

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE Des SCIENCES

DEPARTEMENT : SNV

N° :



FILAIRE : Sciences Biologiques

OPTION : Biodiversité et
Physiologie Végétale

*Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique*

Par : Meftah Saida -Mchegueg Khaoula

Intitulé

Les microalgues, traitement des eaux usées et applications

Soutenu devant le jury composé de:

-Dr. BENDIF Hamdi

-Pr. GHADBANE Mouloud

-Dr. MEDJEKAL Samir

Université: M'sila

Université: M'sila

Université: M'sila

président

Examinateur

rapporteur

Année universitaire : 2020 /2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DEDICACE

Je dédie ce mémoire

A tous ceux grâce à qui je suis la femme que je suis

*A ma très chère mère Djeghaba Alatra et à mon très
cher père Mechegueg Djamel.*

*A mon cher mari, merci pour votre soutien
brikat Abderrahmane.*

*A mes frères et sœurs adorés car ce travail est aussi
le leur.*

*Je dédie mon projet de fin d'étude à toutes les
personnes merveilleuses à qui je fais mes
invocations lorsque je prie Comme une simple
expression de mon grand Amour pour eux.*

DEDICACE

Je dédie ce mémoire

A tous ceux grâce à qui je suis la femme que je suis

A ma très chère mère Moussa halima et ma chère tante Moussa Saha.

à mon père, que Dieu lui fasse miséricorde Abde alhafide.

A mon cher mari, merci pour votre soutien

Chanegue Mohamed amin.

A mes frères et sœurs adorés car ce travail est aussi le leur.

Je dédie mon projet de fin d'étude à toutes les

personnes merveilleuses à qui je fais mes

invocations lorsque je prie Comme une simple

expression de mon grandAmour pour eux.

Meftah Saida

REMERCIEMENT

Louange à Allah, seigneur de l'univers, le tout puissant miséricordieux, pour m'avoir inspiré et comblé en me donnant la santé et le courage d'accomplir ce travail.

Tout d'abord, J'exprime ma gratitude et mon profond respect à mon encadreur de mémoire de Master Dr. Medjekal Samir.

Je remercie les membres du jury

Dr. Bendif Hamdi

Dr. Mouloud Ghadbane

Je remercie aussi chaleureusement tous les enseignants de notre département

Je tiens à remercier tous les enseignants qui nous ont enseigné du primaire au secondaire.

Sommaire

Introduction	01
<i>Chapitre I : Généralités sur les microalgues</i>	
1. Les microalgues.....	2
1.1. Caractérisation générale	3
1.2. Classification et phylogénie	3
1.2.1. Les procaryotes	4
1.2.1.1. Les cyanophycée	4
1.2.2. Les eucaryotes.....	5
1.2.2.1. Les chlorophycées	6
1.2.2.2. Les Rhodophycées	7
1.3. Caractéristiques morphologiques et physiologiques	7
1.4. Distribution et habitat	8
1.5. Composition biochimique	9
1.6. Sélection de la microalgue	9
1.7. Importance des microalgues	10
<i>Chapitre II : Les cultures des microalgues</i>	
2.1. Paramètres du développement des microalgues	12
2.1.1. Lumière.....	12
2.1.2. Température.....	13
2.1.3 . Ph	13
2.1.4. Salinité du milieu	14
2.1.5. Aération/mélange	14
2.1.6. Nutriments	14
a- Carbone.....	14
b- Azote	15
c- Phosphore	16
d - Micro-éléments	16
e- La teneur en O ₂ générée	17

f- Métaux traces et vitamine.....	17
-----------------------------------	----

Chapitre III : Applications des microalgues

3. Approches actuelles de traitement des eaux usées	18
3.1. Méthode de prétraitement des eaux usées	18
3.1.1. Traitement physique.....	18
3.1.2. Traitement chimique.....	18
3.2. Approches de traitement biologique.....	18
3.2.1. Procédé anaérobie.....	18
3.2.2. Traitement aérobie.....	19
3.2.3. Filtration membranaire.....	19
3.2.4. Traitement par bioréacteur à membrane.....	20
3.2.5. Processus de traitement d'oxydation avancé.....	20
3.2.6. Traitement à base de carbone activé.....	20
3.2.7. Méthode de traitement des microalgues.....	21
3.3. Avantages du traitement des eaux usées à base de microalgues.....	22
3.3.1. Engrais et bioengrais.....	22
3.3.2. Aliments pour animaux.....	23
3.3.3. Production de biocarburants.....	23
3.4. Défis associés au traitement des eaux usées des microalgues.....	23
3.4.1. Prétraitement des eaux usées.....	23
3.4.2. Sélection d'une souche de microalgues appropriée pour le traitement des eaux usées.....	23
3.4.3. Récolte des microalgues des eaux usées.....	24
3.5. Les traitements tertiaires.....	24
3.5.1. Elimination biologique de l'azote et du phosphore.....	24
a. Elimination de l'azote.....	24
b. Elimination du phosphore	24
3.5.2. Elimination et traitement des odeurs.....	24
3.5.3. Traitement et élimination des boues	25
3.6. Applications des microalgues.....	25
3.6.1. Domaine alimentaire	25
a- La nutrition humaine.....	26
3.6.2. Domaine pharmaceutique.....	26

3.6.3. Domaine cosmétique	27
a. Blanchiment de la peau et antirides.....	27
b. Les algues contre le vieillissement cutané.....	27
c. Les algues comme agent hydratant.....	28
d. Les algues comme agent épaississant et sensibilisant cutané.....	28
e. Les algues comme antioxydants.....	29
3.6.4. Domaine environnemental	29
3.6.5. Domaine énergétique.....	31
a. Production de biométhane.....	32
b. Production de biocarburant.....	32
c. Production de biohydrogène.....	32
Conclusion.....	33
Références Bibliographiques.....	34
Résumé.....	40

LISTE DE TABLEAU

Chapitre I . *Généralités sur les microalgues*

Tableau I . 1. Les groupes d'algues les plus importants en termes d'abondance (Sharma et Rai,2011)	4
Tableau I .2. diverses espèces de microalgues.....	9
Tableau I . 3 . Rendement en biomasse de différentes cultures végétales (Chisti,2007).....	10

LISTE DES FIGURE

Chapitre I *Généralités sur les microalgues*

Figure I.1. Diversité des formes des microalgues.	3
Figure I.2. Exemples de quelques espèces d'algues bleues. (Filali, 2012).....	5
Figure I.3. Exemple des microalgues eucaryotes (modifiée la détermination de quelques espèces de microalgues par Khaldi et Zegaoui in Algues.)	6
Figure I.4 . Algues vertes (chlorophycées) – <i>Micrasterias</i> , (Coste, 2008).	6
Figure I.5 . <i>Rhodorusmarinus</i> . (algue rouge)	7
Figure I.6. diversité morphologique des microalgues(Sumi,2009).....	8

Chapitre II *Les cultures des microalgues*

Figure II.7. Photosynthèse des microalgues.....	15
--	----

Chapitre III *Applications des microalgues*

Figure III. 8. Une relation bactérie-microalgues dans le traitement des eaux usées.....	21
Figure III. 9. Exemple de traitement des eaux usées d'un bassin de canalisation (Mohdudaiyappan et al.,2017).....	22
Figure III. 10. Modèle de photobioréacteurs tubulaires (Mohdudaiyappan et al.,2017).....	22
Figure III. 11. Formes nutritives des microalgues (Anonyne, 2011).....	26
Figure III. 12 . Procédé de traitement des eaux par les microalgues (Filali, 2012).....	30
Figure III. 13 . Représentation schématique du procédé de fixation de CO ₂ par les microalgues à partir de gaz d'échappement industriel (Filali, 2012).....	31
Figure III. 14. Procédés de production de biocarburant via microalgues (Filali, 2012).....	32

LISTE DES ABRIVIAITION

TAGs : Triglycérides (triacylglycérides)

AGPI : polysaccharides et acides gras polyinsaturés

EDTA : Acide Ethylène Diamine Tétracétique

DCO : Dirigente centrale operativo

OR : osmose inverse

NF : nano filtration

UF : ultrafiltration

MF : microfiltration

TSS: Total Suspended Solids

BOD: Biochemical oxygen demand

MBR : Mastre boot record

AOP : Procédés oxydation avancés

ROS : oxygène réactif

NOx : Oxydes d'azote

SOx : Oxydes de soufre

Introduction

Les microalgues sont des micro-organismes photosynthétiques unicellulaires dotées d'une croissance rapide et ont la particularité de produire des métabolites à haute valeur ajoutée comme les pigments protéiques, les antioxydants, les polysaccharides, les enzymes et les substances bioactives, des acides gras essentiels ; pour réaliser des opérations de dépollution (métaux lourds, fixation de CO₂), voir pour produire de l'hydrogène. De plus, ces molécules intéressent de nombreuses applications dans les domaines de l'alimentation, la pharmacologie, la cosmétique et l'énergie (production de biocarburants). Dans le milieu marin, les microalgues constituent le phytoplancton qui est à la base de toute la chaîne alimentaire et supporte une production de biomasse et de ressources renouvelables exploitées de l'ordre de 100 millions de tonnes par an (Jalilian et al., 2019).

Les microalgues constituent un groupe diversifié d'organismes unicellulaires photoautotrophes eucaryotes présents dans de nombreux écosystèmes, particulièrement dans les environnements aquatiques. Elles peuvent aussi bien coloniser les milieux à basse qu'à haute température, sous forte ou faible intensité lumineuse, à des pH très variés, des milieux hautement salins ou encore les eaux profondes. Cette grande diversité des espèces de microalgues ouvre les portes sur de nombreuses possibilités d'utilisation. Ces dernières années, la diversité des algues a suscité un intérêt particulier pour l'utilisation de leur capacité à reformer le dioxyde de carbone et certains métaux lourds au fur et à mesure de leur croissance pour traiter et filtrer les eaux usées et réduire les gaz à effet de serre (Mediboyina et al., 2019).

Le but de notre travail est de réaliser une revue bibliographique autour des microalgues et leurs applications biotechnologiques et en particulier l'utilisation des microalgues dans le traitement des eaux usées, technologie et filtration ; l'épuration des effluents industriels et municipales. Au vu de tous ces avantages, la filière «microalgue» est vouée à se développer et particulièrement dans les régions fortement ensoleillées comme l'Algérie.

Notre travail est organisé en trois parties : la première consiste en une synthèse bibliographique présentant la définition, la classification et les caractéristiques des algues, la deuxième présente le développement de la culture des microalgues et une troisième partie revue en détail les applications potentielles les plus importantes des microalgues et plus particulièrement les traitements des eaux usées.

1. Les microalgues

Les algues sont des organismes photosynthétiques et elles sont la source ultime de carbone cellulaire et d'énergie chimique pour d'autres organismes. Elles sont donc souvent appelées producteurs primaires et sont généralement classées en deux catégories : les macroalgues (algues marines) et les microalgues (unicellulaires). Pour leur croissance, les microalgues ont besoin de lumière, de dioxyde de carbone et de nutriments.

Les microalgues sont cultivées et utilisées pour l'alimentation, pour la production de composés utiles, comme biofiltres pour éliminer les nutriments et autres polluants des eaux usées, dans l'industrie cosmétique et pharmaceutique et dans l'aquaculture. Les microalgues sont également de bonnes sources potentielles pour la production de biocarburants en raison de leur forte teneur en huile et de la production rapide de biomasse.

L'aquaculture est un secteur en pleine croissance et sa production augmente constamment. Les genres de microalgues les plus fréquemment utilisés en aquaculture sont la chlorelle, la tétrasélis, le *scenedesmus*, la pavlova, le phaeodactyle, le chaétocère, la nannochloropsis, le squeletteema et la thalassiosie. Ils ont des taux de croissance rapides et sont stables en culture face aux éventuelles variations de température, de lumière et de nutriments comme cela peut se produire dans les systèmes d'écloserie.

Les microalgues doivent avoir une bonne composition en nutriments, y compris une absence de toxines qui pourraient être transférées vers le haut de la chaîne alimentaire. La principale application des microalgues en aquaculture est liée à leur utilisation pour l'alimentation animale. Actuellement, 30 % de la production mondiale d'algues est utilisée pour l'alimentation animale, mais l'utilisation en aquaculture concerne principalement les larves de poissons, de mollusques et de crustacés. Les eaux usées des piscicultures intensives sont enrichies de particules solides et de nutriments dissous, principalement sous forme d'azote et de phosphore inorganiques. L'utilisation de microalgues vivantes pour éliminer l'excès de nutriments dissous des effluents aquacoles est une méthode de traitement des eaux usées efficace et rentable.

Les microalgues contiennent de nombreux composés bioactifs qui peuvent être exploités à des fins commerciales. Le pigment responsable de la couleur rose du saumon et de la truite est l'astaxanthine, un caroténoïde, et l'une des sources naturelles d'astaxanthine est l'algue verte d'eau douce *Haematococcuspluvialis*. D'autre part, bien qu'un petit nombre de certaines microalgues libèrent des toxines qui peuvent causer des problèmes dans l'aquaculture en eau douce de vertébrés (poissons) et d'invertébrés (mollusques et crustacés). De graves efflorescences d'algues, même non toxiques, peuvent être désastreuses pour les

hydrobiontes cultivés, car elles épuisent l'oxygène des eaux peu profondes de nombreux systèmes d'aquaculture.

