

# Les microalgues

## Table des matières

Introduction :.....	2
Les différents fonds marins.....	3
Le plateau continental.....	3
La plaine abyssale .....	3
La fosse marine .....	4
Les microalgues.....	4
Qu'est-ce qu'une microalgue ? .....	5
Quelle est la différence entre les microalgues et le phytoplancton ? .....	6
L'anatomie des microalgues .....	7
- Les chloroplastes (Chloroplasts) .....	9
La photosynthèse.....	13
Qu'est-ce que la photosynthèse ? .....	13
La photosynthèse à la loupe .....	13
La phase photochimique.....	13
La phase sombre – le cycle de Calvin.....	16
.....	17
La symbiose des microalgues.....	18
L'utilité des microalgues dans notre société et leurs différents rôles.....	20
Le phytoplancton, poumon de la planète terre.....	20
La spiruline, une « microalgue » très nutritive et peu chère.....	22
Des photo bioréacteurs pour dépolluer l'air .....	23
Le projet de construction de photo bioréacteurs au LEM .....	25
Conclusion.....	26

## Introduction :

Cette année, j'ai décidé d'écrire mon travail personnel sur les microalgues. C'est un milieu très méconnu et beaucoup de personnes n'en savent pas beaucoup. J'ai envie d'en savoir plus sur les microalgues et je me suis posé différentes questions comme :

**A quoi ressemble l'écosystème marin ?**

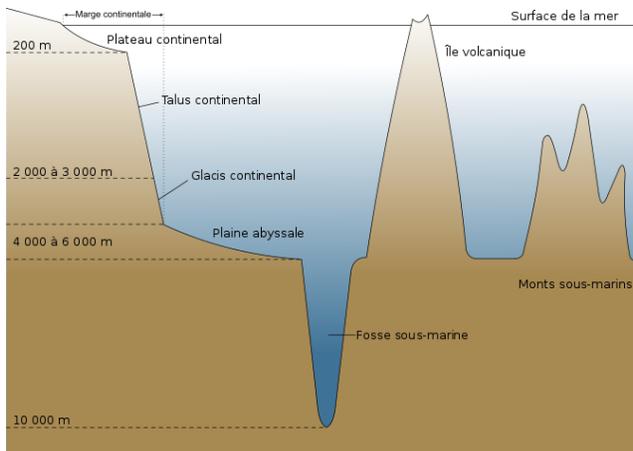
**Quelles sont les différences majeures du métabolisme et de la physiologie entre les espèces de microalgues vivant dans la mer et celles qui vivent à basse profondeur, dans l'eau douce ?**

**Quel rôle les microalgues jouent-elles dans notre vie et notre écosystème et pourquoi sont-elles importantes ?**

## Les différents fonds marins

Pour ce travail personnel, j'ai subdivisé les fonds marins en trois catégories :

- Le plateau continental, se situant entre 0-200 mètres de profondeur
- La plaine abyssale, se situant entre 4000-6000 mètres de profondeur
- La fosse sous-marine, se situant au fond des fosses marines pouvant être jusqu'à 10 000 mètres de profondeur



### Le plateau continental

Le plateau continental est le fond marin le moins profond (entre 0-200 mètres). Le plateau continental est la continuation sous-marine des continents. Elle peut aller de quelques mètres de la côte à des kilomètres : son amplitude est variable. La zone submergée possède donc les mêmes propriétés que le continent.

### La plaine abyssale

La plaine abyssale est une zone aplanie se situant entre 2500-6000 mètres de profondeur constituant 33% de l'océan Atlantique et 75% de l'océan Pacifique. La plaine abyssale est recouverte de sédiments provenant de l'érosion des continents et de sédiments naturels en provenance de squelettes de plancton et de débris provenant de la surface.

Il y fait très froid, (0 degrés, atteint parfois des températures négatives) et il y règne une énorme pression, allant à environ de 200 jusqu'à 600 bars. Malgré ces conditions extrêmes, c'est dans la plaine abyssale qu'a commencé la vie et les scientifiques estiment que le nombre d'espèces à découvrir dans les plaines abyssales est entre 38-76 millions (Source : <https://fr.wikipedia.org>). C'est donc le plus grand réservoir de vie sur terre.

Cependant, il faut savoir que les algues sont plus rares à partir de 100 mètres de profondeur car il n'y a que peu de lumière. Or, la plupart des microalgues ont besoin de lumière pour effectuer la photosynthèse, qui leur permet de se développer.

### La fosse marine

La fosse sous-marine ou fosse océanique est une zone de dépression sous-marine. Les fosses sous-marines mesurent souvent des milliers de kilomètres de long et entre 6000 et 11 034 mètres (fosse des Mariannes, fosse sous-marine la plus profonde et point le plus profond jamais mesuré sur terre se trouvant dans la partie nord-est de l'océan Pacifique) de profondeur. La pression y est d'environ 600 à plus de 1000 bars, soit plus de 1000 fois la pression atmosphérique sur terre.

Cependant, aucune algue n'y vit car il n'y a pas de lumière à cette profondeur, et les algues ne peuvent donc pas réaliser la photosynthèse.

### Les microalgues

Les microalgues sont des organismes passionnants : elles sont à l'origine de la vie sur terre. A elles seules, les microalgues absorbent 30 à 40 %\* du dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère, qu'elles utilisent pour effectuer la photosynthèse. En plus de cela, elles constituent la base de la chaîne alimentaire et servent donc au développement des autres animaux et organismes sous-marins. Récemment, des chercheurs ont déjà réussi à créer une alternative au plastique biodégradable à base d'algues et du biocarburant à base d'algues.

\*Source : [Des microalgues pour sauver la planète - Le Point](#)



*Voici une bouteille à base d'agar agar (un composant gélifiant provenant d'une algue) et d'eau, développée par un étudiant islandais, Ari Jónsson*

Bref, les microalgues méritent d'être davantage étudiées, car elles sont essentielles à la vie des humains et des animaux. De plus en plus de chercheurs commencent à s'intéresser aux microalgues pour leurs bienfaits.

### Qu'est-ce qu'une microalgue ?

Une microalgue est une algue microscopique unicellulaire mesurant entre quelques micromètres et quelques centaines de micromètres, donc une plante ou une bactérie (cyanobactéries) marine pouvant effectuer la photosynthèse grâce à la chlorophylle A ou B qui est le pigment qui les rend vertes ou de caroténoïdes, qui rendent les algues brunes ou jaune. Elles utilisent donc la lumière et l'eau pour pousser et se développer, pour ensuite rejeter de l'oxygène dans l'atmosphère. Les algues sont des organismes eucaryotes (à l'exception des cyanobactéries) et possèdent donc un noyau. Il a été estimé qu'il existe 200 000 à 800 000 espèces de microalgues.



*Plusieurs espèces de microalgues d'eau douce (Source : [wikipedia.org](http://wikipedia.org))*

### Quelle est la différence entre les microalgues et le phytoplancton ?

Le phytoplancton fait référence à un groupe de planctons photosynthétiques. La plupart d'entre eux sont des microalgues. Cependant, le terme microalgue est souvent considéré comme un synonyme de phytoplancton, même s'il existe une légère nuance.

### Le milieu de vie des microalgues

Les microalgues (le phytoplancton) vivent là où les conditions nécessaires pour effectuer la photosynthèse sont réunies :

- La lumière : Comme cité dans la définition de la fosse marine, les microalgues ont besoin de lumière pour effectuer la photosynthèse. C'est pourquoi elles vivent souvent à la surface de l'eau, dans la couche appelée couche euphotique, là où la lumière est présente. Dans la haute mer, cette couche peut atteindre 200 mètres, mais les microalgues sont le plus souvent dans des baies, des estuaires, des marais salants...
- Les minéraux : Les minéraux sont également essentiels au développement des microalgues. Les nutriments à la surface viennent des fleuves qui se jettent dans la mer. Pour que les nutriments restent à la surface de l'eau, là où les conditions idéales au développement des microalgues sont réunies, ils doivent être poussés par les courants et le vent afin d'éviter de couler jusqu'au fond et de s'ajouter aux sédiments.
- Le CO<sub>2</sub> : Le gaz carbonique est dissous partout dans l'eau. Il sert à effectuer l'échange de gaz nécessaire à la photosynthèse.

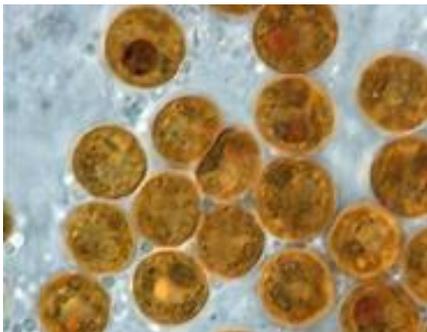
Note : la population d'algues et microalgues est 10 fois plus élevée dans les lacs, étangs, marais etc.... car les microalgues préfèrent les eaux calmes et riches en sels nutritifs.

