



Les microalgues, promesses et défis

Bruno Sialve, Jean-Philippe Steyer

► **To cite this version:**

Bruno Sialve, Jean-Philippe Steyer. Les microalgues, promesses et défis. Innovations Agronomiques, INRA, 2013, 26, pp.25-39. hal-01137072

HAL Id: hal-01137072

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01137072>

Submitted on 30 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les microalgues, promesses et défis

Sialve B.¹, Steyer J-P.¹

¹ INRA UR 050 - Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, Av des étangs, F-11100 Narbonne

Correspondance : bruno.sialve@supagro.inra.fr ; jean-philippe.steyer@supagro.inra.fr

Résumé

Les microalgues suscitent aujourd'hui un intérêt grandissant tant les applications qui convergent autour de ces cellules sont nombreuses. De la production d'énergie, à la nutrition humaine et animale, en passant par le traitement des rejets anthropiques, chercheurs et industriels s'investissent dans ces vastes domaines d'application. Il y a aujourd'hui une multitude de verrous scientifiques et technologiques qui méritent d'être levés, carrefours d'innovations entre approche agro-écologiques et vision techno-économiques, pour parvenir à créer une filière industrielle sur le sujet. Cet article se propose de dresser un panorama du spectre des possibles et de présenter certains travaux de l'INRA sur le sujet.

Mots-clés : microalgue, innovation, bioénergie, biotechnologie, photosynthèse

Abstract: Microalgae, potentialities and challenges

Microalgae are currently the topic of a growing interest due to their high and numerous potentialities. Internationally, scientists and industries are deeply involved looking at fields of application such as energy production, human and animal nutrition, treatment of anthropogenic waste. There are still a lot of scientific and technological bottlenecks and challenges that need to be solved and a high potential for innovations between agro-ecological and techno-economical approaches to succeed in creating an industrial sector. This article aims to provide an overview of the spectrum of potentialities and present some INRA work on the subject.

Keywords: microalgae, innovation, bioenergy, biotechnology, photosynthesis

1. Les microalgues : une biomasse diversifiée pour des applications multiples

1.1 Définition

Les algues désignent un ensemble d'organismes que l'on retrouve préférentiellement dans les milieux aquatiques. Elles rassemblent à la fois les macroalgues benthiques (fixées sur un support) ainsi que des organismes microscopiques pélagiques (en eau libre, du fond à la surface) : les microalgues. Ces dernières, dénommées également phytoplancton, sont définies comme étant des organismes unicellulaires ou pluricellulaires indifférenciés. Sous cette désignation, elles constituent un sous-ordre des Eucaryotes ou des Procaryotes. Dans ce dernier règne, les représentants des microalgues sont regroupés dans la sous-classe des Cyanobactéries.

1.2 Diversité et classification

Les microalgues constituent un groupe extrêmement hétérogène rassemblé autour d'une cohérence physiologique : la photosynthèse oxygénique (Andersen, 1992). Cette famille rassemblerait de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions d'espèces selon les estimations, parmi lesquelles 47000 espèces sont décrites (Andersen *et al*, 1997 ; Sharma and Rai, 2011). Par comparaison, la diversité des plantes supérieures est de l'ordre de 400 000 espèces. La classification (Tableau 1) de cette diversité est complexe et la taxonomie est sujette à de fréquents bouleversements du fait notamment de l'utilisation des techniques de phylogénie moléculaire.

Règne	Embranchement/Classe
Procaryotes	Cyanophytes
	Prochlorophytes
Eucaryotes	Bacillariophytes
	Charophytes
	Chlorophytes
	Chrysophytes
	Cryptophytes
	Dinophytes
	Euglenophytes
	Glaucophytes
	Haptophytes
	Phaeophytes
	Rhodophytes

Tableau 1 : Diversité des microalgues eucaryotes et procaryotes, marines et d'eau douce (d'après, Jeffrey *et al.*, 1997 ; Sharma et Rai, 2011)

1.3 Distribution/Habitats : des océans aux milieux extrêmes

Les microalgues occupent la plupart des niches écologiques. Si elles sont surtout présentes dans les environnements aquatiques, elles ont su également coloniser les sols et une vaste gamme de supports comme les rochers, les arbres ou encore les édifices architecturaux (Macedo *et al.*, 2009). Preuve de leur diversité d'habitats, certaines microalgues se développent dans les eaux de fonte de la glace ou de la neige et on les rencontre également dans les déserts arides à semi-arides. L'atmosphère

constitue également un environnement dans lequel une diversité notable de microalgues eucaryotes et de cyanobactéries est signalée (Sharma *et al.*, 2007). Enfin, cette capacité à coloniser l'ensemble de la biosphère est une propriété qui, comme pour les bactéries non photosynthétiques, leur permet de se développer dans des conditions dites « extrêmes ». C'est grâce à l'absence de structure complexe autre que la cellule et à un métabolisme orienté principalement vers la production d'énergie que les microalgues ont cette capacité à être notablement ubiquistes (Falkowski et Raven, 1997).

85 % des biotopes de la terre présentent des conditions de températures inférieures à 5°C (Margensin et Miteva, 2011). Ces milieux hébergent une diversité remarquable de microorganismes photosynthétiques psychrophiles. Parmi ceux-ci, nous citerons par exemple *Chlamydomonas nivalis*, responsable des colorations rouges sur les neiges qui présente en outre une résistance aux radiations UV du fait d'une accumulation d'asthaxanthine dans son cytoplasme.

A l'inverse, dans des conditions thermophiles, la cyanobactérie *Synechococcus* est capable de croître dans les sources d'eau chaude (60-80°C), par ailleurs alcalines. Dans des sources chaudes (38-57°C) et acides (pH 0,5-2,5), les microalgues rouges *Cyanidioschyzon*, *Cyanidium* et *Galdieria* sont les seules représentantes des Eucaryotes identifiées à ce jour capables de se développer. Parmi les espèces acidophiles, *Dunaliella acidophila* croît dans une gamme de pH de 0 à 3 (Assunção *et al.*, 2011). Dans cette vaste classe des Chlorophyceae, *Dunaliella salina*, exploitée massivement pour la production de β -carotène et de glycérol, a la particularité de croître dans des conditions hypersalines proches de la saturation.

