

# Les microalgues : pour quoi faire ?

*Jack Legrand est professeur à l'Université de Nantes. Il a créé en 2002 le Laboratoire de Génie des Procédés - Environnement - Agroalimentaire (GEPEA)<sup>1</sup>, UMR CNRS 6144, entre l'Université de Nantes, l'École des Mines de Nantes et ONIRIS, qu'il dirige.*

## 1 Le monde des microalgues et des cyanobactéries

### 1.1. Comment fonctionnent-elles ?

Les cyanobactéries et les microalgues sont deux organismes différents d'un point de vue biologique puisque les premières sont procaryotes<sup>1</sup> et les autres eucaryotes<sup>2</sup>. Quand on parle de microalgues et de leur valorisation, on intègre ces deux micro-organismes puisque tout deux sont des micro-organismes photosynthétiques (**Figure 1**).

La photosynthèse permet l'utilisation du carbone minéral, donc du CO<sub>2</sub>, pour le métabolisme de l'organisme. Comme

les plantes supérieures<sup>3</sup>, à côté du CO<sub>2</sub>, les microalgues utilisent d'autres nutriments (le phosphate, les nitrates, etc.), qu'il faut prendre en considération pour les analyses des cycles de vie<sup>4</sup> et de la production de ces microalgues.

L'énergie à la base de ces processus basés sur la photosynthèse est l'énergie solaire. Plus précisément, c'est la partie visible du spectre qui est utilisée. Se pose donc le problème de l'autre moitié du spectre, et notamment du rayonnement infrarouge. Il faut du Soleil pour produire des algues, mais il ne faut pas trop de température non plus. Dans nos régions, on ne cultive pas les algues l'hiver,

1. [www.gepea.fr](http://www.gepea.fr)

1. Procaryote : cellule ne possédant pas de noyau.

2. Eucaryote : cellule possédant un noyau qui renferme son matériel génétique.

3. Plantes supérieures : plantes se reproduisant à l'aide de graines et non de spores comme les algues.

4. Analyse du cycle de vie : étude de l'impact environnemental d'un produit à sa conception, pendant son utilisation, et en fin de vie.

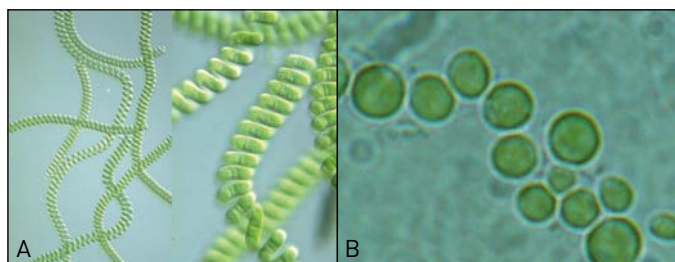


Figure 1

La croissance des microalgues vertes se fait par photosynthèse en milieu entièrement minéral, sans apport d'un substrat organique (ce sont des organismes autotrophes), par absorption en milieu aqueux des minéraux nécessaires et du carbone inorganique environnant grâce à la lumière captée. A) cyanobactérie : *Spirulina platensis* ; B) microalgaue : *Chlorella vulgaris*.

et dans la Chine du Sud, on ne cultive pas les algues l'été... Tous ces paramètres sont importants à contrôler pour la production industrielle de ces microalgues.

Les microalgues ont été parmi les premières espèces présentes sur Terre ; on parle de 4 milliards d'années. Les **Figures 2** et **3** montrent la diversité des microalgues et cyanobactéries ; elles sont présentes dans les mers,

mais aussi dans les zones terrestres humides. Cette très grande diversité conduit à un grand potentiel d'exploitation sur lequel nous reviendrons plus loin.

## 1.2. La photosynthèse, première source d'énergie chez les microalgues

La photosynthèse est un mécanisme extrêmement répandu dans le monde vivant, mise en œuvre par une très grande diversité de mécanismes biochimiques. Pour les plantes supérieures, ces mécanismes réalisent une meilleure efficacité de l'utilisation de la photosynthèse, donc une productivité accrue. Celle-ci peut encore être améliorée, comme on le verra plus loin.

Les microalgues sont constituées des trois grandes catégories de macromolécules de la biologie : les protéines, les carbohydrates (amidon, sucres, glucose, polysaccharides) et les lipides (glycérols, acides gras saturés ou non).

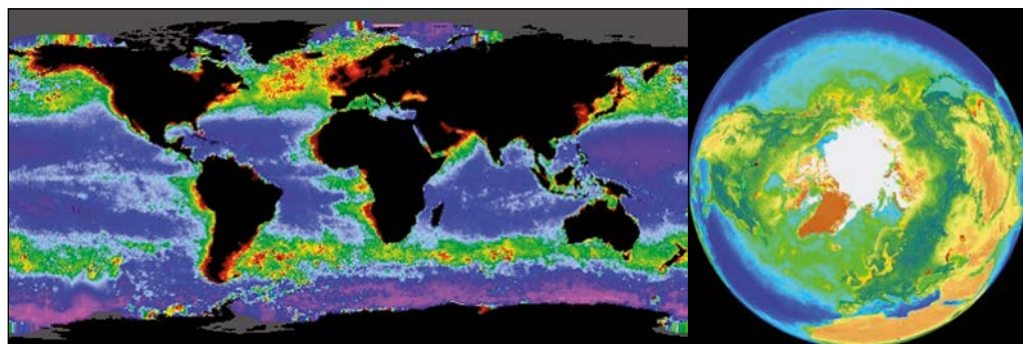


Figure 2

Présence et abondance des microalgues et cyanobactéries en fonction des régions océaniques du monde : une biodiversité à peine explorée (30 000 espèces décrites, 200 000 à 1 million estimées). En rouge sur la carte se distinguent les zones largement peuplées, c'est-à-dire les régions présentant une modification de pH suite à l'absorption de  $\text{CO}_2$  par les microalgues.

