


Master 1: Biologie Moléculaire des Microorganismes

Microorganismes
photosynthétiques et valorisation
de la microflore du sol

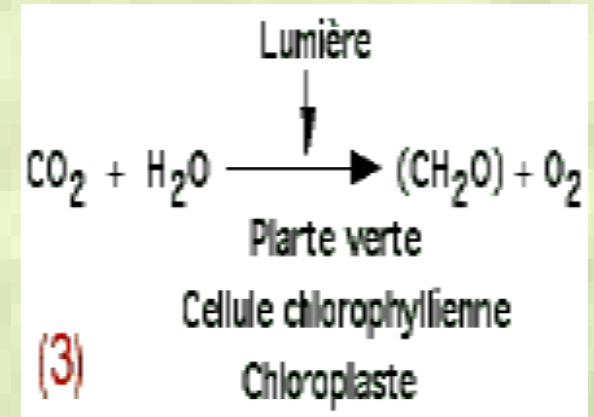
Pr. MIHOUBI I.

A close-up photograph of a green leaf, showing a detailed network of veins. The veins are light green and form a complex, branching pattern across the darker green leaf surface. The texture of the leaf is visible, with small, irregular cells forming the leaf's surface.

Chapitre 1: Généralités sur la photosynthèse

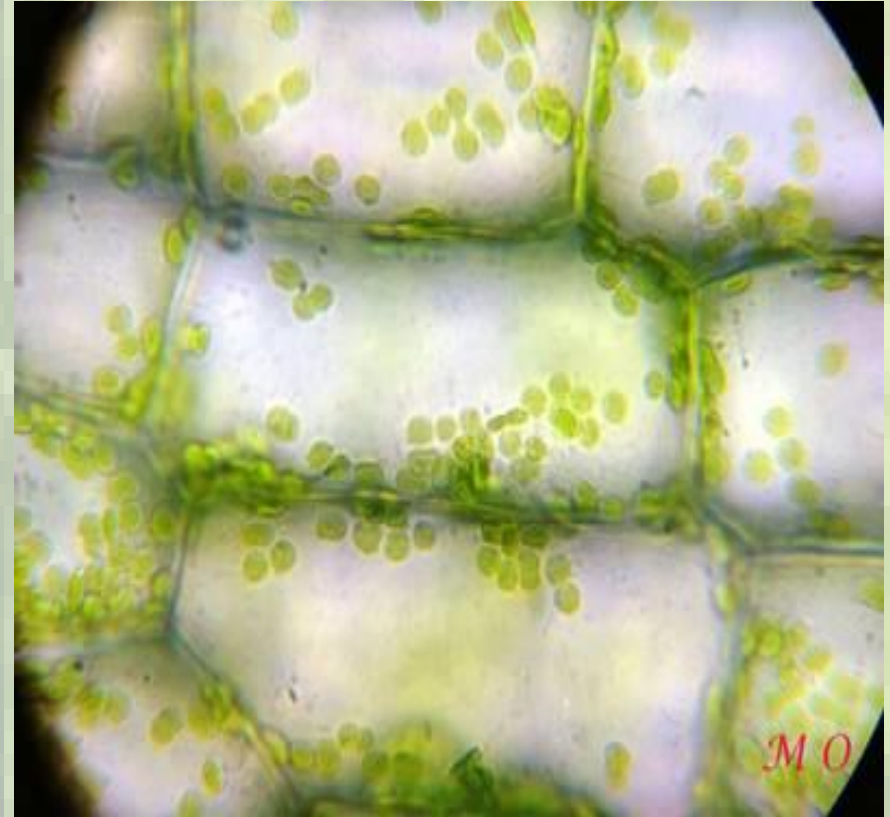
Définition

- La photosynthèse est l'un des processus biochimiques (biologique, physico-chimique) les plus fondamentaux et les plus anciens de la vie.
- C'est le processus par lequel la plupart des plantes, des algues et certaines bactéries photosynthétiques utilisent l'énergie lumineuse pour réaliser la synthèse de molécules organiques (hydrate de carbone + O₂), à partir de composés minéraux CO₂ + H₂O).
- Cette absorption de lumière visible est réalisée grâce à un pigment : la chlorophylle.

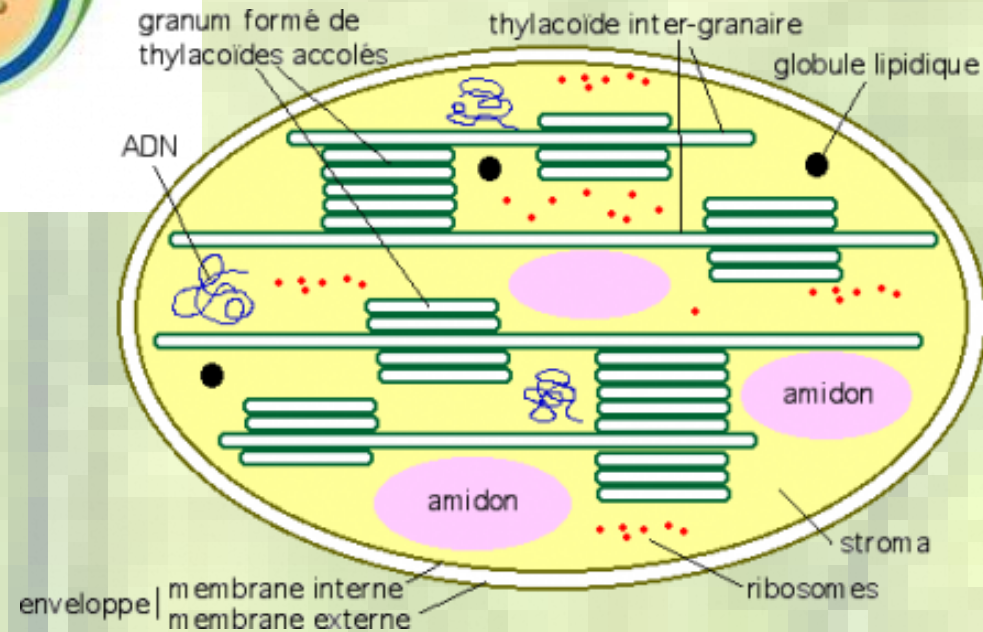
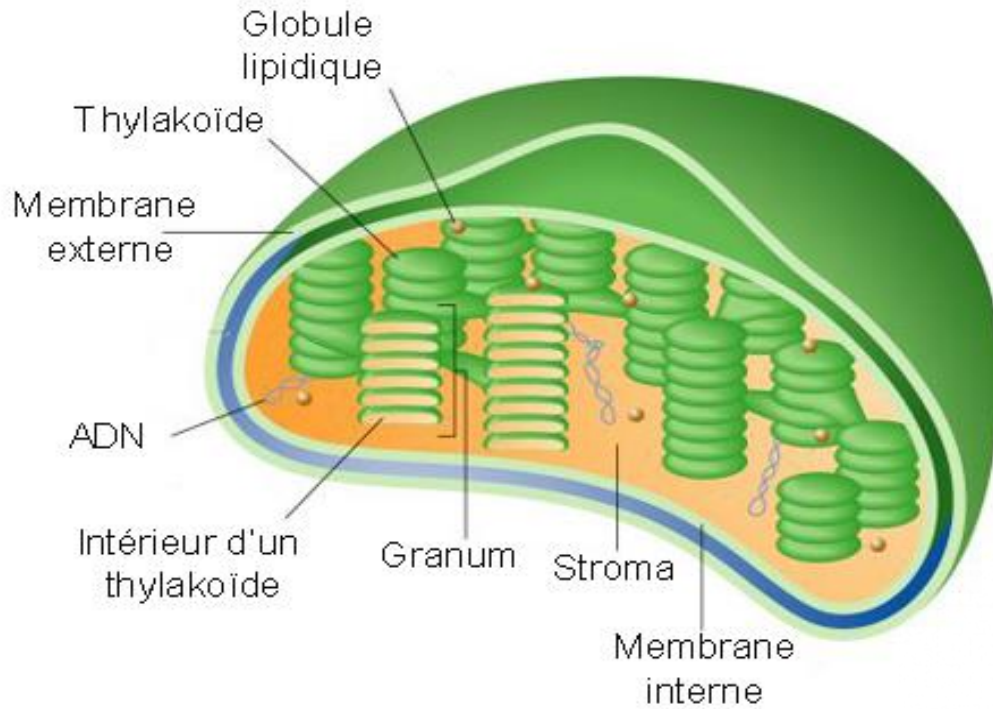


Site de la photosynthèse: le chloroplaste

- Présents en grands nombre dans les cellules végétales, bactéries phototrophes (70 chloroplastes/cellule)
- Taille: 2 à 10 μm
- Accomplie la photosynthèse
- conversion d'énergie lumineuse en énergie chimique au niveau des membranes des thylakoïdes.

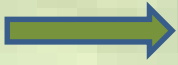


Structure interne du chloroplaste



- Les chlorophylles utilisées par certaines bactéries photosynthétiques sont appelées **bactériochlorophylles**.
- Elles absorbent la lumière à des longueurs d'onde plus grandes que celles captées par la chlorophylle a.
- Outre la chlorophylle, la photosynthèse met en jeu d'autres pigments photosynthétiques : les **caroténoïdes** (500-700 nm) et les **phycobilines** qui sont présents exclusivement chez les algues et les cyanobactéries.
- Ces derniers sont appelés **pigments accessoires** car ils absorbent la lumière non captée par les chlorophylles (470-630 nm). (Chlorophylle a : 700 nm ; chlorophylle b : 680 nm)

Types de photosynthèse

- Chez les plantes, les algues et les bactéries photosynthétiques (cyanobactéries, bactéries vertes et pourpres sulfureuses), la photosynthèse peut être **oxygénique** ou **anoxygénique**.
- Lors du processus photosynthétique de ces organismes, les atomes d'hydrogène de l'eau servent à réduire le dioxyde de carbone et il y'a libération d'oxygène sous forme gazeuse.  En raison de la production de dioxygène en utilisant l'eau comme donneur d'e⁻, ce processus est parfois dit **oxygénique**. Exp : les cyanobactéries (*Nostoc*, *Oscillatoria*...)

- Il existe d'autres familles de procaryotes photosynthétiques qui sont classifiées selon la méthode qu'elles utilisent pour réduire le CO_2 .
- Ces bactéries ne peuvent pas utiliser l'eau pour réduire le CO_2 (H_2O n'est pas le donneur d'e- mais un composé réduit du soufre tel H_2S ou un composé organique) et sont incapables d'accomplir la photosynthèse en présence d'oxygène. Elles doivent donc se trouver dans un environnement anaérobie.
- En conséquence, leur processus photosynthétique est dit **anoxygénique** car il ne produit pas d' O_2 . Exp : les bactéries vertes sulfureuses (ex : *Chlorobium*), les bactéries pourpres sulfureuses (ex : *Rhodospirillum*).

Les étapes de la photosynthèse

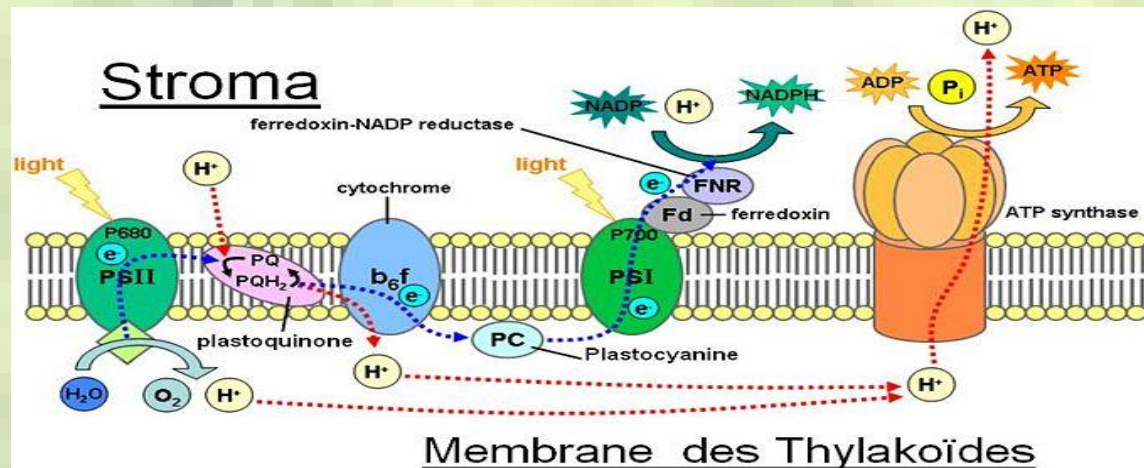
- La photosynthèse se déroule en deux phases. :
- **La phase lumineuse** (claire) : l'énergie lumineuse est utilisée pour convertir les molécules d'ADP + Pi en ATP au cours des réactions photochimiques (photophosphorylations).
- **La phase sombre** : les e^- cédés dans la 1^{ère} phase ainsi que l'énergie provenant de l'ATP servent à réduire le CO_2 en glucide au cours des réactions du cycle de Calvin-Benson.

1-Réactions lumineuses

- Les réactions lumineuses ont lieu dans les thylakoïdes.
- Ces derniers contiennent les pigments et les enzymes indispensables aux réactions lumineuses.
- Les pigments (chloro, caroténoïdes, phycobilines) y sont organisés en sous unités appelées **photosystèmes**.
- Deux photosystèmes ont été identifiés à ce jour: photosystème I (PSI) et photosystème II (PSII)

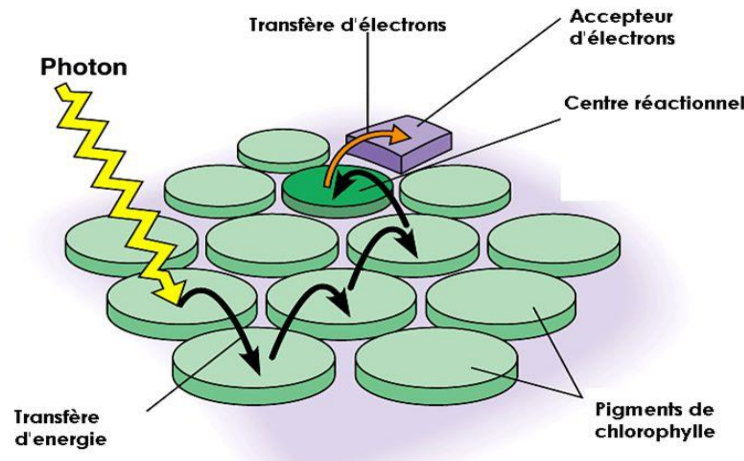
Qu'est ce qu'un photosystème?

- Les photosystèmes (PS) sont des complexes constitués de photorécepteurs et de transporteurs d'électrons inclus dans les protéines intégrales des membranes thylakoïdes
- Ils ont pour fonction de capter la lumière puis d'effectuer les premières étapes de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique



- Un photosystème est constitué d'un centre réactionnel et d'une antenne collectrice permettant d'optimiser l'absorption des photons déclenchant les réactions photochimiques.
- **Centre réactionnel**: emplacement spécialisé constitué de deux molécules de chlorophylle *a* ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$) capable de déclencher les réactions photochimiques et céder ses électrons à l'accepteur primaire.
 - **Antenne collectrice**: autres molécules de chlorophylle *a* et *b* et les molécules de caroténoïdes. Elle absorbe les photons et transmet l'énergie vers les centres réactionnels.

Un photosystème



➤ Les PSI et PSII ont lieu durant la phase claire là où ont lieu les réactions photochimiques (**photophosphorylation** : désigne la synthèse d'ATP dans les chloroplastes, elle est amorcée par l'énergie lumineuse)

PSI (P₇₀₀) : - Riche en chlorophylle a

- Absorbe la lumière à 700 nm
- Comprend environ 200 chlorophylles, 50 caroténoïdes, des protéines liées au centre réactionnel, des cytochromes, des ferredoxines

PSII (P₆₈₀) : - Riche en chlorophylle b

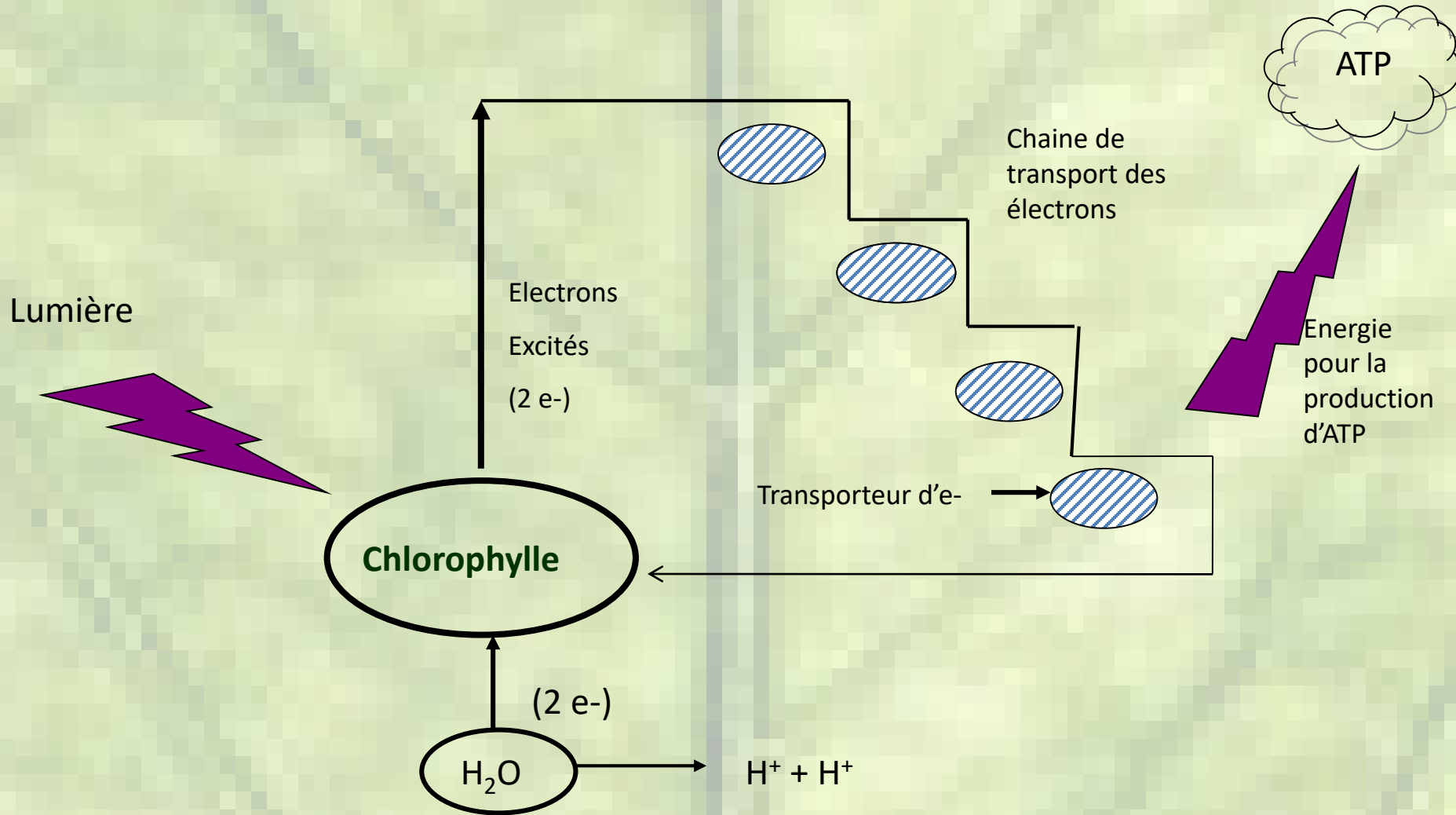
- Absorption à 680 nm
- Permet la production d' O₂
- Comprend la chlorophylle, caroténoïdes, protéines liées au CR, des plastoquinones, des cytochromes

1-1- La photophosphorylation

- C'est l'un des moyens mis au point par la nature pour produire de l'ATP et elle n'a lieu que dans les cellules photosynthétiques.
- L'énergie lumineuse est absorbée dans ces cellules par les molécules de chlorophylle (PSII) dont elle excite certains des e^- .
- La principale chlorophylle utilisée par les plantes, algues et cyanobactéries est la chlorophylle. a .
 - * Les électrons de la chlorophylle. excités par les rayons lumineux bondissent sur le premier transporteur d'une suite de transporteurs moléculaires qui forment une chaîne de transport des e^- vers le PSI
 - * Au fur et à mesure du passage des e^- d'un transporteur à l'autre, des protons sont pompés de la membrane et l'ADP est converti en ATP par chimiosmose (force protomotrice). L'enzyme responsable est **l'ATP synthétase**.

