

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre  
Département de Biologie

Projet de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## LICENCE

**Domaine :** Sciences de la nature et de la vie

**Filière :** Ecologie et environnement

**Spécialité :** Ecologie végétale

## Thème

**Production de Biocarburant  
à partir de Microalgues**

**Par :**

Kiouas Abir

**Jury :**

**M. Kebbab L.**

Maître Assistant B

Univ. Ghardaïa

**Encadreur**

**M<sup>elle</sup> Ouici H.**

Maître Assistant B

Univ. Ghardaïa

**Examineur**

**Année universitaire 2013/2014**

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre  
Département de Biologie

Projet de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## LICENCE

**Domaine :** Sciences de la nature et de la vie

**Filière :** Ecologie et environnement

**Spécialité :** Ecologie végétale

## Thème

**Production de Biocarburant  
à partir de Microalgues**

**Par :**

Kiouas Abir

**Jury :**

**M. Kebbab L.**

Maître Assistant B

Univ. Ghardaïa

**Encadreur**

**M<sup>elle</sup> Ouici H.**

Maître Assistant B

Univ. Ghardaïa

**Examineur**

**Année universitaire 2013/2014**

## *Remerciements*

*Je tiens tout d'abord à remercier le Dieu tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*En second lieu, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à M<sup>me</sup> **KEBBAB L.**, Maître assistant B à la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre de l'Université de Ghardaïa, pour m'avoir proposé ce sujet de mémoire. J'ai beaucoup appris sous sa direction grâce à ses connaissances et à sa patience. Je tiens à lui exprimer ma gratitude et toute ma reconnaissance pour son dévouement, la confiance qu'elle m'a accordée, son aide à tout instant, sa rigueur et la qualité des commentaires et suggestions dont elle m'a fait part.*

*J'adresse mes sincères remerciements à M<sup>me</sup> **OUISSI H.**, Maître assistant B à la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre de l'Université de Ghardaïa qui a bien voulu examiner mon mémoire.*

*Mes remerciements s'adressent à tous mes amies Meriem, Houria, Sara et Faiza qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce projet.*

*J'ai une grande reconnaissance envers mes camarades de promotion qui ont contribué à l'ambiance de travail très agréable durant toutes ces années.*

*Je remercie plus particulièrement ma famille, qui m'a soutenue et encouragée durant toute la période de mes études, et surtout mes chers **parents et grands parents**, pour leurs encouragements et leur soutien moral.*

*Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.*

---

<b>Introduction</b> .....	01
<i>Les microalgues : Caractéristiques et propriétés</i>	
1- Les microalgues .....	03
1.1- Caractéristiques générales .....	03
1.2- Classification et phylogénie.....	03
1.2.1- Les procaryotes .....	04
1.2.1.1- Les Cyanophycée (cyanobactéries) .....	04
1.2.1.2- Les eucaryotes .....	05
1.2.2.1- Les diatomées (bacillariophycées) .....	06
1.2.2.2- Les Chlorophycées (algues vertes) .....	06
1.2.2.3- Les Chrysophycées (algues dorées) .....	07
1.2.2.4- Les Rhodophycées.....	07
1.2.2.5- Les Euglenophycées.....	07
1.3- Caractéristiques morphologiques et physiologiques.....	07
1.4- Ecologie des microalgues.....	10
1.5- Composition biochimique .....	10
1.6- Importance des microalgues.....	12
2- La culture des microalgues.....	13
2.1- Paramètres du développement des microalgues.....	13
2.1.1- Lumière .....	13
2.1.2- Température.....	14
2.1.3- pH.....	14
2.1.3- Nutriments.....	14
2.1.3.1- Carbone .....	14
2.1.3.2- Azote.....	15
2.1.3.3- Phosphore.....	15
2.1.3.4- Micro-éléments.....	16
2.1.3.5- Salinité du milieu.....	16
2.2- Production de la biomasse.....	17
2.2.1- Culture en photoautotrophie.....	17
2.2.1.1- Systèmes ouverts (Raceways).....	17
2.2.1.2- Systèmes fermés (PBR) .....	19
2.2.2- Culture en hétérotrophie .....	21
2.2.3- La récolte des microalgues .....	22
2.2.4- Le séchage de la pâte algale .....	26
2.3- Application des microalgues.....	27
2.3.1- Domaine alimentaire .....	29
2.3.2- Domaine pharmaceutique .....	30

---

2.3.3- Domaine cosmétique.....	31
2.3.4- Domaine environnemental.....	32
2.3.5- Domaine énergétique .....	34
<i>Biocarburant via microalgues</i>	
3- Les biocarburants à partir de microalgues .....	36
3.1- La filière bioéthanol .....	37
3.1.1- Généralité .....	37
3.1.2- Production de bioéthanol à partir des microalgues .....	37
3.1.3- La fermentation .....	38
3.1.4- Utilisation du bioéthanol .....	39
3.2- Biogaz (biométhane).....	39
3.2.1- Généralité.....	39
3.2.2- La méthanisation.....	40
3.3- Biodiesel .....	41
3.3.1- Généralité .....	41
3.3.2- La transestérification.....	41
3.3.2.1- Transestérification Chimique.....	43
3.3.2.2- Conversion biochimique (enzymatique).....	43
3.4- Biohydrogène .....	44
3.4.1- Généralité .....	44
3.4.2- La gazéification.....	45
3.4.3- Photoproduction de l'hydrogène.....	45
3.4.3.1- Protocole de culture sous carence en soufre .....	46
<b>Conclusion</b> .....	48
<b>Références bibliographiques</b> .....	49

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I</b> : Les groupes d'algues les plus importants en terme d'abondance (SHARMA et RAI, 2011) .....	04
<b>Tableau II</b> : Rendement en biomasse de différentes cultures végétales (CHISTI, 2007)..	12
<b>Tableau III</b> : Les principales espèces de microalgues commercialisées.....	28

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Exemples de quelques espèces d'algues bleues .....	05
<b>Figure 2</b> : Exemple de Microalgues eucaryotes (IFREMER, 2012) .....	06
<b>Figure 3</b> : Diversité morphologiques des microalgues (SUMI, 2009 <i>in</i> FILLALI, 2012) ..	08
<b>Figure 4</b> : Schéma d'un chloroplaste (source : <a href="http://www.famille-schlegel.com/tpe/">http://www.famille-schlegel.com/tpe/</a> ) ....	08
<b>Figure 5</b> : Phases photochimique et chimique de la photosynthèse (source : <a href="http://www.famille-schlegel.com/tpe/">http://www.famille-schlegel.com/tpe/</a> ) .....	09
<b>Figure 6</b> : Voies possibles pour la production d'énergie (PILLONETTO, 2013).....	12
<b>Figure 7</b> : Principe de fonctionnement des systèmes de culture ouverts (raceways) (source : <a href="http://www.econologie.com/forums/le-vehicule-a-hydrogene-vu-par-total.html">http://www.econologie.com/forums/le-vehicule-a-hydrogene-vu-par-total.html</a> ).	18
<b>Figure 8</b> : Culture en raceways (source : <a href="http://www.econologie.com/forums/le-vehicule-a-hydrogene-vu-par-total.html">http://www.econologie.com/forums/le-vehicule-a-hydrogene-vu-par-total.html</a> ).....	19
<b>Figure 9</b> : Photobioréacteur (PBR) de laboratoire pilote à éclairage externe .....	20
<b>Figure 10</b> : Fermenteur de production d'Oméga-3 à partir de microalgues (FERMENATLG, 2013) .....	22
<b>Figure 11</b> : Principe de la filtration (source : <a href="http://micro-algues-tpe.eklablog.com">http://micro-algues-tpe.eklablog.com</a> ) .....	23
<b>Figure 12</b> : Centrifugeuse modèle <i>Hettich</i> .....	23
<b>Figure 13</b> : La floculation (source : <a href="http://micro-algues-tpe.eklablog.com">http://micro-algues-tpe.eklablog.com</a> ) .....	24
<b>Figure 14</b> : floculant naturelle le <i>Chitosan</i> (source Wikipedia) .....	25
<b>Figure 15</b> : Electroflocculation de microalgues (Cabatuando et <i>al.</i> , 2011).....	25
<b>Figure 16</b> : Séchage par atomisation .....	26
<b>Figure 17</b> : Les différents domaines de valorisation des microalgues (A.R.V.A.M.) .....	27
<b>Figure 18</b> : Formes nutritives des microalgues (source : <a href="http://www.wordpress.com">http://www.wordpress.com</a> ) .....	30
<b>Figure 19</b> : Procédé de traitement des eaux par les microalgues (FILALI, 2012) .....	32
<b>Figure 20</b> : Représentation schématique du procédé de fixation de $CO_2$ par les microalgues à partir de gaz d'échappement industriel (FILALI, 2012) .....	33
<b>Figure 21</b> : Procédés de production de biocarburant via microalgue (source : <a href="http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/">http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/</a> ) .....	35
<b>Figure 22</b> : Procédé de production de bioéthanol via microalgues .....	38
<b>Figure 23</b> : La méthanogenèse .....	40
<b>Figure 24</b> : Schéma du principe de production du biodiesel à partir des microalgues (FILALI, 2012) .....	41

<b>Figure 25</b> : Mécanisme de production de biodiesel par tranestérification .....	42
<b>Figure 26</b> : Réaction de transestérification chimique classique (PERSON, 2010) .....	43
<b>Figure 27</b> : Structure trois dimensionnel de la lipase (ANSORGE-SCHUMACHER, 2007).....	44
<b>Figure 28</b> : Induction de l'activité de l'hydrogénase par l'inactivation du PSII et principales enzymes impliquées dans la production d'hydrogène.....	46
<b>Figure 29</b> : Protocole de photoproduction d'hydrogène (MELIS et <i>al.</i> , 2000) .....	47

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

% : Pourcent

*al.* : Collaborateurs

°C : Degré celsuce

A.R.V.A.M : Agence pour la recherche et la valorisation marines

cm : Centimètre

fig. : Figure

g : Gramme

kg : Kilogramme

m : Mètre

mm : Millimètre

tab. : Tableau.

# *Introduction*

Les sociétés actuelles dépendent d'approvisionnements abondants et constants en ressources énergétiques pour fonctionner et progresser, dans lesquelles les ressources fossiles comblent la plus grande part des besoins énergétiques mondiaux. Cependant l'exploitation des combustibles fossiles est source de plusieurs effets négatifs notamment l'émission de divers polluants comme les gazes à effet de serre liés aux dérèglements climatiques (NIGAM et SINGH, 2010).

Aujourd'hui, l'instabilité des cours pétroliers et les changements climatiques ont stimulés la production de carburant d'origine végétale à partir du maïs et du soja. Reste, que leur origine agricole a provoqué une augmentation significative du prix des produits alimentaires de base, de plus l'accroissement de la production agricole a produit, entre autres, des problèmes de déforestation, d'érosion et de surconsommation d'eau.

L'utilisation de microalgues pour la production de composés à haute valeur ajoutée se développe depuis plusieurs années. En sus de l'argument de la productivité, leur avantage majeur réside dans le fait qu'il n'entre pas en concurrence avec les productions répondant aux besoins de l'alimentation humaine ou des industries de transformation (SUBHADRA et EDWARDS, 2010).

Les premières recherches sur les microalgues ont commencés dans les années 50, principalement pour répondre à des problématiques nutritionnelles et pharmaceutiques (BECKER, 2003).

Au début des années 2000, la recherche de source d'énergie renouvelable a réitéré l'intérêt des chercheurs pour les microalgues, en effet, de par leur composition biochimique, particulièrement intéressant, les microalgues peuvent être utilisées pour produire une variété de biocarburants tels que le biogaz, l'éthanol, le biodiesel, et la production biologique d'hydrogène (WEN et *al.*, 2011), ou bien en combinaison pour la production de biocarburant et comme dépolluant d'effluents industriels gazeux (fixation de  $CO_2$ ) (FILLALI, 2012).

En outre, la composition biochimique des microalgues peut être modifiée en fonction des conditions de culture (lumière, température, source d'azote, rapport N/P, etc...) ce qui permet d'obtenir des biomasses qui présentent les caractéristiques préférées (BELKOURA et *al.*, 1992).

Toutefois, à l'heure actuel la production de biocarburant utilisant des organismes photosynthétiques est encore loin d'être rentable et fait face à plusieurs défis technologiques majeurs tels que les faibles rendements et les coûts élevés de production ; s'ajoute à cela l'asepsie, mal contrôlée, particulièrement lors d'essais en milieu hétérotrophe (WEN et *al.*, 2009).

Aujourd'hui, développer une production de biocarburant algal et s'assurer de sa viabilité économique à grande échelle, revient à travailler sur l'optimisation des souches cultivées et des procédés de culture, de récolte et de préparation (GHOBIRINI et *al.*, 2014). Ce qui

implique donc la participation de plusieurs disciplines travaillant en étroite interrelation allant du domaine de la Biologie en passant par l'Ingénierie (WEN et *al.*, 2009).

L'objectif de ce travail est de donner un aperçu sur l'état actuel de la production de biocarburant algal et d'apporter des informations concernant les étapes nécessaires à la fabrication des différents types de biocarburants qui peuvent être produits.

Ainsi, notre travail s'organise comme suit :

Dans un premier temps, il est question de décrire les microalgues, donner la composition de la biomasse algale et citer les avantages de l'utilisation des algues pour la production de biocarburant.

Ensuite, ce travail détaille toutes les étapes du procès de production du biodiesel, du bioéthanol, du biogaz et illustre les voies biochimiques impliquées dans le procédé de production biologique d'hydrogène. Enfin, une conclusion générale clôture notre travail.

*Les microalgues :  
Caractéristiques  
et Propriétés*

## **1- Les microalgues**

### **1.1- Caractéristiques générales**

Les microalgues font partie des premiers organismes vivants apparus sur notre planète (il y a plus de trois milliards d'années). Elles représentent le premier maillon de la chaîne alimentaire des océans et assurent le fonctionnement des grands cycles biologiques. De même qu'elles contribuent au maintien de la biodiversité et synthétisent les molécules organiques indispensables à la vie (GHOBRIINI et *al.*, 2014). Elles sont à l'origine de la moitié de la photosynthèse réalisée à la surface du globe et se trouve à la base de toutes les chaînes alimentaires en milieu océanique, à l'instar des plantes dans le milieu terrestre (NABORS, 2008), et leur transfert de l'énergie solaire en une biomasse s'avère efficace.

Les microalgues représentent une source d'alimentation pour les premières étapes larvaires comme pour les êtres humains de par leur composition biochimique adaptée (FILALI, 2012).

Toutefois, les organismes du phytoplancton sont extrêmement sensibles aux variations de température ainsi qu'à la pollution. Une modification de quelques degrés de la température de l'eau ou une augmentation de la pollution ont un effet majeur sur la survie du phytoplancton, ce qui, en fin de compte, affecte tous les organismes, y compris les êtres humains, situés en aval dans les chaînes alimentaires (NABORS, 2008).

Les microalgues sont largement et principalement connues étant des organismes photoautotrophes. L'autotrophie est un mode de nutrition des microalgues leur permettant d'utiliser les rayons solaires afin de synthétiser leur énergie. Les microalgues de métabolisme autotrophes utilisent également une source de carbone inorganique comme le  $CO_2$  et le  $HCO_3^-$  pour la synthèse du carbone organique. Ce carbone organique est essentiel à la synthèse de toutes les composantes organiques nécessaires à leur survie.

D'autre part, plusieurs microalgues ont un métabolisme hétérotrophe de nutrition et celle-ci n'ont pas besoin de l'énergie solaire. Elles utilisent plutôt une source de carbone organique pour la production de l'énergie et des composants organiques (CANTIN, 2010).

En outre, plusieurs espèces de microalgues sont capables de passer d'une croissance photoautotrophe (grâce à de la lumière qui fournit l'énergie pour convertir le  $CO_2$  en chaînes carbonées) à une croissance hétérotrophe (sans lumière) utilisant le glucose ou d'autres substrats carbonés utilisables pour le métabolisme du carbone et de l'énergie (PERSON, 2010).

### **1.2- Classification et phylogénie**

Les microalgues, présentent une diversité plus grande que celle de toutes les plantes terrestres (GHOBRIINI et *al.*, 2014). Il existe sur le globe au moins 200 000 espèces différentes. Certains auteurs avancent même des chiffres supérieurs à un million d'espèces (CADORET et BERNARD, 2011).

De nos jours, leur biodiversité est à peine explorée, ainsi, et environ 47 000 espèces de microalgues ont été répertoriées. A cet égard, les possibilités de valorisation de cette richesse naturelle apparaissent donc très importantes. Pourtant, seule une cinquantaine d'espèces sont étudiées de manière détaillée au niveau de laboratoire de recherche et une dizaine d'espèces uniquement sont exploitées au niveau industriel et commercial.

Selon SHARMA et RAI (2011), les espèces les plus importants en termes d'abondance se rencontrent toutes dans les quatre classes données dans le Tableau I.

**Tableau I :** Les groupes d'algues les plus importants en terme d'abondance (SHARMA et RAI, 2011)

<b>Algues</b>	<b>Nombre d'espèces</b>	<b>Formes de Réserves</b>	<b>Habitat</b>
Diatomées ( <i>Bacillariophyceae</i> )	100, 000	<i>Chrysolaminarine</i> (Polysaccharides) et TAGs*	Océans, eaux douces et Saumâtres
Algues vertes ( <i>Chlorophyceae</i> )	8,000	Amidon et TAGs	Eaux douces
Algues bleu-vert ( <i>Cyanophyceae</i> )	2,000	Amidon et TAGs	Différents habitats
Algues Brunes ( <i>Chrysophyceae</i> )	1,000	TAGs et hydrates de carbone	Eaux douces

\* TAGs : Triglycérides (triacylglycérides)

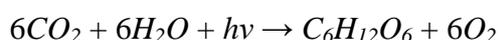
Ces organismes constituent un groupe polyphylétique et très diversifié de procaryotes (les algues bleues ou cyanobactéries) et eucaryotes (où l'on retrouve les algues vertes, rouges et brunes). Le classement en divisions est basé sur diverses propriétés telles que la pigmentation, la nature chimique des produits de stockage issus de la photosynthèse, l'organisation des membranes photosynthétiques et d'autres caractéristiques morphologiques (PERSON, 2010). Ainsi on y distingue principalement deux grands groupes de microalgues.

### 1.2.1- Les procaryotes

Ce sont des organismes unicellulaires qui sont dépourvus de noyau et ne présentent que très rarement des organites cellulaires.

#### 1.2.1.1- Les Cyanophycée (cyanobactéries)

Les cyanobactéries ou cyanophycées, encore appelées algues bleues, auraient permis la production d'oxygène dans l'atmosphère en réalisant la photosynthèse, suivant la réaction universelle de la photosynthèse :

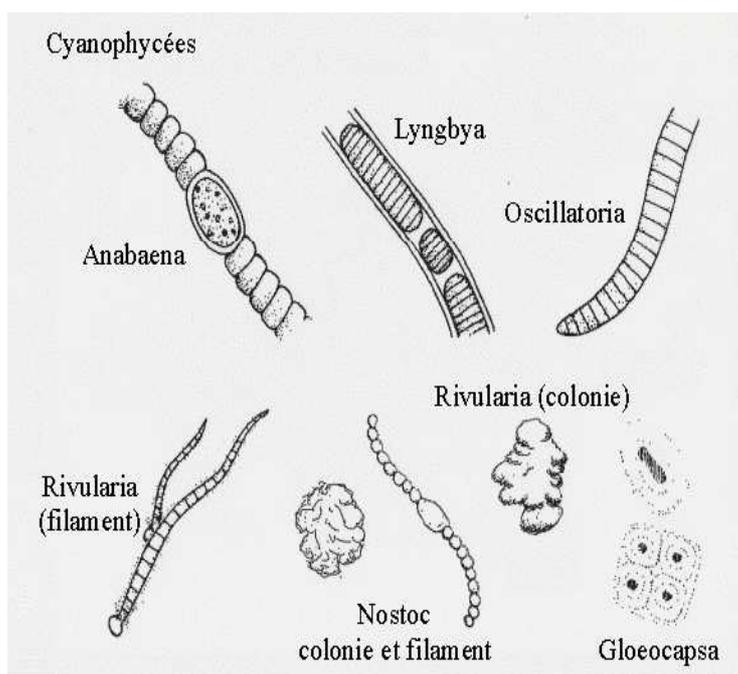


Selon PERSON (2010), sur la base de leur structure procaryote typique, elles sont considérées dans les classifications actuelles comme étant des bactéries photosynthétiques oxygéniques (fig. 1).

