers l'extérieur et crible vers l'intérieur (b)





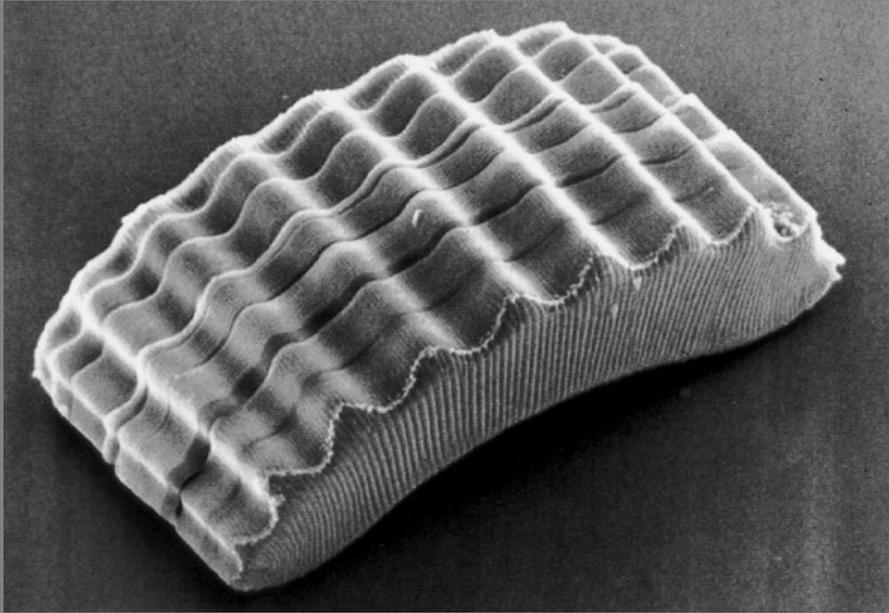
# Diatomophyceae

Bacillariophyta = Diatomées

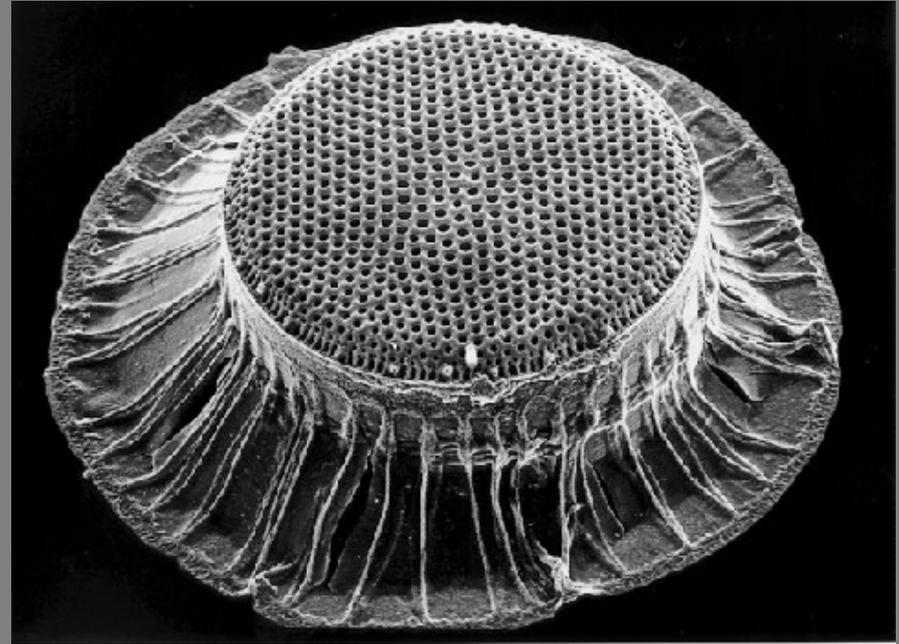
Unicellulaires à frustules  
siliceux



# Frustules (thèques):



- symétrie bilatérale:  
Ordre des Pennales

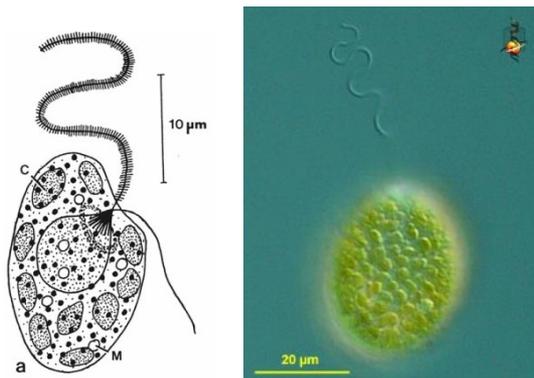


- symétrie radiale :  
Ordre des Centrales

# Ochrophyta - Autres classes

## RAPHIDOPHYCEAE

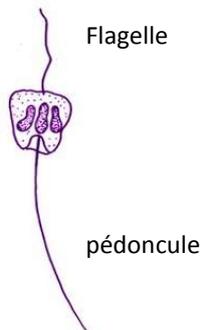
- Cellule souvent « verrueuse »
- 2 flagelles insérés latéralement, l'un tractant la cellule
- 1 ou 2 plusieurs plastes jaunes/dorés
- Présence de mucocystes