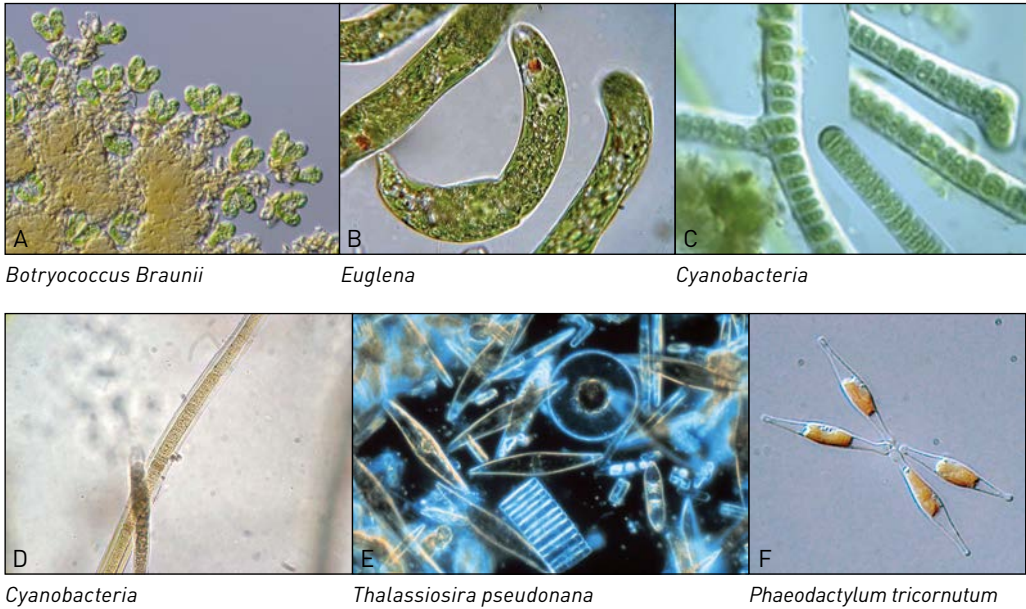


Figure 3

Une grande variété d'espèces de microalgues, précurseurs de la vie sur Terre, peuplant notre planète depuis 4 milliards d'années.

Sources : Wikipédia, Creative Commons : A) CC-BY-SA-3.0, ja ; B) CC-BY-SA-3.0, Deuterostome ; D) CC-BY-SA-3.0, Kristian Peters ; F) CC-BY-2.5 Image courtesy of Alessandra de Martino and Chris Bowler, Stazione Zoologica and École Normale Supérieure

Dans le monde, beaucoup de recherches appliquées sont consacrées aux microalgues pour la production de lipides en vue de disposer de vecteurs énergétiques (carburants). L'exploitation des microalgues conduit aussi à la production de pigments ; ces pigments peuvent avoir des applications dans certains domaines médicaux ou cosmétiques.

Dans une réaction photosynthétique, l'énergie nécessaire pour la transformation chimique est fournie par la lumière. Ce peut être la lumière solaire – comme dans les processus vivants – ou une lumière artificielle pour certaines applications à forte valeur ajoutée. Les réactions photochimiques utilisées pour

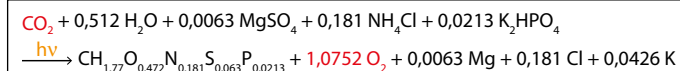
les applications sont réalisées par la matière vivante : on fournit la lumière et les nutriments à un système vivant, et celui-ci effectue la transformation chimique que l'on recherche. En pratique, la matière vivante est apportée sous forme d'inocula de souches<sup>5</sup>, en l'occurrence récupérées dans la biodiversité des algues et des cyanobactéries. Ces procédés produisent ensuite des macromolécules selon les processus naturels.

La **Figure 4** donne l'exemple du bilan de la réaction photosynthétique d'une microalgue *Chlamydomonas reinhardtii*.

5. Souche : population microbienne issue d'une même souche après divisions successives.

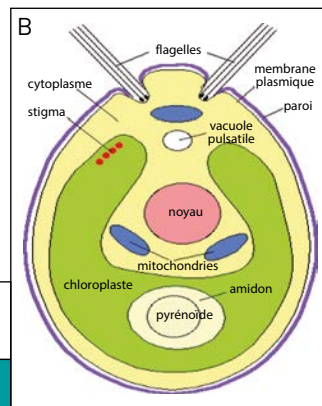
Figure 4

Équation bilan de la photosynthèse par la microalgue *Chlamydomonas reinhardtii*, dont le schéma simplifié indique en vert le chloroplaste, lieu de la photosynthèse.



A

1 kg CO<sub>2</sub> → 0,6 kg biomasse



Approximativement, le bilan de la réaction est : **pour 1 kg de CO<sub>2</sub>, on produit 0,6 kg de biomasse** ; ce chiffre est très peu variable d'une espèce à une autre.

Pour les microalgues, la photosynthèse a lieu dans le chloroplaste<sup>6</sup>. La nuit, les microalgues respirent et utilisent une partie de leurs réserves pour retransformer l'oxygène en CO<sub>2</sub>. Quand on parle de productivité, il faut tenir compte des cycles jour/nuit. Par ailleurs, les pigments jouent un rôle biologique extrêmement important car l'énergétique cellulaire en dépend. En fonction des conditions d'éclairage, en fonction de la saison, etc., les cellules adaptent leurs pigments. Ces mécanismes doivent être compris afin d'optimiser les procédés de culture de ces microalgues.