*Au cours des réactions photochimiques, le transport des e^- peut suivre 2 trajets : ***cyclique*** ou ***non cyclique***.

Phosphorylation cyclique

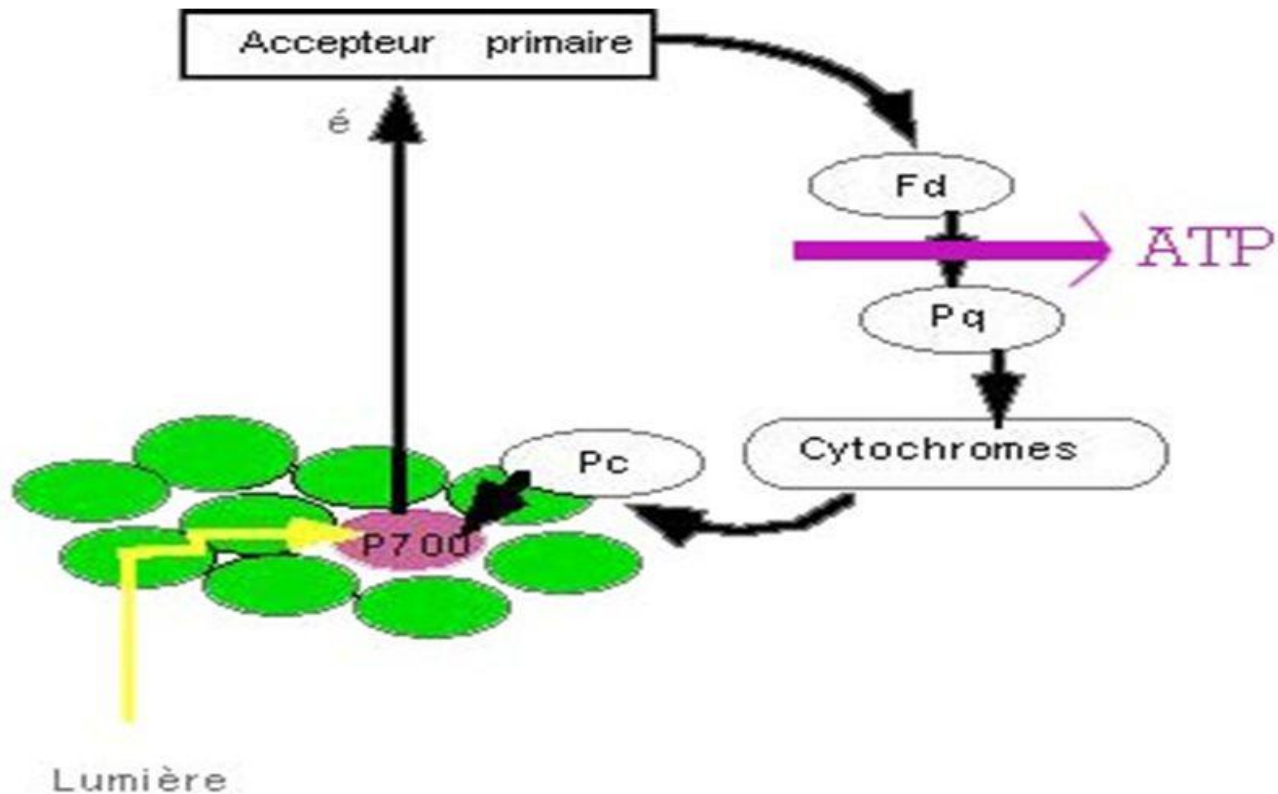


Voie cyclique de transfert des électrons

- Les électrons arrachés à la chlorophylle par la lumière retournent à la chlorophylle après leur passage le long de la chaîne de transport des e^- .
- L'énergie de transfert des e^- est convertie en ATP.
- Le transport cyclique d' e^- est le trajet le plus simple. Il ne fait intervenir que le photosystème I et n'engendre que de l'ATP ; il ne produit ni NADPH + H^+ ni oxygène.

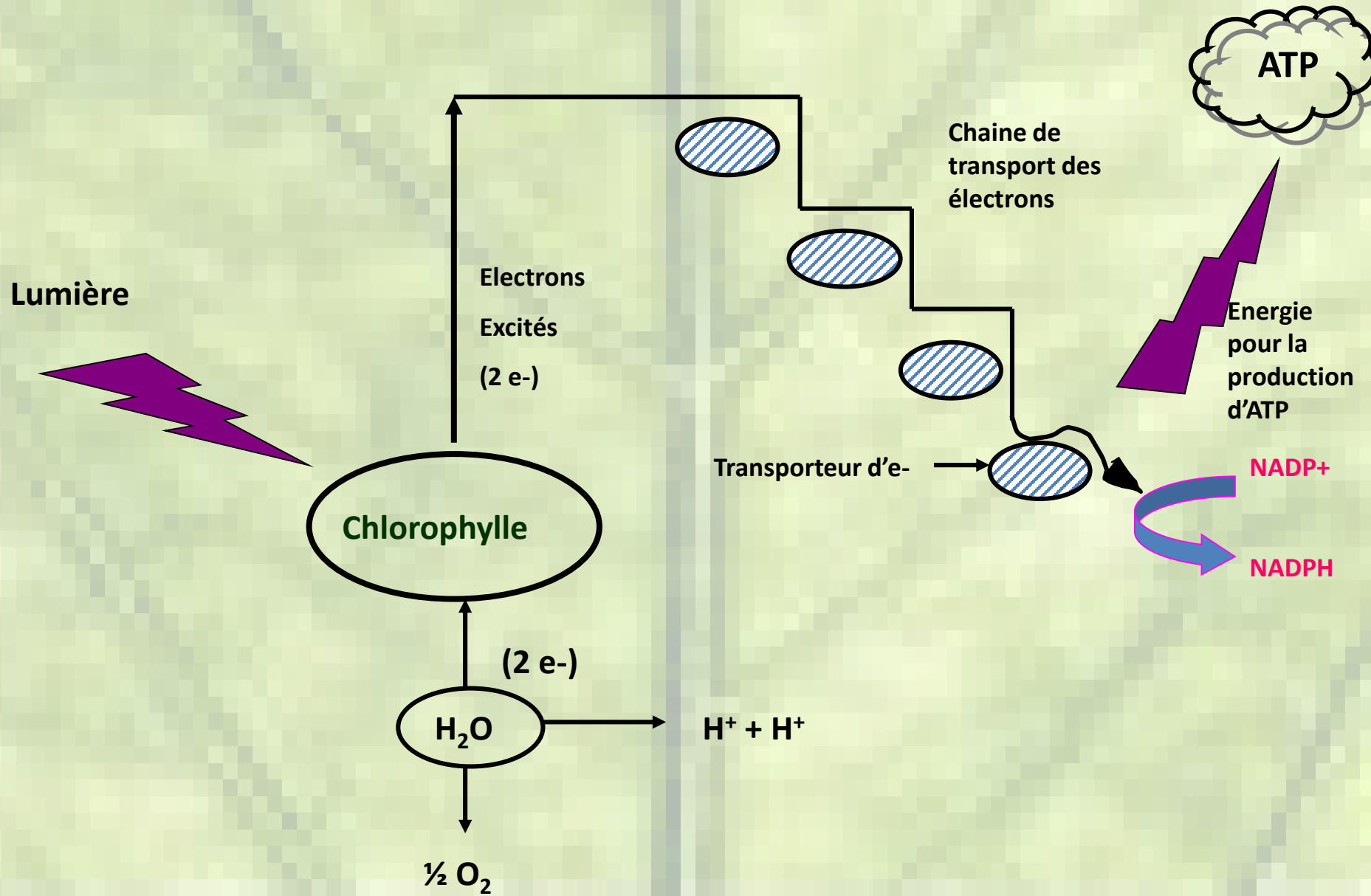
Phosphorylation cyclique

Le P700 : la voie cyclique de transfert d'électrons



Dans le photosystème 700 (voie cyclique), les électrons sont recyclés une fois que leur énergie a été utilisée pour former des molécules d'ATP.

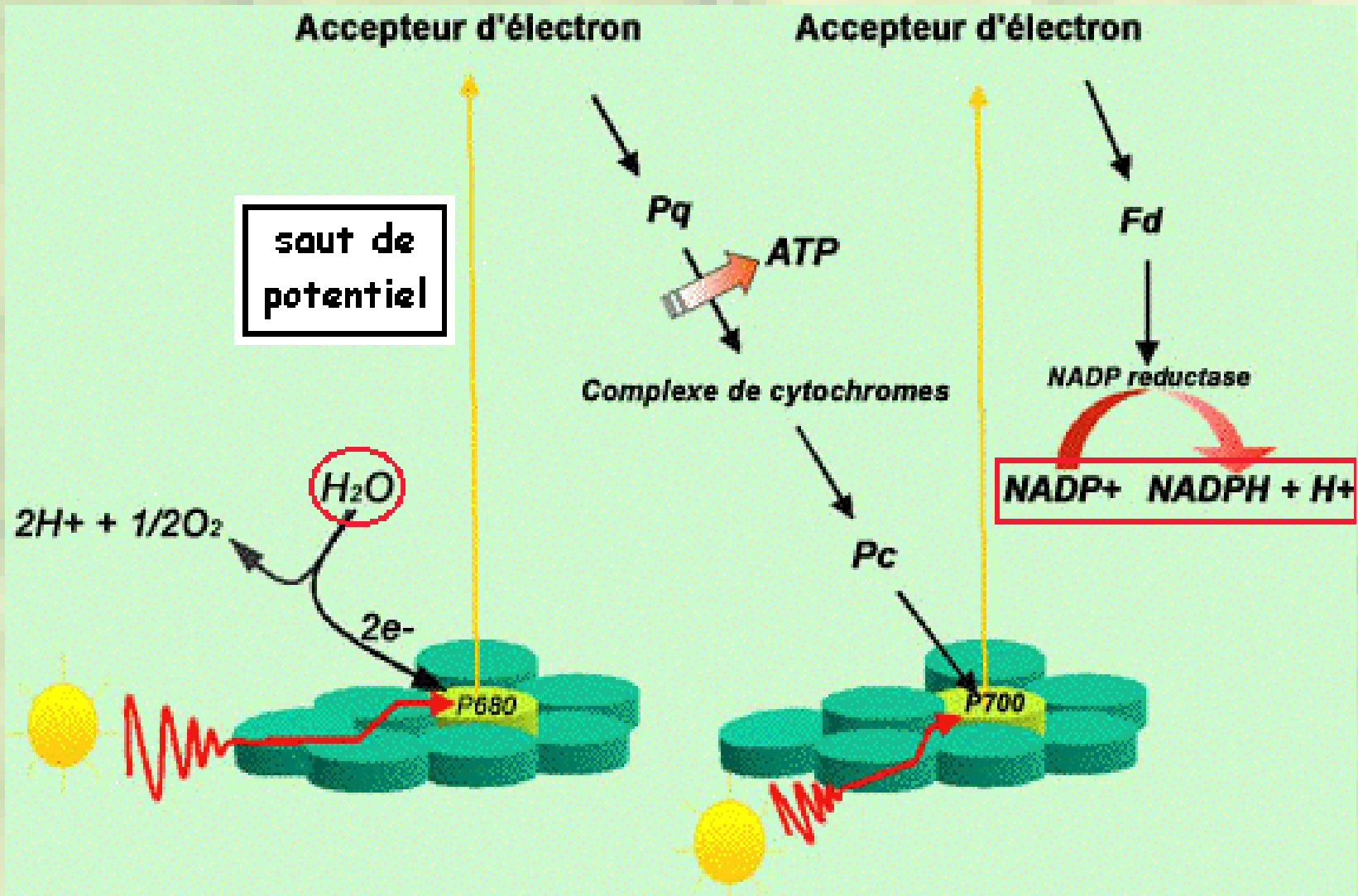
Phosphorylation non cyclique



Photophosphorylation non cyclique

- Au cours de ce trajet, les e^- passent continuellement de l'eau au $NADP^+$. Il fait intervenir les deux photosystèmes.
- Les e^- cédés par la chlorophylle sous l'effet de la lumière ne retournent pas à cette dernière, par des e^- provenant de l'eau.
- Les e^- de la chlorophylle sont acheminés le long de la chaîne de transport jusqu'à l'accepteur d' e^- , le NAD^+ . Ce dernier se combine à des e^- et à des ions hydrogène provenant de l'eau pour former le **NADPH**.
- Le courant d' e^- qui passe dans la chaîne de transport produit de l'**ATP** par chimioosmose.

Voie non cyclique de transfert des électrons



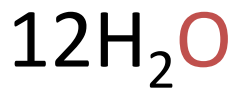
Phase photodépendante

- Lieu :
Membrane
Thylakoïde

Énergie lumineuse



Phase
photodépendante



ATP

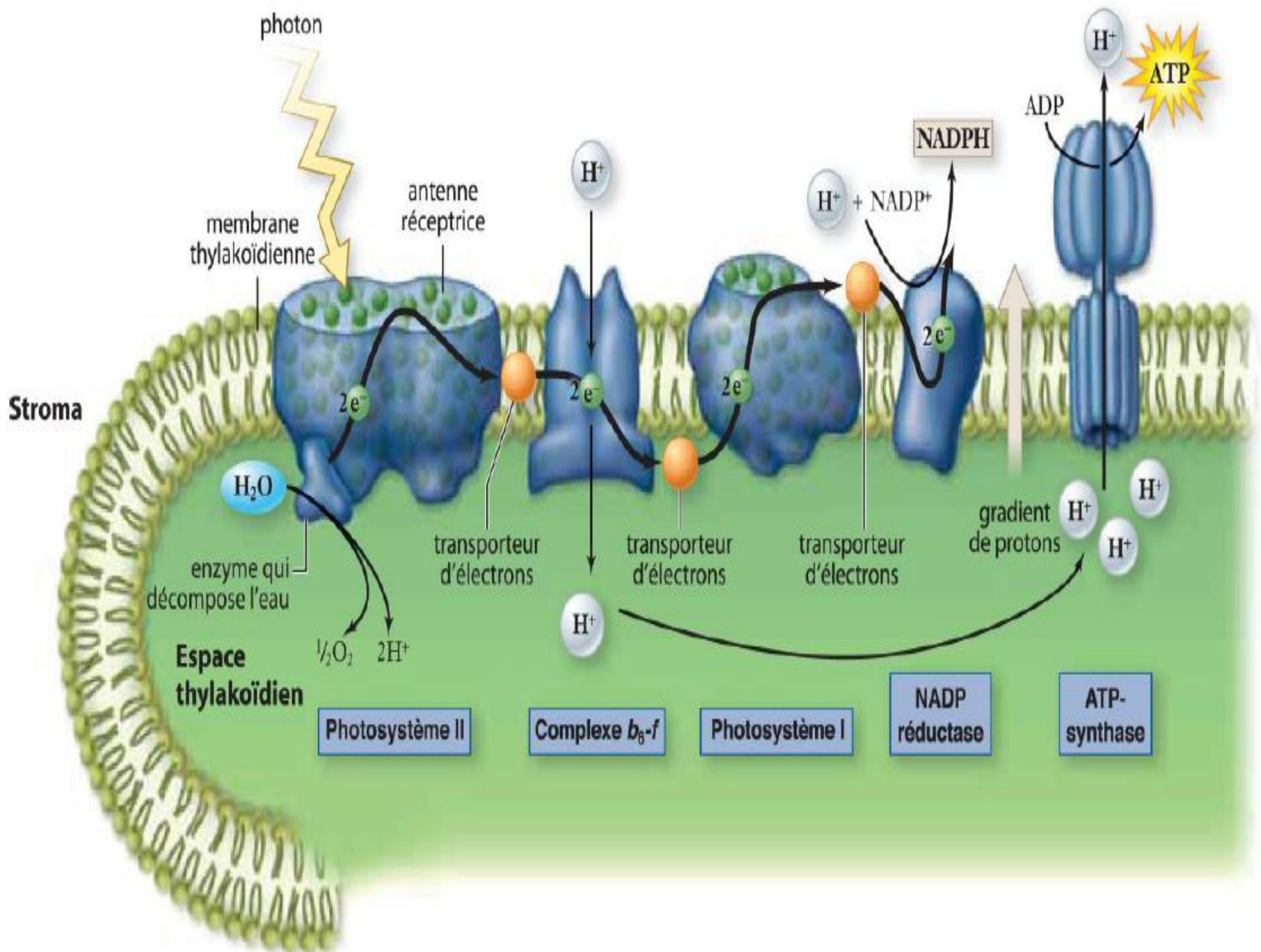
+

NADPH₂

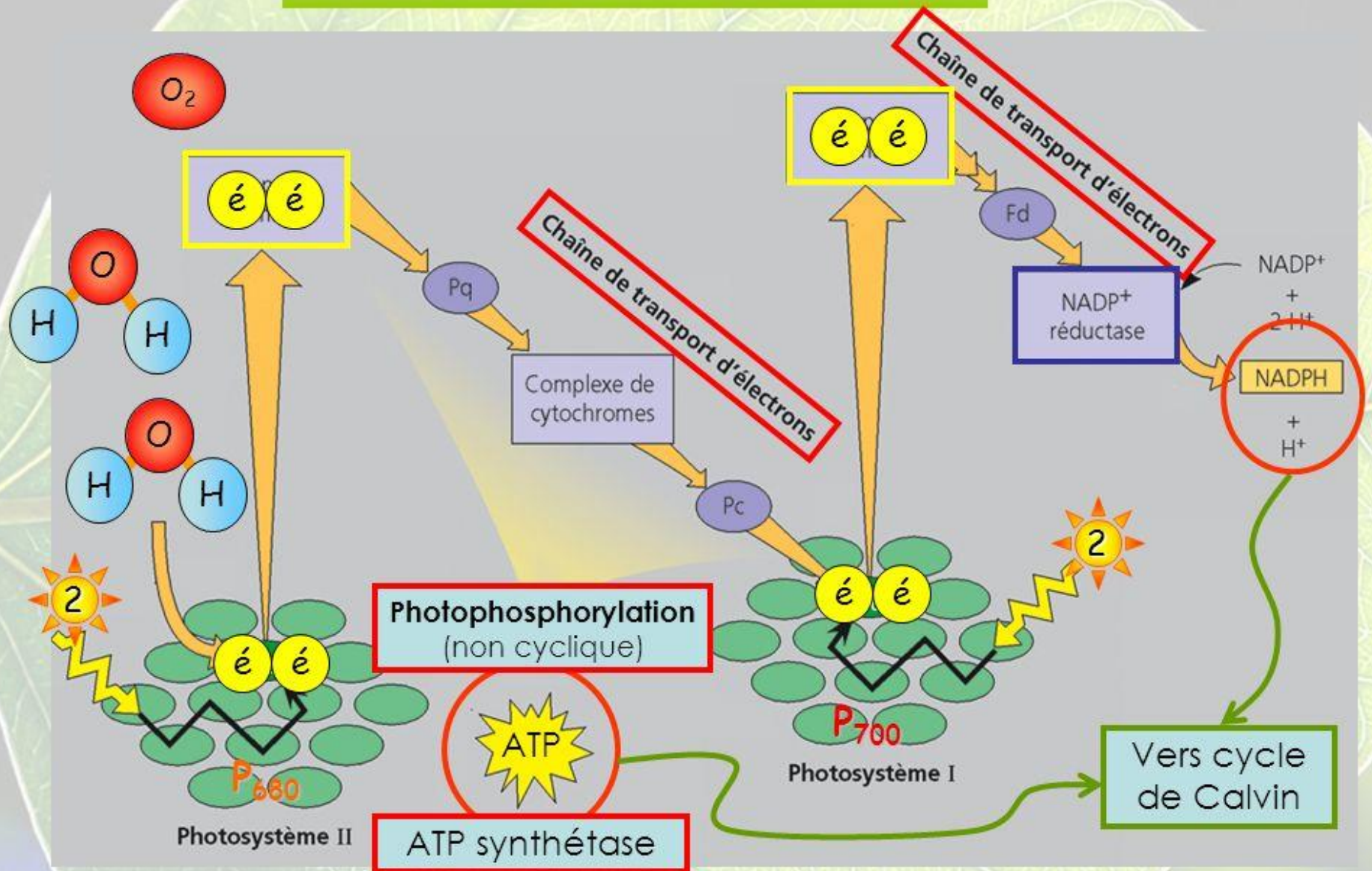


Étapes Phase photo dépendante

- Absorption de la lumière
- Photolyse (indirecte) de l'eau :
- $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{é}$
- Chaîne de transport d'Électrons
- Synthèse du NADPH_2 .
- Phosphorylation : $\text{ADP} + \text{P} \rightarrow \text{ATP}$

