

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

Université des Frères Mentouri Constantine

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Biochimie



Mémoire présenté en vue d'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Spécialité : Biochimie Appliquée

Intitulé :

**La production des métabolites par les
micro-algues**

Présenté par :

- ❖ **AISSAOUI Ikram**
- ❖ **ZARZA Safa**

Jury d'évaluation :

Présidente : Mme Bennamoun L., MCB Universtité Des Frères Mentouri Constantine 1.

Encadrante : Mme Dakhmouche S., MCA ENS Assia Djebbar, Constantine.

Examinatrice : Mme Riah.N., MCB Universtité Des Frères Mentouri, Constantine 1.

Année Universitaire

2020-2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





Remerciements

En premier lieu et avant tout nous tenons à remercier DIEU le tout puissant qui nous avons donné le courage, la patience et la force de terminer ce travail.



Nous tenons à remercier particulièrement mon encadreur,

Mme DAKHEMOUCHE schahrazed

pour ça haute compétence, ces qualités humaines, et ces conseils judicieux qui ont été pour nous une source inestimable de réconfort et d'encouragement pour l'accomplissement de ce travail. Qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous exprimons tous mes remerciements à l'ensemble des membres de jury d'avoir bien voulu accepter de juger ce travail :

Nous remercions qui n'ont manqué aucun effort et ont contribué de près et de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicaces

Avec tout respect et amour je dédie ce modeste travail

À mes chers parents Yazid et Fouzia

Qui m'ont soutenue et encouragée durant ces années d'étude et pour l'éducation qu'ils m'ont prodigué, avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis mon enfance.

À mes chères sœurs Soumia, Randa, Narimen et mon frère Wassim

Pour tout leur soutien moral et leur amour et affection, et particulièrement et pour me motiver à avoir autant de succès et de réussite.

À tous mes proches de la famille Aissaoui

À ma chère binôme ZARZA Safa et à toute sa famille

Ma douce sœur qui a eu la patience de me supporter durant ce mémoire, et qui m'a soutenue et encouragé pendant tous les moments difficiles vécus.

À tous les étudiants de ma promotion

 *Aissaoui Ikram*



Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance... Aussi, c'est tout simplement que je dédie ce modeste travail...

À mes chers parents Tahar et Linda

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À mon chère mari Nabil

Mon conseiller, et ami fidèle qui m'a assisté dans les moments difficiles et m'a pris doucement par la main pour traverser ensemble des épreuves pénibles...

À mes chères adorables sœurs et frère Imad Eddine le généreux, Asma la prunelle de mes yeux, ma petite adorable Melissa et mon petit poussin Yanis

À ma petite fille, mon miracle Zeineb Melina

À mon amie intime Imene

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

À ma binôme Ikram et à toute ma promotion 2021 Master 2 Biochimie que j'ai passé avec des moments inoubliables malgré la courte durée que je les ai rencontré.

 ZARZA Safa



Résumé

Depuis plusieurs années, la recherche dans le domaine des bioénergies s'oriente de plus en plus vers l'utilisation des microorganismes (bactéries, levures, moisissures et microalgues) pour la production de biocarburants. Face au contexte actuel de développement durable, l'utilisation des microorganismes oléagineux photoautotrophes (cyanobactéries et microalgues) semble potentiellement plus intéressante d'un point de vue économique (énergie solaire) et environnemental (assimilation de CO₂) malgré des productions plus faibles que celles des microorganismes oléagineux hétérotrophes (levures et moisissures).

L'objectif de cette recherche bibliographique est d'identifier les métabolites biochimiques produits par les microalgues, afin de déterminer l'étendue de l'intérêt et de la culture des microalgues sur terre et leur rôle principal dans l'augmentation significative des rendements productifs. La première partie de cette thèse présente des généralités sur les microalgues, leur classification et leur composition biochimique, tandis que la seconde partie présente la culture des microalgues et leur production de différents métabolites

Mots clés : Microalgues, biodiversité, métabolites, biocarburant, bioénergies.

Abstract

For several years, research in the field of bioenergy has been directed more and more towards the use of microorganisms (bacteria, yeasts, molds and microalgae) for the production of biofuels. Faced with the current context of sustainable development, the use of photoautotrophic oleaginous microorganisms (cyanobacteria and microalgae) seems potentially more interesting from an economic (solar energy) and environmental (CO² assimilation) point of view despite lower productions than those of heterotrophic oleaginous microorganisms (yeasts and molds).

The objective of this bibliographical research is to identify the biochemical metabolites produced by microalgae, in order to determine the extent of interest and cultivation of microalgae on earth and their main role in the significant increase in productive yields. The first part of this thesis presents generalities on microalgae, their classification and their biochemical composition, while the second part presents the culture of microalgae and their production of different metabolites.

Keywords: Microalgae, biodiversity, metabolites, biofuel, bioenergy

مُلخَّص

منذ عدة سنوات، ركزت الأبحاث في مجال الطاقة الحيوية بشكل متزايد على استخدام الكائنات الحية الدقيقة (البكتيريا والخمائر والقوالب والطحالب الدقيقة) لإنتاج الوقود الحيوي. وفي مواجهة السياق الحالي للتنمية المستدامة، يبدو استخدام الكائنات الدقيقة للزيت الفوتوتوتروفيك (البكتيريا الزرقاء والطحالب الدقيقة) أكثر إثارة للاهتمام من وجهة نظر اقتصادية (الطاقة الشمسية) والبيئة (استيعاب ثاني أكسيد الكربون) على الرغم من انخفاض إنتاج الكائنات الدقيقة للذرى الزيتية غير المتغايرة (الخمائر والقوالب).

والهدف من هذا البحث البيولوجي هو تحديد الأيضات الكيميائية الحيوية التي تنتجها الطحالب الدقيقة، من أجل تحديد مدى أهمية زراعة الطحالب الدقيقة على الأرض ودورها الرئيسي في زيادة الغلة الإنتاجية بشكل كبير.

الجزء الأول من هذه الأطروحة يعرض العموميات على الطحالب الدقيقة وتصنيفها وتكوينها الكيميائي الحيوي، في حين أن الجزء الثاني يعرض زراعة الطحالب الدقيقة وإنتاجها من الأيض المختلفة.

الكلمات المفتاحية: الطحالب الدقيقة، التنوع البيولوجي، الأيض، الوقود الحيوي، الطاقة الحيوية.

LISTE DES FIGURES

Figure 01	Structures cellulaires d'une microalgue eucaryote	04
Figure 02	Schéma de fonctionnement d'une micro-algue, intrants, produits, application	05
Figure 03	Diversité morphologique des microalgues	06
Figure 04	Quelque exemple des Cyanophytes	07
Figure 05	<i>Chlorella vulgaris</i> observée en microscope optique	08
Figure 06	Bacillophyta vue par microscope électronique	09
Figure 07	<i>Porphyridium cruentum</i> observée en microscope optique (×100).	10
Figure 08	Prymnésiophycées sous microscope électronique	11
Figure 09	Eustigmatophyta vue microscopique	11
Figure 10	Structure du chloroplaste	13
Figure 11	Mécanisme de photosynthèse	14
Figure 12	Différentes étapes du cycle de Calvin	15
Figure 13	Phases de croissance des microorganismes	17
Figure 14	Rendement photosynthétique en fonction de l'intensité lumineuse incidente (exprimée en $\mu E.m^{-2}.s^{-1}$)	19
Figure 15	Reproduction sexuée et asexuée chez les microalgues	25
Figure 16	Culture de <i>Dunaliella salina</i> en bassins naturels de 200 ha Cognis nutrition (Australie)	26
Figure 17	Bassin circulaire de culture de Spirulline, Culture de <i>Spirulina</i> en raceway, Californie	27
Figure 18	Système de photobioréacteurs	27

Figure 19	Photo bioréacteur plan	28
Figure 20	Colonne à bulles	29
Figure 21	Trois types de photobioréacteurs	30
Figure 22	Photobioréacteurs tubulaires	31
Figure 23	Système « Plastic bag »	32
Figure 24	Fermenteur de production d'Oméga-3 à partir de microalgues	32
Figure 25	Différents types de polysaccharides partiels des microalgues	36
Figure 26	Structures de l'amylose et de l'amylopectine	37
Figure 27	Structure chimique de l'amylose	37
Figure 28	Organisation structurale d'une fibre de cellulose	38
Figure 29	Formes nutritives des microalgues	46
Figure 30	Nourriture pour poisson (HBH)	47
Figure 31	Procédé de traitement des eaux par les microalgues	48
Figure 32	Représentation schématique du procédé de fixation de par les microalgues à partir de gaz d'échappement industriel	49
Figure 33	Procédés de production de biocarburant via microalgues	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01	Modes de nutrition des microalgues	13
Tableau 02	Représente les différents types nutritionnels des microalgues	16
Tableau 03	Répartition du fractionnement biochimique d'une cellule de microalgue	24
Tableau 04	Comparaison des avantages et inconvénients des bassins de type raceway et des photobioréacteurs	33
Tableau 05	Contenu lipidique de diverses espèces	42

LISTE DES ABREVIATIONS

(C16 :0) : Acide palmitique

(C16 :2) : Acide hexadecadiénoïque

(C18 :1) : Acide oléique

(C18 :2) : Acide linoléique

(C18 :3) : Acide linoléique

ADN : Acide Désoxyribonucléique

AGPI : Acide gras polyinsaturé

ATP : Adénosine Tri-Phosphate

BPS : Bound Polysaccharide

CO₂ : Dioxyde de carbone

CPS : Carbamoyl phosphate synthetase,

Cytb6/f : Cytochrome b6/f

DGDG : Digalactosyldiacylglycérol

DOC : Dissolved Organic Carbon

EDTA : Acide Ethylène Diamine Tétra-Acétique

EPS : Exopolysaccharide

FACS : Fluorescence Activated Cell Sorting

GES : Gaz à Effet de Serre

HCO₃ : Hydrogénocarbonate

HIV : Virus d'Immunodéficience Humaine

IAA : Acide indole 3-acétique

LPS : lipopolysaccharides

MCC : Mécanisme de Concentration en CO₂

MGDG : Digalactosyldiacylglycérol

NADP+ : Nicotinamide adénine donuclétide phosphate, forme oxydée

NADPH : Nicotinamide adénine donuclétide phosphate, forme réduite

PC : Plastocyanine

PC : Phosphatidylcoline

PG : Phosphatidylglycérol

PH : Potentiel Hydrogene

Ppmv : Partie par million volume

PQ : Plastoquinone

PS : Polysaccharide

PSI : Photosystème I

Rbcl : Rubidium chloride

RPS : Released Polysaccharide

RuBisCO : Ribulose 1,5 Biphosphate carboxylase / oxygénase

SQDG : Sulfoquinovosyldiacylglycérol

TAG : Triacylglycérol

Table des matières

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abreviations

Introduction01

Chapitre I :

Les microalgues

I. Généralité sur les microalgues04

II. Caractéristiques des microalgues.....05

III. Taxonomie06

III. 1. Procaryotes07

III. 1. 1. Cyanophyta (Les cyanobactéries)07

III. 1. 2. Prochlorophyta07

III. 2. Eucaryotes.....08

III. 2. 1. Bacillariophyta (Ochromphyta)09

III. 2. 2. Rhodophyta (microalgues rouges)10

III. 2. 3. Prymnésiophycées (Haptophycées)10

III. 2. 4. Eustigmatophycées11

IV. Habitat des microalgues12

V. Nutrition des microalgues12

VI. Mécanisme de la photosynthèse chez les algues13

VI. 1. Phase lumineuse.....14

VI. 2. Phase sombre14

VII. Modes de nutrition des microalgues15

VII. 1. Photo autotrophie	15
VII. 2. Hétérotrophie	16
VII. 3. Mixotrophie	16
VIII. Croissance des microalgues.....	16
IX. Effet de différents paramètres sur la croissance des microalgues.....	17
IX. 1. Lumière	18
IX. 2. Température	20
IX. 3. pH.....	20
IX. 4. Salinité du milieu	21
IX. 5. Influence des nutriments.....	21
IX. 5. 1. Influence de la teneur en dioxyde de carbone (CO ₂)	21
IX. 5. 2. Influence de la teneur en azote	22
IX. 5. 3. Influence de la teneur en phosphore	22
IX. 5. 4. Apport des microéléments.....	23
X. Composition biochimique des microalgues	24
XI. Mode de reproduction des microalgues	25
XI. 1. Reproduction asexuée	25
XI. 2. Reproduction sexuée	25
XII. Système de culture des microalgues.....	25
XII. 1. Système ouvert	26
XII. 2. Système fermé	27
XII. 2. 1. Photobioréacteurs plans	28
XII. 2. 2. Photobioréacteurs de type cylindrique.....	29
XII. 2. 3. Photobioréacteur « Plastic-bag » ou gaine.....	31
XII. 2. 4. Fermenteurs.....	32
XIII. Comparaison des avantages et inconvénients des bassins de type raceway et des photobioréacteurs	33

Chapitre II :

La production des métabolites par les microalgues

I. Molécules d'intérêts produites par les microalgues	35
I. 1. Polysaccharides.....	35
I. 1. 1. Selon leur degré de polymérisation, ils sont classés en deux catégories	35
I. 1. 2. Selon la disposition de leur chaîne	35
I. 1. 3. En fonction des espèces	35
II. Domaine d'application des microalgues	44
II. 1. Domaine pharmaceutique	44
II. 2. Domaine alimentaire.....	45
II. 3. Domaine des microalgues en aquaculture	47
II. 4. Domaine cosmétique	47
II. 5. Domaine environnementales	48
II. 5. 1. Traitement des eaux usées	48
II. 5. 2. Remédiation du CO₂.....	49
II. 5. 3. Agriculture.....	50
II. 6. Domaine énergétique	50
II. 6. 1 . Biodiesel	51
II. 6. 2. Biohydrogène	51
II. 6. 3. Biocarburant.....	52
Conclusion	55
Références bibliographiques	58

Introduction

Introduction

Le pétrole représente la principale source d'énergie fossile dans le monde. L'exploitation des sources fossiles est de plus en plus associée à des problèmes environnementaux, géopolitiques et économiques (Doré-Deschenes, 2009). Sachant que l'épuisement de ces ressources dites fossiles est annoncé, mais il reste lointain, d'au moins plusieurs décennies. Arrivons-nous à la fin des énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole) et saurons nous nous en passer ? Quelles alternatives envisageons-nous ?

De plus pour un souci permanent de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de préservation de l'environnement, nous devons nous intéresser aux bioénergies, ces dernières semblent incontournables (Khaldi et Zeggaoui, 2014).

Pour nos sociétés modernes, en quête de nouveaux procédés et de molécules actives innovantes, les microalgues représentent un formidable potentiel. Leurs nombreuses espèces constituent un réservoir de métabolites et de propriétés biochimiques quasi-inexploré, pour le développement de nouvelles applications biotechnologiques (Bougaran et Saint-Jean., 2014).

Ces êtres vivants existent depuis trois milliards d'années, elles colonisent la quasi-totalité des écosystèmes de la terre : de l'eau sur-salée à l'eau douce, du chaud au froid, ils se trouvent aussi fixées sur les roches, les troncs d'arbres ou dans le sol et les poils des animaux (Gudin., 2013). Ils constituent le premier maillon indispensable à notre survie sur la terre. En effet, ils sont les premiers producteurs d'oxygène et de matière organique, maillon fondamental de la chaîne alimentaire, mais également premier consommateur de dioxyde de carbone, donc jouant un rôle dans la stabilité du climat (Asfour, 2019).

Les microalgues s'affirment comme une bioressource végétale nouvelle et prometteuse dans plusieurs domaines (Pruvost *et al.*, 2011). Elles présentent des caractéristiques biochimiques très intéressantes qui leur confèrent un grand nombre d'applications à l'échelle scientifique et industrielle dans différents domaines à savoir : la production de molécules à hautes valeurs ajoutées exploitées dans le domaine pharmaceutique et cosmétique, l'alimentation humaine et animale et la production d'énergie renouvelable à travers la synthèse biologique d'hydrogène, de méthane et de carburant (Khaldi et Zeggaoui, 2014).

Les microalgues ont une forte productivité avec des taux de croissance élevés largement supérieurs à ceux des plantes terrestres, ainsi qu'une capacité à stocker d'importantes quantités de lipides les ont positionnés comme une source prometteuse de biocarburant de 3^{ème} génération. D'autre part elles peuvent produire des molécules telles que les antioxydants, les pigments, les acides gras, les vitamines... (Asfour, 2019)

Donc, les bioprocédés à base de microalgues représentent des alternatives encourageantes aux technologies actuelles, notamment dans tous les domaines (énergétiques, pharmaceutiques et nutraceutiques). Toutefois, l'implantation de ces procédés à grande échelle est ralentie par leur difficile rentabilité (Morisset, 2018).

Dans ce contexte, notre objectif est de mettre à la lumière la grande valeur des microalgues qui 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, et les chercheurs et les industriels doivent s'investir dans ces vastes domaines d'application. En Algérie peu d'études ont y été consacré. Ce travail comprend deux chapitres :

- Dans le premier chapitre nous avons mentionné les connaissances sur les microalgues à savoir les caractéristiques, l'habitat, la taxonomie, la reproduction, la nutrition et la croissance, les différents facteurs influençant la croissance, la composition biochimique des microalgues et leur culture.
- Le deuxième chapitre est consacré pour la production des métabolites à haute valeur par les microalgues et leurs domaines d'application.

Chapitre I

Les microalgues

I. Généralités sur les microalgues

Le terme microalgue, parfois appelé microphyte, désigne les algues microscopiques, Elles peuvent mesurer de quelques micromètres à plusieurs centaines de micromètres, selon les espèces (Boileau, 2015). Ce sont des microorganismes unicellulaires photosynthétiques dites thallophytes (ne possèdent ni racines ni feuilles), et sont capables de convertir l'énergie lumineuse et une source de carbone (CO_2) en un ensemble de produits organiques. (khatab et toumi, 2019).

Les microalgues sont divisées en deux grandes catégories : les microalgues eucaryotes (Figure 01) et les microalgues procaryotes (Lee *et al.*, 2009 and Mollo et Noury, 2013).

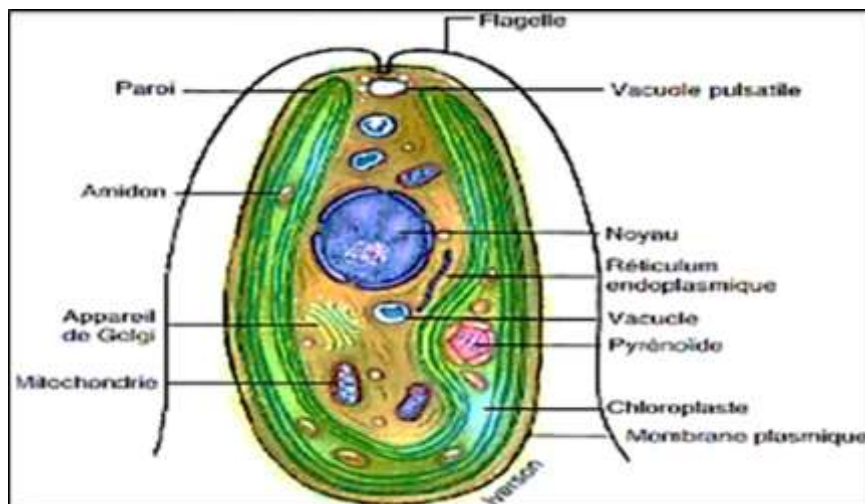


Figure 01 : Structures cellulaires d'une microalgue eucaryote (Boileau, 2015).