On peut ramener la chimie de tous les procédés photosynthétiques à ceci : on réalise la photolyse de l'eau, ce qui produit des protons et de l'énergie, qui est utilisée pour produire les macromolécules. Cela est réalisé par la nature,

6. Chloroplaste : organite présent dans le cytoplasme des cellules végétales eucaryotes photosynthétiques. La photosynthèse a lieu au sein de ces micro-organismes.

et nous essayons de le domestiquer en laboratoire puis en faire des procédés industriels.

La **Figure 5** donne l'évolution de la productivité en biomasse en fonction de l'éclairage. On observe une phase de croissance puis on arrive à un optimum et ensuite à un régime de photoinhibition<sup>7</sup>, liée au fait que la microalgue adapte ses pigments de manière à se protéger quand elle a trop d'ensoleillement. Le processus de photosynthèse conduit à la production de molécules de type carbohydrates, protéines ou lipides grâce au cycle de Calvin<sup>8</sup>, qui permet la transformation du CO<sub>2</sub> en macromolécules plus ou moins complexes suivant les métabolites recherchés.

7. Photoinhibition : processus par lequel la lumière diminue la vitesse de la photosynthèse chez les micro-organismes photosynthétiques.

8. Cycle de Calvin : ensemble de réactions biochimiques ayant lieu dans le cytoplasme des micro-organismes photosynthétiques, qui utilisent l'énergie solaire stockée après la photosynthèse sous forme d'ATP (adénine triphosphate) et de NADH (nicotinamide adénine dinucléotide). Ces transporteurs énergétiques sont utilisés par l'organisme pour métaboliser le CO<sub>2</sub> en macromolécules (protéines, polysaccharides, lipides).

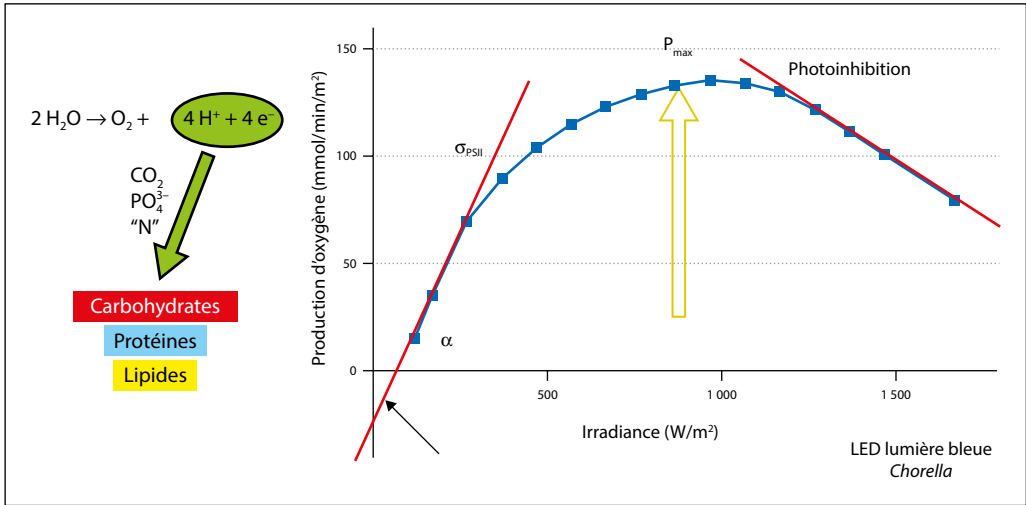


Figure 5

Productivité photosynthétique de la biomasse (espèce *Chlorella*) en fonction de l'éclairement, montrant l'existence d'un optimum avant photoinhibition.

Source : G. Dismukes, Princeton.

### 1.3. Les applications des microalgues de culture

Les applications industrielles des microalgues sont aujourd'hui l'aquaculture, les compléments alimentaires et les cosmétiques (Figure 6). D'autres applications sont à l'étude ou en émergence, à savoir les carburants (mais

à un horizon beaucoup plus lointain), ou encore l'alimentation animale ou humaine. La question à résoudre est celle de l'extrapolation des procédés pour permettre la production de masse des algues. Le débat technique est ouvert sur le type de système de culture à mettre en œuvre.



Figure 6

Des applications variées dans des domaines clés [alimentation humaine et animale, pharmacie, cosmétiques, aquaculture...] expliquent la nécessité de développer la production de microalgues à plus grande échelle.

Sources : pot de spiruline : Nutrex Hawaii ; spirulysat : Algosource/Alpha Biotech.

## 2 Produire et valoriser les microalgues

### 2.1. Les systèmes de culture des microalgues

Si l'on utilise directement les microalgues naturelles, on n'a pas de question technique à se poser sur le procédé. Mais pour une filière de production industrielle, il faut comprendre en détail et contrôler ce que fait la nature et pouvoir l'extrapoler, éventuellement en apportant des modifications aux microalgues.

On utilise un réacteur chimique (*Figure 7*), en l'occurrence un photobioréacteur<sup>9</sup> puisqu'il s'agit de réactions biologiques et qu'elles nécessitent de la lumière. On a dans le réacteur, dans le milieu de culture, des microalgues (en fait les souches mentionnées plus haut), les nutriments qui nourrissent ces organismes et les produits que l'on veut rechercher.