### La profondeur en fonction des pigments :

Les algues vertes possèdent la chlorophylle A et B, qui leur permettent d'absorber la lumière bleue et rouge. Elles ne persistent que jusqu'à la profondeur qu'atteint la lumière rouge, c'est à dire 5 mètres.

Les algues rouges possèdent la chlorophylle A et D, qui leur permettent de subsister jusqu'à cent mètres de profondeur en raison de la pénétration importante des longueurs d'onde bleues.

Les algues brunes contiennent de la chlorophylle A et C. Elle a un large spectre d'absorption de lumière, allant du rouge au bleu. C'est la plus « jeune » algue (1,1 milliards d'années), ce qui peut laisser supposer une évolution sélective. Le brun est la couleur la plus adaptée à l'absorption de la couleur bleue.

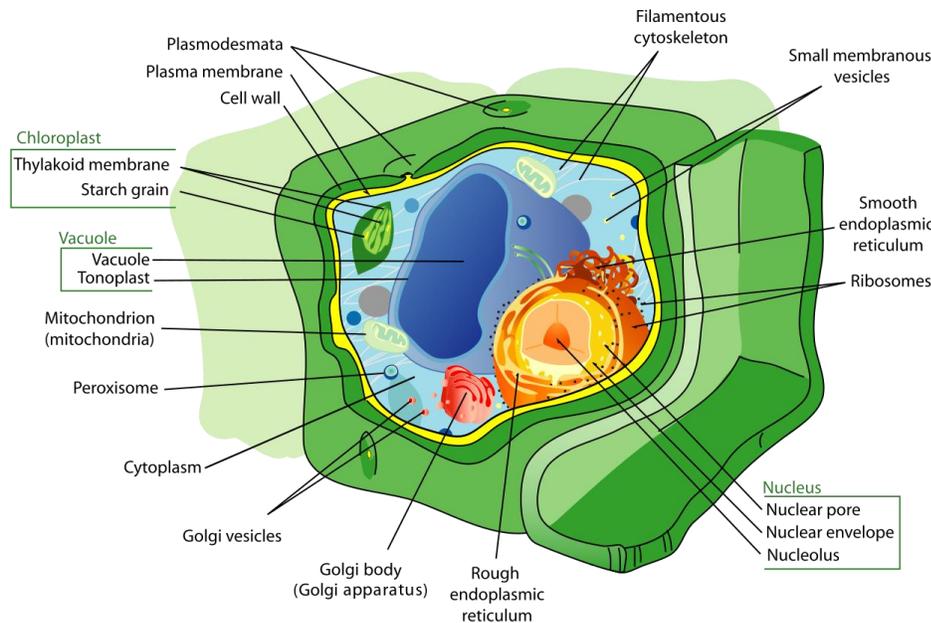


*Zooxanthelles* (espèce d'algues brunes) vue au microscope. Sa couleur lui permet de vivre en symbiose avec des polypes à quelques centaines de mètres de profondeur

### L'anatomie des microalgues

Les microalgues sont des cellules eucaryotes.

#### **Anatomie d'une cellule eucaryote (microalgue) :**



#### **Les différents tissus et organites :**

##### - **Le noyau (Nucleus)**

Présent dans toutes les cellules eucaryotes, le noyau est « le centre de contrôle » de la cellule. Il contient et stocke toutes les informations génétiques (ADN) et contrôle l'expression des gènes.

##### - **Le réticulum endoplasmique rugueux (Rough endoplasmic reticulum) et les ribosomes (Ribosomes)**

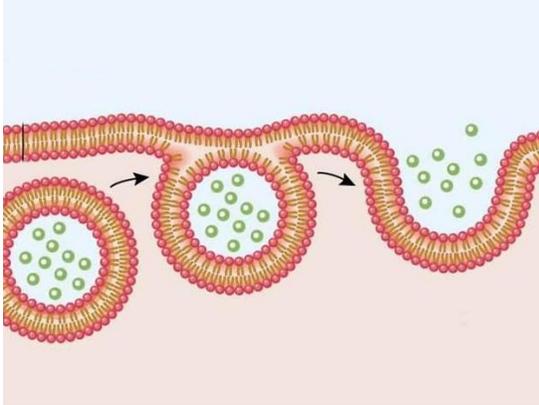
Le réticulum endoplasmique rugueux est un organe de la cellule dont la surface comporte des ribosomes (d'où l'aspect rugueux), qui sert principalement à biosynthétiser des protéines grâce aux ribosomes qui « lisent » l'ARN messager ainsi qu'à produire de la membrane. Le réticulum endoplasmique rugueux transporte, via des vésicules, les protéines assemblées qui sont destinées aux membranes et à la sécrétion. La plupart de ces protéines gagnent l'appareil de golgi par des vésicules transitoires (voir l'explication de l'appareil de golgi et des vésicules golgiennes).

##### - **Le réticulum endoplasmique lisse (Smooth endoplasmic reticulum)**

Le réticulum endoplasmique lisse qui, contrairement au réticulum endoplasmique rugueux, est dépourvu de ribosomes, sert de lieu de synthèse des lipides (graisses) et du métabolisme des sucres (réactions chimiques qui se passent dans la cellule et qui concernent les glucides) créés à l'aide de la photosynthèse.

- **Les vésicules membraneuses (Small membranous vesicles)**

Les vésicules membraneuses sont des organites très petits délimités par une membrane qui se trouve autour. Elles servent à transporter, stocker ou digérer des produits et des déchets cellulaires.



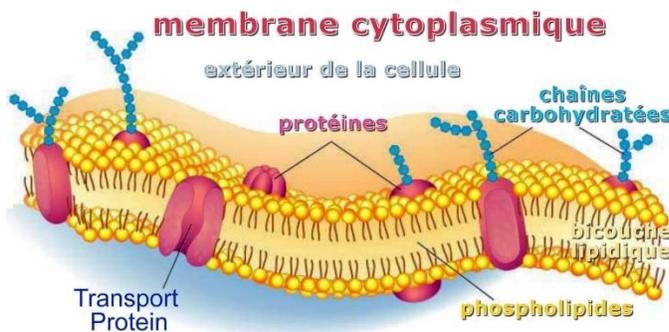
*Schéma simplifié de vésicule sécrétant des produits ou déchets cellulaires (Source : [Les vésicules – La cellule animale et végétale \(wordpress.com\)](https://www.wordpress.com))*

- **Le cytosquelette filamenteux (Filamentous cytoskeleton)**

Le cytosquelette est un assemblage de multiples protéines qui forment « l'ossature » de la cellule sous forme de filaments plus ou moins gros. Il a plusieurs fonctions : il donne la forme à la cellule, il assure des fonctions de transport un peu à la manière de rails sur lesquels des différents éléments intracellulaires vont pouvoir se déplacer et il permet à la cellule de bouger grâce à des contractions du cytosquelette.

- **La membrane plasmique (Plasma membrane)**

La membrane plasmique, composée de lipides et de protéines, est la paroi qui délimite la cellule. Elle a pour rôle de séparer le contenu cellulaire de l'extérieur et d'effectuer des échanges et des communications avec l'extérieur, comme faire passer certaines substances à l'intérieur de la cellule (cytoplasme).



*Schéma simplifié de la membrane plasmique*

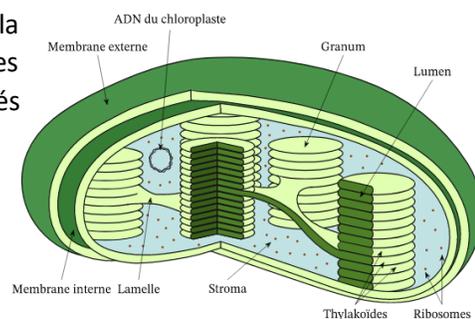
- **La paroi cellulaire (Cell wall)**

La paroi cellulaire est une paroi assez rigide se trouvant en dehors de la membrane plasmique. Elle a pour but de donner cette structure à la cellule, mais sert aussi de filtre lors de l'absorption de substances et de protection contre les pathogènes. Chez la majorité des plantes terrestres, la paroi cellulaire est principalement composée de cellulose, un complexe de glucose épais. Cependant, la majorité des algues marines possèdent une paroi cellulaire majoritairement composée de polysaccharides sulfatés (type de glucide), qui jouent un rôle dans l'adaptation des plantes au milieu marin.