Elles se caractérisent par une grande diversité morphologique (taille, couleur, et forme) et cette diversité leur permet de coloniser plusieurs milieux terrestre et aquatique à la fois (Richmond, 2001).

Les microalgues présentent une très grande diversité de molécules au sein de leurs cellules (Figure 2). Cette biomasse se différencie principalement des autres végétaux par sa richesse en lipides qui pouvant atteindre jusqu'à 80 % de leur poids sec, et ils sont principalement sous forme des triglycérides (Cantin et juillet, 2010), en protéines, en vitamines (B1, B6, B12, C, E, K1), en pigments tels que les caroténoïdes (1% à 2%) et en antioxydants (Person, 2010).

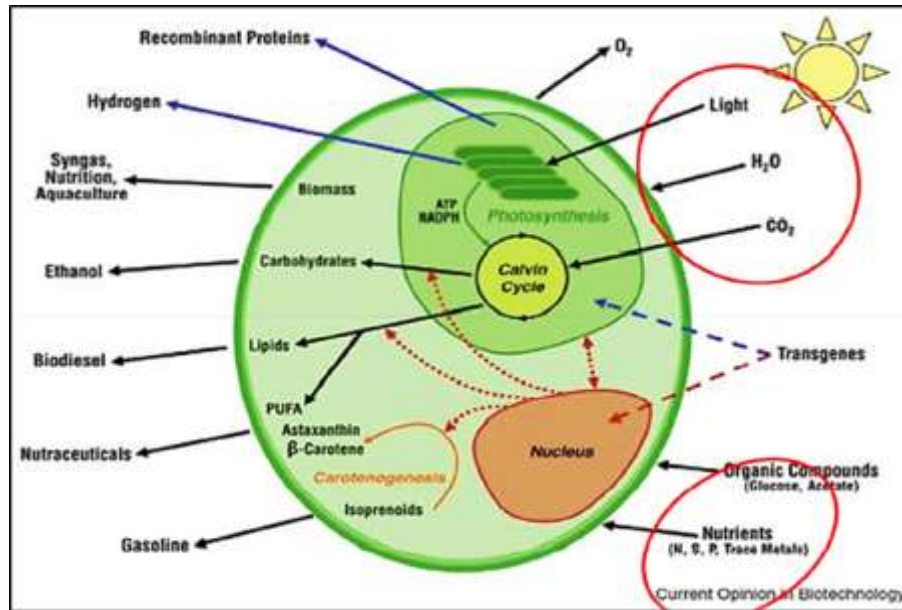


Figure 02 : Schéma de fonctionnement d'une micro-algue, intrants, produits, application (Person, 2010).

La membrane plasmique est une structure composée de polysaccharides et de protéines plus ou moins complexes et en proportions variables selon les espèces. Elle est chargée négativement, ce qui est attribuable à la composition des groupes fonctionnels qui y sont associés. Elle confère aux cellules une certaine résistance aux ions métalliques potentiellement toxiques, ce qui motive leur utilisation pour le traitement des eaux. Les microalgues ont démontré une certaine capacité à accumuler rapidement les lipides, ce qui leur a permis de se profiler dans le domaine des biocarburants de 3^{ème} génération (Boileau, 2015).

II. Caractéristiques des microalgues

La majorité des microalgues sont dites photo-autotrophes ou autotrophes. Elles tirent leur énergie de la lumière par photosynthèse et leur principale source nutritive est le CO₂ en solution dans l'eau. Leur relative simplicité et la petitesse de leur taille permettent d'effectuer une photosynthèse très efficace. Elles convertissent ainsi l'énergie lumineuse en lipides et en hydrates de carbone, des formes plus condensées et stables d'énergie. De plus, leur condition aquatique leur donne un accès optimal à l'eau et en particulier aux nutriments comme le CO₂ dissout. Par exemple, ces petites plantes peuvent être de dix à trente fois plus productives en huiles par unité de surface de production en comparaison avec les cultures oléagineuses terrestres conventionnelles.

Certaines espèces peuvent aussi être chimio-hétérotrophes (chimio-organotrophes) ou hétérotrophes. Ainsi, au besoin, elles sont capables de puiser de l'énergie et des nutriments directement des matières organiques présentes dans le milieu aquatique (Chevalier *et al.*, 2002). Par exemple, l'espèce *Agmenellum quadruplicatum* devient hétérotrophe en conditions de faible luminosité (Van Baalen *et al.*, 1970). La majorité des microalgues croissent à une température de 25-35°C avec un pH neutre (Zeng *et al.*, 2011).

Les microalgues présentent des formes variables : souvent sphériques (*porphyridium*), en forme de croissant (*clostridium*), de spirale (*Arthrospira*), de gouttelette (*chlamydomonas*) et même d'étoile (*Staurastrum*) (voir figure 3).

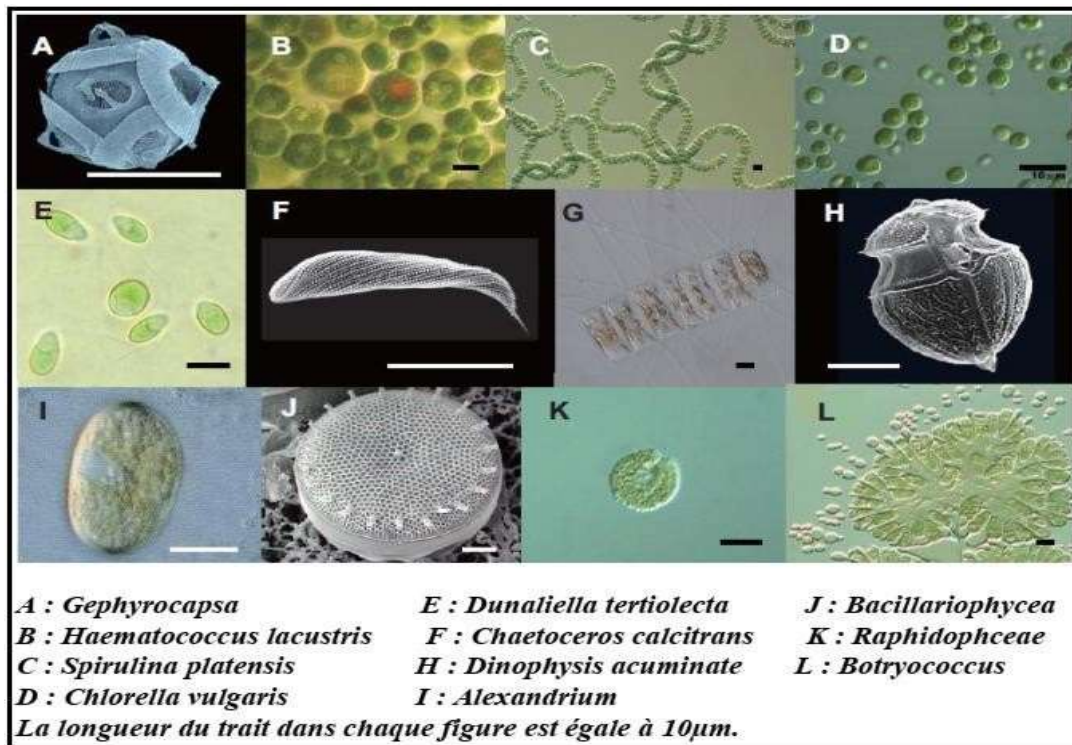


Figure 03 : Diversité morphologique des microalgues (Sumi, 2009).

III. Taxonomie

Le classement des microalgues 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 (Person, 2010), Le nombre de membranes plastidiales, la forme des crêtes mitochondriales, l'appareil flagellaire, et d'autres caractéristiques morphologiques (Reviere, 2002).

III. 1. Procaryotes

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

III. 1. 1. Cyanophyta (Les cyanobactéries)

Les cyanobactéries sont des procaryotes photosynthétiques. Bien qu'elles soient souvent appelées algues bleu-vert, elles n'ont aucun lien direct avec les algues supérieures. Elles sont l'un des plus anciens organismes sur terre avec des archives fossiles datant de 3, 5 milliards d'années (Mazard *et al.*, 2016), dont la principale espèce cultivée est *Spirulina*. La photosynthèse se produit directement dans le cytoplasme. Elles seraient à l'origine des chloroplastes des cellules eucaryotes (Person, 2014). D'après Bouamra et hadj (2004) et Thomazeau (2006) on dénombre deux classes 5 ordres divisés en 27 familles qui comportent 150 genres et 2000 espèces (figure 04).

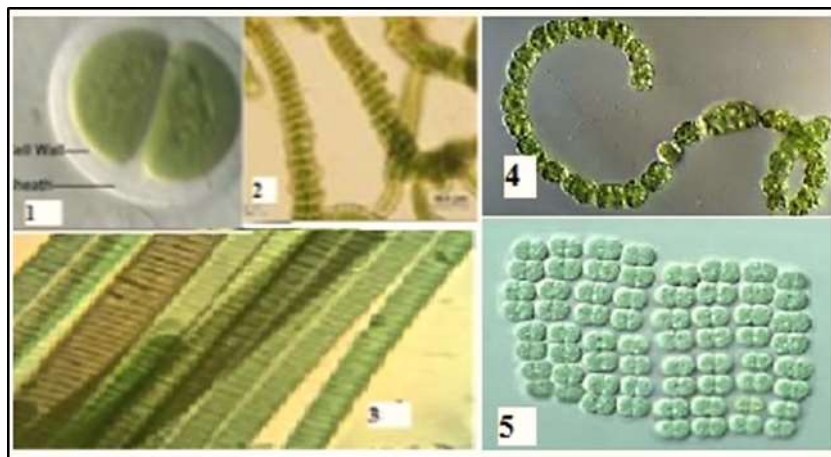


Figure 04 : Quelque exemple des Cyanophytes : 1- *Chroococcus turgidus*,
2- *Stigonema mamillosum* 3- *Oscillatoria margaritifera*, 4- *Anabaena spiroides*,
5- *Merismopedia elegans*. (Abadli, 2014).

III. 1. 2. Prochlorophyta

Les prochlorophyta, ou freeliving chloroplastes, sont une autre collection de cyanobactéries qui représentent un groupe artificiel en fonction de leur pigmentation différente, qui dérive d'une absence de phycobiliprotéines, et dans la plupart des cas, de la présence de chlorophylles a et b (López, *et al.*, 2017).

Les espèces appartenant à ce groupe peuvent être autotrophes ou hétérotrophes et colonisent tout type d'habitat. Les cellules peuvent être de forme sphérique, ovoïde, ou ellipsoïdale (Hanagata et Chihara, 1999 and Feipeng *et al.*, 2014).

Chlorella vulgaris (figure 05). Parmi les premières formes de vie apparues sur terre et en raison de son contenu intéressant en acides gras fait l'objet de nombreux travaux (Queiroz *et al.*, 2002; Safi *et al.*, 2014 and Sun *et al.*, 2018) et est utilisée comme complément alimentaire, colorant mais aussi dans la production du biodiesel grâce à son potentiel d'accumuler de grandes quantités de lipides (Safi *et al.*, 2014). *Dunaliella salina* et *Haematococcus pluvialis* sont la source naturelle de production de caroténoïdes à l'échelle industrielle et font l'objet d'applications nutritionnelles (utilisées comme complément dans le pain, les biscuits, les bonbons, les crèmes glacées); mais ont aussi des applications cosmétiques (Les extraits de ces microalgues sont ajoutées aux crèmes régénérantes pour les lotions pour le visage et le corps) (Mobin et Allam, 2017).

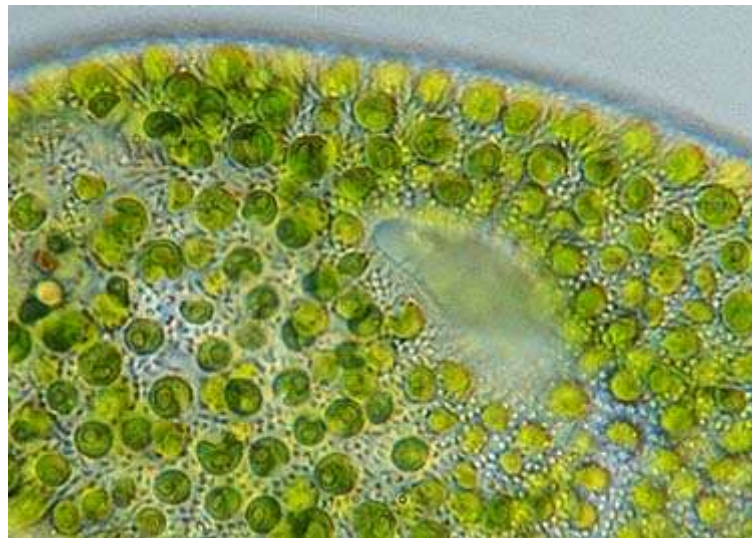


Figure 05 : *Chlorella vulgaris* observée en microscope optique (Web 01).

III. 2. Eucaryotes

Les microalgues eucaryotes sont des organismes uni ou pluricellulaires qui présentent une structure complexe contenant un noyau (Bateman, 2020).

Différentes microalgues eucaryotes ont été identifiées et placées dans divers groupes, et sont principalement reconnues par le pigment (Anand *et al.*, 2017).

III. 2. 1. Bacillariophyta (Ochrophyta)

Les bacillariophycées sont des organismes photosynthétiques représentées par les diatomées, souvent appelées «algues brunes», cette couleur est due à la présence de chlorophylles *a* et *c*, le bêta- carotène, la fucoxanthine, la diatoxanthine et la diadinoxanthine (Kuczynska *et al.*, 2015).

Les diatomées sont des algues unicellulaires non flagellées entourées d'un exosquelette siliceux caractéristique appelé frustule. Cette classe d'algues présente l'une des plus grandes richesses en espèces de phytoplancton avec environ 14 000 espèces. Elles sont présentes dans les habitats marins, d'eau douce et (semi) terrestres du monde entier, et contribue à la production primaire et au cycle biogéochimique du carbone et des nutriments (Stock *et al.*, 2018).



Figure 06 : Bacillariophyta vue par microscope électronique (Web 02).

III. 2. 2. Rhodophyta (microalgues rouges)

Ce sont des organismes en la majorité sont macroscopiques colorés en rouge. (Pencreac *et al.*, 2004).

Seules quelques espèces sont unicellulaires. Parmi celles-ci *Porphyridium purpureum* (anciennement *cruentum*) qui possède une forte potentialité pour la production d'acide eicosapentaénoïque.

Ils ont la phycoérythrine et la phycocyanine, qui peuvent masquer la chlorophylle a. Ce groupe ne présente pas de chlorophylles accessoires, bien que les algues rouges produisent un large éventail de carotènes et les pigments de xanthophylle récoltant la lumière (Yan *et al.*, 2016).

La microalgue *Porphyridium cruentum* (Figure 07) a plusieurs utilisations industrielles, pharmaceutiques et nutritionnelles pour sa richesse en polysaccharides (Razaghi *et al.*, 2014) mais aussi pour sa production de nombreux métabolites valorisables tels que des pigments (B-phycoérythrine, zéaxanthine, astaxanthine) et des acides gras oméga 3, oméga 6 (Rebollos-Fuentes *et al.*, 2000; Guil-Guerrero *et al.*, 2001).

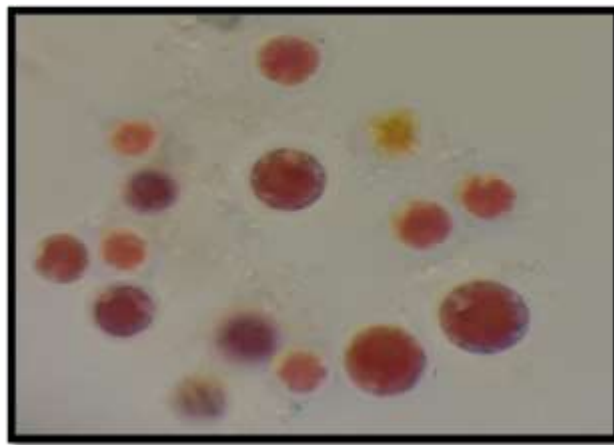


Figure 07 : *Porphyridium cruentum* observée en microscope optique (×100) (Web 3).

III. 2. 3. Prymnésiophycées (Haptophycées)

Les Prymnésiophycées ou Prymnesiophyceae ou Coccolithophores sont une classe d'algue de l'embranchement des ochrophyte Ces microorganismes sont caractérisés par la présence d'un appendice nommé haptomène entre deux flagelles lisses. Ces flagelles contiennent des microtubules, dont la taille est variée selon l'espèce. Les flagelles assurent le déplacement et la capture la matière organique présente dans leurs environnements (Adl *et al.*, 2005).

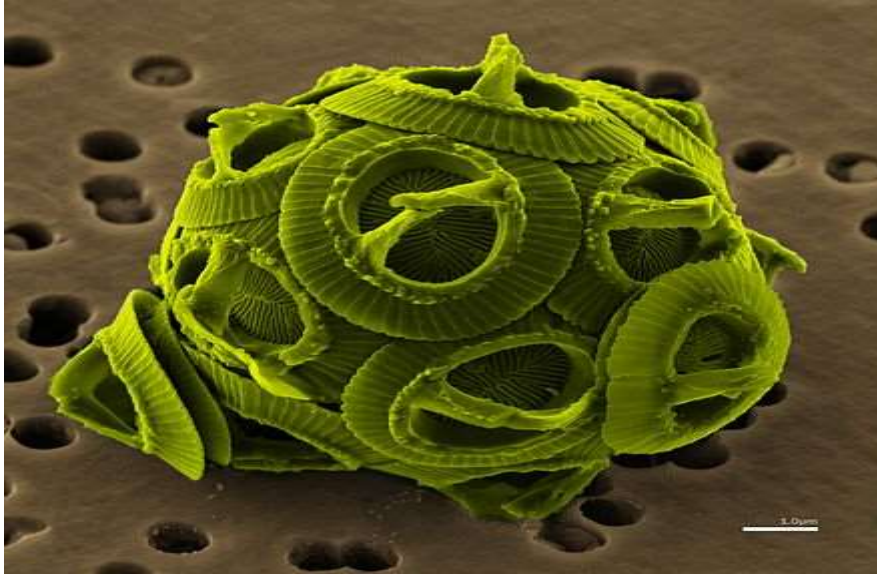


Figure 08 : Prymnésiophycées sous microscope électronique (Web 4).

III. 2. 4. Eustigmatophyta

Ces algues représentent une classe de l'embranchement des ochrophytes. Elles peuvent posséder un ou deux flagelles.

Les microorganismes de ce groupe se caractérisent par la couleur vert-jaunâtre due à leur composition spécifique en pigments. En effet, les microalgues de ce groupe contiennent la chlorophylle a sans la chlorophylle b et c (Asfour *et al.*, 2019) ainsi que les principaux pigments accessoires comme les violaxanthéne et vaucheriixanthéne.

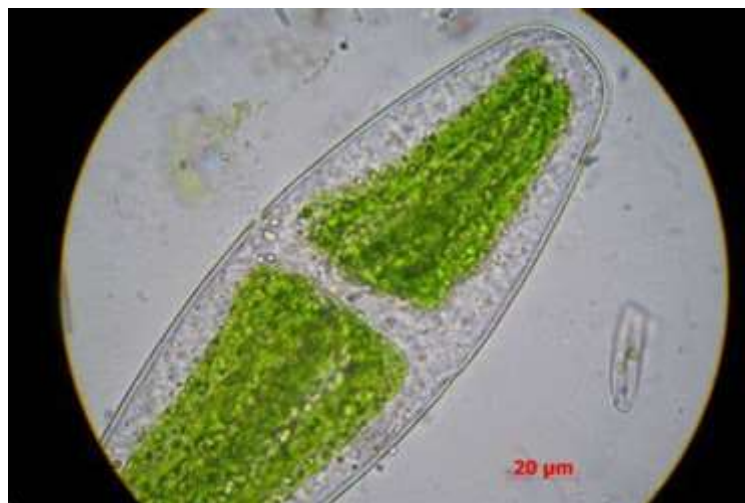


Figure 09 : Eustigmatophyta vue microscopique (web 5).