A l'instar des bactéries et *archae*, l'adaptation à ces conditions environnementales particulières mobilise des propriétés métaboliques qui recèlent un intérêt et des enjeux potentiels en biotechnologie (Pulz et Gross, 2004), que nous abordons plus en détail dans la suite.

1.4 De l'organisation cellulaire au métabolisme

Les microalgues eucaryotes et procaryotes ont en commun la photosynthèse oxygénique. Cette réaction assure la transformation du carbone inorganique en énergie chimique en captant l'énergie lumineuse. C'est dans le chloroplaste que se réalise cette conversion.

Une cellule de microalgues mesure de quelques microns à plusieurs centaines de microns. Le cytoplasme est séparé du milieu extracellulaire par une membrane plasmique. Certaines espèces présentent des structures pariétales plus ou moins complexes qui vont recouvrir cette membrane. Les parois des cyanobactéries, sont identiques à celles des bactéries Gram-négative, à savoir un peptidoglycane. Bon nombre de microalgues Eucaryotes exhibent en revanche une diversité remarquable de structures pariétales.

Les diatomées, d'une importante diversité de taille et de forme en fonction des espèces, se distinguent par l'élaboration d'une paroi siliceuse, la frustule. Parmi les Haptophyceae, les coccolithophoridées élaborent des structures complexes composées de carbonate de calcium (Figure 1).

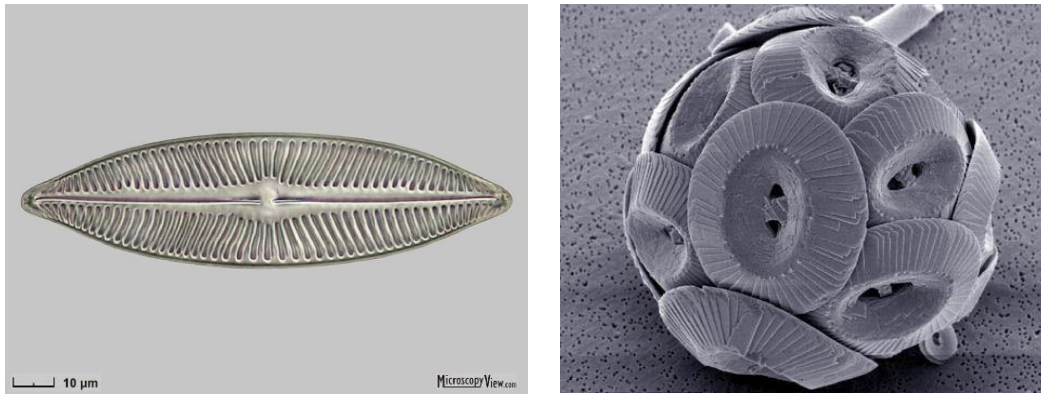
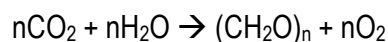


Figure 1 : Exemples de structures pariétales remarquables pour, à gauche, la diatomée *Navicula yarrensii* (Bacillariophyceae) et, à droite, le coccolithophore *Coccolithus pelagicus* (Haptophyceae) (<http://planktonnet.awi.de/>).

Pour la plupart des microalgues présentant une paroi (à l'exclusion des configurations précédentes), la composition sera sensiblement similaire aux structures pariétales des plantes supérieures offrant des structures polysaccharidiques et protéiques plus ou moins complexes. La présence de ces parois est déterminante dans la fonction de résistance aux lyses enzymatiques d'origine bactérienne ou lors du passage dans le tractus digestif des prédateurs. Elles les préservent également des conditions environnementales potentiellement délétères. Algaenanes et sporopollenines sont les deux polymères fréquemment associés à cette résistance. Pour de nombreuses espèces, la paroi est fortement chargée négativement du fait des groupes fonctionnels qui y sont associés et qui interagissent fortement avec les cations présents dans le milieu. Cette propriété confère aux cellules une tolérance significative à certains ions potentiellement toxiques. Cette propriété motive l'intérêt de l'utilisation des microalgues pour le traitement des effluents chargés en métaux (Monteiro *et al.*, 2012). Enfin, la présence et la composition de ces structures externes constituent une barrière qui détermine l'accessibilité au contenu intracellulaire pour des attaques biologiques, physiques et chimiques pour les filières de valorisation de ces biomasses (González-Fernández *et al.*, 2011).

Ce sont dans les chloroplastes que se déroule la réaction de photosynthèse. Ce mécanisme consiste en une réaction d'oxydoréduction catalysée par l'énergie lumineuse et qui convertit le dioxyde de carbone et l'eau en sucre simples et en oxygène.



Cette réaction globale se réalise en deux étapes (phase lumineuse et phase obscure) séparées dans l'espace et dans le temps (Figure 2).

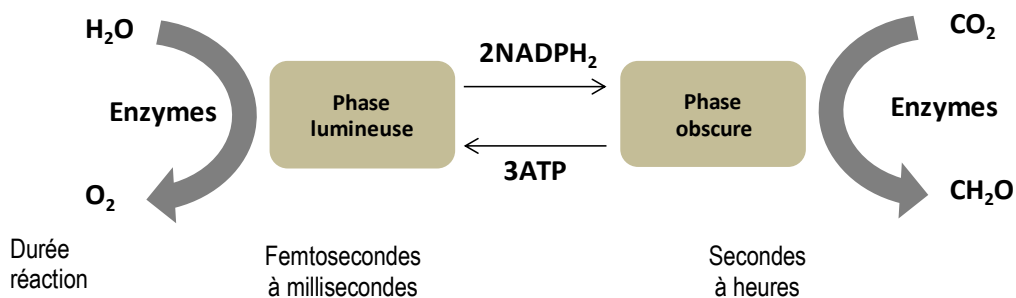


Figure 2 : Phases lumineuse et obscure de la réaction de photosynthèse

- Phase lumineuse

Cette réaction rapide est réalisée dans la membrane du chloroplaste. Elle permet la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique pour produire du NADPH_2 et de l'ATP. L'oxygène libéré résulte de la dissociation de la molécule d'eau consommée. Cette réaction est particulièrement rapide.

- Phase « obscure » ou sombre

Le siège de la réaction est situé dans le stroma (Figure 2) où les produits de la phase claire vont participer à la réduction du CO_2 en glucides. Cette étape est significativement plus lente que la précédente.