Le fonctionnement du réacteur fait intervenir : l'absorp-

tion des photons, les réactions biologiques au sein des microalgues dont le métabolisme peut être orienté par les conditions opératoires, les réactions chimiques autour de l'assimilation des nutriments à travers de multiples réactions enzymatiques. Toutes ces réactions ont leurs cinétiques propres et doivent être contrôlées ; le paramètre pH joue un rôle déterminant. Les aspects physiques, notamment l'incorporation de CO<sub>2</sub> dans les milieux de culture, ainsi que la nature des rayonnements, sont également essentiels.

Les systèmes de culture industriels sont extrêmement variés (*Figure 8*). Certains sont des systèmes fermés comme celui qui produit en Israël une microalgue qui donne un pigment nommé astaxanthine, un antioxydant puissant. D'autres sont des systèmes de culture ouverts ou sous serre. Il n'y a pas de pratique générale qui se soit imposée.

### 2.2. Valorisation énergétique des produits issus des microalgues

#### 2.2.1. Le procédé de production

La culture des algues est faite pour un ou plusieurs produits. On a affaire à une chaîne de procédés schématisée sur la *Figure 9*. Les souches sont choisies en fonction de l'application. Parmi les nutriments, on cite principalement le CO<sub>2</sub>, ce qui a conduit à des discours trompeurs sur la gestion des gaz à effet de serre (voir l'*Encart : « Valoriser le CO<sub>2</sub> par la production d'algues »*).

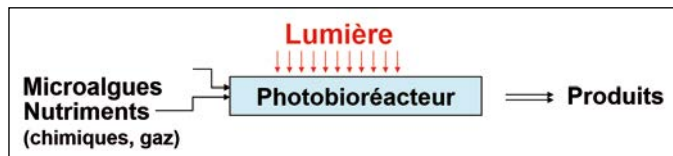


Figure 7

La conversion de nutriments en produits par les microalgues est réalisée à l'aide d'énergie lumineuse dans les photobioréacteurs. Des paramètres cinétiques sont à contrôler : physiques (rayonnement, transfert gaz/liquide), chimique (incorporation cellulaire des nutriments) et biologiques (photosynthèse, métabolisme).



Figure 8

De nombreux dispositifs de production de microalgues permettent aujourd'hui de produire et commercialiser près de 30 000 tonnes de microalgues chaque année.

Source : à droite : Emmanuel Rousseau (Spiruline du Val de Dagne).

### VALORISER LE CO<sub>2</sub> PAR LA PRODUCTION D'ALGUES

On sait que les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère sont beaucoup trop abondantes. Une idée avancée est de consommer ce CO<sub>2</sub> pour produire des algues pour l'aquaculture.

Quelques projets à l'échelle pilote existent, mais il doit être clair que les algues ne sont pas là pour résoudre le problème du CO<sub>2</sub>. Elles ne peuvent que le valoriser. Il n'y aurait pas de réalisme à l'idée de capter tout le CO<sub>2</sub> pour produire des algues. Les bilans montrent vite que ce serait complètement impossible à cause de la surface de culture nécessaire.

Après la production du (ou des) produit(s) par les microalgues intervient la récolte qui fournit une biomasse à traiter. De celle-ci, on extrait les produits recherchés et des effluents qu'il faut également traiter avec des recy-

clages possibles. Pour donner un procédé industriel, cette chaîne doit être optimisée. L'optimisation touche beaucoup de paramètres, en particulier celui de la consommation d'énergie, bien entendu, s'il s'agit de mettre en place

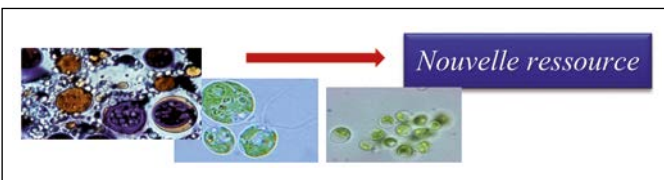


Figure 9

Le cycle de production des microalgues est pensé pour traiter efficacement la nouvelle ressource que présente la biomasse aqueuse.

une filière de production d'énergie à partir d'algues.

### 2.2.2. Quelle valorisation énergétique ?

Que peut-on produire comme vecteurs énergétiques<sup>10</sup> à partir des algues ?

- L'hydrogène<sup>11</sup> : de premières études déjà anciennes se sont intéressées à l'hydrogène puisqu'il a été observé depuis les années 1940 que sous certaines conditions, les algues étaient capables de produire de l'hydrogène.

- Les hydrocarbures : beaucoup de laboratoires se sont orientés vers la production de lipides, de carburants diesel ou d'autres hydrocarbures puisque certaines microalgues les produisent et les relarguent dans le milieu.

- Les polysaccharides pour produire du bioéthanol.

- On peut aussi faire de la fermentation seule ou en mélange avec d'autres déchets organiques pour produire du biométhane.

La culture des microalgues permet un bien meilleur contrôle des nutriments que l'agriculture classique. Elle n'entre donc pas en compétition en ce qui concerne les nutriments. Cependant, il y a compétition sur les surfaces disponibles au sol puisque la future production en masse

10. Voir aussi *Chimie et enjeux énergétiques*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2013.

11. À propos de l'hydrogène, voir aussi le *Chapitre de P. Mauberger* dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2016.

ne pourra que faire appel à l'énergie solaire.