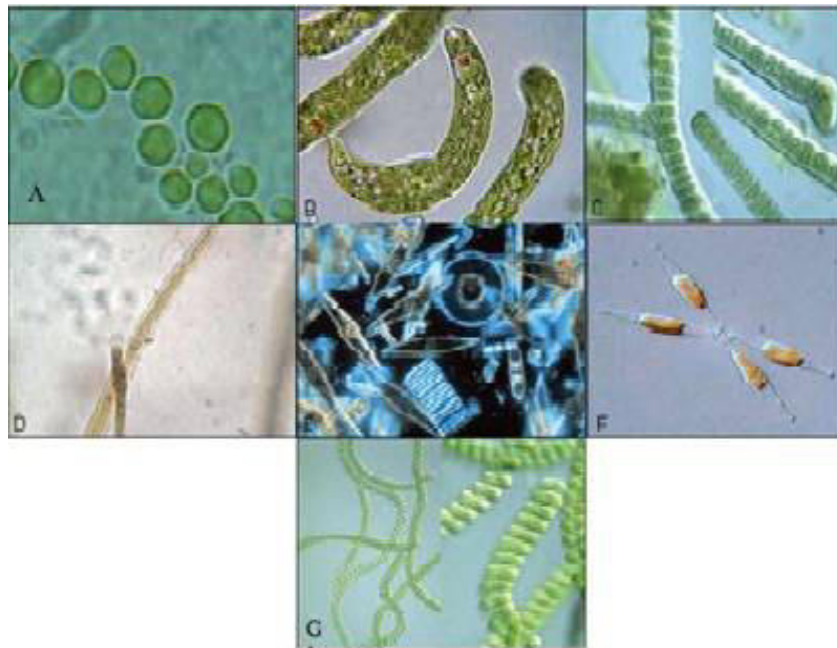


Figure 1 : Diversité des formes des microalgues.

A) *Chlorellavulgaris*, B) *Euglena*, C) *Cyanobacteria*, D) *Thalassiosira pseudonana*, E) *Phaeodactylum tricorutum*, F) *Cyanobactérie: Spirulina platensis* (Jeckelgrand., 2002).

1.1. Caractérisation générale :

Les microalgues ont une structure cellulaire simple et leur croissance nécessite de la lumière, du dioxyde de carbone, de l'eau et des nutriments (phosphore et azote comme nutriments majeurs). Photosynthétiquement, les microalgues peuvent convertir ces nécessités en énergie et l'utiliser dans le développement cellulaire. La microalgue présente un noyau et une membrane plasmique contenant des organites essentiels à son fonctionnement tels que les chloroplastes, les amyloplast, les oléoplastes et mitochondries, elle contient trois principaux types de pigments qui sont les chlorophylles, les caroténoïdes et les phycobiliprotéines.

1.2. Classification et phylogénie :

Les microalgues, présentent une diversité plus grande que celle de toutes les plantes terrestres (Ghobrin et al., 2014). Il existe sur le globe au moins 200 000 espèces différentes. Certains auteurs avancent même des chiffres supérieurs à un million d'espèces (Cadoret et Bernard, 2008). De nos jours, leur biodiversité est à peine explorée, ainsi, environ 47 000 espèces de microalgues ont été répertoriées. A cet égard, les possibilités de valorisation de

cette richesse naturelle apparaissent donc très importantes. Pourtant, seule une cinquantaine d'espèces sont étudiées de manière détaillée au niveau de laboratoire de recherches et une dizaine d'espèces uniquement sont exploitées au niveau industriel et commercial. Selon (Sharma et Rai, 2011), les espèces les plus importantes en termes d'abondance se rencontrent toutes dans les quatre classes données dans le Tableau I.

Tableau 1 : Les groupes d'algues les plus importants en termes d'abondance (Sharma et Rai, 2011)

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

* TAGs : Triglycérides (triacylglycérides)

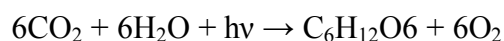
Ces organismes constituent un groupe polyphylétique et très diversifié de procaryotes (les algues bleues ou cyanobactéries) et eucaryotes (où l'on retrouve les algues vertes, rouges et brunes). Le classement en divisions est basé sur diverses propriétés telles que la pigmentation, la nature chimique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

1.2.1. Les procaryote :

Un procaryote est un organisme (bactérie, cyanophycée) unicellulaire qui ne possède pas de noyau. L'ADN est circulaire, généralement unique et regroupé dans un nucléoïde. Cette région contient le matériel génétique, mais n'est pas séparée du reste de la cellule. C'est précisément ce qui sépare le procaryote de l'eucaryote

1.2.1.1. Les cyanophycée :

Les cyanobactéries comprennent des espèces unicellulaires et des espèces multicellulaires. Les cyanobactéries ou cyanophycées, encore appelées algues bleues, auraient permis la production d'oxygène dans l'atmosphère en réalisant la photosynthèse, suivant la réaction universelle de la photosynthèse :



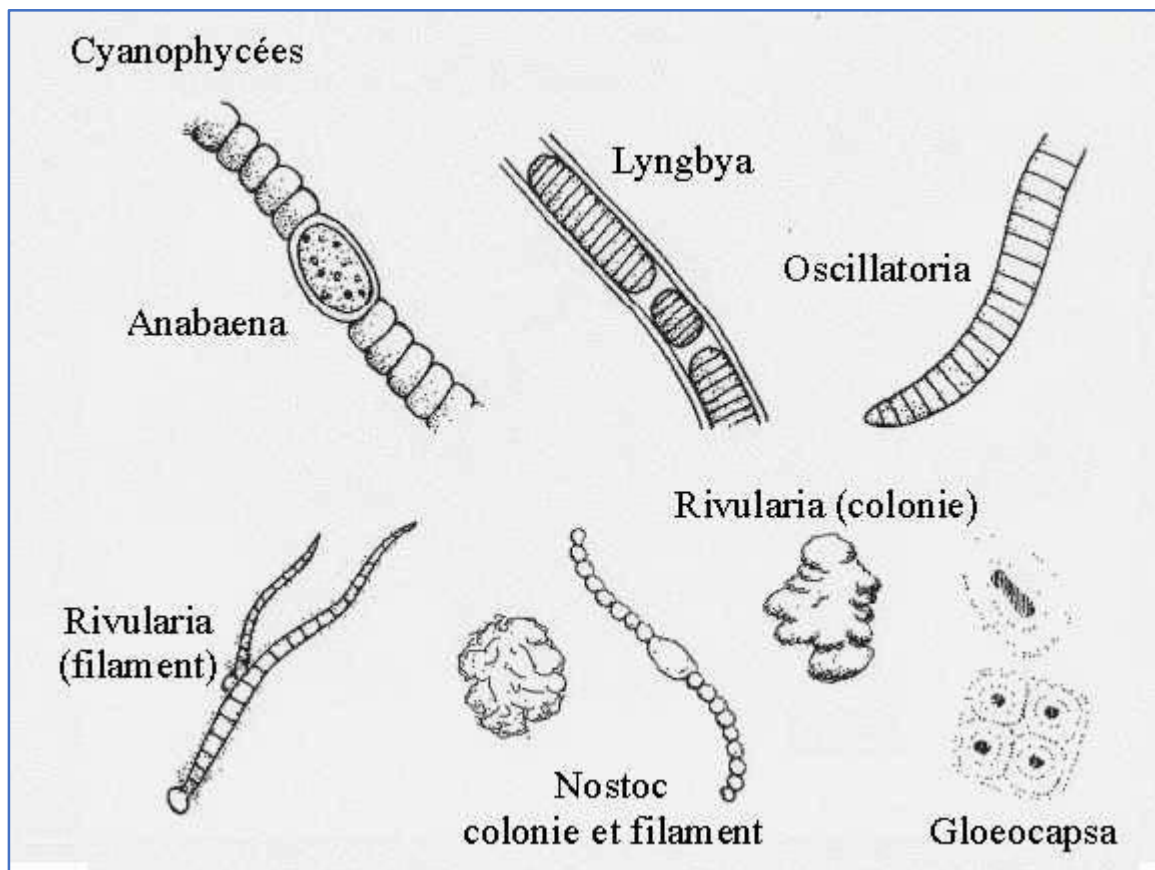


Figure 2 : Exemples de quelques espèces d'algues bleues. (Filali, 2012).

1.2.2. Les eucaryotes :

Cellules parfaites, avec noyaux cellulaires typiques, des mitochondries, des plastes, et des appareils de golgi. Organismes très variés, les uns animaux, les autres végétaux généralement doués de reproduction sexuée typique avec gamètes et zygotes, ce sont :

- a) Les Algues eucaryotes (Rouges, Brunnes et Vertes) : Phycophytes.
- b) Les Champignons : Mycophytes.
- c) Les Lichens.
- d) Les Cormophytes – Bryophytes- Ptéridophytes- Prè-spermaphytes (Pré-phanérogames) plantes à fleurs- Phanérogames (plantes à fleurs)
- e) Les Animaux : Zoaires
 - Métazoaires
 - Protozoaires



Figure 3 : Exemple des microalgues eucaryotes (modifiée la détermination de quelques espèces de microalgues par Khaldi et Zegaoui in Algues.)

a- *Volvox aureus*. e- *Micrasterias foliacea*. b- *Glosterium parvulum*. f- *Cresignia fenestria*. c- *Cosmarium binum*. g- *Lepocinclis ovum*. d- *Pediastrum boryanum*. h- *Anabaenaopsis circula*

1.2.2.1. Les chlorophycées :

Les chlorophycées sont abondantes en eaux douces. Elles peuvent se développer en mode unicellulaire ou en colonies qui va devenir très denses. Elle accumule l'énergie qu'elles capturent, principalement par photosynthèse, sous la forme d'hydrates de carbone et d'huiles. Elles peuvent tolérer plusieurs types de condition. Elles sont d'ailleurs adaptées à des milieux étonnement variés (Lindblad, 2005).



Figure 4: Algues vertes (chlorophycées) – *Micrasterias*, (Coste, 2008).

1.2.2.2. Les Rhodophycées :

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

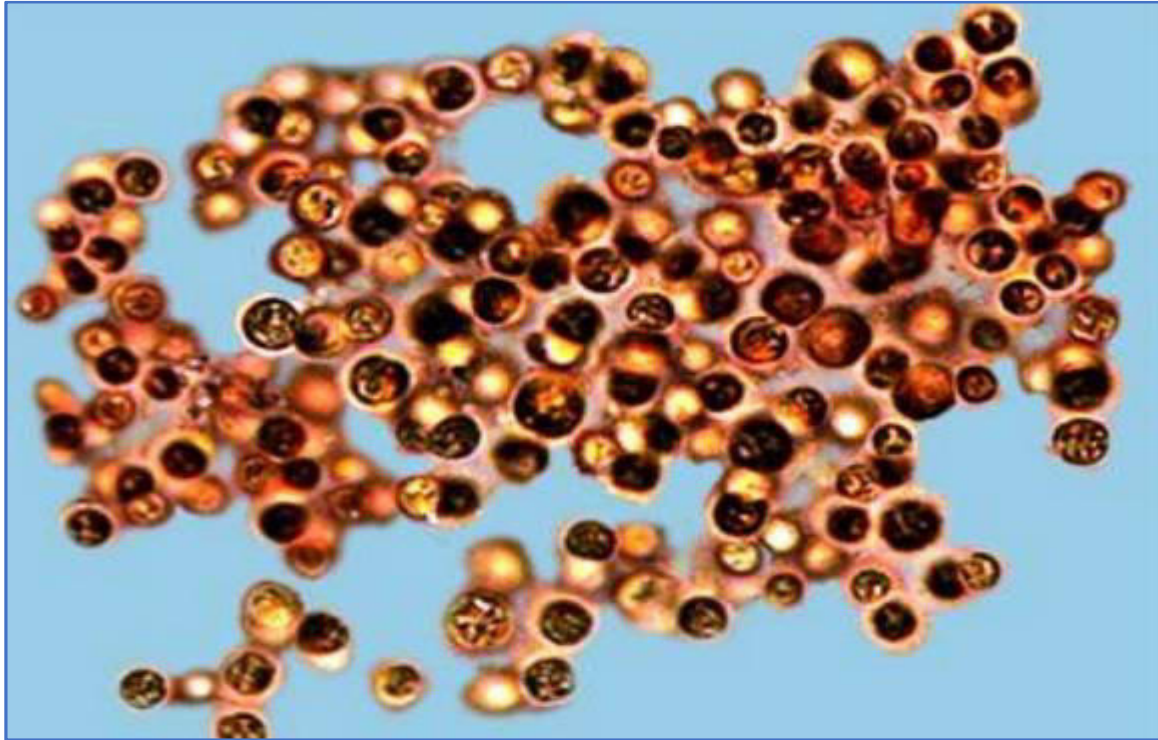
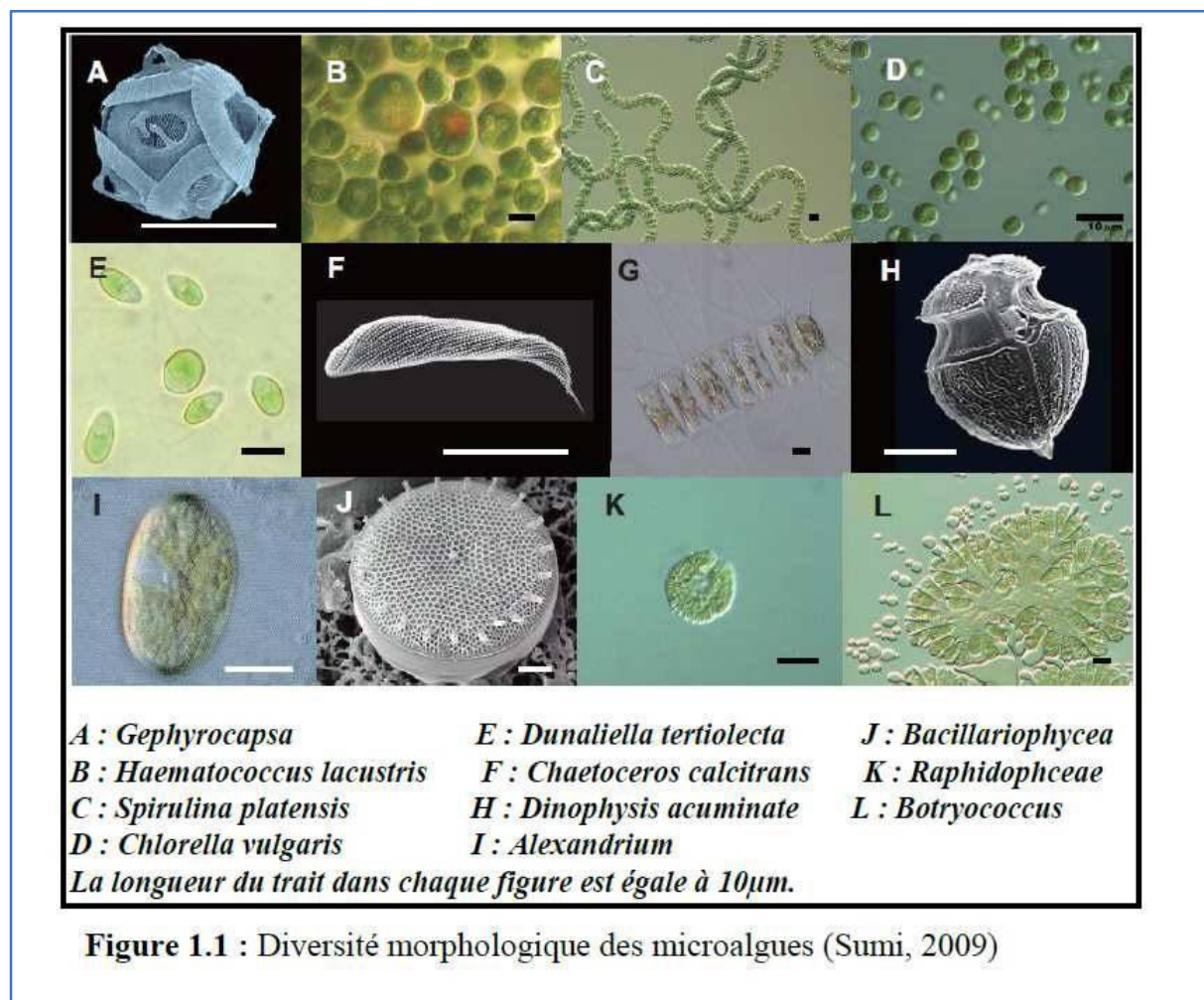