1.5 De l'efficacité photosynthétique à la productivité

La lumière solaire est la forme d'énergie la plus abondante et la plus distribuée sur terre. Ce flux continu constitue la ressource énergétique qui va permettre l'incorporation du carbone dans les biomasses photosynthétiques. A l'échelle de la terre, le flux carboné issu de ce métabolisme est presque équitablement réparti entre le phytoplancton et les plantes supérieures (Falkowski et Raven 2007).

Lors de son trajet du soleil vers la surface terrestre, le spectre lumineux est partiellement absorbé en traversant l'atmosphère pour atteindre une énergie de l'ordre de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. La chlorophylle « a » est le pigment le plus utilisé pour intercepter cette énergie et présente deux pics maximaux d'absorption à respectivement 400-450 et 650-700 nm (Figure 3).

Cela fixe les bornes du spectre lumineux utilisable pour les microalgues, et qui représente 45 % de l'énergie initialement reçue. Les autres pigments observés dans ces organismes (chlorophylle « b », phycoérythrine, phycocyanine, β -carotène) vont permettre d'augmenter la part d'énergie utilisable dans cette gamme du spectre.

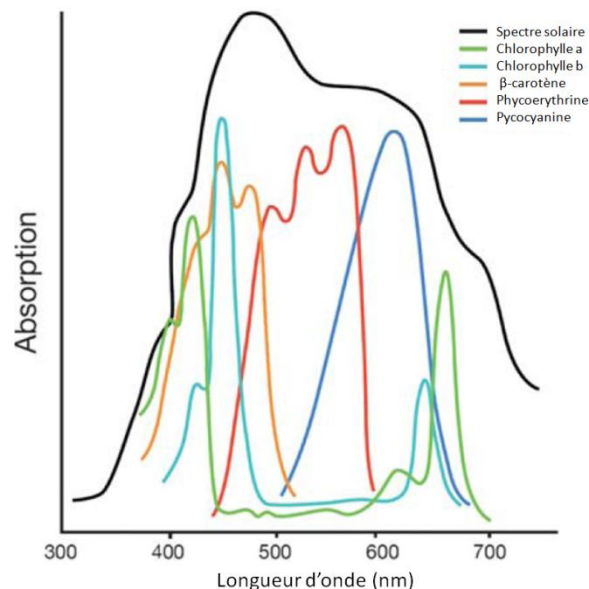


Figure 3 : Comparaison des spectres d'absorption de la chlorophylle et des pigments accessoires par rapport au spectre solaire (Williams et Laurens, 2010)

L'efficacité photosynthétique se définit comme la fraction de l'énergie solaire convertie en énergie chimique par les organismes photosynthétiques. En considérant (i) qu'une mole de CO_2 assimilée et

convertie en sucre simple a un pouvoir calorifique de 475 KJ et (ii) que cette conversion requiert 10 photons (8 photons utilisés et 2 perdus au cours de la réaction, soit 10×217 KJ) et enfin (iii) que seul 45 % du spectre peut être capté par les pigments photosynthétiques, le rendement théorique de la photosynthèse est de l'ordre de : $475/2170 \times 45\%$, soit environ 10 %.

Cependant, l'efficacité photosynthétique mesurée dans les systèmes de production en conditions extérieures s'étend de 2 % pour les procédés de culture les plus « simples » à presque 7 % pour des procédés particulièrement optimisés (Béchet *et al.*, 2013). Cette différence et la grande disparité observée dans la littérature est imputable à de nombreux facteurs : efficacité du transfert radiatif (diffusion atmosphérique, transmission dans la cellule), conditions de cultures (température, apport de CO₂, concentration en O₂ et présence d'autres inhibiteurs), turbulences et contaminations biologiques éventuelles (Williams et Laurens, 2010). Dès lors, la projection de l'efficacité synthétique vers une productivité surfacique doit inviter à une extrême prudence. Ce fait est soumis à une controverse déterminante. En effet, les enjeux associés aux perspectives économiques autour du potentiel – toutefois avéré – de ces organismes motivent des extrapolations du laboratoire à la production de masse qui se révèlent risquées (Walker, 2009).

En observant les productivités annuelles en conditions extérieures et ainsi proche d'une réalité industrielle (Tableau 2), nous constatons que la production de microalgues eucaryotes et procaryotes, certes supérieure d'un ordre de grandeur au colza, maïs, panic érigé et prairie mixte, reste cependant en deçà des productivités atteintes pour la canne à sucre (plante en C4).

Mais	Canne à sucre	Panic érigé et prairie mixte	Colza	<i>Tetraselmissuecica</i>	Spiruline
7	73-87	3.6-15	2.7	38	27

Tableau 2 : Productivité comparée de quatre espèces de plantes supérieures et de deux espèces de microalgues eucaryote et procaryote mesurée en conditions extérieures de cultures et exprimée en tonne de matière sèche par hectare et par an (adapté d'après Dismukes *et al.*, 2008)

1.6 Composition et nutrition

Les besoins nutritifs des microalgues sont similaires à ceux des plantes supérieures (Becker 1994). Redfield (1934) a proposé une composition élémentaire C:N:P de 106:16:1. Cette composition est relativement constante dans le milieu naturel. Défini par Vonshak (1986) le milieu de culture devra satisfaire les besoins en éléments majeurs (ou macroéléments) C,H,N,O,P,S et en micro-éléments encore appelés éléments traces. Le tableau suivant (Tableau 3) indique des ordres de grandeurs pour les éléments majeurs constitutifs des microalgues.

Elément	Composition cellulaire µg/mg de poids sec	Elément	Composition cellulaire µg/mg de poids sec
C	176-650	Mg	0,5-75
O	205-330	Fe	0,2-34
H	29-100	Zn	0,005-1
N	10-140	Mn	0,02-0,24
Na	0,4-47	Si	0-230
K	1-75	B	0,001-0,25
P	0-80	Mo	0,0002-0,001
S	1,6-16	Cu	0,006-0,3
		Co	0,0001-0,2

Tableau 3 : Eléments majeurs constitutifs des microalgues.

Enfin, le fractionnement biochimique se répartit suivant 4 familles de molécules : protéines, lipides, sucres et acides nucléiques (Tableau 4). Cette composition dépend des espèces et des conditions de culture.