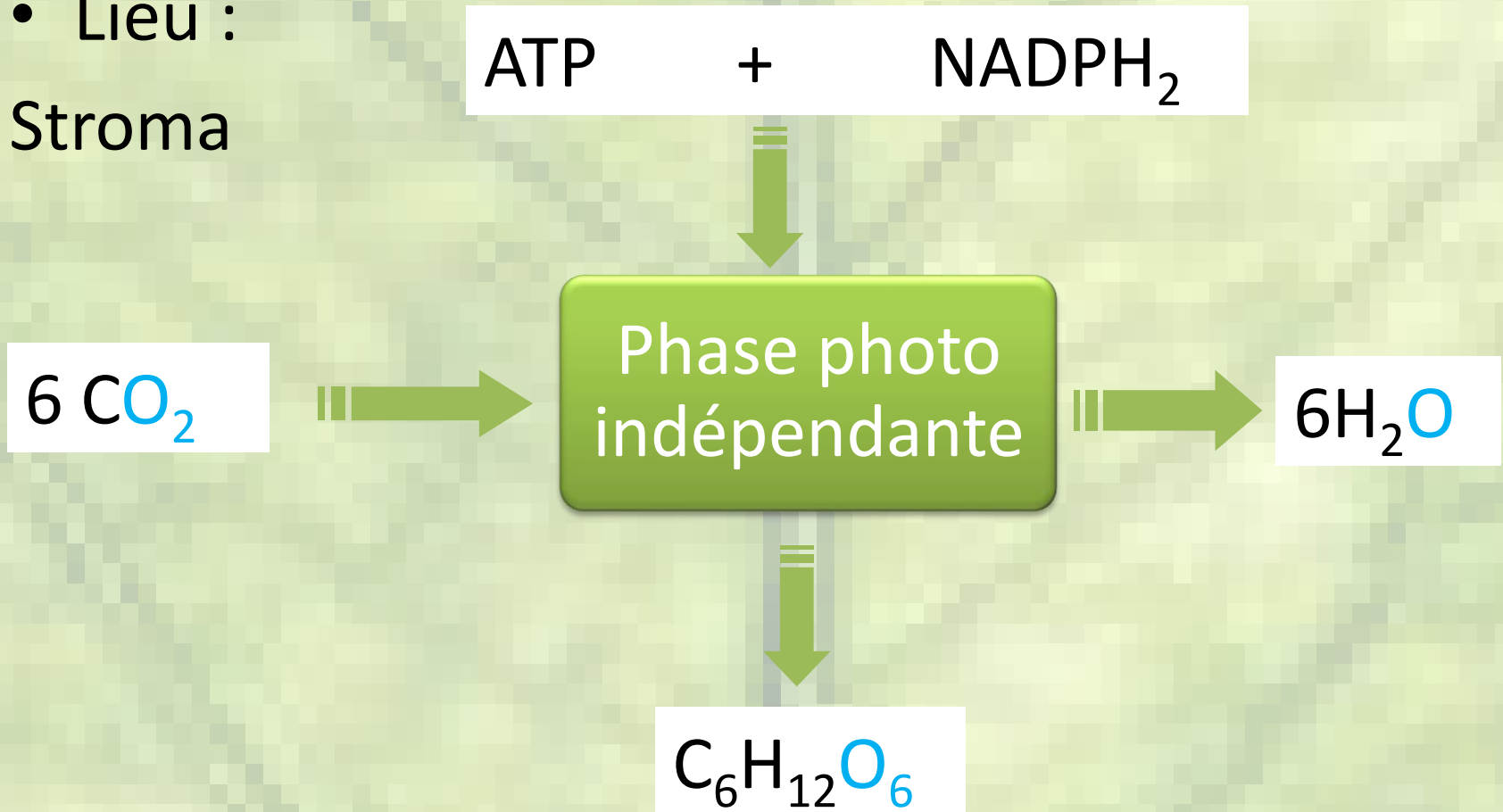


Phase claire



Phase photo indépendante

- Lieu :
Stroma



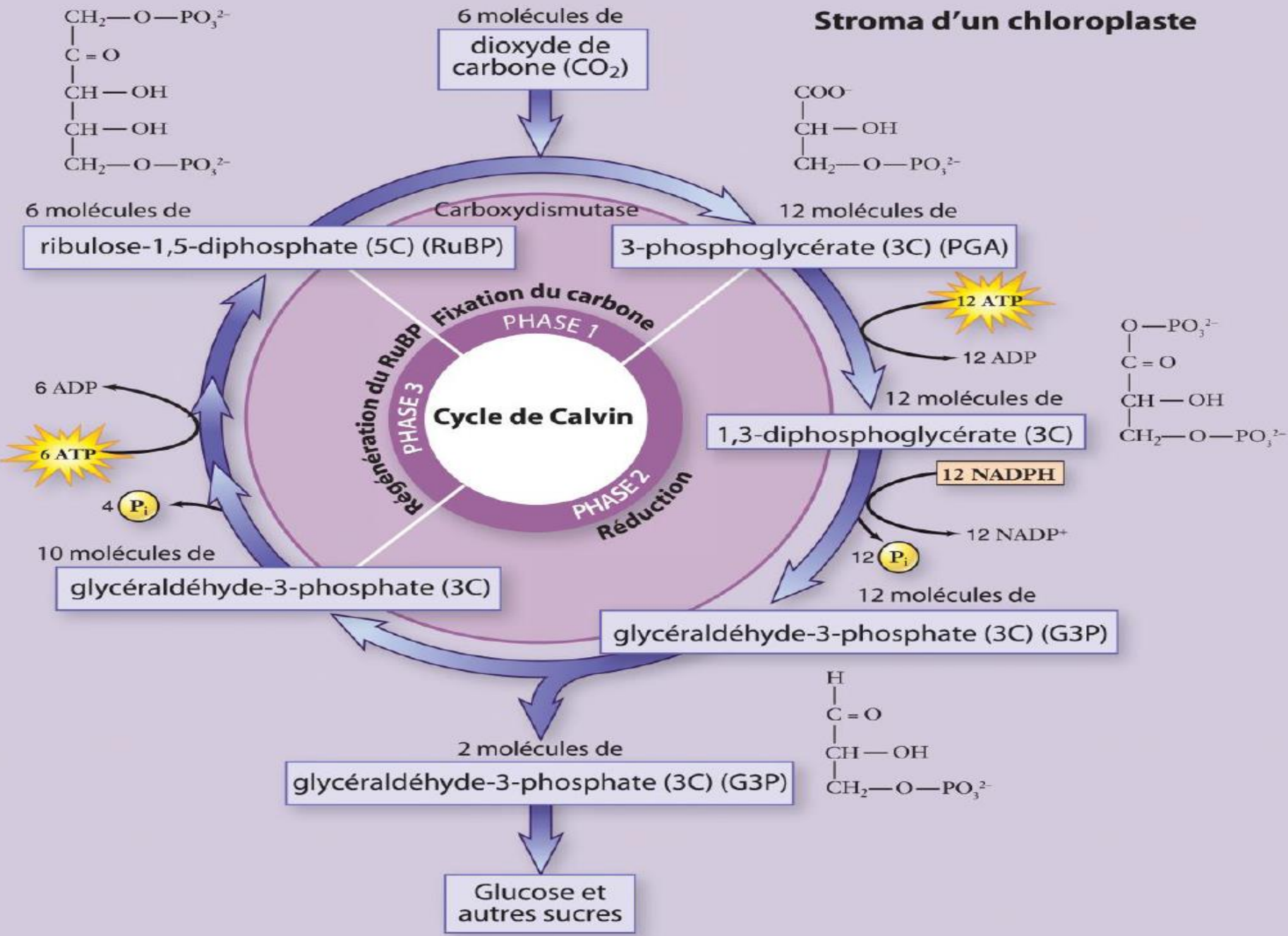
Étapes phase photo indépendante

- Réactifs : $\text{ATP} + \text{NADPH} + \text{H}^+ + \text{CO}_2$
- Produits : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (produit organique)
- Lieu : stroma
- ATP fournit l' énergie, NADPH a le pouvoir réducteur (donne des électrons) nécessaire pour la transformation et l'union du CO_2 pour former du glucose.

2- Réactions obscures

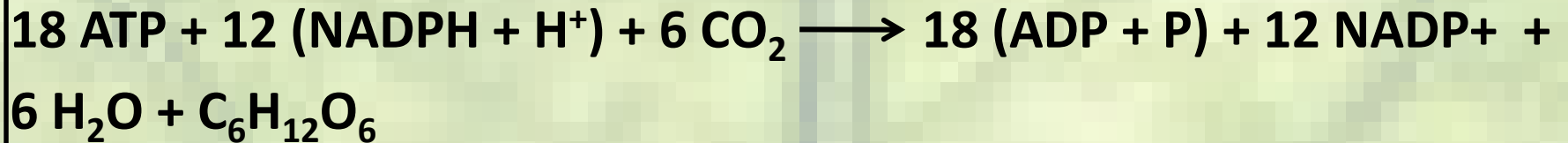
- Les réactions obscures ont lieu dans le stroma où l'énergie stockée S/F d'ATP et de NADPH₂ est utilisée pour réduire le CO₂ en carbone organique S/F de glucide
- La phase obscure se réalise par le biais d'une série de réactions connues sous le nom de **cycle de Calvin-Benson**

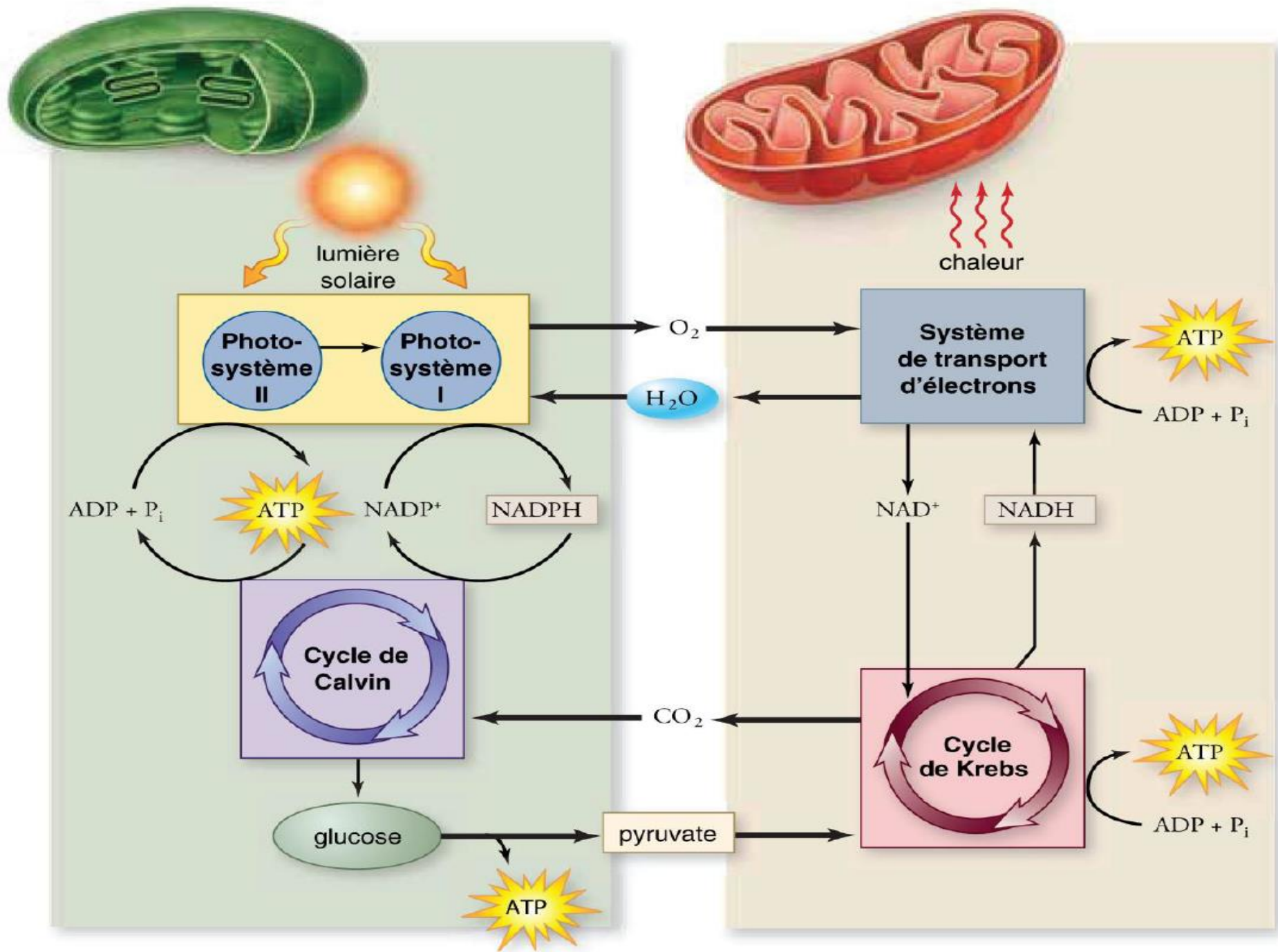
Stroma d'un chloroplaste



- Chaque tour de cycle consomme 3 molécules de CO_2 . Celles-ci se combinent avec 3 molécules d'un sucre à 5 atomes de carbone, appelé Rudip (ribulose 1,5-disphosphate), ce qui aboutit à 3 molécules à 6 carbones. Ces dernières se scindent en 2 pour former 6 molécules de 3-phosphoglycérate (PGA), un composé à 3 carbones. C'est la raison pour laquelle cette photosynthèse est dite en C3.
- Cette réaction est réalisée par une enzyme : la Rudip carboxylase (rubisco), enzyme la plus abondante de la biosphère.
- Les 6 molécules de PGA sont ensuite transformées par des réactions qui aboutissent à la production de 6 molécules de glycéraldéhyde -3- phosphate avec consommation de 6 ATP et 6 NADPH₂.
- Parmi ces molécules, 5 servent à la poursuite du cycle : elles sont recyclées en 3 molécules de Rudip (avec consommation de 3 ATP). La dernière molécule sort du cycle pour servir à la fabrication du sucre.

- Chaque tour de cycle consomme au final 3 CO₂, 9 ATP et 6 NADPH₂ et aboutit à 1 molécule de glycéraldéhyde 3 phosphate
- 2 molécules de glycéraldéhyde 3 phosphate sont combinés pour synthétiser 1 molécule de glucose



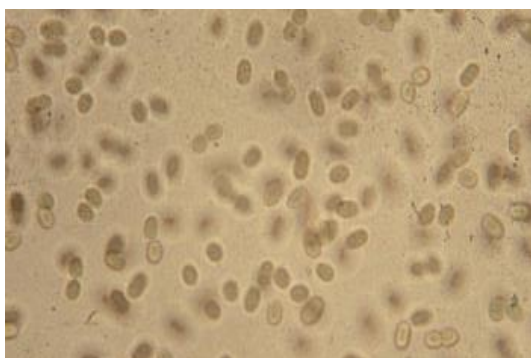


Bilan de la photosynthèse



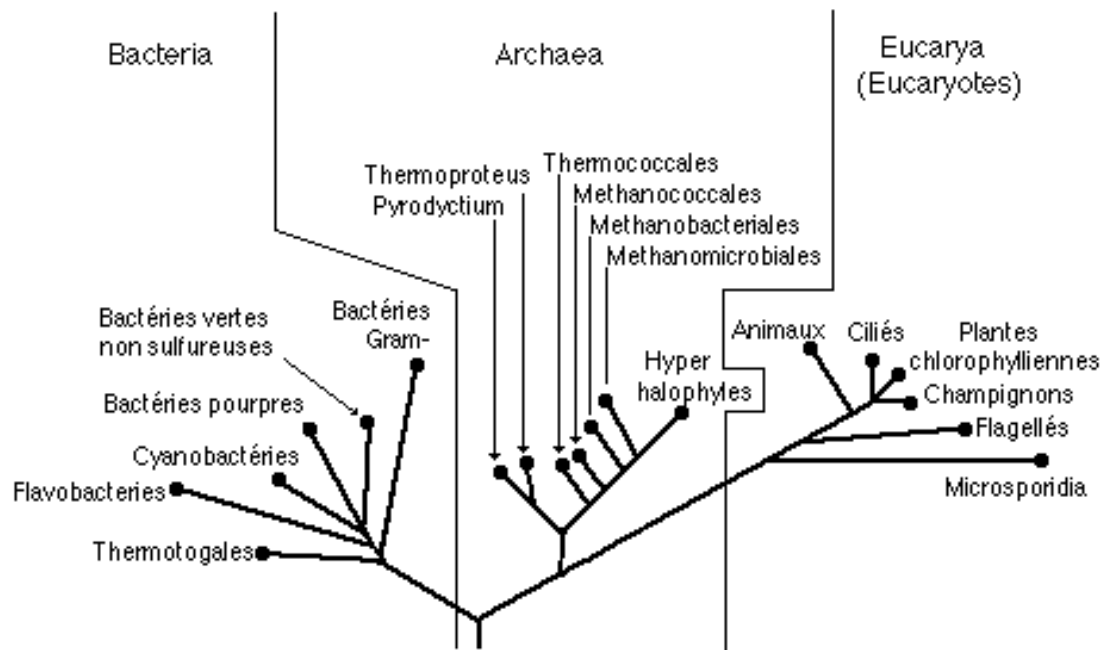
Chapitre 2 : Les cyanobactéries

1-Définition des cyanobactéries



Les cyanobactéries (Cyanobacteria), également appelées cyanophycées (Cyanophyceae) sont des organismes procaryotes autotrophes. Elles étaient autrefois appelées « algues bleues ». Il en existe plus de 1500 espèces réparties dans environ 120 genres. Elles ont apparues il y'a environ 3,8 milliards d'années et font parte des espèces qui sont à l'origine de l'expansion de la vie sur terre par leur production d'oxygène par photosynthèse et par leur contribution au premier puit biologique de carbone et à une désacidification des océans, lorsqu'elles se sont organisées en colonies fixées (stromatolithes), capables de produire du calcaire.

Les cyanobactéries ont pour seul point commun cette photosynthèse de type « plante », ce qui leur a valu pendant longtemps d'être classées dans les algues (algues bleu-vert, cyanophycées). Leur nature procaryotique les a fait reclasser dans les bactéries Gram négatives (Phylum BX dans la récente classification du Bergey's).



Arbre phylogénique universel basé sur la comparaison des séquences de l'ARN ribosomal 16S. Il montre l'existence des trois domaines: bacteria, archaea et eucarya. Les cyanobactéries sont situées dans le domaine "Bacteria" ainsi que les deux autres groupes de bactéries photosynthétiques: les bactéries pourpres et vertes (d'après Woese *et al.*, 1990).

Chez les cyanobactéries, on distingue au microscope électronique deux zones différenciées principalement par leur couleur: le chromoplaste (zone périphérique contenant les thylakoïdes) et le centroplasma (zone centrale assurant des fonctions semblables à celles d'un noyau, contenant de l'ADN sous forme d'aiguilles). Le chromoplaste, outre la photosynthèse, assure deux autres fonctions: la respiration et la fixation d'azote chez certaines espèces.