- **Les chloroplastes (Chloroplasts)**

Les chloroplastes sont les organites permettant d'effectuer la photosynthèse présente dans tous les organismes capables d'effectuer la photosynthèse. Les chloroplastes sont composés d'une membrane externe et interne contenant l'ADN du chloroplaste, des thylakoïdes entourés de stroma (un liquide présent dans les chloroplastes), des ribosomes ainsi que des grains d'amidon.

*A droite, un schéma simplifié de la structure du chloroplaste ainsi que les parties importantes présentes à l'intérieur des membranes.*



**Figure 3:** Schéma montrant la structure du chloroplaste, avec les structures essentielles indiquées.

### **Les membranes d'un chloroplaste**

Comme pour la paroi cellulaire de la cellule, la paroi extérieure d'un chloroplaste sépare l'intérieur d'un chloroplaste du cytoplasme de la cellule et assure, avec la membrane intérieure, l'absorption de substances essentielles à la photosynthèse, comme l'eau par exemple.

L'espace entre les deux membranes contient des enzymes capables de traiter et de transformer l'ATP (adénosine triphosphate). L'ATP est une molécule transporteuse et donneuse d'énergie présente dans tous les organismes vivants qui capture l'énergie chimique obtenue à partir de la dégradation des molécules alimentaires. Elle est composée d'une base azotée (adénine), d'un sucre ribose et de trois groupes phosphate liés en série. On l'appelle aussi la monnaie d'énergie, car c'est une source d'énergie facilement libérable.

### **Les thylakoïdes**

Les thylakoïdes sont un ensemble de membrane présents dans un chloroplaste contenant de la chlorophylle. Une partie de la photosynthèse se déroule sur la membrane des thylakoïdes, qui servent principalement à absorber et à tirer de l'énergie des rayons lumineux. Un chloroplaste contient une structure de plusieurs thylakoïdes, appelées granum.

A l'intérieur de la membrane des thylakoïdes se trouve une substance aqueuse dans laquelle se trouvent des enzymes et des protéines qui sont responsables de l'oxydation de l'eau, une étape essentielle à la principale source d'énergie de la plante. L'oxydation de l'eau consiste à « arracher » des électrons à des molécules d'eau pour les transformer en énergie chimique, l'adénosine triphosphate (ATP). L'équation de l'oxydation se note  $2\text{H}_2\text{O} (\text{eau}) = 2\text{O}_2 (\text{dioxygène}) + 4\text{H}^+ (\text{hydrons, ions positif}) + 4\text{e}^- (\text{électrons})$

### **Les grains d'amidon**

L'amidon est un glucide. Les grains d'amidon sont les réserves d'amidon en cas de surproduction de glucose.

### **L'ADN des chloroplastes**

L'ADN des chloroplastes permettent à ces derniers de se multiplier indépendamment de la cellule végétale.

### **Les ribosomes**

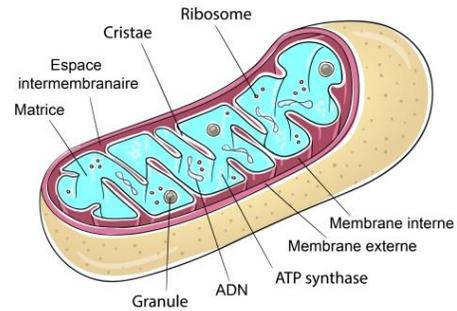
La fonction des ribosomes dans les chloroplastes est de traduire les ARN messenger provenant de l'ADN du chloroplaste afin de synthétiser une protéine précise.

#### **- La vacuole (Vacuole)**

La vacuole est un organite composé de membranes contenant de l'eau, des enzymes, des glucoses et autres composés organiques ou inorganiques. Sa taille peut varier en fonction des besoins d'une cellule (la vacuole occupe parfois la moitié de la place dans la cellule). Chez les végétaux, la vacuole a une fonction similaire aux vésicules : elle se débarrasse des déchets et des substances nocives (notamment dans l'eau) mais joue également un rôle important dans l'hydratation et l'équilibre de l'eau dans la cellule.

- **La mitochondrie (Mitochondria)**

La mitochondrie, aussi appelée « the powerhouse » en anglais, est un organite essentiel à la production d'adénosine triphosphate. Son rôle principal est d'utiliser les glucides synthétisés grâce à la photosynthèse pour produire de l'énergie qui sera stockée dans l'ATP. Elle a également pour rôle la synthèse de nucléotides (composants de base de l'ADN et de l'ARN), d'acides aminés (principales molécules servant à la synthèse de protéines), de lipides (servant au stockage d'énergie) et de vitamines ainsi que de réguler l'apoptose (mort programmée) des cellules en synthétisant un ion spécifique,  $Ca^{2+}$ . Il a été prouvé qu'une forte concentration de  $Ca^{2+}$  dans la mitochondrie cause l'apoptose de la cellule.



- **Le peroxysome (Peroxisome)**

Le peroxysome est un organite présent dans la cellule végétale composé de membranes. Dans le peroxysome, il y a environ 50 enzymes différentes servant à détoxifier la cellule. La catalase, une enzyme présente dans le peroxysome, utilise le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ), une substance hautement toxique pour la cellule produite par d'autres enzymes lors de la respiration cellulaire pour le transformer en eau ou pour oxyder d'autres molécules. L'oxydation d'acides gras p.ex. fournit de l'énergie.

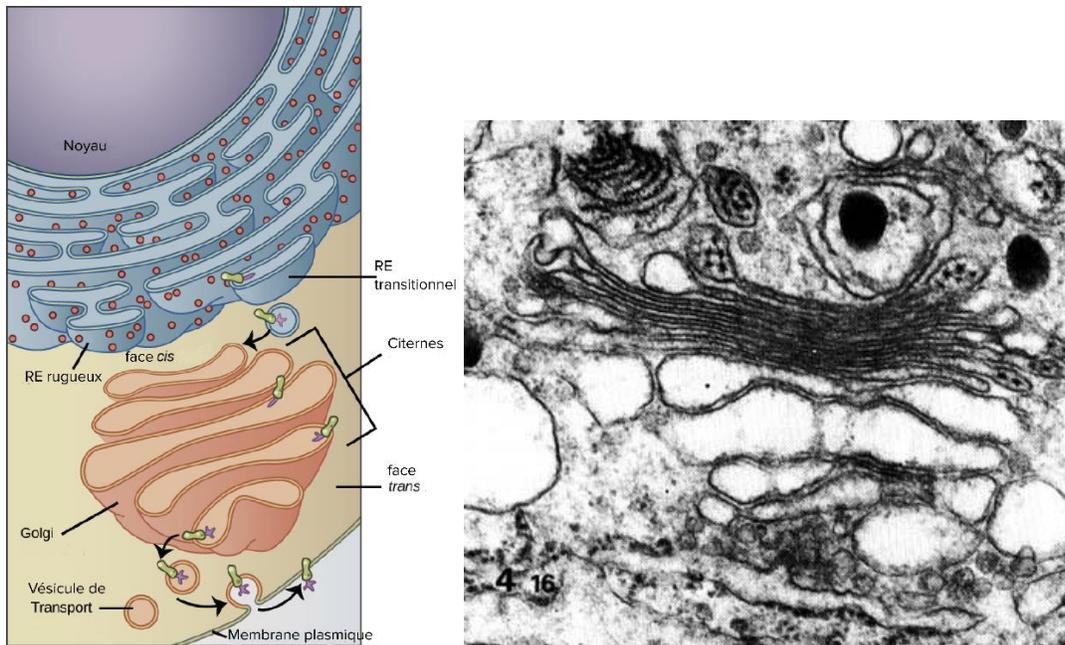
- **Le cytosol (Cytosol)**

Le cytosol est une substance gélatineuse composée de 80% d'eau, de sels et de minéraux ainsi que d'autres composés organiques dans laquelle baignent tous les organites. Il permet de garder la structure de la cellule et sert de milieu de suspension pour les organites. Il est important de souligner que le noyau ne contient pas de cytosol.

- **L'appareil de golgi (Golgi apparatus)**

L'appareil de golgi est un organite se trouvant à proximité du réticulum endoplasmique constitué de plusieurs poches pliées sur elles-mêmes appelées citernes. Les cellules végétales peuvent contenir jusqu'à des centaines d'appareils. Ses fonctions principales sont de servir de lieu de passage dans lequel les lipides et les protéines traduites par l'ARN messager dans le réticulum endoplasmique sont transformées et subissent des modifications dans les citernes en fonction de leur rôle au sein de la cellule. Ce processus se nomme le processus de maturation. Ce processus sert à ce que les protéines ou les lipides soient digérées correctement (lysosomes, membrane plasmique ou sécrétion) en effectuant une modification (par ajout de groupe phosphate, d'acide aminé, d'un glucide, etc..) sur une protéine. La plupart des protéines et lipides produits dans la cellule passent par ce stade, et donc par l'appareil de Golgi.