Bien qu'étant des procaryotes, les cyanobactéries ont un système photosynthétique proche des végétaux chlorophylliens. Elles possèdent de la chlorophylle a et le photosystème II. Comme les algues rouges, elles ont des phycobiliprotéines comme pigments accessoires.

Elles peuvent être retrouvées dans pratiquement tous les habitats (eaux fraîches, eaux salées, eaux saumâtres et sols) étant donné leur aptitude à résister à des températures extrêmes et leur résistance à la dessiccation. Les cyanophycées emmagasinent principalement leur énergie sous forme d'amidon (amylose et amylopectine) ou encore sous forme d'huiles (CANTIN, 2010). Les espèces les plus connues sont *Spirulina (Arthrospira) plantensis*, *Nostoc commune* et *Aphanizomenon flos-aquae*.

Une seconde classe de cyanobactéries, les "*Prochlorophyta*", présente une spécificité au niveau de la pigmentation avec une absence totale de phycobiliprotéines, mais une présence de chlorophylle a et b (FILALI, 2012).



**Figure 1 :** Exemples de quelques espèces d'algues bleues.

### 1.2.2- Les eucaryotes

Au contraire des cellules procaryotes, les cellules eucaryotes possèdent un vrai noyau délimité par une enveloppe nucléaire. Au sein du cytoplasme délimité par la membrane plasmique, les organites subdivisent le cytosol et constituent autant de compartiments différents (ARICO et al., 2013) (fig. 2).



**Figure 2 :** Exemple de Microalgues eucaryotes (IFREMER, 2012)

#### **1.2.2.1- Les diatomées (bacillariophycées)**

Les diatomées représentent souvent le groupe dominant de microalgues parmi les populations de phytoplancton et sont extrêmement répandues dans tous les types d'habitat (CANTIN, 2010) avec plus de 100 000 espèces connues (FILALI, 2012). Elles sont unicellulaires et sont souvent réunies en chaîne. Leur paroi cellulaire (ou frustule) est composée de substances pectiques associées à de la silice (DABBADIE, 1992).

Les diatomées emmagasinent leurs réserves sous forme de chrysolaminaran, un polysaccharide, ainsi que d'huiles. Elles sont d'ailleurs reconnues et exploitées pour leur contenu en acides gras (CANTIN, 2010).

#### **1.2.2.2- Les Chlorophycées (algues vertes)**

Elles sont très abondantes en eaux douces. Elles peuvent se développer en mode unicellulaire ou en colonies qui peuvent devenir très denses. Elles accumulent l'énergie qu'elles capturent, principalement par photosynthèse, sous la forme d'hydrates de carbone et d'huiles (DESCHENES, 2009). On dénombre actuellement 8 000 espèces, dont 1 000 sont des chlorophytes marines.

Les espèces les plus connues sont *Chlorella*, *Chlamydomonas*, *Dunaliella* ainsi que *Haematococcus* (FILALI, 2012), L'espèce la plus étudiée est *Chlorella vulgaris*. Cette espèce est très intéressante pour la production de biodiesel en raison de son pourcentage intéressant en acides gras. Les principales sources de carbone assimilables le sont sous forme de sucres et d'acide acétique.

D'autres espèces faisant partie de cette classe ont un potentiel intéressant pour la production d'algocarburants dont notamment l'espèce *Chlorella protothecoides* (CANTIN, 2010).

### **1.2.2.3- Les Chrysophycées (algues dorées)**

Les *chrysophycées* se retrouvent surtout en eaux douces et on en compte environ 1 000 espèces. Elles ressemblent aux diatomées mais elles peuvent arborer plus de couleurs que ces dernières : du jaune au brun en passant par l'orange. Chez plusieurs espèces d'algues dorées l'enveloppe est principalement composée de silice et en plus faibles proportions de cellulose (DESCHENES, 2009).

### **1.2.2.4- Les Rhodophycées**

Ce sont des algues de pigmentation rouge qui sont capables de se développer dans les eaux saumâtres et salées. Cette classe comprend près de 400 espèces présentant dans la majorité des cas un métabolisme photoautotrophe (FILALI, 2012).

### **1.2.2.5- Les Euglenophycées**

Il existe plus de 800 espèces d'euglenophycées qui sont retrouvées généralement dans les eaux saumâtres et douces. Les principales réserves de ces algues sont constituées de paramylon, une substance glucidique, et d'huiles (CANTIN, 2010).

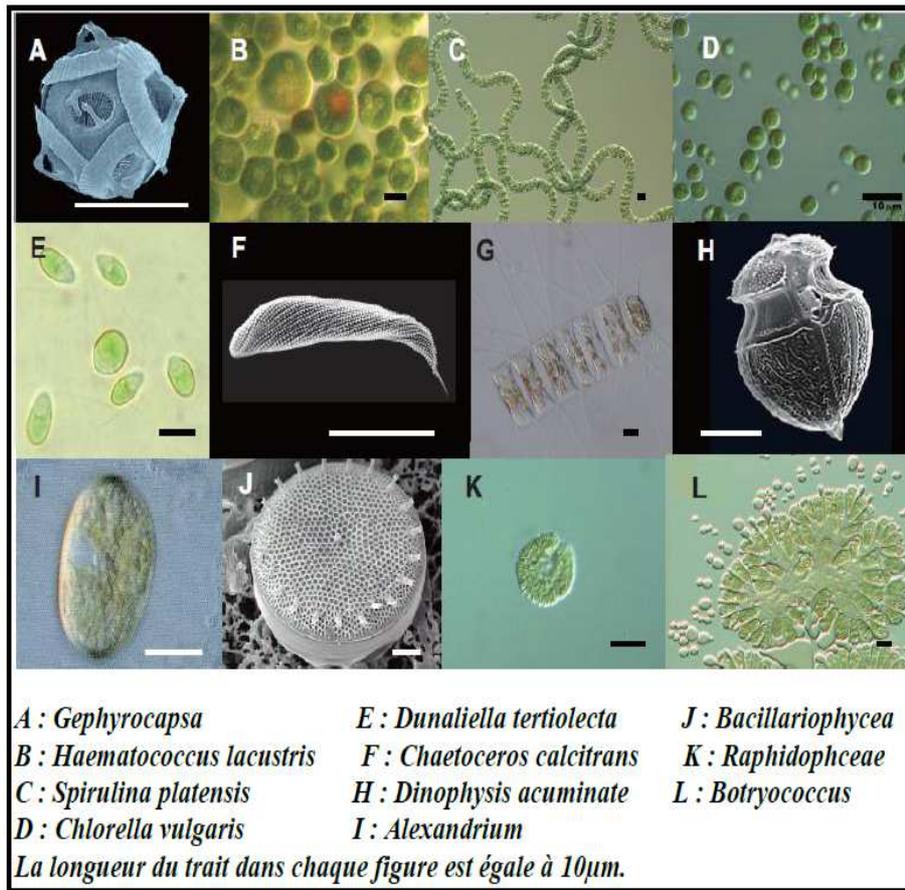
## **1.3- Caractéristiques morphologiques et physiologiques**

D'une grande simplicité d'organisation (absence de structures spécialisées), les microalgues ont une taille de l'ordre du micromètre et se présentent sous des formes variables : souvent sphériques (*porphyridium*), en forme de croissant (*clostridium*), de spirale (*Arthrospira*), de gouttelette (*chlamydomonas*) et même d'étoile (*Staurastrum*) (fig. 3) (SUMI, 2009 in FILALI, 2012).

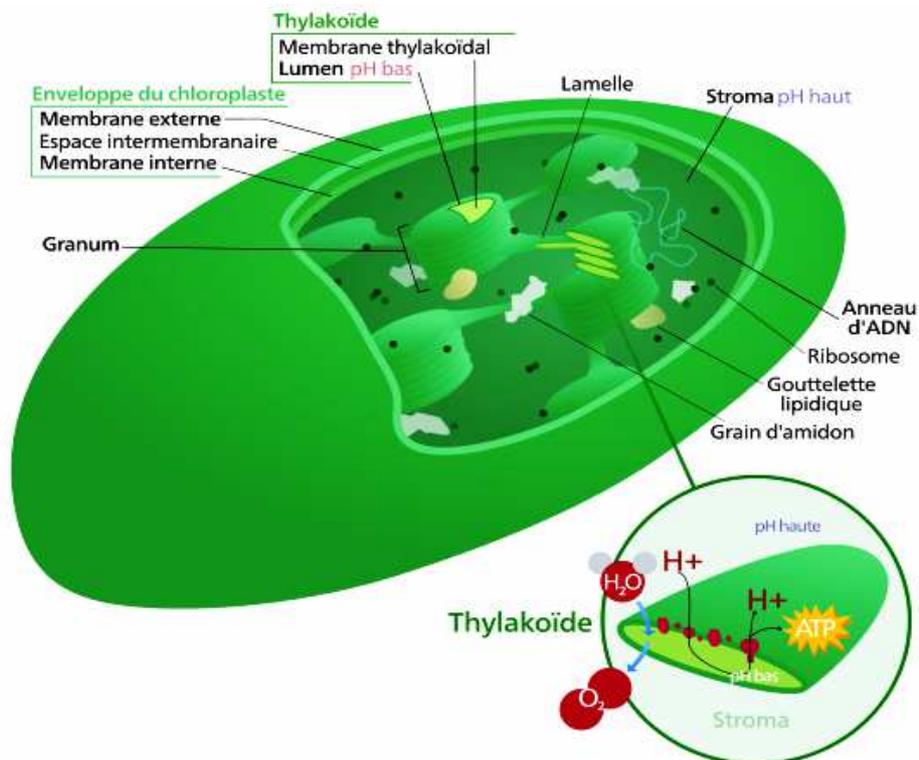
Du point de vue structure cellulaire, la microalgue présente un noyau et une membrane plasmique contenant des organites essentiels à son fonctionnement tels que les chloroplastes, les amyloplast, les oléoplastes et les mitochondries. Elle contient trois principaux types de pigments qui sont les chlorophylles, les caroténoïdes et les phycobiliprotéines.

Comme tous les organismes possédant des chloroplastes, les microalgues sont capables de transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique pour leurs développements par le biais du métabolisme photosynthétique :

La photosynthèse se déroule en deux étapes : une étape photochimique et une non-photochimique. Ce processus a lieu dans les chloroplastes qui sont des organites présents dans le cytoplasme des cellules eucaryotes photosynthétiques (fig. 4).



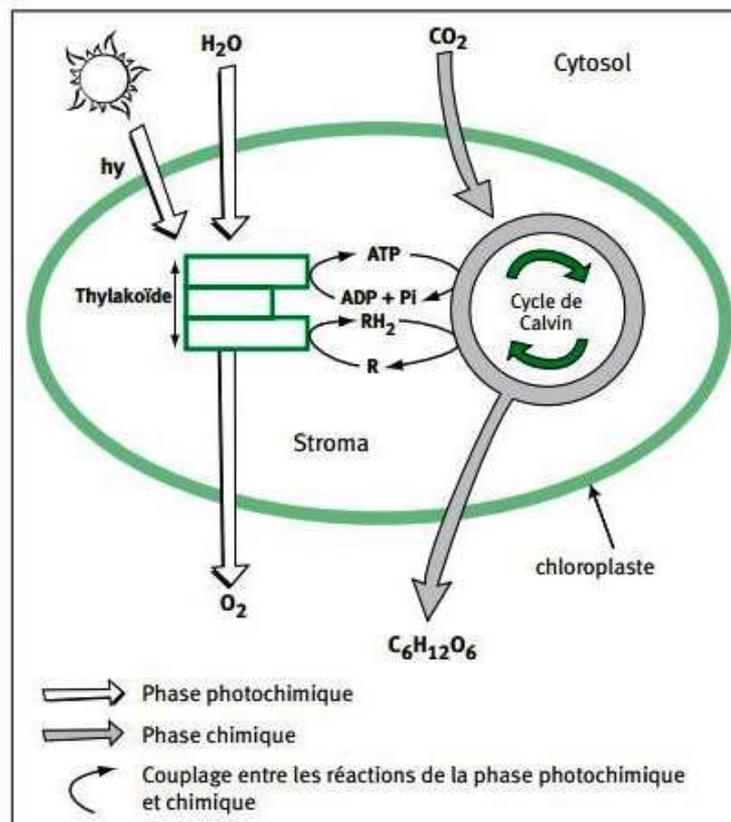
**Figure 3 :** Diversité morphologiques des microalgues (SUMI, 2009 in FILLALI, 2012)



**Figure 4 :** Schéma d'un chloroplaste (source : <http://www.famille-schlegel.com/tpe/>)

L'étape photochimique (phase claire) se déroule dans les thylakoïdes des chloroplastes et nécessite de la lumière. La chlorophylle présente dans les chloroplastes joue un rôle important dans le métabolisme photosynthétique, en effet c'est elle qui permet d'absorber les radiations rouge, violette et certaines radiations bleues ; de plus elle permet de convertir l'énergie lumineuse absorbée sous une forme permettant les réactions de synthèse de se produire, comprenant des réactions photochimiques entraînant le transfert d'électron extraits de l'eau vers le  $\text{NADP}^+$  et la création d'un potentiel électrochimique localisé de part et d'autre de la membrane des thylacoïdes permettant la synthèse d'ATP. Le transfert d'électrons de l'eau au  $\text{NADP}^+$  requiert de l'énergie, celle-ci provient des photosystèmes.

L'étape non photochimique (phase sombre) est séparée spatialement et temporellement de la phase claire. Elle comprend un ensemble de réactions enzymatiques formant le cycle de Calvin au cours duquel le carbone est fixé et réduit pour donner des triose-phosphates. Les enzymes du cycle sont localisées dans le stroma et le cycle utilise les produits de la phase claire, ce qui conduit à la formation de glucides (fig. 5).



**Figure 5 :** Phases photochimique et chimique de la photosynthèse

(source : <http://www.famille-schlegel.com/tpe/>)

Certaines microalgues peuvent accumuler, comme d'autres végétaux terrestres, le carbone sous forme de lipides. Les lipides ainsi stockés constituent une réserve de carbone pour

l'organisme. En condition normale, cela représente aux alentours de 20 à 50 % de la microalgue, de plus les lipides sont principalement constitués de phospholipides et de glycolipides. Mais certaines, particulièrement prolifiques sont capables d'accumuler jusqu'à 80% de leur poids sec en lipides. Ce stockage de lipides est dû à un déséquilibre transitoire entre le flux de carbone issu de la photosynthèse et le flux d'autres éléments, phosphore ou azote, nécessaires à la croissance. La cellule alors carencée en l'un de ces éléments, ne stoppe pas tout de suite l'acquisition de dioxyde de carbone nécessaire à la photosynthèse. Elle stocke donc ce flux sous forme de lipides.

Ainsi chez certaines microalgues, on observe des organites particuliers : les oléoplastes qui sont des organites spécifiques des cellules végétales présentant un stockage lipidique sous la forme de plastoglobules.

#### **1.4- Ecologie des microalgues**

Les microalgues sont capables de se développer dans un large éventail de conditions abiotiques. A cet égard, l'évolution des espèces a été accompagnée d'une diversification écologique, la majorité des espèces se développent des environnements aquatiques (océans, rivières, lacs, ... etc.), humides et ensoleillés (SUBHADRA et EDWARDS, 2010). Cependant, les microalgues présentent une capacité d'adaptation et de survie telles qu'elles se sont adaptées à différentes niches écologiques : des glaces polaires aux zones désertiques, arides et semi arides et aux sources d'eau chaudes. De même les milieux hyper salins, alcalins et/ ou acides sont colonisés par quelque espèces (SIALVE et STEYER, 2008). En outre, certaines espèces peuvent subsister dans les grottes, associées sous forme de symbioses avec tout type d'organisme vivant et même parasites, entre autre de l'homme. Elles sont également capables de se développer sur des surfaces rigides, telles que les murs ou les troncs d'arbres et même à même le sol (BECERRA–CELIS, 2009). Aussi, certaines espèces ont la particularité de croître même dans des conditions de luminosité très faible (SUBHADRA et EDWARDS, 2010).

Cette capacité ubiquitaire des microalgues est le résultat d'une part de leurs propriétés morphologique (absence de formation complexe et présence de structure pariétales particuliers) de l'autre à un métabolisme orienté capable entre autre de synthétiser différentes variétés de métabolismes notamment secondaires (FILALI, 2012 ; GHOBINI et *al.*, 2014).

#### **1.5- Composition biochimique**

L'intérêt des microalgues se manifeste par la diversité de leurs compositions biochimiques, mais également par des particularités qui justifient l'utilisation de certains procédés de production. Ainsi l'absence de paroi autour des cellules de *Dunaliella* et l'existence de globules de  $\beta$ -carotène extraplastidiaux permettent l'extraction de ce métabolite par des procédés

utilisant des chocs osmotiques, ou des réacteurs biphasiques utilisant la diffusion du pigment à l'aide de solvants (do-décane), sans perte de viabilité (JENCK et *al.*, 2011).

Les microalgues représentent une source importante de quasi toutes les vitamines essentielles : *B1*, *B6*, *B12*, *C*, *E*, *K1*, et possèdent un large panel de pigments, fluorescents ou non, pouvant aussi avoir un rôle d'antioxydants. En plus de la chlorophylle (0,5 à 1 % de la matière sèche) qui est le pigment photosynthétique primaire chez toutes les algues photosynthétiques, on trouve toute une gamme de pigments supplémentaires de type caroténoïdes (0,1 à 0,2 % de la matière sèche) et phycobiliprotéines (phycoérythrine et phycocyanine). Les pigments principalement exploités sont la phycocyanine de la spiruline (colorant bleu), la phycoérythrine (couleur rouge) de *Porphyridium purpureum*, l'astaxanthine d'*Haematococcus pluvialis* ou le bêta-carotène de *Dunaliella salina*.

Elles peuvent accumuler plus de 50 % de leur poids sec en lipides. Ces derniers sont principalement constitués de triglycérides, de phospholipides, et de glycolipides (PERSON, 2010). La microalgue *Odontella aurita* est par exemple une source importante d'acides gras insaturés. Par ailleurs, l'huile extraite de *Schizochytrium* a été récemment autorisée en tant que nouvel ingrédient alimentaire.

A l'heure actuelle, la richesse en lipides des micro-algues et leur relative facilitée de production font de ces dernières une source intéressante pour les secteurs de la pétrochimie afin de produire des biocarburants.

Certaines microalgues ont des constituants pariétaux particuliers tels que des polysaccharides sulfatés, pouvant donner des oligosaccharides, du  $\beta$ -glucane ou des glycoprotéines impliqués dans des processus d'agrégation cellulaire, utilisables comme biofloculants (JENCK et *al.*, 2011), d'autres encore peuvent produire des molécules à activité antivirales, antibiotiques, ou anti-prolifératrices chez l'homme (PERSON, 2010).

Le contenu élevé en protéines, peptides et acides aminés (entre 12 et 65 % de matière sèche) de plusieurs espèces de microalgues est une des principales raisons pour les considérer comme une source non conventionnelle de protéines dans l'alimentation humaine et animale (pisciculture) (PERSON, 2010).

La cyanobactérie *Arthrospira platensis*, est mondialement reconnue pour ses qualités nutritionnelles supérieures à la viande et est préconisée dans la lutte contre la malnutrition sévère dans les pays en voie de développement. Cette cyanobactérie n'est toutefois pas la seule source de protéines d'origine algale. Certaines études ont mis en évidence la teneur élevée en protéines d'autres algues, protéines constituées d'ailleurs par des acides aminés essentiels. Ainsi, *Palmaria palmata* contient de la leucine, de la valine, de la méthionine et de l'acide aspartique tandis qu'*Ulva pertusa* présente une fraction protéique riche en histidine et en thréonine, à des taux comparables à l'ovalbumine.