Compartiment biochimique	Fonction	Ordre de grandeur (% massique)
Protéines	Structure et métabolisme	40-60
Lipides	Structure et réserve énergétique	5-60
Sucres	Structure et réserve énergétique	8-30
Acides nucléiques	Support, vecteur et régulateur de l'information génétique	5-10

Tableau 4 : Répartition du fractionnement biochimique d'une cellule de microalgue

Le carbone est le constituant majeur des microalgues (Van den Hende *et al.*, 2012). Si, vis-à-vis de cet élément, la plupart des microalgues mobilisent un métabolisme exclusivement photoautotrophe (utilisation de lumière comme source d'énergie et du carbone inorganique), d'autres présentent un métabolisme hétérotrophe (utilisation du carbone organique en absence de lumière) voire mixotrophe (métabolismes photoautotrophe et hétérotrophe conjugués), simultanément ou séquentiellement (Bumbak *et al.*, 2011; Becker, 1994).

Dans le cas du métabolisme photoautotrophe, le carbone inorganique pourra être introduit dans la culture sous forme gazeuse (CO₂) ou directement dans le milieu de culture sous la forme de carbonate (HCO₃⁻). Par rapport à d'autres mélanges gazeux (d'origine industrielle), l'air est relativement peu concentré en CO₂ (de l'ordre de 390 ppmv) et un apport supplémentaire va favoriser une croissance non limitée par le carbone et permettre d'atteindre des productivités plus importantes. Les effluents gazeux industriels issus de combustion constituent un gisement en carbone inorganique intéressant d'un point de vue économique et environnemental. En considérant que le carbone compte pour 50 % de la biomasse sèche des micro-algues, nous pouvons en effet calculer, à partir de la stœchiométrie de la photosynthèse, que 1,8 g de CO₂ permettra de produire environ 1 g de biomasse sèche.

Certaines espèces ont la capacité d'assimiler directement du carbone organique produit par d'autres organismes. Dans cette voie hétérotrophe, l'incorporation de carbone dans la cellule est plus coûteuse d'un point de vue énergétique et entraîne des taux de croissance plus faible. Les substrats organiques « simples » préférentiels sont le glucose et l'acétate. Bien plus intéressants d'un point de vue économique, les mélasses et effluents d'activité sucrière et laitière ont été également utilisés avec succès (Bumbak *et al.*, 2011).

La mixotrophie se définit comme la capacité des organismes à assimiler à la fois du carbone inorganique et du carbone organique. Le taux de croissance spécifique global sera sensiblement égal à la moyenne des taux de croissance obtenu dans les deux types trophiques. Cette propriété métabolique avantageuse est exploitée dans les filières industrielles de production de microalgues et de co-produits à haute valeur ajoutée (Lee, 2004).

L'azote compte pour 7 à 10 % de la composition de la biomasse. C'est un élément indispensable au métabolisme cellulaire qui intervient notamment dans la synthèse de protéines fonctionnelles et

structurelles. Il est assimilé préférentiellement sous les formes ammonium (NH_4^+) et nitrate (NO_3^-), mais nitrites et urée pourront également répondre aux besoins azotés (Becker 1994). La consommation de nitrate a pour effet d'augmenter le pH tandis que l'assimilation de l'ammonium provoque sa diminution. Dans ce dernier cas, un pH supérieur au pKa du couple $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ favorisera l'expression de la forme ammoniacale et par conséquent sa volatilisation potentielle ainsi qu'une perte nette pour les cellules. Certaines cyanobactéries, dites diazotrophes, ont la capacité d'assimiler directement l'azote minéral atmosphérique (N_2) en mobilisant une enzyme inexistante chez les eucaryotes, la nitrogénase (Berman-Frank et al., 2003). Décrit depuis 1949 (Spoehr et Milner, 1949), le contrôle des apports azotés constitue le mode de régulation le plus efficace et le plus employé pour réguler la synthèse et le stockage de composés organiques de réserve dans la cellule : lipides, sucres et pigments.

Le phosphore représente environ 1% du poids sec de la cellule. Il intervient pour l'essentiel dans le transfert d'énergie (ATP), la synthèse des acides nucléiques et la formation de la membrane cellulaire. La forme orthophosphate (PO_4^{3-}) est préférentiellement assimilée. Dans le milieu de culture, le phosphore est souvent considéré comme limitant. Sous forme ionique, il va en effet former des complexes avec la plupart des cations métalliques en présence. Dans certaines conditions (de pH notamment), il n'est alors plus assimilable par les cellules. Comme pour l'azote, la régulation des apports en phosphore est également un moyen de contrôler le stockage du carbone organique intracellulaire. Enfin, la gestion du ratio N/P dans les écosystèmes phytoplanctoniques complexes constitue en outre un moyen de maîtriser l'équilibre entre les populations Eucaryotes et Procaryotes (Bulgakov and Levich, 1999).

D'autres composés inorganiques sont déterminants dans l'activité métabolique du phytoplancton. Parmi ceux-ci, le potassium, qui est le cation le plus abondant dans le cytoplasme, intervient comme cofacteur enzymatique ainsi que dans les équilibres de charge des membranes. Le magnésium est indispensable au fonctionnement de la photosynthèse car il entre à la fois dans la composition de la chlorophylle et intervient comme cofacteur de la Rubisco (Pelmont, 2008; Becker, 1994). La plupart des éléments traces inorganiques (B, Co, Cu, B, Zn, Mo, V) sont mobilisés dans la composition de l'appareillage enzymatique et participent à la biosynthèse de nombreux composés (Richmond, 2008). L'élément trace le plus indispensable est le fer. Il intervient dans des réactions enzymatiques fondamentales : au niveau des cytochromes des chaînes respiratoires, de l'assimilation de l'azote, de la synthèse de la chlorophylle et des acides nucléiques (Becker 1994). Enfin, un certain nombre de composés organiques sont identifiés comme des facteurs de croissance indispensables pour certaines espèces qui sont incapables de les synthétiser. La cobalamine (vitamine B12) est fréquemment citée ainsi que la thiamine (Vitamine B1) et la biotine (Vitamine B7). Les bactéries hétérotrophes libres ou associées aux microalgues en relation symbiotique, subviennent à ces besoins en les excréant activement dans le milieu ou passivement au cours des lyses cellulaires (Croft et al. 2006 ; Droop, 2007).

