

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :  
N° de série :

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

**Mémoire de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de**  
**Master**

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

**Filière :** Ecologie et environnement

**Spécialité :** Ecologie

Thème

**Culture des microalgues sur les effluents  
laitiers production de composé biologique actif**

**Par :**

**ABDELALI Imane**

**DAHANE Rokaia**

**Jury :**

**M. Kebbab L.**

Maître Assistant A

Univ. Ghardaïa **Encadreur**

**M. Mebarek-Oudina I.**

Maître Assistant A

Univ. Ghardaïa **Président**

**M<sup>r</sup> Aouadi A.**

Maître Conférence B

Univ. Ghardaïa **Examineur**

**Année universitaire 2020/2021**

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :  
N° de série :

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

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

**Master**

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

**Filière :** Ecologie et environnement

**Spécialité :** Ecologie

Thème

**Culture des microalgues sur les effluents  
laitiers production de composé biologique actif**

**Par :**

**ABDELALI Imane**

**DAHANE Rokaia**

**Jury :**

**M. Kebbab L.**

Maître Assistant A

Univ. Ghardaïa **Encadreur**

**M. Mebarek-Oudina I.**

Maître Assistant A

Univ. Ghardaïa **Président**

**M<sup>r</sup> Aouadi A.**

Maître Conférence B

Univ. Ghardaïa **Examineur**

**Année universitaire 2020/2021**

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier plus particulièrement nos encadreurs de mémoire de fin d'étude Mr. GHOBRI D, et Mme KEBBAB L, pour leur haute compétence, leurs qualités humaines et leurs conseils judicieux qui ont été pour nous une source inestimable de réconfort et d'encouragement pour l'accomplissement de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Pour nous avoir fait l'honneur de juger notre travail : nous tenons à remercier les enseignantes **M.Mebarek-Oudina I.** et **M<sup>r</sup> Aouadi A.**

## DEDICACE

Avec l'aide de ALLAH tout puissant. J'ai pu achever ce travail que je dédie :

Aux deux être le plus chers au le monde, qui ont souffert nuit et jour pour nous couvrir de leur amour, mes parents.

Source de puissance, compassion et tendresse l'exemple de patience, la raison de mon existence et support de ma vie, ma mère <<BEN HADID KHADIJA >>

A celui dont je porte le nom, je souhaite que dieu lui donne une longue et qui le protégé mon père << DJALLOUL >>

A mon cher mari << ZERRARA MOHAMMEDE ELGHAZALI >>

Pour les personnes qui sont encore en vie dans mon cœur et dans la miséricorde de Dieu ma grand- père << MOUSSA >> et ma grand-mère << MASSOUDA >> .et je demande à Dieu de protéger et de prolonger sa vie de mon grand-père << Tayeb >> et ma grand-mère << KHAIRA >>

Et à la mère de mon mari << FATNA >> et au père de mon mari << MOHAMMEDE >>

Mes sœurs : Bouchra, Fatima Zohra, Laila Massouda

A très chers frères : Ismail et son marie, Noureddine, Larbi, Zighem, Mohammed Moussa  
A mes sœurs et frères mon mari

A mes tantes et oncles coussinet et cousines À mon cher ami << maroua >>

A toute ma famille : ABDELALI, BEN HADID, ZERRAR



A la mémoire des mes défunts grands parents, Anichel masouda et Maarouf khira (Paix à leurs âmes), qui auraient été fiers de moi. J'exprime toute ma gratitude à ma famille, en particulier à mon père et à ma mère, à qui je dois ma réussite. Je les remercie pour leur confiance, leur tendresse, leur amour qui me porte et me guide tous les jours. Je leur dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection. A ma sœur aya et à mes frère mouad et abed raouf, merci pour votre soutien et vos encouragements, sans lesquels je n'aurais pas eu sans doute la force de terminer ma thèse Et présente mes salutations amani benelkedi

**ROUKIA**



## Résumé

microalgues sont une source importante de produits biologiques (protéines, glycolipides, lipides, etc.). Parmi les algues cultivées actuellement dans divers pays, les espèces du genre *Chlorella* sont exploitées. Malgré l'importance de ces microorganismes, les chercheurs sont confrontés à plusieurs problèmes qui empêchent le développement des filières à base de microalgues, notamment les coûts élevés des processus de récolte et de culture.

Afin de trouver des solutions aux problèmes de prix de production des microalgues, nous avons déterminé le rôle de micro algue dans la bioremédiation et défini les effluents laitiers comme base de culture pour les micro algue et de réduit leur impact sur l'environnement.

Néanmoins, les technologies actuelles sont encore en cours de recherche et nécessite plus de connaissances scientifiques et des études à l'avenir pour améliorés les rendements de ces cultures à base d'effluents pour être compétitif comparé aux cultures sur un milieu commerciale.

**Mots clés :** Micro algues, *Chlorella vulgaris*, culture, effluent laitiers, produits biologiques.

## Abstract

Microalgae are an important source of biological products (proteins, glycolipids, lipids, etc.). Among the algae currently cultivated in various countries, species of the genus *Chlorella* are exploited. Despite the importance of these microorganisms, researchers are faced with several problems that prevent the development of microalgae-based pathways, including the high costs of the harvesting and cultivation processes.

In order to find solutions to the production price problems of microalgae, we determined the role of microalgae in bioremediation and defined milk effluents as a culture base for microalgae and to reduce their impact on the environment.

Nonetheless, current technologies are still being researched and require more scientific knowledge and studies in the future to improve the yields of these effluent-based crops to be competitive compared to crops on a commercial setting.

**Keywords :** Microalgae, *Chlorella vulgaris*, culture, dairy effluent, organic products.

## الملخص

تعد الطحالب الدقيقة مصدرًا مهمًا للمنتجات البيولوجية البروتينات ، الجليكوليبيدات ، الدهون .(من بين الطحالب المزروعة حاليًا في بلدان مختلفة ، يتم استغلال أنواع من جنس *Chlorella* على الرغم من أهمية هذه الكائنات الدقيقة إلا أن الباحثين يواجهون العديد من المشكلات التي تمنع تطور المسارات القائمة على الطحالب الدقيقة ، بما في ذلك التكاليف المرتفعة لعمليات الحصاد والزراعة.

من أجل إيجاد حلول لمشاكل أسعار إنتاج الطحالب الدقيقة ، حددنا دور الطحالب الدقيقة في المعالجة الحيوية وحددنا مخلفات الحليب السائلة كقاعدة استزراع للطحالب الدقيقة ولتقليل تأثيرها على البيئة. ومع ذلك ، لا تزال التقنيات الحالية قيد البحث وتتطلب المزيد من المعرفة والدراسات العلمية في المستقبل لتحسين غلة هذه المحاصيل القائمة على النفايات السائلة لتكون قادرة على المنافسة مقارنة بالمحاصيل التجارية.

**الكلمات المفتاحية :** الطحالب الدقيقة ، الكلوريللا ، المستنبت ، مخلفات الألبان السائلة ، المنتجات العضوية

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Taxonomie du genre Chlorelle.....9

Tableau 2: Caractéristiques des effluents bruts (en g/l) ..... 26

Tableau 3: Niveaux de pollution des eaux usées de laiterie .....26

Tableau 4: Prétraitements et traitements physico-chimiques retrouvés sur les sites de transformation..... 29

Tableau 5: Traitements aérobies utilisés sur les sites de transformation..... 30

Tableau 6: Traitements anaérobies utilisés sur les sites de transformation.....31

Tableau 7: Principaux traitements tertiaires appliqués sur les sites de transformation.....32

Tableau 8: Valeurs limites de certains paramètres des rejets industriels ( décret exécutif n°93-160 du juillet 1993 ) . .....35

Tableau 9: Répartition du fractionnement biochimique d'une cellule de microalgue d'après Sialve and Steyer (2013)..... 40

Tableau 10: Composition en protéines de différentes Sources d'aliments et des microalgues d'après..... 49

**LISTE DES FIGURES**

Figure 1: Vue microscopique de <i>Chlorella vulgaris</i> .....	7
Figure 2: Classification de genre Chlorella.....	8
Figure 3: Morphologie structurale de <i>Chlorella vulgaris</i> .....	9
Figure 4: Complément alimentaire de Chlorella plus.....	11
Figure 5: Diversité du champ d'application des microalgue.....	12
Figure 6: Utilisation de <i>Chlorella vulgaris</i> dans la nutrition.....	13
Figure 7: Chlorella source naturelle de vitamine B12.....	14
Figure 8: Algotherm produit cosmétiques à base de microalgue.....	15
Figure 9: Production de biocarburants à partir de microalgues.....	16
Figure 10: Fabrication de biodiésel à partir les microalgues.....	17
Figure 11: Photo bioréacteurs type tubulaires.....	19
Figure 12: Effluents industriels.....	23
Figure 13: Grande famille des lipides.....	41
Figure 14: Acides gras et les familles d'oméga.....	42
Figure 15: Structure d'un MGDG, DGDG et SQDG.....	43
Figure 16: Structure de phospholipide.....	44
Figure 17: Mécanismes de biosynthèse des lipides.....	45
Figure 18: Extraction par fluide supercritique.....	46
Figure 19: Technique d'extraction par solvant organique.....	47
Figure 20: Technique d'extraction par CO2 supercritique.....	48
Figure 21: Structure de la chlorophylle.....	50
Figure 22: Exemple de structure de caroténoïdes.....	51

## LISTE DES ABREVIATIONS

**CGF** : Facture de croissance Chlorelle

***C. vulgaris*** : *Chlorelle vulgaris*

**DBO** : demande biochimique en oxygène

**DCO** : demande chimique en oxygène

**DBO5** : Demande Biologique en Oxygène à 5 jours

**MES** : matières en suspension

**UASB** : Upflow an aérobic Soudage Blanket

**SALT**: Stands for Size Attitude Location Type

## TABLE DES MATIERES

Remerciement

Dédicace

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Table de matière

Introduction

### CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MICROALGUES

I.1 Généralités sur les microalgues.....	3
I.2...Mode de culture des microalgues.....	4
I.2.1....Culture hétérotrophe.....	4
I.2.1.1 Milieu de culture hétérotrophe.....	4
I.2.1.2 Avantages et les inconvénients de ce type de culture.....	4
I.2.2 Culture mixotrophe.....	4
I.2.2.1 Milieu de culture en mixotrophie.....	4
I.2.2.2 Avantages et les inconvénients de ce type de culture.....	5
I.2.3 Culture autotrophe.....	6
I.3 Présentation de <i>Chlorella vulgaris</i> .....	7
I.4 Domaines d'application des microalgues.....	12
I.4.1 Domaine alimentaire.....	12
I.4.2 Domaine pharmaceutique.....	14
I.4.3 Domaine cosmétique.....	15
I.4.4 Domaine énergétique.....	15

I.5	Verrous technologiques qui empêchent le développement des microalgues	17
I.5.1	Effet des bactéries.....	17
I.5.2	Porcidé de culture.....	17
I.5.2.1	Système de cultures des microalgues.....	18
I.5.2.1.1	Système ouvert.....	18
I.5.2.1.2	Système fermes.....	19
I.5.3	Porcidé de récolte.....	20

**CHAPITRE II : UTILISATION DES EFFLUENTS LAITIERS LIQUIDES COMME  
BASE DE MILIEU DE CULTURE**

II.1	Généralités sur les effluents liquides .....	23
II.1.1	Définition des effluents liquides .....	23
II.1.2	Différents types d'effluents.....	23
II.1.2.1	Effluents de fabrication.....	23
II.1.2.2	Effluents particuliers.....	24
II.1.2.3	Effluent des machines.....	24
II.1.2.4	Effluents des utilités.....	24
II.1.2.5	Effluents occasionnels.....	24
II.2	Effluents laitiers.....	25
II.2.1	Définition.....	25
II.2.2	Caractéristiques des effluents laitiers.....	25
II.2.3	Traitements appliqués aux effluents laitiers.....	27
II.2.3.1.	Prétraitements et traitements physico-chimiques.....	28
II.2.3.2.	Procédés biologiques aérobies.....	30
II.2.3.3.	Procédés biologiques anaérobies.....	30
II.2.3.4.	Traitements tertiaires.....	31
II.3	Source de pollution .....	33

II.3.1	Eaux de refroidissement et condensats.....	33
II.3.2	Eaux résiduelles de lavage.....	34
II.3.3	Eaux issues du produit.....	34
II.4	Norme de rejets.....	34
II.5	Contraints réglementaires.....	35
II.5.1	Face à la réglementation Laiteries.....	35
II.5.2	Législation des installations classées pour la protection de l'environnement....	36
II.6	Rôle des micro algue dans la bioremédiation.....	36
II.6.1	Différentes techniques de bioremédiation dans le traitement des eaux usées....	37
II.6.1.1	Bioremédiation intrinsèque ou bio-atténuation.....	37
II.6.1.2	Bio-stimulation.....	37
II.6.1.3	Bio-augmentation.....	37
II.6.1.4	Bio-injection.....	37
II.6.1.5	Bio-extraction.....	38
II.6.1.6	Phyto remédiation.....	38
II.7	Importance des micro algues dans le traitement des eaux usées.....	38
<b>CHAPITRE III : LES COMPOSES BIOLOGIQUES ACTIFS TIRES DESMICROALGUES</b>		
III.	Composants biologiques des micro algues.....	40
III.1	Lipide.....	40
A-	Lipides non polaires.....	41
B-	Lipides polaires.....	43
III.1.2	Mécanismes de biosynthèse des lipides.....	44
III.1.3	Extraction de lipides.....	45
III.1.3.1	Paramètres influençant l'extraction des lipides.....	45
III.1.3.2	Techniques d'extraction des lipides.....	45
III.1.3.2.1	Extraction avec des fluides supercritiques.....	46

III.1.3.2.2 Extraction par solvant organique.....	46
III.1.3.2.3 Extraction par CO <sub>2</sub> supercritique.....	47
III.2 Protéines.....	48
III.3 Glucides.....	49
III.4 Pigments.....	50
III.5 Caroténoïdes.....	51
Conclusion.....	53
Références	



INTRODUCTION

Les microalgues sont des microorganismes aquatiques unicellulaires eucaryotes de forme ellipsoïde ou ronde, elles se trouvent dans tous les habitats aquatiques, marins ou d'eaux douces. Elles sont souvent connues sous la dénomination de « phytoplancton » (Sumi, 2009).