IV. Habitat des microalgues

Les microalgues sont des microorganismes ubiquitaires qui occupent la plupart des niches écologiques (Sahoo *et al.*, 2015 and Bwapwa *et al.*, 2018). Elles sont présentes sur l'ensemble des surfaces du globe : des océans (soit $\frac{2}{3}$ de la surface terrestre) aux glaces arctiques, en passant par les lacs hyper-salés, les neiges éternelles, les forêts humides et les murs de nos maisons. Le phytoplancton, qui comprend les microalgues et les bactéries phototrophes, participe à 50 % de la production primaire mondiale et joue ainsi un rôle majeur dans la séquestration du dioxyde de carbone atmosphérique (Bougaran et Saint-Jean, 2014).

L'atmosphère constitue également un environnement dans lequel une diversité notable de microalgues eucaryotes et de cyanobactéries est signalée. Enfin, cette capacité à coloniser l'ensemble de la biosphère est une propriété qui, comme pour les bactéries non photosynthétique, leur permet de se développer dans des conditions dites extrêmes.

V. Nutrition des microalgues

Les besoins nutritifs des microalgues sont similaires à ceux des plantes supérieures (Becker, 1994). Plusieurs espèces de microalgues sont capables de passer d'une croissance photoautotrophe ou une croissance hétérotrophe Certaines algues peuvent également se développer par mixotrophie en combinant les deux modes (Baya, 2012). Pour des algues autotrophes, la photosynthèse est une clé component de leur survie, par lequel ils convertissent la radiation solaire et le CO₂ absorbé par les chloroplastes en chaînes carbonées et O₂, la monnaie d'énergie utilisable au niveau cellulaire, est alors utilisé dans la respiration pour produire de l'énergie nécessaire à la croissance (Dragone *et al.*, 2010). Les microalgues pour pouvoir assimiler les hydrates de Carbone, doivent posséder un système de transport à haute affinité. Selon (Cantin, 2010). Certains travaux réalisés ont révélé l'existence de différents systèmes de transport :

- La diffusion passive qui n'exige aucune dépense énergétique.
- La transport actif via la présence d'un gradient de concentration à travers la membrane.
- Le transport ainsi que la fixation par une enzyme transmembranaire (tableau suivant).

Tableau 01 : Modes de nutrition des microalgues (Becerra, 2009).

Microalgues	Source de carbone		Source d'énergie	
	CO ₂	Composés organiques	Lumière	Oxydation des composés organiques ou inorganiques
Photoautotrophe	+		+	
Photohétérotrophe		+	+	
Chimioautotrophe	+			+
Chimiohétérotrophe		+		+

VI. Mécanisme de la photosynthèse chez les algues

La photosynthèse est le processus qui permet la présence de lumière, pour la formation d'hydrate. Chez les plantes, la photosynthèse a lieu dans des organites intracellulaires d'une dizaine de microns (qui délimitent le stroma où se trouvent les chloroplastes sous forme d'amidon indéterminé. C'est au niveau des thylacoïdes contenant les pigments photosynthétiques qu'a lieu la photosynthèse. (Figure 10). Structure du chloroplaste La photosynthèse se déroule en deux phases.

Une phase lumineuse qui est l'absorption de l'énergie lumineuse par les pigments photosynthétiques : le NADPH et l'ATP. Une phase sombre (ou obscure) durant laquelle il y a la formation de glucides grâce à l'énergie chimique obtenue en phase lumineuse, au dioxyde de carbone et à l'eau.

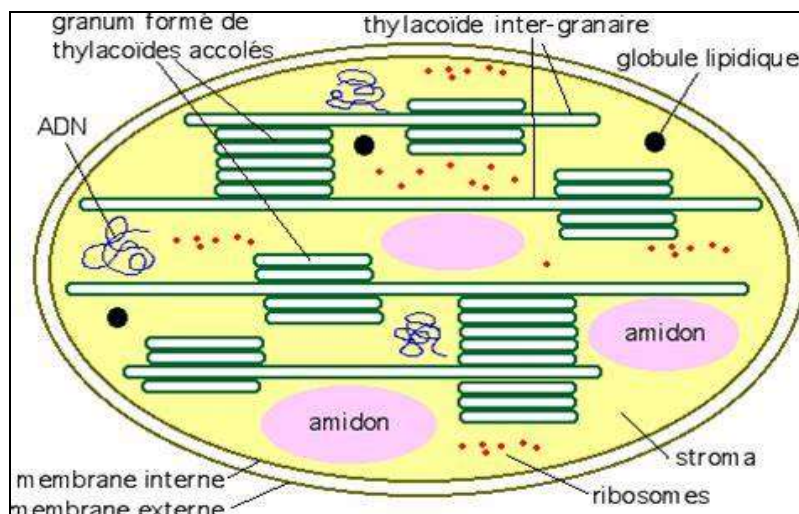


Figure 10 : Structure du chloroplaste.

VI. 1. Phase lumineuse

Au sein du photosystème II, il y a excitation électronique de la chlorophylle qui va permettre l'extraction d'un électron (qui servira à la réduction du NADP^+) à partir de la molécule d'eau (donneur primaire). Cet électron est transporté dans un premier temps jusqu'à des plastoquinones (PQ). Elles le cèdent par la suite à un complexe appelé cytochrome b6/f (cytb6/f) qui le transfère à une plastocyanine (PC).

La réduction de l'accepteur final intervient au niveau d'un deuxième centre réactionnel (PSI), elle permet de stocker du « pouvoir réducteur » dans la molécule de NADPH. L'oxydation de cette molécule ainsi que le gradient de protons généré par ces processus produira de l'énergie sous forme d'ATP.

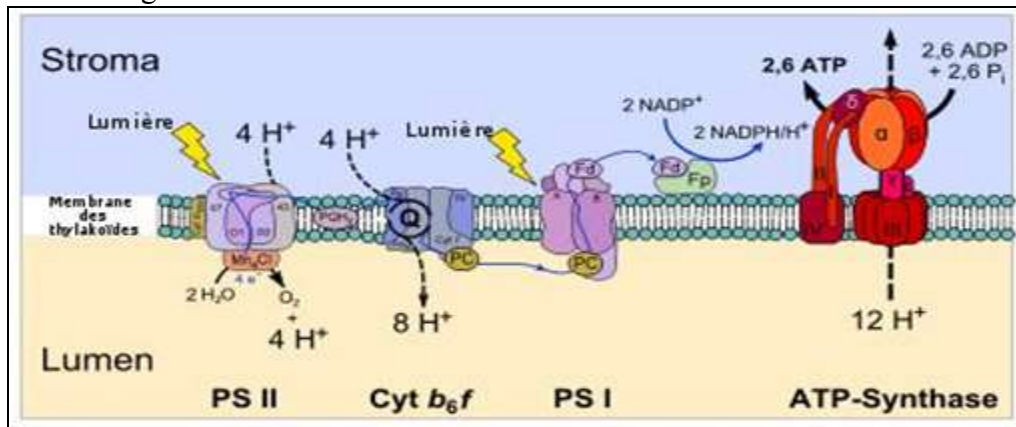


Figure 11 : Mécanisme de photosynthèse (Web 6).

VI. 2. Phase sombre

Elle correspond à l'assimilation du CO_2 en utilisant les molécules énergétiques (ATP et NADPH) produites dans la phase claire. Ce cycle de réactions appelé cycle de Calvin-Benson se déroule à l'extérieur des thylakoïdes, au niveau du stroma.

Le cycle de Calvin est initié par l'enzyme Rubisco (D-ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase) qui condense le carbone du CO_2 à une molécule à 5 carbones (**ribulose-biphosphate**), générant molécule à 6 carbones instable qui sera scindée en deux triose phosphate : le 3 Phosphoglycérate. Une seconde phosphorylation par l'ATP produit le 1,3 biphospho glycérate, réduit à son tour par le NADPH en 3-phosphoglycéraldéhyde (sucre). Une série de réactions permet la régénération de l'accepteur de CO_2 qui rentre dans un nouveau cycle.

Le gène chloroplastique *rbcl* est très utilisé comme marqueur moléculaire dans l'identification des différentes espèces de microalgues.

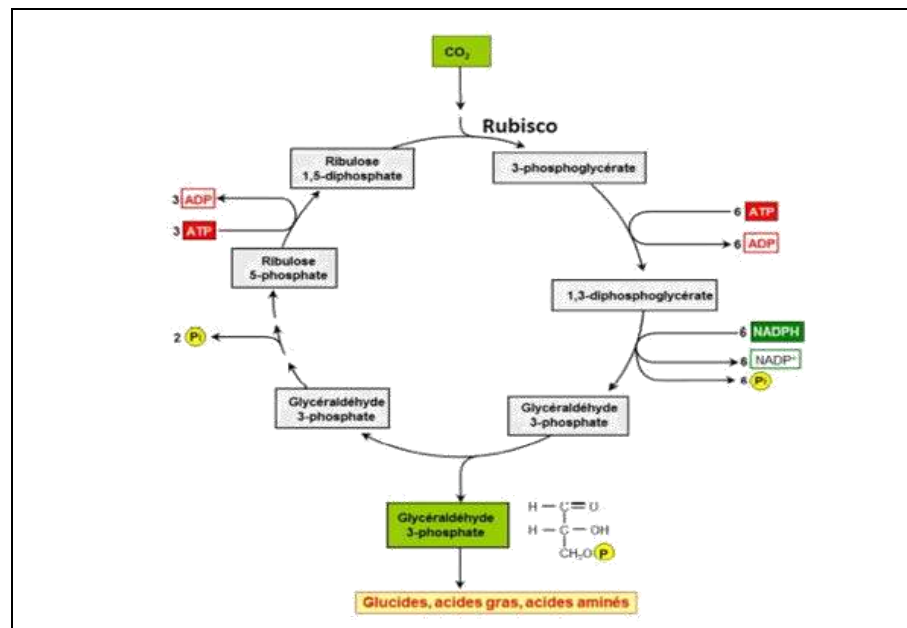


Figure 12 : Différentes étapes du cycle de Calvin (Alberts *et al.*, 1995).

VII. Modes de nutrition des microalgues

Le mode de nutrition est défini par la façon avec laquelle un organisme se procure le carbone nécessaire à sa survie et sa croissance. Certaines espèces de microalgues ont la capacité d'assimiler diverses sources de DOC par les mécanismes de la respiration cellulaire en plus du carbone inorganique, présent dans l'eau sous la forme de CO_2 , par la photosynthèse. Le DOC assimilé par les microalgues peut être de différentes formes (glucose, glycérol, acétate de sodium, etc...) selon l'espèce (Ceron-Garcia *et al.*, 2000).

VII. 1. Photo autotrophie

La photo autotrophie est le mode de nutrition par lequel les microalgues assimilent le carbone inorganique sous forme de CO_2 ou sous forme de carbonate (HCO_3^-) pour la synthèse du carbone organique (Asfour, 2019). L'énergie nécessaire à cette assimilation est fournie par la lumière, processus appelé photosynthèse (Taiz et Zeiger, 2010). Pour la production de biomasse, dans les cultures traditionnelles photo autotrophes, l'élément limitant la croissance des populations est souvent la pénétration de la lumière due à l'ombrage mutuel (Richmond, 2007).

VII. 2. Hétérotrophie

L'hétérotrophie est le mode de nutrition par lequel les microalgues assimilent le DOC. En l'absence de lumière, l'énergie requise pour la croissance est fournie par l'oxydation du substrat organique, phénomène appelé chimio-hétérotrophie. Certaines espèces de microalgues utilisent l'énergie de la lumière pour assimiler le DOC, processus appelé photo-hétérotrophie (Chen *et al.*, 2011 and Chojnacka et Marquez-Rocha, 2004).

VII. 3. Mixotrophie

La mixotrophie est une variante de l'hétérotrophie où le CO₂ et d'autres sources de DOC peuvent être assimilés simultanément (Lee, 2000). Ceci implique la cohabitation dans la cellule des métabolismes de respiration cellulaire et de photosynthèse qui peuvent opérer en parallèle. Certaines espèces de microalgues ne sont pas de vraies mixotrophes et possèdent la capacité d'alterner entre les modes autotrophes et hétérotrophes selon des conditions environnementales (Chojnacka et Marquez-Rocha, 2004).

Tableau 02 : Représente les différents types nutritionnels des microalgues.

Mode de nutrition	Source d'énergie	Source de carbone
Photo autotrophe	Radiation solaire	CO ₂ seulement
Photo hétérotrophe	Radiation solaire	CO ₂ et carbone organique
Chimio autotrophe	Composé inorganique	CO ₂
Chimio hétérotrophe	Composé organique	Carbone organique

VIII. Croissance des microalgues

Plusieurs espèces de micro-algues sont capables de passer d'une croissance photoautotrophe (grâce à de la lumière qui fournit l'énergie pour convertir le CO₂, en chaînes carbonées) à une croissance hétérotrophe (sans lumière) utilisant le glucose ou d'autres substrats carbonés pour le métabolisme du carbone et de l'énergie. Certaines algues peuvent également se développer par mixotrophie en combinant les deux modes :

- Les photoautotrophes, pratiquant la photosynthèse comme métabolisme principal
- Les chimiohétérotrophes, pratiquant la respiration comme métabolisme principal

Les micro-algues 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) (Person, 2010). La courbe de croissance (figure 13) montre 4 phases de croissance :

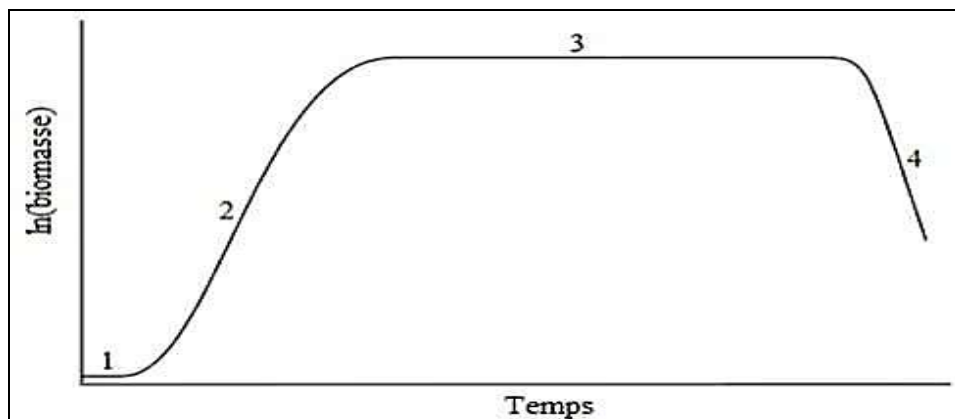


Figure 13 : Phases de croissance des microorganismes (Fao, 1996).

- 1. Phase de latence** : La phase de latence correspond à la période où le microorganisme s'adapte au milieu, la vitesse de croissance durant cette période est quasi nulle.
- 2. Phase exponentielle** : C'est la phase où la vitesse de croissance est à son maximum et est constante. Les microorganismes se multiplient et la mortalité est faible.
- 3. Phase stationnaire** : Durant cette phase, la capacité du milieu est atteinte, la croissance est nulle, le taux de reproduction est égal au taux de mortalité.
- 4. Phase de déclin** : Phase durant laquelle les microorganismes meurent et ne se reproduisent plus (Fao, 1996).

IX. Effet de différents paramètres sur la croissance 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 l'augmentation 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).

Aussi, 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).

D'autres paramètres liés au fonctionnement hydrodynamique du réacteur, tels que la vitesse du transfert gazeux et le degré d'homogénéité du milieu, peuvent jouer sur la disponibilité des nutriments et de l'énergie lumineuse (Kumar *et al.*, 2010).

IX. 1. Lumière

Differentes études ont montrés que la lumière est le facteur le plus important pour la croissance photosynthétique des algues. Elle a un effet sur la composition cellulaire des microalgues (Hu, 2004). À de faibles intensités lumineuses, le taux de photosynthèse dépend linéairement de l'intensité lumineuse mais avec l'augmentation de l'intensité lumineuse, l'activité de la photosynthèse augmente jusqu'à atteindre un plateau (Grima *et al.*, 1996).

Il existe plusieurs types de comportement des microalgues (figure 14) selon l'intensité lumineuse à savoir :

- **Phase de respiration (en absence de lumière) :** réactions métaboliques de consommation de l'oxygène et de rejet de dioxyde de carbone ;
- **Phase de limitation :** liée à un apport insuffisant d'énergie lumineuse (faible intensité lumineuse, trajet lumineux élevé, géométrie non favorable du réacteur) ou au phénomène d'ombrage cellulaire mutuel induit par une forte concentration cellulaire (Kumar *et al.*, 2011) ;
- **Phase de saturation :** traduite par un rendement photosynthétique maximal ;
- **Phase d'inhibition :** elle est définie par une perte de l'activité photosynthétique en raison de forte intensité lumineuse (Vonshak *et al.*, 1988).

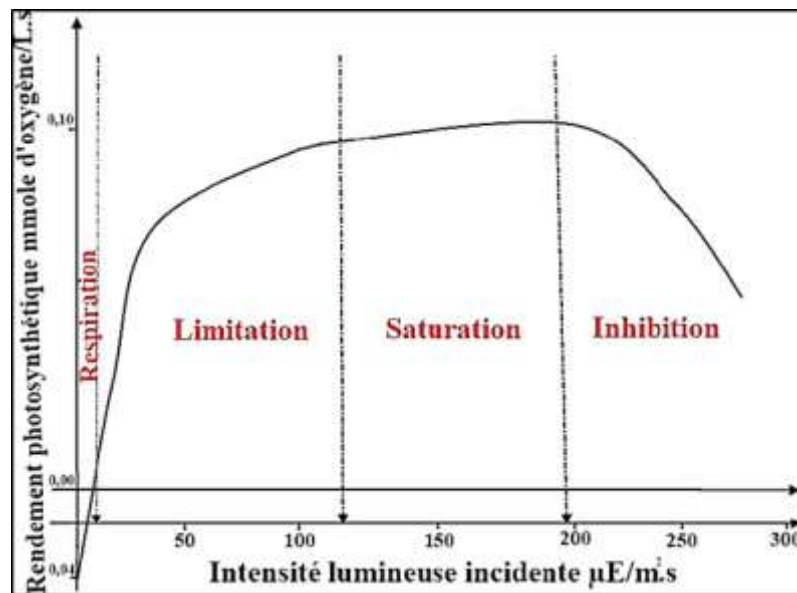


Figure 14 : Rendement photosynthétique en fonction de l'intensité lumineuse incidente (exprimée en $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (Goldman, 1980).