En plus de cela, l'appareil de golgi est également un lieu de passage régulant le trafic de vésicules se rendant à la membrane cellulaire et participe ainsi au renouvellement de la membrane.



*Schéma de l'intérieur d'une cellule. Appareil de golgi vu au microscope*  
*Les vésicules transitoires provenant du réticulum endoplasmique rugueux (bleu) traversent l'appareil de Golgi (orange).*

- **Les vésicules golgiennes (Golgi vesicles)**

Comme cité auparavant, les vésicules de golgi sont des vésicules se détachant des citernes de des citernes de l'appareil de golgi servant à transporter les molécules ayant passé le stade de maturation dans l'appareil de golgi à des endroits précis (dans la cellule ou vers la membrane, soit pour renouveler la membrane ou pour sécréter des protéines).

**En résumé :**

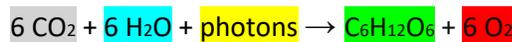
Les protéines ou les lipides synthétisés dans le réticulum endoplasmique rugueux par la traduction de l'ARNm sont transférés dans les citernes de l'appareil de Golgi grâce à des vésicules transitoires, où se déroule la maturation des protéines ou des lipides. Ils subissent des modifications servant à les employer au bon endroit. Une fois le processus de maturation terminé, les protéines et les lipides sont transportés au bon endroit par les vésicules golgiennes.

## La photosynthèse

### Qu'est-ce que la photosynthèse ?

Photosynthèse signifie « synthèse réalisée à l'aide de l'énergie lumineuse ». Tous les végétaux chlorophylliens ainsi que certaines bactéries, comme les cyanobactéries sont capables de réaliser la photosynthèse. Cela consiste à absorber l'énergie lumineuse (photons) et de la transformer en énergie chimique afin de l'utiliser pour la réduction du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) par l'eau (H<sub>2</sub>O), qui va servir de donneur d'hydrogène, pour synthétiser du glucose et de l'oxygène (O<sub>2</sub>). Au moins 8 photons sont nécessaires pour la réduction d'un atome de dioxyde de carbone par l'eau.

L'équation de la photosynthèse se note :



(6 molécules de dioxyde de carbone + 6 molécules d'eau + énergie lumineuse → Une molécule de Glucose + 6 molécules de dioxygène)

La photosynthèse est réalisée dans les chloroplastes, un organite présent dans le cytoplasme des cellules végétales, qui contient les chlorophylles ou/et les caroténoïdes qui sont des pigments photorécepteurs.

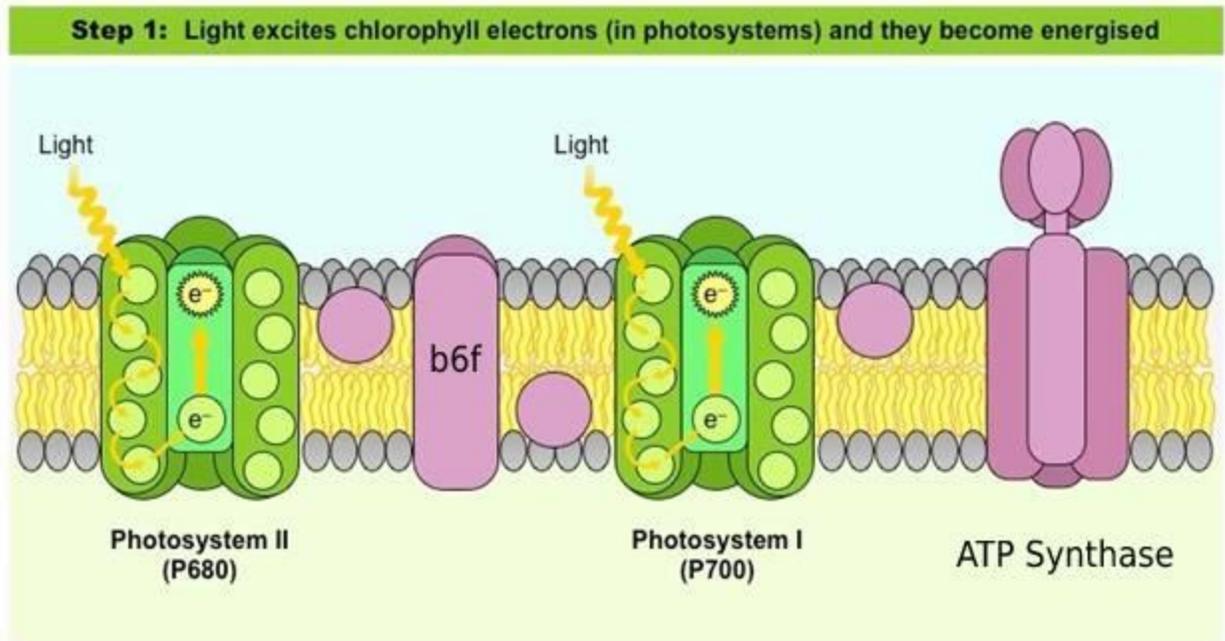
### La photosynthèse à la loupe

On sait que la photosynthèse est la réaction qui permet à la microalgue de produire l'énergie nécessaire à son développement et à son alimentation. Mais que ce passe-t-il exactement dans les chloroplastes, l'organe propice à la photosynthèse et comment cela fonctionne-t-il ?

La photosynthèse tourne autour de deux phases principales : la phase photochimique et la phase chimique. Tout cela se déroule dans les chloroplastes. Dans la phase photochimique, la cellule utilise l'énergie lumineuse (photons) et l'eau pour produire de l'énergie chimique. Cette énergie chimique sera requise pour la phase chimique dans laquelle le glucose sera synthétisé à l'aide du CO<sub>2</sub> absorbé.

### La phase photochimique

La phase photochimique, aussi appelée phase claire dû au fait que l'énergie lumineuse est utilisée dans cette phase, se déroule essentiellement dans la membrane des thylakoïdes et est constituée de plusieurs complexes protéiques, dont les plus importants sont les photosystèmes 2 et 1 ainsi que l'ATP synthase. Dans la phase photochimique vont avoir lieu 3 réactions chimiques majeures : la photolyse de l'eau, la synthèse d'ATP à partir d'ADP et la réduction de NADP<sup>+</sup> en NADPH.

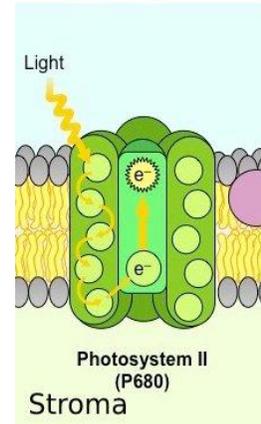


*Schéma fort simplifié de la phase photochimique de la photosynthèse*

## Photosystème II

Le photosystème II (nommé ainsi car il a été découvert après le photosystème I) est le premier complexe protéique qui entre en jeu lors de la photosynthèse. Ce photosystème possède une « antenne » composée de plusieurs types de chlorophylle (a et b) ainsi qu'un centre de réaction dans lequel une paire de chlorophylle a (P680 = absorbe la lumière à une longueur d'onde de 680 nm) va être responsable de la première partie majeure de la photosynthèse.

Tout d'abord, l'antenne constituée de chlorophylle va absorber un photon et le transmettre à la chlorophylle P680. Lorsque P680 reçoit un photon, cela va exciter un électron. L'électron va alors être donné vers le photosystème I. Laissons l'électron de côté un instant. La chlorophylle, devenue chlorophylle<sup>+</sup>, est désormais un oxydant très puissant et va avoir une très haute attraction pour les électrons. Cela va permettre la dissociation de molécules d'eau (H<sub>2</sub>O) présentes dans le stroma du thylakoïde en arrachant un électron, qui devient donc  $1 \text{ O} + 2 \text{ e}^- + 2 \text{ H}^+$ . Ceci est la photolyse de l'eau (réduction d'une molécule par la lumière). En oxydant 2 molécules d'eau, cela va donc donner  $1 \text{ O}_2 + 4 \text{ H}^+ + 4 \text{ e}^-$ , d'où le rejet d'O<sub>2</sub> dans l'atmosphère à la suite de la photosynthèse des algues.



Les électrons envoyés par la paire de chlorophylle a du photosystème II vont, à travers une chaîne de complexes protéiques, se rendre dans le photosystème I. En passant par la chaîne les menant vers le photosystème I, les électrons vont perdre de l'énergie, qui va être utilisée pour faire entrer des protons H<sup>+</sup> venant de l'extérieur de la membrane thylakoïdienne vers l'espace intra-thylakoïdien via le complexe protéique cytochrome b6f. L'augmentation de la concentration d'ions H<sup>+</sup> par l'oxydation des molécules d'eau ainsi que du passage d'ions H<sup>+</sup> dans l'espace intra-thylakoïdien va faire augmenter ce que l'on appelle le gradient de concentration. Cela est une information importante à retenir pour comprendre la suite de la photosynthèse.