### 2.3. Les clés scientifiques pour optimiser la valorisation énergétique des microalgues

La *Figure 10* liste un certain nombre de processus biologiques à l'œuvre dans les microalgues. Ils pointent vers des verrous scientifiques qu'il faut lever pour développer une application, notamment à la production d'énergie. Les processus biologiques sont dépendants les uns des autres, par le moyen de signalisations biologiques. Celles-ci peuvent être orientées par action sur les métabolismes. On peut ainsi amener le micro-organisme (la microalgue) à stocker les produits synthétisés soit sous forme de corps lipidiques, qui ne sont pas essentiels pour lui mais « mis en réserve » pour son avenir, ou soit sous forme de grains d'amidon. Un des objectifs des laboratoires est de comprendre la manière dont le micro-organisme stocke ces réserves énergétiques sous une forme ou sous une autre, et avec quelle efficacité.

Une des techniques est de concevoir (re-designer) des micro-organismes qui remplissent ces tâches (voir le *Chapitre de M. Fontecave* dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, EDP Sciences 2016). Les difficultés sont nombreuses, en particulier parce que la présence d'oxygène est inséparable de la photosynthèse, mais aussi parce que de nombreuses enzymes sont perturbées par l'oxygène. Ce domaine évoluera avec les progrès de la biologie de synthèse.



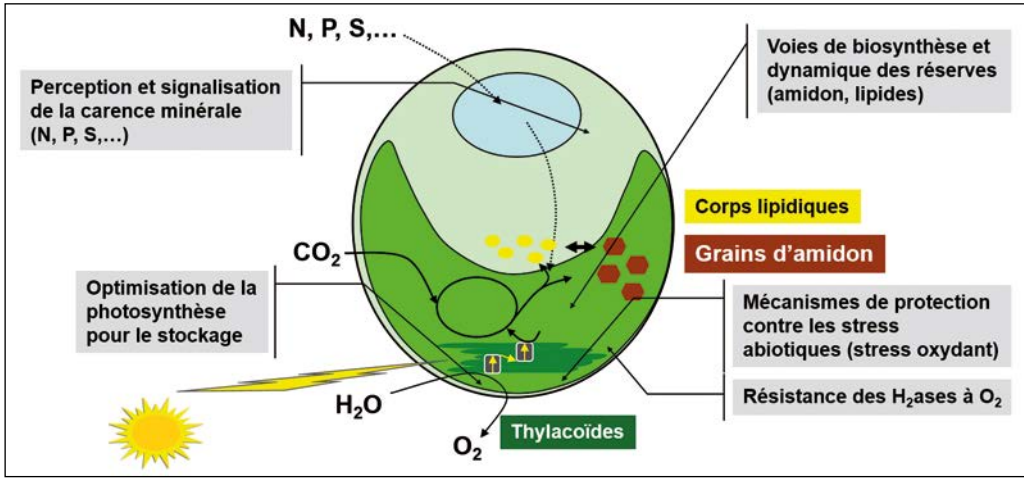


Figure 10

La microalgue est le siège d'un grand nombre de réactions métaboliques qui lui confèrent sa richesse d'exploitation.

Source : G. Peltier.

## 2.4. Les molécules issues des microalgues pour la valorisation énergétique

### 2.4.1. Production de lipides

La **Figure 11** donne quelques exemples de lipides produits par les microalgues. Il y a ainsi les lipides neutres (les triacylglycérols, TAG), que l'on peut transformer en carburant diesel ; les lipides constitutifs à la constitution des parois cellulaires – ce sont des phospholipides qui se trouvent dans le chloroplaste. Certaines microalgues produisent directement des hydrocarbures.

La microalgue *Neochloris oleoabundans* est capable d'accumuler des lipides. Dans des conditions normales de croissance, les lipides représentent à peu près 20 % de leur matière (**Figure 12**). Pour orienter le métabolisme vers la production de lipides, on

carence le milieu de culture en nitrates dont l'azote est essentiel pour la synthèse des protéines. Avec moins de nitrate, on fait moins de protéines et donc plus de lipides ; cette stratégie s'applique de façon générale. La fraction lipidique qui a augmenté en pourcentage correspond essentiellement à des TAG. Au laboratoire, on travaille sur l'optimisation des quantités produites. En fait, ce qu'il faut optimiser pour le procédé industriel, c'est à la fois la croissance et le contenu en lipides : c'est le produit des deux qui est important.

### 2.4.2. Production d'hydrogène

Autre exemple de production d'énergie : la production d'hydrogène. Elle se fait à partir d'une microalgue, *Chlamydomonas reinhardtii*, extrêmement connue dans les laboratoires qui travaillent sur la photosynthèse (**Figure 13**),