Figure 5 : *Rhodosorusmarinus*. (algue rouge)

1.3. Caractéristiques morphologiques et physiologiques :

D'une grande simplicité d'organisation (absence de structures spécialisées), les microalgues ont une taille de l'ordre du micromètre et se présentent sous des formes variables: souvent sphériques (Porphyridium), en forme de croissant (Clostridium), de spirale (Arthrospira), de gouttelette (Chlamydomonas) et même d'étoile (Staurastrum), (Sumi, 2009 in Filali, 2012). Du point de vue structure cellulaire, la microalgue présente un noyau et une membrane plasmique contenant des organites essentiels à son fonctionnement tels que les chloroplastes, les amyloplastes, les oléoplastes et les mitochondries. Elle contient trois principaux types de pigments qui sont les chlorophylles, les caroténoïdes et les phycobiliprotéines. Comme tous les organismes possédant des chloroplastes, les microalgues sont capables de transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique pour leur développement, par le biais du métabolisme photosynthétique.



1.4. Distribution et habitat :

Les microalgues sont capables de se développer dans un large éventail de conditions abiotiques. A cet égard, l'évolution des espèces a été accompagnée d'une diversification écologique, la majorité des espèces se développe dans des environnements aquatiques (océans, rivières, lacs, ... etc.), humides et ensoleillés (Subhadra et Edwards, 2010). En plus de se présenter sous plusieurs arrangements cellulaires différents et de posséder divers cycles de vie, les algues colonisent une multitude d'habitats (Bhattacharya et Medlin, 1998). Les algues peuvent être aquatiques, retrouvées presque partout dans les sources d'eau fraîches jusque dans les eaux salées (avec une tolérance pour une large gamme de pH, température, turbidité et concentration d'O₂ et de CO₂) ou subaériennes (exposées à l'atmosphère plutôt que submergées). Elles peuvent être planctoniques (comme la plupart des espèces unicellulaires) ou benthiques (vivant sur ou dans les sédiments) ; les algues benthiques peuvent se retrouver attachées sur la pierre (épilithiques), sur le sable ou la boue (épipéliques), sur d'autres algues ou plantes (épiphytiques) ou sur des animaux (épizoïques) (Barsanti et Gualtieri, 2006).

1.5. Composition biochimique :

Les microalgues se différencient principalement des autres végétaux par leurs richesses en : lipides, protéines, acides gras, polysaccharides, stérols, phycobilines, pigments et en antioxydants. Elles présentent une source importante de quasi toutes les vitamines essentielles : B₁, B₆, B₁₂, C, E, K₁ (Person, 2011, Dash et al, 2014). Et les microéléments majeures : C, O, H, N, Na, K, P, S, Mg, Fe, Zn, Mn, Si, B, Mo, Cu, Co (Sialve et Steyer, 2013). De nombreuses analyses de la composition chimique brute de différentes algues ont été publiées dans la littérature. Afin de donner un aperçu général sur les principaux constituants, les données sélectionnées de diverses espèces de microalgues sont compilées dans le tableau 2. (E.W. Becker, 2007).

Les algues	Protéines	Carbohydrates	Lipides
<i>Anabaenacylindrica</i>	43-56	25-30	4-7
<i>Aphanizomenonflos-aquae</i>	62	23	3
<i>Chlamydomonas reinhardii</i>	48	17	21
<i>Chlorellapyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Chlorellavulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglenagracilis</i>	39-61	14-18	14-20
<i>Porphyridiumcruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Scenedesmusobliquus</i>	50-56	10-17	12-17
<i>Spirogyrasp.</i>	6-20	33-64	11-21
<i>Arthrospira maxima</i>	60-71	13-16	6-7
<i>Spirulinaplatensis</i>	46-63	8-14	4-9
<i>Synechococcussp.</i>	63	15	11

tableau 2 : diverses espèces de microalgues

Toutes les algues primaires comprennent, dans des proportions variables : protéines, glucides, graisses et acides nucléiques. Bien que les pourcentages varient selon le type d'algues, il y a des algues types qui sont composés jusqu'à 40% de leur masse globale par des acides gras.

1.6. Sélection de la microalgue :

Différents paramètres sont pris en compte dans la sélection d'espèces d'algues. Ces paramètres peuvent concerner la morphologie de l'espèce, la cinétique de croissance ainsi que

l'impact des facteurs environnementaux tels que la lumière, le pH, ...etc. D'après Lee et Park (1995), la sélection de l'espèce algale repose sur les paramètres suivants :

- ❖ Tolérance importante vis-à-vis des concentrations de CO₂ élevée .
- ❖ Vitesse de croissance importante en présence de la forte concentration cellulaire.
- ❖ Tolérance vis-à-vis des gaz toxiques tels que le monoxyde d'azote et le monoxyde de soufre .
- ❖ Thermo-tolérance (tolérance vis-à-vis des températures élevées).

1.7. Importance des microalgues :

Les microalgues présentent l'avantage d'avoir un cycle de division très court, de l'ordre de quelques heures, permettant la production rapide de biomasse (plusieurs grammes de matière sèche par litre) ce qui leur confère un rendement supérieur à celui des plantes supérieures (10 fois plus que les plantes terrestres) (tableau 3). De plus, leur avantage majeur réside dans le fait qu'il n'entre pas en concurrence avec les productions répondant aux besoins de l'alimentation humaine ou des industries de transformation, des récoltes continuent sur l'année (permaculture) et pas d'apport de produits phytosanitaires (Subhadra et Edwards, 2010). Toutefois, les taux de croissance des microalgues sont fortement dépendants des espèces et des conditions de culture considérées en relation avec leur efficacité photosynthétique (Andersen, 1994).

Tableau 3 : Rendement en biomasse de différentes cultures végétales (Chisti, 2007)

Culture	Rendement (L/ ha/ an)
Soja	73
Camelina	94
Tournesol	155
Jatropha	307
Palmier à huile	907
Microalgues	1500-10000

En outre Les microalgues représentent une source de biomasse qui intéresse les nombreux secteurs des énergies renouvelables (ex. biocarburants, traitements des eaux usées). Néanmoins, la quantité produite de chacune de ces sources dépend du rendement

photosynthétique de l'espèce cultivée et des conditions de culture. Trois sources sont couramment exploitées : la biomasse, l'huile et le dihydrogène.

2.1. Paramètres du développement des microalgues :

Les conditions de culture telles que la lumière, le dioxyde de carbone, la température, le pH et les nutriments affectent les caractéristiques des microalgues. La lumière fournit de l'énergie pour la photosynthèse et la croissance microbienne. Le dioxyde de carbone est une source de développement de cellules de microalgues (Tan xb et al., 2018). Afin de réduire le coût de la source de carbone, gaz de combustion peut être utilisé comme source de carbone de remplacement ; 1,8 kg de CO peut produire 1 kg de biomasse de microalgues (Hasnain et al., 2018).

La température et le pH de la culture en croissance sont maintenus dans des conditions appropriées pour soutenir la croissance microbienne. Les nutriments nécessaires sont le phosphore et l'azote ; cependant, l'utilisation de sources de nutriments peut causer de la pollution dans l'eau. Par conséquent, l'application la culture de microalgues est une alternative car elle contient généralement du phosphore et nutriments azotés. Non seulement fournir des nutriments pour la croissance des microalgues, en utilisant eaux usées peuvent également réduire les contaminants dans les eaux usées. Les constituants, le déséquilibre de la composition et les composés toxiques peuvent nuire à son utilisation pour la culture de microalgues.

L'analyse systématique des eaux usées est nécessaires elle sont considéré comme une autre source de nutriments (Tan xb et al., 2018). La culture des microalgues peut se faire dans un bassin de canalisation ou un photobioréacteur. L'étang Raceway a un coût en capital inférieur à celui d'un photobioréacteur, mais système est facilement contaminé et la perte d'eau due à l'évaporation est énorme. Dans l'utilisation de sources de carbone comme le dioxyde de carbone n'est pas optimal par conséquent, certaines améliorations doivent être apportées.

2.1.1. Lumière :

Comme pour toutes les plantes, les micro-algues photosynthétisent, c-à-d elles assimilent le carbone inorganique pour la conversion en matière organique. La lumière est la source d'énergie qui alimente cette réaction et à cet égard l'intensité, la qualité spectrale et la photopériode. L'intensité lumineuse joue un rôle important, mais les exigences varient

grandement selon la profondeur de la culture et la densité de la culture algale : à des profondeurs et des concentrations cellulaires plus élevées, l'intensité lumineuse doit être augmentée pour pénétrer à travers la culture (par ex. 1.000 lux convient pour les flacons Erlenmeyer; 5.000-10.000 est nécessaire pour les volumes plus importants). La lumière peut être naturelle ou fournie par des tubes fluorescents. L'intensité de la lumière trop élevée (p. ex., lumière solaire directe, petit récipient près de la lumière artificielle) peut provoquer une photo-inhibition. En outre, la surchauffe due à l'éclairage naturel et artificiel doit être évitée. La durée de l'éclairage artificiel doit être d'au moins 18 h de lumière par jour, bien que le phytoplancton cultivé se développe normalement sous éclairage constant. Dans les pièces contrôlées, des lampes fluorescentes de jour blanches peuvent être utilisées. Les cultures extérieures comptent sur la lumière du soleil pour éclairage (Perumal et al.,2012).

2.1.2. Température:

La température affecte habituellement le taux métabolique d'un organisme. Les basses températures sont généralement maintenues dans le transfert des démarreurs d'algues ou inoculation préalablement cultivée dans des salles contrôlées lorsqu'ils sont mis à l'échelle pour la masse. La production devrait se faire tôt le matin pour éviter le stress causé par l'augmentation soudaine de la température des cultures de phytoplancton qui se situe généralement entre 20 et 24 °C, bien que cela puisse varier selon la composition du milieu de culture, l'espèce et la souche cultivée. Les espèces de microalgues les plus couramment cultivées tolèrent les températures entre 16 et 27 °C. Les températures inférieures à 16 °C ralentissent la croissance, tandis que celles supérieures à 35 °C sont mortelles pour un certain nombre d'espèces. Si nécessaire, les cultures algales peuvent être refroidies par un écoulement d'eau froide sur la surface du récipient de culture ou par le contrôle de la température de l'air avec l'air réfrigéré - unités de climatisation. (Perumal et al.,2012).