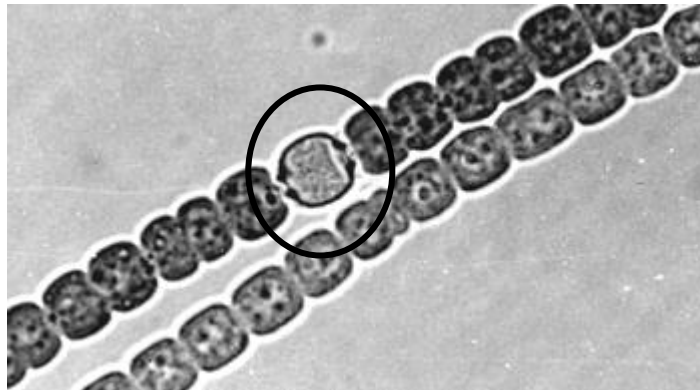
Certaines cyanobactéries sont aussi actives la nuit ou en l'absence de lumière, se transformant en quelque sorte en bactéries chimio-hétérotrophes. D'autres survivent aussi en anaérobiose (ex: *Oscillatoria limnetica*) en photosynthétisant à partir du sulfure d'hydrogène au lieu de l'eau.

Beaucoup de cyanobactéries sont en outre capables de fixer le diazote (N_2). Des cellules spécialisées, appelées hétérocystes, contiennent des enzymes (nitrogénases) qui fixent le diazote atmosphérique, de sorte que la cellule en croissance puisse l'utiliser.

Les cyanobactéries constituent un groupe génétiquement et morphologiquement très hétérogène. Cette hétérogénéité est reflétée notamment par la taille de leurs génomes allant de 2400 à 13000 kb et par leur pourcentage en GC (32 à 71 %) couvrant l'éventail des valeurs rencontrées dans le monde bactérien.

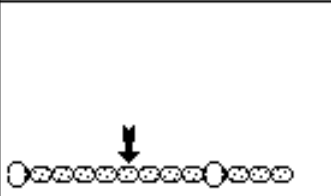





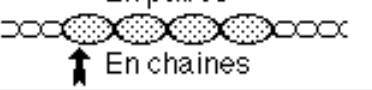
2-Morphologie des cyanobactéries

Les cyanobactéries présentent une grande diversité morphologique. Certaines sont unicellulaires, sphériques ou en bâtonnets et se multiplient par divisions binaires, d'autres sont filamenteuses et se propagent par rupture du filament végétatif ou par germination des akinètes (spores). Certaines peuvent différencier des cellules spécialisées, telles que les hétérocystes, les akinètes et les hormogonies. Certaines présentant des ramifications qui peuvent être de plusieurs types. Cette hétérogénéité leur a permis de coloniser la grande majorité des écosystèmes terrestres ou aquatiques, ainsi que les milieux extrêmes chauds, salés et hypersalés et alcalins. Il existe des formes terrestres, marines et dulçaquicoles, libres et symbiotiques.



Hétérocyste intercalaire bipolaire chez Anabaena

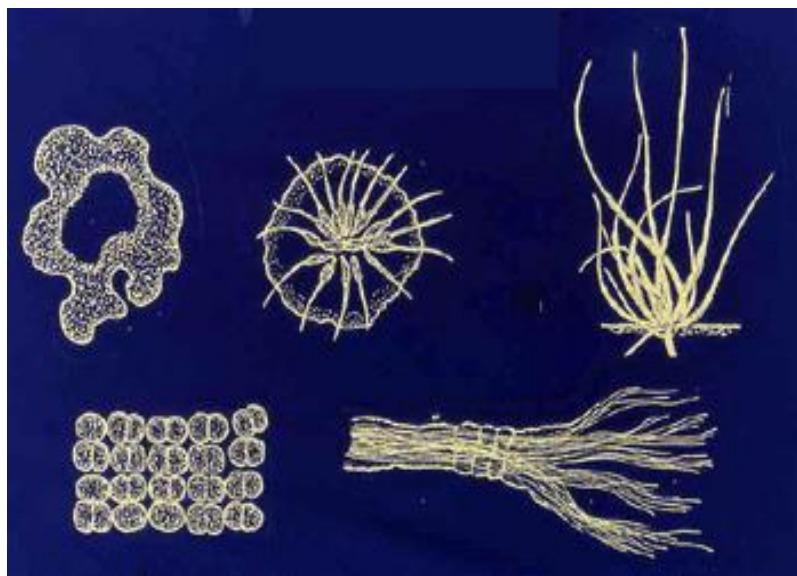
Leur couleur résulte de la présence de pigments (chlorophylles vertes, carotènes rouges et orange, xanthophylles jaunes, phycocyanine bleue et phycoérythrine rouge) et de mucilage. Elle varie du jaune sale au noir en passant par différentes teintes de bleu-vert ou de brun. Leur ancien nom d'algues bleues est dû à la présence de phycocyanines. Si l'on extrait les pigments solubles dans l'acétone (chlorophylles et caroténoïdes) d'une culture de cyanobactéries la couleur bleue devient alors parfaitement visible.

Cellules végétatives	Hétérocystes	Spores ou Akinètes
Activité photosynthétique	Fixation de l'azote	Conservation Dissémination
	 Intercalaire bipolaire  Terminal unipolaire	 Intercalaires  Terminales  En paires  En chaînes

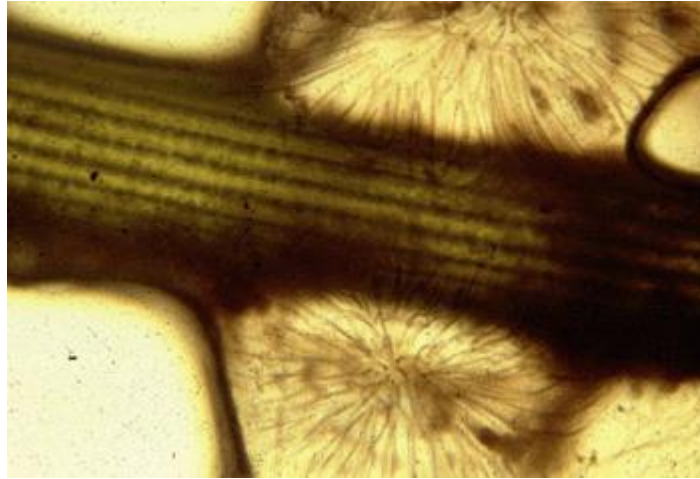
En plus de ces trois types de cellules les Cyanobactéries peuvent présenter un certain nombre de structures telles que des gaines mucilagineuses, des ramifications, etc...

Chez les formes filamenteuses on appelle trichome la file de cellules et filament l'ensemble du trichome et de la gaine mucilagineuse entourant le trichome lorsqu'une gaine est formée.

La gaine mucilagineuse peut réunir de nombreux filaments et former des colonies de forme indéfinie ou définie. Suivant leur taille on peut distinguer de micro (< 1mm) et des macro-colonies



Exemples de microcolonies de Cyanobactéries

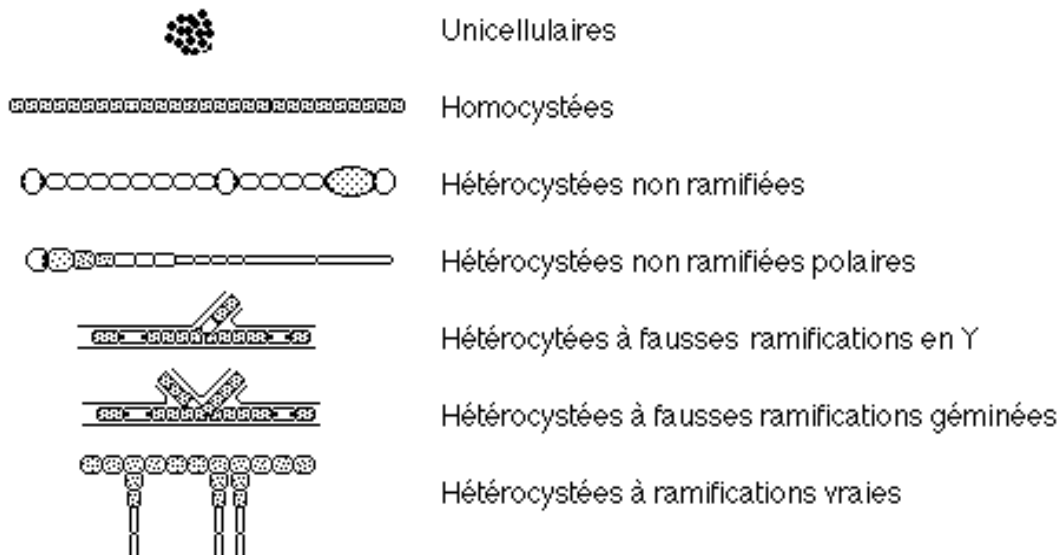


Microcolonies de Gloeotrichia sur une tige de Chara sp.

Les cyanobactéries sont non mobile ou mobile par glissement ou mobilité à l'aide de vacuole à gaz (Nostocales).

3-Taxonomie des cyanobactéries

La combinaison de différents caractères morphologiques a servi jusqu'à récemment de base à la taxonomie des cyanobactéries.



Les principaux caractères pris en compte étaient:

- * aspect de la croissance: unicellulaire, coloniale, filamenteuse
- * aspect et forme de la colonie pour les formes coloniales
- * présence, taille et forme des cellules végétatives
- * présence, taille et forme des hétérocystes et akinètes

- * présence ou absence de vacuoles à gaz
- * présence ou absence d'hormogonies, mobilité des hormogonies

- pour les organismes filamenteux:
 - différenciation cellulaire: hétérocystes et akinètes
 - polarité: base et apex du filament
 - gaine: absence ou présence, épaisseur
 - ramifications vraies ou fausses
 - nature des fausse ramifications: simples ou géminées

En raison du polymorphisme des cyanobactéries, les anciennes classifications ont donné naissance à de très nombreux genres et espèces superflus. Seule la classification morphologique de Rippka et al. (1979) est fondée sur des caractères morphologiques stables observables en culture. Elle a amené à une première révision taxonomique qui a considérablement réduit le nombre de taxons reconnus.

Pour les cyanobactéries, la nouvelle taxonomie phylogénétique se heurte à un manque de séquences et la nouvelle version du Manuel de Bergey présente un traitement taxonomique d'attente dans lequel les cyanobactéries constituent un phylum d'une seule classe, dans lequel les taxons classiques sont remplacés par des sous-sections et des sous-groupes et les genres sont remplacés par des formes. Les 56 formes actuellement reconnues se répartissent en cinq sous-sections

Formes présentés suivant la Classification de Bergey's

Phylum BX. Cyanobacteria

Classe I. Cyanobacteria (Formes, pas d'espèces)

Sous-section I:

Chamaesiphon, Chroococcus, Cyanobacterium, Cyanobium, Cyanothece, Dactylococcopsis, Gloeobacter, Gloeocapsa, Gloeotheca, Microcystis, Prochlorococcus, Prochloron, Synechococcus, Synechocystis.

Sous-section II.

Sous-groupe I: Cyanocystis, Dermocarpella, Stanieria, Xenococcus.

Sous-groupe II: Chroococciopsis, Myxosarcina, Pleurocapsa.

Sous-section III:

Arthrospira, Borzia, Crinalium, Geitlerinema, Leptolyngbya, Limnothrix, Lyngbya, Microcoleus, Oscillatoria, Planktothrix, Prochlorothrix, Pseudanabaena, Spirulina, Starria, Symploca, Trichodesmium, Tychonema.

Sous-section IV.

Sous-groupe I:

Anabaena, Anabaenopsis, Aphanizomenon, Cyanospira, Cyindrospermopsis, Cyindrospermum, Nodularia, Nostoc, Scytonema.

Sous-groupe II:

Calothrix, Gloeotrichia, Microchaete, Rivularia, Tolypothrix.

Sous-section V.

Famille I:

Chlorogloeopsis, Doliocatella, Fischerella, Geitleria, Iyengariella, Mastigocladopsis, Mastigocoleus, Nostochopsis, Stigonema, Westiella.

Sous-section I : Reproduction par division binaire suivant 1, 2 ou 3 plans symétriques ou non , ou par bourgeonnement

Sous-section II : Reproduction par fissions multiples internes avec production de cellules filles plus petites que les cellules parentales ou par fissions multiples et D

Sous-section III : Trichomes composés de cellules ne se différenciant pas en hétérocystes ou en akinètes

Sous-section IV Une ou plusieurs cellules du trichome se différencient en hétérocystes, au moins lorsque le milieu est carencé en ammonium ou en nitrate; certaines cellules peuvent aussi former des akinètes

Sous-section V : Reproduction par fission binaire, parfois ou fréquemment suivant plusieurs plans, donnant naissance à des trichomes multisériés et (ou) à des trichomes présentant différents types de ramifications vraies

4- Reproduction des cyanobactéries

La reproduction, chez les cyanobactéries, se fait par division végétative et par spores, soit unicellulaires (coccospores), soit sous forme de filaments de cyanobactéries (trichomes = hormogonies). Ce qui constitue deux principales classes de cyanobactéries : les coccogonophycidées (formes solitaires ou coloniales) et les hormogonophycidées (formes coloniales filamenteuses).

5-Physiologie des cyanobactéries

Les cyanobactéries sont capables d'adopter différents modes de métabolisme carboné. La photosynthèse est leur principale méthode de nutrition (autotrophie), cependant, en présence de substrats organiques et de CO₂, certaines espèces utilisent le carbone organique pour leurs synthèses cellulaires. Quelques espèces peuvent croître à l'obscurité en hétérotrophie.

Les cyanobactéries utilisent l'azote minéral des nitrates, nitrites et sels ammoniacaux. L'azote nitrique est la source d'azote préférée dans la plupart des milieux de culture. En l'absence d'azote minéral, de nombreuses formes de cyanobactéries peuvent utiliser l'azote de l'air comme source d'azote et l'incorporer dans leurs cellules (fixation de N₂). A la mort de ces cyanobactéries, cet azote retourne dans l'environnement sous forme d'azote minéral assimilable par les plantes. La fixation de l'azote a donc un rôle très important dans le maintien de la fertilité de certains environnements naturels ou cultivés.

Certaines cyanobactéries se développent de façon symbiotique avec des champignons, des végétaux et certains mollusques. Certaines de ces symbioses ont une importance écologique ou agronomique.

6-La photosynthèse chez les cyanobactéries

Les cyanobactéries sont des photoautotrophes, c'est à dire qu'elles utilisent la lumière comme source d'énergie et le CO₂ comme source de carbone. Elles sont les seuls procaryotes effectuant la photosynthèse oxygénique comme le font les plantes, en utilisant l'eau comme donneur d'électrons pour produire de l'oxygène. Les cyanobactéries possèdent un appareil photosynthétique similaire à celui des chloroplastes.

7-Fixation de l'azote par les cyanobactéries

Les cyanobactéries utilisent l'azote minéral des nitrates, nitrites et sels ammoniacaux. L'azote nitrique est la source d'azote préférée dans la plupart des milieux de culture. En absence d'azote minéral, certaines cyanobactéries utilisent directement l'azote de l'air (N₂), c'est ce que l'on appelle "la fixation de l'azote".

L'aptitude à la fixation de N₂ se rencontre chez de nombreuses formes de cyanobactéries. Toutes les formes hétérocystées telles que cette *Anabaena* fixent l'azote, aussi bien en aérobie qu'en anaérobie. Quelques formes non-hétérocystées (homocystées) filamenteuses fixent l'azote en anaérobie. Des formes unicellulaires (*Aphanothece* et *Gloeothece*) peuvent également fixer l'azote en aérobie. Toutefois, la fixation de N₂ intervient seulement lorsqu'il y a une déficience en azote minéral. En particulier, la formation des hétérocystes, cellules spécialisées dans la fixation de N₂ chez certaines formes de cyanobactéries, est inhibée par des sources d'azote combiné telles que les nitrates ou l'ammonium.

L'enzyme responsable de la fixation de l'azote est la nitrogénase. Cet enzyme est irréversiblement inhibé par l'oxygène.

Certaines formes unicellulaires telles que cette *Aphanothece* dans une rizière asiatique ont une activité photosynthétique dans la journée et fixent l'azote la nuit lorsque l'absence d'énergie lumineuse empêche la production d'oxygène par photosynthèse.

L'activité fixatrice des cyanobactéries a des implications importantes pour la fertilité des sols cultivés et non cultivés ainsi que celle des écosystèmes aquatiques dulçaquicoles et marins. En particulier c'est l'activité fixatrice d'azote des cyanobactéries qui a permis de maintenir pendant des siècles la production de riz dans les rizières traditionnelles qui ne reçoivent pas d'engrais azoté minéral.

8-Ecologie des cyanobactéries dans l'environnement

En raison de leur caractère photosynthétique, les cyanobactéries (fixatrices d'azote ou non), sont des producteurs primaires. Dans les milieux fertiles, leur contribution, qui est faible par rapport à celle des Phanérogames (plantes), passe souvent inaperçue. Par contre dans les milieux extrêmes (pluviométrie réduite, températures élevées ou très basses, milieux hypersalés) elles constituent, avec les algues, le producteur primaire principal. Dans certaines conditions, elles peuvent se développer de façon explosive à la surface des sols (manne de la bible...), dans les eaux douces (fleurs d'eau), et les eaux marines.



Fleur d'eau à Cyanobactéries unicellulaires



*Croûte à cyanobactéries et bactéries photosynthétiques
à la surface d'un sol argileux salé*

Les cyanophycées vivent presque partout, y compris dans des conditions extrêmes, des glaces polaires aux sables des déserts. Elles survivent dans les lacs très chauds et/ou acides des cratères volcaniques comme dans les geysers. Elles croissent tant en eau douce que salée, sous forme planctonique. Elles se développent particulièrement bien dans certains milieux pollués par les activités humaines (eutrophisation, dystrophisation). Ces proliférations (blooms) forment des fleurs d'eau de couleur particulières qui apparaissent sur un plan d'eau en voie de pollution. On assiste à ces efflorescences algales quand l'eau contient de l'azote et/ou du phosphore en excès. Un autre paramètre influençant l'apparition de fleur d'eau est le débit du cours d'eau. Un fort débit provoque un brassage continu de la matière en suspension en plus d'empêcher la stratification des eaux. Ainsi, l'acquisition de nutriments par les cyanobactéries est peu probable et elles ne peuvent se positionner dans la colonne d'eau pour obtenir l'intensité lumineuse requise. C'est pourquoi les fleurs d'eau apparaissent dans les lacs et les rivières à faible débit, plutôt que dans les fleuves.

9- Toxicité des cyanobactéries

Les toxines cyanobactériennes sont des poisons naturels qui sont emmagasinés dans certaines cyanobactéries. Ces toxines sont libérées dans l'eau lors de la mort des cyanobactéries.

Certaines peuvent attaquer le foie : les hépatotoxines ou le système nerveux : les neurotoxines ou peuvent irriter la peau : dermatotoxines + les LPS.

Certaines toxines provoquent des problèmes d'allergies et de dermatoses, sensations de brûlures, des démangeaisons qui sont parfois suivies de desquamations rougeâtres, boursoufflées.

Les neurotoxines : Elles agissent sur le système nerveux et paralysent les muscles respiratoires, provoquant la mort en quelques minutes. Elles stimulent constamment les muscles et provoquent des crampes, puis une fatigue excessive et une paralysie. Quand les muscles respiratoires sont atteints, l'oxygénation insuffisante du cerveau engendre des convulsions et la suffocation.

Les hépatotoxines : De faibles doses sont à l'origine de maux d'estomac et de troubles intestinaux et hépatiques. Une consommation régulière de faibles doses de toxines favoriserait l'apparition de troubles chroniques du foie et du tube digestif. Aux Etats-Unis et en Australie, des intoxications humaines gastro-intestinales et hépatiques graves ont été signalées.

Les toxines des cyanobactéries sont nocives pour les oiseaux, les vaches, les chevaux et les autres vertébrés mais aussi pour le zooplancton des lacs et des étangs. L'ingestion et l'inhalation de toxines peuvent provoquer la mort des mammifères.