## DICTYOCOPHYCEAE

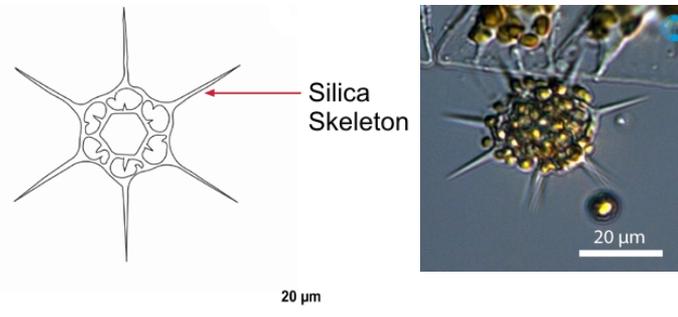
### Pedinellales :

- 1 long flagelle et 1 flagelle vestigial (pas visible)
- 3 ou 6 plastes jaunes/dorés
- Parfois des tentacules ou pédoncules



### Dictyochales (genre *Dictyocha*)

- 1 long flagelle et 1 flagelle vestigial (pas visible)
- 3 ou 6 plastes jaunes/dorés
- Noyau central et chloroplastes dans des expansions périphériques
- Squelette siliceux en 2 parties

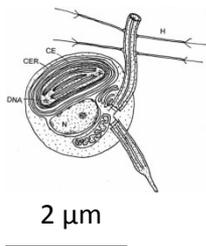


Les classes moins bien connues dans le phytoplancton (petite taille, fragiles)

### EUSTIGMATOPHYCEAE



### BOLIDOPHYCEAE



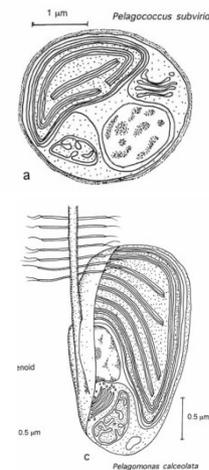
### CHRYSOPHYCEAE



### PINGUIPHYCEAE



### PELAGOPHYCEAE



# Ochrophyta - Xanthophyceae

## Xanthophyceae ou Tribophyceae

### Caractères généraux / classification

- 90 genres et 600 espèces  
(classification mal résolue)

Coccoïdes, monadoïdes, amiboïdes, palmelloïdes, siphonnées ou filaments pluricellulaires.

Absence d'amidon dans le plaste

Parois cellulose mucilagineuse

Dulçaquicole, eaux saumâtres et marines

Planctoniques ou bethiques

Association (lichen)



### PLASTE

- Chl a, c
- Plaste nombreux
- Enveloppe à 4 membranes
- Thylacoïdes par 3

### RESERVES

Chrysolaminarine

### REPRODUCTION

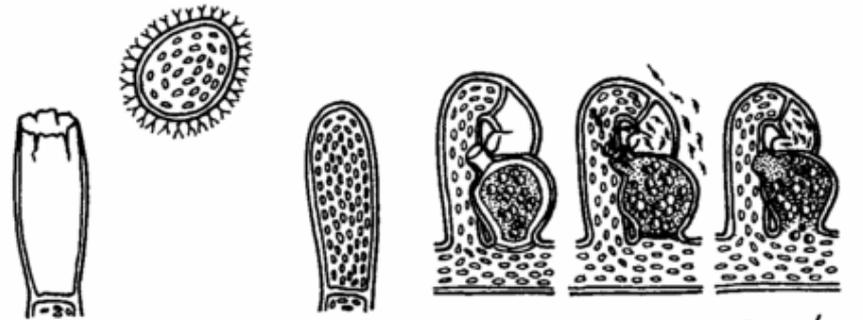
Asexué

Sexué (cycle probablement diploïde)