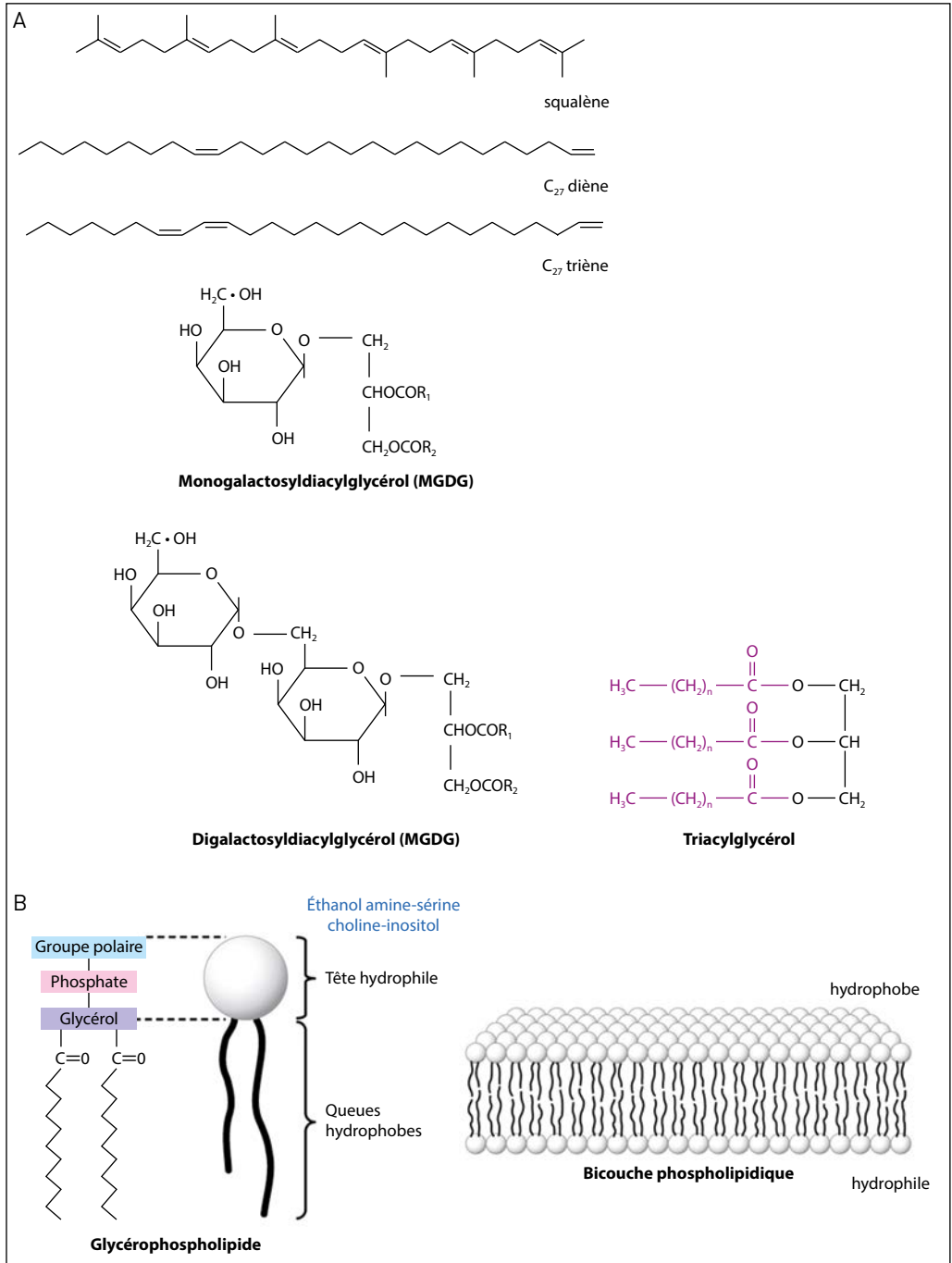


Figure 11

A) Les lipides neutres, comme les triacylglycérils, sont une des classes de molécules produites par les microalgues, lieu de stockage d'énergie ; B) les phospholipides, produits dans le cytoplasme, jouent un rôle primordial dans la formation de parois cellulaires.

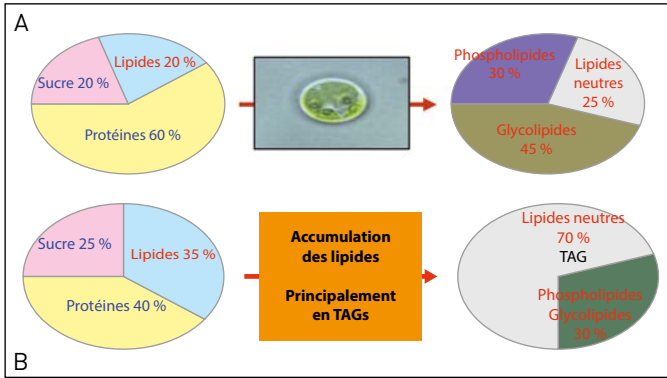


Figure 12

Diagramme représentant la part occupée par les lipides dans les microalgues *Neochloris oleoabundans* en fonction des conditions de culture (standard A ou en carence de nitrate B).

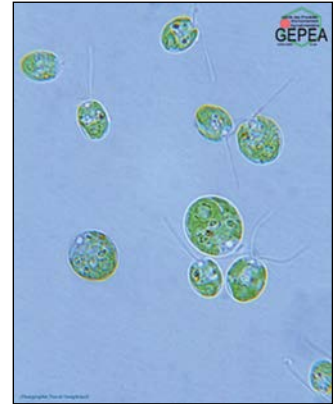


Figure 13

Représentation caractéristique de *Chlamydomonas reinhardtii* avec son double flagelle.

et qui présente deux flagelles. Cette microalgue verte possède une hydrogénase<sup>12</sup>, une enzyme capable de transformer les protons en hydrogène. Elle ne le fait pas systématiquement et doit être forcée si l'on veut avoir un procédé industrialisable.