Une limitation ou un excès de lumière vont donc avoir des répercussions sur le métabolisme des cellules et la croissance des populations. Ce phénomène s'appelle la photoinhibition. Lorsque la cellule reçoit plus d'énergie lumineuse qu'elle ne peut en intégrer vers la synthèse d'ATP et l'assimilation du carbone, la photosynthèse est inhibée et la croissance cellulaire chute (Yeh *et al.*, 2010)

IX. 2. Température

La température est un facteur qui intervient dans le développement et la croissance cellulaires des microalgues. Les microalgues n'ont pas toutes le même comportement vis-à-vis de la température. Elles peuvent être cryophiles, mésophiles ou encore thermotolérantes. Les microalgues cryophiles se développent à des températures de l'ordre de 4 à 5°C comme c'est le cas pour les microalgues appartenant au genre *Dunaliella* qui se développent dans des lacs hypersalins de l'Antarctique (Xu *et al.*, 1998). Les microalgues mésophiles se multiplient à des températures comprises entre 15 et 35°C et se sont les microalgues les plus abondantes en termes de diversité de genres et d'espèces (*Porphyridium*, *Tetraselmis*, *Chlorella*...). La microalgue *Celastrella sp.* est thermo-tolérante et peut se développer à des températures supérieures à 35°C, elle accumule des pigments (astaxanthine, lutéine, canthaxanthine et bêta-carotène), des triglycérides, et se développe à des températures allant jusqu'à 50°C avec un optimum de croissance à 45°C (Hua *et al.*, 2013).

Pour chaque température il y a une intensité lumineuse spécifique pour atteindre le taux de photosynthèse maximal (Hu, 2004).

- La température optimale augmente donc avec l'augmentation de l'intensité lumineuse.
- La diminution de la température augmente le degré d'insaturation des lipides
- l'augmentation de la température entraîne l'augmentation des concentrations des pigments mais aussi une augmentation de la concentration des radicaux d'oxygène.

Si les microalgues ne croissent pas à la température optimale, le besoin en carbone et en nutriment pour obtenir le même taux de croissance est plus important (Hu, 2004).

IX. 3. pH

De même que pour la température, il existe différents comportements métaboliques et physiologiques de microalgues, face au pH de leur milieu de culture. La plupart des microalgues sont alcalophiles et se développent dans des milieux de culture de pH compris entre 7 et 10,5. Ainsi, les microalgues du genre *Scenedesmus* peuvent survivre à des variations de pH allant de 5 à 11 mais montrent un optimum de développement pour un pH compris entre 9 et 11 (Asfour, 2010).

Il est à noter que pour ces pH fortement basiques, on assiste à un phénomène d'autofloculation (formation d'agrégat par les cellules) qui n'interfère pas avec la croissance des microalgues. Le pH n'a pas d'influence notable sur la composition et la production de métabolites tels que les lipides (Vidyashankar *et al.*, 2013).

Cependant, il existe des algues qui se développent à pH acide. Ainsi, *Chlamydomonas acidophila* est une microalgue acidophile qui pousse à des pH compris entre 2 et 9 avec un pH optimal de croissance de 6 (Cuaresma *et al.*, 2006).

IX. 4. Salinité du milieu

Du fait de leur capacité à s'adapter à une large gamme d'environnements, les microalgues sont en mesure de supporter des milieux aux propriétés physico-chimiques extrêmes absolument diversifiées. Ainsi certaines microalgues sont adaptées à l'eau douce (*Chlorella*, *Synura*, *Oscillatoria*...), d'autres aux milieux marins (*Rhodella*, *Porphyridium*...) et certaines sont halophiles (*Gyrodinium*, *Dunaliella*...). Les microalgues marines peuvent s'adapter à des milieux de concentrations en sel (NaCl) de 10% à 50% (m/v) en fonction de la microalgue (Asfour, 2010).

Le changement de salinité du milieu induit un stress osmotique et ionique qui peut se traduire par la formation de précipités et une augmentation de la teneur lipidique des algues. Ainsi, (Fillali, 2012) ont noté lors du 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 (Khaldi et Zeggaoui, 2014).

IX. 5. Influence des nutriments

IX. 5. 1. Influence de la teneur en dioxyde de carbone (CO₂)

Les microalgues peuvent assimiler une grande variété de formes de carbone inorganique ou organique selon les espèces. Le glucose, l'acétate, le glycérol, le fructose, le sucrose, le lactose, le galactose et le mannose sont des exemples de formes de carbone organique qui peuvent être assimilées par certaines microalgues (Chen *et al.*, 2011). La source de carbone inorganique utilisée est le CO₂ (ou le HCO₃⁻). Selon les conditions dans lesquelles elles se trouvent, les microalgues peuvent modifier le type de carbone qu'elles utilisent et le moyen dont elles acquièrent leur énergie (Asfour, 2019).

La croissance cellulaire est stimulée par l'augmentation de la concentration de CO₂ (concentration optimale). Durant la photosynthèse, la consommation du CO₂ entraîne une augmentation progressive du pH, alors qu'en présence de concentrations importantes de CO₂ dissous, le pH chute entraînant une consommation faible de CO₂ à cause de l'inactivation de l'enzyme « *Rubisco* » responsable de l'activité de fixation de CO₂. (Sobczuk *et al.*, 2010).

Une préférence de l'espèce algale peut être distinguée vis-à-vis de l'une des formes du carbone (CO₂ ou HCO₃⁻) selon le mécanisme biologique de concentration du CO₂ ou « MCC ». Généralement, les microalgues présentent une préférence vis-à-vis de l'assimilation du CO₂ comme source de carbone inorganique (Khaldi et Zeggaoui, 2010).

IX. 5. 2. Influence de la teneur en azote

L'azote constitue un élément nutritif essentiel pour la croissance algale. La teneur en azote des microalgues se situe aux environs de 7 % de la matière sèche algale (Bhola *et al.*, 2011). Dans des cultures en auto- et hétérotrophie, les sources d'azote sont principalement minérales (NH₄⁺, NO₃⁻ et NO₂⁻) mais il existe également des sources organiques telles que l'urée et les acides aminés (Asfour, 2019). 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).

La carence de cet élément induit une accumulation importante de réserves lipidiques (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.

IX. 5. 3. Influence de la teneur en phosphore

Le phosphore est impliqué dans plusieurs voies métaboliques (Chen *et al.*, 2011). Il représente environ 1% de la matière sèche algale (Richmond, 2004). Le phosphore est peu répandu dans la nature. Le phosphore est assimilable par les cellules lorsqu'il est sous forme de phosphate inorganique ou dans les molécules organiques solubles. Dans le dernier cas, les molécules peuvent être rendues assimilables par les espèces autotrophes qui utilisent des phosphatases pour hydrolyser les groupes phosphates. L'assimilation du phosphore est régulée par un processus ionique et chimique (Falkowski et Raven, 2007).

La carence en phosphore joue sur l'activité photosynthétique principalement au niveau de la fonction de l'enzyme « *rubisco* », indispensable à la fixation du CO₂ (Maziliak, 1998 and Agreen, 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 ce qui minimise la quantité de phosphore ajoutée.

IX. 5. 4. Apport des microéléments

Les microéléments sont des éléments présents dans le milieu en très faible quantité. 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 pour les oligoéléments tels le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le cobalt (Co), le molybdène (Mo), etc.

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 Ethylène Diamine Tétracétique » afin d'éviter toute limitation en éléments nutritifs dans le milieu liquide (Fillali., 2012).

D'autre part, une augmentation de ces éléments dans le milieu peut avoir un impact positif sur les cellules. C'est le cas du magnésium ou du fer qui permettent l'augmentation de la concentration cellulaire lorsqu'ils sont ajoutés en forte concentration (Dragore., 2011). Seulement cet effet positif a lieu jusqu'à une certaine concentration, à partir de laquelle ces composés deviennent toxiques pour la cellule. Ainsi le fer en trop forte quantité dans la cellule, va endommager les membranes biologiques, les protéines ou bien encore l'ADN (Estevez., 2001).

De même, l'appareil photosynthétique de la cellule peut lui aussi présenter des modifications afin de s'adapter à une carence du milieu. C'est le cas pour des limitations en fer, où par exemple, les antennes collectrices de photons vont être réorganisées de façon à s'adapter aux modifications physiologiques de la cellule carencée et de limiter les phénomènes de dommage cellulaire liés à la lumière, tout en optimisant l'activité photosynthétique (Moseley *et al.*, 2002 and Michel et Pistorius, 2004).

X. Composition biochimique des microalgues

Les microalgues présentent une très grande diversité de molécule originales au sein de leurs cellules cette biomasse se caractérise par sa richesse en lipides. En protéine en vitamine et en antioxydant (Tableau 03) (Choubert *et al.*, 2006).

Tableau 03 : Répartition du fractionnement biochimique d'une cellule de microalgue.

Composition biochimique	Fonction	Ordre
Protéines	Structure	40-60
Lipides	Structure énergétique et réserve	5-60
Glucides	Structure énergétique et réserve	8-30
Acides nucléique	Support, vecteur et régulateur de l'information génétique	5-10

Le carbone est le constituant majeur des micro algues (Van den Hende *et al.*, 2012). Si, vis-à-vis de cet élément, la plupart des micro algues mobilisent un métabolisme exclusivement photo autotrophe (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 photo autotrophe et hétérotrophe conjugués), simultanément ou séquentiellement (Bumbak *et al.*, 2011 and Becker, 1994).

Dans le cas du métabolisme photo autotrophe, le carbone inorganique pourra être introduit dans la culture sous forme gazeuse (CO_2) ou directement dans le milieu de culture sous la forme de carbonate (HCO_3^-). Par rapport à d'autres mélanges gazeux (d'origine industrielle), l'air est relativement peu concentré en CO_2 (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 présente 50 % de la biomasse sèche des microalgues, nous pouvons en effet calculer, à partir de la stœchiométrie de la photosynthèse, que 1,8 g de CO_2 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 décroissance plus faible. Les substrats organiques «simples» préférés sont le glucose et l'acétate.

Bien plus intéressants d'un point de vue économique, les mélasses les effluents de l'activité sucrière et l'également utilisés avec succès (Bumbak *et al*, 2011).

XI. Mode de reproduction des microalgues

Le cycle de vie des microalgues comprend le mode de reproduction sexuée et/ou mode asexuée.

XI. 1. Reproduction asexuée

La prolifération microalgale s'effectue principalement par une reproduction asexuée ou multiplication végétative : une cellule mère se divise alors en deux cellules filles génétiquement identiques (figure 15) (Guebabi et Zerrouki., 2019).

XI. 2. Reproduction sexuée

Ce mode est le moins fréquent et le plus aléatoire, généralement déclenchée par des conditions environnementales particulières souvent multifactorielles. Au cours de ce mode de reproduction les gamètes mâle et femelle fusionnent pour produire un zygote diploïde (figure 21) (Guebabi et Zerrouki., 2019).

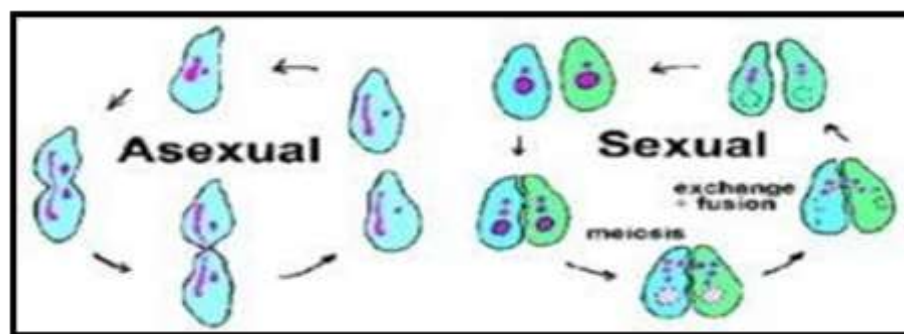


Figure 15 : Reproduction sexuée et asexuée chez les microalgues (Guebabi et Zerrouki, 2019).

XII. Systèmes de culture des microalgues

La culture à l'échelle laboratoire et semi-industrielle est déjà bien étudiée, connue et est maîtrisée, ce qui n'est pas encore le cas pour la culture à grande échelle (Singh et Sharma, 2012). Deux moyens principaux de cultures de microalgues ont été développés, aussi bien à l'échelle laboratoire qu'à l'échelle industrielle (Olaizola, 2003).

Les deux principales méthodes de production de biomasse micro algale sont les systèmes ouverts (bassins) et les photobioréacteurs (systèmes fermés).

XII. 1. Système ouvert

Dans les systèmes ouverts une large surface de la culture est exposée au milieu extérieur. La culture se fait en bassin artificiels. Le mélange et la circulation du milieu sont possibles grâce à des hélices, ou des injecteurs d'air.

Le flux est guidé par la vitesse de rotation de cette roue et un système de bullage permet un apport en CO₂. Ces bassins sont en général peu profonds (Kumar *et al.*, 2011). 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).

Les bassins varient par leur forme, le type de matériaux utilisés, le système de mélange du milieu. Il existe plusieurs types de bassin :

- **Bassins naturels** : ces bassins non mélangés, aux conditions climatiques et nutritionnelles nécessaires aux microalgues, sont souvent utilisés pour la culture de *Dunaliella salina* ou pour *la Spiruline* (figure22). Ils ont en général une faible productivité (< 1 g/m²/j) (Lee, 2001).



Figure 16 : Culture de *Dunaliella salina* en bassins naturels de 200 ha Cognis nutrition (Australie) (Lee, 2001).

- **Bassins circulaires** : principalement utilisés en Asie pour la culture de *Chlorella*, ils nécessitent un fort investissement en matériel et leur agitation, par un bras rotatif placé au centre, consomme beaucoup d'énergie (Tredici., 2004).

- **Raceways** : ce sont les bassins les plus utilisés depuis leur début dans les années 50 (Christenson et Sims, 2011), majoritairement pour la culture de *Spiruline*. Leur principe est de faire circuler les algues sur une petite largeur et profondeur (entre 15 et 50 cm) mais sur une grande distance (figure23) . La circulation et le mélange s'effectuent grâce à des roues à aubes. La productivité de ces bassins est d'environ 20-25 g/m²/j, pour une concentration cellulaire inférieure à 0,6 g/L (Tredici, 2004). L'utilisation de CO₂ n'est pas efficace dans les raceway et il y a un faible mélange (Chisti, 2007).



**Figure 17 : a : Bassin circulaire de culture de Spiruline
b : Culture de *Spiruline* en raceway, Californie (Andersen, 2005).**

XII. 2. Système fermé

Les photobioréacteurs sont des réacteurs construits à partir de matériaux transparents. Leur conception est basée sur la surface éclairée, l'efficacité du mélange et le contrôle des paramètres de culture (température, teneur en CO₂ et en O₂, pH), pour atteindre une productivité maximale. Les systèmes fermés ont été conçus pour pallier les problèmes des bassins (Brennan et Owende, 2010).

Le principal avantage de cette technique est qu'elle permet de contrôler les conditions de culture (distribution et évacuation du CO₂ et l'O₂ contrôle du pH, de la température) et aussi de maintenir la stérilité de la culture (figure 18).

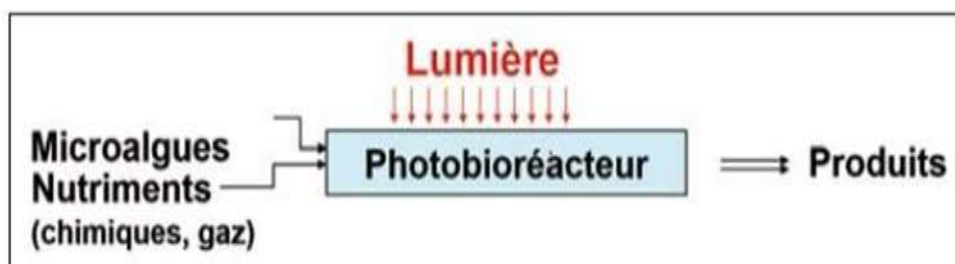


Figure 18 : Système de photobioréacteurs. (Legrand, 2002).

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

La conception des photobioréacteurs doit être optimisée pour chaque espèce de microalgues, par rapport à ses caractéristiques physiologiques et à ses caractéristiques de croissance (Sierra *et al.*, 2008).

Les photobioréacteurs existent sous de nombreuses formes, mais ils peuvent être séparés en plusieurs catégories : les photobioréacteurs plans, les photobioréacteurs cylindriques, les photobioréacteurs « Plastic bag » et un type particulier de réacteurs pour la culture de microalgues en l'absence de lumière : les fermenteurs (Sierra *et al.*, 2008).

XII. 2. 1. Photobioréacteurs plans

Les photobioréacteurs plans (figure 19) sont :

- Des réacteurs de faibles épaisseurs inférieures à 10 cm.
- Permet de réduire le chemin lumineux (Degen *et al.*, 2001).
- Ils sont disposés verticalement ou horizontalement avec une certaine inclinaison pour maximiser l'intensité lumineuse incidente.
- Les plaques utilisées peuvent être des panneaux de verres ou des plaques alvéolaires en polymère.
- La productivité de ce système va de 24 à 50 g/m²/j.
- La circulation s'effectue par pompe ou injection d'air (Chisti, 2007).



Figure 19 : Photo bioréacteur plan (Bitog *et al.*, 2011).

XII. 2. 2. Photobioréacteurs de type cylindrique

XII. 2. 2. 1. Type colonne : Les photobioréacteurs en colonnes sont les plus employés pour les petites productions de microalgues comme pour les écloséries. Plusieurs formes de colonnes existent comme de simples colonnes à bulles, des photobioréacteurs annulaires et des photobioréacteurs à circulation par air (ou airlifts) (Lu *et al.*, 1995).

A /Colonnes à bulles et colonnes annulaires :

La colonne à bulles est un cylindre vertical en matériau transparent, de diamètre variable, mais assez faible pour laisser passer la lumière jusqu'au centre de la culture. Le système est éclairé par des tubes fluorescents situés sur les cotés. Les colonnes à bulles sont mélangées et aérées par injection d'air par le bas. Les colonnes à bulles sont généralement utilisées dans l'industrie chimique, les fermentations biologiques et les traitements d'eaux usées (Lu *et al.*, 1995).

Les photobioréacteurs annulaires, composés de deux cylindres concentriques sont éclairés en leur centre par des néons, c'est la seule différence avec les colonnes à bulles (figure 26). Les cultures sont généralement réalisées en batch, ou tous les nutriments sont apportés en une seule fois au début de la culture (Lu *et al.*, 1995).

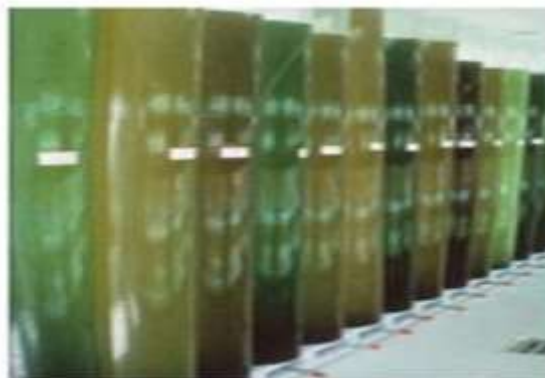


Figure 20 : Colonne à bulles (Fao, 1996).

B/ Airlifts :

Les photobioréacteurs dits airlift ou à circulation par air sont des systèmes gaz/liquide caractérisés par la circulation du fluide qui est cyclique (Merchuk et Gluz, 1999).

Ils sont composés de deux sections distinctes : la colonne ascendante et la colonne descendante .Ces deux sections sont interconnectées par le haut et par le bas (Chisti, 1989). Deux types d'airlifts existent : le photobioréacteur est désigné airlift intense à cause de la présence d'une chicane ou de deux cylindres concentriques, ou il peut être nommé airlift extrême (Merchuk et Gluz, 1999).