Les microalgues sont des organismes photosynthétiques présentent de diverses caractéristiques biochimiques intéressantes pour un grand spectre d'applications dans différents domaines à savoir : l'alimentation humaine et animale, la production d'énergie (biocarburants) et la production de molécules à hautes valeurs ajoutées pour des fins industrielles, notamment les domaines pharmaceutiques et cosmétiques (Ghobrini et *al.*, 2014).

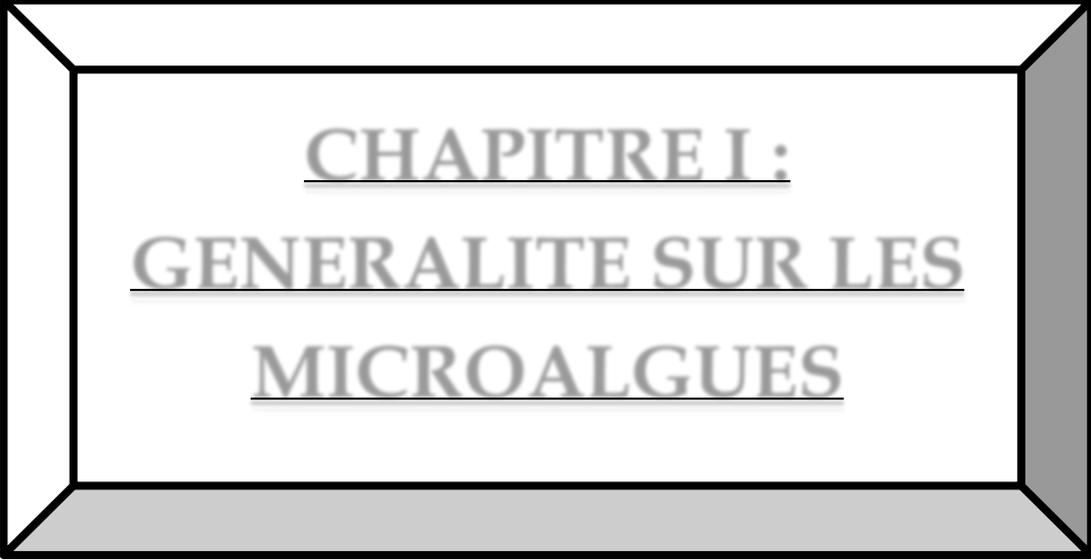
Parmi les algues cultivées actuellement dans divers pays, les espèces du genre *Chlorella* sont exploitées dans l'alimentation, la médecine, la cosmétologie, aquaculture, etc...) et sont largement étudiées en tant que biocarburant en raison de leur haute efficacité photosynthétique et de leur capacité à produire des lipides (Ghobrini et *al.*, 2019). Par ailleurs, leur très grande diversité spécifique, la plasticité de leur métabolisme permet d'orienter ces organismes vers la production du ou des métabolites souhaités, en fonction des conditions de culture adoptées (Tahri et *al.*, 2000). Mais malgré l'importance de ces microorganismes, les chercheurs sont confrontés à plusieurs problèmes qui empêchent le développement des filières à base de micro algues, notamment les coûts élevés des processus de récolte et de culture (Ghobrini communication personnelle).

Ce travail de thèse, sera décliné en trois chapitres et s'organise comme suit :

- **Le chapitre I** présentera une étude bibliographique des micro algues : les espèces, les domaines d'application de ces microorganismes et les différents modes de culture et de récolte puis on expose le modèle *Chlorella vulgaris* sa définition, sa présentation morphologique, leur position taxonomique et son importance.
- **Le chapitre II** traite de l'utilisation des effluents laitiers comme base de milieu de culture pour répondre à la problématique des coûts de production. Nous présentons les différents types d'effluents et leur traitement, jusqu'au rôle des micro algues dans la bio remédiation.
- **Le chapitre III** exposera les principaux composés biologiques tirés de micro algues, leur importance, notamment les lipides, leur technique d'extraction et leur

synthèse.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale qui reprend l'essentiel des remarques retenues sur l'importance des microalgues dans le traitement des effluents principalement laitiers mais aussi l'importance de ces effluents dans le développement de la filière algale (Ghobrini et *al.*, 2020).



CHAPITRE I :  
GENERALITE SUR LES  
MICROALGUES

## I.1 Généralités sur les microalgues

Les microalgues font partie des organismes apparus sur notre planète il y a plus de trois milliards d'années, car elles sont le principal maillon de la chaîne alimentaire des océans et des mers, et jouent un rôle dans la préservation de la biodiversité (Ghobrani et al., 2014) Cette diversité non indépendante représente de réelles possibilités pour la recherche et l'industrie, avec un nombre estimé d'espèces trouvées dans la nature, il y a 200 000 et plusieurs millions d'espèces de micro algues (Sumi, 2009).

Selon leur taille (micro et macro algues), par rapport à leurs pigments, leurs propriétés de paroi et leur composition, les microalgues peuvent être divisées en trois groupes selon leurs pigments : vert, rouge et brun, et elles sont utilisées dans les processus de conversion pour produire de l'énergie : combustion, pyrolyse et digestion Anaérobie (biogaz) (Ross *et al.*, 2008).

Les microalgues sont des organismes microscopiques appelés microphytes, les eucaryotes unicellulaires photosynthétiques sont généralement ovales ou ronds, ils sont invisibles à l'œil nu, et leur taille est de quelques micromètres, ce sont des organismes aquatiques trouvés dans les habitats marins ou d'eau douce connues sous le nom de [phytoplancton] (Sumi, 2009).

Les microalgues captent la lumière du soleil et produisent environ la moitié de l'oxygène de l'atmosphère terrestre à travers le phytoplancton. Ainsi, elle absorbe de grandes quantités de dioxyde de carbone, afin d'incorporer du carbone dans sa biomasse et elles accumulent les molécules organiques nécessaires à la vie.

Les microalgues sont utilisées dans de nombreux domaines et cela est dû aux composants qu'elles contiennent, car elles sont une source de protéines, de glucides, de graisses (acides gras), d'antioxydants et de vitamines en plus des colorants, et peuvent ainsi être utilisés pour augmenter la valeur nutritionnelle des aliments, dans les cosmétiques, et/ou même en médecine.

L'acquisition des graisses fait partie du processus de production de biocarburant de troisième génération (Spolaore et *al.*, 2006).

## **I.2 Mode de culture des microalgues**

### **I.2.1 Culture hétérotrophe**

#### **I.2.1.1 Milieu de culture hétérotrophe**

Les microalgues cultivées en hétérotrophie dans des fermenteurs sont alimentées en substrat carboné qu'elles doivent trouver dans leur milieu de culture. Cette source de carbone peut être de nature variée tel que le glucose, des glucides lignocellulosiques ou de la mélasse riche en sucre. Il est important de renouveler régulièrement le substrat carboné par des apports réguliers afin de maintenir le processus de fermentation à son meilleur niveau.

Les autres éléments, indispensables à la croissance des microalgues, tels que l'azote, le phosphore et les différents microéléments sont apportés par des sels présents dans le milieu de culture tel que le milieu de Conway.

#### **I.2.1.2 Avantages et les inconvénients de ce type de culture**

Selon Ghobrini et *al.* (2020), en culture hétérotrophe, il est plus facile de maintenir les conditions de production et de se prévenir des contaminations. De plus, il est possible d'utiliser pour la croissance des substrats tels que le glycérol ou des acides organiques (acétiques...).

En outre, des concentrations élevées en biomasse sont atteintes sur de courte période.

Par ailleurs, la disponibilité des matières premières telles que les sucres et la compétitivité des matières produites avec d'autres technologies de biocarburants issus de levures ou de bactéries ont fait un mode de culture de choix pour les souches adaptées.

### **I.2.2 Culture mixotrophe**

La mixotrophie permet aux microalgues de tirer leur énergie de la photosynthèse, mais aussi du carbone organique. Découvrez tous les avantages de ce mode de culture dans ce qui suit :

#### **I.2.2.1 Milieu de culture en mixotrophie**

Les microalgues sont cultivées à grande échelle dans des fermenteurs contenant un substrat carboné qui les nourrit afin qu'elles produisent de grandes quantités de biomasses. De la lumière de faible intensité et de courte durée est régulièrement introduite dans la

culture pour activer les organites capteurs de l'énergie lumineuse des algues comme les chloroplastes.

Ces photorécepteurs une fois activés permettent d'augmenter le rendement des microalgues et la production des molécules d'intérêts. De plus, en modifiant la longueur d'onde de la lumière ou en utilisant un mode lumineux sous forme de flash, il est possible d'orienter la production des algues en culture vers tel ou tel type de molécules (Ghobrini et *al.*, 2014).

### **I.2.2.2 Avantages et les inconvénients de ce type de culture**

La culture des microalgues en mixotrophie permet d'obtenir des rendements bien supérieurs aux autres modes de production et peut atteindre jusqu'à 250 g de matière sèche par litre. Il s'agit d'un taux de production qui peut être jusqu'à 10 fois supérieur aux cultures d'algues en photo bioréacteurs.

Quand on sait que les chlorelles sont riches en amidon et possèdent de nombreuses propriétés tonifiantes et détoxifiantes, leur culture en mixotrophie devient intéressante.

Les molécules d'intérêts qui peuvent être produites en mixotrophie sont nombreuses : des sucres et des polysaccharides, des acides aminés, des antioxydants, des pigments ainsi que des acides gras de grande valeur comme le DHA ou l'EPA.

Le processus de culture des microalgues en mixotrophie est hautement industrialisable et ne requiert pas de contraintes géographiques liées à la durée d'ensoleillement. Néanmoins, si la molécule d'intérêt est un pigment, la présence de soleil ou d'une lumière artificielle est alors indispensable.

L'impact environnemental d'une culture de microalgues en mixotrophie est relativement faible, car :

- La consommation d'énergie est faible : la lumière apportée pour la phase autotrophe est de faible intensité et sporadique ;
- La consommation d'eau est limitée puisque le système fonctionne en circuit fermé
- Le bilan carbone est positif, car le CO<sub>2</sub> produit durant la phase hétérotrophe est consommé pendant la phase lumineuse.

Néanmoins la mise en place d'une culture d'algues en mixotrophie représente des

dépenses d'investissement assez élevées. De plus, le risque de contamination de la culture par des microorganismes tels que des bactéries ou des champignons est important. Par ailleurs, les charges d'entretien et d'exploitation sont également importantes puisqu'il faut régulièrement apporter à la culture des sources de carbone externes et stériles. (Clara Bennouna 2020).

### **I.2.3. Culture autotrophe**

Dans une culture de microalgues en photo bioréacteurs type SALT (stands for Size Attitude Location Type (science)), le carbone, qui représente à lui seul plus ou moins 50 % de la matière sèche des microalgues, est issu totalement du CO<sub>2</sub> en bouteilles branchées au système. Celui-ci est acheminé à la culture en fonction des besoins de l'algue cultivée et de la régulation du pH. (Clara Bennouna.2021).

Un milieu de culture classique utilisé pour les cultures des microalgues dans un PBR doit contenir de l'azote qui est généralement apporté sous la forme d'ammoniaque, de nitrate ou d'urée. Le choix de l'une ou l'autre source est essentiellement fonction de l'espèce cultivée. (Clara Bennouna.2021).

Le phosphore constitue également un élément indispensable. Dans certains cas, et en fonction du milieu de culture, il est ajouté en excès, car il a la fâcheuse tendance à former des complexes avec certains ions métalliques. Dans ce cas, les algues ne parviennent plus à l'assimiler (Clara Bennouna.2021).

Un milieu de culture contient également des éléments à l'état de traces, mais absolument indispensables. Il s'agit très souvent d'ions métalliques comme le magnésium qui intervient dans la constitution de la chlorophylle, la molécule clé de la photosynthèse.

Un milieu de culture classique utilisé pour cultiver des microalgues en photo bioréacteurs est le milieu de Conway. Il contient essentiellement des sels pour l'apport de l'azote et du phosphore ainsi que des métaux à l'état de trace. Il peut contenir des vitamines B1 et B12. Le milieu de Conway n'est pas utilisé pur, mais généralement dilué dans de l'eau. Avant utilisation, il est stérilisé par passage dans un autoclave ou par filtration sur des filtres de 0,45 µm puis 0,22 µm. (Clara Bennouna2021).