2. Applications

Dès les années 50, les microalgues ont suscité un intérêt notable lorsque les sociétés d'après-guerre appréhendaient les perspectives d'une expansion démographique et ses conséquences sur l'alimentation mondiale (Becker, 2003). Un taux de croissance plus important que celui des plantes supérieures et une fraction protéique remarquable ont alors positionné le phytoplancton comme un gisement d'intérêt à l'avenir de la nutrition humaine. Ces travaux, vraisemblablement initiés dans l'Allemagne en guerre, ont marqué le début des enjeux scientifiques et industriels autour de ces cellules. La recherche et l'exploitation de métabolites d'intérêt pharmaceutique ont suivi ce mouvement.

Ainsi, si la nutrition constitue à l'heure actuelle l'essentiel des revenus industriels de ces organismes, ils s'adressent également de façon marginale aux marchés de la cosmétique, de la pharmacie et de l'environnement et bien plus récemment à celui de l'énergie. Actuellement, la production mondiale de microalgues était estimée à un peu plus de 10 000 tonnes de matière sèche par an (Tableau 5). Plus de 60 ans après un certain enthousiasme, l'ampleur de l'exploitation du phytoplancton demeure toutefois anecdotique par rapport à la production de macroalgues (15 millions de tonnes/an dans le monde, essentiellement en Asie) et de Procaryotes non photosynthétiques (eg., la seule production de boues activées est de l'ordre de 1 MT de matière sèche/an pour la France).

Algue	Production annuelle (t poids sec)	Pays producteur	Applications et produits
Spirulina	3,000	Chine, Inde, USA, République de l'Union du Myanmar, Japon	Nutrition animale et humaine, phycobiliprotéines, cosmétique
Chlorella	2,000	Taiwan, Allemagne, Japon	Nutrition humaine, aquaculture, cosmétique
Dunaliella	1,200	Australie, Israël, USA, Chine	Nutrition humaine, cosmétique, b-carotène
Aphanizomenon	500	USA	Nutrition humaine
Haematococcus	300	USA, Inde, Israël	Aquaculture, Astaxanthine
Cryptocodinium	240 t DHA	USA	Acide docosahexaénoïque (Omega-3) DHA
Schizochytrium	10 t DHA	USA	Acide docosahexaénoïque (Omega-3) DHA

Tableau 5 : Production mondiale de microalgues (d'après Spolaore *et al.*, 2006)

2.1 Alimentation humaine et animale

Depuis des millénaires, macroalgues et microalgues sont récoltées pour un usage alimentaire. Utilisée par les Mayas, la Spiruline est par exemple encore récoltée et consommée par les habitants des bords du lac Tchad. Si certains pigments sont utilisés comme colorants alimentaires (β -carotène, phycobiliprotéines), la contribution à la nutrition humaine des sociétés modernes reste essentiellement confinée à la nutraceutique (Milledge, 2011).

Le phytoplancton en tant que producteur primaire des milieux aquatiques est par ailleurs tout « naturellement » exploité comme ressource nutritive pour l'aquaculture (Spolaore *et al.*, 2006). Dans cette filière majeure de la production mondiale, les microalgues sont utilisées directement pour subvenir aux besoins des stades larvaires des mollusques bivalves et des crustacés (Muller-Feuga *et al.*, 2003) ou indirectement comme complément alimentaire et comme substrat pour le zooplancton, base alimentaire de nombreuses espèces aquacoles. A l'exception de la Spiruline, la faible digestibilité de ces cellules, due à une paroi pseudo-cellulotique, rend toutefois difficile la consommation de cette ressource protéique par les animaux terrestres (Becker, 1994).

2.2 Pharmaceutique et cosmétique

A l'instar des plantes supérieures, un certain nombre de métabolites d'intérêt sont extraits de la dizaine d'espèces exploitées industriellement à l'heure actuelle. Parmi ceux-ci, les caroténoïdes sont utilisés comme antioxydants (Astaxanthine) et comme colorants à usage alimentaire, pharmaceutique et cosmétique (β -carotène, phycobiliprotéines).

Les lipides constituent également une très large classe de molécules que la plupart des microalgues peuvent accumuler dans d'importantes proportions de leur poids sec. Les acides gras polyinsaturés – qui dans le milieu naturel se retrouvent concentrés dans les organismes marins en position inférieure dans la chaîne trophique – appartiennent à la classe des oméga-3 et oméga-6 comme les DHA et EPA. Egalement, des molécules élaborées par des diatomées, dinoflagellées et cyanobactéries font l'objet de travaux de recherche car elles présentent des propriétés anticancéreuses (Folmer *et al.*, 2010). D'autres composés aux propriétés antifongiques, antibactériennes, antivirales et antihistaminiques comptent également parmi les molécules à intérêt pharmaceutique.

2.3 Environnement et énergie

2.3.1 Traitement des effluents liquides

Etant donné que leurs conditions de croissance et leur activité métaboliques requièrent de l'eau et des éléments nutritifs (macro et micro-éléments), les microalgues ont la capacité de croître sur une vaste gamme d'effluents. La littérature scientifique rapporte un grand nombre de gisements auxquels les microalgues furent confrontées avec succès: eaux résiduaires urbaines, effluents d'élevages (Mulbry *et al.*, 2008) et effluents industriels comme les digestats (Levine *et al.*, 2011 ou encore les lixiviats de décharges (Eminenour-Muzalina *et al.*, 2011 ; Lin *et al.*, 2007 ; Richards *et al.*, 2013).

2.3.2 Traitement des métaux

Indispensables au métabolisme de tous les êtres vivants à l'état de trace, les ions métalliques se révèlent toxiques pour des concentrations excessives. A la différence des polluants organiques, ils sont non biodégradables et s'accumulent dans les organismes vivants, directement ou concentrés via la chaîne trophique, et expriment alors leur toxicité. Ils sont transférés en excès dans le milieu naturel portés dans les rejets d'un grand nombre d'activités industrielles (métallurgie, exploitation minière, production de fertilisants et de pesticides,...). Le traitement de ces métaux en solution se réalise couramment via des techniques physico-chimiques (précipitation/chélation, filtration membranaire...) et biologiques. Parmi ces dernières solutions, les microalgues se distinguent à la fois par une certaine tolérance à la présence de ces métaux et des rendements importants de fixation. A ce titre et étant donné leur position dans la chaîne trophique des milieux aquatiques, ces organismes sont utilisés comme indicateurs écotoxicologiques de la qualité des eaux vis-à-vis des métaux lourds notamment. Monteiro *et al.* (2012) décrivent un mécanisme de fixation des métaux qui se décompose en deux temps :

- Adsorption : l'adsorption peut se réaliser directement sur la paroi des cellules et/ou indirectement dans un mucus exo-polysaccharidique. Cette première étape, rapide et réversible, mobilise les charges portées par les groupes fonctionnels chargés négativement portés par la paroi.
- Assimilation dans le cytoplasme : cette réaction est plus lente, mobilise un mécanisme actif et est irréversible. Les ions rejoignent leur destination et leur fonction métabolique ou expriment leur toxicité.