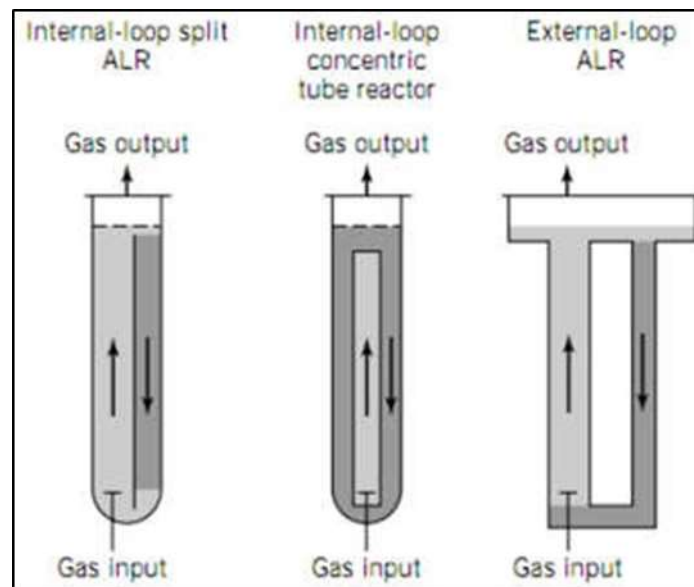


Figure 21 : Trois types de photobioréacteurs (Marchuk et Gluz, 1999).

XII. 2. 2. 2 .Type tubulaire :

Les photobioréacteurs tubulaires (figure 28) sont des tubes :

- De faibles diamètres entre 2 et 6 cm environ (Miron *et al.*, 1999) pour permettre la disponibilité de la lumière au centre de la culture.
- Ils peuvent atteindre des longueurs très importantes (jusqu'à 500 km),
- Ils sont agencés de manières variables (verticalement ou horizontalement) sous forme de serpentins, parallèles, enroulés hélicoïdalement(Figure29). Pour des raisons de structures,
- Ils sont limités à une hauteur de 4 mètres (Miron *et al.*, 2000).
- Faits de matériaux transparents, ils sont souvent conçus en verre ou en matière plastique (Chisti, 2007).
- Ils peuvent être éclairés par des tubes fluorescents ou simplement exposés à la lumière du soleil.

- L'apport en nutriment, en CO₂ et en milieu est généralement effectué par une cuve annexe aux tubes (Razzak *et al.*, 2013).



**Figure 22 : Photobioréacteurs tubulaires. a : horizontaux (Demirbas, 2010)
b : enroulés (Biocol) (Andersen., 2005).**

Les photobioréacteurs tubulaires sont les seuls systèmes fermés à être utilisés à grande échelle (Christenson et Sims, 2011), ces systèmes ont une bonne productivité en biomasse (Brennan et Owende, 2010). Cependant, ce type de photobioréacteur rencontre des problèmes d'accumulation d'oxygène et de contrôle de la température et ils ont aussi des problèmes d'encrassement (Brennan et Owende, 2010). De plus, ils occupent une grande surface au sol et sont chers à construire (Miron *et al.*, 1999).

XII. 2. 3. Photobioréacteur « Plastic-bag » ou gaine

Ces photobioréacteurs (figure 23) sont des gaines en plastiques, suspendues à chaque extrémité à une structure en métal et généralement éclairées par des néons. D'environ une centaine de litres de culture, le milieu est mélangé par aération (figure 23). La culture peut se faire en continu ou en batch. Ce système a un faible ratio surface/volume et peut avoir des problèmes d'encrassement. Ce système est encore utilisé par certaines entreprises pour sa simplicité et sa facilité d'utilisation (Rengel, 2010).



Figure 23 : Système « Plastic bag » (Pulz, 2007).

XII. 2. 4. Fermenteurs

Un autre type de réacteur existe pour la culture de microalgues : les fermenteurs (figure 30). Certaines espèces de microalgues peuvent croître en hétérotrophie, c'est à dire sans lumière et avec comme source de carbone des composés organiques comme du sucre. Le système des fermenteurs est une technologie bien connue, sophistiquée et qui existe à grande échelle (jusqu'à 500000 L). Tous les paramètres de la croissance sont facilement contrôlables (Brennan et Owende, 2010). La culture en hétérotrophie est moins chère (< 6 €/kg de biomasse produite (Tredici, 2004) que la culture photosynthétique en photobioréacteur mais tous les composés moléculaires ne peuvent être produits par cette technique (Degen *et al.*, 2001).



Figure 24 : Fermenteur de production d'Oméga-3 à partir de microalgues (Fermentag., 2013).

XIII. Comparaison des avantages et inconvénients des bassins de type raceway et des photobioréacteurs :

Les principaux avantages et inconvénients des deux types sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 04 : Comparaison des avantages et inconvénients des bassins de type raceway et des photobioréacteurs (Habchi et Hidjaa, 2013).

Paramètres \ Systèmes	Bassin de type « raceway »	Photobioréacteur
Risque de contamination	Fort, sauf pour les espèces extrémophiles	très faible si le procès est maîtrisé
Impacts des conditions extérieures	Important	Faible
Dimensions des réacteurs	Illimitée	Limitée
Concentration en biomasse	Faible	Elevée, jusqu'à 10 g. l ⁻¹
Rapport S/V	Faible (1 à 8)	Elevé (de 20 à 100)
Perte en CO₂	Importantes	Maîtrisables
Concentration en O₂	Faible	Elevée
Eclairage	Dépendance totale aux conditions climatiques	Possibilité d'éclairage en continu mais la source lumineuse est gourmande en énergie
Agitation	Nécessaire	Nécessaire
Coût	Elevé	Faible à modérée

Chapitre II

La production des
métabolites par les
microalgues

I. Molécules d'intérêts produites par les microalgues

L'intérêt majeur de la culture de microalgues est la production de molécules à hautes valeurs ajoutées. Les microalgues sont une source importante de lipides, de protéines, de polysaccharides et de pigments (Chanel, 2016).

1. Polysaccharides

Les polysaccharides sont les macromolécules les plus répandues dans la nature. Ils sont trouvés aussi bien chez les animaux que chez les végétaux. Ces polymères sont constitués de plusieurs oses liés entre eux par des liaisons osidiques dont la taille peut atteindre plusieurs millions de g/mol.

1. 1. Selon leur degré de polymérisation, ils sont classés en deux catégories

a. Les oligosaccharides : Composés de 2 à 10 monosaccharides.

b. Les polysaccharides : Constitués de plus de 10 monosaccharides. On distingue aussi deux catégories de polysaccharides :

- **Les homopolysaccharides :** Constitués du même monosaccharide (amidons, celluloses, fructanes, glucanes, galactanes, mannanes...).
- **Les hétéropolysaccharides :** Sont formés de différents oses (hémicelluloses, pectines...).

1. 2. Selon la disposition de leur chaîne

Les polysaccharides peuvent être soit linéaires soit ramifiés. Tous ces paramètres participent alors à leur diversité (Gargouch, 2018).

1. 3. En fonction des espèces

Les microalgues produisent différents types de polysaccharides (figure 31). On distingue des PS intracellulaires qui sont des glucanes de réserves énergétiques, des PS de structures également qualifiés de PS fibrillaires qui participent à la formation de la paroi des cellules, et des exopolysaccharides (EPS). Ces derniers peuvent être incorporés dans la paroi cellulaire, excrétée sous forme de structures définies (gaines LPS, capsules CPS ou tiges), ou libérés sous forme de mucilage (Spolaore, 2006 and Villay, 2013).

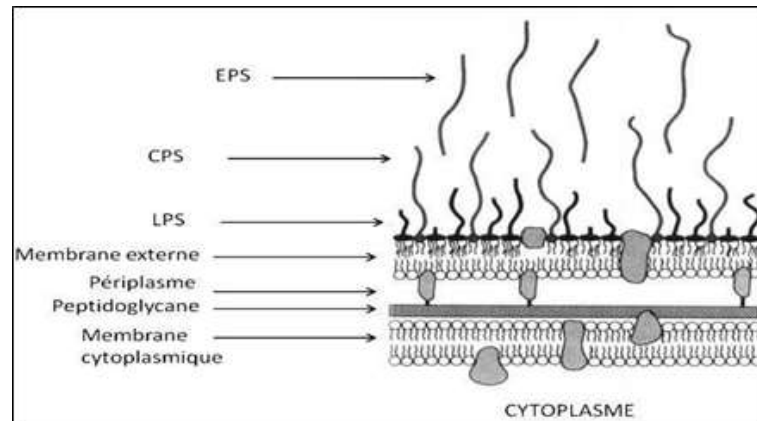


Figure 25 : Différents types de polysaccharides partiels des microalgues (Bertin, 2014).

1. 3. 1. Polysaccharides intracellulaires ou polysaccharides de réserve

La lumière est la source principale d'énergie chez les micro-organismes photosynthétiques. Or, lors des cycles solaires, le flux lumineux peut atteindre des valeurs extrêmes. Lorsque la quantité d'énergie est trop élevée, les micro-organismes photosynthétiques sont capables de modifier leurs profils de pigmentaires (Richardson *et al.*, 1983). Cependant, lors de la phase nocturne, ces organismes n'ont plus aucun apport énergétique et doivent être en mesure de maintenir leur activité métabolique, car même si la croissance cellulaire est partiellement ralentie lors de la phase nocturne, cette dernière a besoin d'énergie pour que la respiration puisse s'effectuer (et ainsi la maintenance du processus de réplication de l'ADN et de la division cellulaire). Afin de survivre, les microalgues sont capables de produire et utiliser deux types de réserves énergétiques : les glycanes (retrouvés sous la forme d'amidon, glycogène, paramylon, chrysolaminarine...) et les lipides.

L'amidon est le polysaccharide de réserve de référence pour les plantes supérieures tout comme pour les algues vertes. L'amidon retrouvé dans les algues vertes est composé à 70% d'amylopectine et 30% d'amylose (figure 26). Cependant ces pourcentages peuvent évoluer en fonction des conditions de culture (pH, lumière, température...) (Harris, 2009). L'amidon est dit floridien chez les microalgues lorsqu'il est présent sous forme de grain dans le cytoplasme (chez les *Rhodophytes*), alors qu'il est intraplastidial chez les algues vertes (comme chez les végétaux supérieurs) (Villay, 2013).

Le glycogène est un polymère produit principalement par les cyanobactéries. Ce dernier est composé de glucose lié en α -(1-4) présentant des ramifications de type α -(1-6) (Figure 26).

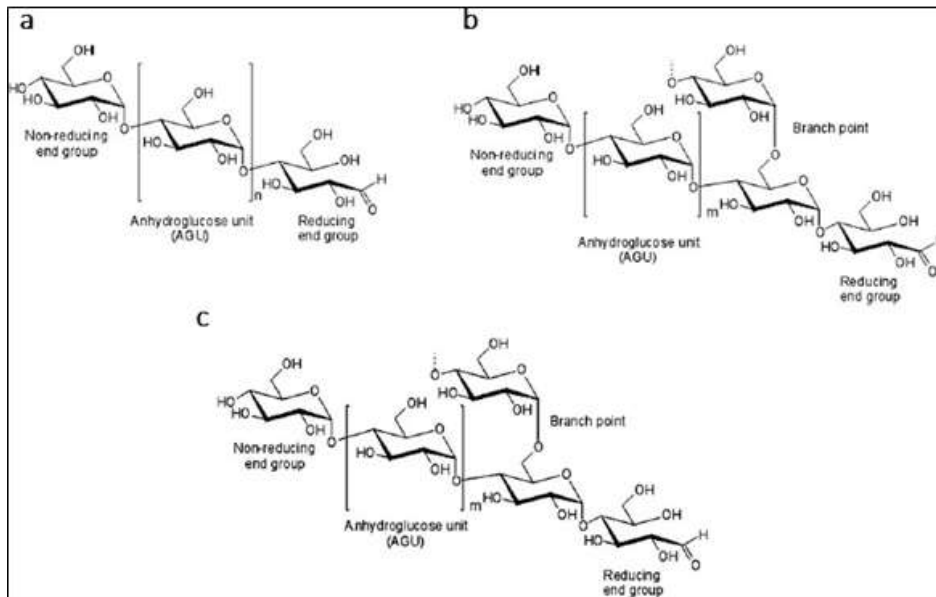


Figure 26 : Structure chimique de l'amylose (a), amylopectine (b) et du glycogène (c) (Heinze *et al.*, 2012).

1. 3. 2. Polysaccharides de structure (fibrillaires)

La cellulose et/ou l'hémicellulose représentent les constituants de la phase fibrillaire (figure 33). Ce sont des polymères de glucose liés en β -(1,3) et dans certaines espèces on peut trouver du xylose ou du mannose comme PS fibrillaire (Kornprobst, 2005).

Le polysaccharide fibrillaire de *Chlorella vulgaris* est un glucane de β -(1,3) avec un potentiel d'activité antitumorale et immunostimulante (Pignolet *et al.*, 2013).

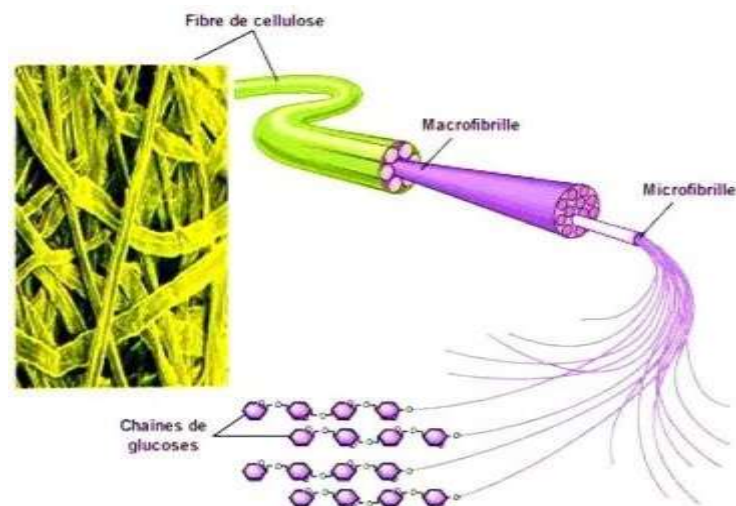


Figure 27 : Organisation structurale d'une fibre de cellulose (Kornprobst, 2005).

1. 3. 3. Exopolysaccharides

Les microalgues synthétisent des polysaccharides extracellulaires structurellement complexes dits exopolysaccharides (EPS).

Les EPS forment une masse muqueuse entourant des cellules ou un groupe de cellules (Philippis et Vincenzini, 1998). Ils peuvent être structurés comme une gaine qui est une couche mince immédiatement à côté de la membrane cellulaire externe contenant des fibres concentriques ou radiales, ou sous forme de capsule qui est intimement associé à la surface cellulaire. Lorsque les EPS sont associées de manière lâche à la surface des cellules et ne constituent pas des enveloppes aux limites définies, ils sont généralement englobés sous le terme «slim» où peuvent former un mucilage. En effet, 50 à 70% du polymère produit par une microalgue reste autour de la cellule pour former un mucilage capsulaire (Singh *et al.*, 2019).

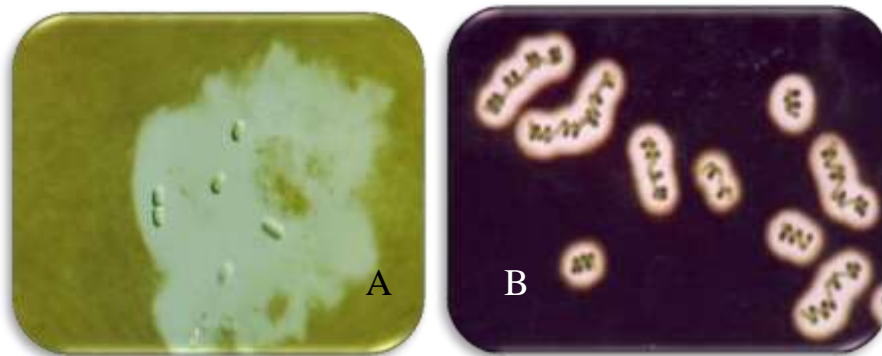


Figure 28 : A : Observation microscopique de mucilage dispersé d'une cyanobactérie après coloration à l'encre de Chine (Philippis et Vincenzini, 1998). B : Observation microscopique montrant la capsule polysaccharidique du *Cyanospira capsulata* après coloration à l'encre de Chine (Rossi et Philippis, 2016).

Les exopolysaccharides (EPS), représentent un intérêt pour la cellule, en effet, certains interviennent dans les mécanismes de reconnaissance cellulaire, d'adhésion cellulaire (Guzman-Murillo et Ascencio 2000) et d'autres sont plutôt impliqués dans la protection cellulaire lorsque les conditions environnementales deviennent défavorables (température, pH, salinité, lumière) (Arad et Levy-Ontman 2013 ; Philippis *et al.*, 2001 and Kumar *et al.*, 2007).

Il est important de distinguer deux types de polymères extracellulaires :

- les RPS (Released Polysaccharides) : ce sont les polysaccharides qui sont sécrétés et libérés dans le milieu extracellulaire.
- les BPS (Bound Polysaccharides) : ce sont les polysaccharides sécrétés sous forme de mucilage, de capsule ou non sécrétés participant à la structure de l'édifice cellulaire.

Les exopolysaccharides de microalgues présentent une importante chimio diversité liée à l'origine taxonomique de chaque organisme. Cette forte diversité présente un fort potentiel, car elle propose un panel de polymères extrêmement différents, accompagnés potentiellement de propriétés physico-chimiques très variées.

1. 3. 3. 1. Protéines

Les microalgues sont considérées comme une source riche en protéines végétales. En effet, elles produisent une quantité non négligeable de protéines (de 6 à environ à 80% de leurs masses sèches) en fonction des espèces (Becker, 2007) À titre d'exemple, *Chlorella vulgaris* accumule jusqu'à 46 % de protéines et *Arthrospira platensis* 70 % (Pignolet *et al.*, 2013).

La production de protéines par les microalgues diminue logiquement lors de carences en azote. Elle est maximale lorsque les microalgues sont en phase exponentielle de croissance. Aujourd'hui les efforts se tournent vers le potentiel génétique impressionnant des microalgues d'une part, et les activités spécifiques des protéines de microalgues d'autre part. Certaines biomasses algales sont cependant déjà utilisées comme compléments dans l'alimentation humaine et animale (aquaculture) en raison de leur haute teneur en protéines (Harun, 2010).

Cependant, il n'existe toujours pas de demandes importantes d'extraits de protéines de microalgues purifiées car la présence de composants non protéiques conduit généralement à des changements indésirables dans la couleur ou le goût des protéines. De ce fait, le ratio d'efficacité protéique, la valeur digestive, la couleur et le goût doivent également être pris en compte pour montrer le potentiel nutritionnel des protéines extraites des microalgues.

Peu de microalgues (*Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Dunaliella sp.*, *Tetraselmis suecica...*) ont été sélectionnées pour la production à grande échelle (protéines, pigments ou autres composants) et l'utilisation commerciale de microalgues pour leurs protéines et/ou la teneur en pigments est beaucoup plus associée à des marchés de niche tels que les marqueurs fluorescents (Glazer et Stryer, 1984) et les colorants naturels (Arad et Yaron, 1992).

1. 3. 3. 2. Pigments

Les microalgues produisent des pigments qui sont indispensables à la photosynthèse (transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique). Les pigments sont des molécules complexes qui ont la capacité de changer la couleur de la lumière réfléchie ou transmise en fonction de l'absorption de longueurs d'onde spécifiques.

Ils ont aussi des activités biologiques. Par exemple la chlorophylle, qui est un agent chélateur, peut être utilisée dans le traitement des ulcères pour la régénération des tissus du foie (Harun, 2010).