2.1.3. pH

La plage de pH de la plupart des espèces d'algues cultivées se situe entre 7 et 9, la plage optimale étant comprise entre 8,2 et 8,7. Complet l'effondrement de la culture en raison de la perturbation de nombreux processus cellulaires peut résulter d'un défaut de maintenir un pH acceptable. Ce dernier est accompli par l'aération de la culture. Dans le cas de la culture

d'algues à haute densité, l'ajout de dioxyde de carbone permet de corriger l'augmentation du pH, qui peut atteindre des valeurs limites allant jusqu'à pH 9 pendant la croissance des algues.

2.1.4. Salinité du milieu :

Le changement de salinité du milieu induit un stress osmotique et ionique (sel) qui peut se traduire par la formation de précipités et une augmentation de la teneur lipidique des algues. Ainsi, Borowitzka et Borowitzka (1998 in Filali, 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.

2.1.5. Aération/mélange :

Le mélange est nécessaire pour empêcher la sédimentation des algues, pour s'assurer que toutes les cellules de la population sont exposées de la même façon à la lumière et aux nutriments, pour éviter la stratification thermique (p.ex. dans les cultures extérieures) et pour améliorer l'échange de gaz entre les milieux de culture et l'air. Ce dernier est d'une importance primordiale car l'air contient la source de carbone pour la photosynthèse dans le milieu. Pour les cultures très denses, le CO₂ provenant de l'air (contenant 0,03 % de CO₂) a traversé la culture limite la croissance algale et le dioxyde de carbone pur peut être ajouté à l'alimentation en air (p. ex., à un taux de 1 % du volume d'air) (Perumal et al., 2012).

2.1.6. Nutriments :

Dans les cultures de laboratoire, cependant, les eaux naturelles elles-mêmes ne sont pas satisfaisantes pour une croissance algale soutenue, principalement par ce que certains nutriments essentiels ne sont généralement présents qu'en quantités infimes. La concentration de ces éléments dépend en grande partie sur l'équilibre dynamique qui est perturbé dès que l'eau est recueillie. Les nutriments les plus importants dans un milieu nutritif sont représentés comme suit :

a- Carbone :

Les microalgues ont besoin de carbone inorganique pour la photosynthèse (Figure 7), il peut être apporté sous forme de sels (bicarbonate) ou par enrichissement de l'air insufflé

(car l'air ambiant ne contient pas assez de CO_2 pour la culture intensive des microalgues). Pour que les microalgues puissent utiliser le CO_2 lors de la photosynthèse, celui-ci doit être solubilisé (Bernard, 2008). Le dioxyde de carbone, dissout dans l'eau prend plusieurs formes, en fonction du pH.



Figure 7. Photosynthèse des microalgues.

Les microalgues sont très consommatrices de dioxyde de carbone, pour produire 1 kilogramme de biomasse, 1.8 kg de dioxyde de carbone sont nécessaires (Cadoret et Bernard, 2008).

b- Azote :

L'azote constitue un élément nutritif essentiel pour la croissance algale. La teneur en azote des microalgues se situe aux alentours de 7 % de la matière sèche algale (Bhola et al., 2011). La source d'azote pour la culture peut être organique (urée) ou inorganique (nitrate NO_3^- , ammoniacque NH_4^-) (Alcaine, 2010). L'azote, étant un des constituants des acides nucléiques et des protéines, est impliqué dans les principales voies métaboliques des microalgues (Green et Durnford, 1996). Ainsi, une augmentation de la concentration d'azote, jusqu'à une certaine valeur limitée, entraîne une productivité cellulaire et protéique plus importante et une synthèse plus significative de chlorophylle. La carence de cet élément induit une accumulation importante de 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.

c- Phosphore :

Le phosphore est impliqué dans plusieurs voies métaboliques (Chen et al., 2011). Il représente environ 1% de la matière sèche algale (Richmond, 2004). Les microalgues sont capables d'utiliser les formes inorganiques du phosphore (PO_4^{3-} , H_2PO_4^- et HPO_4^{2-}) ainsi que ses formes organiques via le phénomène d'hydrolyse grâce à une enzyme de la famille des phosphatases (Alcaine, 2010). La carence en phosphore joue sur l'activité photosynthétique principalement au niveau de la fonction de l'enzyme « rubisco », indispensable à la fixation du CO_2 (Maziliak, 1998 ; Agren, 2004), sur l'accumulation des réserves lipidiques (Wang et al., 2008) et sur la productivité en biomasse (Borowitzka, 1988). Selon (Yun et al., 1997) il est nécessaire que le phosphore soit apporté en excès dans le milieu car il forme des précipités avec les ions métalliques et de ce fait pas toute la quantité de phosphore ajoutée est disponible.

d - Micro-éléments :

Plusieurs micro-éléments organiques et inorganiques sont nécessaires à la croissance des microalgues, tels le soufre (S), le fer (Fe), le magnésium (Mg), le potassium (K), le sodium (Na) il en va de même pour les oligoéléments tels le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le cobalt (Co), le molybdène (Mo), ...etc. Le soufre est un des éléments essentiels dans la composition de deux acides aminés : la cystéine et la méthionine. Une carence en soufre induit une inhibition de la synthèse protéique et de l'activité photosynthétique des microalgues (Wang et al., 2008). Une carence en fer entraîne des changements métaboliques cellulaires à travers une diminution de la densité et de la taille cellulaire et une inhibition de la synthèse protéique et lipidique (Valera et al., 2011 in Filali, 2012). Cet élément intervient également comme catalyseur lors de la synthèse de la chlorophylle (Becerra-Celis, 2009). Le magnésium est indispensable à l'activité nitrogénase dans le métabolisme cellulaire des microalgues (Wang et al., 2008). On a par ailleurs mis en évidence l'implication du cuivre, du fer et du zinc dans diverses fonctions enzymatiques telles que l'activité de l'anhydrase carbonique, enzyme impliquée dans le mécanisme d'assimilation du carbone (Buitenhuis et al., 2003 in Filali, 2012). De même, une carence en cuivre est susceptible d'affecter le mécanisme photosynthétique des microalgues (Rochaix, 2011). Une carence en molybdène peut influencer sur le processus métabolique d'assimilation de l'azote au niveau cellulaire (Glass

et al., 2009). La carence en certains oligo-éléments peut affecter plusieurs voies métaboliques telles que l'accumulation des triglycérides ou « TAG » (acide gras indicateur de stress environnemental durant la culture de microalgues) (Chen et al., 2011). Ces oligoéléments peuvent réagir avec d'autres éléments présents dans le milieu et précipiter ; il est donc souvent nécessaire d'ajouter un agent chélatant comme l'EDTA « Acide Ethylène Diamine Tétracétique » afin d'éviter toute limitation en éléments nutritifs dans le liquide (Filali, 2012).

e- La teneur en O₂ générée :

L'O₂ générée par la photosynthèse peut atteindre une quantité 10 g/m³ /min (Chisti, 2007). L'oxygène dissout à une action inhibitrice sur la photosynthèse. La limite tolérable est d'environ 40% la saturation du milieu.

f- Métaux traces et vitamine :

Les microalgues ont besoin de potassium, de fer de silice (pour les diatomées), de soufre, de métaux sous forme de traces et de vitamines. Le fer est un oligo-élément essentiel pour la croissance de la microalgue de par son implication dans le transport des électrons dans le processus des photosynthèses.

3. Approches actuelles de traitement des eaux usées

3.1. Méthode de prétraitement des eaux usées

En général, le processus de prétraitement des eaux usées vise à modifier les propriétés physiques, chimiques ou biologiques de l'eau d'alimentation. Le processus de prétraitement est effectué par des moyens physiques, chimiques ou biologiques ou des combinaisons de deux ou plusieurs méthodes.

3.1.1. Traitement physique

Le traitement physique des eaux usées a généralement été utilisé pour réduire les matières en suspension des eaux usées par sédimentation par force gravitationnelle. Le procédé sépare également les matières telles que la graisse et l'huile de l'effluent (Jayanti et Narayanan,2010). Cependant, les méthodes de traitement physique ne retirent que les matériaux solides grossiers, mais ne dégradent pas les polluants.

3.1.2. Traitement chimique

Les procédés de traitement chimique impliquent l'ajustement du pH ou la coagulation/floculation en ajoutant différents produits chimiques à l'effluent pour altérer sa chimie (Simate et al.,2011). La coagulation-floculation est la première étape du traitement chimique des eaux usées. La floculation consiste à agiter/agiter les effluents traités chimiquement pour induire une coagulation qui améliore la performance de sédimentation en augmentant la taille des particules, augmentant ainsi l'efficacité de décantation (Olajire, 2012). Des coagulants inorganiques comme le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique ont été largement appliqués dans le traitement des eaux usées (Okolo et al., 2016).

3.2. Approches de traitement biologique

Les effluents nécessitent des méthodes de traitement efficaces qui peuvent décomposer les charges organiques dans les eaux usées. L'effluent passe par des processus de digestion anaérobie (à l'aide de bactéries aérobies) et aérobie (à l'aide de boues activées) visant à réduire la DCO de l'effluent avant son rejet dans l'égout municipal.

3.2.1. Procédé anaérobie

La digestion anaérobie est un processus naturel dans lequel diverses espèces microbiennes travaillent ensemble en l'absence d'oxygène pour transformer les déchets organiques à travers une variété d'intermédiaires en biogaz (Mccarty, 2001). Toutefois, la digestion anaérobie est influencée par un certain nombre de facteurs, notamment les éléments nutritifs, les charges organiques, le rapport carbone/azote, la température et le pH des eaux usées (Deublein et Stemhauser,2010 ; Polprasert,2015).

Cependant, les bactéries actives sont classées en fonction de leur plage de pH optimale. Les bactéries acidogènes et méthanogènes fonctionnent parfaitement à des pH optimaux inférieurs à 6,0 et 7 à 8 respectivement (Raposo et al., 2012; Angelidaki et Sanders, 2004).

3.2.2. Traitement aérobie

La méthode de traitement aérobie se déroule en présence d'oxygène par des microorganismes aérobies (bactéries) qui métabolisent la matière organique dans les eaux usées. Ils produisent plus de microorganismes et de produits finis inorganiques comme le dioxyde de carbone, l'ammoniac et l'eau. Les processus aérobies sont plus efficaces dans la digestion des polluants (Metcalf et Eddy, 2003). Dans le processus de traitement biologique aérobie, les microorganismes convertissent les solides non solubles en solides sédimentables, suivis d'une sédimentation qui permet aux solides sédimentables de se déposer et de se séparer. La méthode de traitement aérobie largement utilisée dans le traitement des eaux usées comprend :

- (a) le processus de boues activées.
- (b) le processus de croissance attaché (biofilm).
- (c) le processus de filtrage par ruissellement.

Les boues activées sont surtout utilisées dans le traitement des eaux usées. Dans ce processus, les eaux usées s'écoulent dans un réservoir aéré agité qui est amorcé avec des boues activées. La suspension des bactéries aérobies dans le réservoir d'aération est mélangée vigoureusement par des dispositifs d'aération qui fournissent de l'oxygène à la suspension biologique (Simate et al., 2011).

Dans le processus de croissance attaché, le processus biologique aérobie crée un environnement favorable pour les micro-organismes qui désirent se fixer à la surface solide (Metcalf et Eddy, 2003). L'application de procédés anaérobies et aérobies dans le traitement des eaux usées est associée à un coût en capital énorme. Toutefois, le coût opérationnel du processus anaérobie est comparativement inférieur à celui du traitement aérobie. Les processus aérobies sont également entravés par la variation physique et chimique des eaux usées (Agler et al., 2010).

3.2.3. Filtration membranaire

Le procédé de filtration membranaire utilise des matériaux semi-perméables qui permettent à certaines molécules de les traverser. Les techniques de filtration membranaire telles que l'osmose inverse (OR), la nanofiltration (NF), l'ultrafiltration (UF) et la microfiltration (MF) ont été appliquées de manière significative dans l'assainissement des

effluents et peuvent entraîner une élimination de 99 % de la DCO, de la DBO et du TSS (Braeken et al., 2004).

3.2.4. Traitement par bioréacteur à membrane

Un traitement par bioréacteur membranaire est la combinaison de deux technologies de traitement que sont la filtration membranaire et le traitement biologique avancé (boues activées ou unité anaérobie). Cette technologie a produit des résultats positifs dans le traitement des eaux usées au cours de la dernière décennie (Fan et Zhou, 2007). De manière descriptive, le MBR est un système qui intègre une membrane avec un bioréacteur. Les configurations submergées et latérales sont les deux principaux systèmes MBR reconnus.

Néanmoins, la technologie MBR est contestée par des facteurs tels que :

- (1)- L'encrassement qui doit être traité par un nettoyage et un entretien réguliers.
- (2)- Un coût d'investissement élevé dû à la combinaison de plusieurs méthodes de traitement (membrane et réacteurs aérobies/anaérobies).
- (3)- Une consommation d'énergie élevée entraînant des surcoûts.