Oogame chez les *Vaucheria*

Isogame ou anisogame chez les *Botrydium*

Zoospores de grande taille pourvues de multiples paires de flagelles





## Class Xanthophyceae

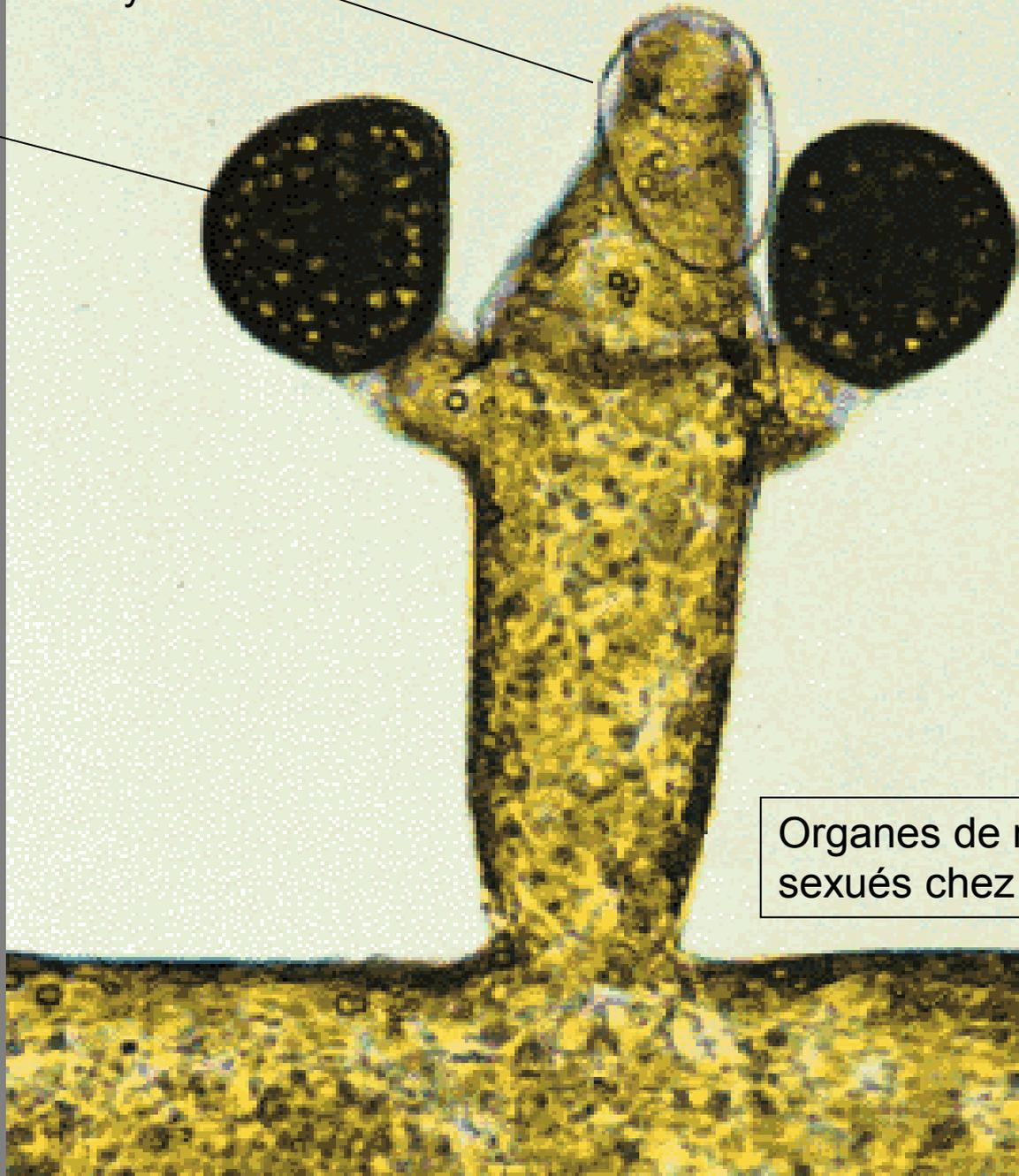


*Vaucheria sp.*

Unicellulaires ou filamenteux (coenocytique)

vestige du gamétocyste mâle

oosphère



Organes de reproduction  
sexués chez *Vaucheria*

# Ochrophyta - Phaeophyceae

## PHAEOPHYCEAE

285 genres et 2000 espèces

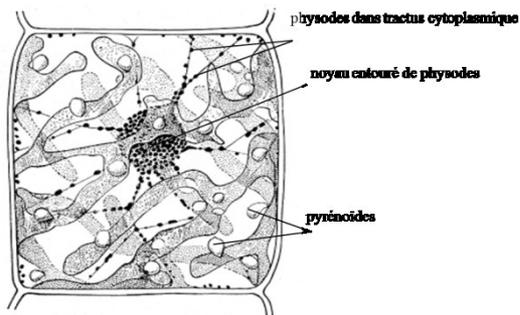
Pluricellulaires Filaments microscopiques, thalle pseudoparenchymateux laminarine ( $\beta$  1,3 glucane) et mannitol

### PLASTE

- Chl a, 2 formes de Chl c
- $\beta$  carotènes
- Fucoxanthine, violaxanthines
- Enveloppe à 4 membrane (CER)
- Chloroplastic Endoplasmic Reticulum: vestige de l'endosymbiose secondaire en continuité avec l'enveloppe nucléaire
- Thylacoïdes par 3
- 1 à plusieurs plastes par cellules

### RESERVES

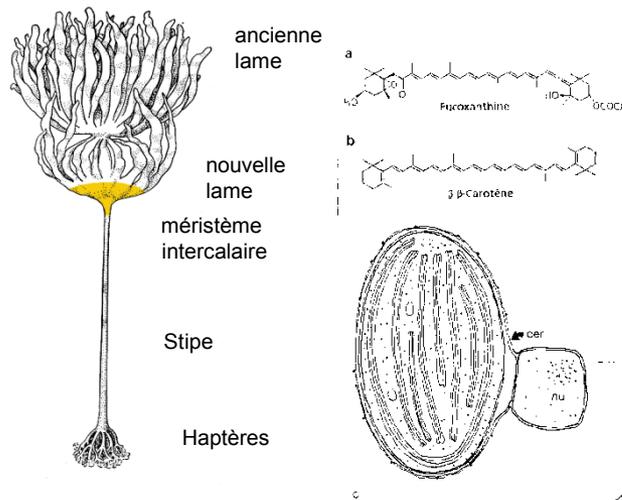
laminarine ( $\beta$  1,3 glucane) et mannitol



plusieurs plastes ribasés pariétaux, chacun avec plusieurs pyrénoïdes casés (cellule de Phaeophyceae)

### PHYSODES

Vésicules réfringentes dans la vacuole qui contiennent des tannins (phlorotannins = phénol) similaires aux terpènes.



### PAROI

- Cellulose (support structural, 1 à 10% du poids sec)
- Acide alginique (polymère de mannuronique et guluronique (35 à 50% du poids sec) sels (alginates) de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  (E 401...))
- Polysaccharides sulfatés (Fucanes)

### 2 Caractères autapomorphiques

- Plasmadesmata



Graham & Wilcox (2000) Prentice Hall

- Sporocystes uni et pluriloculaires

meioses (a) mitoses (b)

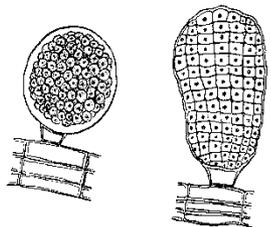


FIG. 27. (a) unilocular and (b) plurilocular sporangia of *Sphaelaria* sp.