Un autre milieu qui peut être utilisé pour la culture des microalgues est le milieu BBM (Bold Basal Medium) (Ghobrini Et *al.*, 2014). Il diffère du milieu de Conway, par le type de sels utilisé pour sa préparation. Certaines microalgues ont également un meilleur

taux de croissance dans un type de milieu plutôt que dans un autre (Ghobrini communication personnelle). La culture de certaines microalgues marines de type diatomée nécessite la présence de silice dans le milieu de culture. ( Clara Bennouna.2021)

Les milieux de culture peuvent être acheté tel quel, mais sa préparation est simple et relativement bon marché.

### **I.3 Présentation de *Chlorella vulgaris***

#### **● Définition**

*Chlorella vulgaris* est une micro algue eucaryote verte, présente sur terre depuis la période précambrienne. Elle a été découverte en 1890 par un biologiste hollandais Martinus Willem Beijerinck à partir de la première culture pure d'une micro algue avec un noyau bien défini, elle se trouve dans les environnements d'eaux douce, marins, terrestres (figure 1).

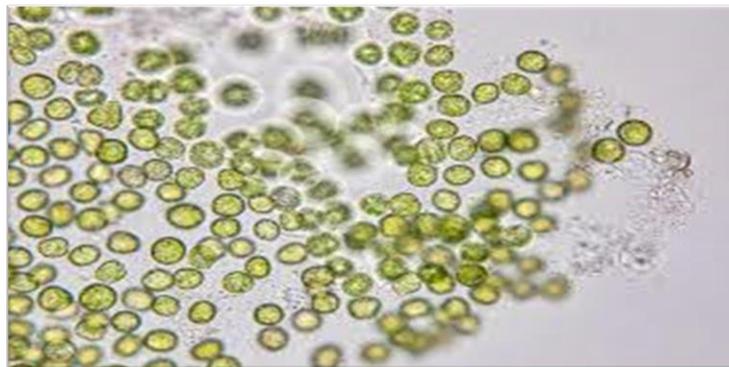


Figure 1: Vue microscopique de *Chlorella vulgaris* (Anonyme,2019)

*Chlorella vulgaris* possède une capacité photosynthétique élevée avec une capacité de croissance rapide dans des conditions autotrophes, mixotrophes et hétérotrophes (Tomaseli, 2004).

Les organismes de *Chlorella* existent sur terre depuis plus de 2.5 milliards d'années (Krientiset al., 2015 ; Safi et al., 2014). Au début des années 1990, les scientifiques allemands ont remarqué la teneur élevée en protéines de *C. vulgaris* et ont commencé à la considérer comme une nouvelle source de nourriture.

● **Position taxonomique de genre Chlorelle**

Depuis la première description de l’espèce type du genre Chlorelle par Beijerinck en 1890, plus de cent espèces de Chlorelle ont été décrites (Krienitz et al., 2004).

Traditionnellement, ces espèces étaient rattachées au genre Chlorelle selon des critères morphologiques (Pröschold et Leliaert, 2007). Dès les années 1970, il est admis que Chlorelle constitue en fait un groupe polyphylétique : il n’existe pas d’ancêtre commun exclusif à toutes les espèces. L’avènement des techniques d’analyse moléculaire entraîne aujourd’hui un véritable bouleversement de la classification précédemment établie de ces espèces.

Aujourd’hui, les systématiciens ont recours à des approches « intégrées » prenant en compte les différents éléments que sont les marqueurs moléculaires, la morphologie, l’ultrastructure et la physiologie (Anonyme, 2021)

Nouvellement, les études moléculaires ont eu pour conséquence des données dépendantes sur l’histoire évolutive du genre Chlorelle, ce qui a donné des résultats à des classifications mieux élaborées avec des groupes nécessairement plus petits (figure 2)

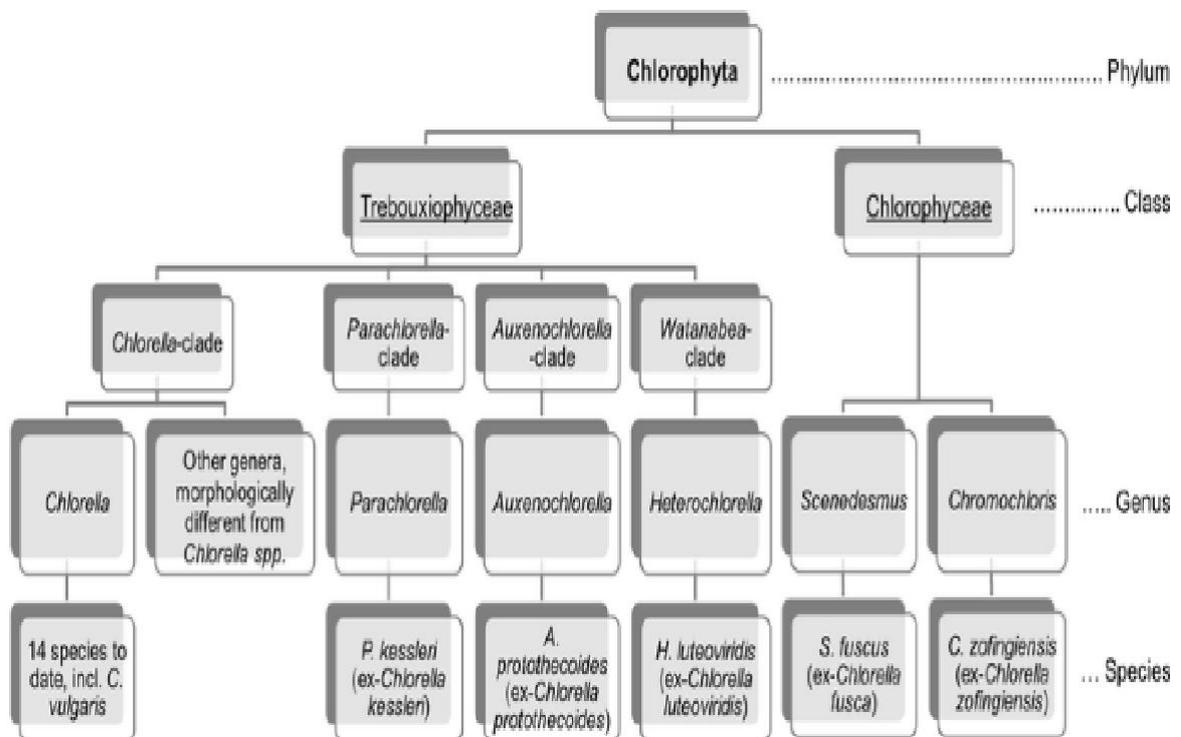


Figure 2: Classification de genre Chlorelle

Un recensement récent dénombre environ 4 espèces du genre *Chlorelle* sensu stricto (Krinitz et al., 2004). Lesquelles sont : *C. vulgaris*, *C. logophore*, *C. Sorokin Iana*, *C. Kessler*.

Les espèces du genre *Chlorelle* sont unicellulaires eucaryotes de la famille des *Chlorellaceae* et de l'ordre des *Chlorococcales* (tableau 1) (Hoel et al., 1995).

Tableau 1: Taxonomie du genre *Chlorelle*

Domaine	Eucaryote
Règne	Plantae
Embranchement	Chlorophyta
Classe	Trebouxiophyceae
Ordre	Chlorellales
Famille	Chlorellaceae
Genre	<i>Chlorella</i>

● **Présentation morphologique de *Chlorelle vulgaris***

*Chlorelle vulgaris* a un diamètre de 2 à 10 µm, est de forme sphérique, sous-sphérique ou ellipsoïde sans flagelle (Champenois et Al, 2015 ; Garcia, 2012). Elle possède un noyau bien spécifique et un chloroplaste pariétal, un pyrénôïde, des thylakoïdes, du matériel génétique et des grains d'amidon (Clement-larosiere, 2012 ; Rowley, 2010) (figure 3).

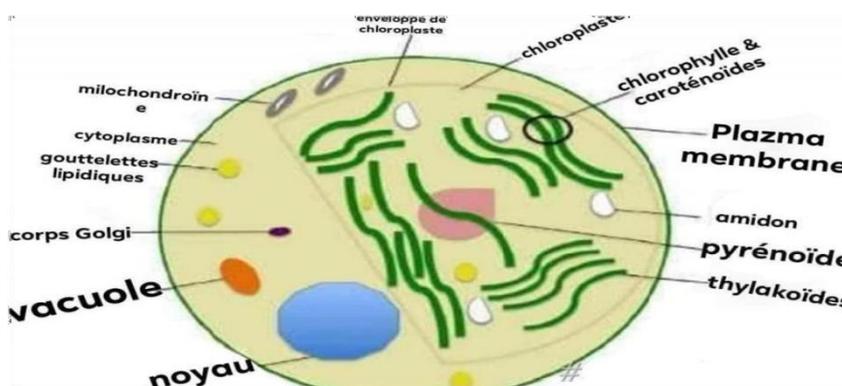


Figure 3: Morphologie structurale de *Chlorelle vulgaris* (Anonyme,2014).

L'amidon est la réserve majeure de glucides de la cellule. D'autres organites sont également présents dans la cellule : un noyau, des mitochondries, de petites vacuoles, gouttelettes lipidiques, des ribosomes (Van den hoek et *al.*, 1995).

La chlorelle est une algue extrêmement riche, les protéines constituent plus de 50% de la composition de la chlorelle, leurs lipides sont notamment des acides gras essentiels polyinsaturés de type oméga 3, et de pigments tels que la chlorophylle qui représente de 2 à 4% de son poids sec. Il contient également de nombreux sels minéraux et vitamines B (B1, B6, B12), la vitamine C et la vitamine E.

### ● Cycle de division de *Chlorelle vulgaris*

*Chlorelle vulgaris* se reproduit par la production d'autospores asexuées et se caractérise par sa grande capacité à se reproduire. Une cellule mère se divise en quatre cellules filles toutes les 24 heures, ces cellules filles se divisant à leur tour dans les 16 à 20 heures suivantes. *Chlorelle vulgaris* a un grand potentiel pour produire de la biomasse par unité de surface et de temps de n'importe quelle plante (Ghobrini et *al.*, 2020).

Cela signifie que la *C. vulgaris* possède l'un des plus grands potentiels pour la production de biomasse par unité de surface et de temps de toutes les plantes connues.

### ● Importance de *C. vulgaris*

Chlorelle est un nutriment important riche en protéines, vitamines, minéraux et de nombreux autres nutriments importants pour la santé humaine. Ainsi, la chlorelle a de nombreux avantages, notamment :

- Grâce à sa teneur en bêta-carotène (10 fois plus que dans les carottes), et la présence de vitamines C et E, la chlorelle représente un puissant antioxydant qui peut contribuer à freiner le vieillissement des cellules.
- Le CGF (Chlorelle Growth Factor), facteur de croissance de la chlorelle est un complexe formé de vitamines, de nucléotides (ADN, ARN) et d'acides aminés. Il peut aider à stimuler le système immunitaire. Il a également un effet probiotique et équilibrant sur la flore intestinale. Le CGF grâce à sa haute teneur en acides nucléiques peut favoriser la régénération et le rajeunissement des cellules du corps humain

- Une grande teneur en chlorophylle : très riche en chlorophylle, la chlorelle est même l'aliment qui en contient le plus. Capteur de lumière solaire, la chlorophylle apporte de l'oxygène à l'organisme, stimule la production de globules rouges, participe à l'absorption du fer, freine l'oxydation des cellules et stimule la réparation des tissus endommagés. Cet apport en oxygène apporte aussi un renouvellement des cellules et donc un rajeunissement du corps. La chlorophylle permet aussi de nettoyer le foie, les reins et le sang ainsi que d'assainir la flore intestinale. Elle possède également des propriétés anti-inflammatoires et un effet désodorisant qui atténue la mauvaise haleine et les odeurs corporelles (figure 4).



Figure 4: Complément alimentaire de *Chlorella* plus

- Notre régime alimentaire a souvent tendance à acidifier notre organisme ce qui le rend plus vulnérable. De par sa nature alcaline, la chlorelle peut contribuer à rétablir ce déséquilibre en régulant le taux de Ph de l'organisme.
- L'algue semble aussi avoir un effet bénéfique sur la tension artérielle. En effet, la consommation de chlorelle permet de réduire la pression artérielle, aussi les taux de cholestérol sanguins.