### 1.6- Importance des microalgues

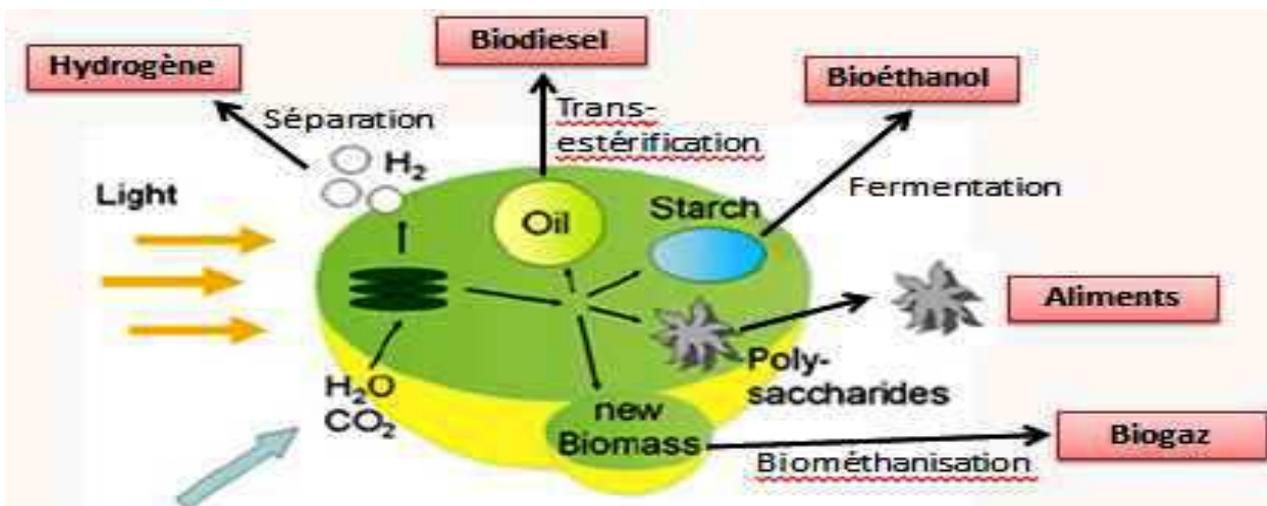
Les microalgues présentent l'avantage d'avoir un cycle de division très court, de l'ordre de quelques heures, permettant la production rapide de biomasse (plusieurs grammes de matière sèche par litre) ce qui leur confère un rendement supérieur à celui des plantes supérieures (10 fois plus que les plantes terrestres) (tab. II). De plus, leur avantage majeur réside dans le fait qu'il n'entre pas en concurrence avec les productions répondant aux besoins de l'alimentation humaine ou des industries de transformation, des récoltes continue sur l'année (permaculture) et pas d'apport de produits phytosanitaires (SUBHADRA et EDWARDS, 2010). Toutefois, les taux de croissance des microalgues sont fortement dépendants des espèces et des conditions de culture considérées en lien avec leur efficacité photosynthétique (ANDERSEN, 1992).

**Tableau II :** Rendement en biomasse de différentes cultures végétales (CHISTI, 2007)

Culture	Rendement (L/ ha/ an)
Soja	73
Camelina	94
Tournesol	155
Jatropha	307
Palmier à huile	970
Microalgues	1500 – 10000

En outre Les microalgues représentent une source de biomasse qui intéresse les nombreux secteurs des énergies renouvelables (ex. biocarburants, traitements des eaux usées) (fig. 6).

Néanmoins, la quantité produite de chacune de ces sources dépend du rendement photosynthétique de l'espèce cultivée et des conditions de culture. Trois sources sont couramment exploitées : la biomasse, l'huile et le dihydrogène.



**Figure 6 :** Voies possibles pour la production d'énergie (PILLONETTO, 2013).

## **2- La culture des microalgues**

### **2.1- Paramètres du développement des microalgues**

La culture de microalgues est soumise à l'influence de plusieurs paramètres environnementaux physiques ou biologiques qui sont dépendants des caractéristiques intrinsèques de l'espèce algale et de la géométrie du système de production. Ces paramètres affectent non seulement l'activité photosynthétique et la productivité en biomasse, mais également le comportement physiologique et métabolique des microalgues dans la culture (RICHMOND, 2004).

Ce sont des facteurs abiotiques tels que la lumière, la source de carbone, les nutriments minéraux, la température, la salinité, le pH, la teneur en  $O_2$ ; et des facteurs biotiques tels que des pathogènes (bactéries, champignons, virus), des compétiteurs pour les ressources (algues exogènes) ou des prédateurs (hydres, copépodes). Pour ces derniers le problème est en grande partie résolu pour les algues croissant en milieu extrêmophile, comme les eaux hyper-salées (telle que *Dunaliella salina*) ou hyper alcalines (telle que la spiruline) qui limitent la croissance des prédateurs et des microorganismes concurrents (KUMAR *et al.*, 2010).

Ainsi, avec la lumière, la température est le facteur limitant le plus important pour la culture des microalgues. En effet, beaucoup de microalgues peuvent facilement supporter des températures allant jusqu'à 15 °C en dessous de leur température optimale, mais la hausse de la température de seulement 2 à 4 °C au-dessus de leur température optimale peut entraîner la perte totale de la culture (ANEX, 2012).

De même, la salinité de l'eau peut affecter la croissance et la composition cellulaire des microalgues. Chaque microalgue a une gamme de salinité optimale différente qui peut augmenter dans des conditions météorologiques chaudes en raison de la forte évaporation. Les changements de salinité affectent les microalgues à cause du stress osmotique, du stress ionique et des changements de ratios ioniques cellulaires en raison de la perméabilité membranaire sélective aux ions. Néanmoins, la façon la plus simple de contrôler la salinité est l'addition d'eau douce ou salée selon les besoins (ANEX, 2012).

#### **2.1.1- Lumière**

La lumière est un des facteurs indispensables au métabolisme photosynthétique des microalgues. L'apport de l'énergie lumineuse peut se produire de manière naturelle grâce à l'énergie solaire ou bien artificiellement grâce à des tubes fluorescents émettant la lumière à une longueur d'onde bien spécifique.

La croissance algale dépend de la disponibilité et de l'efficacité de l'utilisation de l'énergie lumineuse (SMITH, 2000). On notera l'importance du trajet lumineux, de la concentration cellulaire (qui trop importante induit le phénomène d'auto-ombrage), des caractéristiques pigmentaires des cellules algales (MALONE, 1982). Un apport insuffisant de lumière est

susceptible de limiter la productivité et la croissance même si les autres paramètres sont à des valeurs optimales (RICHMOND, 1999).

Toutefois, les organismes chlorophylliens ont non seulement développé des mécanismes de conversion énergétique réalisée, par la photosynthèse des chloroplastes pour croître et se développer mais également des systèmes multiples d'information sur leurs conditions d'éclairement (BALLARE *et al.*, 1987; MAZLIAK, 1998).

### **2.1.2- Température**

La cinétique de croissance algale est influencée par la température (RICHMOND, 1999), la vitesse de croissance augmentant en général avec la température. Ce paramètre permet de réguler les réponses cellulaires, physiologiques et morphologiques des microalgues (KUMAR *et al.*, 2010). La température peut provoquer des changements de la structure cellulaire, et notamment de son volume (RICHMOND, 2004). Ainsi, une température supérieure à la valeur optimale induit une augmentation du volume cellulaire (HARRIS, 1988).

Les microalgues tolèrent en général une gamme de température comprise entre 15 et 26 °C avec une concentration cellulaire optimale à 23 °C (KUMAR *et al.*, 2010). Des températures extrêmes, supérieures à 35 °C, peuvent constituer un optimum pour certaines espèces alors qu'elles peuvent être létales pour d'autres espèces. De plus, l'augmentation de la température affecte le métabolisme de fixation de  $CO_2$  par les microalgues.

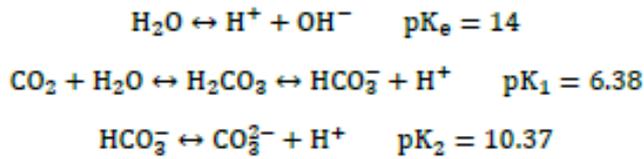
### **2.1.3- pH**

Ce paramètre dépend principalement de la concentration de  $CO_2$  dissous dans le milieu de culture et régie par les équilibres chimiques entre les différentes formes de carbone dans l'eau ( $CO_2$ ,  $H_2CO_3$ ,  $HCO_3^-$  et  $CO_3^{2-}$ ). Un grand apport de  $CO_2$  peut entraîner une acidification du milieu susceptible d'inhiber la croissance de plusieurs espèces de microalgues. De même, la présence de monoxyde de soufre, un élément toxique, entraîne une acidification importante du milieu et par là même une croissance limitée (KUMAR *et al.*, 2010). En conséquence, un contrôle du pH des cultures est nécessaire afin de favoriser la croissance de certaines espèces ayant des exigences environnementales particulières. De manière générale, la croissance algale est favorisée pour un pH proche de la neutralité.

### **2.1.3- Nutriments**

#### **2.1.3.1- Carbone**

La source de carbone d'une culture algale en condition d'autotrophie est présente en phase liquide sous forme de différentes espèces en équilibre :  $CO_2$ ,  $H_2CO_3$ ,  $HCO_3^-$  et  $CO_3^{2-}$ . Ces équilibres sont régis par les équations de dissociation de l'eau et du mélange carbonate bicarbonate à une température de 25°C (LIVANSKY, 1990 *in* FILLALI, 2012) :



Ces différentes formes de carbone constituent le carbone inorganique total « *CIT* ».

Durant la photosynthèse, la consommation du  $\text{CO}_2$  entraîne une augmentation progressive du pH, alors qu'en présence de concentrations importantes de  $\text{CO}_2$  dissous, le pH chute entraînant une consommation moindre de  $\text{CO}_2$  par suite de l'inactivation de l'enzyme « *rubisco* » responsable de l'activité de fixation de  $\text{CO}_2$ . (SOBCZUK et al., 2010).

Une préférence de l'espèce algale peut être distinguée vis-à-vis de l'une des formes du carbone ( $\text{CO}_2$  ou  $\text{HCO}_3^-$ ) selon le mécanisme biologique de concentration du  $\text{CO}_2$  ou « *MCC* ». Généralement, les microalgues présentent une préférence vis-à-vis de l'assimilation du  $\text{CO}_2$  comme source de carbone inorganique (CARVALHO et al., 2006 in FILLALI, 2012).

### **2.1.3.2- Azote**

L'azote constitue un élément nutritif essentiel pour la croissance algale. La teneur en azote des microalgues se situe aux alentours de 7 % de la matière sèche algale (BHOLA et al., 2011). La source d'azote pour la culture peut être organique (urée) ou inorganique (nitrate  $\text{NO}_3^-$ , ammoniacque  $\text{NH}_4^-$ ) (ALCAINE, 2010). L'azote, étant un des constituants des acides nucléiques et des protéines, est impliqué dans les principales voies métaboliques des microalgues (GREEN et DURNFORD, 1996). Ainsi, une augmentation de la concentration d'azote, jusqu'à une certaine valeur limite, entraîne une productivité cellulaire et protéique plus importante et une synthèse plus significative de chlorophylle.

La carence de cet élément induit une accumulation importante de réserve lipidique (polysaccharides et acides gras polyinsaturés "*AGPI*") (CHEN et al., 2011), une limitation de l'activité photosynthétique et cellulaire (ALCAINE, 2010) ainsi qu'une augmentation de la synthèse des caroténoïdes.

### **2.1.3.3- Phosphore**

Le phosphore est impliqué dans plusieurs voies métaboliques (CHEN et al., 2011). Il représente environ 1% de la matière sèche algale (RICHMOND, 2004). Les microalgues sont capables d'utiliser les formes inorganiques du phosphore ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) ainsi que ses formes organiques via le phénomène d'hydrolyse grâce à une enzyme de la famille des phosphatases (ALCAINE, 2010).

La carence en phosphore joue sur l'activité photosynthétique principalement au niveau de la fonction de l'enzyme « *rubisco* », indispensable à la fixation du  $CO_2$  (MAZILIAK, 1998; AGREN, 2004), sur l'accumulation des réserves lipidiques (WANG *et al.*, 2008) et sur la productivité en biomasse (BOROWITZKA, 1988). Selon YUN *et al.* (1997) il est nécessaire que le phosphore soit apporté en excès dans le milieu car il forme des précipités avec les ions métalliques et de ce fait pas toute la quantité de phosphore ajoutée est disponible.

#### **2.1.3.4- Micro-éléments**

Plusieurs micro-éléments organiques et inorganiques sont nécessaires à la croissance des microalgues, tels le soufre (*S*), le fer (*Fe*), le magnésium (*Mg*), le potassium (*K*), le sodium (*Na*) ; il en va de même d'oligoéléments tels le cuivre (*Cu*), le manganèse (*Mn*), le zinc (*Zn*), le cobalt (*Co*), le molybdène (*Mo*), etc.

Le soufre est un des éléments essentiels dans la composition de deux acides aminés : la cystéine et la méthionine. Une carence en soufre induit une inhibition de la synthèse protéique et de l'activité photosynthétique des microalgues (WANG *et al.*, 2008).

Une carence en fer entraîne des changements métaboliques cellulaires à travers une diminution de la densité et de la taille cellulaire et une inhibition de la synthèse protéique et lipidique (VALERA *et al.*, 2011 *in* FILLALI, 2012). Cet élément intervient également comme catalyseur lors de la synthèse de la chlorophylle (BECERRA-CELIS, 2009).

Le magnésium est indispensable à l'activité nitrogénase dans le métabolisme cellulaire des microalgues (WANG *et al.*, 2008). On a par ailleurs mis en évidence l'implication du cuivre, du fer et du zinc dans diverses fonctions enzymatiques telles que l'activité de l'anhydrase carbonique, enzyme impliquée dans le mécanisme d'assimilation du carbone (BUITENHUIS *et al.*, 2003 *in* FILLALI, 2012). De même, une carence en cuivre est susceptible d'affecter le mécanisme photosynthétique des microalgues (ROCHAIX, 2001). Une carence en molybdène peut influencer sur le processus métabolique d'assimilation de l'azote au niveau cellulaire (GLASS *et al.*, 2009).

La carence en certains oligo-éléments peut affecter plusieurs voies métaboliques telles que l'accumulation des triglycérides ou « *TAG* » (acide gras indicateur de stress environnemental durant la culture de microalgues) (CHEN *et al.*, 2011). Ces oligoéléments peuvent réagir avec d'autres éléments présents dans le milieu et précipiter ; il est donc souvent nécessaire d'ajouter un agent chélatant comme l'*EDTA* « *acide éthylène diamine tétraacétique* » afin d'éviter toute limitation en éléments nutritifs dans le liquide (FILLALI, 2012).

#### **2.1.3.5- Salinité du milieu**

Le changement de salinité du milieu induit un stress osmotique et ionique (sel) qui peut se traduire par la formation de précipités et une augmentation de la teneur lipidique des algues.

Ainsi, BOROWITZKA et BOROWITZKA (1990 in FILLALI, 2012) ont notés lors de stress ionique chez certaines espèces de *Dunaliella* une augmentation de la concentration en caroténoïdes s'ensuit une inhibition de leur croissance. En outre, selon LU et al. (1999) une augmentation de la salinité induit une inhibition de l'activité photosynthétique.

## **2.2- Production de la biomasse**

La plupart des microalgues sont photoautotrophes, c'est-à-dire qu'elles utilisent le  $CO_2$  et qu'elles tirent leur énergie de la photosynthèse. Or, il existe aussi des microalgues hétérotrophes qui sont capables de se développer sans utiliser l'énergie solaire, mais une source de carbone organique (SADI, 2012).

Le  $CO_2$  absorbé constitue environ 50 % du poids sec de la biomasse microalgale. Ce  $CO_2$  doit être apporté durant la période d'ensoleillement. Ainsi, un intérêt majeur réside dans la valorisation de  $CO_2$  émis par des centrales électrique, par exemple. La production à grande échelle de microalgues requiert une culture continue durant le jour. Les lipides extraits des microalgues peuvent être transformés en biodiésel suivant la réaction classique de transestérification. Les microalgues présentent également la particularité de produire des composés à hautes valeurs ajoutés permettant de rendre économiquement viables les installations (OUELLET, 2013).

Les microalgues et cyanobactéries peuvent être cultivées en photoautotrophie, en systèmes ouverts ou fermés qui peuvent être de tailles et de géométries variées et utiliser la lumière solaire et/ou artificielle, ou par hétérotrophie, bien connue et maîtrisée depuis des années pour la culture des bactéries (PERSON, 2010).

La culture des microalgues utilisant la lumière du soleil peut être effectuée soit dans des bassins à ciel ouvert ou des photobioréacteurs en forme de tube, rectangle, réacteur à agitation continue ou autre forme. (SADI, 2012).

### **2.2.1- Culture en photoautotrophie**

#### **2.2.1.1- Systèmes ouverts (Raceways)**

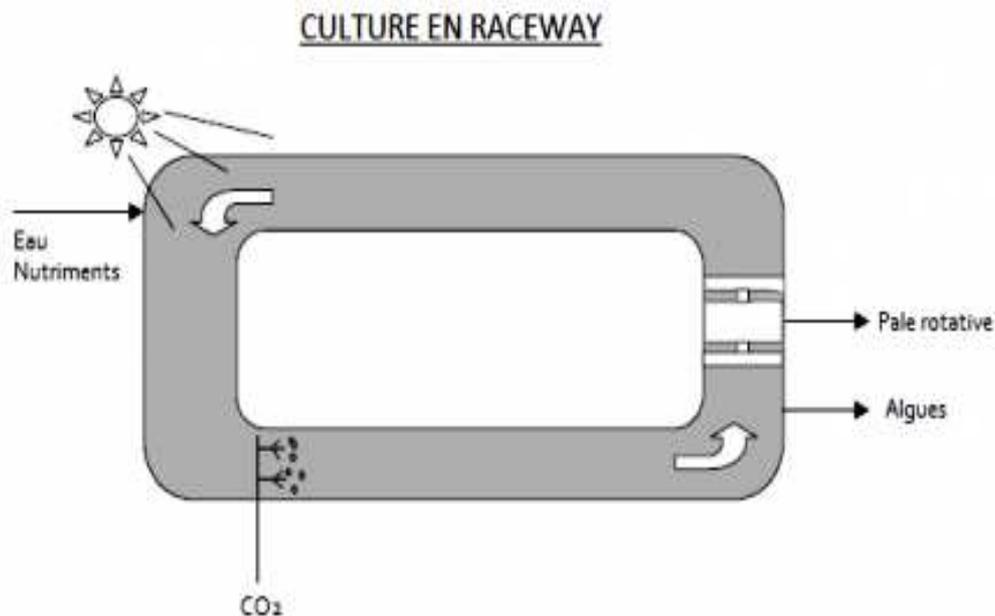
L'évaluation des technologies et de leurs rendements de conversion biosynthétique constitue la base de l'analyse technique du concept. Elle permet d'établir le potentiel de production et l'éventuelle faisabilité technique mais aussi de juger l'applicabilité pratique des variantes énergétiques du concept algal (DESCHENES, 2009).

Par principe, la culture ouverte nécessite des espèces robustes à la contamination. Elle est également peu contrôlée (maîtrise faible des paramètres physico-chimiques) et très dépendante des variations saisonnières et climatiques (production restreinte aux saisons propices). L'évaporation forte induit une consommation en eau élevée (qui limite néanmoins la montée en température de culture). Ce principe souffre souvent d'une double limitation par la lumière et

par l'apport en carbone, du fait d'un contact important avec l'air ambiant (PRUVOST et al, 2011).

Leur formes peuvent être circulaire ou allongée, uniques ou connectés les uns aux autres. L'eau est généralement maintenue en mouvement par des roues à aubes ou des structures en rotation, et un certain mélange peut y être accompli par des guides bien conçus (fig. 7) (PERSON, 2010).