3.2.5. Processus de traitement d'oxydation avancé

Les procédés avancés de traitement par oxydation (AOP) sont largement utilisés dans le traitement des eaux usées des distilleries et des brasseries. Dans ce processus, des radicaux hydroxyles ($\bullet\text{OH}$) sont produits par l'utilisation d'ozone, de peroxyde d'hydrogène et d'irradiation ultraviolette dans la première étape de l'oxydation. Dans la deuxième étape, les charges organiques réagissent avec les radicaux hydroxyles pour produire des précipités. Les technologies AOP peuvent être rendues possibles grâce à la combinaison de l'irradiation peroxyde d'hydrogène/ultraviolet ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$), irradiation zone/ultraviolet (O_2/UV) et ozone/péroxyde d'hydrogène ($\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}_2$) (Bes-pia et al., 2003).

3.2.6. Traitement à base de carbone activé

Le carbone activé est largement utilisé dans l'épuration de l'eau potable municipale, les filtres au point d'utilisation (POU) et les filtres au point d'entrée (PDE) et l'épuration des eaux usées industrielles. Le carbone activé possède de forts adsorbants qui aident à éliminer une variété de composés organiques des eaux usées industrielles. Le carbone peut être utilisé pour purifier le débit total d'un effluent contenant différents polluants ou peut être utilisé dans le cadre d'une approche en plusieurs étapes, c'est-à-dire pour éliminer certains polluants présents dans l'effluent (Simate et al., 2011).

3.2.7. Méthode de traitement des microalgues

Les microalgues sont considérées comme l'un des agents favorables des eaux usées en raison de leur capacité à absorber les nutriments et à les convertir en biomasse (Chinnasamy et al., 2010). Pendant le traitement des eaux usées de brasserie, l'azote, le phosphore et les autres éléments nutritifs présents dans les eaux usées sont absorbés adéquatement par les microalgues pour leur croissance. Les microalgues, par leurs activités photosynthétiques, libèrent librement de l'oxygène qui est utilisé par les bactéries dans les eaux usées. Les microalgues fixent également le CO_2 en assimilant le HCO_3^- ou CO_2 par la respiration. La **figure 8** montre le mécanisme de la relation bactéries-microalgues dans les eaux usées.

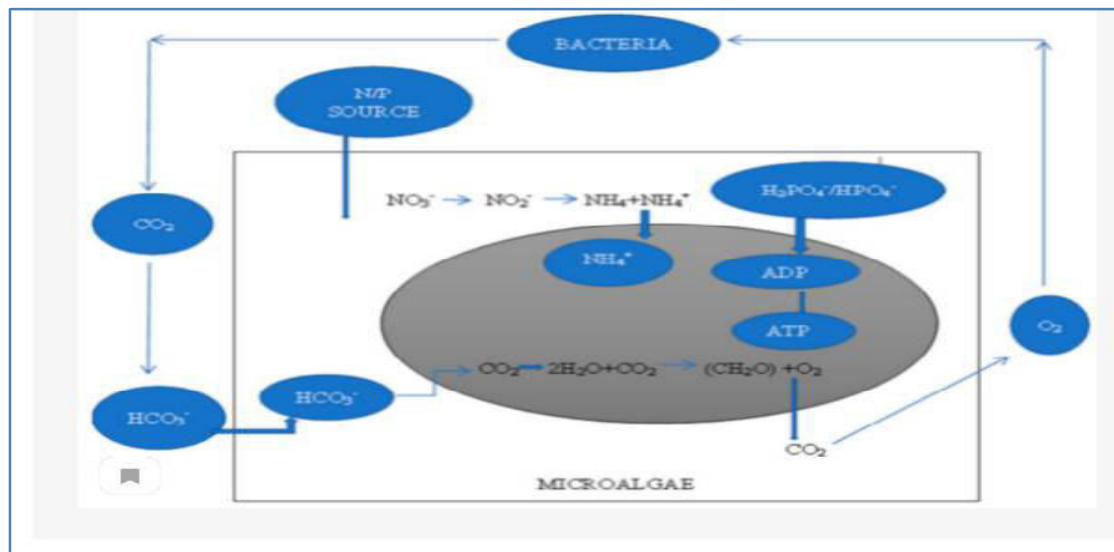


Figure 8. Une relation bactérie-microalgues dans le traitement des eaux usées.

Jusqu'à récemment, l'application des microalgues dans le traitement des eaux usées était réservée au laboratoire. Les étangs de raceway et les technologies de photobioréacteur ont été appliqués au traitement des eaux usées des microalgues, y compris les eaux usées des brasseries. Les étangs Raceway sont semi-circulaires aux deux extrémités, avec un système ouvert peu profond. Le système a des roues à aubes qui assurent un mélange continu des microalgues dans les eaux usées pour les nutriments et la lumière du soleil (Rogers et al., 2014). Un étang de canalisation est représenté sur la **figure 9**. La figure 3 montre le modèle du photobioréacteur tubulaire.

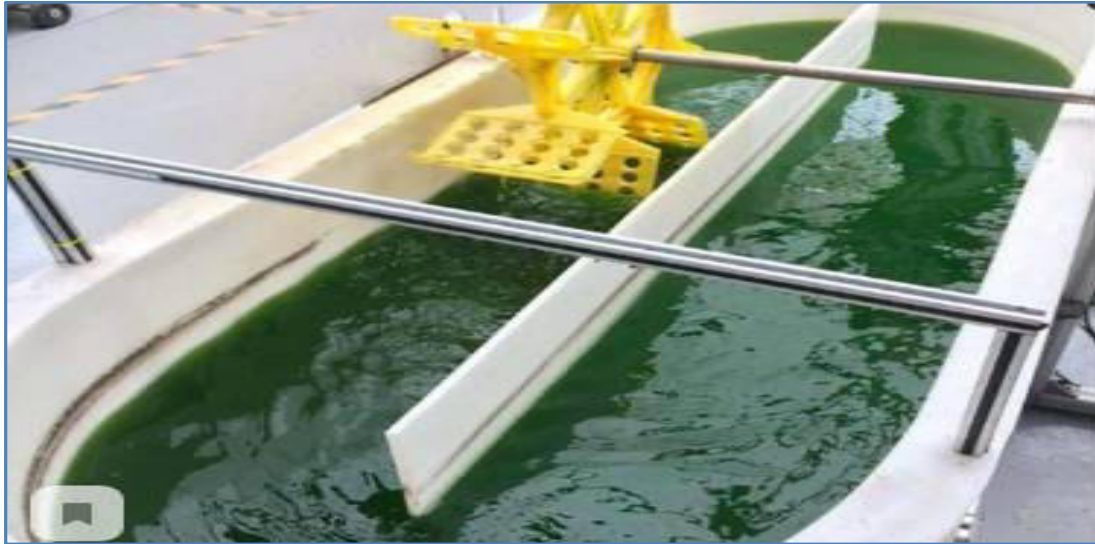


Figure 9. Exemple de traitement des eaux usées d'un bassin de canalisation (Mohdudaiyappan et al., 2017).



Figure 10. Modèle de photobioréacteurs tubulaires (Mohdudaiyappan et al., 2017).

3.3. Avantages du traitement des eaux usées à base de microalgues

3.3.1. Engrais et bioengrais

L'application excessive d'engrais inorganiques modifie la fertilité du sol en augmentant et en diminuant l'acidité et le pH, respectivement. En outre, les engrais inorganiques contiennent des substances telles que les nitrates et les phosphates qui sont ensuite lavés dans les plans d'eau par les pluies et les eaux usées qui peuvent conduire à l'eutrophisation. Les microalgues jouent un rôle utile dans l'agro-industrie. La biomasse algale récoltée à partir des eaux usées peut être transformée en engrais végétaux. Ces engrais

améliorent la composition minérale et la capacité de rétention d'eau des sols agricoles (Bhardwaj et al., 2014).

3.3.2. Aliments pour animaux

Les microalgues servent d'aliments vivants dans l'industrie aquacole en raison de leur contenu nutritionnel et de leur digestibilité facile. Les microalgues sont composées (matière sèche) de 39 à 71 % de protéines, de 10 à 57 % de glucides, principalement de polysaccharides, de cellulose et d'amidon (Yan et al., 2013).

La biomasse récoltée peut être utilisée directement ou indirectement pour nourrir les huîtres, les crevettes et les larves bivalves. Les microalgues peuvent également enrichir le zooplancton pour nourrir les poissons. (Phang et al., 2000)

3.3.3. Production de biocarburants

Un biocarburant peut être défini comme une substance (biohydrogène, biodiesel, bioéthanol, biométhanol) ayant une grande valeur de chaleur de combustion obtenue à partir de la biomasse (Nigam et Singh, 2011 ; Razzak et al., 2013). Ces derniers temps, des études ont porté sur les sources d'énergie de remplacement en raison des inconvénients associés aux combustibles fossiles. Les biocarburants ont fait l'objet d'un examen approfondi et ont été considérés comme une source prometteuse d'énergie de remplacement. Les microalgues seraient la source la plus prometteuse pour la production de biocarburants. C'est parce qu'ils ont un taux de croissance élevé et une efficacité photosynthétique élevée (Mahdy et al., 2014).

3.4. Défis associés au traitement des eaux usées des microalgues

3.4.1. Prétraitement des eaux usées

Les eaux usées nécessitent un prétraitement pour éliminer tous les organismes avant l'introduction des microalgues. Ces derniers temps, diverses technologies de prétraitement ont été appliquées pour réguler un grand volume d'eaux usées. Les méthodes de prétraitement telles que la filtration et l'autoclavage sont largement utilisées. Cependant, des études ont révélé que l'autoclavage était la méthode de prétraitement la plus efficace pour l'élimination microbienne (Ramsundar et al., 2017).

3.4.2. Sélection d'une souche de microalgues appropriée pour le traitement des eaux usées

La sélection d'espèces de microalgues pour les traitements des eaux usées est très vitale. En raison de la composition physique et chimique des eaux usées, les espèces de microalgues devraient être suffisamment robustes pour faire face aux fluctuations des facteurs environnementaux. De plus, l'espèce devrait avoir la capacité de partager des métabolites

pour s'adapter au stress, passer outre à toute attaque d'espèces indésirables et aux limites nutritionnelles (Qin et al., 2016).

3.4.3. Récolte des microalgues des eaux usées

L'un des problèmes liés aux microalgues et au traitement des eaux usées industrielles est la séparation des microalgues de l'effluent. On dit que ce processus est énergivore. Les techniques de récolte comprennent la floculation, la centrifugation, la flottation, la sédimentation par gravité, la filtration et l'ultrasonisation.

3.5. Les traitements tertiaires

Appelés aussi les traitements complémentaires qui visent l'élimination de la pollution azotée et phosphatée. On y distingue généralement les opérations suivantes :

La nitrification-dénitrification et déphosphatation biologique ou mixte (biologique et physico-chimique), la désinfection bactériologique et virologique.

3.5.1. Elimination biologique de l'azote et du phosphore

a- Elimination de l'azote :

L'élimination de l'azote est, le plus souvent, obtenue grâce à des traitements biologiques, de "nitrification-dénitrification" ou par échange d'ions. L'azote subit différentes transformations au cours d'un traitement biologique : passage de la forme nitreuse puis nitrique et de retour à la forme gazeuse. C'est la raison pour laquelle les charges et les concentrations de NH_4^+ donnent les équivalences suivantes :

1- 1,29 mg NH_4^+ sont équivalents à 1mg d'azote ammoniacal N- NH_4^+

2- 3,29 mg NO_2^- sont équivalents à 1mg d'azote nitreux N- NO_2^-

3- 4,43 mg NO_3^- sont équivalents à 1mg d'azote nitrique N- NO_3^-

b- Elimination du phosphore :

L'élimination du phosphore, ou "déphosphatation", peut être réalisée par des voies physico-chimiques ou biologiques. La déphosphatation biologique consiste à provoquer l'accumulation du phosphore dans les cultures bactériennes des boues. Dans les grosses installations d'épuration, ce procédé est souvent couplé à une déphosphatation physico-chimique, pour atteindre les niveaux de rejets requis.

3.5.2. Elimination et traitement des odeurs

La dépollution des eaux usées produit des odeurs, qui sont parfois perçues comme une gêne par les riverains des stations d'épuration. La conception des stations est le premier élément permettant de limiter l'émission d'odeurs dans le voisinage. Il faut, par exemple, veiller à réduire les surfaces d'échange entre l'air et les eaux usées. Des installations de désodorisation

chimique ou biologique sont également mises en place, au sein des stations d'épuration. La désodorisation chimique est la technique la plus utilisée. Les gaz malodorants sont captés puis envoyés dans des tours de lavage, où un liquide désodorisant est pulvérisé. Ces lavages peuvent comporter de la soude, de l'acide et/ou de l'hypochlorite de sodium (eau de javel), réactifs qui captent ou neutralisent les mauvaises odeurs.

3.5.3. Traitement et élimination des boues

Le traitement des boues a pour objectif de :

- a- Réduire la fraction organique de diminuer le pouvoir fermentescible des boues et les risques de contamination, ce par la « stabilisation » ;
- b- Diminuer le volume total des boues afin de réduire le coût d'évacuation, ce par « déshydratation » ;
- c- Élimination finale des boues par : **valorisation agricole ; incinération ; mise en décharge** (Medjekal, 2021).