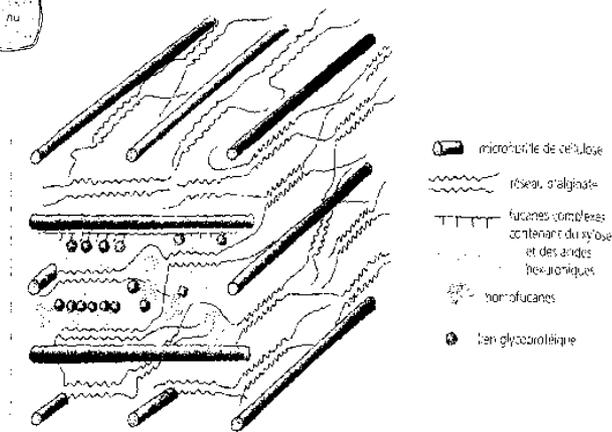


Fig. 3.41. Structure schématique de la paroi des algues brunes. (D'après Kloreg et Quatrano, 1988.)

### REPRODUCTION

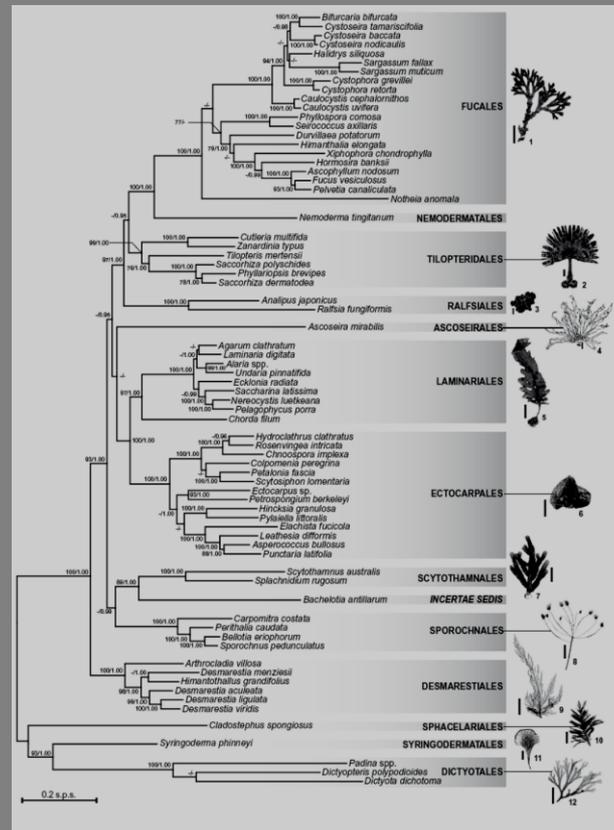
Sexuée

- isogamie, oogamie (oosphère et spermatozoïde)
- Chimiotactisme: attraction du gamète mâle par le gamète femelle par
- émission d'ectocarpènes

Sporocyste: uniloculaire ou pluriloculaire

Cycle de reproduction:

- alternance de phase haploïde et diploïde individualisée (isomorphe ou
- hétéromorphe)