Ces étangs sont utilisés lors d'une culture continue, les nutriments sont ajoutés face à la roue à aube et la récolte se fait derrière la roue après un moment de circulation (SADI, 2012). De nouveaux systèmes ouverts notamment améliorés ont été installés en Californie, Hawaii et à Roswell (Nouveau-Mexique). La productivité maximale obtenue est de 50 grammes de microalgues par mètre carré par jour (fig. 8). Ces bons résultats ont été obtenus en utilisant des espèces natives qui se sont naturellement développés dans les étangs. Au contraire, les espèces cultivées au laboratoire ne sont pas si performantes. Des problèmes liés aux basses températures ont été rencontrés, particulièrement la nuit, ce qui a conduit au développement d'une certaine forme de contrôle de température avec la clôture des étangs (BECERRA CELIS, 2009).



**Figure 7 :** Principe de fonctionnement des systèmes de culture ouverts (raceways)  
(source : <http://www.econologie.com/forums/le-vehicule-a-hydrogene-vu-par-total.html>)



**Figure 8** : Culture en raceways (source : <http://www.econologie.com/forums/le-vehicule-a-hydrogene-vu-par-total.html>)

### **2.2.1.2- Systèmes fermés (PBR)**

La culture en milieu isolé de l'extérieur se fait en système appelé « photobioréacteur » (PBR) (fig. 9) (PRUVOST et *al.*, 2011). Il est défini comme un système clos à l'intérieur duquel se déroulent, en présence d'énergie lumineuse, des interactions biologiques que l'on cherche à contrôler en maîtrisant les conditions de culture. En son sein, une réaction biochimique de photosynthèse a lieu dans le but de produire de la biomasse végétale à partir de microalgues, de  $CO_2$  et de lumière (OLIVO, 2007).

Les Photobioréacteurs offrent différents avantages: ils permettent la culture des souches microalgales sensibles qui ne pourraient pas faire face aux microorganismes polluants installés dans les systèmes ouverts, les productivités sont sensiblement plus élevées et peuvent être obtenues par un ajustement des conditions optimales de culture, les molécules destinées à la fabrication de produits de beauté ou les soins de santé peuvent être produites en respectant les normes de pureté et sûreté du produit. Ainsi, des photobioréacteurs pour la production des molécules pharmaceutiques en suivant les lignes directrices relatives aux bonnes pratiques de fabrication (BPF) ont également été décrites (BECERRA CELIS, 2009).

L'utilisation des photobioréacteurs revient plus chère que les systèmes d'étang à ciel ouvert, cependant ils nécessitent moins de lumière et d'espace pour la culture des microalgues. Les scientifiques préfèrent l'utilisation des photobioréacteurs, car ils assurent la croissance d'une seule espèce d'algue sans qu'elle rentre en compétition avec une autre espèce ou qu'elle soit contaminée (SADI, 2012).

La production des molécules intéressantes justifie l'investissement porté à la culture en photobioréacteur. La culture industrielle de ces microorganismes passe par le développement de photobioréacteurs fermés, stérilisables, contrôlés et à haute productivité (BECERRA-CELIS, 2009).

Il est à noter que le transfert du  $CO_2$  de la phase gazeuse vers la phase liquide est optimisé. Par ailleurs, du fait de la forte productivité des systèmes, l'oxygène doit aussi être éliminé en continu pour éviter des inhibitions de croissance (PERSON, 2010).

La culture des microalgues en milieu clos et plus précisément en photobioréacteurs permet d'obtenir plusieurs sources d'énergie valorisables.



**Figure 9** : Photobioréacteur (PBR) de laboratoire pilote à éclairage externe.

A : PBR solaire Plat (laboratoire GEPEA, France)

B : PBR Tubulaire (Solar Biofuels Research Centre, Allemagne)

C : PBR Cylindrique (laboratoire de l'Ifremer, France)

### **2.2.2- Culture en hétérotrophie**

Les microalgues de métabolisme hétérotrophe sont principalement cultivées dans des bioréacteurs fermés appelés fermenteurs (SADI, 2012) (fig. 10). Bien que le mot « bioréacteur » recouvre une grande variété de dispositifs, nous pouvons dire qu'il s'agit d'un espace contrôlé contenant des organismes vivants qui interagissent avec différents substrats. En suivant cette définition, nous pouvons trouver les dispositifs de laboratoire (le plus souvent des cultures pures), les bassins artificiels, mais aussi les écosystèmes naturels (lacs ou lagunes).

Ces systèmes sont composés de microorganismes, des substrats nécessaires pour leur croissance (c'est-à-dire *C*, *N*, *K*, *Na*, *Fe*,...), des catalyseurs pour démarrer ou accélérer une réaction et des produits synthétisés par ces microorganismes (BECERRA-CELIS, 2009). Il serait possible de croire que ces microorganismes peuvent utiliser n'importe quelle source d'hydrates de carbone pour remplacer le rayonnement solaire en tant que source d'énergie pour leur métabolisme, alors que tel n'est pas le cas (SADI, 2012).

Cependant, ce système nécessite des souches adaptées au mode de culture, des coûts d'installation et d'investissement importants dus aux réacteurs, et surtout des sources de carbone externes, stérilisées et en quantité équivalentes aux produits générés. Par ailleurs, cette technologie n'est pas adaptée à la production de bioénergie à partir d'énergie solaire. Cette technologie est donc utilisée pour la production de produits de haute valeur ajoutée (molécules organiques), il est à noter que ce système ne permet pas la production de pigments (PERSON, 2010).

Les photobioréacteurs se différencient des bioréacteurs classiques par la nécessité de fournir un substrat additionnel (lumière) en plus de conditions générales de culture (BECERRA – CELIS, 2009).

Les rendements du mode hétérotrophe sont indépendants du rayonnement solaire et ils dépendent des caractéristiques nutritives de leur milieu de culture. L'énergie chimique est répartie dans le volume même du réacteur. Les rendements des systèmes hétérotrophes sont exprimés en grammes par litre de milieu de culture et ils sont calculés sur des périodes variables de croissance (g/ litre/ temps). Mais les rendements des techniques autotrophes sont exprimés en grammes par mètre carré par période de culture (g/ m<sup>2</sup>/ temps) (DESCHENES, 2009).



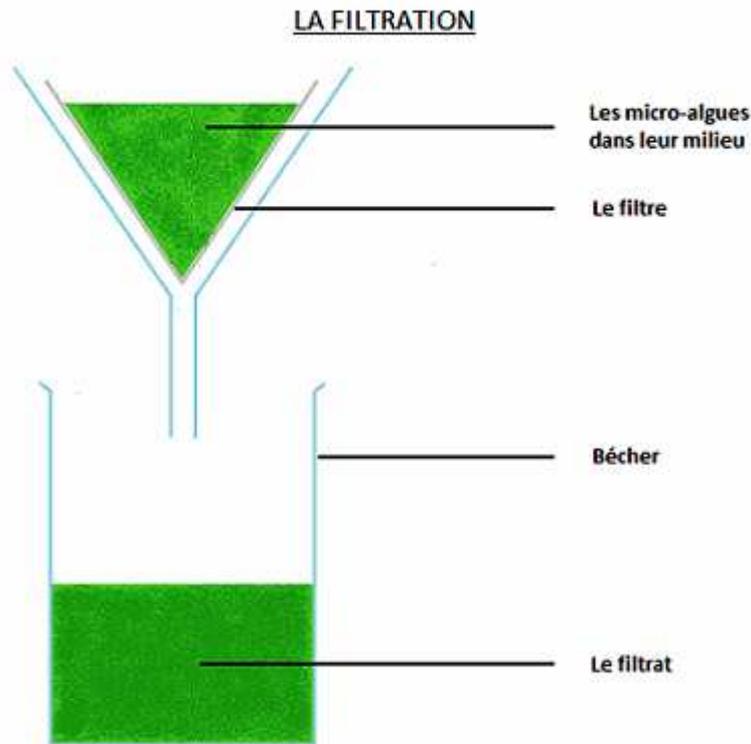
**Figure 10 :** Fermenteur de production d'Oméga-3 à partir de microalgues (FERMENATLG, 2013).

### **2.2.3- La récolte des microalgues**

Récolter des cellules de quelques microns de diamètre qui ont une densité proche de l'eau n'est pas une tâche aisée, ce qui rend la récolte de ces dernières difficiles et délicates, car elle consiste à séparer ces micro-organismes du milieu dans lequel ils se trouvent. Cette étape clé est trop souvent passée sous silence et constitue une réelle étape limitante dans une optique de production de biocarburants (CADORET et BERNARD, 2008).

Les techniques de séparation solide-liquide largement employées sont : la centrifugation, la fraction de la mousse, la floculation. Néanmoins, la méthode de la récolte dépend de l'espèce elle-même, de la densité des cellules et souvent des conditions de la culture (SADI, 2012).

Ainsi, la filtration peut être utilisée pour récupérer de grandes quantités de biomasse par l'utilisation d'un filtre (fig. 11). Mais pour certaines applications, elle s'avère relativement lente, ce qui peut être insatisfaisant. En effet, ce procédé est plus adapté pour les grandes microalgues telles que *Coelastrum proboscideum* et *Spirulina platensis* mais ne peut pas récupérer les plus petites comme *Scenedesmus*, *Dunaliella* et *Chlorella* (ANEX, 2012).



**Figure 11** : Principe de la filtration (source : <http://micro-algues-tpe.eklablog.com>)

Pour les petites microalgues, c'est la centrifugation qui est le procédé le plus efficace (ANEX, 2012) ; c'est une technique utilisant la force centrifuge, c'est à dire l'action sur le nombre de g : l'intensité gravitationnelle, pour séparer des particules solides en suspension dans un fluide, ici les algues en suspension dans leur milieu de culture. L'appareil utilisé pour réaliser cette séparation est nommé centrifugeuse (fig. 12), qui permet de séparer les éléments du mélange en les faisant tourner à grande vitesse (PERSON, 2010). Cette technique est toutefois considérée comme étant trop dispendieuse et énergivore pour la production d'algocarburants (SADI, 2012).



**Figure 12** : Centrifugeuse modèle *Hettich*

La floculation et l'autofloculation sont aussi des méthodes communément utilisées pour concentrer les microalgues. La floculation est réalisée grâce à l'ajout de floculants tels le chlorure d'aluminium et de fer. Ces floculants permettent l'agglomération de la biomasse algale qui, étant donné sa densité plus élevée, précipitera et pourra être facilement récoltée (fig. 13). L'autofloculation consiste en l'induction d'un stress tels un pH extrême, une augmentation ou diminution de la température optimale ainsi qu'une modification de la concentration en nutriments qui entraîneront une floculation de façon naturelle des microalgues (CANTIN, 2010).

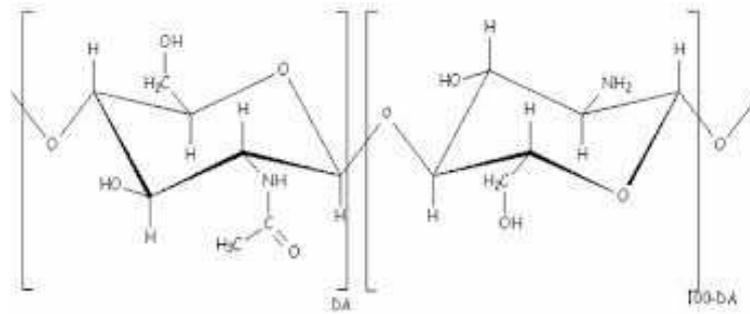


Flacon de Gauche : Avant floculation  
Flacon de Droite : Après floculation

**Figure 13 :** La floculation (source : <http://micro-algues-tpe.eklablog.com>)

Certaines souches peuvent avoir une tendance naturelle à flotter, en particulier celles riches en lipides. Pour les autres le phénomène de flottation est produit par une action sur la différence de masse volumique et le diamètre des cellules (PERSON, 2010).

D'autres technique plus naturelles comme l'utilisation de molécule organique d'origine naturelle exp. le *Chitosan* sont utilisées (fig. 14). Toutefois, hormis leur avantage certain puisque compatible avec la nutrition humaine et animale, avec la cosmétique et la pharmacologie, leur prix ainsi que leur disponibilité font qu'ils restent inabordables.



**Figure 14 :** flocculant naturelle le *Chitosan* (source Wikipedia)

Aujourd'hui, nous assistons chaque jour à la naissance de techniques plus inventives les unes des autres. Ainsi, des laboratoires de recherche ont mis au point une nouvelle technique de floculation dite l'Electrofloculation, qui consiste en l'envoi de pulses électromagnétiques pour déstabiliser les charges superficielles des microalgues ce qui provoque leur floculation (fig. 15), une technique toujours au stade recherche développement dont seule l'avenir nous dira si elle fut bénéfique car au stade actuel elle reste énergivore surtout dans le cas d'une production à grande échelle.



**Figure 15 :** Electrofloculation de microalgues (CABATUANDO et *al.*, 2011).

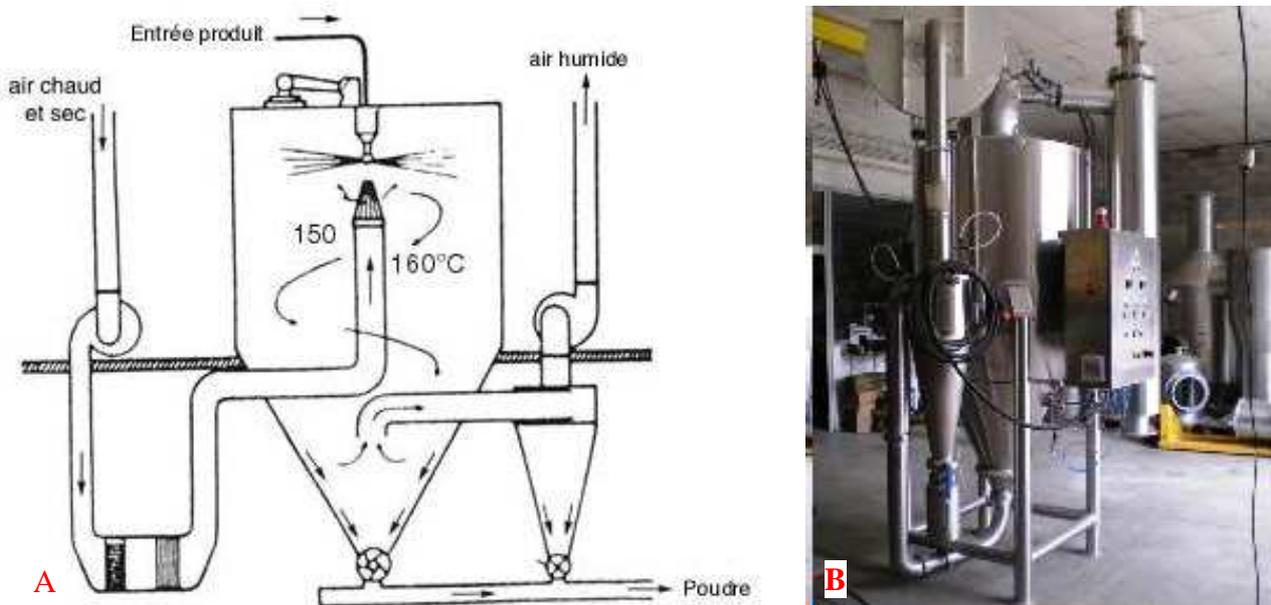
### 2.2.4- Le séchage de la pâte algale

Certains procès demandent la déshydratation de la biomasse qui augmente également sa durée de vie et celle du produit final. Plusieurs méthodes ont été employées pour le séchage des microalgues telles que *Chlorella*, *Scenedesmus* et *Spirulina* (RICHMOND, 2004).

Ces procédés courants sont le séchage par atomisation, le séchage dans des tambours, la lyophilisation et le séchage au soleil. En raison de la teneur élevée en eau de la biomasse algale, le séchage au soleil n'est pas une méthode très efficace pour la production de poudre d'algues et le séchage par atomisation n'est pas économiquement faisable pour les produits de faible valeur comme les biocarburants (ANEX, 2012).

Le séchage par atomisation est une méthode de déshydratation d'un liquide (jus, lait, ...) sous forme de poudre par passage dans un flux d'air chaud. Lors de la déshydratation par atomisation, le liquide est pulvérisé en fines gouttelettes, dans une enceinte cylindrique verticale au contact d'un courant d'air chaud afin d'évaporer l'eau. La poudre obtenue est entraînée par le flux de chaleur jusqu'à un cyclone ou un filtre à manche va séparer l'air de la poudre (PERSON, 2010) (fig. 16).

Le séchage par lyophilisation consiste à ôter l'eau d'un produit liquide, pâteux ou solide, à l'aide de la surgélation puis une évaporation sous vide de la glace sans la faire fondre (sublimation). La vapeur d'eau quitte le produit puis est capturée par congélation à l'aide d'un condenseur, ou d'un piège à froid. Cette technique permet de conserver à la fois le volume, l'aspect et les propriétés du produit traité. Cette technique reste la plus consommatrice en énergie (PERSON, 2010).



**Figure 16 :** Séchage par atomisation

A : Schéma détaillé du procédé d'atomisation (CHEFTEL et BESANCON, 1977).

B : Tour de séchage pilote (source : <http://www.techni-process.com>)

### 2.3- Application des microalgues

Outre l'intérêt écologique considérable comme agents épurateurs des eaux usées, les algues microscopiques jouent un rôle important dans de nombreux domaines (fig. 17) : elles sont utilisées en agriculture comme engrais biologique pour la fertilisation des sols pauvres, en particulier les sols sahariens squelettiques dont la structure est amoindrie par l'abondance des ions sodium dans l'eau d'irrigation, ce qui engendre des conditions asphyxiantes très défavorables ; ainsi l'apport d'algues microscopiques riches en azote à ce type de sol, peut corriger l'insuffisance en matière organiques.

Par ailleurs, les microalgues constituent également un gisement prometteur de molécules d'intérêt pour de nombreux secteurs d'activité tels que la santé, la pharmacie, la parapharmacie, la cosmétologie, l'agroalimentaire et la chimie. Les molécules extraites des algues sont de nature très variée et possèdent de nombreuses activités reconnues (ex. antioxydant, anti-inflammatoire, cytotoxique et antimicrobien).

Ces mêmes algues représentent une source potentielle de protéines alimentaires non négligeable (50 à 60 % du poids sec) pour l'homme et l'animal qu'il soit terrestre ou aquatique. En effet, ces organismes sont considérés comme le premier maillon de la chaîne alimentaire (phytoplancton) pour les producteurs secondaire (poissons, crustacés, ...) ; elles représentent indéniablement le nutriment essentiel en aquaculture (croissance et développement des poissons)

<b>VALORISATION DES MICROALGUES</b>		
<b>NUTRITION</b>	<b>SANTE</b>	<b>COSMETIQUE</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutraceutiques,</li> <li>• Complément alimentaire,</li> <li>• Aquaculture</li> <li>• Nutrition animale,</li> <li>• Colorants naturels</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Omega-3 (OHA, EPA),</li> <li>• Antioxydant,</li> <li>• Marqueurs fluorescents,</li> <li>• Molécules recombinantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antioxydant,</li> <li>• Photoprotection,</li> <li>• Régénération cellulaire,</li> <li>• Colorants naturels</li> </ul>
<b>ENERGIE</b>	<b>ENVIRONNEMENT</b>	<b>CHIMIE</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algocarburants,</li> <li>• Bioéthanol,</li> <li>• Biométhane</li> <li>• Production H<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomitigation du CO<sub>2</sub>,</li> <li>• Bioremédiation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Source de Synthons,</li> <li>• Colorants naturels,</li> <li>• Molécules naturelles</li> </ul>

**Figure 17** : Les différents domaines de valorisation des microalgues (A.R.V.A.M.)

Malgré le potentiel biotechnologique incroyable de cette ressource, les microalgues sont encore très peu exploitées ; seulement quelques espèces sont commercialisées actuellement (tab. III).