2.3.3 Traitement des effluents gazeux

Le CO₂, identifié comme le gaz contributeur majeur à l'effet de serre, voit sa concentration en constante augmentation dans l'atmosphère depuis la révolution industrielle. Avec un impact avéré sur le réchauffement climatique, cette problématique a notamment motivé la recherche de solutions de piégeage de ce gaz avant sa libération et sa dilution dans l'atmosphère. Parmi ces technologies envisageables, sont étudiées les procédés physiques (capture et stockage du CO₂) et les solutions biologiques de fixation. Les solutions physiques de capture et de stockage se révèlent toutefois particulièrement coûteuses mais font l'objet de nombreuses expérimentations aux échelles pilotes et pré-industrielles. La croissance des microalgues en conditions non limitantes en carbone compte parmi les enjeux clés de la production de masse (Benemann et Woertz, 2012). L'utilisation de la photosynthèse pour la fixation de CO₂ d'origine anthropique répond ainsi à la fois à un enjeu environnemental du point de vue des activités industrielles particulièrement émettrices et à un enjeu économique sur le versant culture de masse des microalgues.

2.3.4 Production d'énergie

La production d'énergie à partir de microalgues est sans aucun doute le moteur de l'engouement et des activités de recherches croissantes mobilisées autour du potentiel offert par ces organismes depuis le début du XXI^{ème} siècle. A l'instar des gisements de biomasses mobilisés dans les filières bioénergies, et du fait d'une expression phénotypique métabolique identique aux plantes supérieures, les travaux portant sur la valorisation énergétique des microalgues concernent pour l'essentiel les mêmes filières (Figure 4). D'autres voies sont également explorées, comme la production directe d'hydrogène et l'utilisation de ces organismes dans des piles microbiennes.

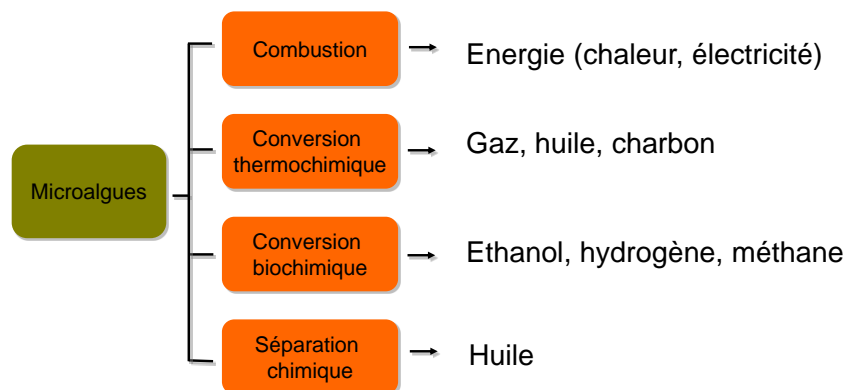


Figure 4 : Les quatre principaux processus de valorisation énergétique de la biomasse de microalgues

A titre illustratif, la biomasse sèche peut servir à produire de l'énergie par combustion directe (Kadam, 2002). Liquéfaction, pyrolyse ou hydrogénation de ces organismes permettent de produire un biocarburant gazeux ou une « huile » brute par conversion thermochimique (Mac Kendry, 2002 ; Miao et Wu, 2004). Méthane et éthanol peuvent être produits par conversion biochimique à partir respectivement de toute la biomasse ou de la fermentation des sucres accumulés dans la cellule (Sialve *et al.*, 2009). Cette filière de conversion permet également de produire de l'hydrogène par fermentation de tout ou partie de la cellule (Carver *et al.*, 2011; Mussnug *et al.*, 2010). Enfin, les

lipides intracellulaires peuvent être extraits par séparation chimique pour intégrer une filière biodiesel après transestérification (Hu *et al.*, 2008). Dans ce champ des possibles, les filières lipides, éthanol carburant et méthanisation sont les voies qui suscitent le plus d'intérêt et, a priori, de grands potentiels de développements industriels. En effet, comme pour les autres gisements de biomasse, ces formes d'énergie peuvent compléter ou se substituer à la plupart des énergies fossiles (gasoil, essence et gaz naturel) et bénéficier des mêmes filières de valorisation, réseaux de distribution et stockage.

3. Conclusions

Les travaux de l'INRA sur la thématique des microalgues concernent par exemple le fonctionnement des écosystèmes aquatiques alpins et lacustres en interaction avec les apports des bassins versants (<http://www7.dijon.inra.fr/thonon>) ou la nutrition et le métabolisme en aquaculture (http://www7.bordeaux-aquitaine.inra.fr/st_pee).

Pour notre part (<http://www4.montpellier.inra.fr/narbonne>), nous avons étudié il y a quelques années l'apport du phytoplancton pour le recyclage des eaux usées de la navette spatiale (Guerrin *et al.*, 1994) et nous nous sommes focalisés il y a un peu moins d'une dizaine d'années sur l'utilisation des microalgues dans un contexte de « bioraffinerie environnementale » (*i.e.*, production de molécules plateformes à haute valeur ajoutée combinée à une production de bioénergie à partir de résidus de l'activité humaine).