3.6. Applications des microalgues

Outre l'intérêt écologique considérable comme agent épurateur des eaux usées, les algues microscopiques jouent un rôle important dans de nombreux domaines. Elles sont utilisées en agriculture comme engrais biologique pour la fertilisation des sols pauvres, en particulier les sols sahariens squelettiques, ainsi l'apport d'algues microscopiques riches en azote à ce type de sol, peut corriger l'insuffisance en matières organiques.

3.6.1. Domaine alimentaire

L'utilisation des microalgues comme source de nourriture vient des pratiques ancestrales de populations sujettes à la famine. Les chinois utilisaient la microalgue *Nostoc commune* pour assurer leur alimentation il y a plus de 2000 ans. Actuellement, la plus connue dans ce domaine est une microalgue appelée *Arthrospira platensis*, ou Spiruline (Becerra - Celis, 2009). Les microalgues sont considérées comme une source potentielle d'oméga 3 et 6 utilisés en nutrition humaine et animale. En outre, les microalgues ont un potentiel intéressant dans la production de pigments. Le carotène est un colorant, actuellement extrait de *Porphyridium cruentum*, qui sert notamment à colorer la margarine (Dabbadie, 1992), et comme additif dans l'alimentation animale (Becerra - Celis, 2009).

Une autre microalgue qui est tout 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, est exploité dans l'agroalimentaire comme édulcorant et c'est l'algue *Dunaliella salina* qui est la plus riche (Filali, 2012). Les microalgues peuvent être

intégrées à l'alimentation en aquaculture marine (Ghobrini et al., 2014). Les microalgues sont également utilisées pour produire du zooplancton, généralement des rotifères, qui sont donnés comme nourriture aux poissons carnivores fraîchement éclos (Person, 2010).



Figure 11: Formes nutritives des microalgues (Anonyne, 2011)

A : La Chlorelle (*Chlorellavulgaris*)

B : La Spiruline (*ArthrospiraPlatensis*)

a- La nutrition humaine

Les principales espèces de microalgues cultivées comme aliments de santé sont la Chlorelle et la Spiruline (*Arthrospiraplatensis*). *Arthrospiraplatensis* est une microalgue bleu-vert ayant une longue histoire comme source de nourriture en Afrique de l'Est et au Mexique précolonial. La spiruline est riche en protéines et en autres nutriments et est utilisée comme complément alimentaire et contre la malnutrition.

La production d'acides gras oméga-3 à longue chaîne importants pour l'alimentation humaine peut également être cultivée par des systèmes d'écloserie de microalgues. Des scientifiques australiens de l'Université Flinders d'Adélaïde ont expérimenté l'utilisation de microalgues marines pour produire des protéines destinées à la consommation humaine, créant des produits comme le "caviar", des burgers végétaliens, de la fausse viande, des confitures et d'autres tartinades alimentaires. En manipulant les microalgues en laboratoire, on pourrait augmenter la teneur en protéines et autres nutriments et modifier les saveurs pour les rendre plus acceptables. Ces aliments laissent une empreinte carbone beaucoup plus légère que d'autres formes de protéines, car les microalgues absorbent plutôt que de produire du dioxyde de carbone, ce qui contribue aux gaz à effet de serre.

3.6.2. Domaine pharmaceutique

Au vu de leur grande diversité biochimique, les microalgues représentent une source intéressante de molécules bioactives et de toxines utilisables dans le développement de

nouveaux médicaments (Filali, 2012). Ainsi plusieurs études ont permis de mettre en évidence l'implication des microalgues dans le domaine pharmaceutique par l'identification de nouvelles molécules naturelles (Ghobrint et al., 2014). Les microalgues contiennent une multitude de pigments associés au captage de la lumière incidente.

Les caroténoïdes issus des microalgues présentent déjà de nombreuses applications sur le marché (Person, 2010). Les caroténoïdes ont des propriétés intéressantes en termes de protection par rapport à certaines pathologies. Un effet thérapeutique préventif vis-à-vis du cancer est aussi parfois attribué à ces molécules. Par contre, les phycobiliprotéines sont largement utilisées dans des laboratoires en immunologie.

En effet, leurs propriétés en font des réactifs fluorescents hautement sensibles et très puissants (Becerra-Celis, 2009). Le β -carotène est un pigment synthétisé par l'algue *Dunaliella* (Filali, 2012), ce caroténoïde précurseur de la vitamine A est un antioxydant (Jenck et al., 2011). Le criblage d'extraits de microalgues par les industries pharmaceutiques et les laboratoires de recherches dans le domaine médicale afin d'identifier des molécules actives et des médicaments potentiels est en plein essor.

3.6.3. Domaine cosmétique

a. Blanchiment de la peau et antirides

Lorsque l'exposition directe entre la peau et les rayons UV est établie pendant une longue période, le rayonnement est absorbé par la mélanine, un pigment polymère complexe qui donne de la couleur à la peau humaine et agit également comme une barrière protectrice pour les cellules de la peau humaine (Thomas et kim, 2010).

Ainsi, une exposition constante à la lumière du soleil augmente la mélanine dans la peau, ce qui entraîne un bronzage. Le rayonnement du soleil aide à synthétiser la tyrosinase qui contribue à catalyser les réactions pour la formation de mélanosomes, qui mûrissent ensuite en mélanine et se différencient en kératinocytes pour augmenter la dilapidation de la peau.

Les inhibiteurs sont utilisés pour catalyser l'étape limitant la vitesse dans le processus de pigmentation (Wang). Les pigments d'algues tels que fucoxanthine d'algues brunes *Laminaria japonica*, *Alaria*, *Chorda*, et *Macrocystis* aident à réduire l'activité de tyrosinase et mélanogénèse (Shinoda et al., 2010).

b. Les algues contre le vieillissement cutané

Le vieillissement cutané est une activité biologique complexe qui se réfère à la perte d'élasticité de la peau, l'apparition de ridules, plis et décoloration de la peau avec l'âge de plus en plus (Wang et al., 2011). Notre peau est soumise à des sévérités extrêmes des facteurs

environnementaux et, par conséquent, les problèmes de peau comme la sécheresse, l'amincissement, la laxité de la peau, la fragilité, les pores dilatés et l'affaissement, de la peau entraîne des rides prématurées car les fibres d'élastine se détériorent lentement (Peytavi, 2016).

Le processus naturel de ridules de la peau est amplifié en cas d'exposition continue aux métaux lourds, de carence en nutriments et de manque de l'hydratation de l'épiderme. La cause la plus fréquente du vieillissement cutané est l'oxygène réactif (ROS), comme les peroxydes, superoxyde, radical hydroxyle, et l'oxygène simple. Des études scientifiques récentes ont abouti à des conclusions prometteuses sur la vitamine E qui est un antioxydant liposoluble et les pigments comme le carotène peuvent rajeunir et aider la peau à être immunisés contre le vieillissement cutané et réduisent le risque de cancer de la peau chez les utilisateurs (Keen et Hassan, 2016). Du β -carotène présent dans les algues vertes et rouges aide contre le vieillissement cutané (Schgen et al., 2012). Des espèces d'algues comme *Turbinaria orment*, *Ahnfeltiopsis*, *Colpomenia*, *Gracilaria*, *Halymenia*, *Hydroclathrus*, *Laurencia*, *Padina*, *Polysiphonia*, sont utilisés comme anti agents de vieillissement (Kelman et al., 2012).

c. Les algues comme agent hydratant

Un hydratant est constitué d'un mélange complexe de composés chimiques qui rendent l'épiderme de la peau plus doux. Si la peau n'est pas correctement hydratée, elle est sujette à l'aggravation de l'acné et peut même causer l'eczéma. Ainsi, les hydratants aident à retenir l'humidité de la peau et empêchent son séchage, les contusions et les rides. L'eau avec certains acides tels que hyaluronique aide à hydrater la peau humaine (Bonté, 2011). Polysaccharides tels que alginate, agar, carraghénane, et le fucoidans de certaines espèces d'algues aide à réguler la distribution de l'eau dans la peau.

Ces polysaccharides sont non toxiques, économiques, abondants dans la biomasse algale qui peut être utilisée comme alternative pour les huiles légères, comme l'alcool acétylique, ou les ingrédients dérivés de la silicone (Wang et al., 2014).

d. Les algues comme agent épaississant et sensibilisant cutané

Les agents épaississants sont utilisés dans les lotions ou autres produits cosmétiques si la teneur en eau est élevée dans la formulation pour prévenir les incohérences. Les agents épaississants utilisés dans les cosmétiques comprennent le polyéthylène glycol et la gomme végétale (Kadajji et betageri, 2011). Agar fonctionne comme un liant qui se trouve dans la paroi cellulaire des espèces d'algues rouges *Gracillaria* et *Gellidium*. *Carraghénane* obtenu par *Chondrus crispus*, est un autre type d'agent d'épaississement et de stabilisation. Certaines

espèces d'algues peuvent également être inculquées dans les cosmétiques comme sensibilisants cutanés car ils contiennent des pigments tels que la phycocyanine, les protéines, la vitamine A, les sucres, la *carraghénane* qui sont utiles et constructives pour la peau (Couteau et coiffard, 2016).

e. Les algues comme antioxydants

Un antioxydant aide à resserrer la peau, la réduction des rides et réduit l'inflammation. L'acide rétinoïque est un type de vitamine A qui réduit les taches foncées, les cernes et les rides, il améliore également l'élasticité de la peau (Kelman et al., 2012). Il a été découvert que les proliférations de cyanobactéries produisent de l'acide rétinoïque (Wu x et al., 2012). Les caroténoïdes sont des pigments accessoires liposolubles qui aident les algues à récolter la lumière en conjonction avec la chlorophylle pour poursuivre le processus de photosynthèse (Beta-carotene, 2017). Les algues comme *Spiruline maxima* et *Chlorellavulgaris* contiennent des vitamines qui aident également à tonifier la peau, à guérir les cernes, à purifier la peau, à favoriser la croissance des cheveux en traitant les pellicules.

3.6.4. Domaine environnemental

L'utilisation des microalgues dans le secteur de l'environnement s'intègre dans une optique de dépollution avec pour idée de transformer nos déchets en produits ; comme par exemple le traitement des eaux usées chargées en nitrates, phosphates, l'épuration d'effluents gazeux contenant du CO₂ mais aussi divers oxydes NO_x, SO_x, et la bioremédiation possible des sites pollués... (**fig. 12**) (Person, 2010).

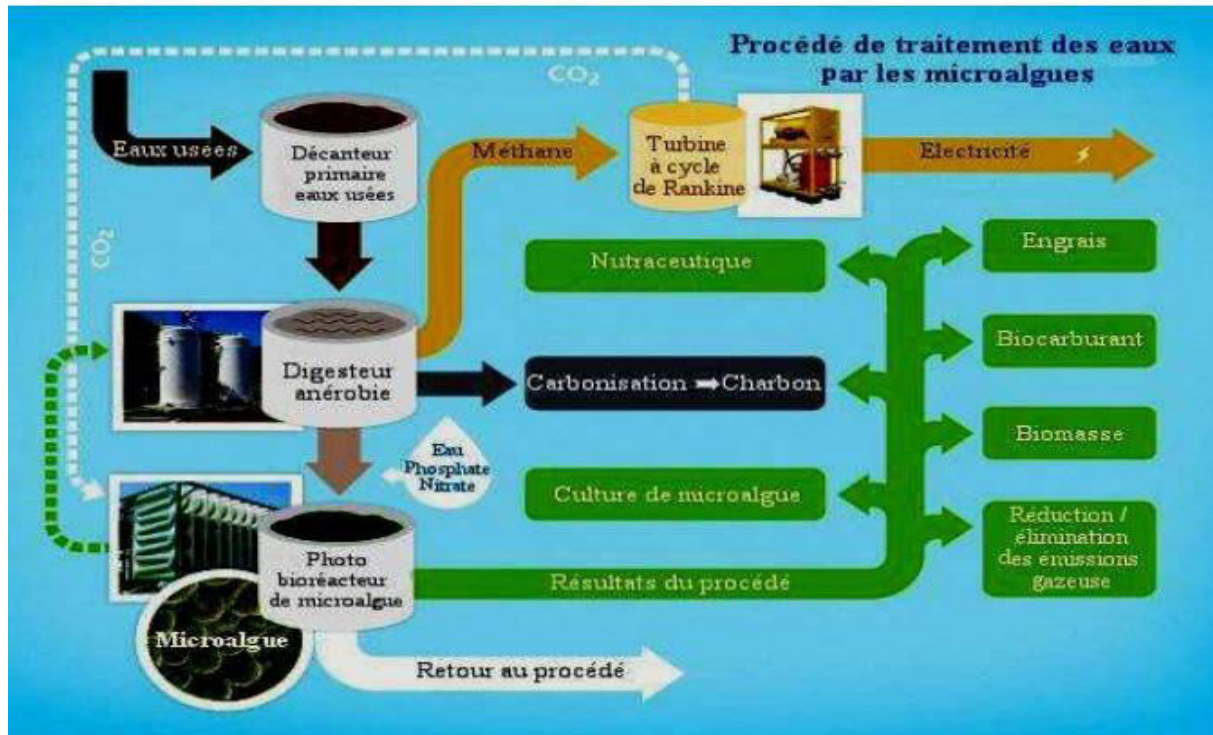


Figure 12 : Procédé de traitement des eaux par les microalgues (Filali, 2012).