12. Hydrogénase : enzyme catalysant la réaction de conversion de protons  $H^+$  en dihydrogène.

L'hydrogénase est couplée à la photosynthèse. Elle ne transforme les protons qui lui sont envoyés par la chaîne photosynthétique en hydrogène qu'en l'absence d'oxygène (Figure 14). On doit donc trouver des procédés capables de découpler la partie production de biomasse de la partie production d'hydrogène. Soit on modifie les souches qui assurent naturellement

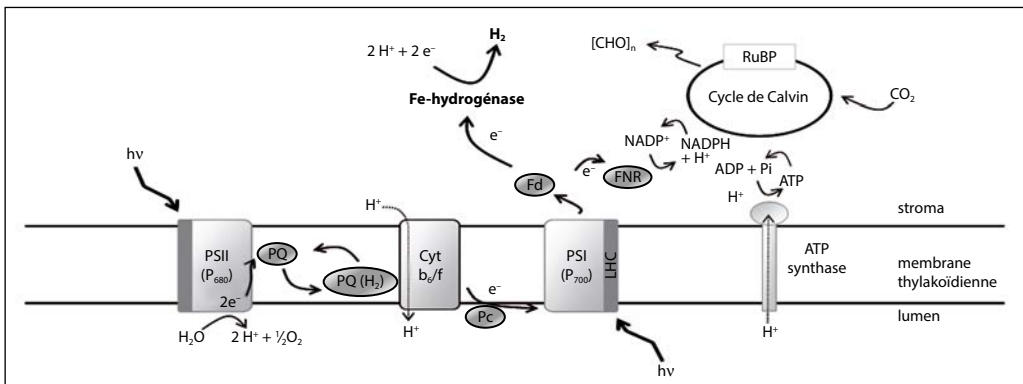


Figure 14

La métabolisation de l'hydrogène en présence de l'enzyme hydrogénase dans les microalgues en fait une des cibles privilégiées pour la production industrielle d'hydrogène.

cette possibilité, soit on ajoute des étapes supplémentaires au procédé : une étape de production de biomasse, une étape de production d'hydrogène. Ces mises au point sont en cours dans les laboratoires.

### 3 État des lieux et avancées majeures dans la culture de microalgues

#### 3.1. Les microalgues pour la production de biocarburants

À partir de microalgues et de manière industrielle, on produit déjà des huiles végétales pour des applications en compléments alimentaires comme les omega-3 EPA et DHA ; on commence à produire des biocarburants et des « jet fuels » par voie hétérotrophique<sup>13</sup>. Pour ces productions, on utilise des micro-organismes type microalgues ou des levures que l'on nourrit avec du sucre (ou des résidus de mélasse) ou avec des polysaccharides. C'est ce que fait

13. Hétérotrophique : activité de micro-organismes hétérotrophes, lesquels sont incapables de synthétiser leur propre matière organique et ayant donc recours à des sources externes de matière organique.

l'entreprise « Roquette » dans le Nord de la France.

Avec les microalgues ou les micro-organismes de type levuriens, on fait du biodiesel (chimiquement des lipides), mais cette production n'est pas encore complètement industrialisée. Il y a tout de même un vol entre Toulouse et Paris qui utilise toutes les semaines une partie du jet fuel produit à partir de levures (le farnesane, d'Amyris-Total). C'est déjà là une voie industrielle : la rentabilité économique est encore assez éloignée mais les procédés techniques sont maîtrisés.

Au niveau de la recherche et développement, on a une synthèse de biodiesel à partir de micro-organismes photosynthétiques. Pour l'hydrogène, les délais d'application sont plus éloignés parce que les mécanismes biologiques sont beaucoup plus compliqués (**Figure 15**) : il faudra encore au moins vingt années de recherche.

#### 3.2. Valorisation totale des microalgues et systèmes innovants

Associés à la production d'énergie, se développent des travaux sur la valorisation entière de ces micro-organismes. Comme nous avons pu le voir pour les productions de lipides, on est à 30-40 % de lipides dans l'algue, ce qui reste 60 à 70 % d'autre chose. On veut valoriser cet « autre chose », non pas pour le bilan énergétique, mais pour le bilan économique de l'utilisation de la matière, et de nombreux travaux voient le jour sur ce thème un peu partout dans le monde.

Figure 15

Le marché des produits issus de microalgues a un futur prometteur grâce aux progrès réalisés sur les nombreux métabolismes qu'elles abritent.

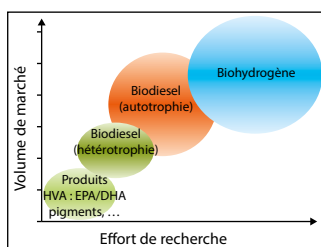




Figure 16

Pour boucler le cycle de production de microalgues, la fabrication de biobitume à partir de résidu d'algues est envisagée (programme de recherche Algoroute financé par la Région des Pays de la Loire réunissant IFSTTAR Nantes, le CEISAM, le GEPEA et la société AlgoSource).

Au niveau du laboratoire, on travaille sur des résidus d'algues dont on avait extrait les lipides pour fabriquer du biobitume. La **Figure 16** montre quelques exemples réalisés avec un procédé de liquéfaction hydrothermale. On obtient une espèce d'huile assez informe mais qui a des propriétés qui ressemblent à celles du bitume : des propriétés visqueuses et thermofusibles<sup>14</sup> qui sont assez proches.

La souche *Porphyridium cruentum* donne des exemples de valorisation des microalgues. Cette souche ne produit pas des lipides mais des exopolysaccharides, qui sont des polysaccharides excrétés par la microalgue, utilisés à l'heure actuelle en cosmétique. Il y a de nombreux produits valorisables avec cette

souche ; l'objectif est de développer une série d'opérations unitaires pour récupérer l'ensemble de ces produits valorisables. C'est tout le problème du génie chimique, de développer des opérations unitaires pouvant travailler en synchronisme.

La **Figure 17** donne un exemple de ce que l'on réalise à l'échelle du laboratoire avec différentes étapes mettant en place des unités de membranes pour séparer les différents produits et essayer de les valoriser de la manière la plus efficace et la plus pertinente possible.