LES RECOMMANDATIONS OMS: Taux de toxines tolérées par litre d'eau : 0.5 µg.l⁻¹

FACTEURS FAVORISANT LE DEVELOPPEMENT DES CYANOBACTERIES

Une absence de vent. Une température de l'eau comprise entre 15 et 30°C. Une eau alcaline et riche en éléments nutritifs. L'accumulation de détergents et d'engrais entraîne une augmentation des concentrations d'azote et de phosphore dans les réserves d'eau et favorise la prolifération des cyanobactéries et la formation de fleurs d'eau (blooms).

Les genres principaux reconnus pour produire des toxines sont : Anabaena, Aphazinomeon, Cylindrospermopsis, Microcystis, Nodularia, Oscillatoria, Planktothrix.

La plus grande partie des cyanotoxines produites s'accumulent à l'intérieur des cellules et l'ampleur de la production semble être corrélée avec la phase de croissance des cyanobactéries. Ensuite, lorsque les bactéries sont à la fin de la période de sénescence, elles meurent et se lysent, provoquant le relâchement des toxines dans le milieu environnant. Ainsi, lorsque la période de floraison est en progression, on retrouve très peu de toxines extracellulaires alors que vers le déclin de celle-ci, la concentration de toxines extracellulaires augmente énormément.

L'évaluation de la toxicité d'une efflorescence ne peut se faire par la seule reconnaissance des espèces en présence, car une même cyanotoxine peut être synthétisée par plusieurs genres. Par exemple, on sait que les genres *Microcystis* et *Anabaena* produisent des cyanotoxines de type microcystine

La présence d'un genre réputé produire des cyanotoxines ne signifie pas nécessairement que les toxines seront présentes, car ce ne sont pas toutes les espèces constituant le genre qui produiront des cyanotoxines. Les espèces toxiques peuvent générer une souche qui possèdera ou non les gènes pour la production de toxines. Il est à noter que selon la diversité du matériel génétique des souches toxiques, celles-ci peuvent générer des cyanotoxines de toxicité variable.

10- Quelques domaines d'application des cyanobactéries

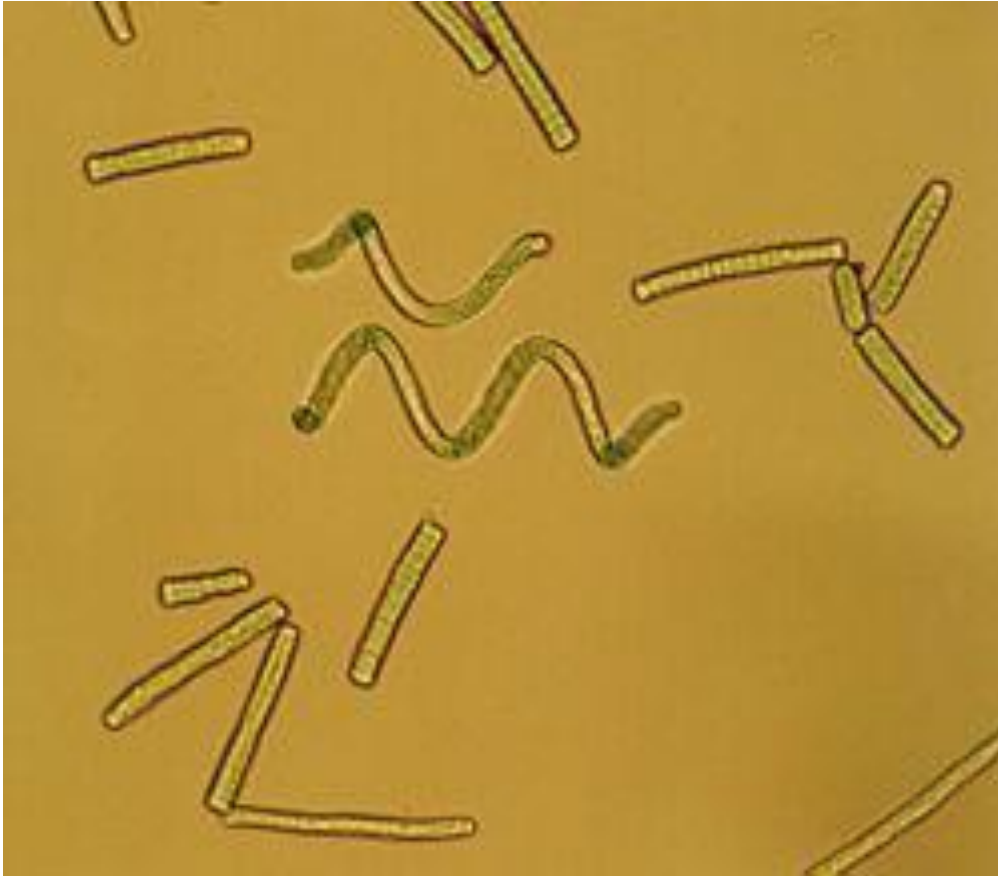
➤ Riziculture

Le riz est la troisième céréale mondiale en volume de production (468.10 6 t par an), mais la première en terme de consommation alimentaire humaine. Il constitue la base du régime alimentaire de près de 50% de la population mondiale.

Les organismes fixateurs d'azote, capables d'utiliser l'azote de l'air, constituent une fois enfouis dans le sol une source d'azote utilisable par le riz et qui ne nécessite pas ou peu d'investissement financier par le riziculteur. Par contre, ces techniques demandent aux riziculteurs un travail supplémentaire, parfois important. La technologie la plus ancienne faisant usage des organismes fixateurs de N₂ en riziculture est celle des engrais verts: légumineuses et *Azolla* qui est une symbiose entre une petite fougère aquatique et une cyanobactérie fixatrice d'azote (*Anabaena azollae*) et qui a été utilisée depuis le 11^e siècle pour la riziculture en Chine

➤ Spiruline

La spiruline est une algue planctonique unicellulaire. Elle est ainsi nommée parce qu'elle se présente sous forme de longs filaments spiralés, ces algues bleues microscopiques appartenant à l'embranchement des cyanophytes sont parmi les premiers végétaux à être apparus sur terre. La spiruline est une algue bleu-vert microscopique (0,2 à 0,3 mm de long) qui doit son nom à sa forme de spirale. Il en existe de nombreuses variétés dont font partie la *Spirulina maxima* et la *Spirulina platensis*



Presque aussi vieille que la vie sur terre, elle croît à l'état naturel dans des lacs des régions chaudes dont le sous-sol ou le terrain volcanique enrichissent les eaux de sels minéraux. Aujourd'hui, les microalgues servant à la fabrication de produits sont récoltées par aquaculture ou dans des étangs ou des lacs naturels contrôlés et sont commercialisées sous diverses formes comme supplément alimentaire. Les deux principales espèces de spiruline utilisées commercialement sont la *Spirulina maxima* et la *Spirulina platensis*. La première espèce provient du Mexique et était déjà consommée par les Aztèques du lac Texoco (aujourd'hui disparu), tandis que la deuxième espèce a été retrouvée au lac Tchad où elle fait partie de l'alimentation traditionnelle des tribus vivant dans le sud de la province du Kanem. Les spirulines sont composées à environ 65 % de protéine, et d'une forte concentration de fer. Elles contiennent aussi de l'acide gamma-linolénique, du bêta-carotène, de la phénylalanine, de la thiamine, de la riboflavine, du magnésium, du phosphore, du calcium, du potassium et des vitamines du groupe B. Les protéines et le fer qu'elles contiennent font de la spiruline un aliment intéressant pour les chercheurs qui s'intéressent à son potentiel comme denrées agricoles dans les pays où la famine sévit. Par contre, et malgré certaines allégations, les recherches ont démontré que la vitamine B12 contenue dans la spiruline n'était pas assimilée par l'humain

➤ Pigments (les cyanobactéries et le saumon)

Le saumon sauvage tire sa couleur rose caractéristique de pigments naturels appelés astaxanthine et canthaxantine qui se trouvent dans les algues planctoniques et les cyanobactéries. Ces algues et cyanobactéries sont d'abord consommées par d'autres organismes de petite taille, comme le krill (minuscules organismes planctoniques ressemblant à des crevettes). Lorsque ces organismes sont ingérés par des saumons sauvages, le pigment qu'ils contiennent est retenu par les tissus musculaires des saumons et donne à leur chair sa couleur rose.

Les algues, les cyanobactéries et le krill n'entrent pas normalement dans les aliments servant à l'alimentation des saumons d'élevage. En l'absence des pigments dérivés de ces organismes, la chair du saumon serait de couleur crème, au lieu de la couleur rose privilégiée par les consommateurs. Donc, il faut ajouter de l'astaxanthine et de la canthaxanthine synthétiques dans la nourriture des saumons avant leur mise sur le marché pour que leur chair acquière sa couleur rose.

Les pigments caroténoïdes synthétiques (c.-à-d. de couleur jaune, rouge ou orange) représentent environ 15 à 25 % du coût de production des aliments commerciaux des saumons.

Les principaux ordres de cyanobactéries

Ordre	Forme générale	Hétérocystes	Autres propriétés	Genres représentatifs
Chroococcales	Bacilles ou coques Agrégats non filamenteux	Non	Presque toujours immobiles	<i>Chamaesiphon</i> , <i>Gloeobacter</i> , <i>Synechococcus</i>
Pleurocapsales	Bacilles ou coques Peuvent former des agrégats	Non	Seuls quelques béocytes (petites cellules sphériques reproductrices) sont mobiles	<i>Pleurocapsa</i> , <i>Dermocarpa</i>
Oscillatoriales	Filaments, trichomes non ramifiés	Non	Généralement mobiles	<i>Lyngbya</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Spirulina</i>
Nostocales	Filaments, trichomes non ramifiés	Oui	Souvent mobiles ; peuvent produire des akinètes (cellules à paroi épaisse, résistantes à la dessiccation)	<i>Anabaena</i> , <i>Nostoc</i> , <i>Calothrix</i>
Stigonématales	Trichomes filamenteux ramifiés	Oui	Peuvent produire des akinètes	<i>Fischerella</i> , <i>Stigonema</i> , <i>Geitleria</i>

**CHAPITRE 3:
LES ALGUES**

Généralités

- Les algues sont des êtres vivants capables de photosynthèse dont le cycle de vie se déroule généralement en milieu aquatique.
- Elles constituent une part très importante de la biodiversité, et une des bases des réseaux trophiques (types de nutrition) des milieux aquatiques d'eaux douces, saumâtres et marines.
- Elles sont aussi utilisées dans l'alimentation humaine, par l'agriculture et par l'industrie.
- Ce sont des Eucaryotes de formes très diverses, capables de photosynthèse et de reproduction aussi bien sexuée qu'asexuée.

- Les algues sont surtout aquatiques, bien qu'on en trouve quelques unes dans le sol et sur les arbres quand l'humidité y est assez élevée. En règle générale, les algues vivent dans les eaux plutôt froides des zones tempérées.
- Elles utilisent la photosynthèse pour produire leur nourriture et croître ; en conséquence, il leur faut de la lumière et de l'air, mais en général, elles n'ont pas besoin de composés organiques de leur environnement.
- Grâce à leur photosynthèse, elles produisent de l'oxygène et des glucides qui sont consommés par d'autres organismes dont les animaux. C'est ainsi qu'elles jouent un rôle important dans l'équilibre de la nature.

Caractéristiques des algues



A- Les algues procaryotes

➤ Il existe un groupe d'algues procaryotes qui, comme les bactéries, n'ont pas de noyau défini, ce sont les cyanobactéries.

➤ **Les cyanobactéries ou algues bleu-vert:**

- Leur thalle est unicellulaire, sans noyau défini. Par cette caractéristique, elles sont proches des bactéries.

- Les colonies peuvent être isolées, on les appelle « *cénobes* » ou en files de cellules qui sont alors appelées les « *trichomes* », entourées d'une gaine et qui forment un filament.

- Elles sont apparues il y'a 3,8 milliards d'années environ.
- Elles auraient joué un grand rôle dans la production de l'oxygène de l'atmosphère.
- Leurs cellules ont une structure procaryote typique des bactéries.
- Lorsqu'elles sont en symbiose avec un champignon, elles forment un lichen.

B- Les algues eucaryotes

- Toutes les autres algues sont eucaryotes.
- Chez-elles, la photosynthèse se produit dans des structures particulières, entourées d'une membrane, qu'on appelle chloroplastes

1- Structure et morphologie des algues

- La plupart des algues protistes sont des organismes unicellulaires et phototrophes qui se multiplient par scission binaire.
- Elles peuvent être mobiles ou non.
- Chez certaines espèces d'algues, les cellules filles issues par division ne se fragmentent pas mais s'agrègent pour former des thalles coloniaux, filamenteux ou membraneux.
- La plupart des parois des algues, si présentes, sont formées de cellulose et parfois imprégnées de silice ou de carbonate de calcium. Les parois peuvent être fibrillaires, similaires à celles des mycètes, ou elles peuvent être composées d'une matrice distincte dont les composants sont sécrétés par l'appareil de Golgi.

- Les cellules contiennent:
 - un noyau,
 - des mitochondries,
 - des ribosomes,
 - un appareil de Golgi
 - Chloroplastes,
 - flagelles

- La structure cellulaire interne est soutenue par une charpente de microtubules et par le réticulum endoplasmique. Elles possèdent souvent des flagelles, un à deux par cellule. Ils peuvent être insérés aux pôles de la cellule, à sa face latérale ou à sa partie postérieure.

- Du point de vue morphologique , les algues se présentent sous un nombre de formes très variées, depuis le type unicellulaire jusqu'aux filaments ramifiés. On peut distinguer:

A- Les formes unicellulaires

- Type rhizopodial : les algues de forme rhizopodiques n'ont pas de parois cellulaires rigides et émettent des pseudopodes. Ce sont en général des cellules isolées, nues ou contenues dans une thèque. Ces formes sont généralement rares chez les algues d'eau douce et ne se rencontrent que chez les Chrysophytes.
- Type cocoïde : les cellules sont immobiles, entourées d'une membrane ferme et bien définie
- Type flagellé : les cellules sont en général solitaires et mobiles présentant 1,2, rarement 3 ou 4 fouets. Ce type morphologique n'existent pas comme forme végétative chez les Cyanophytes, les Rhodophytes et les Phéophytes.

B- Les formes coloniales

On distingue 2 sortes de colonies: les mucilagineuses et les cénobes

- Les colonies mucilagineuses : elles sont constituées de cellules groupées sans forme définie dans une gelée englobant l'ensemble. Certaines colonies sont constituées de cellules flagellées et mobiles
- Les coenobes : colonies immobiles ayant toujours une structure régulière.

C- Les formes filamenteuses

Des filaments simples, non branchus existent chez un grand nombre d'algues d'eau douce. Ils peuvent être libres ou agrégés en colonies

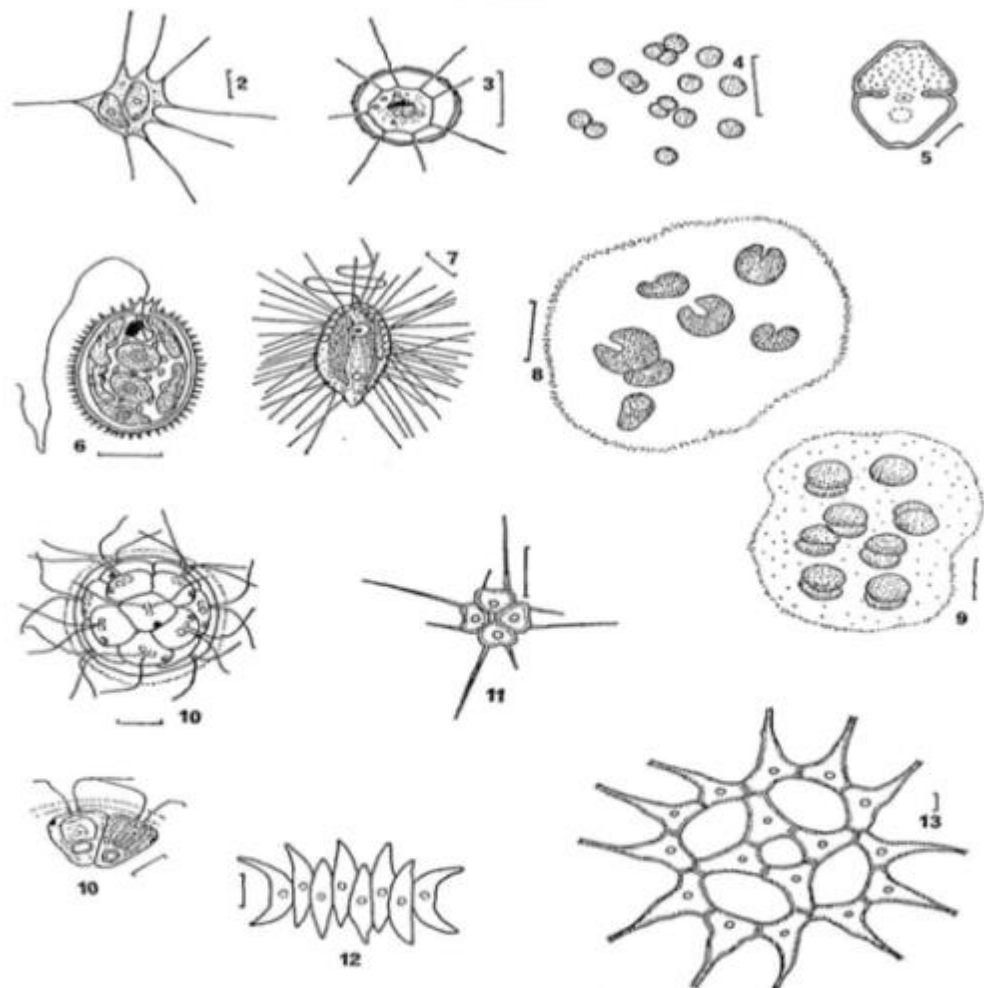


PLANCHE I. — Figs 2 et 3 : Type rhizopodial : *Rhizochrysis doffeinii* et *Stephanoporus regularis*. 4 et 5 : Type coccolide : *Synechocystis aquatilis* et *Cosmarium granatum* 6 et 7 : Type flagellé : *Trachelomonas hispida* var. *coronata* et *Mallomonas mirabilis*. 8 à 10 : colonies mucilagineuses : *Kirchneriella obesa*, *Chroococcus limneticus* et *Pandorina morum* (colonie entière et détail de deux cellules). 11 à 13 : cénobes : *Tetrastrum heteracanthum*, *Scenedesmus acuminatus* et *Pediastrum clathratum* (2 d'après Fott ; 3 d'après PASCHER ; 7 d'après CONRAD ; 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13 d'après BOURRELLY).

N. B. : sur cette planche et sur les suivantes, le tiret situé à côté des figures représente 10 μ .

2- Taxonomie des algues (classification)

On distingue plusieurs Phylums:

- ❖ **Les algues brunes**, ou varech, constituent l'embranchement des *Phœophyta*. On trouve ces algues brunes dans les eaux côtières. Ces algues possèdent un taux de croissance phénoménal.
- ❖ Elles produisent des polysaccharides de haute viscosité (Agar Agar)
- ❖ Elles possèdent un taux de croissance phénoménale



❖ **Les algues rouges** constituent l'embranchement des *Rhodophyta*

❖ La plupart des algues rouges possèdent un thalle finement découpé et peuvent vivre à de plus grandes profondeurs océaniques que les autres algues. Les pigments rouges permettent à ces algues d'absorber la lumière bleue qui pénètre plus profondément dans la mer



- ❖ **Les algues vertes** constituent l'embranchement des *Chlorophyta* (dans la nouvelle classification, les algues vertes seraient regroupées avec les plantes).
- ❖ Elles ont des parois cellulaires de cellulose, contiennent de la chlorophylle a et la chlorophylle b et emmagasinent de l'amidon comme les plantes.
- ❖ Certains types filamenteux d'algues vertes forment dans les étangs une mousse verte qui rappelle l'herbe.