Au vu de leur capacité d'assimilation de nombreux nutriments nécessaires à leur croissance, les microalgues représentent une solution intéressante pour éliminer ces éléments ; elles sont également capables de fixer des métaux lourds. Elles sont ainsi les principaux éléments biologiques de certains systèmes de traitement des eaux municipales et industrielles. Grâce à l'absorption de l'azote et du phosphore, elles contribuent à réduire le phénomène d'eutrophisation de certains milieux aquatiques (Filali, 2012).

Pour éviter la pollution de la nappe phréatique, il est possible de cultiver des algues à partir de ces déchets organiques, et de les épandre ensuite par l'eau d'irrigation. Les matières organiques contenues dans les algues établiront alors des liaisons avec les argiles du sol en formant un complexe argilo-humique qui ne libérera ses matières minérales que très progressivement, préservant ainsi la nappe phréatique (Dabbadie, 1992). Les centrales thermiques, les cimenteries, les raffineries sont très productrices de CO₂. Les microalgues produisent de l'énergie tout en consommant du carbone créant ainsi des bénéfices environnementaux, mais également des retombées économiques pour les entreprises polluantes (**fig. 13**) (Person, 2010).

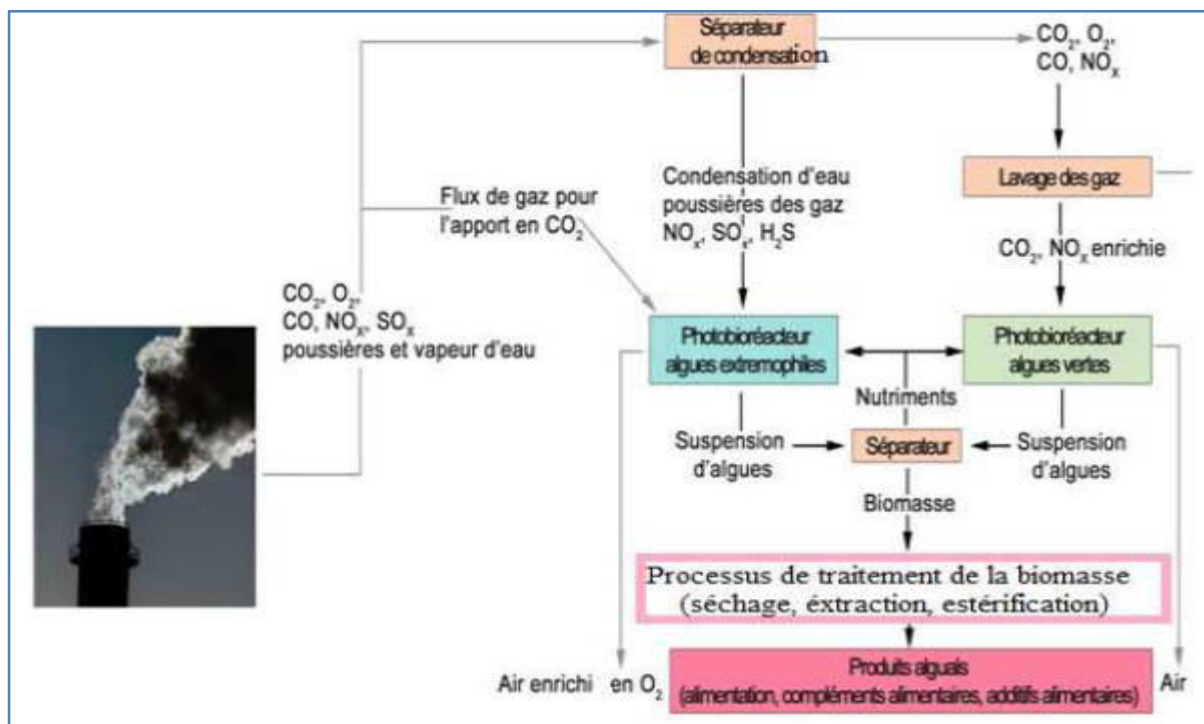


Figure13 : Représentation schématique du procédé de fixation de CO₂ par les microalgues à partir de gaz d'échappement industriel (Filali, 2012).

La biomasse algale est connue pour améliorer la composition minérale des sols et leur capacité de liaison avec l'eau. Ce sont les cyanobactéries qui, grâce à leur capacité de fixer l'azote gazeux, contribuent à maintenir la fertilité des écosystèmes naturels ou de cultures. Leur présence dans les champs de riz améliore la qualité des récoltes. Malgré tout, c'est une technique qui n'a pas été adoptée largement par les agriculteurs mais qui mérite d'être reconsidérée et améliorée. Par exemple, au Japon, *Chlorellavulgaris*, 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 (Becerracelis, 2009).

3.6.5. Domaine énergétique

La valorisation de la biomasse algale peut se traduire par la production d'énergie sous forme d'électricité et/ou de chaleur par combustion directe, ou sous forme de bio éthane ou de biocarburant. Cependant, cette valorisation ne sera concurrentielle qu'avec une forte productivité de biomasse, une possibilité de récolte mécanique simple et un coût de production plus réduit que les procédés mettant en œuvre d'autres types de biomasse (Carlsson, 2007).

a. Production de biométhane

Plusieurs recherches ont permis de vérifier la faisabilité technique et commerciale de la production de biométhane à partir de la biomasse marine, avec un potentiel intéressant (Chynowth, 2002). Cependant, des verrous techniques tels que l'accessibilité des nutriments et les coûts de production élevés limitent l'exploitation des microalgues pour cette application. Un moyen permettant de réduire les coûts est par exemple de coupler la production de biométhane avec la production de métabolites secondaires à haute valeur ajoutée. Des espèces telles que *Gracilariasp.* et *Macrocystis* représentent des organismes producteurs de biométhane.

b. Production de biocarburant

Considérant le contexte mondial actuel (hausse du prix du pétrole, raréfaction des ressources fossiles, production de gaz à effet de serre, etc.), il est intéressant de considérer les microalgues comme source de production de différents types de biocarburant : le bio-oil (Miao et al., 2004), et le biodiesel (Benzidane, 2017).

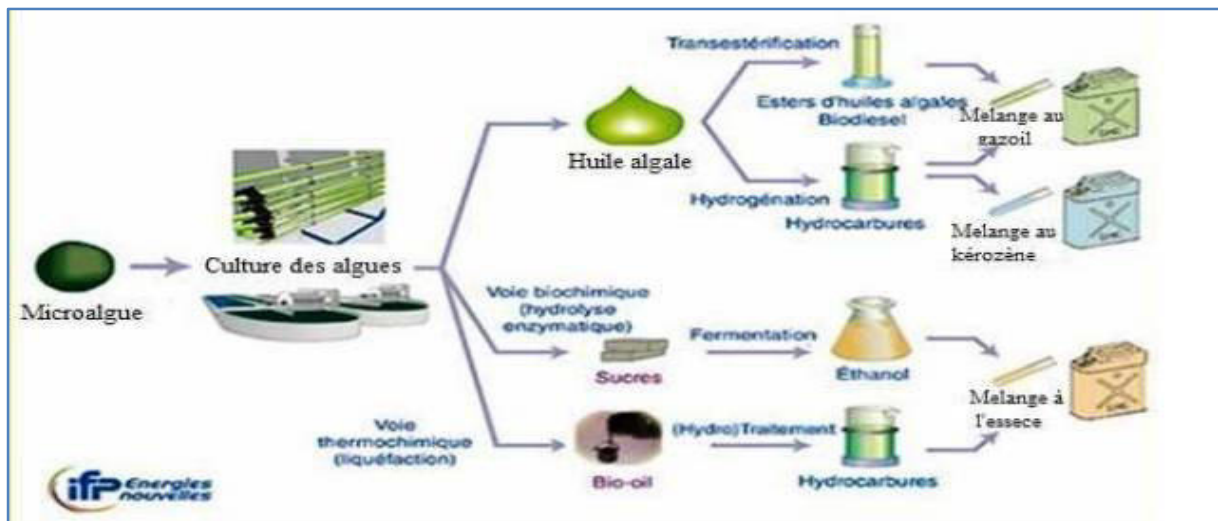


Figure 14: Procédés de production de biocarburant via microalgues (Filali, 2012).

c. Production de biohydrogène

Le procédé de synthèse de biohydrogène peut revêtir deux formes : la photolyse directe et la photolyse indirecte. La photolyse directe repose sur un transfert des électrons issus de l'eau aux protons, couplés à une réduction de la ferrédoxine (protéine intervenant au niveau du photosystème des algues dans le transport d'électrons et de protons) (Tebhani, 2014). Induisant la synthèse d'hydrogène par l'enzyme Hydrogénase (Benemann, 1987). La méthode indirecte repose sur la conversion de l'amidon stocké par les algues sous forme d'hydrogène sous des conditions d'anaérobiose et de limitation de soufre (Carlsson, 2007).

Conclusion

Les microalgues sont actuellement envisagées comme des organismes capables de produire de l'énergie ainsi que des substances à très haute valeur pour l'industrie. D'autre part, les microalgues sont considérées comme un moyen de réduction des émissions des gaz à effet de serre. Toutefois, il est difficile aujourd'hui d'attribuer une part de marché à chaque secteur d'application potentiel des microalgues, en particulier parce que tous ces secteurs en devenir sont dans l'attente d'une production de biomasse stable, de qualité et à moindre coût.

Notre travail de revue bibliographique a montré que les algues revêtent une grande importance à l'avenir et pourraient être la seule alternative énergétique et plus largement utilisées dans l'épuration des eaux usées. Dans ce contexte, nous cherchons à préparer une étude bibliographique scientifique, récente et approfondie sur les microalgues, leurs domaines d'utilisation et leur importance dans le domaine de l'épuration des eaux usées. Ces travaux ouvrent de nombreuses pistes de recherche pour étudier le potentiel des souches isolés dans d'autres applications agroalimentaires, cosmétique ainsi que dans les projets de bioremédiation.

Références Bibliographiques

Agler, M.T.; Aydinkaya, Z.; Cummings, T.A.; Beers, A.R.; Angenent, L.T. Anaerobic digestion of brewery primary sludge to enhance bioenergy generation: A comparison between low- and high-rate solids treatment and different temperatures. *Bioresour. Technol.* **2010**, *101*, 5842–5851.

AGREN G. I., 2004. The C:N:P stoichiometry of autotrophs — theory and observations. *Ecology Letters*, *7*, pp: 185-191.

Alcaina-Miranda, M.I. Comparison between nanofiltration and ozonation of biologically treated textile wastewater for its reuse in the industry. *Desalination* **2003**, *157*, 81–86.

AlcaineA..A., 2010. Biodiesel from microalgae. Final degree project. Royal School of Technology Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sweden.

Andersen D. M., 1994. Eaux colorées et phytoplancton toxique. *Pour Science*, *204*, 68 – 76.

Angelidaki, I.; Sanders, W. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* **2004**, *3*, 117–129.

Becerra -Celis, G. P., 2009. Proposition de stratégies de commande pour la culture de microalgues dans un photobioréacteur continu. Thèse de Doctorat, Ecole supérieure d'électricité, Gif-sur-Yvette (France).

Becker E.W. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, Volume 25, Issue 2, March-April 2007, Pages 207-210.

Benemann J.R . Tillett D ., Weissman J.C., *Microalgae Biotechnology* [Section du livre]. - 1987

Benzidane D. Baba Hamed M.B. and Abi-Ayad S.-M.E.-A. Biodiesel production from marine microalgae *Nannochloropsis gaditana* by in situ transesterification process. *African Journal of Biotechnology* [Livre]. – 2017.

Bernard Cadoret J.-P and La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis. *Journal de la société biologique*, 202(3) :201-211. [Livre]. – 2008

Bes-Piá, A.; Mendoza-Roca, J.A.; Roig-Alcover, L.; Iborra-Clar, A.; Iborra-Clar, M.I.;

Bhardwaj, D.; Ansari, M.W.; Sahoo, R.K.; Tuteja, N. Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microb. Cell Fact* **2014**, *13*.

Bhola, V., Desikan, R., Santosh, S. K., Subburamu, K., Sanniyasi, E., Bux, F., 2001. Effects of parameters affecting biomass yield and thermal behaviour of *Chlorella vulgaris*. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 111 (3), pp. 377–382.

Bonté, F. “Skin moisturization mechanisms: new data” .*Annales Pharmaceutiques Françaises*, vol. 69, pp.135-41, 2011.

Borowitzka,, L.J. (Eds.), *Micro Algal Biotechnology*. Cambridge University Press, pp. 153-196

Borowitzka,, M.A. 1998. Vitamins and fine chemicals form micro-algae. In: BOROWITZKA, M.A.,

Braeken, L.; Van Der Bruggen, B.; Vandecasteele, C. Regeneration of brewery waste water usinnanofiltration. *Water Res.* **2004**, 38, 3075–3082.

Buitenhuts E.T., 2003. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *PNAS* ; 104 (47) : 18866-18870 ; 20 novembre 2007

Cadoroet J. et Bernaand O., 2008. La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis. *Journal de la société de biologie*, vol 202 (3) : 201 – 211.

Carlsson A. S. Van Beilen J. B., MOLLER R., CLAYTON D., Micro- and macro algae: utility for industrial application [Section du livre]. - 2007.

Chen M., Tanga H., Holland T. C. et Salley S. O., 2011. Effect of nutrients on growth and lipid accumulation in the green algae *Dunaliellatertiolecta*. *Bioresource Technology*, Volume 102, Issue 2, pp. 1649-1955.