## I.4 Domaines d'application des microalgues

Par leur diversité, leur grande valeur, l'importance de leurs composants biologiques et biochimiques, et notamment la simplicité de leur production massive dans des milieux simples, ils constituent un ensemble prometteur de molécules d'importance pour de nombreux secteurs d'activité tels que la pharmacie, la nutrition, l'énergie, l'environnement et la cosmétique (fig. 5)

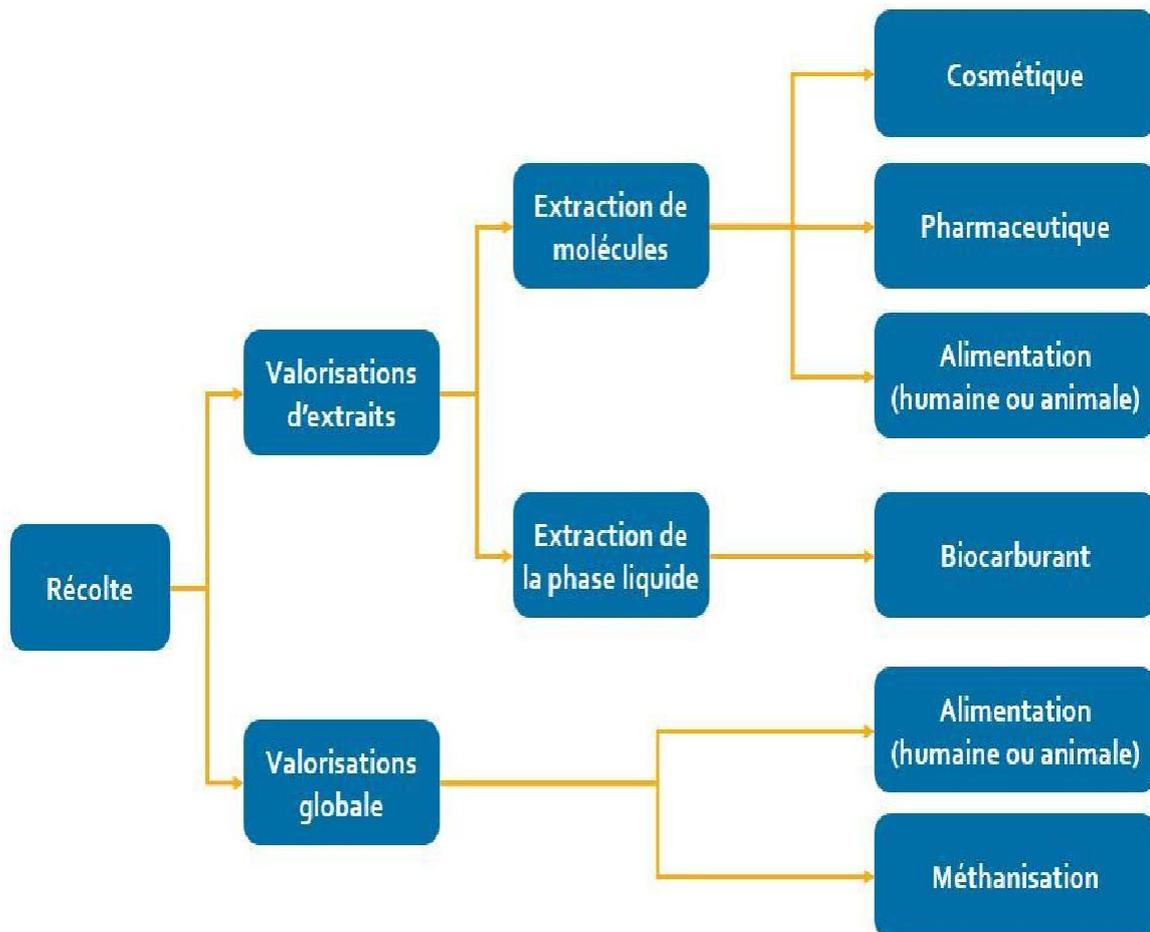


Figure 5: Diversité du champ d'application des micro algue

### I.4.1 Domaine alimentaire

La science moderne a eu tendance à rechercher de nouveaux aliments sains parce que les consommateurs sont devenus plus conscients du choix de leur nourriture et ont réalisé l'importance des aliments sains et de leurs avantages, tels que microalgues, car ils peuvent être source d'un grand nombre de produits alimentaires sains. De par leur bonne valeur nutritionnelle, ces microorganismes sont utilisés dans l'alimentation animale et humaine et enaquaculture (Pulz et *al.*, 2004).

Il existe de nombreux types de microalgues en usage alimentaire aujourd'hui, comme : Chlorelle et spiruline (figure 6). Ils sont composés d'environ 50 % de protéines et sont d'excellentes sources naturelles en nutriments essentiels tels que les acides gras polyinsaturés (oméga 3 et oméga 6) (Otlés, 2001 ; Tokusoglu, 2006), vitamines, sels minéraux et oligoéléments, elles contiennent également le fer dont l'absorption par notre organisme est au moins 5 fois plus efficace que celle en provenance de la viande.

Selon les souches, 3 g de Chlorelle en chorial ou 12 g de spiruline peuvent fournir jusqu'à 50% de l'apport journalier recommandé pour les adultes en fer. Par ailleurs, il a été montré que le fer de la Chlorelle est bien assimilable par l'organisme (Matsuura, 1991).



Figure 6: Utilisation de *Chlorelle vulgaris* dans la nutrition

De même, en Afrique, le botaniste Jean Léonard a observé en 1966 que le peuple Kanem bous n'était pas touché par la mal nutrition qui sévissait chez les populations du Tchad. Cette tribu, vivant au bord du lac Tchad cultivait de la spiruline pour en faire des pâtesd'algue séchée au soleil qu'elle consommait (Brandilly et *al.*, 1959 ; Leonard, 1966).

Par ailleurs, les microalgues se composent de nombreux pigments tels que la chlorophylle, les caroténoïdes qui sont souvent employés en tant que colorants naturels dans l'industrie alimentaire limitant ainsi l'utilisation des colorants artificiels (Gordon et Bouernfeind, 1982), de plus, elles produisent des polysaccharides, qui sont largement exploités en tant que agents gélifiants ou épaississants dans l'industrie agroalimentaire (De la noüe et *al.*, 1988).

#### **I.4.2 Domaine pharmaceutique**

La biodiversité des microalgues représente un véritable réservoir de molécules

originales d'intérêt médical. Elles représentent une source intéressante de molécules bioactives et de toxines utilisables dans le développement de nouveaux médicaments. Plusieurs études ont permis de mettre en évidence l'implication des microalgues dans le domaine pharmaceutique par l'identification de nouvelles molécules naturelles (Hoppe, 1979).

L'utilisation d'extraits algaux à forte teneur en antioxydants, trouve des applications dans l'industrie pharmaceutique pour des thérapies contre certains types d'inflammation (Pulz *et al.*, 2004). 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 sont essentiellement connus pour leurs très grandes facultés antioxydantes. Ils permettent de lutter contre les effets délétères des radicaux libres et de lutter contre le vieillissement prématuré des cellules. Un effet thérapeutique préventif vis-à-vis du cancer est aussi parfois attribué à ces molécules.

Par contre, les phycobilines 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).

Les microalgues produisent une large gamme de vitamines (figure 7). 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 tel que : *Dunaliella tertiolecta* et *Tetraselmis suecica* (CARBALLO-CARDENAS *et al.*, 2003). Toutefois l'utilisation des vitamines algales reste à l'état de la recherche.



Figure 7: Chlorelle source naturelle de vitamine B12

### I.4.3 Domaine cosmétique

Les microalgues sont riches en plusieurs éléments dont les plus importants sont les

protéines, les vitamines et les pigments ainsi que les lipides. Les extraits de ces composants sont nécessaires dans le domaine cosmétique, notamment l'extrait de leurs pigments (Del campo et *al.*, 2000).

Ils existent de nombreux types de microalgues qui sont largement exploités en cosmétique, principalement les deux espèces suivantes *Arthrospira* et *Chlorella* (Stolz et obermayer, 2005). Les espèces type *Chlorella vulgaris* sont connues pour leur richesse en protéines, Des protéines très proches du collagène de la peau, leurs extraits permettent de stimuler la production du collagène. Ce dernier à une propriété anti-âge (Spolaore et *al.*, 2000) (figure 8). De plus, des extraits protéiques de la souche *Arthrospira* ont provoqué la disparition et la réparation des premiers signes du vieillissement cutané. Par ailleurs, les pigments issus des microalgues sont également utilisés dans le domaine cosmétique (Filali, 2012).

A cet effet, de nombreuses recherches ont été menées pour encourager l'utilisation des algues, notamment à la vue des enjeux économiques considérables liés aux produits cosmétologiques d'appellation biologique (Pierre, 2010).



Figure 8: Algothèrm produit cosmétiques à base de micro algue

#### I.4.4 Domaine énergétique

La plupart des microalgues convertissent l'énergie solaire pour produire de l'oxygène et de la biomasse d'algues (matière organique) en utilisant du dioxyde de carbone et de l'eau grâce à une réaction appelée photosynthèse (Ghobrini et *al.*, 2018). Les microalgues ont un taux de photosynthèse très élevé. La majorité des microalgues sont des organismes autotrophes qui tirent leur énergie de la lumière par photosynthèse et leur principale source de nourriture est le dioxyde de carbone dissous dans l'eau tandis que certaines espèces peuvent être non autotrophes.

Ainsi, si nécessaire, ils sont capables d'extraire l'énergie et les nutriments directement de la matière organique présente dans le milieu aquatique (Chevalier et *al.*, 2002). Deux méthodes de production sont principalement développées pour la génération de biomasse

algale : le mode autotrophe et hétérotrophe (Chevalier et *al.*, 2002) (figure 9).



Figure 9: Production de biocarburants à partir de micro algues

L'intérêt pour les microalgues comme source de biocarburants vient suite au choc pétrolier de 1973. Depuis 1978, les recherches du NREL (National Renewable Energy Laboratory) se sont concentrées sur le biodiesel et ont été interrompues en 1996, la raison des prix bas des combustibles fossiles et la hausse des coûts associés à la production d'algues. (Chevalier et *al.*, 2002).

Cependant, les prix élevés du pétrole au cours de la première décennie du XXI<sup>e</sup> siècle ont favorisé le retour au travail aux États-Unis et le début des études en Europe. Les microalgues sont une alternative aux carburants traditionnels et aux dérivés biochimiques. (Chevalier et *al.*, 2002).

En effet, certains types de microalgues possèdent la capacité de produire des composés à potentiel énergétique comme les lipides (source de biodiesel) (figure 10) et/ou l'amidon (source de bioéthanol).

Les microalgues ont des propriétés intéressantes (haute productivité de la biomasse, forte activité lumineuse, grand potentiel de stockage des graisses), les rendant efficaces dans la synthèse du biodiesel, 500 à 1000 fois plus performantes que les espèces terrestres (Dore-deschenes, 2009 ; Ghobrini et *al.*, 2020), notamment *Chlorella sp.* (Ghobrini et *al.*, 2019). Les microalgues font partie de ce que l'on appelle les biocarburants de troisième génération.

Il diffère des agro-carburants produits à partir de cultures traditionnellement utilisées pour l'alimentation et des biocarburants de deuxième génération produits à partir de sources végétales non alimentaires telles que le bois et les déchets végétaux (Ghobrini et *al.*, 2012). De plus, les microalgues peuvent également être impliquées dans la production de

deux autres types de biocarburants : l'hydrogène et le biogaz.

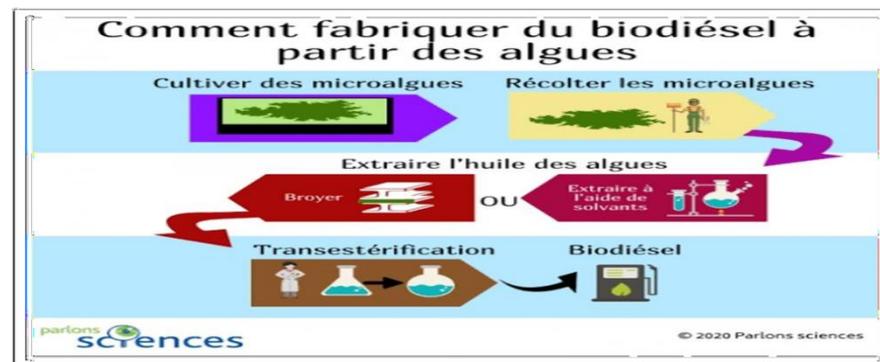


Figure 10: fabrication de biodiésel à partir les microalgues

## I.5 Verrous technologiques qui empêchent le développement des microalgues

L'un des principaux défis auxquels est confrontée l'industrie des microalgues est le coût élevé des opérations majeures telles que la culture, la récolte, l'approvisionnement en nutriments et l'extraction d'huile.

### I.5.1 Effets des bactéries

Le plus souvent, dans les écosystèmes naturels, l'effet des bactéries sur les microalgues est étudié.

De nombreuses études analysent particulièrement l'importance des interactions microalgues-bactéries sur les cycles de développement des booms d'algues toxiques, responsables de mortalités animales et d'intoxications humaines.

Les bactéries peuvent en effet stimuler ou prolonger la durée de blooms phytoplanktoniques (Dakhama et *al.*, 1993 ; Smith et *al.*, 1995 ; Rooney-Varga et *al.*, 2005 ; Oumanxi et *al.*, 2007).

La présence d'une ou plusieurs espèces bactériennes peut affecter fortement le taux de croissance des populations microalgues.

### I.5.2 Porcisé de culture

Cette étape peut être coûteuse et représenter une fraction économique significative du coût du procédé à l'échelle industrielle et dépend notamment des systèmes de culture (Ghobrini et *al.*, 2020).

#### I.5.2.1 Système de cultures 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 (Olaizola, 2003), aussi bien à l'échelle laboratoire qu'à l'échelle industrielle.

Les systèmes ouverts, où une partie importante de la culture est exposée à l'atmosphère, communément appelés bassins. Les systèmes fermés, où les cultures n'ont pas, ou peu, de contact direct avec l'atmosphère. Ces systèmes sont appelés photo bioréacteurs. (Grobbelaar et Kurano, 2003).

Le choix du système de production dépend du degré de contrôle nécessaire à la production du produit voulu et de sa valeur (APT & BEHRENS, 1999). Au niveau industriel, les microalgues sont souvent cultivées en bassin mais la production de molécules à haute valeur ajoutée ne peut pas se faire en système ouvert (Rubio et *al.*, 1999).

#### **I.5.2.1.1 . Systèmes ouverts**

Dans les systèmes ouverts une large surface de la culture est exposée au milieu extérieur. La culture se fait en bassin artificiels (figure 11)



Figure 11: Production de micro algues dans le raceway

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 CO<sub>2</sub>.