*En gris, l'extrémité de la membrane du thylakoïde. L'antenne est constituée de chlorophylle a et b se trouvant tout autour du centre de réaction.*

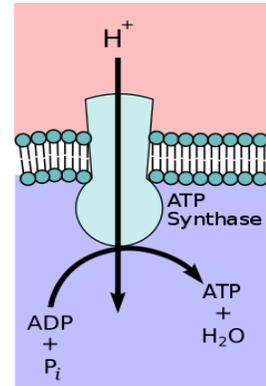
## Photosystème I

Le photosystème I est également constitué d'une antenne et d'un centre de réaction, dans lequel il n'y a pas une paire de chlorophylle P680 mais P700. L'électron envoyé par P680 à partir du photosystème II arrive, en ayant perdu beaucoup d'énergie, dans le photosystème I. L'électron atterrit sur la paire de chlorophylle<sup>+</sup>, chargée positivement. L'antenne va alors (comme dans la première étape de la photosynthèse) capter des photons, qui vont exciter l'électron et « l'expulser » de la chlorophylle P700. L'électron continue son chemin sur la chaîne de transport de l'électron.

## Production d'ATP et réduction de NADPH

L'électron termine sa course dans l'accepteur final d'électrons, le NADP<sup>+</sup>. En recevant un électron ainsi qu'un ion H<sup>+</sup>, celui-ci est réduit en NADPH, un cofacteur (molécule « aidant » dans des réactions réalisées par des enzymes) très stable qui peut donner son atome d'hydrogène et des électrons à d'autres molécules.

Enfin, c'est maintenant qu'entrent en jeu les ions  $H^+$  se trouvant en plus grande concentration à l'intérieur de la membrane du thylakoïde. Comme cité auparavant, il y a un gradient de concentration important. Celui-ci va faire en sorte que les ions  $H^+$  auront tendance à aller en direction de l'extérieur de la membrane. Or, la membrane thylakoïdienne est imperméable aux ions  $H^+$ . Leur seul moyen de sortir de la membrane est l'ATP synthase, une protéine qui va servir à attacher un groupe phosphate à l'ADP (adénosine diphosphate) pour créer de l'ATP (adénosine triphosphate), qui est une importante source d'énergie dans le monde du vivant. Le groupe phosphate peut être fixé grâce au flux d'ions  $H^+$  qui traverse l'ATP synthase.



Maintenant que l'algue a synthétisé de l'ATP ainsi que de l' $NADPH$ , elle peut passer à la phase sombre qui ne nécessite pas de lumière, aussi appelée le cycle de Calvin.

Schéma d'ions  $H^+$  traversant l'ATP synthase

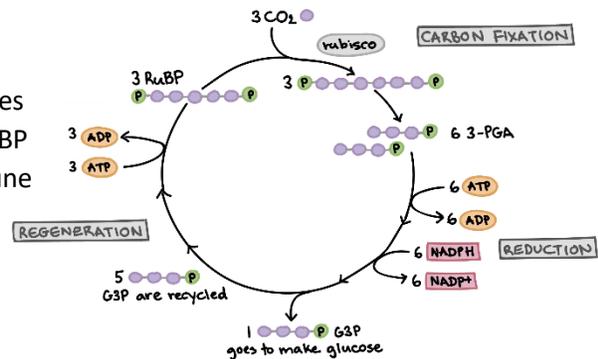
### La phase sombre – le cycle de Calvin

Le but principal du cycle de Calvin est de convertir le  $CO_2$  absorbé dans l'atmosphère en glucoses, qui seront le produit final des deux photosystèmes. Pour cela, de l' $NADPH$  ainsi que de l'ATP, tous deux produits dans la phase photochimique de la photosynthèse, va être utilisé au cours du cycle.

Le cycle de Calvin est constitué de 3 phases : la fixation du carbone, la réduction du carbone et la régénération du RuBP.

#### La fixation du carbone

D'abord, une enzyme nommée Rubisco va fixer des molécules de carbone sur des molécules de RuBP (molécule possédant 5 carbones) pour former une molécule à six carbones instables qui va se diviser en 2 molécules à 3 carbones, le 3-phosphoglycérate, ou 3PG



#### La réduction du carbone

Ensuite, grâce à l'énergie et aux électrons que fournissent l'ATP et le  $NADPH$ , les molécules 3PG sont réduites en G3P. Une parmi les molécules de G3P s'échappe du cycle. C'est le produit du cycle.

Note : les molécules de ATP et  $NADPH$  vont devenir respectivement de l'ADP et du  $NADP^+$ . Ceux-ci vont être utilisés pour fabriquer de l'ATP et de l' $NADPH$  grâce à la photosynthèse.

#### La régénération de RuBP

Pour finir, le restant des molécules G3P vont, à l'aide d'énergie fournie par l'ATP, être réassemblées en RuBP, qui vont servir pour fixer le carbone et ainsi continuer le cycle.

Résumé des réactions

Fixation et réduction du carbone :  $3\text{RuBP} + 3\text{CO}_2 = 6\text{G3P}$  (ATP et NADP sont utilisés)

Régénération de RuBP :  $5\text{G3P} (+ \text{ATP}) = 3\text{RuBP}$



**Une molécule G3P a quitté le cycle, donc il en reste 5**

## La symbiose des microalgues

Comme déjà cité au paravent, certaines microalgues sont en symbiose avec d'autres organismes, comme des cnidaires (coraux) ou des champignons (lichen).

### Qu'est-ce que la symbiose ?

En biologie, la symbiose est la cohabitation d'un ou plusieurs individus qui ne sont pas de la même espèce ou qui n'ont pas de lien de parenté au sein de la même espèce apportant dans la plupart des cas un bénéfice, souvent vital, aux deux espèces ou individus.

### Les coraux :

Malgré le fait que les microalgues sont des êtres unicellulaires, dans certains cas, elles peuvent se regrouper et former un amas visible à l'œil nu, comme certains coraux, formés par la symbiose entre un polype et des zooxanthelles, qui sont des algues unicellulaires.

Grâce à leur relation symbiotique avec les algues, les coraux peuvent vivre dans des milieux pauvres en nutriments : les algues procurent de l'oxygène ainsi que des nutriments comme le glucose, le glycérol, des acides aminés, des peptides, etc... obtenus grâce à la photosynthèse. Grâce à des enzymes digestives des polypes qui rendent la paroi cellulaire des algues perméables, les nutriments obtenus peuvent circuler dans les cellules des polypes afin de les utiliser.

Pour également profiter de la symbiose, les microalgues utilisent les déchets cataboliques azotés des coraux (azote, dioxyde d'azote, nitrate, etc...) pour les transformer en sucres qui vont également pouvoir être utilisés par les polypes.



*Les zooxanthelles sont des microalgues brunes-jaunes (visibles dans ce corail, sur la photo ci-dessus). Lorsque la température de l'eau devient trop élevée, les coraux « expulsent » leur organisme symbiotique, ce qui cause le blanchissement de certains coraux. Beaucoup de coraux ont blanchi et sont en mauvaise condition à cause du réchauffement climatique notamment.*

### Le lichen :

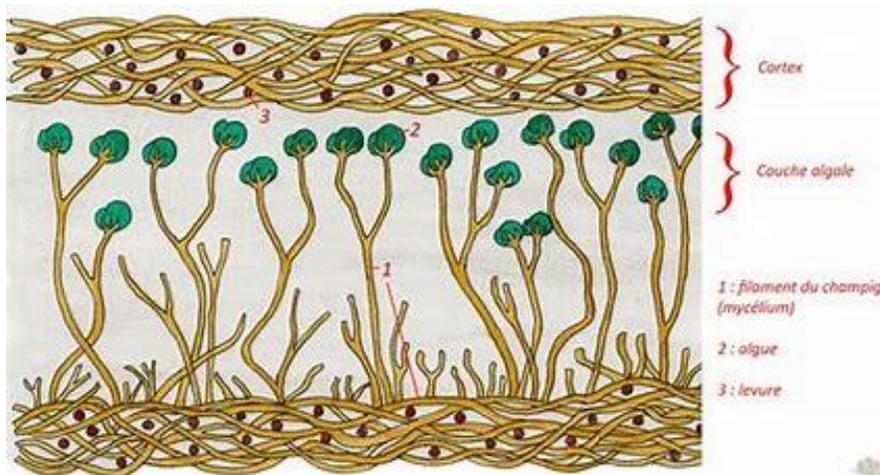
Les lichens sont formés à la suite de la symbiose d'une ou plusieurs microalgues unicellulaire(s) ou cyanobactéries autotrophes(s) (qui produisent leur propre nourriture) et d'un ou plusieurs champignon(s) hétérotrophe(s), c'est-à-dire se nourrissant de matière organique préexistante.