Cela nous a conduit à la rédaction de divers articles scientifiques récents portant notamment sur :

- le potentiel des microalgues dans un contexte de bioénergie (González-Fernández *et al.*, 2012a)
- le potentiel des microalgues dans un contexte de filière méthanisation (Sialve *et al.*, 2009 ; González-Fernández *et al.*, 2012b)
- l'analyse expérimentale d'un couplage entre un procédé de culture de microalgues et un procédé de digestion anaérobie (Ras *et al.*, 2011 ; González-Fernández *et al.*, 2013)
- L'optimisation des prétraitements pour la production de biogaz (González-Fernández *et al.*, 2012c ; 2012d)
- la croissance de microalgues sur des résidus de méthanisation (Vasseur *et al.*, 2012)
- les impacts environnementaux des procédés de culture de microalgues (Lardon *et al.*, 2009, Collet *et al.*, 2011 ; 2012)
- la modélisation de la digestion anaérobie des microalgues dans une filière biogaz (Mairet *et al.*, 2011 ; 2012)
- l'extrapolation de ces résultats à la culture de macroalgues (Langlois *et al.*, 2012, Jard *et al.*, 2013)

Ces travaux nous ont également conduits à l'élaboration d'un procédé pilote particulièrement instrumenté couplant un bassin ouvert de culture de microalgues de 56 m² à un digesteur anaérobie d'un m³ sur le site du LBE-INRA à Narbonne (dans le cadre du projet ANR-BIOE Symbiose associant l'INRA, l'INRIA, l'Ifremer, le CNRS, l'Université de Montpellier II et coordonné par la société Naskeo Environnement (Figure 5).



CE-SSCP : 1 couleur = 1 espèce (1 échantillon tous les 3 jours pendant 6 mois)

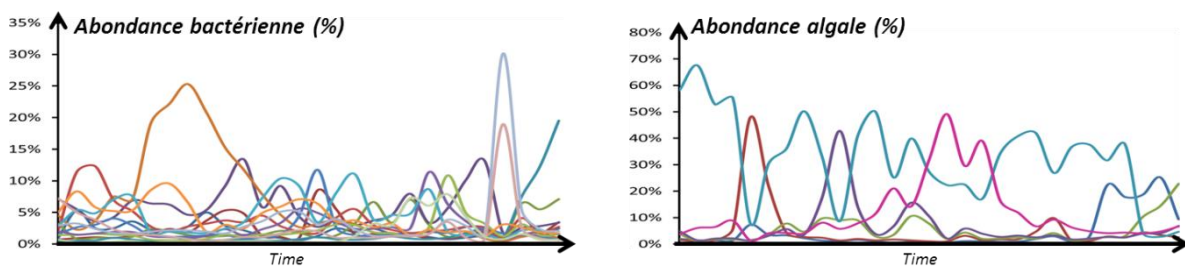


Figure 5 : L'« algotron », procédé pilote parfaitement instrumenté couplant un « raceway » de 56 m² à un digesteur anaérobie d'1 m³ sur le site du LBE-INRA à Narbonne

Références bibliographiques

- Andersen R.A., 1992. Diversity of eukaryotic algae. *Biodiversity and Conservation*, 1(4), 267–292.
- Assunção P., Jaén-Molina R., Caujapé-Castells J., Jara A., Carmona L., Freijanes K., Mendoza H., 2011. Phylogenetic position of *Dunaliella acidophila* (Chlorophyceae) based on ITS and *rbcL* sequences. *Journal of Applied Phycology*, 24(4), 635–639.
- Becker E. W., 1994. *Microalgae Biotechnology and microbiology*. Cambridge Press University.
- Becker E.W., 2003. Microalgae in Human and Animal Nutrition. In A. Richmond (Ed.), *Handbook of Microalgal Culture* (pp. 312–351). Blackwell Publishing Ltd.
- Benemann J., Woertz I., 2012. Life Cycle Assessment for Microalgae Oil Production, 1(2), 68–78.
- Berman-Frank I., Lundgren P., Falkowski P., 2003. Nitrogen fixation and photosynthetic oxygen evolution in cyanobacteria. *Research in microbiology*, 154(3), 157–64.
- Bulgakov N.G., Levich A.P., 1999. The nitrogen:phosphorus ratio as a factor regulating phytoplankton community structure, *Archiv für Hydrobiologie*, 146(1), 3–22.
- Bumbak F., Cook S., Zachleder V., Hauser S., Kovar K., 2011. Best practices in heterotrophic high-cell-density microalgal processes: achievements, potential and possible limitations. *Applied microbiology and biotechnology*, 91(1), 31–46.
- Béchet Q., Muñoz R., Shilton A., Guieysse B., 2013. Outdoor cultivation of temperature-tolerant *Chlorella sorokiniana* in a column photobioreactor under low power-input. *Biotechnology and bioengineering*, 110(1), 118–26.