Ces bassins sont en général peu profonds (Kumar et *al.*, 2011). Les systèmes ouverts sont plus faciles et moins chers à construire et à exploiter que les réacteurs fermés.

Cependant, ces systèmes présentent des limites dues à leur contact direct avec le milieu environnant, ce qui peut entraîner des contaminations soit par d'autres espèces de microalgues, soit par des bactéries, virus ou invertébrés (Narala et *al.*, 2016).

#### **I.5.2.1.2 Systèmes fermés**

Les systèmes fermés « photo bioréacteurs » ont été conçus afin de résoudre les problèmes liés aux systèmes précédents.

Ils réduisent les risques de contamination et fournissent un meilleur contrôle des conditions de croissance.

Cependant, le développement d'un biofilm de microalgues à la surface des photo bioréacteurs est une préoccupation majeure qui peut conduire à une accumulation d'oxygène dans la culture, ce qui peut avoir des effets toxiques sur la photosynthèse (Gupta et al., 2015 ; Louw et al., 2016).

Le photo bioréacteur est un système d'agencement de tube dans lequel le milieu de culture va circuler (fig. 12). La suspension micro algue circule du réservoir jusqu'aux tubes qui vont capter la lumière puis des tubes vers le réservoir. (Gupta et al., 2015 ; Louw et al., 2016).

Ce système est isolé de l'environnement extérieur, ce qui réduit le risque de contamination auquel sont exposés les systèmes ouverts. Ce système offre un meilleur contrôle des paramètres de croissance (température, pH, composition du milieu de culture, apport en énergie lumineuse). Par ailleurs, l'évaporation du milieu de culture est minimisée (Huang et al., 2017).



Figure 11: Photo bioréacteurs type tubulaires

Le marché de la biomasse d'algues en Europe rapporte environ 3 milliards d'euros selon les dernières estimations et devrait générer une croissance de 6,7%. La culture des microalgues est un processus coûteux et inefficace. En effet, les faibles taux de production, qui sont inférieurs à 400 g.m<sup>-3</sup> par jour, réduisent leurs chances et empêchent leur utilisation généralisée dans divers secteurs industriels.

### **I.5.3 Porcisé de récolte**

La récolte est l'une des étapes les plus importantes car il s'agit d'une étape limitée à bien des égards pour accroître la valeur des microalgues. Les microalgues sont souvent micronisées, ce qui facilite leur récolte. Cette étape peut être coûteuse et représenter une fraction économique significative du coût du procédé à l'échelle industrielle (Mata et al.,

---

2010). La récolte se fait par centrifugation, filtration, floculation, sédimentation ou flottation.

➤ **Centrifugation**

La centrifugation permet de séparer des constituants de taille et de masse très variables contenus dans un liquide, depuis des molécules jusqu'à des cellules entières. Tous les constituants contenus dans un échantillon sont soumis à la gravité, force qui s'exerce du haut vers le bas, et à la poussée d'Archimède, force qui s'exerce du bas vers le haut.

En dehors du cas particulier dans lequel ces deux forces sont parfaitement équilibrées, on pourrait donc s'attendre qu'avec le temps tous les constituants finissent par tomber au fond du récipient dans lequel ils se trouvent (sédimentation) ou remontent à la surface. C'est d'ailleurs ce qui arrive pour certains. Mais pour la majorité d'entre eux, un autre phénomène intervient qui empêche ce résultat : l'agitation moléculaire. (Rawat *et al.*, 2011).

Elle n'a pas de direction privilégiée, et à l'échelle microscopique l'agitation moléculaire est de très loin plus importante que la gravité et la poussée d'Archimède, de sorte que les effets de ces dernières sont négligeables. (Rawat *et al.*, 2011).

➤ **Filtration**

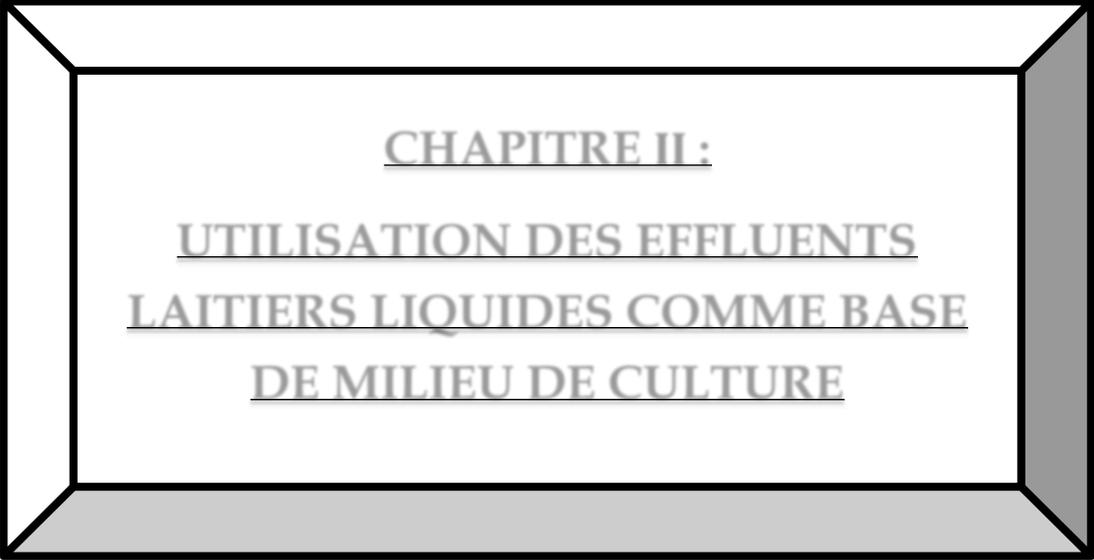
Dans cette méthode, la suspension micro-algale passe au travers d'un filtre, en ne retenant que les cellules. Il existe différentes formes de filtration ; la microfiltration, la filtration sous vide, sous pression, l'ultrafiltration et la filtration à flux tangentiel. Le choix du type de filtration sera dépendant de la taille de l'espèce à récolter. En dépit d'être des méthodes de récoltes attractives, d'un point de vue énergétique, la microfiltration et la filtration sous vide sont coûteuses en énergie. Le pompage de la biomasse demande une dépense énergétique élevée ainsi que le remplacement des membranes souvent victimes de colmatage.

➤ **Floculation**

La floculation est un procédé dans lequel les particules en solution se rejoignent afin de former des agrégats appelés « floes » (Uduman *et al.*, 2010). Lorsque la floculation est combinée à la sédimentation ou à la filtration son efficacité est nettement augmentée (Rawat *et al.*, 2011).

➤ **Sédimentation**

La sédimentation est une technique qui repose sur le principe de gravité. Les cellules en suspension dans le milieu vont être soumises à la gravité et vont former dans la partie inférieure un dépôt de particules solides et dans la partie supérieure une phase liquide. Les microalgues de grande taille et de forte densité vont pouvoir être récoltées par sédimentation comme par exemple la spiruline. La vitesse de sédimentation peut être nettement améliorée grâce à l'ajout de flocculants (Chen et *al.*, 2011 ; Uduman et *al.*, 2010).



CHAPITRE II :  
UTILISATION DES EFFLUENTS  
LAITIERS LIQUIDES COMME BASE  
DE MILIEU DE CULTURE

## II.1 Généralités sur les effluents industriels

### II.1.1 Définition des effluents industriels

Les effluents industriels sont des rejets liquides issus des procédés d'extraction ou de transformation des matières premières en vue de fabriquer des produits industriels ou des biens de consommation.

Ces eaux sont extrêmement hétérogènes. Leur quantité et leur qualité varient en fonction du procédé mis en œuvre et du domaine industriel.

Elles présentent souvent un large spectre de polluants chimiques composés à l'état solide ou dissous de matières organiques et minérales, métaux, hydrocarbures, solvants, polymères, huiles, graisses et sels, à divers niveaux de toxicité (Cantet, 2007) (fig. 13).



Figure 12: Effluents industriels (Anonyme, 2017)

### II.1.2 Différents Types d'effluents

Quatre grandes catégories des rejets peuvent être distinguées dans l'industrie :

#### II.1.2.1 Effluents de fabrication

La plupart des procédés conduisent à des rejets polluants qui proviennent du contact de l'eau avec des gaz, liquides ou solides.

Les rejets sont soit continus, soit discontinus. Ils peuvent même n'être produits que durant quelques mois par an (campagne dans l'industrie agroalimentaire : deux mois en sucrerie de betteraves par exemple. (Le garrec, 2017).

Généralement, les flux de pollution sont connus si les fabrications sont régulières, mais si les industries travaillent par campagnes spécifiques (chimie de synthèse, pharmacie,

parachimie) l'analyse des rejets est plus difficile, ceux-ci évoluant constamment. (Le garrec, 2017).

### **II.1.2.2 Effluents particuliers**

Certains effluents sont susceptibles d'être ségrégés :

- Soit pour subir un traitement spécifique avec éventuellement récupération de matières premières et/ou d'eau recyclable en fabrication ;
- Soit dirigés vers un bassin de stockage pour être réinjectés à débit pondéré dans le circuit de traitement (au besoin après prétraitement). Tel est le cas des :
  - Bains de décapage et galvanoplastie ; soudes usées ; eaux ammoniacales decokerie.
  - Condensats de papeterie, « eaux mères » des industries agroalimentaires et chimiques.
  - Rejets toxiques et rejets concentrés. (Le garrec, 2017).

### **II.1.2.3 Effluents des machines**

Ce sont les fluides qui découlent des cuves et tuyauteries comme les eaux de vannes ; les eaux de chaufferie comme les purges de chaudière ou de réfrigération, ou encore les boues du traitement des eaux d'appoint.

### **II.1.2.4 Effluents des utilités**

Ce sont principalement les :

- Eaux vannes (cantines...).
- Eaux de chaufferie (purges chaudière, éluas de régénération).
- Boues du traitement des eaux d'appoint.
- Purges d'eaux de réfrigération. (Le garrec, 2017).

### **II.1.2.5 Effluents occasionnels**

Ceux-ci ne doivent pas être oubliés, ils peuvent correspondre à :

- Des fuites accidentelles de produits lors de leur manutention ou de leur stockage ;
- Des eaux de lavage de sols ou d'outils de production ;
- Des eaux polluées, dont celles d'orage qui peuvent causer aussi une surcharge hydraulique. (Le garrec, 2017).

## **II.2 Effluents laitiers**

### **II.2.1 Définition**

Les effluents laitiers se composent du lactosérum et des eaux blanches. Le lactosérum, est la partie liquide résiduelle de coagulation du lait dans le processus de fabrication du fromage et de la caséine après la séparation du caillot ou de la phase micellaire, ses caractéristiques correspondent à un liquide jaune-verdâtre trouble, de saveur fraîche, faiblement sucrée par le lactose, de caractère acide qui contient 94% d'eau, de sucre, de protéines et de très peu de matière grasses. (Ben mehreas et Louelh, 2016)

Les effluents de laiterie peuvent constituer un risque de pollution lorsqu'ils sont déversés sans traitement convenable dans l'eau superficielle ou souterraine.

Les eaux blanches sont constituées des eaux de lavage des laiteries et des salles de traite, contenant les différents détergents utilisés ainsi que des résidus du lait. La nature et le volume des déchets produits dépendent de plusieurs facteurs comme le logement des animaux, le système de traite utilisé. (Benaïssa, 2018).

### **II.2.2 Caractéristiques des effluents laitiers**

Les effluents issus de la transformation laitière sont caractérisés par des charges élevées de matière organique. En effet, les effluents de laiterie contiennent essentiellement de l'eau et du lait ou des résidus de produits laitiers dilués. Les produits de nettoyage peuvent également être à l'origine de taux élevés de phosphore.

De plus, la qualité des effluents dépend des produits finis fabriqués sur le site. Le tableau 2 reprend les caractéristiques des effluents bruts générés par différents sites laitiers présents sur le bassin Loire-Bretagne et dont les activités diffèrent. (Bourbo, 2018)

Tableau 2: Caractéristiques des effluents bruts (en g/l) ( : Aelb, 2010)

Type de transformation	MES	DCO	DBO <sub>5</sub>	Azote réduit	Azote Organique	Phosphoree
Lait de consommation, yaourts et desserts Lactés	0.33-5.1	0.53-14	0.33-8.1	0.03-0.21	0-0.16	0.01-0.08
Poudre	0.08-0.21	0.47-1.1	0.29-0.59	0.01-0.11	X	0.01-0.04
Fromage	0.02-1.9	0.22-7.4	0.14-5	0.01-0.24	0-0.09	0-0.19
Multi-activités	0.26-1.1	1.1-5.0	0.54-3.1	0.02-0.12	0-0.13	0.02-0.06

**MES** : matières en suspension, **DCO** : demande chimique en oxygène, **DBO5** : Demande Biologique en Oxygène à 5 jours.

Par ailleurs, les caractéristiques peuvent varier selon les types de production mais aussi selon les pratiques de gestion de l'eau appliquées au niveau des sites de transformation commel'illustre le tableau 3 ( Bourbon, 2018).