Les microalgues possèdent une large gamme de pigments « accessoires » : tels que les caroténoïdes (orange-rose) et les phycoérythrine (rouge) sont utilisés comme colorants en cosmétique et en industries agroalimentaires (Reboloso Fuentes *et al.*, 2000). Plus de 600 molécules de caroténoïdes ont été isolées de diverses sources naturelles. Cette famille diversifiée possède néanmoins une structure commune : l'unité isoprène (5 carbones) qui, par une succession de polymérisations, permet d'obtenir un squelette à 40 carbones. Cette base est ensuite modifiée par :

- i) cyclisation d'une ou deux extrémités,
- ii) modification du degré d'insaturation,
- iii) addition de groupes fonctionnels contenant de l'oxygène.

Si la molécule possède une ou plusieurs molécules d'oxygène, on parle de xanthophylle (ex. : la lutéine), sinon de carotènes (ex. : l' α -carotène).

A. Caroténoïdes : sont des pigments à fort pouvoir antioxydant, qui présentent de nombreuses applications. Parmi eux, le α -carotène qui remplit trois grandes fonctions :

1. Il protège les antennes photosynthétiques, en captant l'énergie lumineuse excédentaire pour la photosynthèse et en la dissipant sous forme de chaleur et de rayonnement (double liaison conjuguée).
2. C'est un antioxydant. En cas de stress oxydatif, il protège les fonctions vitales de la cellule en neutralisant les radicaux libres produits.
3. En condition de croissance déséquilibrée (fixation de carbone excédentaire par rapport à la fixation d'azote)

Le α -carotène constitue un puits capable d'absorber l'excédent de carbone et d'énergie (Lamers *et al.*, 2008). Le α -carotène est un pigment orange liposoluble, qui offre de nombreuses utilisations en pharmacologie, en cosmétique ainsi que dans les IAA (Lamers *et al.*, 2008).

Le α -carotène extrait de *Dunaliella salina* est le principal caroténoïde produit. Cette molécule possède deux stéréo-isomères : les formes trans et cis, aux propriétés biologiques différentes.

La forme trans est néanmoins plus souvent retrouvée, car plus stable. C'est un précurseur de la vitamine A (provitamine A), essentielle pour la vision et le bon fonctionnement du système immunitaire.

La synthèse chimique issue de l'industrie pétrolière ne produit qu'un iso-mélange de ces deux isomères. En revanche, le métabolisme cellulaire produit un mélange enrichi en l'une ou l'autre de ces fractions en fonction des conditions environnementales (Ben-Amotz *et al.*, 1988)

Par ailleurs, de nombreuses études ont mis en évidence l'effet du α -carotène sur la prévention de plusieurs types de cancers, de l'athérosclérose ou encore de maladies cardiaques (de Jesus Raposo *et al.*, 2013).

B. Xanthophylle

❖ **Astaxanthine** : est un xanthophylle antioxydant anti-inflammatoire commercialisé dans l'industrie pharmaceutique pour son action contre les douleurs musculaires par exemple, mais aussi comme complément alimentaire ou comme colorant rose en aquaculture.

D'autres xanthophylles, tels que la lutéine, la zéaxanthine et la canthaxanthine, sont également employés comme colorants alimentaires ou à des fins pharmaceutiques (Naidoo *et al.*, 2013). Les phycobiliprotéines (ex. : phycocyanine, phycoérythrine) sont présentes chez les cyanobactéries et les rhodophytes. Ces pigments sont utilisés pour des applications alimentaires, cosmétiques et également pharmaceutiques (Naidoo *et al.*, 2013). L'action des phycocyanines dans la défense du système immunitaire et comme agent anti-inflammatoire a récemment été mise en évidence.

1. 3. 3. 3. Lipides

Les lipides sont des constituants indispensables des cellules de microalgues. On les retrouve au niveau structural (phospholipides constitutifs des membranes) et énergétique (molécules de réserve). Globalement, les microalgues peuvent être composées de lipides à hauteur de 16 à 75% de leur masse sèche en fonction des espèces (Harun, 2010). Les microalgues stockent les lipides sous forme de tri-glycérols (ou triglycérides). Le contenu lipidique varie entre les différentes espèces (Cadoret, 2008) (Tableau 5).

Tableau 05 : Contenu lipidique de diverses espèces (Cadoret, 2008).

Nom de l'espèce	Contenu maximum en lipides (% poids sec)
<i>Botryococcusbraunii</i>	29-75
<i>Chlorella protothecoides</i>	15-55
<i>Cyclotella DI-35</i>	42
<i>Hantzschia DI-160</i>	66
<i>Isochrysis sp</i>	7-33
<i>Nannochloris</i>	6-63
<i>Nannochloropsis</i>	31-68
<i>Neochlorosoleoabundans</i>	35-54
<i>Nitzschiasp</i>	45-50
<i>Phaeodactylumtricornutum</i>	31
<i>Scenedesmus</i>	45
<i>Stichococcus</i>	9-59
<i>Tetraselmissuecica</i>	15-32

Les lipides forment une famille hétérogène de molécules assez atypiques dans la mesure où, contrairement aux carbohydrates, ils ne sont pas définis par rapport à une structure moléculaire particulière mais par rapport à une propriété chimique : ils sont insolubles dans l'eau.

A. Fonctions des lipides

Dans le monde vivant, les lipides ont, entre autres, deux grandes fonctions directement issues de leur propriété hydrophobe.

❖ Lipides structurels

Cette classe de lipides est au cœur des bicouches lipidiques ou membranes, base structurelle de toutes les cellules et barrières entre les milieux extra- et intracellulaires. Ces lipides sont membranaires et se différencient par le groupement polaire de leur tête hydrophile.

❖ Lipides neutres

Les lipides neutres sont des triglycérides « de réserve », une classe de lipides assez homogènes qui ne diffèrent que par la longueur et le degré de saturation de leurs acides gras. Ce sont des lipides qui permettent la synthèse et la fabrication de biocarburants.

Les principaux acides gras identifiés ont été l'acide hexadécadiénoïque (C16:2), l'acide palmitique (C16:0) et l'acide oléique (C18:1) avec 65% de lipides saturés et 26-33% de mono-insaturés. Les souches qui reçoivent une quantité importante de nutriments peuvent aussi produire des acides gras à longues chaînes comme l'oméga 3. Les microalgues vertes de l'espèce *Chlorella vulgaris* accumulent des C18:1 (acide oléique), C18:2 (acide linoléique), et des C18:3 (acide linoléique) (Pignolet *et al.*, 2013).

Les phospholipides, principaux constituants des membranes plasmiques, se subdivisent en phosphatidylglycérol (PG), phosphatidylcholine (PC), ainsi qu'en phosphatidyléthanolamine et phosphatidylsérine.

Dans cette famille, le groupement polaire est un phosphate lié à un alcool. Les glycolipides, principalement localisés dans les membranes des chloroplastes, se divisent en monogalactosyldiacylglycérol (MGDG), digalactosyldiacylglycérol (DGDG) et sulfoquinovosyldiacyl-glycérol (SQDG). Leur groupement polaire est un carbohydrate plus ou moins complexe. Ces lipides polaires jouent un rôle essentiel dans la structure et la fluidité des membranes, ils sont modifiés par les changements de paramètres environnementaux (lumière, température, etc.) et par le stress associé, pour que les membranes puissent conserver leur rôle biologique de support des réactions métaboliques. Si le stress environnemental reste modéré, seule la longueur des chaînes des acides gras et leur degré d'insaturation sont modifiés. En revanche, si les paramètres environnementaux éloignent trop la microalgue de ses conditions optimales de croissance, la proportion des différents lipides polaires est modifiée, pour un coût énergétique.

B. Factures qui influencent la teneur en lipides

❖ Environnement et les conditions de cultures

Ils impactent la composition et la teneur en lipides des microalgues. Chez les espèces appartenant aux genres *Chlorella* et *Scenedesmus* les températures supérieures à la température optimale de croissance permettent une augmentation des C16 et une diminution des C18 (Xin *et al.*, 2011 ; Han *et al.*, 2013), (Rengel, 2011).

❖ Température

Elle a aussi un effet sur la qualité des lipides synthétisés. Une diminution de température allant jusqu'à 4°C environ, permet d'obtenir des lipides plus insaturés. Par contre une augmentation de température allant jusqu'à 40 °C environ permet d'obtenir des lipides moins insaturés.

❖ Stress

Sheehan (1998) affirme qu'il serait possible d'augmenter la production de lipides chez certaines espèces par un stress. Les stress identifiés peuvent être de différentes natures. Une carence en azote ou en phosphate peut stimuler la production de lipides. L'augmentation soudaine de l'intensité lumineuse provoque un effet similaire. En plus, un choc thermique de même qu'un choc osmotique peuvent stimuler également la production de lipides. Mais il paraît que ces deux dernières conditions favorisent la production des lipides polaires (phospholipides et glycolipides) associés aux membranes cellulaires qui ne sont pas ainsi importantes au niveau énergétique.

❖ Radiations UV

L'exposition à des radiations UV active la production de lipides et a élevé jusqu'à 19.84 % la teneur en lipides (Adarme-Vega, 2014).

II. Domaine d'application des microalgues

Les microalgues se révèlent très prometteuses pour de nombreuses applications dans des domaines variés tels que ; l'industrie pharmaceutique, l'agro-alimentaire l'environnement et les énergies renouvelables. Les principales utilisations sont détaillées comme suite :

II.1. Domaine pharmaceutique

Les microalgues représentent une source intéressante de molécules bioactives et de toxines utilisables dans le développement de nouveaux médicaments pour le traitement de maladies cancéreuses notamment (Pulz, 2004). 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).

Des extraits sélectionnés de plus de 900 souches de cyanobactéries ont permis de mettre en évidence une action inhibitrice anti-HIV. Des effets antiparasitaires ont été également détectés chez les microalgues *Spirogyra* et *Oedogonium* (Pulz *et al.*, 2004). Les caroténoïdes ont des propriétés intéressantes en termes de protection par rapport à certaines pathologies (Tapiero *et al.*, 2004). La fucoxanthine est un caroténoïde utilisé à des fins médicales (Moreau *et al.*, 2006). Les phycobiliprotéines sont des chromoprotéines largement utilisées en immunologie, pour les marquages fluorescents (Fluorescence Activated Cell Sorting « FACS »), les immuno-essais, la microscope en fluorescence et la cytométrie en flux (Bermejo Romàn *et al.*, 2002).

Les polysaccharides extraits des microalgues trouvent des applications industrielles et commerciales dans le domaine médical (activités antioxydantes, antivirales, anti-tumorales et anticoagulantes) (Mayer et Hamann, 2004). Plusieurs molécules sont extraites chez des *Cyanobactéries "Spirulina platensis"* ainsi que chez certaines espèces appartenant à la classe des *Rhodophycées "Porphyridium purpureum"* et des *"Chlorophycées"* (Pulz *et al.*, 2004).

Les microalgues produisent une large gamme de vitamines. Les vitamines *B12* et *E* ont un intérêt commercial (Borowitzka, 1988). Certaines études se sont focalisées sur la production de la vitamine *E* par des microalgues marines *Dunaliella tertiolecta* et *Tetraselmis suecica* (Carballo-Cárdenas *et al.*, 2003). Toutefois l'utilisation des vitamines algales reste à l'état de la recherche.

Le bêta-carotène produit par les microalgues, est un précurseur de la vitamine A, une vitamine très importante, à tout âge, notamment pour la santé des cellules et la vision. Il a des propriétés d'antioxydant et d'immunostimulant. C'est aussi un puissant antioxydant, qui pourrait réduire le risque de cancer.

II .2. Domaine alimentaire

Les microalgues constituent un réel apport nutritif. Ces microorganismes sont utilisés dans l'alimentation animale et humaine, et dans l'aquaculture (Pulz *et al.*, 2004). La biomasse peut être produite sous forme de poudre, tablettes, capsules, pastilles...

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 entrent 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 une algue brune *Undaria pinnatifida* de la famille des Alariacées, 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'aliments, à cause de leur teneur 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 le genre *Chlorella* (figure 36) (Jenck *et al.*, 2011).



Figure 29 : Formes nutritives des microalgues (Anonyme., 2011). A : La Chlorelle (*Chlorella vulgaris*). B : La Spiruline (*Arthrospira Platensis*).

Les microalgues sont considérées comme une source potentielle d'AGPI (Jiang *et al.*, 1999), destinée à l'alimentation humaine et animale. Ces organismes sont susceptibles de synthétiser des AGPI de la série $\omega 3$ comme l'acide eicosapentaénoïque « EPA », l'acide docosahexaénoïque « DHA » et l'acide α -linoléique « LNA », et les AGPI de la série $\omega 6$ comme l'acide arachidonique « AA » et l'acide linoléique « LA ». Ces AGPI sont utilisés en nutrition humaine et animale pour leurs vertus thérapeutiques sur certaines maladies. Les microalgues ont un potentiel intéressant de production de pigments (Lorenz et Cysewski, 2000). Le β -carotène est un pigment synthétisé par l'algue *Dunaliella* et est utilisé comme colorant en industrie alimentaire. D'autres caroténoïdes, tel que l'astaxanthine synthétisé par l'algue *Haematococcus*, la lutéine, le zéaxanthine et le canthaxanthine sont des antioxydants utilisés en alimentation humaine, animale et en aquaculture. Les phycobiliprotéines sont des pigments qui peuvent être utilisées comme colorants naturels en industrie alimentaire comme l'huile de soja (Gouveia *et al.*, 2007).

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).

Une autre microalgue qui est toute aussi bien représentée est *Dunaliella salina* et qui en est la plus riche en polysaccharides utilisés en tant qu'agent gélifiant ou épaississant tel que le β 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 est la plus riche (Fillali, 2012).

II . 3. Domaine des microalgues en aquaculture

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 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 (figure 30) (PERSON, 2010).



Figure 30 : Nourriture pour poisson (HBH) (NREL ,2012).

De même qu'elles apparaissent également comme de bons fertilisants des sols pauvres puisqu'elles apportent notamment du potassium, de l'azote et des éléments essentielles à la croissance végétale (Ghobrini *et al.*, 2014).

II . 4. Domaine cosmétique

Plusieurs espèces de microalgues sont exploitées industriellement dans le domaine cosmétique, surtout les deux espèces *Arthrospira* et *Chlorella* (Stolz et Obermayer, 2005). Des extraits d'algues tel que les pigments, acides aminés essentiels, antioxydants, polyphénols sont utilisés dans des formules cosmétiques comme agents épaississants, agents régénérant et antioxydants.

Des extraits d'*Arthrospira* sp. et *Chlorella* sp. sont présents dans des formules de soin du visage et de la peau tels que les crèmes anti-âge, lotions pour le visage et le corps, les produits de soin rafraîchissant ou régénérant (De Jesus Raposo *et al.*, 2013). Ces extraits sont également retrouvés dans les produits de soin capillaire (Mobin et Allam, 2017).

La synthèse de protéines à partir de la souche *Arthrospira* entraîne une réparation des premiers signes de vieillissement de la peau alors que des extraits de *Chlorella vulgaris* permettent de stimuler la synthèse du collagène dans la peau induisant la réduction des rides (Spolaore *et al.*, 2006). Les pigments issus des microalgues sont également utilisés dans le domaine cosmétique (Del Campo *et al.*, 2000).

II . 5. Domaine environnementales

II . 5. 1. Traitement des eaux usées

La croissance de l'agriculture, de l'industrie et de la population, le volume de déchets liquides non traités rejetés dans les rivières, les ruisseaux, les lacs et les océans, provoquent une grande dégradation de l'environnement.

Au fil des années de nombreux processus ont été développés, que ce soit des traitements physiques, chimiques ou biologiques pour éliminer toutes sortes de polluants des eaux usées. Les procédés de traitement biologique sont considérés comme les plus écologiques et les moins coûteux (Rao *et al.*, 2011).

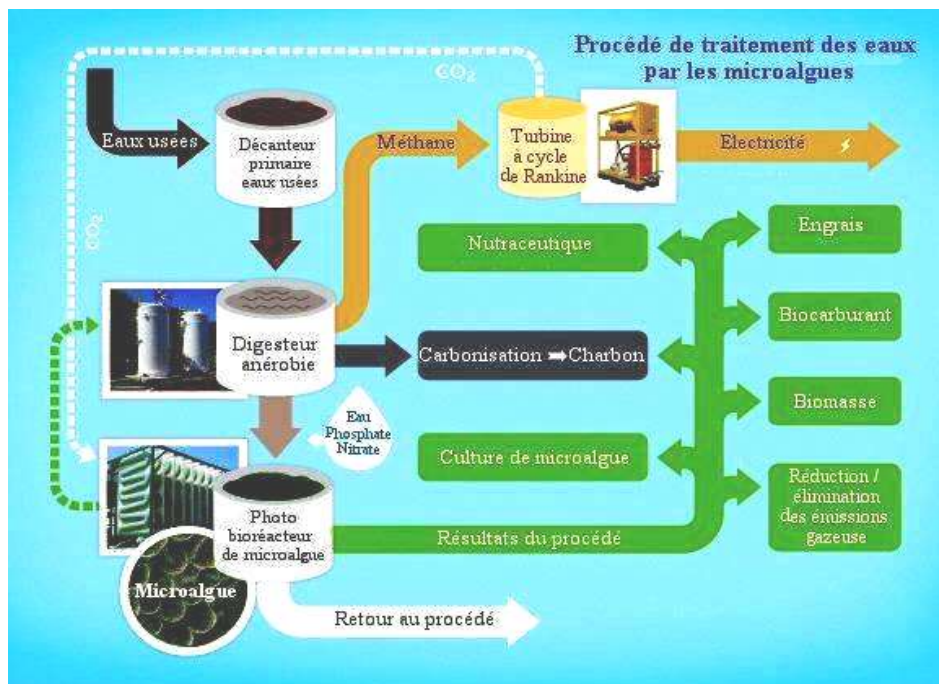


Figure 31 : Procédé de traitement des eaux par les microalgues (Filali, 2012).

Les micro-algues sont capables d'assimiler de nombreux nutriments nécessaires à leur croissance, elles peuvent donc éliminer certains éléments présents dans les eaux usées.

-Elles permettent ainsi de baisser les taux de phosphates et nitrates.

-Elles ont une action détoxifiante et dépolluante et peuvent agir selon deux modes :

1-soit directement grâce à leur capacité à fixer les métaux lourds,

2-soit indirectement afin de fournir de l'oxygène dissous aux bactéries permettant la dépollution des eaux contaminées (Perales-Vela *et al.*, 2006).

II . 5. 2. Remédiation du CO₂

Des travaux ont montré que les microalgues pourraient être utilisées pour le traitement biologique des gaz rejetés par les industries chimiques, les poussières de certaines installations métallurgiques et les cimenteries (Cantrell *et al.*, 2008).

Un des principaux avantages de la culture des micro-algues réside sur la capacité de la photosynthèse à absorber le CO₂, qui est ensuite converti en biomasse, lipides, ou bioproduits précieux. Le CO₂ émis par les centrales thermiques, les industries de la sidérurgie, cimenterie, pétrochimie ou tout autre secteur peut donc être utilisé pour la culture industrielle des micro-algues (figure 39) (Herman, 2008).