**Tableau III** : Les principales espèces de microalgues commercialisées

<b>Espèces</b>	<b>Produits</b>	<b>Exemples d'applications</b>
<i>Aphanizomenon flosaquae</i>	β-carotène	Nutrition
<i>Arthrospira</i> (ou Spiruline)	Phycocyanine, Biomasse	Complément alimentaire, Nutrition, Cosmétique
<i>Chlorella</i>	Biomasse	Complément alimentaire, Nutraceutique, Complément alimentaire, Nutrition animale
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	PUFA* Oméga 3	Nutraceutique, Complément alimentaire
<i>Dunaliella salina</i>	β-carotène, Astaxanthine	Nutraceutique, Pharmaceutique, Nutrition animale
<i>Haematococcus pluvialis</i>	β-carotène, Astaxanthine	Nutraceutique, Pharmaceutique, Nutrition animale
<i>Isochrysis galbana</i>	PUFA* Oméga 3, 6	Nutrition animale, Aquaculture
<i>Nannochloropsis</i>	Biomasse	Aquaculture, Algocarburants
<i>Odontella aurita</i>	PUFA* Oméga 3	Nutraceutique, Pharmaceutique, Cosmétique
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Lipides, PUFA*	Nutrition, Aquaculture, Algocarburants
<i>Porphyridium cruentum</i>	Polysaccharides	Pharmaceutique, Cosmétique, Nutrition
<i>Shizochytrium</i>	PUFA* Oméga 3	Nutraceutique

\*PUFA: polyunsaturated fatty acids (acides gras polyinsaturés) (source: A.R.V.A.M.)

### 2.3.1- Domaine alimentaire

L'utilisation des microalgues comme source de nourriture vient des pratiques ancestrales de populations sujettes à la famine. Les chinois utilisaient la microalgue *Nostoc commune* pour assurer leur alimentation il y a plus de 2000 ans. Actuellement, la plus connue dans ce domaine est une microalgue appelée *Arthrospira platensis*, ou Spiruline (BECERRA – CELIS, 2009).

Aujourd'hui, environ 145 de ces végétaux aquatiques entre dans la catégorie des microalgues alimentaires, 36 % appartiennent aux Chrysobiontes, 48 % aux Rhodobiontes, 15 % aux Chlorobiontes et 1 % aux Cyanobiontes, et trois types de microalgues parmi ce panel couvrent à elles seules 99 % de la demande mondiale : les algues rouges *Porphyra*, la Chrysobionte *Laminaria japonica* et *Undaria pinnatifida*, plus communément connue sous la dénomination de Fougère de mer (PIERRE, 2010).

C'est dans un contexte de pénurie alimentaire en 1940 que les chercheurs se sont intéressés aux microalgues en tant qu'aliment, à cause de leurs teneurs en protéines. La première installation industrielle a vu le jour dans les années 1960 au Japon et, dès les années 1980, l'Asie produit une vingtaine de tonnes par an principalement du genre *Chlorella* (JENCK et al., 2011) (fig. 18a).

Les protéines sont d'une importance majeure dans la nutrition humaine, Certaines algues contiennent jusqu'à 60 % de protéines. La cyanobactérie *Arthrospira* est une algue célèbre, actuellement cultivée pour sa forte teneur en protéines (PERSON, 2010) (fig. 18b).

Les microalgues sont considérées comme une source potentielle d'omégas 3 et 6 utilisés en nutrition humaine et animale.

En outre, les microalgues ont un potentiel intéressant dans la production de pigments. Le carotène est un colorant, actuellement extrait de *Porphyridium cruentum*, qui sert notamment à colorer la margarine (DABBADIE, 1992), et comme additif dans l'alimentation animale (pour donner une couleur orangée à la chair du poisson et au jaune d'oeuf de la poule) (BECERRA – CELIS, 2009).

Une autre microalgue qui est toute aussi bien représentée est *Dunaliella salina* et qui en est la plus riche en polysaccharides utilisés en tant que agents gélifiants ou épaississants tel que  $\beta$  carotène. Le glycérol (molécule intervenant dans les systèmes d'osmorégulation des microalgues), est exploité dans l'agroalimentaire comme édulcorant et c'est l'algue *Dunaliella salina* qui en est la plus riche (FILALI, 2012).

Les microalgues peuvent être intégrées à l'alimentation en aquaculture marine (GHOBRINI et al., 2014), elles sont essentielles au cours des processus d'éclosion et de nurserie de mollusques de bivalves, crevettes, et quelques élevages de poissons. Les microalgues sont également utilisées pour produire du zooplancton, généralement des rotifères, qui sont donnés comme nourriture aux poissons carnivores fraîchement éclos (PERSON, 2010). De même qu'elles apparaissent également comme de bons fertilisants des sols pauvres puisqu'elles

apportent notamment du potassium, de l'azote et éléments essentielles à la croissance végétale (GHOBRINI *et al.*, 2014).



**Figure 18 :** Formes nutritives des microalgues (source : <http://www.wordpress.com>)

A : La Chlorelle (*Chlorella vulgaris*)

B : La Spiruline (*Arthrospira Platensis*)

### 2.3.2- Domaine pharmaceutique

Au vu de leur grande diversité biochimique, les microalgues représentent une source intéressante de molécules bioactives et de toxines utilisables dans le développement de nouveaux médicaments (FILALI, 2012). Ainsi Plusieurs études ont permis de mettre en évidence l'implication des microalgues dans le domaine pharmaceutique par l'identification de nouvelles molécules naturelles (GHOBRINI *et al.*, 2014).

Les microalgues contiennent une multitude de pigments associés au captage de la lumière incidente. Les caroténoïdes issus des microalgues présentent déjà de nombreuses applications sur le marché (PERSON, 2010).

Les caroténoïdes ont des propriétés intéressantes en termes de protection par rapport à certaines pathologies. Un effet thérapeutique préventif vis-à-vis du cancer est aussi parfois attribué à ces molécules. Par contre, les phycobiliprotéines sont largement utilisées dans des laboratoires en immunologie. En effet, leurs propriétés en font des réactifs fluorescents hautement sensibles et très puissants (BECERRA-CELIS, 2009).

Le  $\beta$ -carotène est un pigment synthétisé par l'algue *Dunaliella* (FILALI 2012), ce caroténoïde précurseur de la vitamine A est un antioxydant (JENCK *et al.*, 2011).

Le criblage d'extraits de microalgues par les industrielles pharmaceutiques et les laboratoires de recherches dans le domaine médicale afin d'identifier des molécules actives et des médicaments potentiels est en plein essor ; ainsi des molécules telle que la *tubercidine*,

une molécule cytotoxique, a été identifiée chez la microalgue *Tolythrixbyssoides* ainsi que chez les cyanobactéries. Elle présente une action effective *in vitro* contre un type de leucémie lymphoïde (FILALI 2012).

Diverses microalgues marines produisent naturellement des acides gras polyinsaturés (AGPI) (JENCK et al., 2011). Les (AGPI) sont connus pour jouer un rôle important dans la réduction des maladies cardio-vasculaires, l'obésité, le métabolisme des cellules comprenant la régulation de la fluidité membranaire, le transport des électrons et de l'oxygène, ainsi que la capacité d'adaptation thermique (PERSON, 2010).

De plus, la présence des glycolipides comme les acides gras polyinsaturés à longues chaînes leur permettent d'entrer sur le marché des réactifs biochimiques et de la recherche médicale grâce aux propriétés anti *HIV* prometteuses (BECERRA – CELIS, 2009).

### **2.3.3- Domaine cosmétique**

Les extraits d'algues sont régulièrement utilisés dans des crèmes cosmétologiques. Certaines molécules d'origine algale sont même utilisées en tant qu'excipient dans l'élaboration de produits dermatologiques (alginates).

De nombreuses recherches tendent à valoriser l'utilisation des algues, notamment à la vue des enjeux économiques considérables liés aux produits cosmétologiques d'appellation biologique (PIERRE, 2010).

A cet effet, des extraits d'algues, ayant une activité antioxydante, sont exploités sur le marché dans la fabrication des produits de soin capillaire, du visage et de la peau ainsi que dans les crèmes solaires (FILALI, 2012).

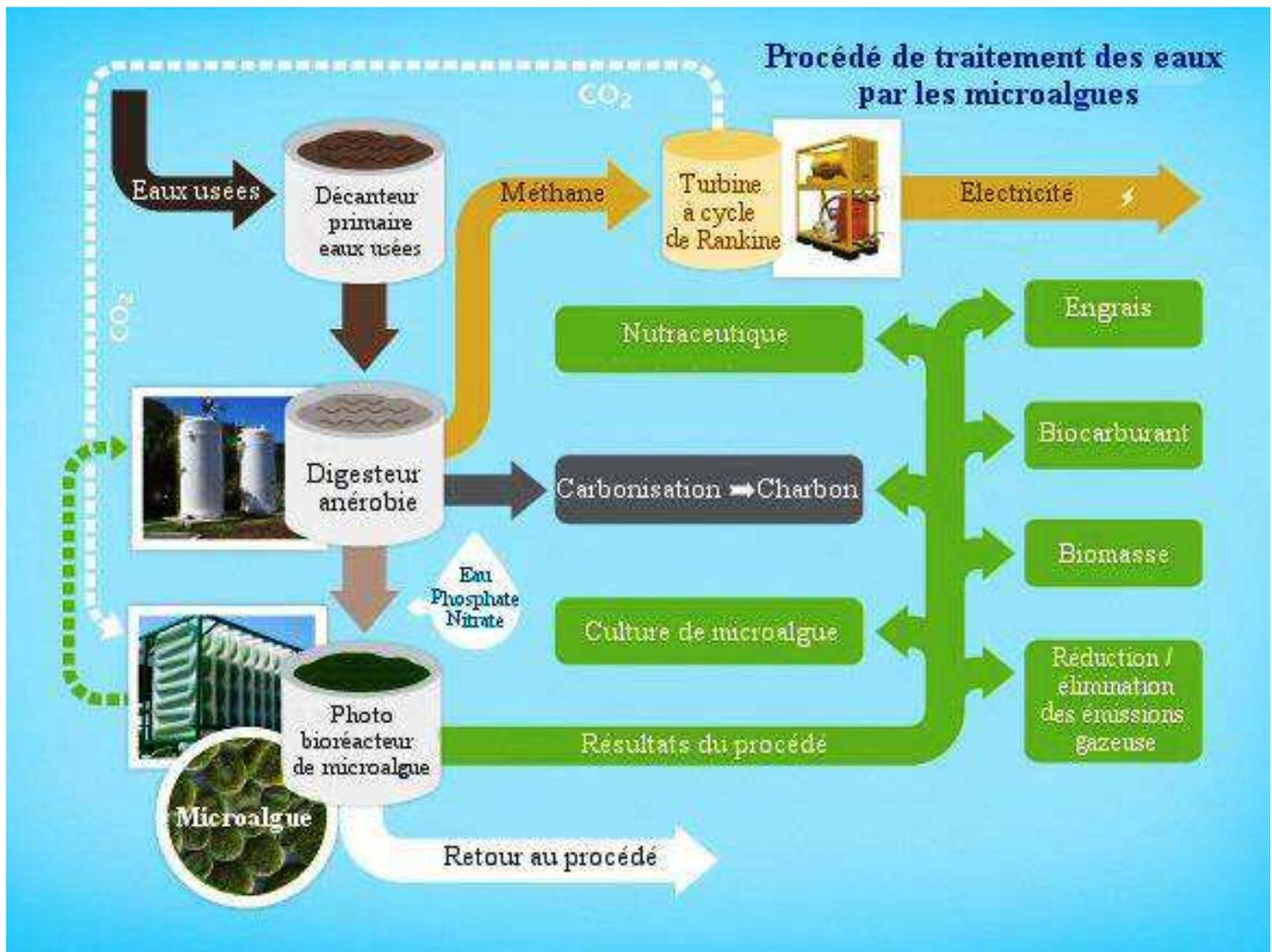
La Dermochlorine, extrait de la microalgue *Chlorella vulgaris*, permet de densifier et protéger le collagène et l'élastine du visage. Ce produit améliore par ailleurs la régénération des cellules du derme, le rendant incontournable dans les produits cosmétiques anti-rides (PIERRE, 2010).

Aussi, des extraits protéiques de la souche *Arthrospira* entraînent une réparation des premiers signes de vieillissement de la peau.

Par ailleurs, les pigments issus des microalgues sont également utilisés dans le domaine cosmétique (FILALI, 2012).

### 2.3.4- Domaine environnemental

L'utilisation des microalgues dans le secteur de l'environnement s'intègre dans une optique de dépollution avec pour idée de transformer nos déchets en produits ; comme par exemple le traitement des eaux usées chargées en nitrates, phosphates, l'épuration d'effluents gazeux contenant du  $CO_2$  mais aussi divers oxydes  $NO_x$ ,  $SO_x$ , et la bioremédiation possible des sites pollués... (fig. 19) (PERSON, 2010).



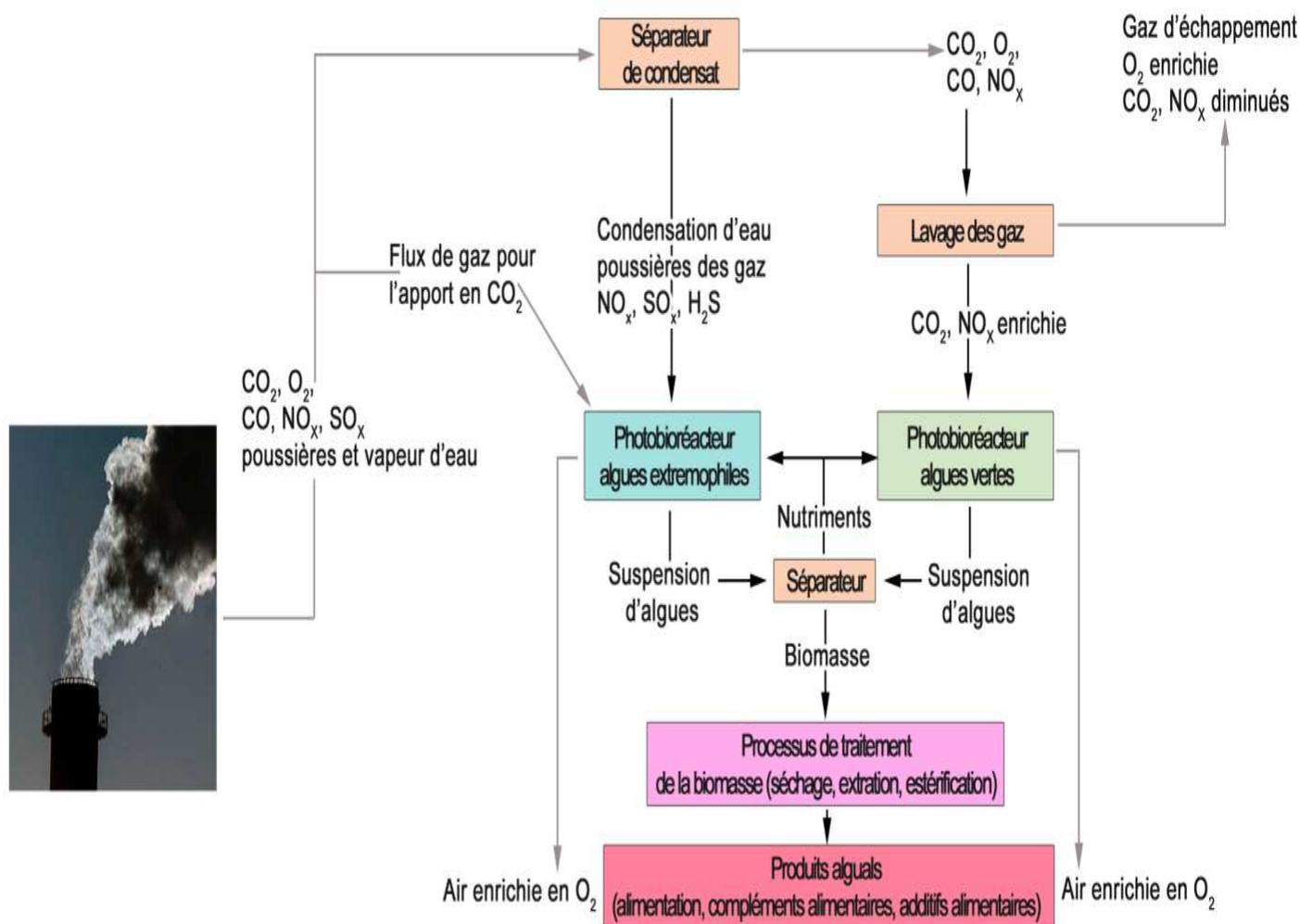
**Figure 19 :** Procédé de traitement des eaux par les microalgues (FILALI, 2012)

Au vu de leur capacité d'assimilation de nombreux nutriments nécessaires à leur croissance, les microalgues représentent une solution intéressante pour éliminer ces éléments ; elles sont également capables de fixer des métaux lourds. Elles sont ainsi les principaux éléments biologiques de certains systèmes de traitement des eaux municipales et industrielles (essentiellement traitement tertiaire). Grâce à l'absorption de l'azote et du phosphore, elles

contribuent à réduire le phénomène d'eutrophisation de certains milieux aquatiques (FILALI, 2012).

Pour éviter la pollution de la nappe phréatique, il est possible de cultiver des algues à partir de ces déchets organiques, et de les épandre ensuite par l'eau d'irrigation. Les matières organiques contenues dans les algues établiront alors des liaisons avec les argiles du sol en formant un complexe argilo-humique qui ne libérera ses matières minérales que très progressivement, préservant ainsi la nappe phréatique (DABBADIE, 1992).

Les centrales thermiques, les cimenteries, les raffineries sont très productrices de  $CO_2$ . Les microalgues produisent de l'énergie tout en consommant du carbone créant ainsi des bénéfices environnementaux, mais également des retombées économiques pour les entreprises polluantes (fig. 20) (PERSON, 2010).



**Figure 20 :** Représentation schématique du procédé de fixation de  $CO_2$  par les microalgues à partir de gaz d'échappement industriel (FILALI, 2012)

La biomasse algale est connue pour améliorer la composition minérale des sols et leur capacité de liaison avec l'eau. Ce sont les cyanobactéries qui, grâce à leur capacité de fixer l'azote gazeux, contribuent à maintenir la fertilité des écosystèmes naturels ou de cultures. Leur présence dans les champs de riz améliore la qualité des récoltes. Malgré tout, c'est une technique qui n'a pas été adoptée largement par les agriculteurs mais qui mérite d'être reconsidérée et améliorée. Par exemple, au Japon, *Chlorella vulgaris*, est utilisée pour stimuler la biosynthèse de chlorophylle ce qui améliore la croissance des plantes. Elle est aussi considérée comme un engrais car elle favorise la croissance d'actinomycètes, bactéries utiles dans le sol (BECERRA – CELIS, 2009).

### **2.3.5- Domaine énergétique**

Aujourd'hui, nous avons besoin des biocarburants pour remplacer les carburants d'origine pétrolière utilisés pour les transports. Ces derniers contribuent au réchauffement climatique et constituent une ressource épuisable (CHISTI, 2007). Les biocarburants obtenus à partir de matériaux organiques renouvelables se présentent comme une alternative aux énergies d'origine fossile pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et assurer une indépendance énergétique (BECERRA CELIS, 2009).

Le concept algal repose sur le principe de capter et de concentrer des formes renouvelables diffuses et irrégulières d'énergie comme le rayonnement solaire ou l'énergie chimique de certains rejets en les convertissant en biomasse algale, une forme stable et concentrée d'énergie. De la biomasse algale, il est possible d'extraire des biocarburants, une forme concentrée, stable et polyvalente d'énergie (GHOBRINI *et al.*, 2014).

La valorisation de la biomasse algale peut se traduire par la production de bioénergie sous forme d'électricité et/ou de chaleur par combustion directe, ou sous forme de biométhane après méthanisation ou sous forme de biocarburant ou d'hydrogène. Cependant, cette valorisation ne sera concurrentielle qu'avec une forte productivité de biomasse, une possibilité de récolte mécanique simple et un coût de production plus réduit que les procédés mettant en œuvre d'autres types de biomasse (FILALI, 2012).

Le potentiel des microalgues pour la mise en place de nouvelles filières de bioénergie, à partir de leurs constituants polysaccharidiques (bioéthanol, biogaz) ou lipidiques (biodiesel, biokérosène) ou même directement de leur biomasse (voies thermochimiques classiques) est lié à leur grande biodiversité, non encore complètement explorée, à leur productivité espérée et au fait que leur production n'entre pas en compétition avec les cultures vivrières (fig. 21).