Chinnasamy, S.; Bhatnagar, A.; Hunt, R.W.; Das, K.C. Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel application. *Bioresours..Technol.* **2010**, 101, 3097–3105.

Chisti Biodiesel from microalgue. *Biotechnology advances* [Livre]. - 2007. - Vol. Vol.25 : No.3 : pp. pp.294-306.

Chisti, Y. Biodiesel from microalgae *Biotechnology Advances*, 2007, 25, 294-306.

Chynowth. Review of biomethane from marine biomass, [Livre]. – 2002.

Coste, S. (2008). III. Les algues, In CIRAD

Couteau, C. and Coiffard, L.J.M. “Seaweed application in cosmetics”. *Seaweed in Health and Disease Prevention*, pp.423-441, 2016.

Dabbadie L., 1992. Cultures intensives de microalgues sur lisier de porc : performances, contraintes, utilisation des biomasses. Mémoire d’Ingénieur Agronome de l’école nationale supérieure agronomique de Montpellier, France, 125p.

Deublein, D.; Steinhauser, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*, 2nd ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2010

Fan, F.; Zhou, H. Interrelated effects of aeration and mixed liquor fractions on membrane fouling for submerged membrane bioreactor processes in wastewater treatment. *Environ. Sci. Technol.* **2007**, *41*, 2523–2528.

Filali, 2012. Estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique du CO₂. Ecole supérieur d'Électricité / Supelec, Paris, 224 p.

Ghobrinid 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.

Glass, R. I., Parashar, U. D., & Estes, M. K. (2009). Norovirus gastroenteritis. *New England Journal of Medicine*, *361*(18), 1776-1785.

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.

Hasnain S, Ahmed I, Rizwan M, Rashid N, Mahmood Q, Ali F, et al. Potential of microalgal biodiesel production and its sustainability perspectives in Pakistan. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;8176–92.

Jalilian, N., Najafpour, G-D, Khajouei, M., 2020. Macro and Micro Algae in pollution control and biofuel production- a review. *Chem.Bio.Eng.Rev*: 7 No.1, 18-33.

Jayanti, S.; Narayanan, S. Computational Study of Particle-Eddy Interaction in Sedimentation Tanks. *J. Environ. Eng.* **2003**, *130*.

Jenck J., Lepine O., Legrand J., Dreno P., Grizeau D. et Dupre C 2011. ‘Valorisation Industrielle des Micro Algues Photosynthétiques’, Ed., Technique de l’ingénieur, 13 p. *Journal*, vol. 7, pp. 311–315, 2016.

Kadajji, V.G. and Betageri, G.V. “Water soluble polymers for pharmaceutical applications”. *Polymers*, vol. 3, pp.1972-2009, 2011.

Keen, M.A. and Hassan, I. “Vitamin E in dermatology.” *Indian Dermatology Online*.

Kelman, D., Posner, E.K., McDermid, K. J., Tabandera, N.K., Wright, P.R., and Wright, A.D. “Antioxidant activity of hawaiian marine algae

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

Lindblad, P. (2005). Bio Hydrogen Nordic Energy Research Program, In Uppsala University, Suède. Site de HFP Europe, # 28-02, 20 p.,

Mahdy, A.A.; Mendez, L.; Ballesteros, M.; González-Fernández, C. Algaculture Integration in Conventional Wastewater Treatment Plants: Anaerobic Digestion Comparison of Primary and Secondary Sludge with Microalgae Biomass. *Bioresour. Technol.* **2014**, *184*, 236–244.

Mazliak P., 1998. Physiologie végétale. Croissance et développement. Editions Hermann, Tome 2, Paris, 575 p.

Mccarty, P.L. The developmental of anaerobic treatment and its future. *Water Sci. Tech.* **2001**, *44*, 149.

Mediboyina, M.K., et al. 2019. Comparative life cycle assessment of autotrophic cultivation of *Scenedesmusdimorphisin* raceway pondcoupled to biodiesel and biogas production, Bioprocess Biosyst, Eng.

Metcalf, E.; Eddy, H. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 2003.

Mohdudaiyappan, A.F.; Abu Hasan, H.; Takriff, M.S.; Sheikh Abdullah, S.R. A review of the potentials, challenges and current status of microalgae biomass applications in industrial wastewater treatment. *J. Water Process Eng.* **2017**, *20*, 8–21.

Nigam, P.S.; Singh, A. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2011**, *37*, 52–68.

Okolo, B.I.; Nnaji, P.C.; Onukwuli, O.D. Nephelometric approach to study coagulation-flocculation of brewery effluent medium using *Detariummicrocarpum* seed powder by

Olajire, A.A. The brewing industry and environmental challenges. *J. Clean. Prod.* **2012**, in press.

Person J., 2010. Livre turquoise – Algues, filières du futur. Édition Adebitech, Romainville, 163 p.

Perumal, P., Prasath, B. B., Santhanam, P., Ananth, S., Devi, A. S., & Kumar, S. D. (2012). Isolation and culture of microalgae. *Manual on Advances in Aquaculture Technology* (ed P. Santhanam), 166-181.

Peytavi, U.B., Kottner, J., Sterry, W., Hodin, M. W., Griffiths, T.W., Watson, R.E., Hay, R.J. and Griffiths, C.E. “Associated skin conditions and diseases: current perspectives and future options”. *The Gerontologist*, vol. 56, pp. 230–242, 2016. response surface methodology. *J. Environ. Chem. Eng.* **2016**, *4*, 992–1001. Retrieved from http://www.oilgae.com/non_fuel_products/betacarotene.html.

Phang, S.; Miah, M.; Yeoh, B. Spirulina cultivation in digested sago starch factory wastewater. *J. Appl. Phycol.* **2000**, *12*, 395–400.

Polprasert, C. *Organic Waste Recycling*; IWA Publishing: London, UK, 2015.

Qin, L.; Wang, Z.; Sun, Y.; Shu, Q.; Feng, P.; Zhu, L.; Xu, J.; Yuan, Z. Microalgae consortia cultivation in dairy wastewater to improve the potential of nutrient removal and biodiesel feedstock production. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2016**, *23*, 8379–8387.

Ramsundar, P.; Guldhe, A.; Singh, P.; Bux, F. Assessment of municipal wastewaters at various stages of treatment process as potential growth media for *Chlorella sorokiniana* under different modes of cultivation. *Bioresour. Technol.* **2017**, *227*, 82–92.

Raposo, F.; De La Rubia, M.A.; Fernández-Cegrí, V.; Borja, R. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2012**, *16*, 261–277.

Razzak, S.A.; Hossain, M.M.; Lucky, R.A.; Bassi, A.S.; de Lasa, H. Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2013**, *27*, 622–653.

Richmond, A. 2004. Principles for attaining maximal microalgal productivity in Photobioreactors: an overview. *Hydrobiologia* 512: 33 – 37.

Rochatx J. D., 2011. Assembly, function, and dynamics of the photosynthetic machinery in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant physiology* 127 (4): 1394-1398.

Rogers, J.N.; Rosenberg, J.N.; Guzman, B.J.; Oh, V.H.; Mimbela, L.E.; Ghassemi, A.; Betenbaugh, M.J.; Oyler, G.A.; Donohue, M.D. A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. *Algal. Res.* **2014**, *4*, 76–88.

Schagen, S.K., Zampeli, V.A., Makrantonaki, E. and Zouboulis, C.C. “Discovering the link between nutrition and skin aging”. *Dermato- Endocrinology.*, vol. 4, pp. 298–307, 2012.

Sharma N. K. et RAI A. K., 2011. Biodiversity and biogeography of microalgae: progress and pitfalls. *Environmental Reviews*, 19 (1) : 1 – 15.

Shimoda, H., Tanaka, J., Shan, S.J. and Maoka, T. “Anti-pigmentary activity of fucoxanthin and its influence on skin mRNA expression of melanogenic molecules”. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, vol. 62, pp. 1137-45, 2010.

Sialve, B., & Steyer J-P., 2013. Les microalgues, promesses et défis. *Innovations Agronomiques*, 26 : 25-39.

Simate, G.S.; Cluett, J.; Iyuke, S.E.; Musapatika, E.T.; Ndlovu, S.; Walubita, L.F.; Alvarez, A.E. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. *Desalination* **2011**, *273*, 235–247.

Subaadra B. et Edwards M, 2010. An integrated renewable energy park approach for algal biofuel production in United States. *Energy Policy* 38, 4897.

Tabani. Recherche des souches accumulatrices des lipides et optimisation des conditions de culture en photobioréacteurs, these de doctorat, L'Université Nantes, France [Revue]. - 2015.

Thomas, N.V. and Kim, S.K. “Effects of marine algal compounds in cosmeceuticals”. *Marine Drugs*, vol. 11, pp. 146–164, 2013.

Wang, B., li, Y., wu, N., Lan, C.Q., 2008. CO2 bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79, pp. 707–718.

Wang, H.M., Chen, C.C., Huynh, P. and Chang, J. “Exploring the potential of using algae in cosmetics”. *Bioresource Technology*, vol. 184, pp. 355-366, 2014.

Wang, H.M., Chen, C.Y. and Wen, Z.H. “Identifying melanogenesis inhibitors from *Cinnamomum subavenium* with *in vitro* and *in vivo* screening systems by targeting the human”. *Experimental Dermatology*, vol. 20, pp. 242-248, 2011.

Wu, X., Jiang, J., Wan, Y., Giesy, J. P. and Hu, J. “Cyanobacteria blooms produce teratogenic retinoic acids”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 109, pp. 9477–9482, 2012.

Yan, C.; Zhang, L.; Luo, X.; Zheng, Z. Effects of various LED light wavelengths and intensities on the performance of purifying synthetic domestic sewage by microalgae at different influent C/N ratios. *Ecol. Eng.* **2013**, *51*, 24–32. “**Beta-Carotene**”. [Date accessed June 28, 2017].

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

Résumé

Les microalgues, en plus de jouer quelques rôles fondamentaux en lien avec la biosphère (oxygène atmosphérique, base des chaînes trophiques marines et d'eau douce, cycles biogéochimiques) ont la capacité de synthétiser, sous certaines conditions, des molécules d'intérêt (caroténoïdes, biocarburants). Étant rapidement renouvelable, la biomasse algale pourrait fournir de nombreux bioproduits pour des applications de nutrition, de nutraceutique, de cosmétique et dans le domaine énergétique.

Néanmoins, il reste encore des verrous à lever, via des recherches en amont, avant que les rendements et les coûts espérés soient effectivement atteints et que ces technologies ne puissent voir le jour à grande échelle. Dans le présent travail de synthèse bibliographique, nous présentons les définitions, les classifications et les caractéristiques les plus importantes des microalgues, leur distribution, leur habitat et leur composition chimique. Quant à la deuxième partie, nous avons traité les paramètres du développement des microalgues et on termine par une troisième partie dans laquelle est présentée des connaissances sur l'approche traitement des eaux usées par l'application des microalgues.

Mots clés : biocarburants, bioproduits, bioréacteurs, Microalgues.

Abstract:

Microalgae, in addition to playing some fundamental roles related to the biosphere (atmospheric oxygen, base of marine and freshwater food chains, biogeochemical cycles) have the ability to synthesize, under certain conditions, molecules of interest (carotenoids and biofuels). Being rapidly renewable, algal biomass could provide many bio-products for nutrition, nutraceutical, cosmetic and energy applications.

However, there are still obstacles to overcome, via upstream research, before the expected returns and costs are actually achieved and these technologies can be developed on a large scale. In this literature review, we present the most important definitions, classifications and characteristics of microalgae, their distribution, habitat and chemical composition. As for the second part, we have treated the parameters of the development of microalgae and we end with a third part in which is presented the approaches of wastewater treatment by the application of microalgae.

Keywords: biofuels, bioproduits, bioreactors, microalgae.

المخلص:

إن الطحالب الدقيقة ، فضلاً عن لعب بعض الأدوار الأساسية المتصلة بالمحيط الحيوي (أكسجين الغلاف الجوي ، وقاعدة السلاسل الغذائية البحرية وسلاسل المياه العذبة ، والدورات الكيميائية الحيوية) ، لديها القدرة على تجميع الجزيئات ذات الأهمية (الكاروتينويدات ، الوقود الحيوي) في ظل ظروف معينة. ونظراً لأن الكتلة الأحيائية الطحلبية سريعة التجديد ، فإنها يمكن أن توفر العديد من المنتجات الأحيائية للتغذية والتطبيقات الصيدلانية والتجميلية وتطبيقات الطاقة.

ومع ذلك ، لا تزال هناك عقبات يتعين التغلب عليها ، عن طريق البحوث الأولية ، قبل تحقيق العائدات والتكاليف المتوقعة ، ويمكن تطوير هذه التكنولوجيات على نطاق واسع. وفي هذا البحث البيولوجي ، نستعرض أهم تعاريف وتصنيفات وخصائص الطحالب الدقيقة وتوزيعها ومولها وتركيبها الكيميائي. أما بالنسبة للجزء الثاني ، فقد عالجتنا بارامترات تطوير الطحالب المجهرية ونختتم بجزء ثالث يقدم فيه عن نهج معالجة مياه الفضلات باستخدام الطحالب المجهرية.

الكلمات المفتاحية: الوقود الحيوي ، المنتجات الحيوية ، المفاعلات الحيوية ، الطحالب الدقيقة.