*Lichen colonisant une écorce d'arbre*

La plupart du temps, environ 90 % du lichen sont composés de champignon(s). Dans 85 % des cas, la symbiose est formée par des microalgues et des champignons, mais dans de plus rares cas, ce sont des cyanobactéries qui sont associés aux champignons ou même les deux (microalgues et cyanobactéries).

La symbiose est essentielle aux champignons : les microalgues leur apportent, comme dans le cas de la symbiose entre les polypes et les zooxanthelles, des molécules organiques synthétisées grâce à la photosynthèse qui vont servir à l'alimentation des champignons. Les champignons donnent en retour des matières azotées qui participe au développement des algues.



*Les algues se trouvent en dessous du cortex (barrière de mycélium entremêlé), qui protège les algues du dessèchement en retenant de l'eau dans les tissus et sont responsables de l'encrage de la structure.*

## L'utilité des microalgues dans notre société et leurs différents rôles

Les scientifiques s'intéressent de plus en plus aux microalgues dû à l'importance qu'elles ont dans notre société d'aujourd'hui, aussi bien sur le plan environnemental que sur le bien-être des êtres vivants sur terre. Voici quelques rôles majeurs des microalgues.

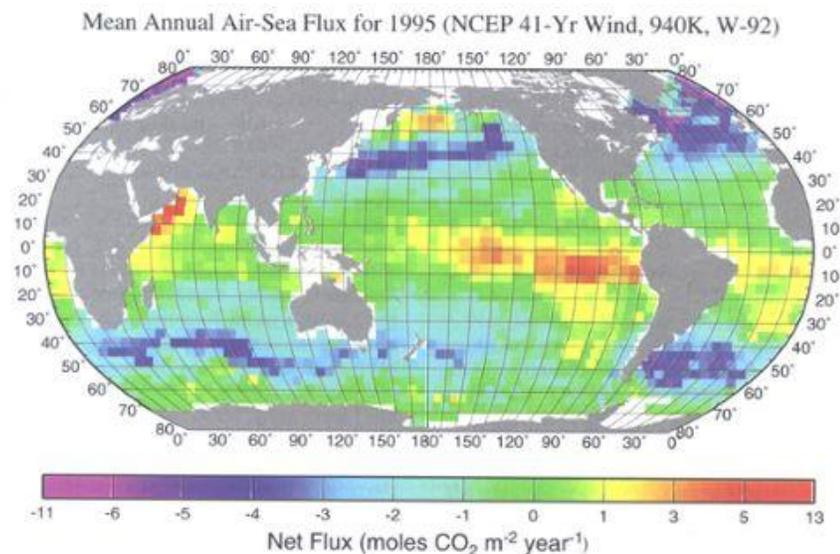
### Le phytoplancton, poumon de la planète terre

Le bénéfice principal qu'offre le phytoplancton (souvent appelé « le poumon » de la planète terre) aux êtres vivants est l'absorption de dioxyde de carbone suivi du rejet d'oxygène dans l'atmosphère terrestre. A lui seul, le phytoplancton absorbe près de 30 % du dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère par les humains et produit plus de 50% de l'oxygène que nous respirons sur terre (le chiffre varie selon les études) grâce à la photosynthèse, soit plus de la moitié. Cela prouve que, contrairement à ce que l'on pourrait croire, les plantes terrestres ne sont pas les seuls végétaux à produire de l'oxygène.

Sur ce graphique datant de 1995, on peut observer le  $\text{CO}_2$  absorbé et rejeté par les océans.

Une valeur négative signifie que du  $\text{CO}_2$  est absorbé et une valeur positive signifie que du  $\text{CO}_2$  est rejeté dans l'atmosphère. On constate que près de l'équateur, la concentration de  $\text{CO}_2$  à la surface de l'océan est plus élevée, ce qui signifie que moins de

dioxyde de carbone est absorbé. Cela est dû au fait que le  $\text{CO}_2$  se dissout beaucoup mieux dans les eaux plus froides. Cela explique le fait que dans les régions  $35^\circ\text{-}50^\circ$  nord et  $35^\circ\text{-}50^\circ$  sud, là où l'eau est plus froide et qu'il y a des vents forts, beaucoup de  $\text{CO}_2$  est absorbé. En effet, lorsqu'il y a du vent et qu'il y a plus de mouvement à la surface de l'eau, cela aide aussi à ce que le dioxyde de carbone soit dissous.

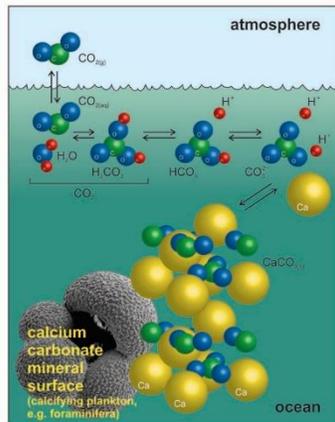


### L'évolution du phytoplancton au fil des années

Depuis l'industrialisation il y a quelques siècles, les humains polluent de plus en plus les écosystèmes terrestres notamment à cause des émissions de  $\text{CO}_2$  ou toutes sortes de déchets biologiques ou chimiques, ce qui exerce une grande influence sur le phytoplancton et donc sur l'océan. Durant les dernières décennies, les scientifiques se penchent sur les « algal bloom » (efflorescences algales) causées par la pollution des océans par déchets chimiques provenant le plus souvent d'usines ou le ruissellement d'engrais et donc de l'accumulation de nutriments, appelée « eutrophisation ». Les microalgues vont alors se proliférer beaucoup plus rapidement dû aux produits chimiques (pouvant contenir des nutriments pour le phytoplancton tel l'azote ou le phosphore). Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la prolifération d'algues est un phénomène négatif, car il entraîne plusieurs conséquences néfastes :

- **L'acidification de l'eau :**

L'acidification de l'eau est due à des réactions chimiques qui ont lieu dans la mer lorsqu'il y a trop de carbone absorbé. Les efflorescences algales sont parmi les causes de ce phénomène entraînant des conséquences néfastes sur certains organismes : lorsque les microalgues meurent et qu'elles sont biodégradées, du  $\text{CO}_2$  est relâché dans l'océan. Or, le  $\text{CO}_2$  dissous réagit avec l'eau. Plusieurs réactions vont conduire à la production d'ions  $\text{H}^+$ , qui vont acidifier l'eau. Le Ph des océans est normalement d'environ 8,1 et peut chuter jusqu'aux alentours de 7,8.



*Réactions causant l'acidification*

Note : lorsqu'il y a beaucoup de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, cela suffit pour que l'eau des océans s'acidifie. Les efflorescences algales ne font qu'empirer ce phénomène.

Lorsque le ph chute, cela affecte beaucoup d'espèces d'animaux comme les coraux (blanchissement des coraux), les poissons (perte de l'instinct de survie et autres problèmes de santé), les crustacés, dont les coquilles sont souvent en carbonate de calcium qui se dissout dans un milieu plus acide, ainsi que d'autres espèces.

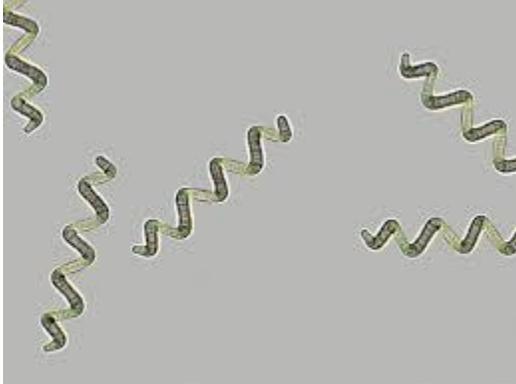
#### - La désoxygénation de l'eau

Lorsqu'à lieu une efflorescence algale, le phytoplancton est tellement abondant qu'il empêche les rayons de soleil de passer à travers et d'atteindre les plantes marines. Celles-ci meurent et sont décomposées par des microorganismes marins qui nécessitent de l'oxygène pour les décomposer. Le taux d'oxygène dissout dans l'eau diminue alors drastiquement et la majorité des espèces marines tels les poissons et les crustacés par exemple en souffrent. Il existe déjà des « zones mortes » à plusieurs endroits sur terre. Dans ces zones, le taux d'oxygène est tellement bas qu'il n'y a quasiment plus de vie dans ces eaux.