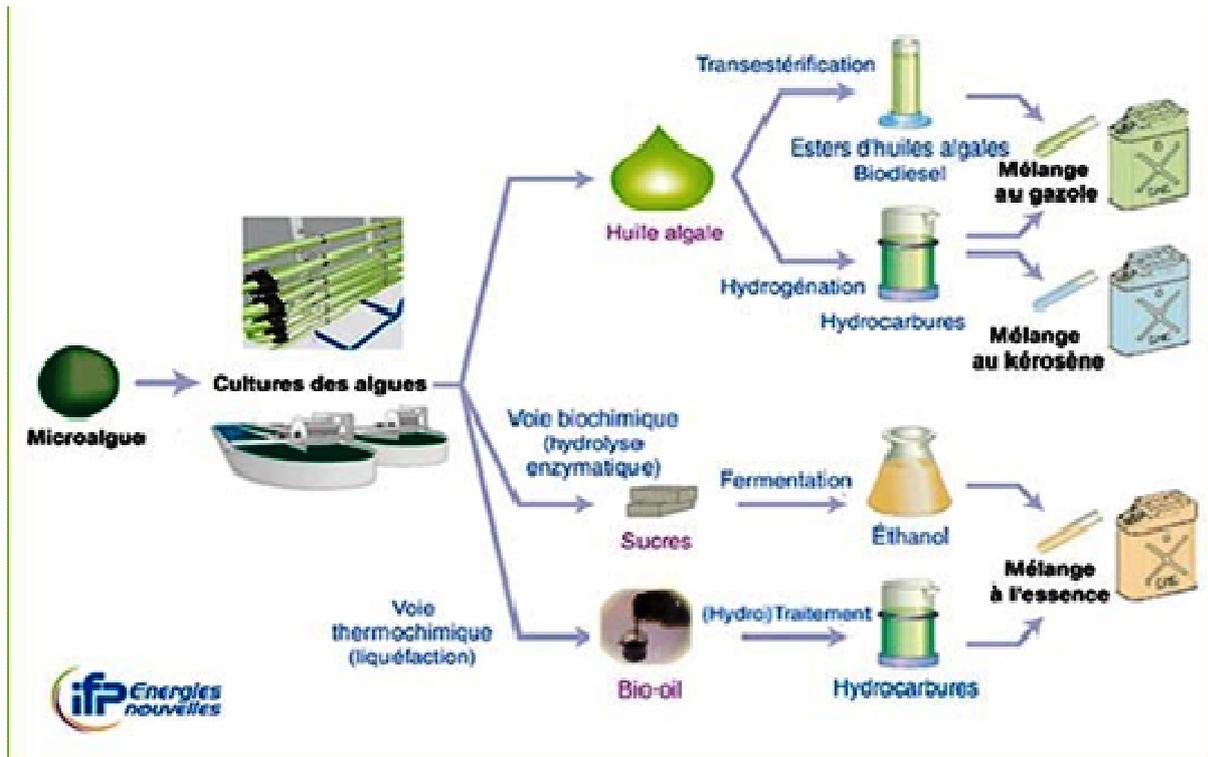


Figure 21 : Procédés de production de biocarburant via microalgue

(source : <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/>)

*Biocarburant*  
*Via*  
*microalgues*

### **3- Les biocarburants à partir de microalgues**

L'expression « biocarburant » (du grec *bios, vie, vivant* et du latin *carbo, charbon, carbone*) signifie que ce carburant est obtenu à partir de matériaux organiques. Il est peut être plus approprié d'appeler ces carburants « agrocarburants ». Les biocarburants (ou agrocarburants) sont des carburants produits à partir de matériaux organiques renouvelables et non-fossiles (HAMAD, 2009). L'appellation « biocarburant » a été promue par les industriels de la filière et certains scientifiques. Biocarburant est la dénomination retenue par le Parlement européen (CHAIB, 2011).

Afin d'utiliser des microalgues comme biocarburant, elles doivent également posséder un pouvoir calorifique élevé et doivent être capable de croître dans de grands volumes. La principale contribution au pouvoir calorifique des cellules est la teneur en glucides, protéines et lipides. Les microalgues cultivées dans des conditions normales possèdent un pouvoir calorifique de 18 – 21 kJ/g, tandis que celui du petrodiesel est de 42 kJ/g.

Les microalgues peuvent subir différentes transformations pour être valorisées en biocarburants. Elles peuvent accumuler des acides gras (jusqu'à 80% de leur poids sec). Ces acides gras doivent être extraits puis transésterifiés pour produire du biodiesel. D'autres espèces de microalgues peuvent contenir des sucres et ainsi être fermentées en bioéthanol. Enfin, ces microalgues peuvent être méthanisées pour produire du biogaz (MARICHAL, 2013).

Ainsi, le biodiesel produit à partir de microalgues semble constituer le seul biocarburant capable de remplacer complètement les carburants d'origine pétrolière utilisés pour les transports sans pour autant affecter l'approvisionnement en nourriture et en produits agricoles divers (CHISTI, 2007).

L'idée d'utiliser les microalgues comme sources de carburant n'est pas nouvelle mais elle commence à être prise en compte sérieusement en raison de l'escalade des prix du pétrole et du réchauffement de la planète qui est associé à la consommation des combustibles fossiles (HAMAD, 2009).

La production d'agrocarburants est aujourd'hui très controversée parce qu'il a été constaté une augmentation de la déforestation des forêts tropicales, de la pollution des eaux et des sols ainsi qu'une augmentation des émissions de gaz tels que le  $CO_2$  et le  $N_2O$ . De plus, la compétition avec les terres cultivables s'est récemment accélérée (RENGEL, 2010).

Dans ce contexte, l'utilisation de microalgues pour la production d'énergie suscite un intérêt croissant. Les procédés de transformation tels que la digestion anaérobique, la fermentation, la liquéfaction hydrothermale, la pyrolyse et la gazéification sont entre autres étudiés pour l'exploitation de la biomasse algale.

La comparaison avec les plantes terrestres permet d'identifier de nombreux avantages parmi lesquels (RENGEL, 2010) :

- une productivité plus élevée ;

- selon l'espèce, les algues peuvent être cultivées dans des eaux douces ou salées et, potentiellement, dans des eaux usées ;
- les algues peuvent absorber des métaux lourds ; puisque les algues utilisent de l'azote et du phosphore pour se reproduire, elles peuvent traiter les eaux usées ;
- les fumées de centrales électriques peuvent être utilisées dans la culture de microalgues ;
- les systèmes de culture peuvent être installés sur des surfaces qui ne sont pas cultivables, par exemple les zones autour de sites industriels.

### **3.1- La filière bioéthanol**

#### **3.1.1- Généralité**

Le bioéthanol est un biocarburant utilisé dans les moteurs à essence. Le terme bioéthanol est un amalgame entre le préfixe bio du grec bios, vie, vivant et du terme éthanol ou alcool éthylique. Le préfixe bio indique que l'éthanol est produit à partir de matière organique (biomasse). Cet éthanol produit est identique à celui qu'on retrouve dans toutes les boissons alcoolisées. Il peut être mélangé à l'essence en des proportions allant de 5 à 85 %, aussi, des adaptations aux moteurs de voitures sont souvent nécessaires (TOGNANG MBENDOU, 2013). L'éthanol est un biocarburant non toxique (à la manipulation notamment) et biodégradable (PALLUET et PINEAU, 2012).

L'éthanol est un composé chimique de formule brute  $C_2H_6O$ , cette molécule appartient à la famille des alcools à cause de la liaison  $C-OH$ . À température ordinaire, l'éthanol est un liquide limpide, incolore, ayant une agréable odeur caractéristique. Il est soluble dans l'eau et dans la plupart des solvants organiques et constitue un excellent solvant pour de nombreux composés. L'éthanol a une température de fusion de  $-114,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , une température d'ébullition de  $78,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , une température de solidification de  $-112\text{ }^{\circ}\text{C}$  et une densité de 0,789 à  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sa masse molaire est de 46,07 g/mol et son pouvoir calorifique est de 21.3 MJ/l (TOGNANG MBENDOU, 2013).

Il existe deux façons principales de produire de l'éthanol, à savoir par synthèse à partir d'hydrocarbures et à partir de biomasse. Seule cette deuxième façon de procéder mérite l'appellation « bioéthanol ». Il s'agit d'un vecteur énergétique issu de l'agriculture et appartenant à la famille des énergies renouvelables. Là également, l'idée d'utiliser ce liquide comme carburant n'est pas nouvelle. Tous les sucres fermentescibles (glucose, saccharose, etc.) peuvent être transformés en éthanol par fermentation. Ces sucres sont présents dans un état plus ou moins polymérisé dans de nombreuses espèces du monde végétal (CHAIB, 2011).

#### **3.1.2- Production de bioéthanol à partir des microalgues**

Le bioéthanol issu des microalgues est dit de troisième génération. Les microalgues comme *Chlorella*, *Dunaliella*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus* et *Spirulina* sont connues par leur

importante quantité d'amidon et de glycogène contenus dans leurs cellules ; ils représentent plus de 50 % de leur poids total sec (SADI, 2012).

La production de bioéthanol à partir des microalgues est obtenue par un procédé de fermentation. Les microalgues contiennent des carbohydrates qui peuvent être fermentés en bioéthanol (JENCK *et al*, 2011).

### 3.1.3- La fermentation

La fermentation est déjà utilisée commercialement à grande échelle dans différents pays pour produire de l'éthanol à partir de cultures de sucre et d'amidon. L'éthanol peut être produit à partir d'une grande variété de glucides. La réaction chimique est composée de l'hydrolyse enzymatique de saccharose suivie par la fermentation des sucres simples obtenus précédemment.

La fermentation du saccharose est effectuée en utilisant des levures commerciales comme *Saccharomyces cerevisiae*. En premier lieu, l'enzyme invertase de la levure catalyse l'hydrolyse du saccharose pour le convertir en glucose et fructose. Deuxièmement, la zymase, une autre enzyme aussi présente dans la levure, transforme le glucose et le fructose en éthanol.

La production de bioéthanol à partir des microalgues suit un processus précis. Dans un premier temps, l'amidon des algues est libéré des cellules mécaniquement ou grâce à des enzymes. Dans un second temps, lorsque les cellules commencent à se dégrader, la levure *Saccharomyces cerevisiae* est ajoutée à la biomasse pour effectuer la fermentation, En plus de l'amidon, certaines algues comme les algues vertes peuvent accumuler de la cellulose dans leur paroi cellulaire glucidique. Cette cellulose peut être utilisée pour la production de bioéthanol (fig. 22). Aussi, la biomasse des algues rouges peut être dépolymérisée pour obtenir des sucres simples tels que le glucose et galactose qui pourront produire du bioéthanol (ANEX, 2012).



Figure 22 : Procédé de production de bioéthanol via microalgues

### **3.1.4- Utilisation du bioéthanol**

L'usage du bioéthanol pur dans des véhicules de série n'est pas possible, les caractéristiques de l'alcool étant trop éloignées de celles de l'essence. Son utilisation nécessite donc certaines précautions et il s'agit d'avoir recours à diverses solutions d'utilisation (mélange à faible taux de bioéthanol avec de l'essence ou du diesel, usage de véhicules spéciaux, etc.).

Il existe ainsi plusieurs types de carburants contenant de l'éthanol, la plupart sont des mélanges d'essence et d'éthanol à différentes proportions (TOGNANG MBENDOU, 2013). Les mélanges d'éthanol et d'essence sont identifiés par l'abréviation « Exx », où « xx » indique le pourcentage d'éthanol inclus dans le mélange. Un carburant E20 contient donc 20 % d'éthanol et 80 % d'essence, alors qu'un carburant E100 correspond à de l'éthanol pur (SADI, 2012). La production et l'utilisation du bioéthanol n'a pas seulement pour but de remplacer les produits pétroliers, mais aussi de lutter contre le changement climatique par une diminution des émissions de gaz à effet de serre, dans le cadre du protocole de Kyoto ; réduire la dépendance énergétique et promouvoir les énergies renouvelables (TOGNANG MBENDOU, 2013).

## **3.2- Biogaz (biométhane)**

### **3.2.1- Généralité**

C'est un biocarburant pouvant se substituer au gaz naturel (essentiellement composé de 95 % de méthane). Les combustibles sont obtenus à partir du méthane contenu dans le biogaz (CHAIB, 2011).

Le biogaz est composé principalement de méthane et de gaz carbonique à hauteur respectivement de 60 à 70 % et de 40 à 30 %. On trouve aussi d'autres gaz comme de la vapeur d'eau,  $H_2S$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ ... La composition du biogaz dépend des conditions physico-chimiques appliquées au digesteur mais aussi de la nature du substrat, du système d'agitation (notons que la recirculation du biogaz dans le digesteur abaisse légèrement le pH du milieu), etc.

L'utilisation ultérieure du biogaz peut demander un traitement d'épuration pour éliminer la vapeur d'eau, le  $CO_2$  (utilisation comme carburant pour les véhicules) ou encore l'  $H_2S$  (avant utilisation dans les moteurs à explosion couplés à des générateurs) (MOLETTA, 2008).

Ce gaz résulte de la fermentation, hors de la présence d'oxygène (donc hors de la présence de l'air, en pratique), de n'importe quel matériau organique : déchets alimentaires, déchets de bois, paille, et bien sûr produits des cultures. Ce méthane peut s'utiliser pur (comme le GNV (gaz naturel véhicule) lequel provient par contre de gisements de gaz naturel) ou servir à alimenter un procédé industriel de fabrication de combustibles liquides à partir de gaz (CHAIB, 2011).

La technologie du biogaz est apparue comme l'une des plus intéressantes, parce qu'elle est en principe renouvelable, non polluante et peut s'appliquer aussi bien dans les décharges

municipales. Depuis lors, un nombre considérable d'installations de biogaz de différents types et de différentes tailles ont été construites un peu partout dans le monde. Au départ, l'objectif visé par la technologie du biogaz était de produire de l'énergie (ABDEREZZAK, 2011).

### 3.2.2- La méthanisation

La méthanisation est une technologie de conversion énergétique de la biomasse et une technologie de dépollution (POITRAT, 2009), et un processus de digestion anaérobie transformant les matières organiques en biogaz (PERSON, 2010).

Cette approche étudiée depuis longtemps permet aussi d'éviter de devoir assécher la biomasse. Ceci est un avantage parce que le séchage de la biomasse demande beaucoup d'énergie. La méthanisation est particulièrement utilisée pour traiter les boues issues de l'épuration des eaux usées. En général, il est plus simple et énergétiquement favorable de traiter par fermentation les matières organiques très humides. La principale filière de cette voie est la bio-méthanisation qui est effectuée en mode anaérobie. La méthanisation serait particulièrement efficace et permettrait de recueillir jusqu'à 75 % de l'énergie thermique disponible dans la biomasse. Par contre, la fermentation visant la production d'alcools, reste l'approche préférée pour générer des biocarburants liquides (DORE-DESCHENES, 2009).

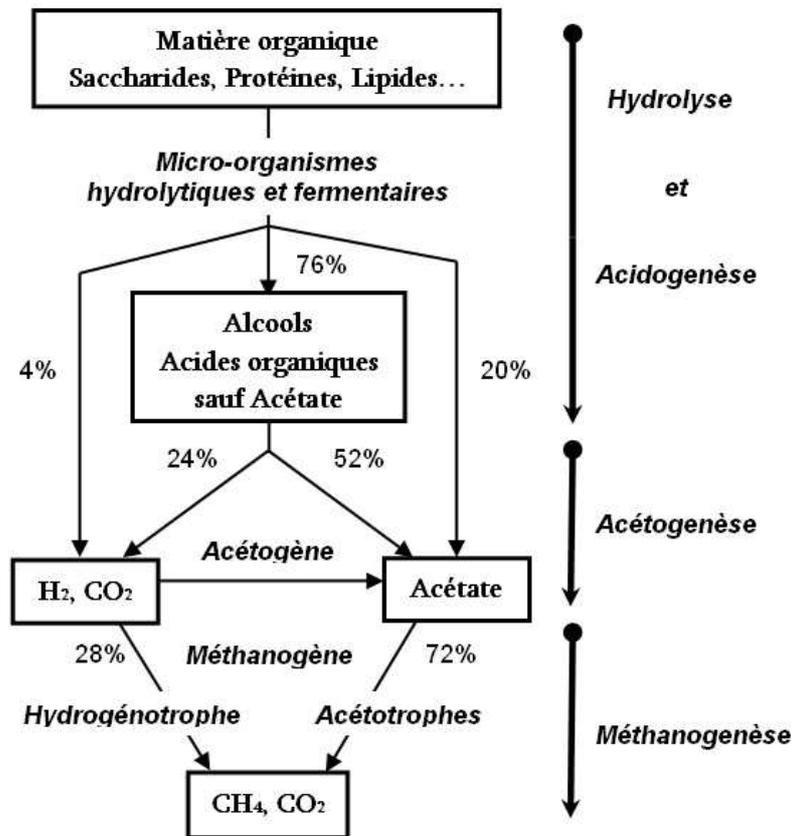
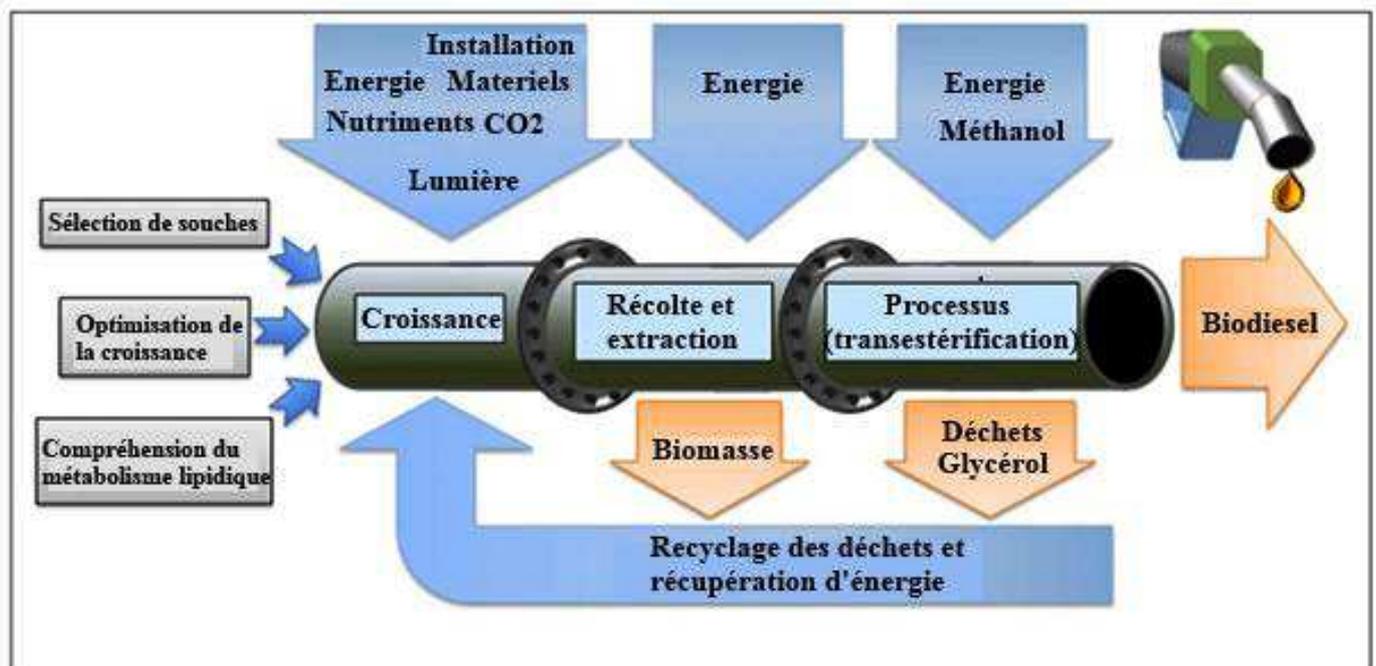


Figure 23 : La méthanogénèse

### 3.3- Biodiesel

#### 3.3.1- Généralité

Le biodiesel est un carburant écologique renouvelable (AMRANI, 2007). C'est un mélange de diesel avec des huiles provenant de plantes à graines, algues ou d'autres sources biologiques (fig. 24), comme les transformations des déchets animaux qui ont été transestérifiées pour éliminer le glycérol (GONDET, 2009).