La **Figure 18** donne un exemple d'application d'une autre espèce. Il s'agit de culture urbaine de microalgues, qui pourraient participer à l'agriculture urbaine du futur. Sur la figure est montré un prototype construit au laboratoire, qui simule ce que seraient des photobioréac-

14. Thermofusibles : qualifie une matière qui devient fluide sous l'effet de la chaleur.

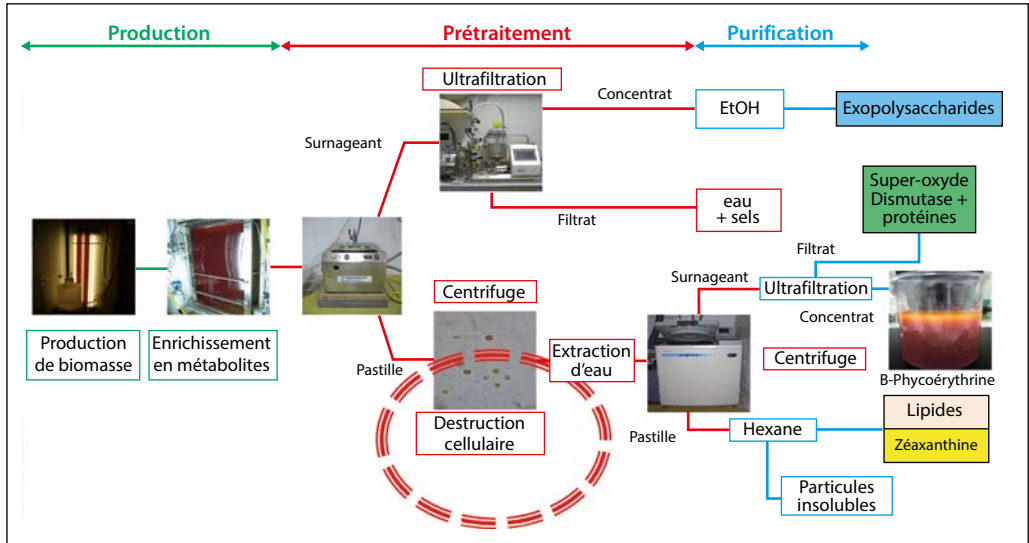


Figure 17

Schéma de procédés fonctionnant à l'échelle du laboratoire pour la valorisation énergétique des microalgues.

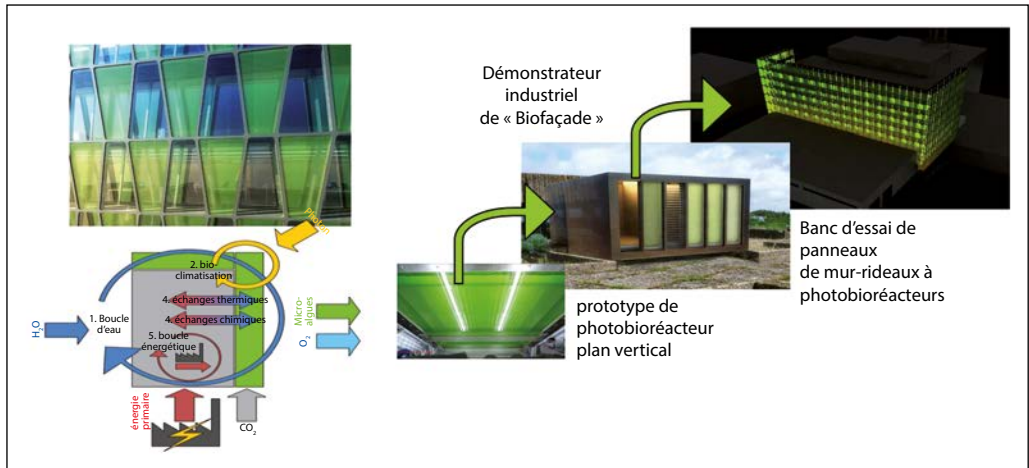


Figure 18

Le projet « Symbio2 » (partenariat : XTU, Séché, AlgoSource, GEPEA, OASIS, Viry, CSTB) : des photobioréacteurs sous forme de panneaux viennent habiller les façades d'immeubles. Les échanges thermiques entre le bâtiment et le panneau de microalgues assurent leur survie.

Source : XTU.

teurs à installer en façade des bâtiments. La thermique du bâtiment peut aider à la culture des algues et inversement en fonction des sai-

sons ; on peut aussi imaginer des symbioses massives notamment à partir du CO<sub>2</sub> ou des eaux résiduelles produites à partir du bâtiment.

## **Quel avenir pour les microalgues ?**

Avec leur nombre gigantesque et leur extrême diversité biologique, les microalgues offrent un éventail impressionnant pour effectuer des synthèses chimiques de produits qui peuvent intéresser l'humanité. Les réactions chimiques qu'elles font naturellement utilisent l'énergie du Soleil par la photosynthèse, considérablement plus économe en énergie que les procédés catalytiques habituels à nos industries.

Pour exploiter ce potentiel, les laboratoires de biologie/chimie doivent comprendre en détail le fonctionnement de ces organismes pour éventuellement leur apporter des modifications en interaction avec les spécialistes du génie chimique pour la mise au point des réacteurs chimiques qui permettent de les exploiter et d'extraire les produits recherchés.

Aujourd'hui, plusieurs productions industrielles utilisant les microalgues sont déjà rentables, des compléments alimentaires aux polysaccharides. Les travaux d'industrialisation progressent, et d'autres produits vont venir, en particulier pour alléger les difficultés prévues dans la production d'énergie à partir des combustibles fossiles.