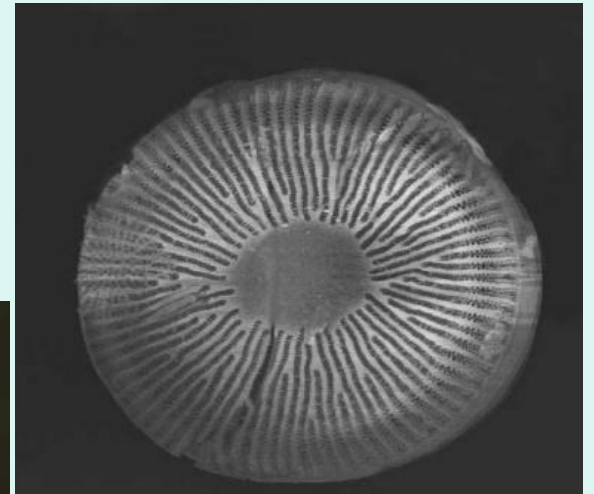
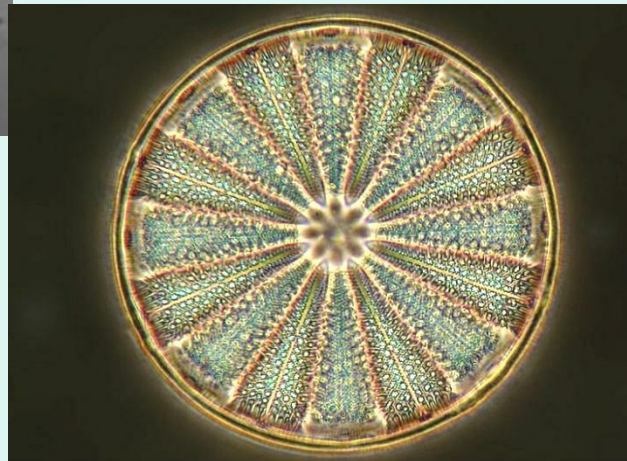
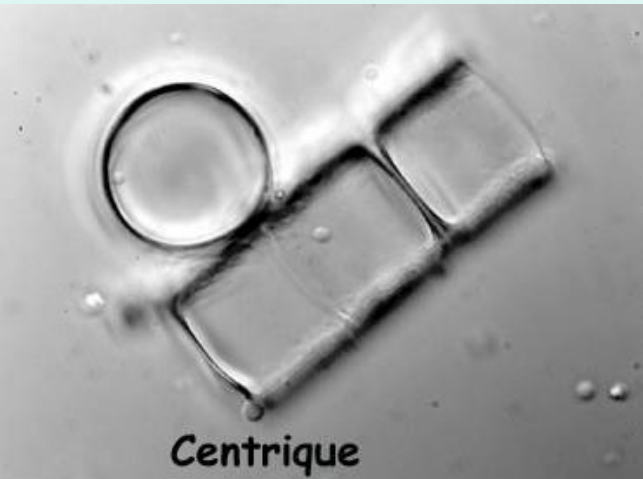


- ❖ Les *diatomées* (Bacillariophycées) constituent l'embranchement des *Chromophyta*. Ce sont des algues unicellulaires ou filamenteuses dont les parois cellulaires sont composées de pectine et d'une couche de silice que l'on nomme « *frustule* »
- ❖ Lorsque les diatomées meurent, leur contenu cellulaire se décompose et il ne reste que cette paroi externe qui sédimente et qui forme une roche que l'on appelle « *diatomite* » ou « *terre de diatomées* »
- ❖ Les diatomées forment la majeure partie du phytoplancton dans les zones les plus froides de l'océan
- ❖ On peut trouver jusqu'à 1.000.000 / L d'eau de mer

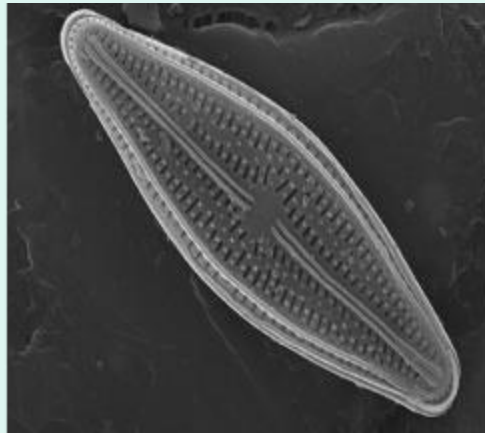
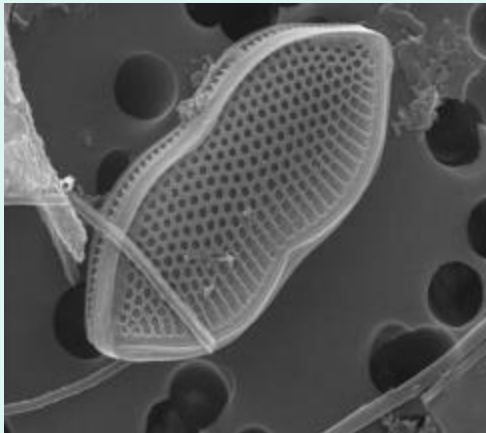
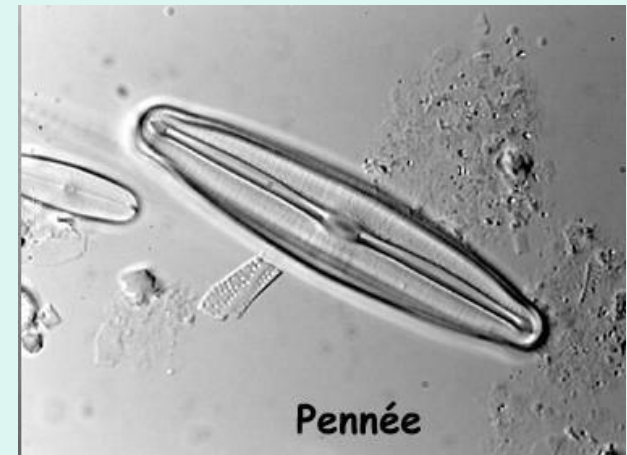


On distingue 2 grandes catégories de diatomées selon la géométrie de leur frustule:

✓ Diatomées centrales; à symétrie radiale: le frustule circulaire porte des stries rayonnant depuis un point ou une auréole (qui n'est pas forcément situé au centre de la valve) ou une réticulation



- ✓ Diatomées pennales à symétrie bilatérale: le frustule allongué présente de stries disposées autour d'un plan symétrique bilatérale.
- ✓ De nombreuses diatomées pennales présentent une fente (le raphé) interrompue par un nodule de silice central.
- ✓ Les pennales sans raphé sont appelées « *diatomées araphidées* » ou « *crypto-raphidées* »



❖ **Les dinoflagellés** (Dinophycées) constituent l'embranchement des *Pyrrhophyta*.

❖ Ce sont des algues unicellulaires qui forment le plancton (organismes en suspension dans l'eau).

❖ Ils ont une structure rigide due à la cellulose enchâssée dans la membrane plasmique.

❖ Parfois cette paroi est absente chez certaines espèces

❖ 1100 espèces environ de Pyrrhophyta sont recensées et les genres les plus connus sont:

- *Gymnodinium*
- *Alexandrium*
- *Ceratium*



- Les *Euglénoïdes*: constituent l'embranchement des ***Euglenophyta***.
- Ce sont des êtres unicellulaires rencontrés dans les eaux douces
- 1/3 d'entre eux sont photosynthétiques et possèdent les chlorophylles a et b ainsi que plusieurs caroténoïdes
- Les euglénoïdes n'ont pas de paroi cellulaire, mais possèdent une série de bandes protéiques disposées en hélice, appelées « pellicules » qui se situent juste sous la membrane plasmique
- Leur reproduction est asexuée, elle se fait par division cellulaire longitudinale
- 700 espèces sont recensées. Les genres les plus connus parmi les 40 recensés sont *Euglena* et *Phacus*



Embranchement (Règne)	Nom commun	Nombre d'espèces	Représentants	Pigments	Réserves	Paroi	Habitat
Chlorophytes (Protistes)	algues vertes	7500	<i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i> , <i>Spirogyra</i> , <i>Ulva</i>	Chloro. a,b Xanthophylles Carotènes	Sucres, amidon, fructane	Cellulose, mannanes, protéines, CaCO ₃	eau douce, saumâtre, salée et terrestre
Charophytes (Protistes)		250	<i>Chara</i> , <i>Nitella</i>	Chloro. a,b Xanthophylles Carotènes	amidon	Cellulose, CaCO ₃	eau douce et saumâtre
Euglenophytes (Protistes)	Euglènes	700	<i>Euglena</i> , <i>Phacus</i>	Chloro. a,b Xanthophylles Carotènes	paramylon, huiles, sucres	absente	eau douce, saumâtre, salée et terrestre
Chrysophytes (Protistes)	algues brun-jaune, vert-jaune et diatomées	6000	<i>Dinobryon</i> , <i>Surirella</i>	Chloro. a, C1, C2 Carotènes fucoxanthine, xanthophylles	Chrysolam inarine, huiles	Cellulose, silice, CaCO ₃	eau douce, saumâtre, salée et terrestre
Phaeophytes (Plantes)	algues brunes	1500	<i>Laminaria</i> , <i>Fucus</i>	Chloro. a,b Xanthophylles Carotènes	laminarine, mannitol, huiles	cellulose, alginate, fucoïdane	eau salée et saumâtre
Rhodophytes (Plantes)	algues rouges	3900	<i>Gracilaria</i> , <i>Gelidium</i> , <i>Chondrus</i>	Chloro. a rarement d Xanthophylles carotènes, zéaxanthine, phycocyanine C, phycoérythrine	amidon floridéen	cellulose, xyloanes, galactanes, CaCO ₃	eau douce, saumâtre et salée
Pyrrhophytes (Protistes)	dinoflagellés, dinophytes	1100	<i>Gymnodinium</i> , <i>Ceratium</i> , <i>Alexandrium</i>	Chloro. a, C1, C2, carotènes, fucoxanthine, péridinine, dinoxanthine	amidon, glycanes, huiles	cellulose ou absente	eau douce, saumâtre ou salée

3- *Ecologie des algues*

- La plupart des algues se développent en milieu aquatique d'eau douce, saline ou saumâtre. Mais certaines sont terrestres et sont capables de se développer à même le sol ou sur les tronc d'arbres
- Elles peuvent donc être autotrophes ou saprophytes, parasites ou vivre en symbiose.

- a- *Les algues flottantes*
 - *Algues flottantes du plancton*: exp: phytoplancton, algues flottantes de grande taille (Sargasses)
 - *Algues thermophiles*: exp:
 - *Algues aériennes*: exp:
 - *Algues fixées*: épilithes (rochers); épizoïques (paresseux qui portent des algues brunes en saison sèche et algues vertes durant la saison des pluies); épiphytes (végétaux) et épixyles (bois)

b- Les algues saprophytes

c- Les algues parasites (exp: *Egeria densa*, algue qui recouvre les étangs)

d- Les algues symbiotiques (exp: *Symbiodinium* qui vit avec le corail; Lichens)

4- La reproduction chez les algues

- Deux mode de reproduction existent chez les algues: sexué et asexué. La reproduction sexuée est le mode le moins fréquent et fait intervenir des gamètes femelles (**oosphères**) et mâles (**anthérozoïdes**).
- La reproduction asexuée est le mode le plus fréquent chez l'algue et peut être de 3 types:
 - ✓ Par fragmentation
 - ✓ Par sporulation
 - ✓ Par scission binaire
- Chez certaines espèces, la reproduction asexuée peut avoir lieu pendant plusieurs générations puis sous l'influence de nouvelles conditions, ces mêmes espèces se reproduisent de façon sexuée.
- Chez d'autres espèces, il y'a alternance de générations (les cellules alternent la reproduction sexuée/asexuée)

5- *Composition des algues*

- Une richesse minérale incomparable composée de:
 - macro-éléments: K, Cl, Na, I, Fe, etc...
 - Oligo-éléments: Al, As, B, Pb, etc...

- Des acides aminés:
 - Les 8 AA essentiels (que le corps ne peut synthétiser)

- Les vitamines
 - Vitamines A,B,C,D3,E,K

- Des pigments
 - Chlorophylle, carotène, xanthophylle et phycobiline

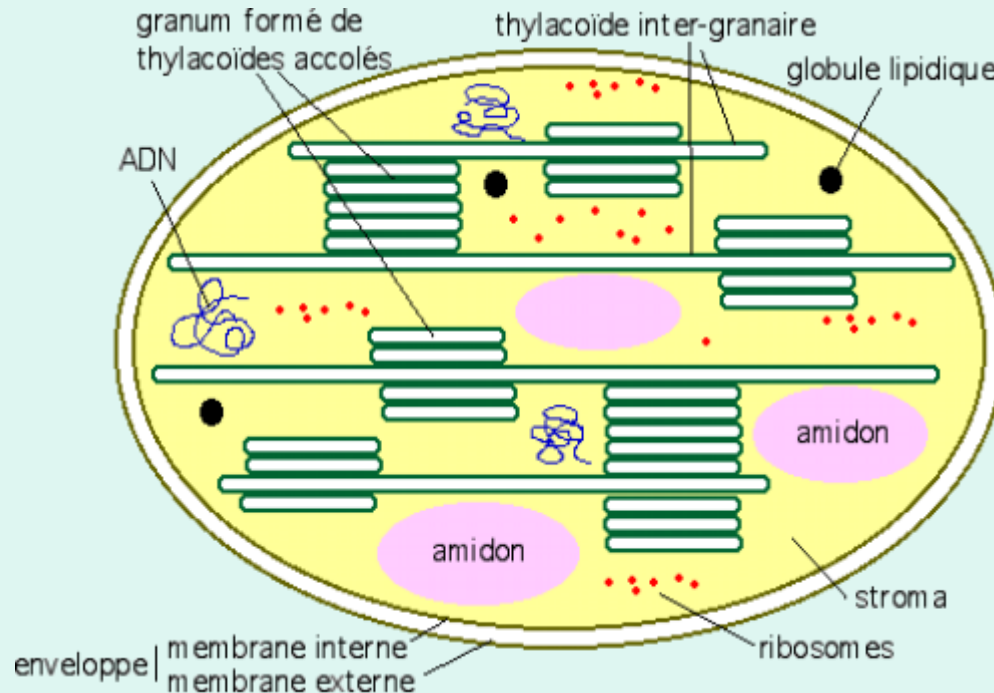
- Des glucides: ex: la cellulose

- Des lipides
- L'eau

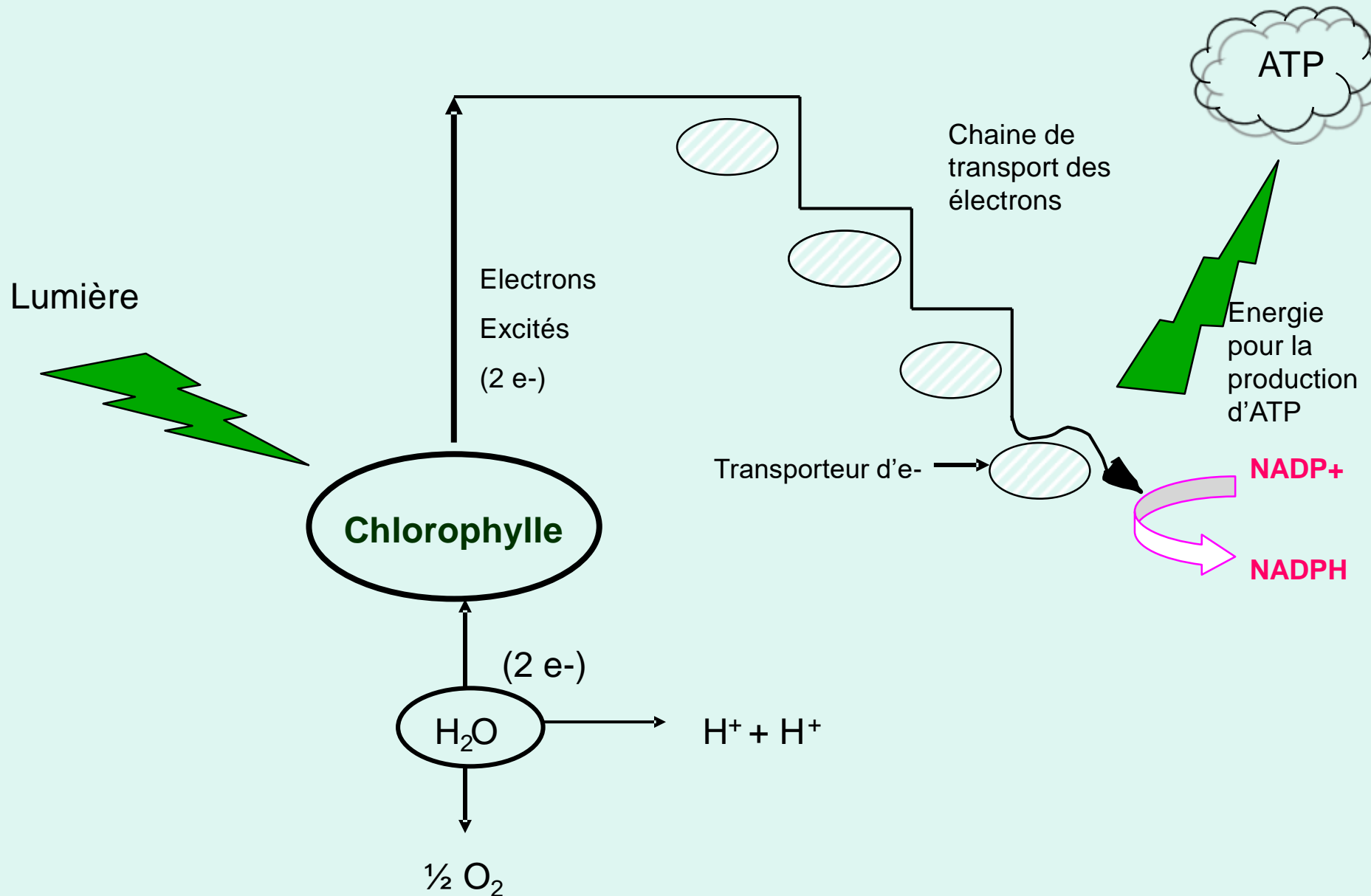
6- Autres caractéristiques des algues

6-1-La photosynthèse :

- Les algues sont des organismes phototrophes : ils satisfont leurs besoins en carbone et en énergie en fixant le CO_2 grâce à la photosynthèse.
- Les réactions de la phase lumineuse ont lieu dans les thylacoïdes et génèrent du $\text{NADPH} + \text{H}^+$ ainsi que la synthèse de l'ATP par phosphorylation non cyclique.



Phosphorylation non cyclique



- Les réactions de la phase obscure ont lieu dans le stroma des chloroplastes. L'énergie générée par les réactions lumineuses est utilisée pour synthétiser des hydrates de carbone à partir du CO_2 et de H_2O (voir photosynthèse).

- De nombreuses algues ne sont pas uniquement phototrophes, elles peuvent aussi se nourrir par phagocytose ou être saprophytes en absorbant des nutriments.

6-2- Les pigments lumineux et photosynthèse :

- La lumière est indispensable à la photosynthèse. Dans un environnement terrestre, le taux de luminosité est souvent adéquat, mais dans un milieu aquatique, la lumière est rapidement absorbée à partir de 0,5m de colonne d'eau.

- Les algues aquatiques possèdent 3 chlorophylles : chl. a, b, et c et un grand nombre de pigments accessoires leur permettant de croître à des profondeurs plus importantes.

6-3-L'oxygène le dioxyde de carbone

- Dans l'environnement terrestre, les besoins en CO_2 et O_2 sont toujours satisfaits par les gaz atmosphériques.
 - Dans le milieu aquatique, l'eau sature à 14mg/l d' O_2 à 0°C. Cependant, la solubilité d' O_2 diminue avec la température et les taux de CO_2 croissants. La disponibilité d' O_2 est donc limitée dans les eaux chaudes.
-

-

-

.