**Figure 24** : Schéma du principe de production du biodiesel à partir des microalgues (FILALI, 2012)

Le biodiesel est un ester méthylique obtenu par réaction chimique (transestérification) entre un alcool léger et de la matière grasse (PALLUET et PINEAU, 2012). Il peut être employé dans les moteurs à combustion interne à pleine concentration, ou mélangé avec du pétrodiesel. Il réduit les émissions atmosphériques dans les applications non classiques (CHAIB, 2011). Il possède actuellement de nombreuses applications (carburants diesel, fuels domestiques, solvants écologiques, composés de base pour la fabrication de sulfonâtes d'alcool gras, d'amides, de dimères d'esters, etc.) grâce à ses propriétés chimiques et physiques très proches du diesel (HAMAD, 2009).

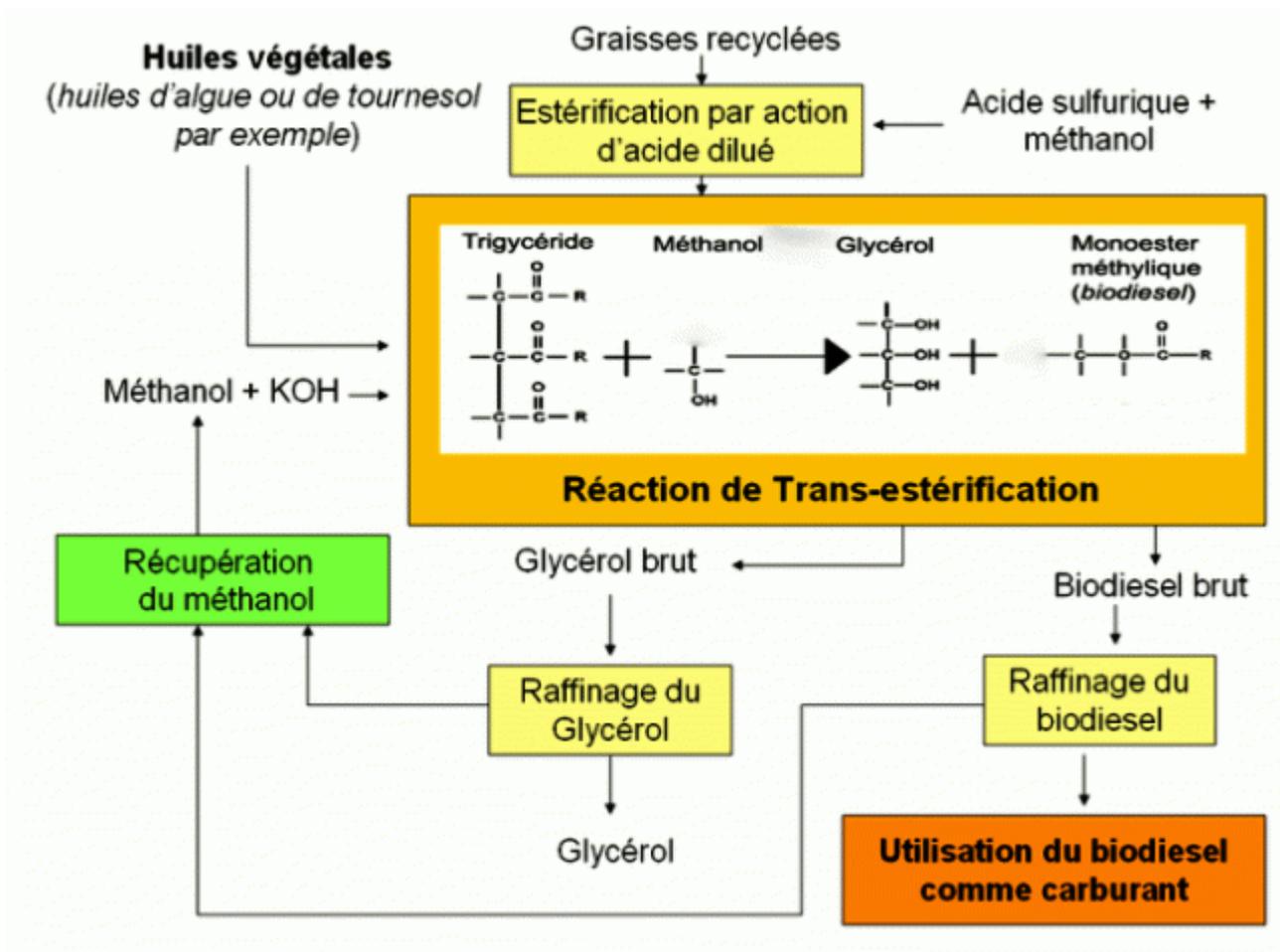
#### 3.3.2- La transestérification

La réaction de transestérification est utilisée pour convertir les triglycérides extraits des microalgues en esters méthyliques d'acides gras utilisables en biodiesel (PERSON, 2010). La transformation des lipides des microalgues en biodiesel par la transesterification en une étape

qui requiert la déshydratation préalable de la biomasse parce que l'eau est un inhibiteur de la réaction.

Cette conversion chimique implique la transesterification des triglycérides en biodiesel qui peut se faire en présence d'un catalyseur. Il existe des catalyseurs homogènes ou hétérogènes, acides ou basiques, qui améliorent le taux de conversion en biodiesel. La plupart des processus industriels utilisent des catalyseurs homogènes alcalins par exemple  $Na - OH$  ou  $KOH$ .

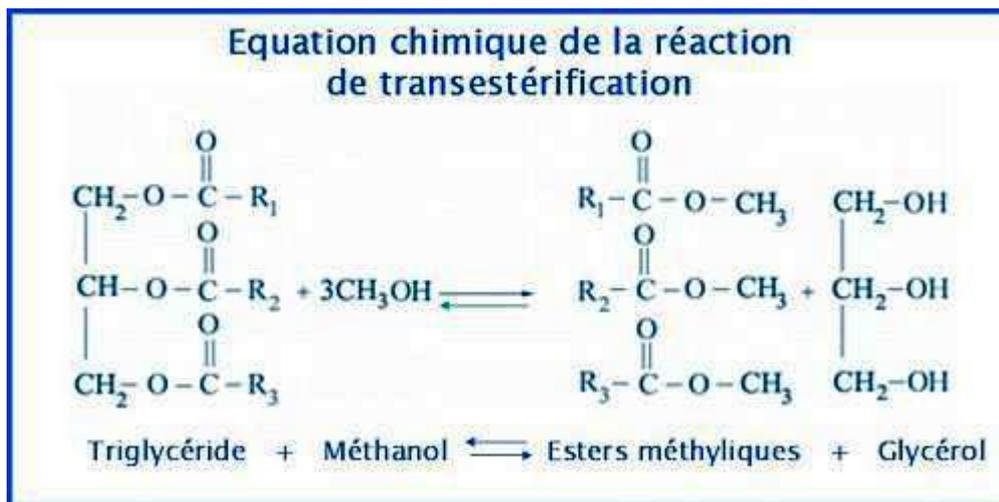
La transesterification est une réaction dont les trois étapes réversibles se font en série. Les triglycérides sont d'abord convertis en diglycérides, puis en monoglycérides, et enfin en esters (biodiesel) et glycérol (sous-produit) (ANEX, 2012) (fig. 25).



**Figure 25 :** Mécanisme de production de biodiesel par transesterification

### 3.3.2.1- Transestérification Chimique

Cette technologie est relativement mature et sert de référence dans la transformation des huiles végétales en biodiesel. En plus de l'approche du méthanol catalysé par une base classique, il a été démontré que la transestérification de l'huile d'algues peut être obtenue avec de l'éthanol et du sodium (éthanolate) agissant comme catalyseur. Les produits de ces réactions sont généralement séparés par addition d'éther et d'eau salée à la solution sous agitation conséquente. Le biodiesel est ensuite séparé de l'éther par un vaporisateur sous un vide poussé (fig. 26) (PERSON, 2010).

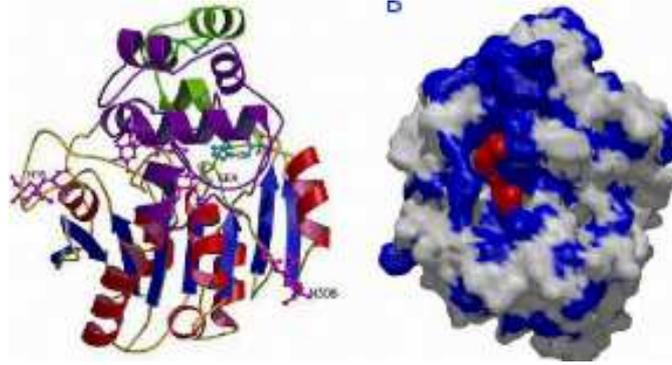


**Figure 26 :** Réaction de transestérification chimique classique (PERSON, 2010)

### 3.3.2.2- Conversion biochimique (enzymatique)

Les procédés chimiques fournissent une conversion élevée des triglycérides en leurs esters correspondants, mais présentent certains inconvénients tels qu'une forte consommation énergétique, une difficulté à enlever le glycérol, le retrait exigé du catalyseur alcalin du produit et le traitement des eaux usées alcalines.

L'utilisation de biocatalyseurs (lipases) dans la transestérification des triglycérides pour la production de biodiesel limite ces problèmes en offrant de surcroît une option environnementalement plus attractive que les procédés classiques. Bien que les approches enzymatiques soient devenues de plus en plus attrayantes, elles n'ont pas été démontrées à grande échelle principalement en raison du prix relativement élevé de la lipase (fig. 27). Cette dernière présente une courte vie de fonctionnement causée par les effets négatifs du méthanol en excès et des coproduits du glycérol. La maîtrise de ces facteurs est incontournable pour qu'un processus de conversion biochimique commercialement viable puisse être réalisé (PERSON, 2010).



**Figure 27** : Structure trois dimensionnel de la lipase (ANSORGE-SCHUMACHER, 2007).

### 3.4- Biohydrogène

#### 3.4.1- Généralité

La généralisation de la filière de l'hydrogène reste à long terme un objectif intéressant, car l'hydrogène est un vecteur polyvalent d'énergie sans carbone. Des recherches sont en cours pour produire de l'hydrogène directement à partir de cultures algales actives. Ces approches représentent un réel potentiel de progrès, parce que certaines de ces techniques permettraient aussi de produire des biocarburants, dont l'hydrogène, sans détruire les microorganismes (DORE-DESCHENES, 2009).

A l'heure actuelle, l'hydrogène ( $H_2$ ) est produit à partir d'hydrocarbures fossiles. Il est utilisé dans l'industrie chimique et le raffinage des produits pétroliers. L'hydrogène pourrait toutefois servir dans les piles par sa transformation en électricité (OUELLET, 2013).

La production photosynthétique d'hydrogène n'a pas suscité, jusqu'à ces dernières années, beaucoup d'intérêt en termes d'applications industrielles. Peu d'exemples de photobioréacteurs existent, alors que de nombreux réacteurs types fermenteurs sont utilisés pour produire de l'hydrogène à partir de bactéries hétérotrophes.

L'échelle de production pour les bactéries photosynthétiques, cyanobactéries ou microalgues, est donc restreinte essentiellement à celle du laboratoire (COURANC, 2012).

Toutefois, la densité énergétique de l'hydrogène est beaucoup plus faible que celle du biodiesel par exemple. À 250 atmosphères de pression un litre d'hydrogène contient 7 % de l'énergie d'un litre de biodiesel. Pour une même autonomie ceci nécessiterait l'usage de réservoirs d'hydrogène 14 fois plus gros que pour le biodiesel. Aussi, les nouveaux moteurs diesels rivalisent ou dépassent déjà l'efficacité des piles à hydrogène actuelles (DORE-DESCHENES, 2009).

### **3.4.2- La gazéification**

La gazéification est un procédé qui permet de convertir des matières carbonées, comme le charbon, le pétrole, ou de la biomasse, en hydrogène par réaction de la matière première avec une quantité contrôlée d'oxygène à des températures très élevées. Le mélange carboné obtenu, appelé syngaz, est lui-même un carburant. La gazéification est une méthode très efficace pour l'extraction d'énergie à partir des différents types de matières organiques, et trouve également des applications dans l'élimination des déchets verts (PERSON, 2010).

### **3.4.3- Photoproduction de l'hydrogène**

La photoproduction d'hydrogène est définie comme le résultat du métabolisme d'un organisme vivant qui libère, dans des conditions données, de l'hydrogène moléculaire comme métabolite primaire (CHADER, 2009).

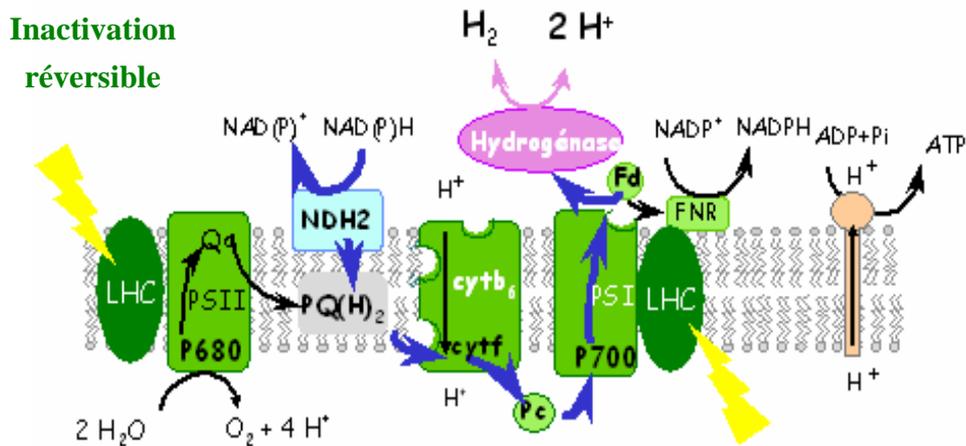
La preuve de la photoproduction d'hydrogène moléculaire par des algues unicellulaire a été apportée pour la première fois par une étude de GAFFRON et RUBIN (1942) sur *Scenedesmus obliquus*, par la suite d'autres chercheurs ont mis en évidence la capacité de photoproduction d'hydrogène chez d'autres groupes d'algues vertes comme *Chlorella fusca* (KESSLER, 1973), ou *Chlamydomonas reinhardtii* (MAIONE et GIBS, 1986). Dans ces travaux, cette production a été induite par simple incubation des cellules à l'obscurité, condition qui entraîne l'anoxie, suivit d'une exposition à la lumière qui entraîne la production d'hydrogène moléculaire. Cependant, ce procédé présente certaine faille, du fait de la faible proportion d'H<sub>2</sub> produit et de la durée du procédé à peine quelques secondes (60 à 90 s). Selon GHIRARDI et al., (1997) cette photoinhibition rapides de la production d'hydrogène est le résultat de la présence d'oxygène produit à la lumière par le photosystème II. Plus tard des chercheurs ont notés que la pression partielle d'oxygène inhibitrice de la production d'hydrogène est fonction des espèces. Ainsi, Chez *Chlamydomonas* elle est  $\geq 0.2$  % d'oxygène (GHIRARDI et al., 1997; ZHANG et al., 2002), alors, qu'elle oscille entre 1.34 – 1.92 % chez *Chlorella sorokiniana* et même parfois  $\geq 11.5$  % pour *Chlorella salina* et  $\geq 15.4$  % pour *Chlorella sp* Pt6, souches isolées dans la région de Timilaine (w. Adrar) sud algérien (CHADER et al., 2009). Toutefois, dans ces deux derniers cas le taux d'hydrogène produit reste très faible même si la production semble être soutenue à ces concentrations O<sub>2</sub> durant 2 ou 3 jours.

La synthèse d'hydrogène chez les microalgues s'effectue grâce à une *Fe-hydrogénase*, c'est le cas pour *Chlorella sorokiniana* (CHADER, 2009) et *Chlamydomonas reinhardtii* (MELIS et al., 2000), c'est une enzyme par nature réversible et sa direction dépend des conditions physiologiques déterminant les flux d'électrons ainsi que du potentiel redox.

Les électrons fournis de l'hydrogénase peuvent emprunter deux voies différentes (fig. 28) :

- La voie dépendante du PSII, les électrons sont fournis après photolyse de l'eau
- La voie indépendante du PSII, les électrons fournis à la chaîne photosynthétique seraient issus de la dégradation de substrat carboné (amidon, protéine).

Reste qu'aucune certitude n'est établie quand au chemin emprunté par les électrons conduisant à la production d'hydrogène.



**Figure 28** : Induction de l'activité de l'hydrogénase par l'inactivation du PSII et principales enzymes impliquées dans la production d'hydrogène.

### 3.4.3.1- Protocole de culture sous carence en soufre

Au début des années (2000), MELIS et ses collaborateurs découvrent que la microalgue *Chlamydomonas reinhardtii*, maintenue à la lumière et cultivée en milieu carencé en soufre pouvait induire une anoxie dans son milieu de culture et de soutenir durant plusieurs jours une production de quantité significative d'hydrogène (fig. 29). Cependant les études de rendement en termes de quantité d'hydrogène produit par unité de biomasse d'algues montrent que la photoproduction est faible par rapport à son maximum théorique (MELIS et HAPPE, 2001). Cependant et bien que le protocole n'ait pas de potentiel d'applications industrielles, il n'en reste pas moins qu'il offre de large possibilités expérimentales dans le domaine de la production d'hydrogène.

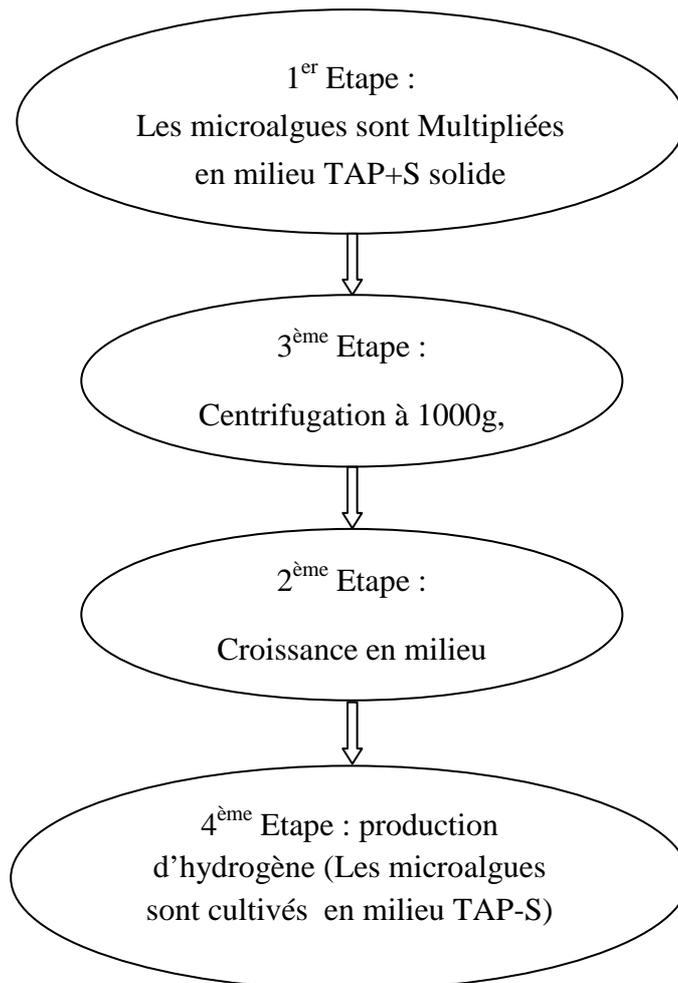
Les cultures sont conduites dans un milieu hétérotrophe, généralement, TAP (Tris Acétate Phosphate) carencé en soufre considéré comme étant le plus favorable pour la production d'hydrogène (CHADER, 2009; HAPPE et al., 2002; MELIS et al., 2000).