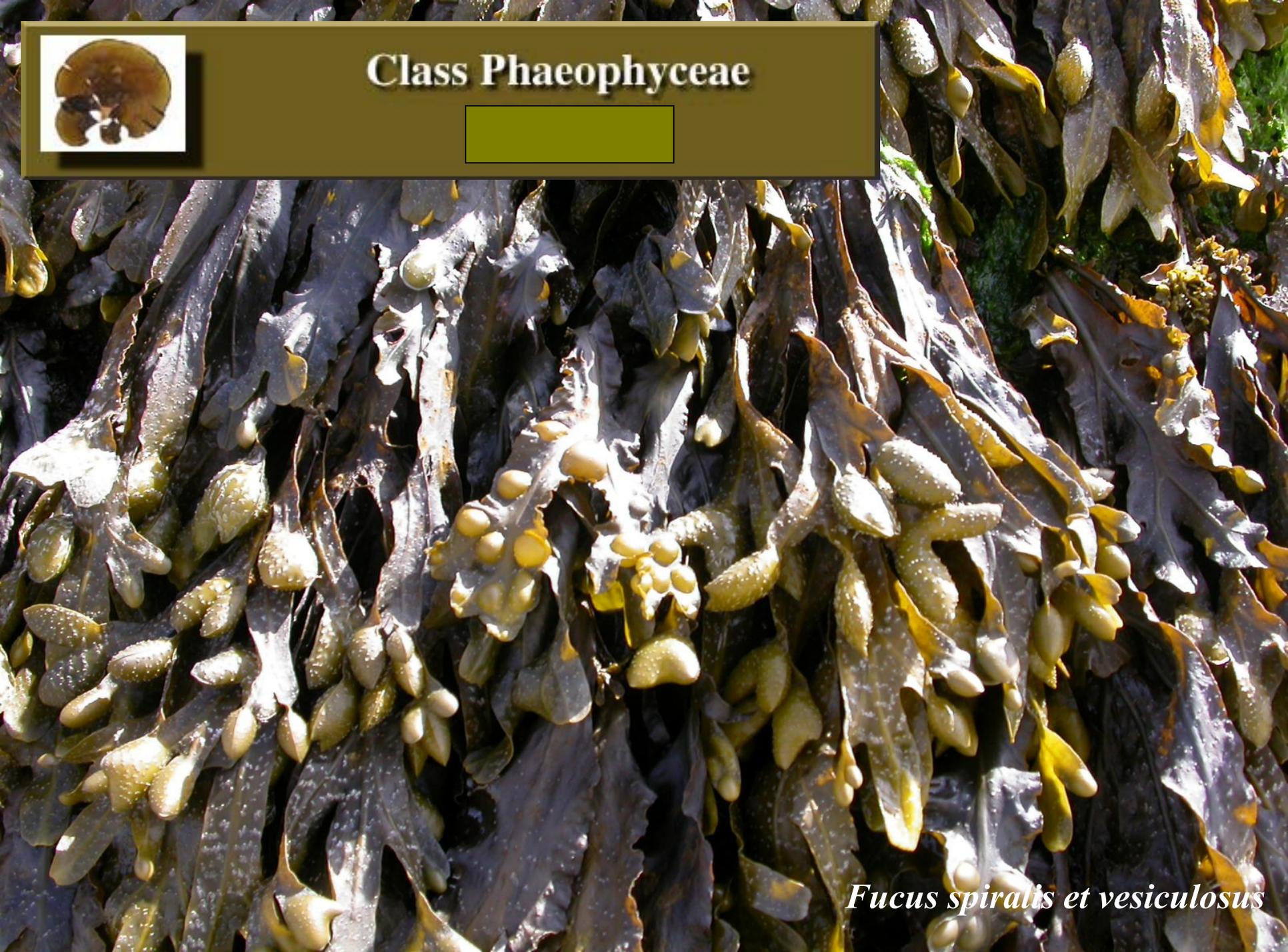


ML phylogram resulting from the combined global data set (72 taxa, 10 genes, 10325 nt).