Note : Le réchauffement climatique est la deuxième cause de la désoxygénation des océans. Lorsque l'eau se réchauffe, l'oxygène ne se dissout plus dans les océans.

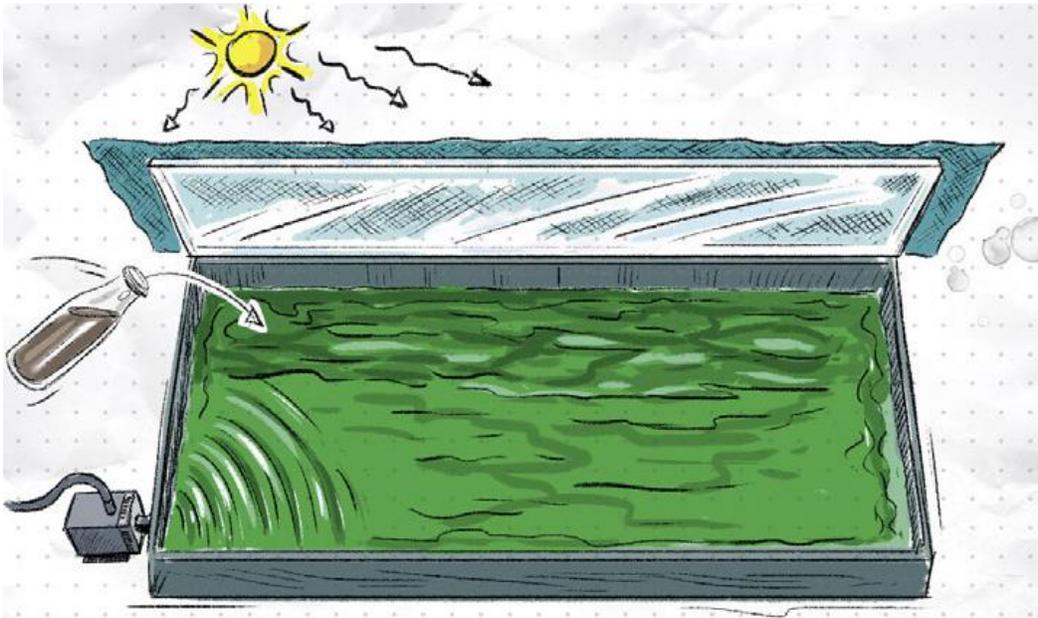
### La spiruline, une microalgue très nutritive et peu chère

La spiruline (*Arthrospira platensis*) est une cyanobactérie (et non une microalgue, contrairement à ce qui est souvent dit) qui suscite l'intérêt de plus en plus de personnes : elle est très facile et peu chère à produire et c'est un « superaliment » très riche en protéines. Elle contient entre 60% et 70% de protéines, ce qui représente environ 2 fois plus que dans la viande (en moyenne 16% - 25% de protéines) et le soja. Aujourd'hui, elle est souvent utilisée comme complément alimentaire.



La spiruline s'appelle ainsi à cause de sa structure en forme de spirale

Cela pourrait être une solution à plusieurs problèmes comme la surpopulation ou la pauvreté. Comme elle est très nutritive, il suffit de plus petites quantités de spiruline pour alimenter une personne. En plus de ça, la cultivation de spiruline est très simple et peu chère : dans une interview menée par le magazine *science-et-vie junior*, le docteur Vola, une scientifique Malgache, a découvert que la spiruline poussait à l'état naturel dans certaines eaux à Madagascar. Habitant dans une région très pauvre et aride, ou de nombreux habitants souffrent de carences, le docteur Vola a décidé de créer une ferme de spiruline.



Voici le schéma d'une culture de spiruline très simple paru dans le numéro 375 du 10 novembre 2020

D'après le docteur Vola, on ne nécessite pas de grand-chose pour cultiver la spiruline : un bassin contenant de l'eau salée et des souches de spiruline, de quoi agiter l'eau (une pompe d'aquarium fait parfaitement l'affaire) pour que le dioxyde de carbone se dissolve dans l'eau ainsi que des nutriments essentiels pour la croissance de *Arthrospira platensis*, notamment du phosphore, de l'azote, du fer, etc... suffisent pour cultiver cette cyanobactérie.



*Voici à quoi ressemble une ferme à spiruline à plus grande échelle, instaurée en Afrique par une ONG pour lutter contre la malnutrition dans certains pays en Afrique*

Néanmoins, il faut faire attention car la spiruline possède un inconvénient. Une surconsommation de spiruline pourrait entraîner des effets secondaires tels des troubles digestifs, des maux de tête, des allergies, etc.... La consommation idéale pour un adulte est d'environ 3 grammes par jour.

### Des photo bioréacteurs pour dépolluer l'air

Un photo bioréacteur est généralement un tube ou un conteneur transparent contenant une culture de microalgues. Ils sont souvent, et de plus-en-plus, utilisés pour dépolluer l'air grâce à la photosynthèse. Les microalgues « recyclent » l'air et le dépolluent.

Grâce à un dispositif d'échange de gazes, « l'air pollué » entre dans le réacteur. Les algues vont, grâce à la présence de lumière, utiliser cet air pour réaliser la photosynthèse et rejeter de l'oxygène. Ces dispositifs permettent d'installer des microalgues dans des villes par exemple.



*Photo bioréacteur à grande échelle*

Certaines entreprises comme Biomitech (México) ou Synoxis (France) développent déjà des bioréacteurs. Biomitech à installé à Mexico City une de leurs technologies phare, BioUrban, qui est un ensemble de bioréacteurs installés sur une structure en forme d'arbre mesurant 4 m de haut. Selon Biomitech, un de ces « arbres » serait en moyenne aussi efficace que 368 pins. Cela signifie qu'une douzaine d'arbres plantés pourraient jouer le rôle d'une forêt. Un arbre BioUrban peut absorber jusqu'à 40 tonnes de dioxyde de carbone par an.



*La technologie BioUrban 2.0, développée par l'entreprise Mexicaine Biomitech*

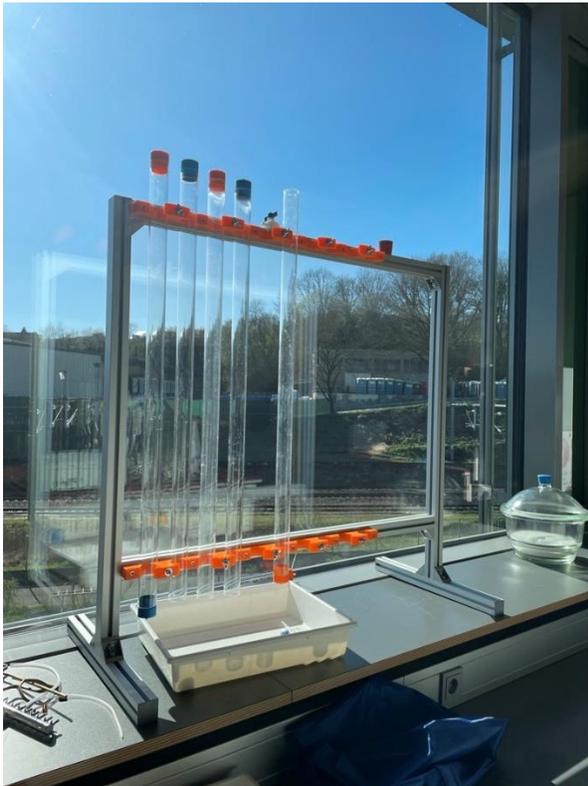
Malgré le fait que les bioréacteurs sont écologiques et que, en théorie, l'on dispose d'une quantité d'algues infinie (en les cultivant), cela ne signifie pas que c'est une solution parfaite. Pour cela, il faut remplir une demi-douzaine de conditions afin qu'un bioréacteur soit efficace :

- Il faut s'assurer que la lumière passe bien à travers la paroi du réacteur, donc que la paroi ne soit pas trop épaisse et qu'elle soit transparente. Il est donc important de construire la paroi à partir de matériaux résistants à la corrosion et laissant passer la lumière, comme le verre ou certains types de plastiques (polyéthylène, polyuréthane, PVC, etc...).
- Le bioréacteur doit disposer d'un système d'échange de gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , N) efficace
- La température doit également être régulée pour garder une température idéale aux microalgues. La régulation de température se fait souvent grâce à des dispositifs de refroidissements grâce à un fluide thermo régulé
- Le bioréacteur doit impérativement disposer d'un mécanisme de mélange afin que toutes les microalgues aient accès à la lumière et aux nutriments
- Le milieu dans lequel sont les microalgues doit rester stérile afin d'éviter toute contamination

Un bioréacteur est donc assez couteux et nécessite d'être bien entretenu afin qu'il reste efficace. En conclusion, l'utilisation courante de bioréacteurs n'est pour l'instant pas encore envisageable, car il reste encore beaucoup de problèmes de praticité et d'autonomie à résoudre. En revanche, il est probable que cette technologie soit optimisée et utilisée dans un futur proche.