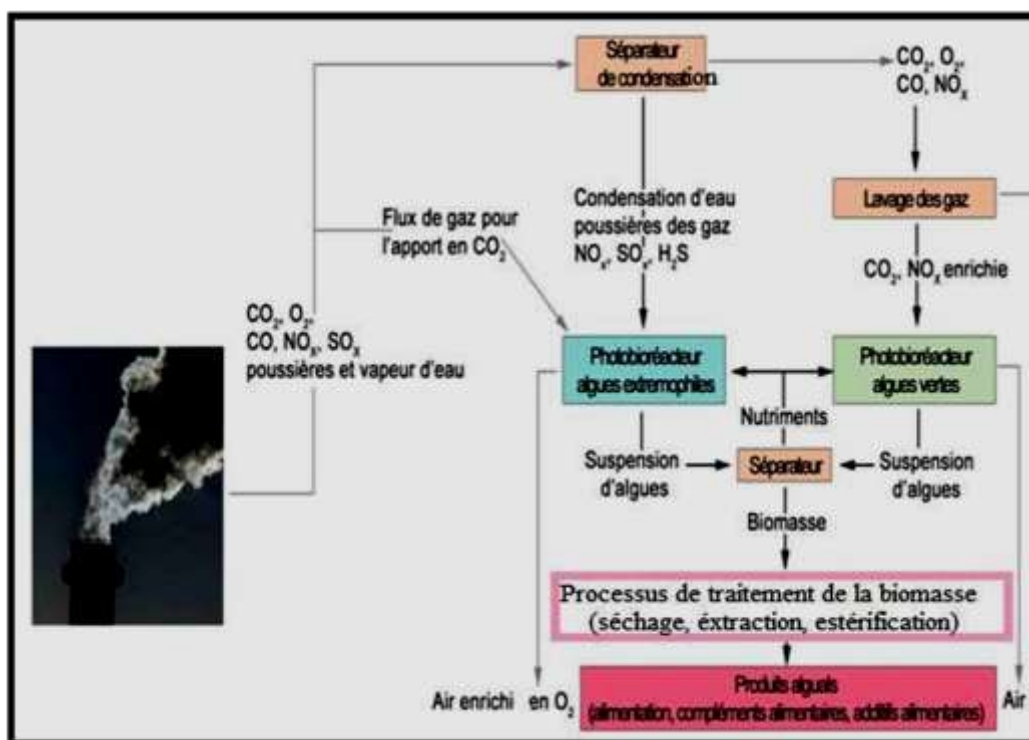


Figure 32 : Représentation schématique du procédé de fixation de CO₂ par les microalgues à partir de gaz d'échappement industriel (Fillali., 2012).

En présence de lumière les microalgues fixent le CO₂ et produisent de l'oxygène et de la matière organique sous forme de biomasse. Le rendement est plus important que chez les végétaux supérieurs. Les microalgues absorbent 1.4 fois leur poids en CO₂. L'utilisation de ces microorganismes constitue une alternative attrayante pour la capture et la séquestration du CO₂ libéré par les gaz de combustion des cimenteries, des aciéries et autres incinérateurs urbains (Ho *et al.*, 2011).

II . 5. 3. Agriculture

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 et des bactéries utiles dans le sol (Becerra-Celis, 2009).

II . 6. 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 concentré d'énergie. il est possible d'extraire des biocarburants, une forme concentrée, stable et polyvalente d'énergie (Ghobrini *et al.*, 2014).

II. 6. 1 . Biodiesel

Nous avons vu que, cultivées dans des conditions dites « de stress », certaines espèces de micro-algues peuvent accumuler des taux importants de lipides et plus spécifiquement des triglycérides. Ces derniers, par réaction de transestérification avec un alcool, conduisent à des esters utilisables dans les moteurs à combustion. En plus de l'argument de productivité, les micro-algues possèdent un atout majeur par rapport aux autres solutions : la non-concurrence avec les cultures alimentaires (Céline, 2013).

En raison de propriétés intéressantes (productivité importante de biomasse, activité photosynthétique élevée, grand potentiel de stockage lipidique), les microalgues sont efficaces pour la synthèse de biodiesel, 500 à 1000 fois plus efficaces que les espèces terrestres (Doré, 2009), notamment *Chlorella sp.* (Rasoul, 2011).

Certains pays, dont les USA, ont accentué leur recherche dans cet axe avec la création d'entreprises telles que « *Green fuel* » qui propose des bioréacteurs avec des algues pouvant contenir 80% de leur poids en huile servant par la suite à la fabrication du biodiesel. De même, ces réacteurs permettent également d'éliminer par temps ensoleillé, plus de 82% du CO_2 contenu dans les effluents gazeux des centrales thermiques ainsi que 86% d'oxydes d'azote impliqués dans le phénomène d'effet de serre.

II.6. 2. Biohydrogène

Le bio-hydrogène est une source efficace d'énergie renouvelable qui suscite actuellement de nombreuses recherches. Il n'est ni toxique, ni polluant, plus énergétique que le pétrole et abondant. En revanche, les techniques de production disponibles à ce jour comme par exemple l'électrolyse de l'eau, la gazéification ou la pyrolyse de la biomasse disposent de coûts de production élevés. Depuis plusieurs années, les microalgues et les bactéries ont été étudiées à cette fin.

Le problème majeur de cette technique est l'arrêt de cette production d'hydrogène lorsque les cellules retrouvent des conditions de cultures favorables sans anoxie. Plusieurs travaux ont été menés à ce sujet, l'espèce *Chlamydomonas reinhardtii* reste la plus utilisée (Melis et Happe, 2001).

II .6. 3. Biocarburant

Les microalgues, de par leur richesse en lipides, sont des organismes prometteurs pour la production de biocarburants, pouvant se substituer aux agrocarburants (biocarburants de première génération) source de déséquilibre des écosystèmes et des biocarburants d'origine ligno-cellulosique (2^{ème} génération) d'abondance limitée.

Dans la première génération de biocarburants, des produits alimentaires tels que le maïs, la canne à sucre, les huiles végétales (huiles de palme, de soja et d'arachide) en constituent la matière première. Le Brésil est considéré comme le deuxième pays producteur de bioéthanol en utilisant comme matière première la canne à sucre (Gasparatos *et al.*, 2012).

Cependant, les plantations de canne à sucre utilisent de grandes quantités de produits agrochimiques qui menacent les écosystèmes et la santé humaine (Lara *et al.*, 2001 and Lehtonen., 2010) mais aussi, l'extension future de la culture de la canne à sucre pourrait poser un problème plus important pour la biodiversité conduisant à sa perte (Gasparatos *et al.*, 2012).

Parmi les biocarburants de deuxième génération, on peut citer l'éthanol dit cellulosique.

Ce biocarburant est obtenu des différents déchets agricoles et d'arbres ayant une croissance rapide (la paille de blé, le peuplier, les sciures de bois ...). Cependant ce dernier pourrait avoir un impact défavorable sur l'environnement (déforestation), sur la sécurité alimentaire et la biodiversité (perte de la diversité des espèces) (Evans *et al.*, 2013).

Les microalgues sont considérées comme biocarburants de 3^{ème} génération.

Ces « algocarburants » auraient la capacité de remplacer les carburants d'origine fossiles sans affecter les ressources alimentaires, la consommation d'eau et la détérioration des sols cultivables (Chisti., 2008) et ce de par leur capacité de multiplication cellulaire rapide et leur production et stockage de grandes quantités de lipides (Chisti, 2007 and Frac *et al.*, 2010).

Ce biocarburant est produit par tranestérification des lipides en présence d'alcool conduisant à des esters utilisables dans les moteurs à combustion (figure 40).

Scenedesmus, *Chlorella*, *Chlorococcum*, *Tetraselmis*, *Nannochloropsis* et la *Synechococcus* sont les genres les plus utilisés dans la production de ce biocarburant (De Farias et Bertucco, 2016).

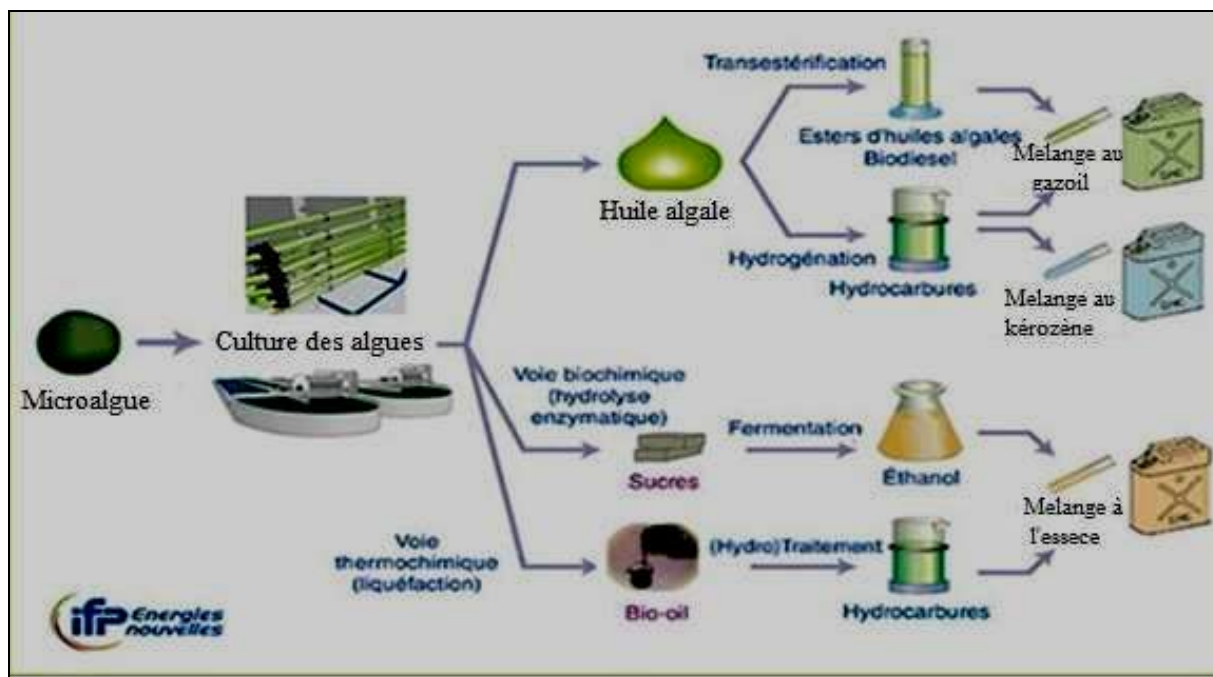


Figure 33 : Procédés de production de biocarburant via microalgues (Filali, 2012).

Conclusion
Générale

Conclusion générale

Les microalgues sont de plus en plus regardées pour leur potentiel énergétique et leurs nombreuses applications. Mais les systèmes de production actuels sont très énergivores et encore peu productifs. La culture de microalgues pour des applications énergétiques implique des productions importantes de biomasse ainsi qu'une logique d'intégration systémique. (Lucchetti, 2014).

Actuellement une nouvelle technologie émerge, capable de résoudre les principaux problèmes environnementaux. L'émission de CO₂ ainsi que la nécessité d'une source d'énergie inépuisable pourront être des problèmes du passé grâce à ce combustible à partir de micro-algues qui remplacent parfaitement le pétrole fossile.

En effet 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 sien de nombreux systèmes et dans de multiples secteurs industriels.

L'utilisation de micro-algues en tant que biodiesel et pour le chauffage des bâtiments aurait un rendu bénéfique pour notre environnement. Les biocarburants à base de micro-algues, possèdent aujourd'hui une productivité deux fois plus élevée que celle des biocarburants à base d'huile de palme, qui sont pourtant plus utilisés.

Malheureusement, face à un tel projet, différents problèmes surviennent très vite dont le coût de la production qui est plutôt élevé, plaçant les micro-algues derrière les énergies fossiles.

Mais malgré cela les micro-algues ont un potentiel très élevé et grâce aux évolutions technologiques d'aujourd'hui, elles pourraient devenir le carburant de demain.

Ils existent plus de 60 000 espèces dans seuls 30 000 sont connues et une dizaine d'espèces, étudier et cultivé toutes avec une composition biochimique et des propriétés différentes et donc avec de nombreuses applications potentielles de plus leur productivité est élevée et permettent même une récolte quotidienne.

Les microalgues constituent une ressource à peine explorée. Malgré la grande biodiversité de ces organismes dont le nombre estimé d'espèces va de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions, seulement quelques-unes sont cultivées à ce jour à l'échelle industrielle. La capacité de nombreuses espèces à fixer du CO₂ et à le stocker efficacement sous forme de polysaccharides et de lipides est particulièrement intéressante. Les microalgues ont jusqu'à présent été cultivées pour des applications à haute valeur ajoutée, notamment pour des pigments et des antioxydants. Les procédés de culture devront donc évoluer pour permettre une réduction des coûts de production et de l'impact environnemental. De nombreux verrous doivent encore être levés tout au long de la chaîne de valeur pour que les microalgues puissent ainsi offrir une ressource variée et abondante à la chimie verte.

Références
Bibliographiques

Références bibliographiques

A

- Abadli Mouna, Harkati Gamra** (2014), contribution à l'inventaire des quelques microalgues vertes d'intérêt nutritionnel dans quelques zones humides de la wilaya d'El Oued (Lac Ayata, Chott Merrouane, Sife Lemnade, STEP Kouinine, mémoire de fin d'étude, biologie et valorisation des plantes : p12
- Abert-Vian M, Dejoye-Tanzi C, Chemat C** (2013) Techniques conventionnelles et innovantes, et solvants alternatifs pour l'extraction des lipides de micro-organismes. *Oilseeds and fats, Crops and Lipids* 6: 20.
- Adarme-Vega TC, Lim D, Timmins M, Vernen F, Li Y, Schenk PM** (2012) Microalgal biofactories: a promising approach towards sustainable omega-3 fatty acid production. *Microbial Cell Factories* 11:96.
- Adarme-Vega, T. Catalina, Skye R. Thomas-Hall, David K. Y. Lim and Peer M. Schenk.** (2014). Effects of Long Chain Fatty Acid Synthesis and Associated Gene Expression in Microalga *Tetraselmis* sp.
- 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.
- Anand V., Singh PK., Banerjee C., Pratyosh Shukla.,** (2017), Proteomic approaches in microalgae: perspectives and applications, *Biotech springer*, 7,197-207. Doi: 10.1007/s13205-017- 0831-5.
- Andersen R.** (2005). *Algal culturing techniques* Elsevier academic press. Pp : 578.
- Anex P. F.** 2012. Les Algues comme biocarburant. Mémoire de master 2 Biologie Gestion, université de Rennes1, France. 32.
- Arad, S., Richmond, A.** (2004). Industrial Production of Microalgal Cell-mass and Secondary Products – Species of High Potential: *Haematococcus*. *Handb. Microalgal Cult. Biotechnol. Appl. Phycol.* 281–288.
- Asfour N Y.** (2019)., Production en masse de microalgues : optimisation des paramètres physicochimiques, Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2019, 10.

B

Barkia I., Nazamid Saari N., Manning S R., (2019), Microalgae for High-Value Products towards Human Health and Nutrition, *Marine Drugs*, 17, 304-333. Doi: 10.3390/md17050304. [26]- Umen J G., (2014), Green algae and the origins of multicellularity in the plant kingdom. *Cold Spring Harb Perspect Biology*, 6, (11), 16170-16182. Doi: 10.1101/cshperspect. a016170.

Bateman A., (2020), Division of labour in a matrix, rather than phagocytosis or endosymbiosis, as a route for the origin of eukaryotic cells. *Biology Direct*, 15 (8), 1-33. Doi: 10.1186 / s13062-020-00260-9

Baya D., (2012). Étude de l'auto floculation dans un chenal algal à haut rendement. Doctorat faculté des Sciences Unité Assainissement et Environnement. Wallonie- Europe.252p

Becerra Celis G., (2009). Proposition de stratégies de commande pour la culture de microalgues dans une photo bioréacteur continu. Thèse doctorat Génie des Procédés. École centrale Paris, 266p.

Becker EW (2007) Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*. 25: 207-210.

Becker, E.; Sir James Baddiley, N. H.; Carey.; (1994). I. H. W. P. (Ed.) *Microalgae: Biotechnology and Microbiology Cambridge Studies in Biotechnology*, 293.

Ben-Amotz A, Katz A, Avron, M (1982) Accumulation of β -carotene in halotolerant algae: purification and characterization of β -carotene-rich globules from *Dunaliella bardawil* (Chlorophyceae). *Journal of Phycology* 18: 529-537.

Bermejo Román R., Álvarez-Pez J. M., Acién Fernández F. G. and Molina Grima E. (2002). Recovery of pure B-phycoerythrin from the microalga *Porphyridium cruentum*. *Journal of Biotechnology*. 93: 73 -85.

- Bhola V., Desikan R., Santosh S. K., Subburamu K., Sanniyasi E. and Bux, F.** (2001). Effects of parameters affecting biomass yield and thermal behaviour of *Chlorella vulgaris*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 111 (3) :377– 382.
- Boileau, Marie-Ève.** (2015) "Évaluation du potentiel d'utilisation d'une eau usée industrielle comme substrat de culture pour des microalgues d'eau douce dans une optique de production de biocarburants de 3e génération."
- Borowitzka M.A.** (1998). Vitamins and fine chemicals from micro-algae. *In: -* Borowitzka M. A. and Borowitzka L.J. (Eds.), *Micro Algal Biotechnology*. Cambridge University Press. pp : 153-196.
- Borowitzka M.A.** (1999). Commercial production of microalgae: Ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of biotechnology*. 70: 313 -321.
- Bouamra, F., Hadj, A.B.** (2004). Contribution a l'inventaire qualitatif des Algues dans la region de Ouargla. Mémoire d'ingénieur d'Etat en biologie. Université d'Ouargla. 88p
- Brennan L. and Owende P.** (2010). Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14: 557 - 577.
- Bwapwa, Joseph K., Akash Anandraj, and Cristina Trois.** (2018). "Microalgae processing for jet fuel production." *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 12.4 : 522-535.

C

- Cantin I.,** (2010). La production biodiesel à partir des Microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe. Mémoire de maître en environnement. Université de Sherbrooke. 87p
- Cantin, Isabelle.** juillet 2010. La production de biodiesel à partir des microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe. CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT, UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE. Québec: s.n.
- Cantrell K. B., Ducey T., Ro K. S. and Hunt P. G.** (2008). Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. *Bioresource Technology*. 99: 7941 -7953.
- Carballo-Cárdenas E. C., Tuan P.M., Janssen M. and Wijffels R.H.** (2003). Vitamin E (α tocopherol) production by the marine microalgae *Dunaliella tertiolecta* and *Tetraselmis suecica* in batch cultivation. *Biomolecular Engineering*. 20: 139 - 147.

Ceron-Garcia. M.C., Fernandez Sevilla J. M., Acien-Fernandez F.G., Molina-Grima E. and Garcia-Amacho F. (2000). Mixotrophic growth of *Phaeodactylum tricornerutum* on glycerol: growth rate and fatty acid profile. *Journal of Applied Phycology*. 12(3/5) : 239 - 248.

Chen C.Y., Yeh K.L., Aisyah R., Lee D.J. and Chang J.S. (2011). Cultivation photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*. 102(1) : 71-81.

Chen M., Tanga H., Holland T. C. and 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.

Chevalier, P. et al. (2002). Technologies d'assainissement et prévention de la pollution, Sainte-Foy (Québec), Université de Québec - Télé-université, 440.

Chisti Y. (2007). Biodiesel from microalgae *Biotechnology Advances*. 25 : 294 – 306.

Chojnacka K. and Marquez-Rocha F.J. (2004). Kinetic and stoichiometric relationships of energy and carbon metabolism in the culture on microalgae. *Biotechnology*. 3(1): 21 -34.