Tableau 3: Niveaux de pollution des eaux usées de laiterie (EC BREF, 2006)

Paramètre	Unité	Niveaux de pollution
Matières suspension	Mg/l	135-8500
DCO	Mg/l	500-4500
DBO <sub>5</sub>	Mg/l	450-4790
Azote	Mg/l	15-180
Phosphore	Mg/l	20-250
Ammoniac-(n)	Mg/l	10-100
Graisses	Mg/l	35-500
Protéines	Mg/l	210-560
Sodium	Mg/l	60-807
Chlorures	Mg/l	48 - 469 (jusqu'à 2000)
Température	°C	12-40

Dans la filière laitière, le principal problème se situe au niveau de l'eau. En effet, elles ne peuvent pas être directement déversées dans l'environnement et doivent être dépolluées avant leur rejet dans le milieu naturel. Par ailleurs, le traitement des effluents laitiers génère des boues dont il faut aussi tenir compte et qui sont à l'origine des problèmes environnementaux. ( Bourbon, 2018).

### **II.2.3 Traitements appliqués aux effluents laitiers**

Environ 64% des sites de transformation d'effluent laitier possèdent leur propre installation de traitement des effluents (Anonyme, 2021). Les filières rencontrées sur ces sites sont constituées de plusieurs ouvrages qui assurent chacun une étape particulière du traitement. L'installation est ainsi composée de :

- Un site de prétraitement
- Un site de traitement secondaire (traitement principal)
- Un site de traitement tertiaire éventuel

### **II.2.3.1 Prétraitements et traitements physico-chimiques**

Les prétraitements sont des opérations destinées à extraire les substances qui, par leur nature ou leur dimension, pourraient nuire aux traitements ultérieurs. Les prétraitements et traitements physico-chimiques susceptibles d'être utilisés sur les sites de transformation d'effluent laitier sont décrits dans le tableau 4. Les cinq premiers traitements sont, à cette occasion, des traitements qui sont couramment mis en place au sein de ces derniers.

D'après Moletta et Torrijos (1999), les traitements physico-chimiques ne suffisent pas à atteindre les seuils de rejets fixés par la réglementation. Ils sont donc principalement utilisés comme prétraitements, suivis d'un traitement biologique aérobie ou anaérobie. (Bourbon, 2018)

Tableau 4: Prétraitements et traitements physico-chimiques retrouvés sur les sites de transformation

Prétraitement	Objectif	Principe
Bassin tampon*	Ecrêter le débit	Bassin à l'entrée de la station d'épuration
Neutralisation*	Equilibrer le Ph	Traitement chimique
Dégrillage, tamisage*	Séparer les éléments grossiers	Séparation physique à l'aide d'une surface percée d'orifices réguliers ou d'une grille fine
Flottation*	Extraire les graisses et Substances non décantables	Injection de fines bulles d'air qui, en remontant à la surface, emportent les particules solides
Dégraissage*	Retirer les graisses	Séparation des graisses par différence de densité
Décantation	Séparer les substances plus ou moins denses que l'eau	Sédimentation dans un bassin
Bassin de détournement	Éviter les rejets non maîtrisés	Bassin accueillant les flux excédentaires
Dessablage	Extraire les particules minérales qui pourraient notamment endommager les pompes	Sédimentation des particules plus denses que l'eau
Précipitation	Extraire les particules non décantables	Ajout de produits chimiques puis décantation
Centrifugation	Séparer les liquides ou les solides	Discrimination par densité dans un récepteur tournant à grande vitesse
Filtration	Extraire les solides en Suspension	Filtration sur sable ou autre support minéral, par gravité ou sous pression

### II.2.3.2 procédés biologiques aérobies

Les procédés biologiques aérobies consistent une élimination des matières organiques biodégradables dans des conditions aérobies. Efficaces pour réduire la DCO et la DBO, les procédés aérobies sont les plus répandus sur les sites de transformation laitière.

Il s'agit de procédés maîtrisés et rentables. Comme le soulignent les études menées par les agences de l'eau (Aelb, 2010 ; Aesn, 2003), les traitements les plus couramment rencontrés sont le procédé à boues activées et le lagunage aéré. Le tableau 5 dresse une liste des procédés aérobies utilisés sur les sites laitiers. (**Bourbon, 2018**)

Tableau 5: Traitements aérobies utilisés sur les sites de transformation

Traitement	Principe
Boues activées*	Contact entre les eaux usées à traiter et une biomasse active de microorganismes aérobies dans les boues en présence d'oxygène (air ou oxygène pur). Suivi d'une étape de décantation. Sur les sites laitiers, ce sont principalement des boues activées à aération prolongée qui sont installées.
Lagunage aéré*	Traitement par les algues, des bactéries, le soleil et le vent dans un bassin peu profond alimenté en oxygène par des aérateurs.
Lit bactérien	Formation d'un biofilm sur un support fixé. Contact entre les eaux usées et le biofilm.
Réacteur biologique séquentiel (SBR)	Même principe que les boues activées mais les étapes de contact et de décantation ont lieu dans un même réacteur.
Disques biologiques	Développement d'un biofilm sur une série de disques rotatifs partiellement immergés dans les eaux à traiter.
Filtres aérobies haut Rendement	Filtration sur un support optimisé. Passage des eaux usées par une série de buses.
Bioréacteurs Aérobies	Bioréacteur noyé aéré, submergé aéré, à lit fluidisé, lit mobile, biofilm flottant...

### II.2.3.3 Procédés biologiques anaérobies

Les procédés biologiques anaérobies correspondent à la transformation d'une partie de la matière organique biodégradable en biogaz (méthane et dioxyde de carbone).

Ces techniques, moins efficaces que les procédés aérobies pour extraire la matière organique des eaux usées, ont l'avantage de produire une moindre quantité de boues et de fournir une source de biogaz valorisable énergétiquement.

D'après Rodriguez (2005) les procédés anaérobies utilisés pour traiter les effluents issus de la transformation laitière sont synthétisés dans le tableau 6.

Les effluents peuvent également être traités dans un bassin d'anoxie. La matière organique est alors biodégradée en absence total d'oxygène. Cette technique permet notamment d'éliminer l'azote (Bourbon, 2018).

Tableau 6: Traitements anaérobies utilisés sur les sites de transformation

Traitement	Principe
Contact anaérobie	Contact entre les eaux à traiter et une biomasse anaérobie dans un réacteur étanche à l'air.
Lagunage anaérobie	Bassin couvert profond (3 à 4m) muni d'un brassage ou d'un garnissage pour améliorer la répartition des microorganismes.
Filtre anaérobie	Développement des microorganismes sur un garnissage puis séparation des gaz de la phase liquide.
UASB	Lit à boue ascendante anaérobie (Upflow anaérobie Soudage Blanket : UASB)
Réacteurs à lit fluidisé et expansé	Passage de l'effluent sur un matériau porteur, sable ou plastique, avec recirculation de l'effluent.
Bioréacteurs anaérobies	Réacteur SBR anaérobie, réacteur membranaire anaérobie, réacteur à biofilm anaérobie, etc.

#### II.2.3.4 Traitements tertiaires

On assiste aujourd'hui à l'essor des procédés de filtration membranaire, qui permettent d'obtenir une eau de qualité élevée. À titre d'exemple, Macedo et al. (2014) appliquent un traitement d'ultrafiltration suivie d'une étape de nano filtration sur du lactosérum de brebis et obtiennent un taux de rétention de la DCO de 93%.

Dans le secteur laitier, les membranes de microfiltration, d'ultrafiltration, de nanofiltration, d'électrodialyse et d'osmose inverse permettent d'obtenir une eau de qualité suffisante pour être réutilisée, comme l'affirment Kulkarni et Goswami, (2014).

Les bioréacteurs membranaires (BRM) couplent un traitement biologique et une unité de filtration membranaire.

Ils peuvent fonctionner en conditions aérobies ou anaérobies, avec une unité de filtration membranaire immergée ou en boucle externe.

En outre, pour le rejet des effluents dans les zones sensibles ou le recyclage des eaux, il est parfois nécessaire de recourir à un traitement de finition. Ces traitements ont pour objectif d'éliminer le phosphore et l'azote, les micropolluants ou encore les microorganismes pathogènes, comme il apparaît dans le tableau 7. (Bourbon, 2018)

Tableau 7: Principaux traitements tertiaires appliqués sur les sites de transformation

Substances à éliminer	Procédés applicables
Azote	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nitrification-dénitrification par une alternance de conditions aérobie-anoxie</li> <li>- Colonne de désorption ou d'adsorption pour extraire l'ammoniac</li> </ul>
Phosphore	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Élimination biologique : alternance de conditions aérobie/anaérobie</li> <li>- Élimination chimique : précipitation de phosphates métalliques insolubles</li> </ul>
Bactéries	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biocides oxydants ou non oxydants</li> <li>- Ozonation</li> <li>- Ultraviolets</li> </ul>

En outre, des procédés innovants sont encore au stade de l'élaboration. Ainsi, des recherches sont menées à travers le monde dans le but de développer des techniques de traitement des eaux usées plus efficaces, produisant moins de rejets (boues, pollution de l'air) ou encore permettant de valoriser d'autres déchets.

C'est le cas de l'étude de Ghobrini et *al.* (2019), dans laquelle il est question d'utiliser des microalgues vertes pour biodégrader la matière organique des eaux usées de laiterie et produire simultanément du biodiesel.

L'utilisation de microalgues vertes pour le traitement des eaux usées est une technologie déjà disponible sur le marché (Ghobrini et *al.*, 2020).

Par ailleurs, plusieurs articles, tels que ceux de Bazrafshan et *al.* (2013) ou Torres-Sanchez et *al.* (2014) proposent l'utilisation de l'électrocoagulation pour le traitement des effluents de laiterie.

Ces études, menées à l'échelle du laboratoire, ont conclu à une efficacité de traitement en abattement de la DCO allant de 70 à 99%.

### **II.3 Source de pollution :**

La nature des effluents issus des laiteries dépend en grande partie des procédés de fabrication. Ainsi, la composition de ces eaux usées dépend bien sûr de la nature du produit formé et donc des procédés mis en œuvre dans la laiterie.

Aujourd'hui, les produits retrouvés dans les effluents sont ceux qui proviennent de la matière première (lactose, protéines, lipides, sels minéraux...) et ceux qui sont ajoutés ou utilisés à des fins de lavage et d'hygiénisation (bactéricides, antiseptiques, soude, acides phosphorique et nitrique...).

Il est important de noter que sa composition dépendra aussi du comportement des hommes et notamment de la rigueur avec laquelle les sous-produits seront récupérés.

#### **II.3.1 Eaux de refroidissement et condensats**

Ces eaux sont généralement très peu polluées, ce qui permet très souvent leur recyclage.

- ✓ Ce sont des eaux abondantes et généralement non polluées, car elles n'ont pas de contact avec les produits fabriqués. Elles peuvent être recyclées, comme les eaux

chaudes (issue des circuits de refroidissement des centrales thermiques) (Menouer et Taibi, 2014)

- ✓ Les photomètres Optek veillent à ce que les eaux de condensation soient libres de toute contamination et puissent être réutilisées pour alimenter la chaudière ou autre.

### **II.3.2 Eaux résiduaire de lavage**

Dans les laiteries, le nettoyage est un facteur essentiel qui agit sur la qualité du produit fini. Des programmes automatisés sont mis en place et sont chargés de gérer les différentes séquences de lavage appliquées aux différents secteurs à traiter.

Ces programmes comportent généralement des rinçages poussés, des lavages alcalins avec des solutions de soude ou acides avec des solutions d'acides phosphorique et nitrique.

Certains établissements n'utilisent qu'une seule fois leur solution et d'autres les stockent pour un usage multiple avant rejet. Bien sûr, un rejet instantané de ces effluents peut créer des problèmes au niveau d'une station biologique de traitement. C'est pourquoi il est nécessaire de le prendre en compte.

De plus, une mauvaise récupération du lactosérum peut conduire à des dimensionnements de station d'épuration bien supérieurs au strict nécessaire.

### **II.3.3 Eaux issues du produit**

Certains procédés, comme la fabrication de lait ou de lactosérum en poudre, génèrent des eaux qui se retrouvent dans les effluents. Elles sont généralement peu chargées. (René; M..Michel; T ).

## **II.4. Norme de rejets**

- ✓ C'est les qualités maximales des matières polluantes qui pourront être rejetées dans un milieu récepteur donné. Les normes répondent à des lois nationales qui peuvent être adoptées localement par arrêté préfectoral (Rejsek, 2002). Au niveau de la Norme nationale et selon le journal officiel de la république Algérienne Démocratique et Populaire (JORAD).
- ✓ La lutte contre la pollution des eaux fait l'objet d'une législation et réglementation assez complexe à travers le monde.

Dans cet ensemble de rejets, celles dues aux effluents industriels occupent une bonne place. En effet la plupart des pays ont établi des normes de rejet.

Ces dernières définissent en général des valeurs maximales admissibles qui, selon certains cas particuliers, peuvent devenir plus contraignantes.

Conformément aux recommandations de l'organisation mondiale de la santé (OMS), les normes de rejets des eaux usées en Algérie sont résumés dans l'annexe (04) .( Ouerd, 2010).

- ✓ Le décret exécutif n°93-160 du juillet 1993. réglemente les procédures de rejets d'effluents liquides dans le milieu naturel et rappelle que tout rejet d'effluents de type industriel est soumis à une autorisation préalable ,délivrée par le ministère chargée de l'environnement ,qui détermine les conditions techniques auxquelles sont subordonnés les rejets .Ce décret précise également les valeurs limites maximale des paramètres de rejets des installations de déversement d'effluents liquides industriels (le tableau suivant) (Bouziani, 2002).