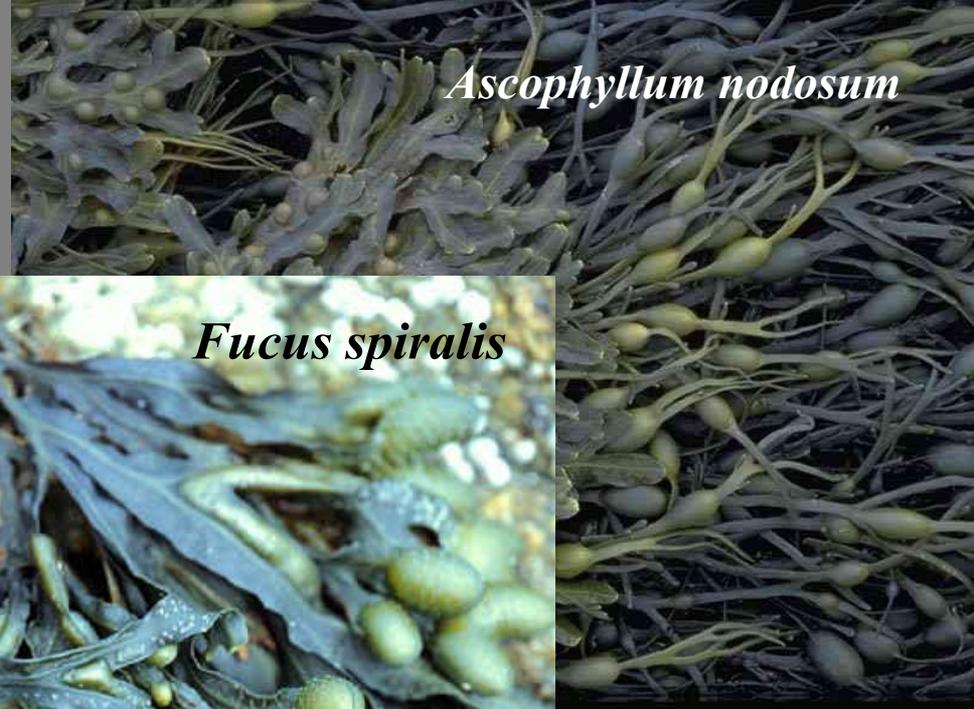
## Class Phaeophyceae



*Fucus spiralis et vesiculosus*

# Les Fucales

*Ascophyllum nodosum*



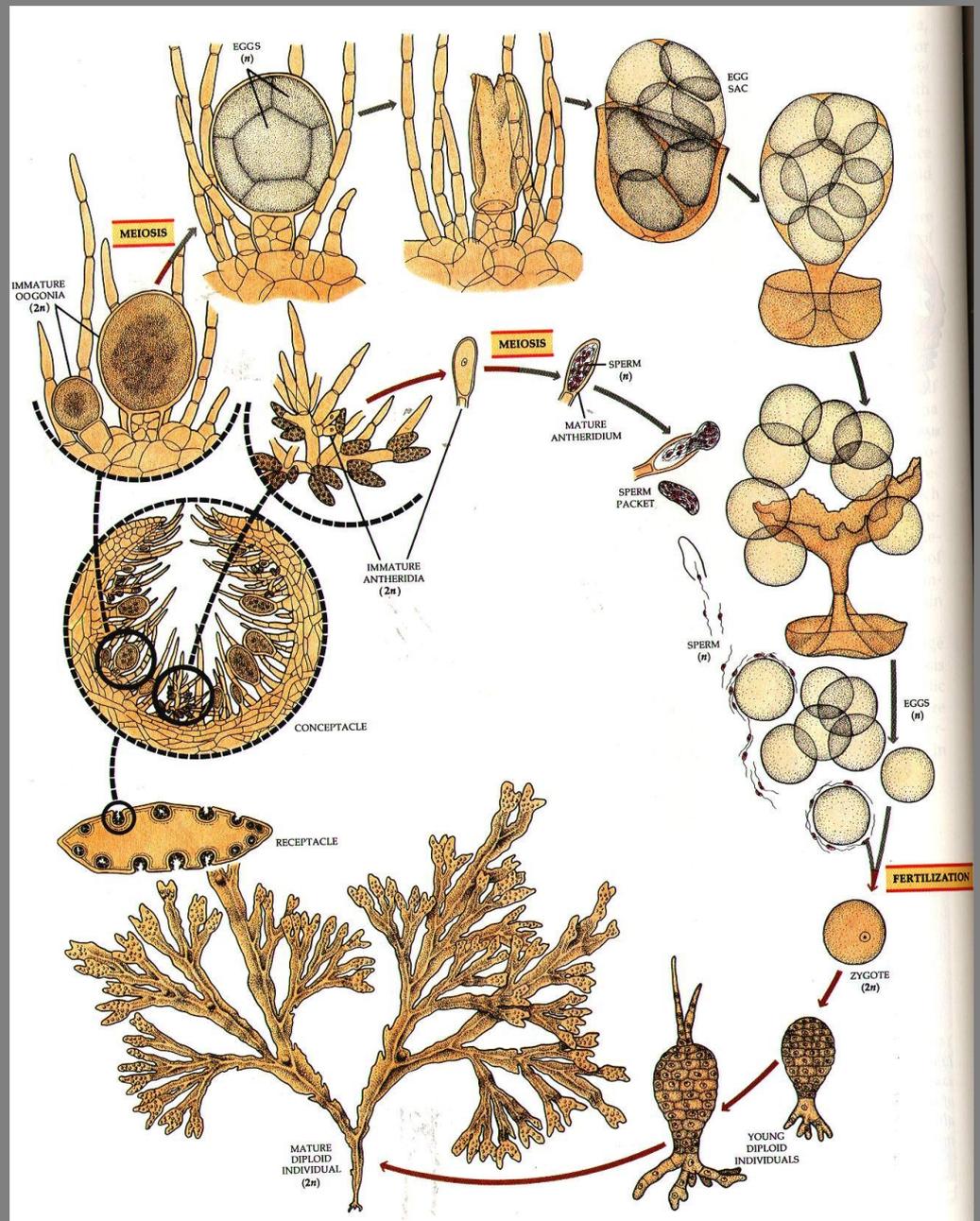
*Fucus spiralis*



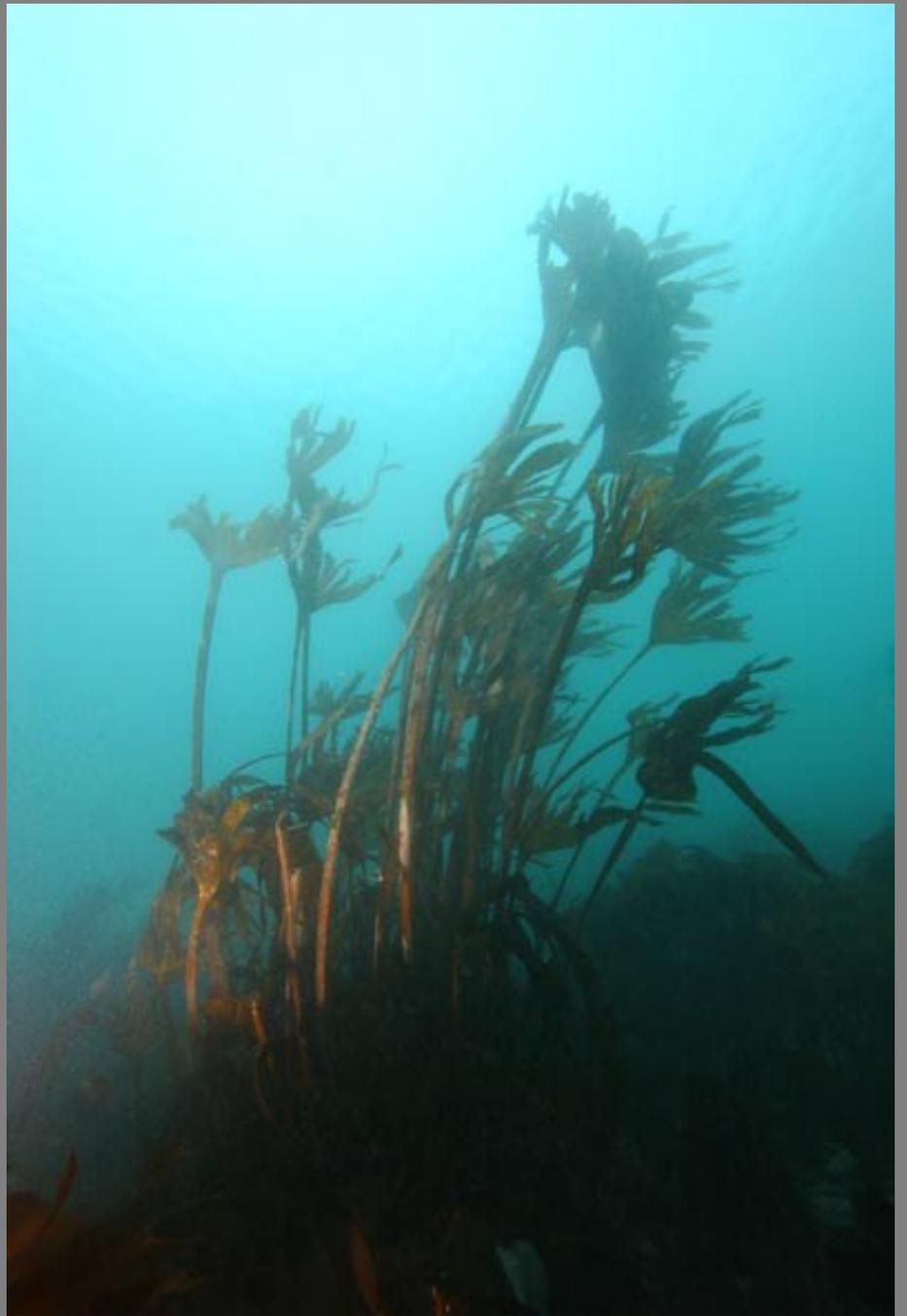
*Fucus vesiculosus*



# Cycle du *Fucus spiralis*



*Laminaria hyperborea*



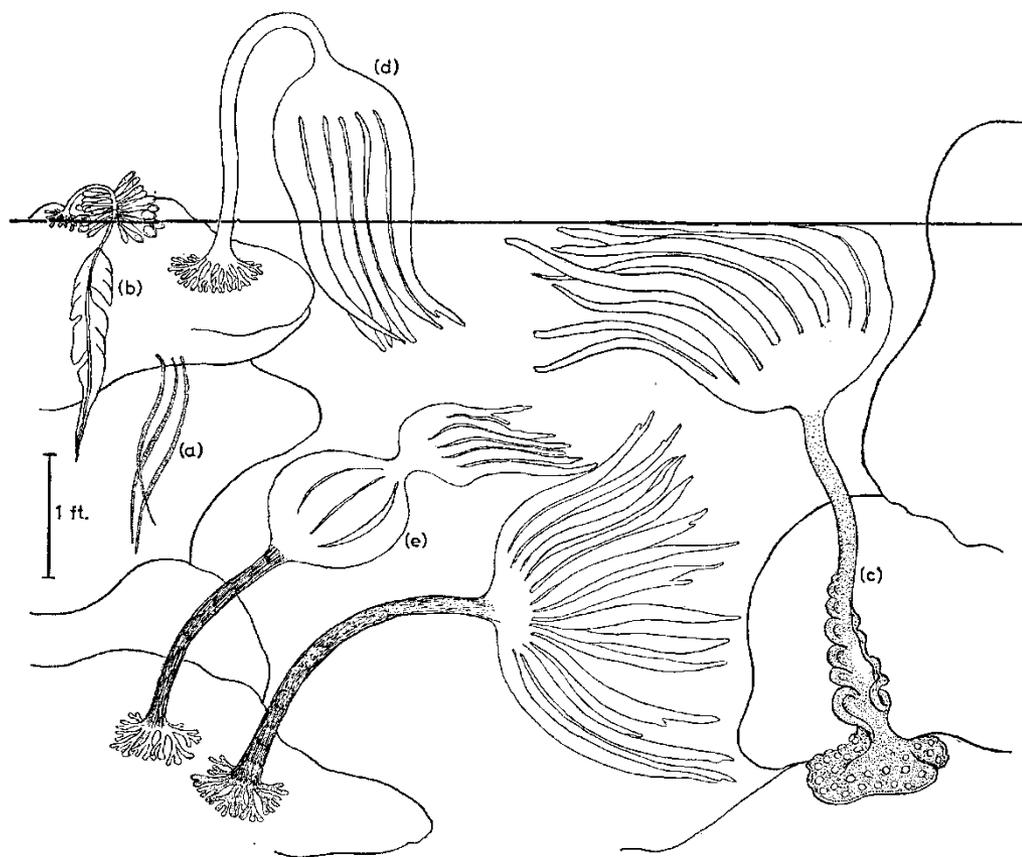
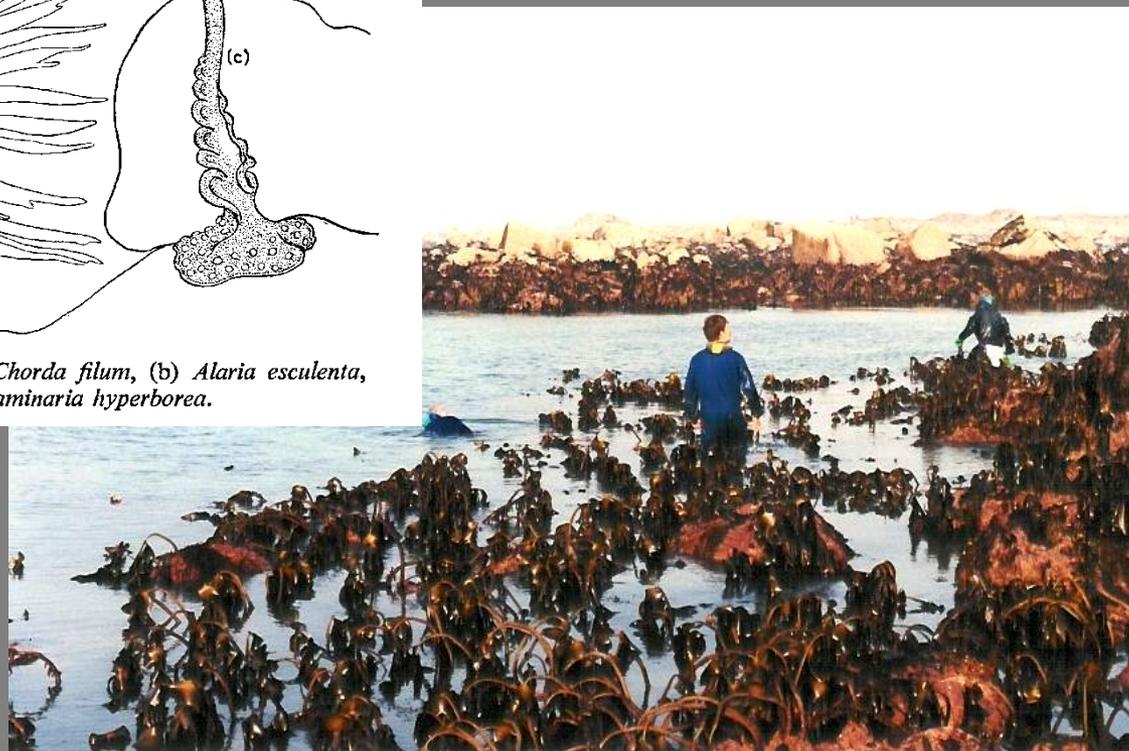
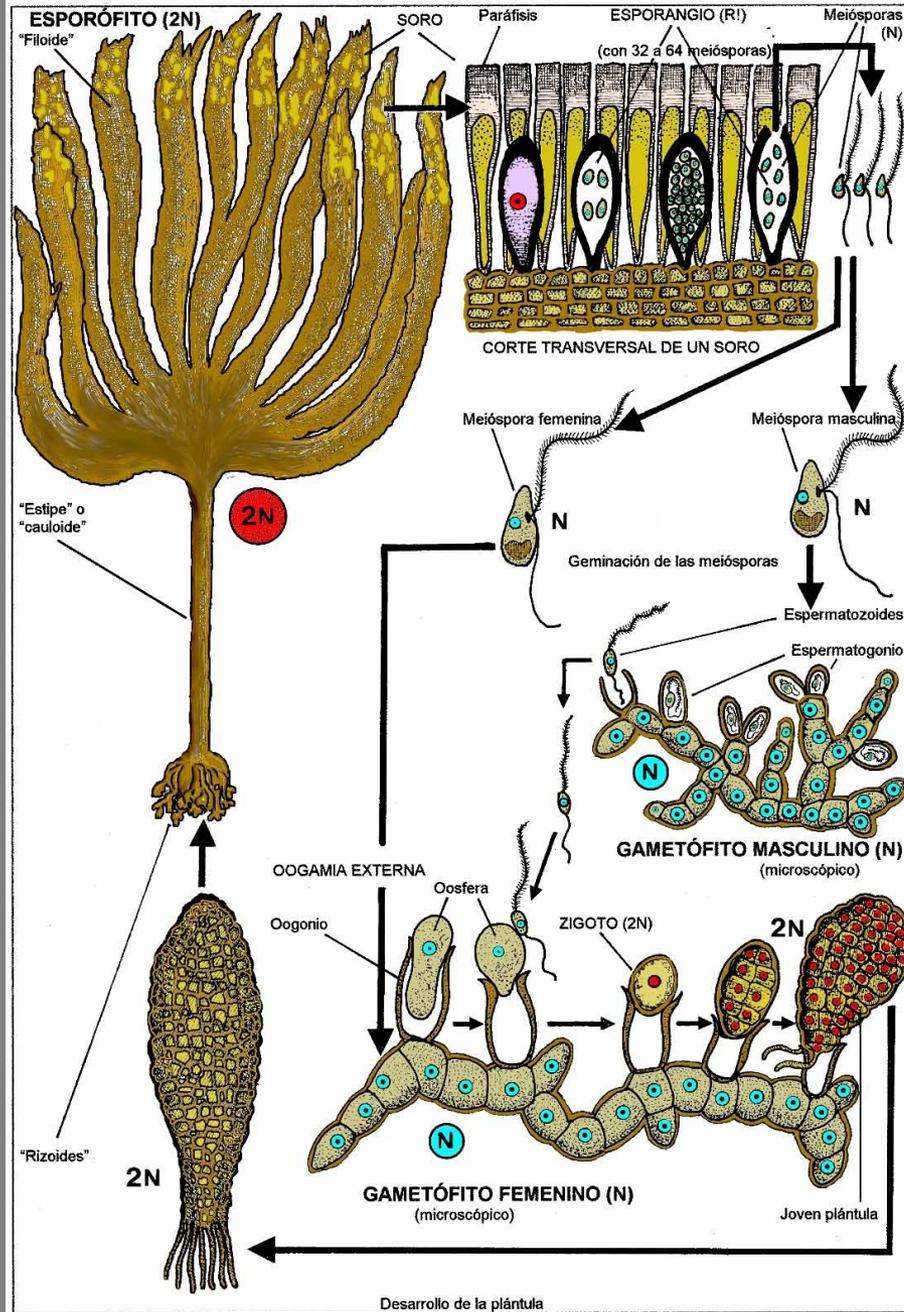


FIG. 30. Laminariales found in the British Isles. (a) *Chorda filum*, (b) *Alaria esculenta*, (c) *Saccorhiza polyschides*, (d) *Laminaria digitata*, (e) *Laminaria hyperborea*.



**CICLO DE LAMINARIA FLEXICAULIS (Feofíceas, algas pardas)**  
**DIGENÉTICO HETEROMÓRFICO CON ESPORÓFITO DOMINANTE, DIPLOHAPLOFÁSICO.**  
**ORGANISMO DIPLOBIÓNTICO**





Laminariales

A sunset over a large body of water, likely a lake or bay. The sun is low on the horizon, creating a bright, shimmering path of light across the water's surface. The sky is filled with soft, golden light and some light clouds. In the distance, a small boat is visible on the water, and the horizon line is marked by some landmasses.

- **Références:**

- **de Reviere B, 2002 « Biologie et phylogénie des algues »  
Edition Belin Tome 1 et 2**
- **Lee, R.E. 1989. « Phycology » Cambridge University Press**
- **Sze, P. « A biology of the algae » WCB, McGraw-Hill**