- Carver S.M., Hulatt C.J., Thomas D.N., Tuovinen O.H. 2011. Thermophilic, anaerobic co-digestion of microalgal biomass and cellulose for H₂ production. *Biodegradation*, 22(4), 805–14.
- Collet P., Hélias A., Lardon L., Ras M., Goy R-A., Steyer J-Ph., 2011 : "Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production", *Bioresource Technology*, vol. 102, pp. 207-214.
- Croft M.T., Warren M.J., Smith, A.G., 2006. Algae need their vitamins. *Eukaryotic cell*, 5(8), 1175–83.
- Disimulak G.C., Carrieri D., Bennette N., Ananyev G.M., Posewitz M.C., 2008. Aquatic phototrophs: efficient alternatives to land-based crops for biofuels. *Current opinion in biotechnology*, 19(3), 235–40.
- Droop M.R., 2007. Vitamins, phytoplankton and bacteria: symbiosis or scavenging? *Journal of Plankton Research*, 29(2), 107–113.
- Falkowski P.G., Raven J.A., 1997. *Aquatic Photosynthesis*. Blackwell Science.
- Folmer F., Jaspars M., Dicato M., Diederich M., 2010. Photosynthetic marine organisms as a source of anticancer compounds. *Phytochemistry Reviews*, 9(4), 557–579.
- González-Fernández C., Sialve B., Bernet N., Steyer J-Ph., 2012a.: "Impact of microalgae characteristics on their conversion to biofuel. Part I: Focus on cultivation and biofuel production", *Biofuels, Bioproducts&Biorefining*, vol. 6, pp. 195-204..
- González-Fernández C., Sialve B., Bernet N., Steyer J-Ph., 2012b : "Impact of microalgae characteristics on their conversion to biofuel. Part II: Focus on biomethane production", *Biofuels, Bioproducts&Biorefining*, vol. 6, pp. 205–218.
- González-Fernández C., Sialve B., Bernet N., Steyer J-Ph., 2012c : "Thermal treatment to improve methane production of *Scenedesmus* ecosystem", *Biomass and Bioenergy*, DOI 10.1016/j.biombioe.2012.02.008.
- González-Fernández C., Sialve B., Bernet N., Steyer J-Ph., 2012d : "Comparison of ultrasound and thermal retreatment of *Scenedesmus* biomass on methane production", *Bioresource Technology*, DOI 10.1016/j.biortech. 2012.01.043.
- González-Fernández C., Sialve B., Bernet N., Steyer J-Ph. : "Effect of organic loading rate on methane production and nitrogen mineralization during anaerobic digestion of thermally pretreated *Scenedesmus* sp. biomass", *Bioresource Technology*, (sous presse)
- Guerrin F., Bousson K., Steyer J-Ph, Travé-Massuyès L., 1994 : "Qualitative reasoning methods for CELSS modeling", *Advances in Space Research*, vol. 14, n°11, pp. 307-312.
- Hu Q., Sommerfeld M., Jarvis E., Ghirardi M., Posewitz M., Seibert M., Darzins A., 2008. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant journal* □: for cell and molecular biology, 54(4), 621–39.
- Jard G., Jackowiak D., Carrère H., Delgenes J-P., Torrijos M., Steyer J-Ph., Dumas C. : "Batch and semi-continuous anaerobic digestion of *Palmariapalmata* : comparison with *Saccharinalatissima* and inhibition studies", *Chemical Engineering Journal*, (sous presse)
- Kadam K., 2002. Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring. *Energy*, 27(10), 905–922.
- Levine R.B., Costanza-Robinson M.S., Spatafora G.A., 2011. *Neochloris oleoabundans* grown on anaerobically digested dairy manure for concomitant nutrient removal and biodiesel feedstock production. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 40–49.
- Langlois J., Sassi J-F., Jard G., Steyer J-Ph., Delgenes J-Ph., Hélias A., 2012 : "Life cycle assessment of biomethane from offshore cultivated seaweed", *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, DOI: 10.1002/bbb.1330.
- Lardon L., Hélias A., Sialve B., Bernard O., Steyer J-Ph., 2009 : "Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, n°17, pp. 6475–6481.
- Macedo M.F., Miller A.Z., Dionísio A., Saiz-Jimenez C., 2009. Biodiversity of cyanobacteria and green algae on monuments in the Mediterranean Basin: an overview. *Microbiology (Reading, England)*, 155(Pt 11), 3476–90.
- Mairet F., Bernard O., Ras M., Lardon L., Steyer J-Ph., 2011 : "Modeling anaerobic digestion of microalgae using ADM1", *Bioresource Technology*, vol. 102, n°13, pp. 6823-6829.

- Mairet F., Bernard O., Cameron E., Ras M., Lardon L., Steyer J-Ph., Chachuat B., 2012 : "Three-reaction model for the anaerobic digestion of microalgae", *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 109, n° 2, pp. 415–425.
- Margesin R., Miteva V., 2011. Diversity and ecology of psychrophilic microorganisms. *Research in microbiology*, 162(3), 346–61.
- Milledge J., 2011. Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 10(1), 11.
- Monteiro C.M., Castro P.M.L., Malcata F.X., 2012. Metal uptake by microalgae: underlying mechanisms and practical applications. *Biotechnology progress*, 28(2), 299–311.
- Mulbry W., Kondrad S., Pizarro C., Kebede-Westhead E., 2008. Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: algal productivity and recovery of manure nutrients using pilot-scale algal turf scrubbers. *Bioresource technology*, 99(17), 8137–42.
- Muller-feuga A., Moal J., Kaas R., 2003. The aquaculture of microalgae. In L.A. McEvoy & J.G. Stottrup (Ed.), *Live feeds in marine aquaculture* (pp. 206–252). London, UK: Wiley-Blackwell.
- Mussnug J.H., Klassen V., Schlüter A., Kruse O., 2010. Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept. *Journal of biotechnology*, 150(1), 51–6.
- Pelmont J., 2008. *Glossaire de biochimie environnementale*. EDP SCIENCES.
- Pulz O., Gross W., 2004. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied microbiology and biotechnology*, 65(6), 635–48.
- Ras M., Lardon L., Sialve B., Bernet N., Steyer J-Ph., 2011 : "Experimental study on a coupled process of production and anaerobic digestion of *Chlorella vulgaris*", *Bioresource Technology*, vol 102, pp. 200–206.
- Redfield A., 1934. On the proportions of organic derivations in sea water and their relation to the composition of plankton, 177 – 192.
- Sharma Naveen Kumar, Rai A.K., 2011. Biodiversity and biogeography of microalgae : progress and pitfalls, 15, 1–15.
- Sharma Naveen Kumar, Rai A.K., Singh S., Brown R.M., 2007. Airborn algae: their present status and relevance, *Journal of Phycology*, 43(4), 615–627.
- Sialve B., Bernet N., Bernard O., 2009. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology advances*, 27(4), 409–416.
- Spoehr H.A., Milner H.W., 1949. The chemical composition of *Chlorellae*: effect of environmental conditions. *PLANT PHYSIOLOGY*, 24, 120–149.
- Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E., Isambert A., 2006. Commercial applications of microalgae. *Journal of bioscience and bioengineering*, 101(2), 87–96.
- Van Den Hende S., Vervaeren H., Boon N., 2012. Flue gas compounds and microalgae: (bio)chemical interactions leading to biotechnological opportunities. *Biotechnology advances*.
- Vasseur C., Bougaran G., Garnier M., Hamelin J., Leboulanger C., Le Chevanton M., Mostajir B., Sialve B., Steyer J-Ph., Foulland E., 2012 : "Carbon conversion efficiency and population dynamics of a marine algae–bacteria consortium growing on simplified synthetic digestate: First step in a bioprocess coupling algal production and anaerobic digestion", *Bioresource Technology*, vol. 119, pp. 79–87.
- Vonshak A., 1986. Laboratory techniques for the cultivation of microalgae. In R. A. (Ed.), *Handbook of microalgal mass culture* (pp. 117–145). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Walker D.A., 2009. Biofuels, facts, fantasy, and feasibility. *Journal of Applied Phycology*, 21(5), 509–517.
- Williams P.J.L.B., Laurens L.M.L., 2010. Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics. *Energy & Environmental Science*, 3(5), 554.