Tableau 8: Valeurs limites de certains paramètres des rejets industriels ( décret exécutif n°93-160 du juillet 1993 ) . (Bouziani.2002).

Paramètre	Valeur maximale (mg/l)	Paramètre	Valeur maximale (mg/l)
DBO5	40	Plomb	1
DCO	120	Cuivre	3
Phosphate	02	Zinc	5
Cyanures	0.1	Huiles et graisses	20
Aluminium	5	Hydrocarbures	20
Cadmium	0.2	Phénols	0.5
Chrome 6	0.1	Solvants organiques	20
Manganèse	1	Chlore actif	1.0
Mercur	0.01	PCB	0,001
Nickel	5	Détergents	2

## II.5 Contraints réglementaires

### II.5.1 La face du la réglementation Laiteries

Depuis longtemps, la législation prend en considération les problèmes que peut poser lapollution. Depuis 1829, la répression des délits de pollution s'exerce dans le cadre de la police de la pêche qui vise la protection du poisson avec l'application de l'article 434-1 du code rural,psde l'article 407 issu de la nouvelle loi sur la pêche du 29 juin 1984.

En matière de réglementation pour les rejets des eaux usées, il convient de distinguer deux aspects :

- Les contraintes réglementaires sous le contrôle de l'État regroupées principalement dans le cadre de la législation des ICPE (installations classées pour la protection de l'environnement) ;
- Les incitations financières concrétisées par les actions des agences de l'eau.

Le premier point définit les contraintes à respecter avec pour objectif la protection du milieu naturel récepteur. Le deuxième point apporte une aide technique et financière pour la réalisation des programmes de lutte contre la pollution.

### **II.5.2 Législation des installations classées pour la protection de l'environnement**

Les ICPE font l'objet de contrôles chroniques et/ou inopinés, qui visent à ce que les installations sont exploitées conformément aux prescriptions (par exemple, respect de la quantité maximum de déchets entrants autorisés, des valeurs limites d'émissions de polluants, etc.)

Décret exécutif n° 07-144 du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 19 mai 2007 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

En application des dispositions de l'article 23 de la loi n° 03-10 du 19 juillet 2003, relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, le présent décret a pour objet de fixer la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

### **II.6 Rôle des micro algues dans la bioremédiation**

La bioremédiation ou la biodégradation stimulée est un ensemble de techniques utilisées pour dépolluer un site naturel (sol, sédiments, eaux de surface ou souterraines), mais qui font appel à l'utilisation de micro-organismes (champignons, de végétaux divers ou d'enzymes) souterrains pour dégrader les pollutions liées à des substances organiques tels que les hydrocarbures. Les moyens mis en œuvre sont donc respectueux de l'environnement et de la santé humaine. La bioremédiation se déroule généralement en

condition d'aérobie, toutefois l'application des systèmes de bioremédiation en condition d'anaérobie permet de dégrader un certain nombre de molécules récalcitrantes (Chedly, 2006).

### **II.6.1 Différentes techniques de bio remédiation dans le traitement des eaux usées**

Il s'agit de traitements biologiques directement appliqués sur le site à dépolluer et ils sont comme suit :

#### **II.6.1.1 Bio remédiation intrinsèque ou bio-atténuation**

C'est simplement la biodégradation naturelle des polluants par les microorganismes présents dans le sol ou la nappe. Cette méthode consiste uniquement à vérifier la présence et la capacité des micro-organismes utilisés pour dégrader les polluants (Hanna, 2004).

#### **II.6.1.2 Bio-stimulation**

Cette technique consiste à remonter l'activité des populations microbiennes présentes dans le sol ou dans les eaux souterraines par apport de nutriments et par ajustement des conditions du milieu qui sont le potentiel d'oxydo-réduction, l'humidité et la température (Hanna, 2004).

#### **II.6.1.3 Bio-augmentation**

Cette technique est utilisée lorsque l'activité des microorganismes indigènes est insuffisante. Il s'agit d'ajouter des micro-organismes étrangers spécialisés. Une des voies de recherche actuelle est l'utilisation de micro-organismes génétiquement modifiés pour la dégradation des polluants récalcitrants (Hanna, 2004).

#### **II.6.1.4 Bio-injection**

C'est la fragmentation des grosses molécules par le couplage de l'injection d'air ou d'oxygène à l'activité biologique normale des micro-organismes suivis d'un entraînement par le flux gazeux (Hanna, 2004).

#### **II.6.1.5 Bio-extraction**

Elle suit le même chemin de celui de la bio-injection sauf que c'est un couplage de

l'activité biologique des microorganismes et de l'extraction sous vide des polluants (Hanna, 2004).

### **II.6.1.6 Phytoremédiation**

C'est l'utilisation de certaines plantes qui favorisent la migration des polluants (métaux lourds) par l'intermédiaire de leur système racinaire. L'efficacité de cette technique en vue d'extraire les polluants organiques est peu étudiée (Hanna, 2004).

## **II.7 Importance des microalgues dans le traitement des eaux usées**

Les microalgues agissent comme bio-absorbants contribuant à l'élimination des métaux lourds et autres produits toxiques véhiculés par ces eaux (Beker, 1983 ; Ghobrini et *al.*, 2020). Par leur activité biologique, elles influencent négativement les conditions de vie de certaines bactéries pathogènes, conduisant ainsi à leur réduction en nombre et même leur disparition (PARhad, 1974).

De plus, les microalgues dégradent et transforment le complexe de xénobiotique. En outre, les microalgues peuvent être utilisées comme un capteur biologique pour détecter la pollution.

Par ailleurs, les microalgues jouent des rôles clés dans le traitement biologique des eaux usées par lagunage (Humenik, 1971). De même, les microalgues assurent l'élimination, en partie, des sels nutritifs excédentaires dans les eaux résiduaires en se nourrissant essentiellement d'azote et de phosphore, contenus en grande quantité dans les eaux usées (Ghobrini et *al.*, 2018).

Aussi, les microalgues peuvent même contribuer directement à l'élimination de certains dérivés organiques (Pearson et *al.*, 1987). A cet égard, les microalgues peuvent être utilisées comme base du milieu de culture pour résoudre le problème de coût de production de la biomasse algale (Ghobrini et *al.*, 2020).



**CHAPITRE III : LES COMPOSES**  
**BIOLOGIQUES ACTIFS TIRES DES**  
**MICROALGUES**

### III. composants biologiques des microalgues

L'intérêt croissant pour les microalgues s'explique par l'importance des molécules qu'elles contiennent, considérées comme de grande valeur. Les microalgues sont une source importante de lipides, de protéines, de sucres et de colorants (Ghobrini et *al.*, 2019) (tableau9).

Tableau 9: Répartition du fractionnement biochimique d'une cellule de micro algue d'après Sialve et Steyer (2013).

Composants	Ordre de grandeur (% massique)
Protéine	40-60
Lipides	5-60
Sucres	8-30
Acides nucléique	5-10

#### III.1 lipides :

La plupart des lipides sont différentes les unes des autres, notamment en termes de structure et de fonction, elles forment une famille hétérogène, mais elles ont des caractéristiques communes en ce qui concerne leur densité. Les lipides représentent une très grande diversité de molécules impliquées dans des structures et des processus biologiques variés. Ils sont l'un des composants de base des cellules de microalgues, car ils sont présents sous forme de phospholipides qui composent les membranes au niveau de la structure cellulaire et proportionnellement au niveau d'énergie, ils sont considérés comme des molécules de réserve. Globalement, les microalgues peuvent se composer de lipides à hauteur de 16 à 75% de leur masse sèche selon les espèces (Harun et *al.*, 2010).

Les lipides sont également des éléments structuraux ayant une fonction de stockage d'énergie (Williams et Laurens, 2010). Par ailleurs, les lipides sont utilisés pour la fabrication de biocarburants (Ghobrini et *al.*, 2017). Ainsi, les microalgues produisent des lipides neutres faiblement insaturés qui sont donc propices à la formation de biodiesel (Harun et *al.*, 2010).



Les acides gras polyinsaturés (PUFA) sont les acides qui comportent un nombre multiple de doubles liaisons. Alors que ceux qui ont un nombre élevé d'insaturations sont appelés acides gras hautement insaturés (HUFA).

Les lipides de microalgues sont connus pour être riches en acide eicosapentaénoïque (EPA, C20 : 5) et en acide docosahexaénoïque (DHA, C22 : 6), de la chaîne AGHI-W3, qui sont deux types d'acides gras hautement insaturés, et représentent aujourd'hui une source alternative potentielle d'huiles de poisson (fig. 15). Les micro algues synthétisent l'EPA ou DHA dans des proportions variables selon leur classe. (Weil, 1990).

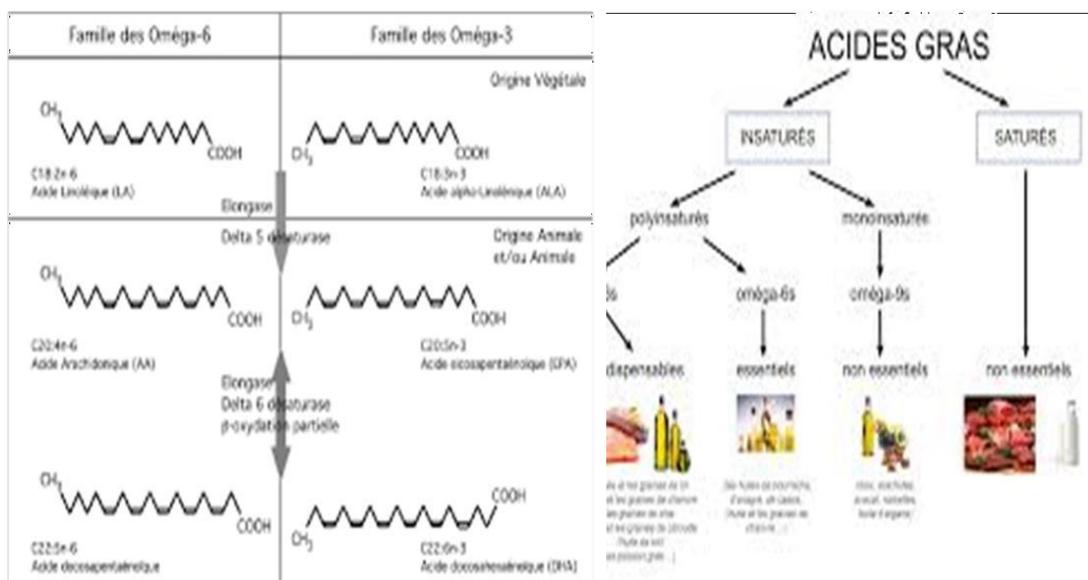


Figure 14: acides gras et les familles d'oméga

➤ **Glycérides**

Glycérides (esters d'acides gras avec du glycérol). Selon le nombre d'hydroxyles du glycérol estérifiés par les acides gras, Ils sont composés de monoglycérides (MAG), de diglycérides (DAG) et de triglycérides (TAG). Les triglycérides représentent 10% du poids total chez les individus normaux du règne animal (Weil, 1990).

Quantitativement les plus importants, les TAG sont des lipides de stockage abondants qui peuvent être facilement catabolisés pour fournir de l'énergie métabolique (Gurr et al., 2002). En plus d'être non polaire, il offre des capacités de stockage plus élevées et est stockés sous forme anhydre.

## B. Lipides polaires

Les lipides polaires sont formés de glycolipides et de phospholipides.

### ➤ Glycolipides

Les glycolipides se trouvent le plus souvent à la surface cellulaire, dans les membranes extra-chloroplastiques et ont des activités antibactériennes, antivirales et anti-inflammatoires (Plouguerne et *al.*, 2014).

Les glycolipides chez les diatomées sont constitués de monogalactosyl-diacylglycérol (MGDG), digalactosyl-diacylglycérol (DGDG), sulfoquinosyl-diacylglycérol (SQDG) (Mimouni et *al.*, 2018) (fig. 16).

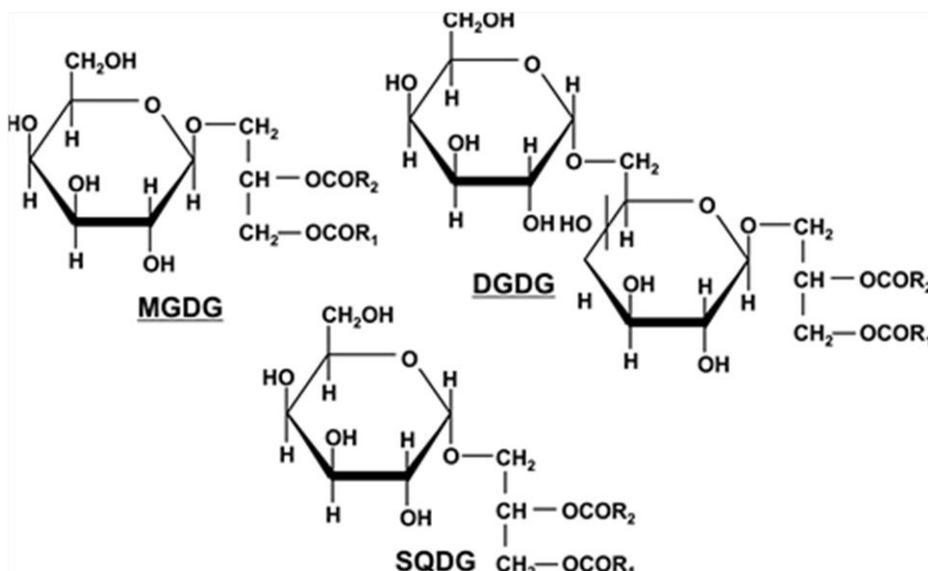


Figure 15: Structure d'un MGDG, DGDG et SQDG

### ➤ Phospholipides

Sont des substances que l'on trouve largement chez les animaux, les plantes et les bactéries, où elles servent à former la bicouche lipidique qui compose la membrane cellulaire. Ils participent également à diverses fonctions cellulaires. (Abd el baky et *al.*, 2014).