7-Les effets bénéfiques et les effets délétères des algues

7-1- Les effets bénéfiques

- Les algues associées avec des bactéries saprophytes et de la matière organique dissoute forment la base de la chaîne alimentaire aquatique
- Dans les associations (algues-mycètes-animaux) , les hydrates de carbone produits par photosynthèse des algues sont échangés contre des nutriments provenant des mycètes ou des animaux.
- **La terre des diatomées** est formée de dépôts de diatomées mortes contenant de la silice. Elle constitue un intérêt commercial grâce à son inertie chimique et sa propriété physique abrasive.

- L'**algine** est une substance extraite de leurs parois cellulaires que l'on utilise comme épaississant dans de nombreux aliments (crème glacée, décoration pour gâteaux). L'algine est également utilisée pour la production de pneus en caoutchouc et les lotions pour les mains. Dans la cuisine japonaise, l'algue brune *Laminaria* (appelée *kombu*) est consommée dans la soupe. En chirurgie, on se sert de *Laminaria japonica* pour dilater le vagin et faciliter l'accès à l'utérus par les voies naturelles.
- La **gélose**, ou agar-agar, utilisée dans les milieux de culture en microbiologie est extraite de nombreuses algues rouges.

- La **carragénine**, extraite d'une algue rouge appelée « mousse d'Irlande » est employée comme épaississant dans le lait condensé, la crème glacée, la sauce chocolat et les préparations pharmaceutiques. Dans la cuisine japonaise, l'algue rouge, *Porphyra* (appelée *nori*) enveloppe les sushis.
- En cosmétique: corps, visage, shampoing, etc...
- En dentisterie: pour les empreintes dentaires
- En médecine: pour soigner les rhumatismes, thalassothérapie
- En pharmacie: laxatifs, vermifuges, antibactériens

7-2-Les effets délétères

-La protothécose : certaines algues peuvent infecter l'homme et les animaux. *Prototheca* est une algue incolore, saprophyte, assez commune dans le sol qui Provoque des lésions cutanées.

-Les diatomées produisent de **l'acide domoïque**, une biotoxine qui se concentre dans les moules. L'intoxication, appelée intoxication par phycotoxine amnestique, se manifeste par des nausées, des vomissements, la diarrhée et la perte de mémoire. Le taux de mortalité : 4%.

-Certains dinoflagellés produisent des neurotoxines. Quand les poissons nagent au milieu d'un grand nombre de *Gymnodinium breve*, certaines cellules du dinoflagellé restent emprisonnées dans les ouïes des poissons et libèrent une neurotoxine qui empêchent ces derniers de respirer. *Alexandrium* est un genre de dinoflagellé dont les neurotoxines : **saxitoxines** ou **mytilotoxine**, causent l'intoxication par phycotoxine paralysante. La toxine est concentrée chez les mollusques tels que les moules.

Chapitre 4:
Organismes à photosynthèse
anoxygénique

1- Généralités

- Il s'agit de bactéries unicellulaires ou filamenteuses, à composition pigmentaire particulière par rapport aux organismes oxygéniques.
- Leur mode de vie est typiquement anaérobie, en milieu aquatique (profondeur dans les lacs) ou dans le sol.
- Certains sont thermophiles
- Ces organismes présentent 3 caractéristiques majeures du point de vue de la photosynthèse:
 - ❖ *un seul photosystème: PSI ou PSII*
 - ❖ *un système antennaire très caractéristique renfermant des bactériochlorophylles et des caroténoïdes réduits*
 - ❖ *phototrophes en anaérobiose et les composés réduits sulfures sont des donneurs d'électrons*

Deux groupes sont distingués classiquement par la nature des pigments qu'ils renferment: les bactéries pourpres et les bactéries vertes

2- Ecologie des bactéries pourpres et vertes sulfureuses

- Les bactéries sulfureuses ont pour habitat des lacs et des estuaires (embouchure d'un cours d'eau)
- Sont strictement phototrophes en anaérobiose et oxydent des sulfures
- 2 types d'habitat sont observés: planctonique en pleine eau et benthique, à la surface des sédiments déposés au fond des lacs
- Les bactéries planctoniques ont pour habitat des lacs d'eau douce « stratifiés » en différentes couches d'eau entre la surface et la profondeur

- Les flux lumineux sont faibles à quelques mètres de profondeur: ils n'atteignent plus que 2-5% de ceux mesurés en surface, ce qui limite le développement des organismes et seule la lumière bleu-vert à jaune (470-550 nm) pénètre dans cette zone
- Les bactéries pourpres sont concentrées à 4-5m de profondeur, leurs pigments caroténoïdes, comme la spirilloxanthine, permettent la capture puis le transfert d'énergie aux bactériochlorophyles
- L'habitat benthique concerne essentiellement les bactéries vertes sulfureuses. Elles forment des coussinets à la surface des sédiments, au fond des lacs et en anaérobiose, mais elles sont recouvertes par les bactéries photo-aérobies (cyanobactéries) ou des bactéries pourpres tolérantes envers l'oxygène, qui consomment l'oxygène les plaçant ainsi en quasi-anoxie et de plus, font écran à la lumière

3- Les bactéries pourpres (*Rhodobactéries*)

- Sont des procaryotes dont l'habitat est typiquement aquatique et anaérobie
- Elles peuvent être photolithotrophes
- L'appareil photosynthétique est localisé dans des invaginations de la membrane cytoplasmique
- Elles possèdent un seul photosystème: le PSII
- Ces bactéries possèdent les bactériochlorophylles a ou b ainsi que des caroténoïdes: spirilloxanthine, lycopène, carotène, l'okénone ou leurs dérivés
- Ces pigments permettent une absorption dans des zones profondes, ce qui leur permet de vivre à des profondeurs plus grandes que celles des algues et des cyanobactéries



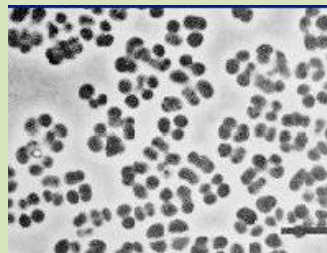
3-1- Bactéries pourpres sulfureuses (*Chromatiaceae*)

- Appelées aussi bactéries sulfo-réductrices , Gram négatif
- Ce sont des gamma-protéobactéries qui sont strictement anaérobies, photoautotrophes et vivent dans des zones lacustres riches en sulfures
- Leur source d'électrons est le H_2S , S , H_2 ,
- Certains sont halophiles et / ou alcalophiles
- Leur mobilité est assurée par flagelle polaire ou encore par cils péritriches
- Les genres les plus communs sont:

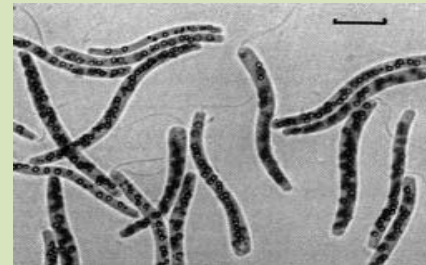
Chromatium



Thiocapsa



Thiospirillum



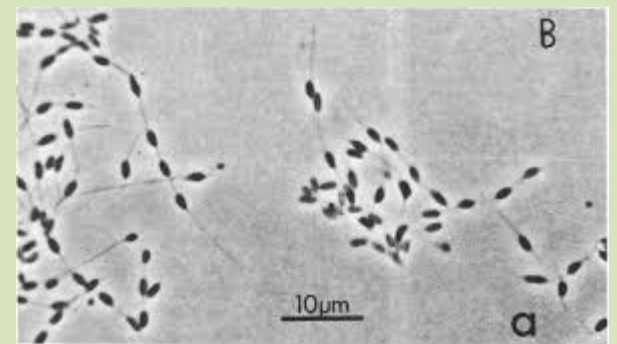
3-2- Bactéries pourpres non sulfureuses (*Rhodospirillaceae*)

- Ce sont des bactéries Gram négatif
- photohétérotrophes, anaérobies utilisant comme donneur d'électrons le H_2S , H_2 ou encore des composés organiques réduits.
- Elles appartiennent aux alpha-protéobactéries
- Les plus connues sont :

Rhodospirillum

Rhodopseudomonas

Rhodomicrobium

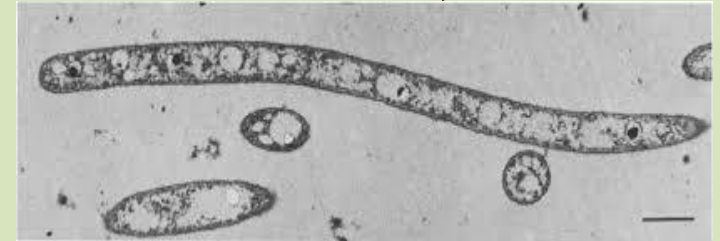


4- Les bactéries vertes (*Chlorobactéries*)

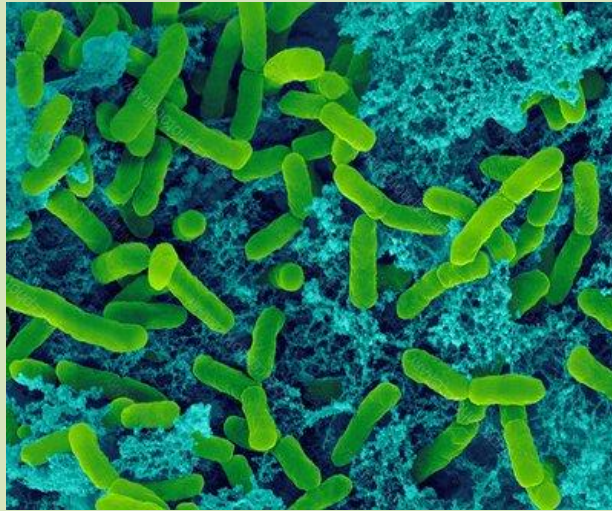
- Sont des procaryotes à Gram négatif qu'on trouve dans les eaux saumâtres et polluées.
- Ce sont des anaérobies strictes possédant les bactériochlorophylles a,c,d et e.
- Le siège de la photosynthèse est le chlorosome.
- On distingue deux grands groupes de bactéries vertes:

4-1- Bactéries vertes sulfureuses (*Chlorobiaceae*)

- Anaérobies, photoautotrophes strictes possédant le PSI
- Sont généralement Gram négatif, unicellulaires, de forme sphérique, bâtonnet ou spirale
- Le sulfure est le donneur d'électrons couramment utilisé, mais peuvent utiliser le H₂
- Généralement immobiles à l'exception de l'espèce *Chloroherpeton thalassium* (glissement)
- Elles comprennent les genres :
 - ✓ *Peledictyon*
 - ✓ *Ancalochloris*
 - ✓ *Chloroherpeton*
 - ✓ *Prosthecochloris*.....



- L'espèce la plus étudiée est *Chlorobium tepidum* dont on a pu séquencer 10 génomes



- Une bactérie verte sulfureuse a été découverte près de fumeurs noirs de côte mexicaine, sous la surface de l'océan pacifique à 2500m de fond. A cette profondeur aucune lumière solaire ne peut y parvenir: elle a été appelée GSB1 (Green Sulfurous Bacteria 1)

4-2- Bactéries vertes non sulfureuse (*Chloroflexaceae*)

- Utilisent des composés organiques réduits comme donneurs d'électrons et possèdent le PSII.
- Généralement pluricellulaires et filamenteuses.
- Mobile par reptation .
- Photo-organo-hétérotrophes en milieu aquatique.
- Beaucoup sont thermophiles. Le seul genre et espèce bien connue est *Chloroflexus aurantiacus* qui est thermophile avec un optimum de croissance à 55°C.
- Elles comprennent les genres:
 - ✓ *Chloroflexus*
 - ✓ *Chloroneura*
 - ✓ *Heliothrix*
 - ✓ *Reseiflexus*.....

En résumé, il existe 4 types possibles trophiques
chez les bactéries pourpres et vertes:

- ❖ Photo-autotrophe
- ❖ Photo-lithoautotrophe
- ❖ Photo-organohétérotrophe
- ❖ Chimio-hétérotrophe (aérobiose)

Autres bactéries photosynthétiques

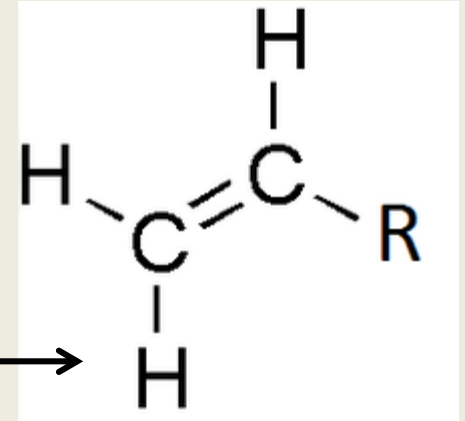
1- héliobactéries (Hbt)

1-1- Découverte des héliobactéries

- Ces bactéries strictement anaérobies des sols humides (rizières) ont été découvertes seulement au début des années 80 (1983)
- La première espèce découverte est *Heliobacterium chlorum*. Depuis, neuf autres espèces ont été mises en évidence
- Ce sont généralement des thermophiles, bâtonnets ou spirilles
- Les héliobactéries forment un groupe très homogène où l'on ne reconnaît que deux genres: *Heliobacterium* et *Heliobacillus*

➤ Elles présentent quelques caractéristiques tout à fait intéressantes comme:

✓ La présence d'une bactériochlorophylle spéciale, **la bactériochlorophylle g (Bchl g)**, proche des bacteriochloro. a et b avec un groupement vinyle



➤ L'absence de chlorosomes et d'invaginations de la membrane cytoplasmique: l'appareil photosynthétique est localisée dans la membrane cytoplasmique

➤ On trouve un complexe antennaire unique, de petite taille, lié au centre réactionnel qui de type I (**PSI**)

➤ Ce sont des photohétérotrophes

1-2- Ecologie des héliobactéries

- Les héliobactéries vivent en anaérobiose stricte à la surface des sols humides riches en matière organique, où elles sont exposées plus ou moins directement à l'éclairement solaire
- Se rencontrent fréquemment dans le sol des rizières en Extrême Orient
- En période de dessiccation des sols, elles produisent des spores de résistance, ce qui les rapprochent des bactéries de type *Clostridium*
- Quelques espèces d'héliobactéries et de Chloflexacées vivent dans les eaux thermales à des températures supérieures à 50°C
- En concurrence avec les héliobactéries, on trouve dans les sols des bactéries pourpres non sulfureuses, également photohétérotrophes facultatives, cependant, la plupart sont aquatiques
- Les héliobactéries phototrophes peuvent utiliser le pyruvate en absence de lumière

1-3-Physiologie et métabolisme des héliobactéries

- Dans des conditions appropriées, les Hbt peuvent se développer en tant que phototrophes ou chimioorganotrophes
- Comme ce sont des anaérobies strictes, des précautions particulières sont nécessaires pour leur culture en laboratoire (Technique de Hungate)
- Des quantités infimes d'oxygène provoquent une oxydation spontanée de la bactériochlorophylle g qui est apparemment irréversible dans les cellules intactes
- La présence d'oxygène dans les cultures d'Hbt est signalée par un changement de couleur du vert brunâtre au vert emmeraude et la viabilité de telles cultures lors du transfert vers un milieu anoxygénique frais est faible
- Seule une séquence du génome de l'espèce thermophile ***Hbt. Modesticaldum*** est actuellement disponible

1-4- Genres et espèces d'Hbt.

➤ Actuellement 4 genres et quelques espèces d'Hbt. ont été formellement décrits et sont regroupés dans leur propre taxon de la famille des Heliobacteriaceae

❖ Le genre Heliobacterium: contient la majorité des espèces

✓ *Hbt. chlorum*

✓ *Hbt. modesticaldum*

✓ *Hbt. sulfi-dophilum*

✓ *Hbt. undosum*

1983 - 2000

❖ Le genre Heliobacillus: contient 1 seule espèce

✓ *Hba. mobilis* (1987), bâtonnet, flagellé

❖ Le genre Heliophilum: 1 seule espèce

✓ *Hph. fasciatum* (1996) bâtonnet à extrémité effilée

❖ Le genre Heliorestis: 3 espèces

✓ *Hrs. daurensis* }

✓ *Hrs. baculata* }

1999 - 2006

✓ *Hrs. convoluta* (spires serrées)

- Les espèces d'Hbt., Hba. et Hph. sont neutrophiles avec un optima de croissance de pH de 7, contrairement à Hrs. dont l'optima de croissance de pH est compris entre 8- 9

2- Rhizobium

- Bactéries Gram négatif, phototrophes, aérobies du sol appartenant à la famille des Rhizobiaceae et à la classe des α -proteobacteria
- Bâtonnets, mobiles par flagelle
- Elles présentent la capacité de former une symbiose avec les plantes de la famille des légumineuses. Cette symbiose confère aux Fabacées l'aptitude de se nourrir à partir de l'azote de l'air
- En conditions limitantes en azote, les rhizobium vont induire la formation de nodosité au niveau racinaire des légumineuses. Ces nodosités vont représenter de véritables organes d'échanges métaboliques entre les bactéries et les plantes

- En effet, les fabacées procurent aux bactéries un apport en substrats carbonés issus de la photosynthèse, en échange, les bactéries vont fixer et réduire l'azote atmosphérique en ammonium assimilable par les plantes hôtes
- Les rhizobium peuvent avoir une activité photosynthétique en anaérobiose, utilisant la lumière infra rouge diffusant au travers des enveloppes des nodosités
- Ils renferment des bactériochlorophylles a et spirilloxanthine
- Le genre *Rhizobium* regroupe des bactéries dites à croissance rapide (temps de génération < 6H) et comporte principalement:
 - ✓ *Rhizobium leguminosarum*
 - ✓ *Rhizobium galagae*
 - ✓ *Rhizobium tropici*
 - ✓ *Rhizobium etli*
 - Rhizobium meliloti*
 - Rhizobium trifolii*
 - Rhizobium phaseoli*
 - Rhizobium lupini*

(1989 – 1992)

3- Bradyrhizobium

- Bacilles, Gram négatif, mobiles par flagelle
- Sont des phototrophes responsables de développement de nodosité fixatrices d'azote sur les tiges de diverses légumineuses tropicales aquatiques du genre *Aeschynomene* (*légumineuse semi-aquatique qui ont la particularité d'être nodulée au niveau des tiges + racines par des Bradyrhizobium photosynthétiques*)
- Cette symbiose joue un rôle clé dans le cycle biologique de l'azote, l'agriculture et la restauration des sols dégradés ainsi qu'en riziculture
- Comme les Rhizobium, elles manifestent une activité photosynthétique en anaérobiose utilisant la lumière infra rouge diffusant au travers des enveloppes des nodosités

- Les *Bradyrhizobium* renferment des pigments rencontrés chez les bactéries pourpres: bactériochlorophylle a, spirilloxanthine et la canthaxanthine. Cette dernière est utilisée dans les IAA, industrie pharmaceutique et cosmétiques pour ses propriétés colorantes et photo protectrices en particuliers la souche ORS 278
- Il existe des *Bradyrhizobium* photosynthétiques et d'autres non photosynthétiques , mais contrairement aux autres bactéries photosynthétiques (BPS, BPNS, BVS, BVNS, héliobactéries) les souches photosynthétiques nodulant *Aeschynomene sp.* sont aérobies strictes et présentent une hétérotrophie pour le carbone
- Ces *Bradyrhizobium* photosynthétiques sont appelés **bactéries quasi-photosynthétiques**, réalisant une photosynthèse anoxygénique en aérobiose.

- Les *Bradyrhizobium* sont très proches phylogénétiquement de *Rhodopseudomonas palustris* (bactérie pourpre). Cette bactérie est bien connue des microbiologistes pour son adaptabilité à des conditions environnementales variées et sa capacité à dégrader de nombreux composés xénobiotiques (substances étrangères à l'organisme possédant des propriétés toxiques: pesticides)

- Le genre *Bradyrhizobium* comprend généralement les bactéries à croissance lente ($G > 6H$). Ce genre ne comprenant qu'une seule espèce définie: *Bradyrhizobium japonicum* nodulant le soja. Depuis 1993, de nouvelles espèces ont été décrites:
 - **B. Elkanii* (1992)
 - **B. liaoningensis* (1995)
 - **B. lupini*
 - **B. ingae* (2014)
 - **B. neotropicale* (2014)
 - **B. stylosanthis* (2016)



Chapitre 6 :

Le Compostage

1- Définition du compostage

Le **compostage** peut être défini comme un procédé de décomposition ou de biodégradation de diverses matières organiques (fumiers, déchets verts agricoles, déchets domestiques, déchets agro-industriels, ...). Les procédés de compostage sont extrêmement variables, depuis des méthodes simples qui consistent en la mise en tas des matières organiques fraîches et leur retournement périodique jusqu'aux procédés technologiquement sophistiqués de type compostage robotisé en passant par le vermi-compostage où les vers de terre sont utilisés comme premiers décomposeurs de matière organique fraîche.