Le processus de production d'hydrogène en milieu carencé en soufre est caractérisé par un nombre de transitions métaboliques majeurs. En effet, l'une des conséquences directe est la diminution de l'activité photosynthétique, principalement par une diminution de l'activité du PSII, ceci suit à l'inhibition du cycle de réparation du PSII dû au manque de synthèse par

l'ADN chloroplastique d'acides aminés soufrés (méthionine et cystéine) (ZHANG *et al.*, 2002), s'adjoint à cela une respiration mitochondrial (restée constante) dépassant le potentiel de production d'O<sub>2</sub> de l'algue qui entre en anoxie. Une deuxième adaptation métabolique intervient, à savoir le démarrage du processus de consommation des substrats endogène (amidon et acides aminés) ce qui fait que les algues entrent dans un métabolisme de fermentation.

Parallèlement à cela, une Fe-hydrogénase est induite et les algues démarrent le processus de Photoproduction d'hydrogène. L'étape finale du cycle de production de l'hydrogène est caractérisée par une diminution de la consommation de l'amidon, une stabilisation du pH et un ralentissement de la vitesse de production de l'hydrogène gazeux.

Ce dernier stade est souvent interprété comme une réponse à l'épuisement des réserves énergétiques cellulaires, alors que les observations montrent que le milieu de culture contient encore de l'acétate et que l'étude de la composition cellulaire montre que les cellules contiennent encore de l'amidon, des lipides et des protéines pouvant servir de combustible (MIGNOLET, 2012).



**Figure 29** : Protocole de photoproduction d'hydrogène (MELIS *et al.*, 2000)

# *Conclusion*

Les microalgues sont actuellement envisagées comme des organismes capables de produire de l'énergie ainsi que des substances à très haute valeur pour l'industrie. D'autre part, les microalgues sont considérées comme un moyen de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Toutefois, il est difficile aujourd'hui d'attribuer une part de marché à chaque secteur d'application potentiel des microalgues, en particulier parce que tous ces secteurs en devenir sont dans l'attente d'une production de biomasse stable, de qualité et à moindre coût, non atteinte à ce jour.

Les utilisations les plus avancées aujourd'hui sont dans des marchés de niche (quelques kilos à quelques tonnes par an) à forte valeur ajoutée comme la cosmétique/ la pharmaceutique ou la nutraceutique, aussi bien animale qu'humaine. Le marché intermédiaire pressenti pour atteindre un niveau de développement à plus grande échelle est celui de l'alimentation animale, notamment l'alimentation de masse en pisciculture en remplacement des farines et huiles de poisson. Pour adresser les marchés de masse (carburant, chimie), il est nécessaire que la filière s'organise avec comme principal objectif la réduction des coûts de production et l'approvisionnement stable de quantités importantes de microalgues.

Aujourd'hui, les biocarburants via microalgues apparaissent comme une source d'énergie de transport indispensable à court terme. En effet, les algues sont capables de produire du biodiesel et du bioéthanol qui peuvent être utilisés dans différents types de moteur. En outre leur utilisation comme matière première pour la production d'énergie permet de diminuer la dépendance aux énergies fossiles sans pour autant provoquer des famines, déstabiliser les sols ou menacer la biodiversité.

Néanmoins, il est très important de sélectionner des systèmes de culture appropriés pour cultiver les microalgues avec des rendements élevés. Actuellement, les systèmes proposés font que la technologie idéale de la valorisation des microalgues n'existe pas. Ainsi, le choix du procédé adéquat est étroitement lié à son usage voulu.

Cependant, de grands progrès ont été obtenus ces dernières années, reste qu'il n'en est pas moins vrai que les avancées réalisées dans le domaine du génie des photobioréacteurs ne peuvent répondre au besoin des filières d'industrialisation dans un avenir proche.

Toutefois, des procédés hybrides (systèmes fermés couplés à des systèmes ouverts) commencent à voir le jour un peu partout ce qui ouvre la voie à de nouvelles approches pour l'optimisation des systèmes de culture à grande échelle.

*Références  
bibliographiques*

- **ABDEREZZAK N., 2011.** Optimisation de l'utilisation du biogaz des méthaniseurs. Mémoire de magister, Ecole doctorale en énergétique et développement durable. FSI, Université de Boumerdes, 77 p.
- **AGREN G. I., 2004.** The C:N:P stoichiometry of autotrophs — theory and observations. *Ecology Letters*, 7, pp: 185-191.
- **ALCAINE A. A., 2010.** Biodiesel from microalgae. Final degree project. Royal School of Technology Kungliga Tekniska Högskolan, *Stockholm, Sweden*.
- **AMRANI M., 2007.** Simulation du procédé de fabrication du biodiesel a partir des graisses jaunes. *Facta universitatis, Séries: Physics, Chemistry and Technology*, 5 (1) : 61 - 67
- **ANDERSEN D. M., 1994.** Eaux colorées et phytoplancton toxique. *Pour Science*, 204, 68 – 76.
- **ANEX P-F., 2012.** Les Algues comme biocarburant. Mémoire de master 2 Biologie Gestion, université de Rennes 1, 32 p.
- **BALLARE C. L., SANCHEZ R. A., SCOPEL A. L., CASAL J. J., et GHERSA C. M., 1987.** Early detection of neighbour plants by phytochrome perception of spectral changes in reflected sunlight. *Plant, Cell and Environment*. 10, pp: 551-557.
- **BECERRA-CELIS, G. P., 2009.** Proposition de stratégies de commande pour la culture de microalgues dans un photobioréacteur continu. Thèse de Doctorat, Ecole supérieure d'électricité, Gif-sur-Yvette (France).
- **BECKER E. W., 2003.** Microalgae in Human and Animal Nutrition. In A. Richmond (Ed.), *Handbook of Microalgal Culture*, Blackwell Publishing Ltd. Pp: 312–351.
- **BELKOURA M., et DAUTA A., 1992.** Interaction lumière – température et influence de la photopériode sur le taux de croissance de *Chlorella sorokiniana* Shirhira & Krauss. *Annl. Limnol.*, 28 (2): 101 – 107.
- **BOROWITZKA, M.A. 1998.** Vitamins and fine chemicals form micro-algae. In: **BOROWITZKA, M.A., BOROWITZKA, L.J.** (Eds.), *Micro Algal Biotechnology*. Cambridge University Press, pp. 153-196.
- **BHOLA, V., DESIKAN, R., SANTOSH, S. K., SUBBURAMU, K., SANNIYASI, E., BUX, F., 2001.** Effects of parameters affecting biomass yield and thermal behaviour of *Chlorella vulgaris*. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 111 (3), pp. 377–382.
- **CADORET J. et BERNARD O., 2008.** La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis. *Journal de la société de biologie*, vol 202 (3) : 201 – 211.
- **CANTIN I., 2010.** La production de biodiesel à partir des microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe. Maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, pp. 1 – 82.

- **CHADER S., 2009.** Etude du mécanisme de production biologique de l'hydrogène par les microalgues. Thèse de doctorat de biologie, USTHB, Alger, 122 p.
- **CHAIB H., 2011.** Etudes et conception d'une bioraffinerie pour la production des biocarburants de seconde génération. Mémoire de magister, FSTSM, Université Kasdi Merbah Ouargla, 77 p.
- **CHEFTEL J. C., BESANCON P., 1977.** Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments, volume 2, *Eds Tec & Doc*, Paris 420 p.
- **CHEN M., TANGA H., HOLLAND T. C. et SALLEY S. O., 2011.** Effect of nutrients on growth and lipid accumulation in the green algae *Dunaliella tertiolecta*. *Bioresource Technology*, Volume 102, Issue 2, pp. 1649-1955.
- **CHISTI Y., 2007.** Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, Vol. 25 (3): 294 – 306.
- COURANC, 2012
- **DABBADIE L., 1992.** Cultures intensives de microalgues sur lisier de porc: performances, contraintes, utilisation des biomasses. Mémoire d'Ingénieur Agronome de l'école nationale supérieure agronomique de Montpellier, France, 125p.
- **DORE-DESCHENES, F., 2009.** Utilisation des microalgues comme source d'énergie durable. Essai de maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 111 p.
- **FILALI, 2012.** Estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique du  $CO_2$ . Ecole supérieur d'Électricité / Supelec, Paris, 224 p.
- **GAFFRON H. et RUBIN J., 1942.** Fermentative and photochemical Production of hydrogen in algae. *J. Gen. Physiol.*, 26: 219 – 240.
- **GHIRARDI M. L., TOGASAKI R. K. et SEIBERT M., 1997.** Oxygen sensitivity of algal  $H_2$ -production. *Appl. Biochem. Biotech.* 63: 141 – 151.
- **GHOBRINI D. AIBOUD K. et YAKOUB-BOUGDAL S., 2014.** Effect of red and far-red light on biomass productivity on *Chlorella vulgaris* cultivated on photobioreactor. *BioTech 2014 and Czech-Swiss symposium*, 11 – 14 Jun 2014, Praha Czech Republic.
- **GONDET L., 2009.** Biodiesel / Bioéthanol : Quel avenir pour les biocarburants ?. Recherche et Analyse de Données Scientifiques, Université de Strasbourg, 27 p.
- **GREEN B. R. et DURNFORD D. G., 1996.** The chlorophyll-carotenoid proteins of oxygenic Photosynthesis. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*, 47: 685 – 714.
- **HAMAD B., 2009.** Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique. Thèse de doctorat, l'université Claude Bernard - Lyon 1, 197 p.
- **HARRIS G. P., 1988.** Phytoplankton ecology. *Chapman & Hall*, New York. 254p.

- **HAPPE T. et KAMINSKI A., 2002.** Differential regulation of the [Fe]-hydrogenase during anaerobic adaptation in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Eur. J. Biochem.*, 269: 1022–1032
- **JENCK J., LEPINE O., LEGRAND J., DRENO P., GRIZEAU D. et DUPRE C., 2011.** ‘Valorisation Industrielle des Micro Algues Photosynthétiques’, Ed., Technique de l’Ingénieur, 13 p.
- **KUMAR A., ERGAS S., YUAN X., SAHU A., ZHANG Q., DEWULF J., MALCATA F. X. et VAN LANGENHOVE H., 2010.** Enhanced  $CO_2$  fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in Biotechnology*, Volume 28, Issue 7, pp. 371-380.
- **LU C., TORZILLA G., VONSHAK A., 1999.** Kinetic response of photosystem II photochemistry in the cyanobacterium *Spirulina plantensis* to high salinity is characterized by two distinct phases. *Australian Journal of Plant Physiology*. 26, pp. 283-292.
- **MAZLIAK P., 1998.** Physiologie végétale. Croissance et développement. Editions Hermann, Tome 2, Paris, 575 p.
- **MAIONE T. E. et GIBBS M., 1986.** Association of the chloroplastic respiratory and photosynthetic electron transport chains of *C. reinhardtii* with photoreduction and the oxyhydrogen reaction. *Plant Physiol* 80: 364 – 368.
- **MALONE T. C., 1982.** Phytoplankton photosynthesis and carbon-specific growth: light-saturated rates in a nutrient-rich environment. *Limnology and Oceanography*, 27: 226 – 235.
- **MELIS A., ZHANG L., FORESTIER M., GHIRARDI M. L. et SEIBERT M., 2000.** Sustained photobiological hydrogen gas production upon reversible inactivation of oxygen evolution in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiol*, 122: 127 – 136.
- **MELIS A. et HAPPE T., 2001.** Hydrogen production: green algae as a source of energy. *Plant Physiology* 127: 740 – 748.
- **MIGNOLET E., 2012.** Conception et réalisation d'un photobioréacteur adapté à l'étude de la production d'hydrogène chez les micro-algues. Thèse de Doctorat de l'université de Liège, Belgique, 197 p.
- **MOLETTA R., 2008.** La méthanisation. *Coord. Éditions Tec & Doc – Lavoisier*, Paris, 532 p.
- **NIGAM P. S. et SINGH A., 2011.** Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 37 (1): 52 – 68.
- **OLIVO E., 2007.** Conception et étude d'un photobioréacteur pour la production en continu de microalgues en écloséries aquacoles. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 125 p.

- **PALLUET E. et PINEAU P. O., 2012.** Les biocarburants : matières premières, transformation et produits. *Les Notes thématiques GRIDD-HEC*, N° 1, 41 p.
- **PERSON J., 2010.** Livre turquoise – Algues, filières du futur. *Édition AdebioTech*, Romainville, 163 p.
- **PILLONETTO P.-F., 2013.** Apport d'énergie renouvelable à un bâtiment urbain par l'implantation d'un système de photobioréacteurs. *Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels*, n° 27 : 65 – 83.
- **PIERRE G., 2010.** Caractérisation biochimique d'exo-polymères d'origine algale du bassin de Marennes-Oléron et étude des propriétés physico-chimiques de surface de micro-organismes impliquées dans leur adhésion. Thèse de doctorat, université la Rochelle, 192 p.
- **POITRAT E., 2009.** Biocarburants. *Techniques de l'Ingénieur*, BE 8550.
- **PRUVOST J., CORNET J. F., BORGNE F. et JENCK J., 2011.** Production industrielle de microalgues et cyanobactéries, *Techniques de l'Ingénieur*, rubrique Innovations (in200) : 1 – 17.
- **RICHMOND A., 1999.** Physiological principles and modes of cultivation in mass production of photoautotrophic microalgae. In: *Chemical from microalgae. (Cohen, Z. eds)*. Taylor and Francis, Philadelphia, pp. 353-386.
- **RENGEL A., 2010.** Conception et analyses énergétique et environnementale d'un bioréacteur à microalgues pour la production d'énergie. Thèse de doctorat, Mines ParisTec, 183 p.
- **RICHMOND, A. 2004.** Principles for attaining maximal microalgal productivity in Photobioreactors: an overview. *Hydrobiologia* 512: 33 – 37.
- **ROCHAIX J. D., 2011.** Assembly, function, and dynamics of the photosynthetic machinery in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant physiology* 127 (4): 1394-1398.
- **SADI M., 2012.** Les microalgues: un défi prometteur pour des biocarburants propres. *Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa (2012)* : 195 – 202.
- **SHARMA N. K. et RAI A. K., 2011.** Biodiversity and biogeography of microalgae: progress and pitfalls. *Environmental Reviews*, 19 (1) : 1 – 15.
- **SIALVE B., STEYER J.-P., 2013.** Les microalgues, promesses et défis. *Innovations Agronomiques*, 26 : 25-39.
- **SMITH H., 2000.** Phytochromes and light signal perception by plants an emerging synthesis. *Nature* 407: 585-691.
- **SOBCZUK T. M., CAMACHO F. G., RUBIO F. C., FERNANDEZ F. G. A., GRIMA E. M., 2000.** “Carbon Dioxide Uptake Efficiency by Outdoor Microalgal Cultures in Tubular Airlift Photobioreactors,” *Biotechnology and Bioengineering*, 67 (4): 465 – 475.

- **SUBHADRA B. et EDWARDS M., 2010.** An integrated renewable energy park approach for algal biofuel production in United States. *Energy Policy* 38, 4897.
- **TOGNANG MBENDOU E. P., 2013.** Production du bioéthanol à partir des résidus de bois : cas du Moabi. Mémoire de Licence de Physique, ENS de Yaoundé, Cameroun, 64 p.
- **YUN Y. S. et Park J., 1997.** Development of gas recycling photobioreactor system for microalgal carbon dioxide fixation. *Korean Journal of Chemical Engineering* 14 (4): 297 – 300.
- **WANG, B., LI, Y., WU, N., LAN, C.Q., 2008.** *CO<sub>2</sub>* bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79, pp. 707–718.
- **ZHANG K., KURANO N. et MIYACHI S., 1999.** Outdoor culture of cyanobacterium with a vertical flat-plate photobioreactor: effects on productivity of the reactor orientation, distance setting between the plates, and culture temperature. *Applied Microbial and Biotechnology*, 52, pp. 781 – 786.
- **WEN Z. et JOHNSON M. B., 2009.** Microalgae as a feedstock for biofuel production, Virginia Cooperative Extension Publication, pp. 442 – 886.

#### **Autres références**

- <http://www.famille-schlegel.com/tpe>
- <http://www.econologie.com/forums/le-vehicule-a-hydrogene-vu-par-total.html>
- <http://micro-algues-tpe.eklablog.com>
- <http://www.techni-process.com>
- <http://www.wordpress.com>
- <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/>

## Résumé

Dans un contexte énergétique marqué à la fois par la nécessité de développer des énergies renouvelables plus respectueuses de l'environnement et par l'épuisement à moyen terme des ressources pétrolières, les microorganismes photosynthétiques s'affirment comme l'une des alternatives convenables pour remplacer les énergies fossiles et suscitent un intérêt grandissant, en raison de leurs propriétés biologiques et métaboliques intéressantes. En sus de l'argument de la productivité, leur avantage majeur réside dans le fait qu'il n'entre pas en concurrence avec les productions répondants aux besoins de l'alimentation humaine ou des industries de transformation.

Ainsi, depuis quelques années, la biotechnologie microalgale est devenue un thème de recherche privilégié permettant d'explorer et d'exploiter l'énorme potentiel de ces microorganismes intervenant au sein de nombreux systèmes et dans de multiples secteurs industriels comme les domaines énergétique, pharmaceutique, alimentaire et plus récemment environnemental : comme dépolluant d'effluents industriels gazeux (séquestration de  $CO_2$ ) ou liquides (fixations de nitrates, phosphates, métaux...). Néanmoins, une multitude de verrous scientifiques et technologiques restent encore à lever, avant que des systèmes de culture à grande échelle ne puissent voir le jour.

Le présent travail, se propose de décrire les systèmes de production de biocarburant à partir de microalgues.

**Mot clés :** Microalgues, espèces, production, biomasse, biocarburants, énergie renouvelable.

## Summary

The need to develop more renewable energy friendly of environment and in the depletion of oil resources on medium-term, photosynthetic organisms are emerging as one suitable alternative to replace fossil fuels and she increasing interest because of their biological and metabolic properties. In addition to the argument of productivity, their major advantage is that it does not in competition with respondents' productions needs for human consumption or processing industries.

Thus, in recent years, microalgale biotechnology has become a prime research topic to explore and exploit the enormous potential of these microorganisms involved in many systems and in many industrial sectors such as energy, pharmaceutical, food and more recently environmental sector : as gas – purifying effluents ( sequestration of  $CO_2$ ) or liquid (bindings nitrates, phosphates, metals ...). However, many scientific and technological barriers remain to be lifted, before cropping systems on a large scale can be created.

The present work aims to describe systems for production of biofuels from microalgae.

**Keyword:** microalgae, species, production, biomass, biofuels, renewable energy.

## المخلص

في سياق الحاجة لتطوير الطاقات المتجددة الأكثر ملائمة مع البيئة و مع الاستنزاف الملحوظ على المدى المتوسط للموارد النفطية، تعد الكائنات الحية المجهرية، المسؤولة على التركيب الضوئي، البديل المناسب لاستبدال الوقود الأحفوري حيث أضحت محل اهتمام متزايد بسبب خصائصها البيولوجية و الأيضية المعتمدة. بالإضافة إلى حجة غزارة إنتاجها، الميزة الخاصة لهذه الكائنات الحية الدقيقة تكمن في أنها لا تنافس حاجيات الصناعات و المنتجات الغذائية.

وهكذا، ففي السنوات الأخيرة، أصبحت التكنولوجيا الحيوية للطحالب الدقيقة موضوع بحث رئيسي في عديد المخابر. هذا الذي سمح باستكشاف واستغلال الإمكانيات الهائلة لهذه الكائنات الحية الدقيقة المشاركة في العديد من الأنظمة و القطاعات الصناعية مثل مجالات الطاقة، المستحضرات الصيدلانية، الأغذية و حديثاً في المجال البيئي: كتطهير النفايات الغازية (عزل ثاني أكسيد الكربون) أو السائلة (تثبيت النترات والفوسفات والمعادن...). ومع ذلك، لا تزال هناك العديد من الحواجز العلمية والتكنولوجية التي يجب رفعها، قبل أن يمكن إنشاء نظم إنتاج على نطاق واسع.

هذا العمل يهدف لوصف نظم إنتاج الوقود الحيوي من طرف الطحالب الدقيقة.

**كلمات مفتاحية:** الطحالب المجهرية، الأنواع، الإنتاج، الكتلة الحيوية، الوقود الحيوي، الطاقة المتجددة.