#### Le projet de construction de photo bioréacteurs au LEM

Au lycée Ermesinde, il y a aussi des élèves qui se sont intéressés aux microalgues. Dans le projet « Photo bioréacteur » de l'entreprise *LEM Sciences*, trois élèves sont actuellement en train d'imaginer et de construire leur propre bioréacteur de microalgues. Pour cela, ils construisent leurs propres installations avec, en partie, des pièces imprimées à l'aide d'une imprimante 3D en collaboration avec la section *FabLab* de l'entreprise. Ils ont également imaginé leur système de régulation de température ainsi qu'un système permettant de contrôler l'état de la culture de microalgues à l'aide d'une lumière LED et d'un détecteur. Ils cultivent leur microalgue utilisées dans le réacteur dans un milieu déjà prêt. La microalgue utilisée est *Chlorella Vulgaris*.



Voici à quoi ressemble la structure du bioréacteur (sans la culture de microalgues). Les pièces oranges et bleues ont été imprimées par la section **FabLab** de l'entreprise **LEM Sciences**

Le projet est encore en cours de développement mais plus tard, le bioréacteur pourrait recycler des eaux usées grâce aux microalgues qui se nourriraient de substances non désirées en grande quantité tels le phosphate, l'azote ou le fer.

## Conclusion

En écrivant sur ce travail personnel, je me suis moi aussi rendu compte de la complexité mais surtout de l'importance que les microalgues et le phytoplancton en général ont sur notre planète. Avec les nombreuses recherches scientifiques en cours, je me suis rendu compte que les microalgues pourraient assurer une grande variété de fonctions qui pourront servir à réduire notre impact sur le réchauffement climatique.

Cela m'a beaucoup plu d'essayer de comprendre et d'expliquer la photosynthèse avec beaucoup plus de précision que dans mon travail personnel de l'année passée. La compréhension de certaines réactions chimiques dans la photosynthèse permet d'en apprendre plus sur de nombreux autres sujets en physique-chimie, ce qui m'aidera sûrement dans un futur proche en empruntant une voie professionnelle orientée vers les sciences.

Pour finir, je voudrais en profiter pour souligner qu'il y a des problèmes assez méconnus du grand public liés aux microalgues et à l'environnement comme les efflorescences algales qui causent la formation de « zones mortes » dans de nombreuses eaux sur terre. Il est important de s'informer sur ces problèmes pour pouvoir agir. Ce travail personnel m'a donc sensibilisé sur ce sujet.

[Plateau continental : définition et explications \(aquaportail.com\)](#)

[Plateau continental — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[Fond marin — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[La vie végétale et animale sur le plateau continental \(scienceaq.com\)](#)

[PLANCTON - Encyclopædia Universalis](#)

[MarineBio Conservation Society - Le plus grand groupe de biologistes marins / écologistes en ligne!](#)

[https://www.ipemed.coop/imgedit/IPEMED\\_Etudes%20et%20Analyses\\_Rapport%20microalgues.pdf](https://www.ipemed.coop/imgedit/IPEMED_Etudes%20et%20Analyses_Rapport%20microalgues.pdf)

<http://www.thelin.net/laurent/plongee/pression.html#:~:text=La%20pression%20absolue%20en%20plong%C3%A9e,4%20bar%2C%20etc...>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Plaine\\_abyssale](https://fr.wikipedia.org/wiki/Plaine_abyssale)

<https://www.aquaportail.com/definition-2406-plaine-abyssale.html>

[http://www.plancton-du-monde.org/module-formation/ou\\_vit\\_le\\_plancton.html](http://www.plancton-du-monde.org/module-formation/ou_vit_le_plancton.html)

[Comment calculer une pression sous l'eau ? - magicpiscine.com](#)

[Fosse des Mariannes — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[Qu'est-ce que le phytoplancton ? - Océans et mers du monde \(ocean-flots.org\)](#)

[Des microalgues pour sauver la planète - Le Point](#)

[Les Micro-Algues | \(naturispharma.com\)](#)

[Corail — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[Les microalgues : c'est quoi ? Explications \(spirulinefrance.fr\)](#)

[Caroténoïde — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[Scientists Say: Zooxanthellae \(snexplores.org\)](#)

[La relation entre les algues et les champignons dans un lichen est a\) Symbiosib\) Parasitisme c\) Commensalisme d\) Protocoopération \(vedantu.com\)](#)

[Lichen — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[Questions Sciences – Intelligence végétale, numéro d'octobre 2022](#)

[Microalgue : définition et explications – AquaPortail](#)

[Zooxanthelle — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[Qu'est-ce que la symbiose - Définition et exemples \(planetanimal.com\)](#)

[Symbiose lichénique : définition et explications – AquaPortail](#)

[Les lichens, des ménages à trois! | La Gazette des Plantes](#)

[Média : Réactions photochimiques et sombres - Encyclopædia Universalis](#)

[Dossier SagaScience - Cellule \(cnrs.fr\)](#)

[Réticulum endoplasmique rugueux : définition et explications – AquaPortail](#)

[10.2 What are Algae? | EGEE 439: Alternative Fuels from Biomass Sources \(psu.edu\)](#)

[Définition et exemples de microalgues - Dictionnaire en ligne de biologie \(biologyonline.com\)](#)

[Noyau \(biologie\) — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[Les vésicules – La cellule animale et végétale \(wordpress.com\)](#)

[\(19\) MOOC côté cours : Le cytosquelette et les filaments intermédiaires - YouTube](#)

[Définition | Ribosome | Futura Santé \(futura-sciences.com\)](#)

[Fiche explicative de la leçon : Structure de la cellule eucaryote | Nagwa](#)

[Plasmodesme — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[download \(education.fr\)](#)

[Paroi cellulaire — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[\(122\) Chloroplasten - Aufbau einfach erklärt - YouTube](#)

[Définitions : thylakoïde, thylakoïde - Dictionnaire de français Larousse](#)

[L'eau à découvert - 17. L'oxydation de l'eau au cœur de la photosynthèse - CNRS Éditions \(openedition.org\)](#)

[Vacuole \(genome.gov\)](#)

[Amino Acids, Evolution | Learn Science at Scitable \(nature.com\)](#)

[The role of mitochondria in apoptosis - PubMed \(nih.gov\)](#)

[Peroxisomes - La Cellule - NCBI Bookshelf \(nih.gov\)](#)

[How Does Cytoplasm Work in Plant Cells? | AAT Bioquest](#)

[Microsoft Word - cour appareil de golgi \(facmed-univ-oran.dz\)](#)

[Golgi apparatus | Definition, Function, Location, & Facts | Britannica](#)

[Les étapes de la photosynthèse - Maxicours](#)

[Photosystème — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[\(197\) phase photochimique de la photosynthèse - YouTube](#)

[La photosynthèse - TS - Cours SVT - Kartable](#)

[Prolifération d'algues — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[Oxygen Factories in the Southern Ocean \(nasa.gov\)](#)

[Absorption du dioxyde de carbone dans les océans | SMHI](#)

[Cafeyn - Abonnement aux magazines en ligne](#)

[Cafeyn - Abonnement aux magazines en ligne](#)

[Les océans absorbent plus de CO2 à quel prix? - rts.ch - Météo](#)

[What is eutrophication? - YouTubeAcidification des océans | Apprenez les sciences chez Scitable \(nature.com\)Ocean acidification | National Oceanic and Atmospheric Administration \(noaa.gov\)](#)

[\(546\) Can the ocean run out of oxygen? - Kate Slabosky - YouTube](#)

[Cafeyn - Abonnement aux magazines en ligne](#)

[Kugawana Spirulina, spirulina against malnutrition in Kenya | Secteur10](#)

[Photobioréacteur — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

[Un photobioréacteur innovant pour la culture de microalgues à bas coût | Brevel Project | Results in brief | H2020 | CORDIS | European Commission \(europa.eu\)](#)

[Biomitech English – Tecnología inspirada en la naturaleza](#)

[\(109\) phase photochimique de la photosynthèse - YouTube](#)

[\(109\) Photosystem 2 and Photosystem 1 - YouTube](#)

[Fiche explicative de la leçon : Réactions dépendantes de la lumière | Nagwa](#)

[\(151\) The Calvin Cycle - YouTube](#)

[La Biologie en BD \(The cartoon guide to Biology\), édition française de Larousse, 2019 – Larry Gonick & Dave Wessner, ISBN : 978-2-03-595787-0](#)