Choubert .G, Mendes-Pinto, M.M. & R, Morais (2006), Pigmenting efficacy of astaxanthin fed to rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* : Effect of dietary astaxanthin and lipid sources. *Aquaculture*, 257,429-436.

Christenson L. and Sims R. (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts *Biotechnology Advances*. 29 : 686 – 702.

D

De Farias Silva C. E. and Bertucco A. (2016). Bioethanol from microalgae and cyanobacteria: A review and technological outlook. *Process Biochemistry*. 51: 833 - 1842.

De Jesus Raposo M. F., De Morais R. M. and De Morais A. M. (2013). Health applications of bioactive compound from marine microalgae. *Life Sciences*. 93: 479 - 486.

De Jesus Raposo, M.F., De Morais, R.M.S.C., De Morais, A.M.M.B. (2013). Bioactivity and applications of sulphated polysaccharides from marine microalgae. *Mar. Drugs* 11, 233–252.

- Del Campo J. A., Moreno J., Rodríguez H., Vargas M. A., Rivas J. and Guerrero M.G.** (2000). Carotenoid and phosphorus ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Water Research*. 36: 2941 - 2948.
- Diouf, Diadié.** (2009). Production d'aliments enrichis en acides gras polyinsaturés à partir de microalgues pour les besoins aquacoles. Diss. Université du Québec à Rimouski,
- Doré-Deschênes F.** (2009). Utilisation des microalgues comme source d'énergie durable. Essai de maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, Sherbrooke. Québec. pp111.
- Dragone G., Fernandes B. D., Abreu A. P., Vicente A. A. and Teixeira JA.** (2011). Nutrient limitation as a strategy for increasing starch accumulation in microalgae. *ApplEnerg.* 88(10): 3331 - 3335.
- Dragone G., Fernandes B., António A., José A.,** (2010). Third generation biofuels from microalgae. *Current Research, Technology and Education Topics in Applied microbiology and Microbial Biotechnology A. Méndez-Vilas*. vol. 4710-057: 1355-1366.

E

- Estevez M. S., Malanga G. and Puntarulo S.** (2001). Iron-dependent oxidative stress in *Chlorella vulgaris*. *Plant Science*. 161: 9-17.
- Evans S. G., Kelley L. C. and Potts MD.** (2013). The potential impact of second-generation biofuel landscapes on at-risk species in the US. *GCB Bioenergy*. 7: 337 - 348.

F

- Feipeng W., Jiai F, Shulian X** (2014) Phylogenetic and morphological investigation of a *Dunaliella* strain isolated from Yuncheng Salt Lake, China. *Plant 2* :20-26
- Filali R.** (2012). Estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique de CO₂. Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes ». pp 180.
- Frac M., Jezierska-Tys S. and Tys J.** (2010). Microalgae for biofuels production and environmental applications. *African Journal of Biotechnology*. 9: 9227 - 9236.

G

Gasparatos A., Borzoni M. and Abramovay R. (2012). The Brazilian bioethanol and biodiesel programs: Drivers, policies and impacts. In: Gasparatos A, Stromberg P (eds). Socioeconomic and Environmental Impacts of Biofuels: Evidence from Developing Nations. Cambridge Univ. Press, Cambridge, England. pp 111- 143.

Ghoibrini 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.

Gouveia L., Nobre B. P., Marcelo F. M., Mrejen S., Cardoso M. T., Palavra A. F., Mendes R. L. (2007). Functional food oil coloured by pigments extracted from microalgae with supercritical CO₂. Food Chemistry. 101: 717 - 723.

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.

Guebabi K and Zerroukhi H. (2019). Etude de la croissance et de la composition biochimique de deux souches microalgales marine « *nannochloropsis gaditana* » et « *nannochloris* ». Mémoire de master en hydrobiologie marine et continentale. Département des sciences de la mer et de l'aquaculture. Université abdelhamid ben badis mostaghanem . 1.

Guil-Guerrero JL, EI-Hassan Belarbi, Reboloso-Fuentes MM (2001) Eicosapentaenoic and arachidonic acids purification from the red microalga *Porphyridium cruentum*. *Bioseparation* 9: 299-306.

Guzman, S.; Gato, A.; Lamela, M.; Freire-Garabal, M.; Calleja, J.M. (2003). Anti-Inflammatory and immunomodulatory activities of polysaccharide from *Chlorella stigmatophora* and *Phaeodactylum tricornerutum*. *Phytother. Res.* 17, 665–670.

H

Habchi S and hidjaa N. (2013). Conception d'un photobioréacteur pour la culture des microalgues. Mémoire de master en génie chimique. Département de génie des procédés . université abderrahmane mira – Bejaïa. 12.

Hanagata N, Chihara M (1999) *Coenocystis inconstans*, a new species of back-inhabiting green algae (Chlorophyceae, Chlorophyta). *Journal of Japanese Botany* 71 : 204-211

Harun, Razif. (2010). "Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14.3: 1037-1047.

Heinze, T., Petzold-Welcke, K., Van Dam, J.E. (2012). Polysaccharides: Molecular and Supramolecular Structures. Terminology., in: *The European Polysaccharide Network of Excellence (EPNOE)*. pp. 24–59.

Ho S. H., Chen C. Y., Lee D.J. and Chang J. S. (2011). Perspectives on microalgal CO₂ emission mitigation systems. *Biotechnology Advances*. 29:189 – 198.

J

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*, pp 13.

Jiang Y., Chen F. and Liang S.Z. (1999). Production potential of docosahexaenoic acid by the heterotrophic marine dinoflagellate *Cryptocodinium cohnii*. *Process Biochemistry*, 34: 633 -637.

K

Khaldi H and Zeggaoui Z. (2014). Contribution a l’étude de la production de biomasse chez une microalgue verte *Chlorella* sp souche isolée dans le parc national du djurdjura (foret de darna). Mémoire de master de biologie végétale. Département de biologie animal et végétal. Université mouloud mammeri de tizi-ouzou. 18.

Khettab Zakaria, Toumi Fatna (2019) Contribution à la production de microalgues riche en lipides isolées de la région d'Oued Righ Mémoire de fin d’étude Biochimie Appliqué Université Echahid Hamma Lakhdar -El OUED P59

Kornprobst, J. M. (2005). Substances naturelles d'origine marine: chimiodiversité, pharmacodiversité, biotechnologies (Vol. 1). Éditions Tec & Doc

Kuczynska P, Jemiola-Rzeminska M, Strzalka K (2015) *Photosynthetic Pigments in Diatoms. Marine Drugs* 13: 5847- 5881.

Kumar A., Ergas S., Yuan X., Sahu A., Zhang Q., Dewulf J., Malcata F. X. et Van Langenhove H. (2010). Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in Biotechnology*. 28(7) : 371.

Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Sahu, A., Zhang, Q., Dewulf, J., & Van Langenhove, H. (2010). Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in biotechnology*, 28(7), 371-380

L

Lara L. L., Artaxo P., Martinelli L. A., Victoria R. L., Camargo P. B., Krusche A., Ayers G. P., Ferraz ES. B. and Ballester M. V. (2001). Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in the Piracicaba River Basin, southeast Brazil. *Atmospheric Environment*. 35: 4937 - 4945.

Lee Y. K. (2001). Microalgal mass culture systems and methods: Their limitation and potential *Journal of Applied Phycology*, Springer Netherlands. 13 : 307 – 315.

Lee Y. K. (2004). Algal Nutrition – Heterotrophic Carbon Nutrition. in: *Handbook of Microalgal Culture*, Blackwell Publishing Ltd, pp. 116-124.

Lehtonen M. (2010). Status report on sugarcane agrochemicals management. Ethical Sugar, Oullins.

López A V., Ascencio F., Nuño K., (2017), Microalgae, a potential natural functional food source – a review, *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 67, 4, 251–263. Doi: 10.1515/pjfn-2017-0017.

Lorenz R. T., Cysewski G. R., (2000). Commercial potential for *Haematococcus* microalgae as a natural source of astaxanthin. *Trends biotechnology*. 18: 160 - 167.

M

Mayer A. M. S. and Hamann M. T. (2004). Marine pharmacology in 2000: marine compounds with antibacterial, anticoagulant, antifungal, anti-inflammatory, antimalarial, antiplatelet, antituberculosis, and antiviral activities; affecting the cardiovascular, immune, and nervous system and other miscellaneous mechanisms of action. *Marine Biotechnology*. 6: 37 – 52.

Maziliak P. (1998). *Physiologie végétale. Croissance et développement*. Editions Hermann, Tome 2. Paris. Pp 575.

Melis A. and Happe T. (2001). Hydrogen Production. Green Algae as a Source of Energy. *Plant Physiol*. 127 : 740 – 748.

Michel K. P. and Pistorius E. K. (2004). Adaptation of the photosynthetic electron transport chain in cyanobacteria to iron deficiency: The function of IdiA and IsiA. *Physiologia Plantarum*. 120: 36 - 50.

Mobin S. and Alam F. (2017). Some promising microalgal species for commercial applications. *Energy Procedia*. 110: 510 - 517.

Mollo, Pierre, and Anne Noury. (2013) *Le Manuel du plancton*. Vol. 195. ECLM,

Moreau D., Tomasoni C., Jacquot C., Kaas R., Le Guedes R., Cadoret J. P., Muller-Feuga A., Kontiza I., Vagias C., Roussis V. and Roussakis C. (2006). Cultivated microalgae and the carotenoid fucoxanthin from *Odontella aurita* as potent antiproliferative agents in bronchopulmonary and epithelial cell lines. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 22: 97 - 103.

Moseley J. L., Chang C.W. and Grossman A.R. (2006). Genome-based approaches to understanding phosphorus deprivation responses and PSR1 control in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Eukaryotic Cell*. 5: 26 - 444.

N

Naidoo T, Zulu N, Maharajh DM, Lalloo R (2013). Value added products from microalgae. CRC Press. Nørskov NH, Barbosa MJ, Vermuë MH, Wijffels RH (2011). Microalgal production—a close look at the economics. *Biotechnol Adv*, 29 : 24-7.

O

Olaizola M. (2003). Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace *Biomolecular Engineering*. 20 : 459 – 466.

P

Perales-Vela H. V., Peña-Castro J. M. and Cañizares-Villanueva R.O. (2006). Heavy metal detoxification in eukaryotic microalgae. *Chemosphere*. 64 :1 – 10.

Person J. (2010). *Livre turquoise – Algues, filières du futur*. Édition Adebitech, Romainville, pp 163.

Pierre G. (2010). Caractérisation biochimique d'exopolymères d'origine algale du bassin de Marennes-Oléron et étude des propriétés physico-chimiques de surface de micro-organismes impliqués dans leur adhésion. Thèse de doctorat, université La Rochelle. pp 192.

Pignolet, O., Jubeau, S., Vaca-Garcia, C., & Michaud, P. (2013). Highly valuable microalgae: biochemical and topological aspects. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, 40(8), 781-796.7.

Pruvost J., Cornet J. F., Borgne F. et Jenck J. (2011). Production industrielle de microalgues et cyanobactéries, *Techniques de l'Ingénieur*, rubrique Innovations (in200) : PP1 – 17.

Pulz Gross W. (2004). Valuable products from biotechnology of microalgae. Mini review, *Applied Microbiology and Biotechnology* . 65(6) : 635 - 648 .

Q

Queiroz ML, Bincoletto C, Valadares MC, Danatas DC, Santos LM (2002) Effects of *Chlorella vulgaris* extract on cytokines production in *Listeria monocytogenes* infected mice, *immunopharmacology and immunotoxicology* 24 : 483-496

R

Rao H. P., Kumar R. R., Raghavan B. G., Subramanian V. and Sivasubramanian V. (2011). Application of phycoremediation technology in the treatment of wastewater from a leather- processing chemical manufacturing facility. *Water, Soil and Air*. 37: 7 – 14.

Rasoul-Amini S., Montazeri-Najafabady N., Mobasher M.A., Hoseini-Alhashemi S. and Ghasemi Y. (2011). *Chlorella sp.* A new strain with highly saturated fatty acids for biodiesel production in bubble-column photobioreactor. *Applied Energy*. 88: 3354 - 3356.

Razaghi A, Godhe A, Albers E (2014) Effects of nitrogen on growth and carbohydrate formation in *Porphyridium cruentum*. *Central European Journal of Biology* 9:156-162.

Reboloso Fuentes MM, Acien Fernández FG, Sánchez Pérez JA, Gil García MD, Guil Guerrero JL (2000) Nutrient composition of the biomass of the microalga *Porphyridium cruentum*. *Food Science and Technology International* 6: 129.

Reboloso Fuentes, M.M., Garcia Sánchez, J.L., Fernández Sevilla, J.M., Acien Fernández, F.G., Sánchez Pérez, J.A., Molina Grima, E., (1999). Outdoor continuous culture of *Porphyridium cruentum* in a tubular photobioreactor: quantitative analysis of the daily cyclic variation of culture parameters. *Prog. Ind. Microbiol.* 35, 271–288. [https://doi.org/10.1016/S0079-6352\(99\)80120-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6352(99)80120-9)

Reviere B., (2002) .Biologie et phylogénie des algues. Tome 1. Edition .BELIN.Paris. 225P.

Richardson, K., Beardall, J., Raven, J. (1983). Adaptation of unicellular algae to irradiance: an analysis of strategies. *New Phytol.* 93, 157–191.

Richmond, Amos. (2004). ed. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycolgy. Vol. 577. Oxford: Blackwell Science,

Rossi Federico, D.P.R. (2016). Exocellular Polysaccharides in Microalgae and Cyanobacteria: Chemical Features, Role and Enzymes and Genes Involved in Their Biosynthesis. *Physiol. Microalgae, Dev. Appl. Phycol.* 6, 565–590.

S

Safi C, Zebib B, Merah O, Pontalier PY, Vaca-Garcia C (2014) Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*, *Renewable and Sustainable Energy* 35 : 265-278.

Sahoo, D., & Seckbach, J. (Eds.). (2015). The algae world (Vol. 26). Netherlands: Springer.

Sathasivam R., Radhakrishnan R., Hashem A., Abd Allah E F., (2019), Microalgues metabolites Arich source for food and médecine, *Saudi Journal Biologie Science*, 26,709-722. Doi: 10.1016/j.sjbs.2017.11.003.

Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., & Roessler, P. (1998) b. A Look Back at the U.S. Department of Energy’s Aquatic Species Program—Biodiesel from Algae. Colorado : National Renewable Energy Laboratory.

Singh R and & Sharma S. (2012). Development of suitable photobioreactor for algae production - A review *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 16 : 2347 – 2353.

Singh, S., Arad, S.M., Richmond, A. (2000). Extracellular polysaccharide production in outdoor mass cultures of *Porphyridium* sp. in flat plate glass reactors 269–275.

Sobczuk T. M., Camacho F. G., Rubio F. C., Fernandez F. G. A. and Grima E. M. (2000). “Carbon Dioxide Uptake Efficiency by Outdoor Microalgal Cultures in Tubular Airlift Photobioreactors,” *Biotechnology and Bioengineering.* 67 (4): 465 – 475.

Spolaore, P., Joannis-cassan, C., Duran, E., Isambert, A., Génie, L. De, Paris, E.C.(2006). Commercial Applications of Microalgae 101, 87–96. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.87>

Stock W., Pinseel E., Decker S., Seftom J., Blommaert L., Chepurnova O., Koen S K., Vyverman W., (2018), Expanding the toolbox for cryopreservation of marine and freshwater diatoms, *Scientific Reports* ,8:4279-4288. Doi: 10.1038/s41598-018-22460-0.

Sumi, Y. (2009). Microalgae pioneering the future-application and utilization. NISTEP Science & Technology Foresight Center.

Sun Y, Liao Q, Huang Y, Xia A, Fu Q, Zhu X, Fu J, Li J (2018) Application of growth-phase based light-feeding strategies to simultaneously enhance *Chlorella vulgaris* growth and lipid accumulation. *Bioresour Technol* 256: 421- 430.

T

Taiz L. and Zeiger, E. (2010). *Plants physiology*. Sinauer Associates, Incorporated.

Tapiero H., Townsend D. M. and Tew K. D. (2004). The role of carotenoids in the prevention of human pathologies. *Biomedicine and Pharmacotherapy*. 58: 100 - 110.

Thomazeau, S. (2006), Diversité phylogénétique et toxinique de cyanobactéries du Sénégal et du Burkina Faso. Mémoire de master. Université de Pierre & Marie CURIE – PARIS- 6. 44 p.

Tredici M. R. (2004). Mass production of microalgae: Photobioreactors. In: Richmond, A. *Handbook of Microalgal Culture Biotechnology and Applied Phycology* Blackwell Publishing Ltd. Pp : 566.

V

Van Baalen, C.; Hoare, D. S.; Brandt, E.; (1970). Heterotrophic Growth of Blue- Green Algae in DimLight, In University of Texas, Marine Science Institute Port Aransas, Texas. NIH Pubmedcentral, [En ligne].

Villay, A.(2013). Production en photobioréacteurs et caractérisation structurale d'un exopolysaccharide produit par une microalgue rouge, *Rhodella violacea*: application à l'obtention d'actifs antiparasitaires 200.

W

Wang B., LI Y., WU N., LAN. and C.Q. (2008). CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 79 : 707–718.

Y

Yun Y. S. and Park J. (1997). Development of gas recycling photobioreactor system for microalgal carbon dioxide fixation. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 14 (4): 297 – 300.

Z

Zeng, X.; Danquah, M. K.; Chen, X. D. & Lu, Y.; (2011). Microalgae bioengineering: from CO₂ fixation to biofuel production *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3252-3260

Les sites Web

Web1 : alga-chlorella-vulgaris-viva-1-litro-D_NQ_NP_861472
MLM29171310777_012019-F - Carne y hueso

Web 2 : diatom-picture-id626096368 (418×612) (istockphoto.com)

Web 3 : 3.jpg (640×480) (ug.edu.pl)

Web 4 : Prymnesiophyceae — Wikipédia (wikipedia.org)

Web 5 : <http://natureineu.blob.core.windows.net/natureineu/pagina158.html>.

Présenté par :

❖ **AISSAOUI Ikram**

❖ **ZARZA Safa**

Encadré par :

Dr. DAKHMOUCHE Scheherazed

Résumé

Depuis plusieurs années, la recherche dans le domaine des bioénergies s'oriente de plus en plus vers l'utilisation des microorganismes (bactéries, levures, moisissures et microalgues) pour la production de biocarburants. Face au contexte actuel de développement durable, l'utilisation des microorganismes oléagineux photoautotrophes (cyanobactéries et microalgues) semble potentiellement plus intéressante d'un point de vue économique (énergie solaire) et environnemental (assimilation de CO₂) malgré des productions plus faibles que celles des microorganismes oléagineux hétérotrophes (levures et moisissures).

L'objectif de cette recherche bibliographique est d'identifier les métabolites biochimiques produits par les microalgues, afin de déterminer l'étendue de l'intérêt et de la culture des microalgues sur terre et leur rôle principal dans l'augmentation significative des rendements productifs. La première partie de cette thèse présente des généralités sur les microalgues, leur classification et leur composition biochimique, tandis que la seconde partie présente la culture des microalgues et leur production de différents métabolites

Mots clés : Microalgues, biodiversité, métabolites, biocarburant, bioénergies.

Jury d'évaluation :

Présidente : Mme Bennamoun L., MCB Uninvestité Des Frères Mentouri, Constantine 1.

Encadrante : Mme Dakhmouche S., MCA ENS Assia Djébar, Constantine.

Examinatrice : Mme Riah.N., MCB Uninvestité Des Frères Mentouri, Constantine 1.

Année Universitaire

2020/2021