2- Composition du compost

Les organismes responsables du compostage ont besoin de 3 paramètres pour vivre :

- de la nourriture équilibrée composée d'un mélange de matières carbonées (brunes-dures-sèches) et de matières azotées (vertes-molles-humides)
- d'humidité qui viendra des matières azotées (humides)
- d'air qui viendra par les matières carbonées structurantes (dures)

Les résidus organiques compostables sont :

❖ des déchets azotés : des déchets végétaux, de jardinage (tailles de haies, tontes de pelouse...), des feuilles vertes, des déchets ménagers périssables (déchets des légumes et de fruits). Il est ainsi possible de diminuer de 30-40 % sa quantité d'ordures ménagères et de diminuer d'autant la taille des décharges et les volumes de déchets transportés vers les incinérateurs ;

❖ des déchets carbonés : des branches broyées, les feuilles mortes, la paille (on stockera précieusement ces matières pour toujours en avoir à sa disposition pour les mélanger avec les matières azotées) ;

❖ les coquilles d'œuf, coquilles de noix ;

❖ les litières biodégradables des animaux herbivores ;

❖ du papier en évitant ceux qui sont imprimés, le carton (il sert de refuge aux vers de terre) ;

❖ des morceaux de tissus 100% naturels (laine, coton), etc.

❖ les déchets de maison (mouchoirs en papier, essuie-tout, cendre de bois, sciures, copeaux, plantes d'intérieur non malades).

Attention : les marcs de café avec le filtre ne sont pas compostables car ceux-ci possèdent une décomposition très lente.

3- Rôle du compost

Le compost joue deux rôles majeurs :

- rôle alimentaire qui réside dans la fourniture progressive d'éléments nutritifs aux plantes cultivées renforcement de l'efficacité des engrais minéraux apportés
- rôle d'amélioration des propriétés physiques du sol (rétention en eau, structure, ..)

Il est à noter que la disponibilité de certains éléments nutritifs diminue au cours du compostage, mais cette diminution est compensée par les autres avantages offerts par le compost.

4- Description du procédé de compostage

Le compostage est une opération qui consiste à faire fermenter, dans des conditions contrôlées, des déchets organiques en présence de l'oxygène de l'air. Deux phénomènes se succèdent dans un processus de compostage :

- le premier, amenant les résidus à l'état de compost frais, est une fermentation aérobie intense : il s'agit essentiellement de la décomposition de la matière organique fraîche à haute température (50-70 °C) sous l'action de bactéries

- le deuxième, par une fermentation moins soutenue, va transformer le compost frais en un compost mûr, riche en humus. Ce phénomène de maturation, qui se passe à température plus basse (35-45 °C), conduit à la biosynthèse de composés humiques par des champignons.

4-1- Fermentation

L'évolution de la température durant le processus de fermentation s'effectue en trois phases:

➤ Phase mésophile

La température monte rapidement à 40-45°C suite à la respiration des microorganismes mésophiles aérobies. Les composés les plus fermentescibles tels les sucres et l'amidon sont d'abord consommés. Une phase préliminaire à cette première phase est parfois décrite. Au cours de cette phase on note, après une courte latence, une légère augmentation de la température. Elle résulte de l'activité respiratoire endogène de cellules vivantes présentes dans la masse à composter. Cette phase est donc très courte et ne s'observe qu'en laboratoire lorsque le mélange à composter contient une forte proportion de tissus frais.

➤ Phase thermophile

La respiration élève alors progressivement la température jusqu'à 60-70°C, conduisant au remplacement des micro-organismes mésophiles par des thermophiles et des thermo-tolérants. Par leur respiration, les micro-organismes vont épuiser l'oxygène de la masse en compostage et rendre le milieu anaérobie. Des germes anaérobies se développent alors, conduisant à un abaissement de la température car leur métabolisme est moins thermogène. Ils sont de plus responsables de la libération de composés volatils nauséabonds (méthane, ammoniac, hydrogène sulfuré...). Pour éviter cette putréfaction, il est nécessaire de restaurer les conditions aérobies du milieu (voir aération ci-dessous). Ainsi il sera possible de prolonger la

fermentation à haute température. Les pathogènes, parasites et semences de mauvaises herbes seront détruits par la température élevée, les mauvaises odeurs seront évitées, la décomposition sera plus rapide. Dès que la température n'augmente plus après aération, on peut considérer que la fermentation est terminée.

4-2- Maturation

À cette étape, la quantité de matière facilement utilisable par la microflore se raréfie et la biosynthèse de composés humiques devient prédominante. On assiste à la disparition des micro-organismes thermophiles au profit d'espèces plus communes et de nouvelles espèces mésophiles au fur et à mesure que la température décroît au cours d'une longue période de mûrissement pour se stabiliser au niveau de la température ambiante.

Il faut encore signaler que la transition entre chacune des phases citées précédemment résulte d'une évolution continue : il n'y a pas de frontière marquée entre les espèces mésophiles et thermophiles. Chaque espèce possède une gamme de températures vitales avec, au milieu, un optimum écologique.

5- Influence de l'environnement sur le compostage

La progression du matériel de départ vers le stade final, l'humus, dépend d'un grand nombre de facteurs externes comme la dimension des particules, la nature des nutriments, leur structure, le taux d'humidité, l'aération, le pH... D'autre part, en se multipliant, les micro-organismes changent constamment leur environnement et le rendent souvent impropre à leur développement.

5-1- Les conditions physiques

➤ Aération

Ce facteur est essentiel puisque le compostage est un processus aérobie. On estime que l'air devrait occuper au moins 50% du volume du tas. L'anaérobiose commence lorsque le taux d'oxygène du tas est inférieur à 10%; elle prédomine au dessous de 5% d'O₂ (air = 21% O₂). Diverses techniques permettent de rétablir l'aérobiose, elles seront décrites ci-dessous.

➤ *Humidité*

Comme pour un substrat de culture, l'aération et l'humidité du compost sont liées : un excès d'eau diminue la quantité d'air disponible dans le volume de compost. Un système d'aération plus efficace sera alors nécessaire.

La chaleur libérée par la fermentation provoque l'évaporation d'une grande quantité d'eau. On arrosera la masse en fermentation si nécessaire de manière à maintenir un taux d'humidité de 50 à 70% de la masse fraîche (c'est-à-dire l'équivalent de la capacité au champ pour un sol). D'autre part, on veillera à la protéger des pluies battantes et de l'évaporation excessive par le soleil (surtout en régions intertropicales). Une toiture sera alors la bienvenue.

➤ *Dimension des particules*

Outre son rôle sur la porosité à l'air et la rétention en eau du milieu, un des effets de la dilacération préalable (broyage) est d'augmenter la surface de contact entre les déchets et la microflore. Une réduction de la taille des particules entraîne donc un accroissement du taux de décomposition mais aussi une circulation d'air plus faible (risque d'anaérobiose).

➤ *Température*

Par leur respiration les micro-organismes dégagent une chaleur telle que les températures atteintes (80 et même plus de 90 °C dans un tas bien isolé) peuvent devenir létales pour les cellules. On veillera à ne pas dépasser une température de 70 °C.

5-2-Les conditions chimiques

➤ *pH*

Généralement, les matières à composter présentent un pH compris entre 5 et 7, c'est-à-dire dans des limites acceptables. Le pH s'abaisse pendant les premiers jours et remonte ensuite pour devenir neutre ou légèrement alcalin. Certains auteurs recommandent cependant l'adjonction d'un tampon ou d'une base faible (calcaires ou dolomie broyés, marne, craie phosphatée...), d'autres s'y refusent car cela peut provoquer un ralentissement du processus. Sans adjonction de tampon, le pH final du compost est au alentour de 8.

➤ **Forme du carbone**

Elle influence beaucoup la vitesse de décomposition du compost. Certaines des molécules, tels les glucides simples, l'amidon, les hémicelluloses, les pectines et les acides aminés, sont aisément dégradables. La cellulose, polymère plus volumineux, est plus résistante. La lignine et les autres polymères aromatiques, extrêmement solides, seront dégradés plus tardivement, plus lentement et incomplètement (conduisant à la formation d'humus).

➤ **Rapport C/N**

Un rapport trop faible (inférieur à 15) conduit à des pertes d'azote ; un C/N trop élevé ralentit la décomposition. La quantité d'azote à ajouter est difficile à estimer car il faut tenir compte du taux de fermentescibilité du carbone.

➤ **Rapport C/P**

Le phosphore est essentiel aux réactions énergétiques des micro-organismes (Adénosine Tri-Phosphate). Il entre aussi dans la composition de nombreuses autres macromolécules. Un rapport C/P de la matière à composter voisin de celui de la microflore (75 à 150) conduit à une dégradation plus rapide de la matière organique et à une plus grande production d'humus.

➤ **Autres éléments minéraux**

Les matières à composter doivent être considérées comme un milieu de culture pour microbes, où le facteur limitant ne peut être que le carbone assimilable et non un autre constituant du milieu. Ces éléments sont en général présents en quantité suffisante dans la matière organique à composter.

6- Conditions biologiques

Comme nous l'avons expliqué au début de ce chapitre, le compostage est réalisé par des micro-organismes. La vitesse et l'efficacité du compostage sont donc liées à la présence d'une population microbienne adéquate. Si la présence de ces milliards de bactéries et champignons est indispensable, leur ensemencement ('activateurs' ou 'stimulateurs' de compostage) semble peu, voire pas utile. Les spores de ces micro-organismes existent en effet en quantités suffisantes dans la nature et il est beaucoup plus important de veiller à créer un milieu (pH, humidité, aération, C/N, ...) favorable à leur développement.

L'inoculation des composts par des micro-organismes fixateurs d'azote atmosphérique, tels que Azotobacter ne semble pas non plus intéressante pour le compostage, la dépense d'énergie de ces organismes pour fixer l'azote étant trop importante. Le seul intérêt de ce type d'inoculation pourrait provenir d'une éventuelle fixation d'azote, postérieure au compostage, pendant la culture des plantes sur les composts ainsi inoculés. Des expériences devraient être menées afin de démontrer la crédibilité, d'une telle hypothèse.

7- Aptitude au compostage (CNFP)

L'aptitude au compostage est un paramètre formé d'un code de quatre lettres, majuscules ou minuscules, il représente les quatre aspects fondamentaux à réunir pour réaliser un bon compost : 'C' ou 'c' pour carbone, 'N' ou 'n' pour azote, 'F' ou 'f' pour le degré de fermentescibilité (c.-à-d. l'aptitude à fermenter du produit), et 'P' ou 'p' pour la porosité totale. Une lettre minuscule indique un apport correct pour cet aspect, une lettre majuscule indiquant des propriétés améliorantes. L'absence d'une lettre ('—') signifie un manque, à compléter par un produit ayant des propriétés améliorantes pour le même facteur. La réalisation du compost se fera donc en combinant deux sous-produits (trois à la rigueur) ayant des propriétés complémentaires de telle manière que les quatre lettres du code soient présentes dans le mélange réalisé.

➤ **'c' ou 'C'**

'c' indique un produit possédant un rapport C/N correct (15 à 30). 'C' indique un produit à forte teneur en carbone, c'est-à-dire ayant un C/N supérieur à 75. Un tel produit devra être mélangé à un produit de type 'N' ou recevra un supplément d'azote sous forme d'engrais minéral (urée par exemple).

➤ **'n' ou 'N'**

Complémentaire du facteur précédant, 'n' indique un C/N correct ; 'N' indique un C/N faible (inférieur à 10) nécessitant un mélange avec un produit de type 'C' ; un matériau à C/N élevé sera de type '—' pour ce facteur.

➤ **'f' ou 'F'**

Donne une indication sur la forme du carbone présent: 'f' représente un équilibre convenable entre les molécules à fermentation rapide (sucres) et les molécules à dégradation lente (lignines). Les molécules à dégradation rapide sont nécessaires au démarrage de la fermentation et à l'obtention d'une température élevée dans la masse de compost

('pasteurisation' du compost). Un matériau riche en ces molécules sera de type 'F', un matériau pauvre de type '—'. Les molécules à dégradation lente quant à elles serviront de base à la biosynthèse des composés humiques.

➤ **'p' ou 'P'**

La porosité à l'air du matériau est importante pour son rôle sur l'aération du compost et sur la rétention en eau (la porosité à l'eau, exprimée en pourcent de la porosité totale, est le complément à 100 de la porosité à l'air). Elle est influencée principalement par la dimension des particules. Un matériau dont la porosité à l'air est élevée ('P', matériau de structuration) permettra par exemple de réaliser des tas de composts de volume plus important sans risquer un tassement qui empêcherait la circulation de l'air. Il pourra aussi servir de matériau de base à mélanger avec des matériaux sans structure ('—': boues de stations d'épuration ou eaux de process industriel par exemple). 'p' représente un matériau présentant un bon équilibre entre la porosité à l'air et la porosité à l'eau.

Il faut remarquer que le compostage, en soi, ne nécessite pas un structurant d'origine organique. Des copeaux de caoutchouc (issus de vieux pneus) peuvent être utilisés, par exemple pour le compostage de boues de stations d'épuration.

8- Les différentes méthodes de compostage

Les méthodes décrites ci-dessous ne concernent que la phase de fermentation active. La phase de maturation quant à elle se déroule habituellement à l'air libre en tas de grande dimension.

8-1- À l'air libre

On construira cependant un auvent au dessus des composts en fermentation afin de les protéger des pluies excessives ou de la dessiccation par le vent et le soleil.

➤ ***En fosse***

La méthode de compostage en fosse est la pratique la plus anciennement employée mais conduit rapidement à des conditions anaérobies. La fosse est creusée dans un endroit abrité et bien isolé. Les déchets organiques y sont disposés en couches d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, alternant les produits riches en azote (type 'N') et ceux riche en carbone (type 'C'). Ils sont ensuite recouverts d'une épaisse couche de paille (isolation) puis

d'une couche de terre d'environ 10 cm d'épaisseur. Cette méthode est très lente et partiellement anaérobie car aucun apport ultérieur d'eau ou d'air n'est effectué. Elle est réservée à l'amateurisme et aux climats frais (meilleure isolation) ou secs (réduction des pertes en eau). Sous un climat tempéré, cette méthode provoque l'apparition de mauvaises odeurs (décomposition anaérobie).

➤ ***En tas***

C'est la méthode de compostage la plus commune. Les déchets sont rassemblés en andains de longueur indéfinie et dont la hauteur dépend à la fois de la porosité à l'air du compost (plus elle est élevée, type 'P', plus le tas peut être haut) ainsi que de la fréquence et de la méthode d'aération choisie (une fréquence élevée et/ou une aération par ventilation forcée autorisent des tas plus importants).

➤ ***En couloir***

Cette méthode est fort semblable à la précédente, mais les andains sont ici compris entre deux murets latéraux. Elle permet parfois une installation plus aisée des dispositifs d'aération mais nécessite un investissement plus important. On dispose également de moins de flexibilité pour l'organisation ou la modification du chantier de compostage.

8-2- En enceinte close ou 'digesteur'

Le principe commun des procédés de fermentation dite 'accélérée' est basé, sur le séjour plus ou moins rapide des déchets dans des dispositifs appelés digesteurs. Un digesteur est une enceinte fermée à l'intérieur de laquelle il est possible de contrôler le déroulement de la fermentation en agissant essentiellement sur l'aération. Les déchets entrent en général par une extrémité du dispositif et ressortent, en fin de fermentation, à l'autre extrémité. Le brassage et l'aération des matériaux sont le plus souvent réalisés en continu.

➤ ***Silo vertical (tour)***

De nombreux dispositifs existent, plus ou moins complexes, mais leur principe reste le même. Les déchets sont acheminés, via une bande transporteuse, au sommet de la tour de digestion. Ils descendront soit au moyen de vis sans fin ou de racleurs en suivant une succession de plateaux, soit par gravité. À chaque niveau, ou dans la masse du compost, sont installés des tuyaux d'aération permettant d'oxygéner le milieu. En fin de fermentation, le compost est récupéré à la base de la tour.

➤ *Biostabilisateur*

Le digesteur est disposé ici, non plus verticalement, mais horizontalement. Il s'agit en fait d'un cylindre rotatif d'une longueur de 25 à 35 mètres et d'un diamètre de 3 à 4 mètres. La rotation continue du cylindre, à l'intérieur duquel sont fixées des plaques défectrices hélicoïdales, permet d'assurer à la fois le brassage et l'aération du produit ainsi que sa progression vers l'extrémité du dispositif. La durée de séjour des déchets à l'intérieur du biostabilisateur est de l'ordre de 4 à 6 jours, après quoi ils sont transférés sur l'aire de maturation.

9- Mode d'aération

Comme nous l'avons déjà indiqué, l'aération du mélange en compostage est essentielle durant la phase de fermentation active. Plusieurs méthodes existent, mieux adaptées à l'une ou l'autre méthode de compostage ou à une échelle de travail plus ou moins grande.

9-1- Aération passive et méthode chinoise

Dans les systèmes traditionnels de compostage en tas, seule la porosité de celui-ci assure l'aération de la masse. On est donc limité à des tas de faibles dimensions et à des composts à porosité, très élevée (type 'P', grosses particules). Les Chinois ont amélioré ce système en installant des faisceaux de bambous lors de la constitution du tas. Ces bambous sont ensuite retirés après 1 ou 2 jours, laissant libres des orifices plongeant jusqu'au milieu du tas et par lesquels l'aération peut se faire plus activement.

9-2- Brassage des matériaux

L'oxygénation la plus efficace d'une masse en fermentation chaude est obtenue par son retournement. Le brassage complet permet également d'assurer une fermentation plus homogène de toute la masse, chaque particule évoluant suffisamment de temps au centre du compost, où la température est la plus élevée. Entre les retournements, la partie extérieure du tas évolue en aérobiose par aération passive (voir paragraphe précédent) pendant que le taux d'oxygène au centre du tas diminue rapidement. La fréquence et la qualité des retournements sont donc les paramètres fondamentaux de cette technique.

Selon la dimension du chantier de compostage, le brassage se fera à la fourche (main d'œuvre manuelle), au moyen d'un engin de travaux publics (pelle chargeuse sur pneus), ou au moyen de machines spécialisées.

9-3- Aération active par soufflerie

Contrairement aux techniques précédentes, l'apport d'oxygène pendant la fermentation est ici continu. Les andains à aérer recouvrent un réseau de tuyauteries perforées sur toute leur longueur et reliées à un suppresseur. La puissance du suppresseur est fonction du volume et du tassement de la masse à aérer.

9-4- Aération active par aspiration (méthode Beltsville)

L'apport d'air frais est réalisé ici par aspiration au travers des andains suivant un schéma identique à celui de la méthode précédente (si ce n'est que le suppresseur est remplacé par un aspirateur). Le dispositif par aspiration est à préférer à celui par soufflerie car l'air aspiré a moins tendance à emprunter des chemins préférentiels, ce qui serait préjudiciable à l'efficacité de l'aération. On prévoira cependant un filtre, qui peut être simplement un tas de compost mature, à la sortie de l'aspirateur afin d'éliminer les odeurs. La ventilation peut être combinée, si on le désire, avec le brassage des matériaux décrit plus haut.

10- Usage du compost

Le compost peut être utilisé comme engrais sur prairie ou avant labour. Son usage améliore la structure des sols (apport de matière organique), ainsi que la biodisponibilité en éléments nutritifs (azote). Il augmente également la biodiversité de la pédofaune.

Au jardin, il sert à fertiliser les plates-bandes, les arbres fruitiers et le potager. Il peut également être utilisé comme terreau pour les plantes en pot.