Les phospholipides constituent environ 40% des membranes cellulaires, tandis que les 60% restants sont composés de protéines (Hart et Conia, 2000). Les phospholipides jouent un rôle essentiel dans la signalisation cellulaire des algues et les interactions cellule-cellule (Abd el baky et *al.*, 2014).

Par ailleurs, ce sont de bons porteurs d'acides gras ou de principes actifs (liposomes, nano-émulsions) du fait de leur double polarité (hydrophile et hydrophobe) (fig. 17).

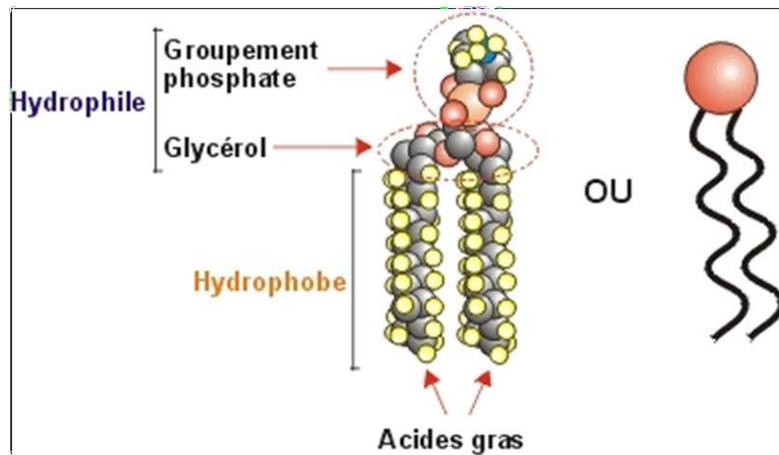


Figure 16: Structure de phospholipide

### III.1.2 Mécanismes de biosynthèse

La biosynthèse des acides gras et des lipides répond à deux impératifs dans la cellule lesquels sont :

- a. Fourniture des acides gras nécessaires à la synthèse des lipides de structure
- b. Mise en réserve de l'énergie

La biosynthèse des acides gras se fait dans le cytosol alors que leur dégradation par B oxydation se fait à l'intérieur des mitochondries. Toute biosynthèse comme la synthèse des lipides nécessite :

- c. De l'énergie apportée par l'ATP
- d. Du pouvoir réducteur, fourni sous forme de NADPH, H provenant essentiellement du fonctionnement de la voie des pentoses phosphates

e. Des précurseurs, le seul précurseur de la synthèse des acides gras est l'acétyl-CoA. L'acétyl-CoA provient de :

- i. L'oxydation du pyruvate (mitochondriale)
- ii. La dégradation oxydative des acides aminés dits octogènes
- iii. L'acétyl-CoA, quel que soit son origine, est formé dans la mitochondrie. Pour servir de précurseur dans le cytosol à la synthèse des acides

gras, il doit être exporté de la matrice mitochondriale vers le cytosol. Seul le radical acétyle est transporté à travers la membrane interne par le système citrate (fig. 18).

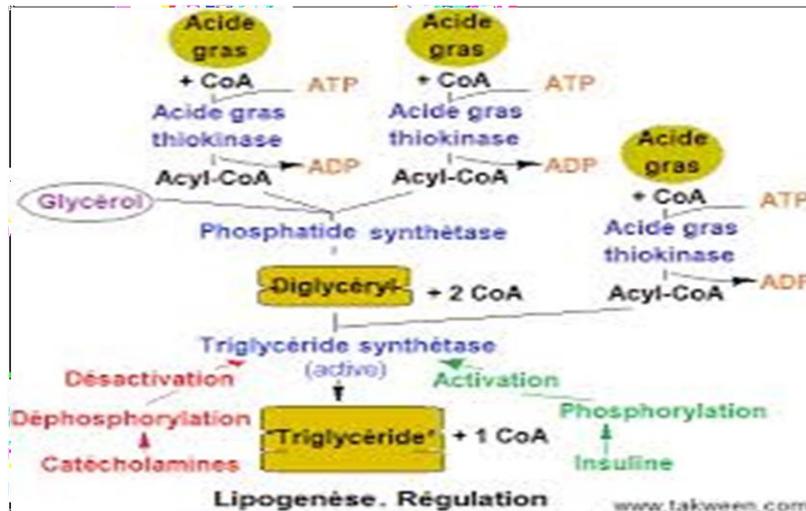


Figure 17: Mécanismes de biosynthèse des lipides

### III.1.3 Extraction des lipides

#### III.1.3.1 Paramètres influençant l'extraction des lipides

Parmi les facteurs qui affectent le processus d'extraction des lipides et interfèrent directement avec la vitesse et la concentration de l'extrait et le rendement on peut citer : les processus de séchage (teneur en eau résiduelle) ; la nature et la composition du solvant (Rickebosch et *al.*, 2011 ; Balasubramanian et *al.*, 2013), la taille des particules (degré de broyage) (Ghobrini et *al.*, 2019) ; la chaleur ; le temps d'extraction et la vitesse d'agitation (Halim et *al.*, 2014). En outre, l'efficacité d'extraction dépend également du type et de la méthode d'extraction utilisé.

#### III.1.3.2 Les Techniques d'extraction des lipides

Il existe plusieurs techniques permettant l'extraction des huiles de micro algues. Parmi ces techniques, il existe :

- A. Extraction avec des fluides supercritiques.
- B. L'extraction par solvant organique.
- C. L'extraction par CO<sub>2</sub> supercritique.

### III.1.3.2.1 Extraction avec des fluides supercritiques

Ce procédé est basé sur le principe d'augmenter la solubilité des agents d'extraction au-dessus du point critique des principaux facteurs utilisés.

En outre, cette technique est d'une grande importance car elle est considérée comme très puissante pour extraire d'autres composés présents dans les algues, et les fluides supercritiques sont sélectifs, offrant ainsi un haut degré de pureté et une concentration élevée du produit. De plus, il n'y a pas de résidus de solvants organiques dans l'extrait ou dans la biomasse traitée. (Kerlero et al., 2016).

L'un des points les plus importants du processus d'extraction par fluide supercritique est qu'une fois que la réaction d'extraction se produit et que les matériaux d'extraction se dissolvent dans le fluide supercritique, le solvant et le produit peuvent être facilement séparés en aval en termes de température et de pression en raison des conditions atmosphériques. (Kerlero et al., 2016).

Dans ce cas, le liquide retourne à son état gazeux d'origine tandis que les produits extraits restent à l'état liquide ou solide. (Kerlero et al., 2016) (fig. 19).

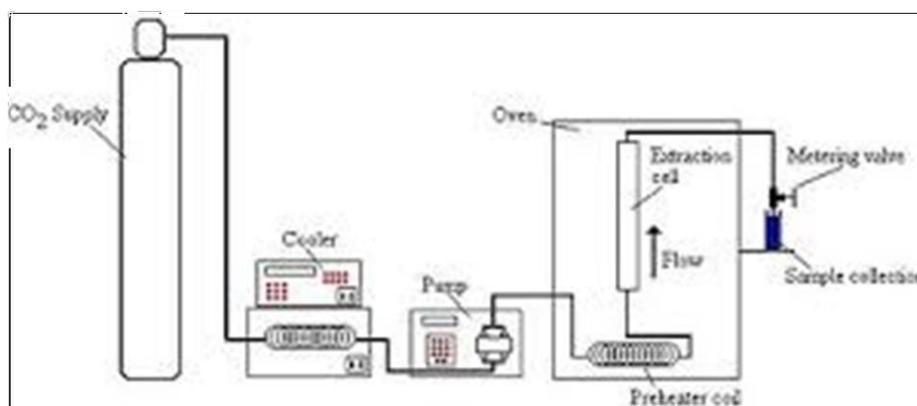


Figure 18: Extraction par fluide supercritique

### III.1.3.2.2 Extraction par solvant organique

L'extraction des lipides des micro algues nécessite une étape de base visant à décomposer les parois cellulaires pour les rendre accessibles au solvant. Cela est dû au fait que le stockage des lipides dans les micro algues se fait dans des cellules qui peuvent être protégées par une paroi épaisse.

Il est possible d'utiliser une variété de traitements : broyage, ultrasons (Ehimen et al., 2012 ; Kim et al., 2013 et Ghobrini et al., 2019), micro-ondes (Koberg et al., 2011), choc

asymétrique, hydrolyse enzymatique, etc. (YU et *al.*2012 ; Shaw et *al.*, 2013).

Le solvant organique est choisi en fonction de sa polarité et de son affinité avec les molécules d'intérêt à extraire. Parmi eux l'hexane est le plus couramment utilisé, mais aussi le chloroforme, l'éthanol, l'isopropanol, le butanol, les cétones et les esters (Kerlero et *al.*, 2016).

Dans certains cas, le fait d'associer plusieurs solvants permet d'améliorer la capacité d'extraction et d'améliorer la sélectivité. Il est possible d'obtenir jusqu'à 98 % d'extraction des acides gras purifiés. L'extraction peut également être améliorée en condensant les conditions de température et de pression, ce qui permet d'augmenter le pouvoir de solubilité du solvant en question (Walker et *al.*, 1999 ; Chen et *al.* 2011) (fig. 20).

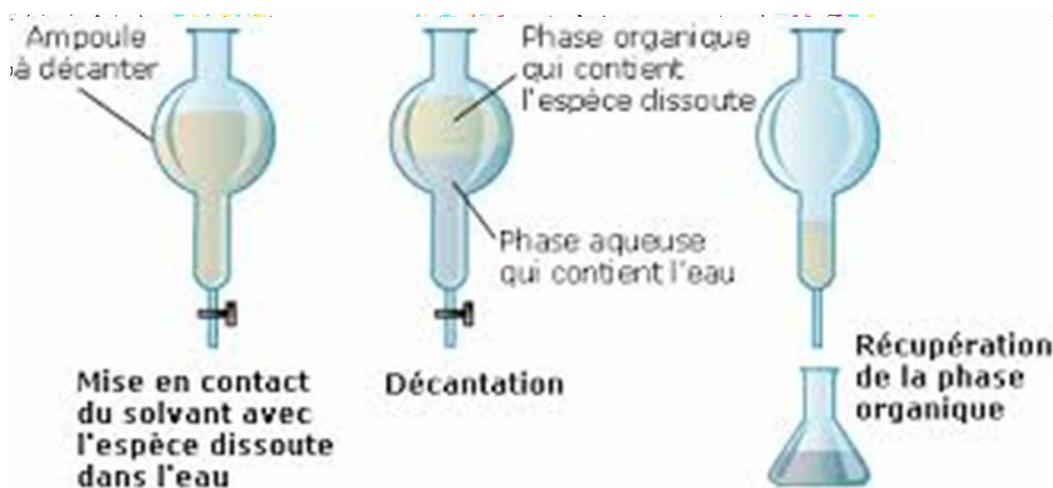


Figure 19: Technique d'extraction par solvant organique

### III.1.3.2.3 Extraction par CO<sub>2</sub> supercritique

Les fluides supercritiques sont utilisés au stade industriel depuis 30 ans (ex : café caténine) et se positionnent aujourd'hui comme une alternative aux techniques classiques d'extraction par solvant organique.

La technologie des fluides supercritiques permet d'obtenir des extraits purs sans résidus de solvant et ne nécessite pas d'étape de séparation.

Cependant, un des freins importants à la diffusion de la technologie est la lourdeur des investissements bien que leurs coûts aient baissé durant ces dernières années.

Les principes de bases de la technologie sont les suivants : quand la température et la

pression d'un fluide vont au-delà de certaines valeurs critiques on dit que ce fluide est à l'état supercritique (fig. 21).

A cet état, les fluides ont une masse volumique voisine de celle des liquides, une viscosité à peine supérieure à celle des gaz et une diffusivité comprise entre celle des liquides et celle des gaz. Dans le domaine de l'extraction, c'est le CO<sub>2</sub> à l'état supercritique qui est le plus utilisé pour ces conditions critiques facilement accessibles ( $T_c = 31,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $P_c = 72,9\text{ ATM}$ ). Par ailleurs, il est peu coûteux, non toxique, ininflammable et chimiquement inerte.



Figure 20: Technique d'extraction par CO<sub>2</sub> supercritique

### III.2 Protéines

Les micro algues sont une source non conventionnelle de protéines dans les aliments et les fourrages, car beaucoup d'entre elles contiennent une forte proportion de protéines et de peptides ainsi que des acides aminés, entre 12 à 65% de la matière sèche, y compris les acides aminés essentiels (Pignolet et al., 2013).

Par exemple, les protéines produites par *Arthrospira platensis* sont digestibles à plus de 90% et contiennent 60% d'acides aminés essentiels (Dillon et Phan, 1993).

Chez *Scenedesmus obliquus*, 30 à 45% des acides aminés totaux sont des acides aminés essentiels (Baker, 2007).

Ainsi, une partie de la biomasse algale est utilisée comme complément en nutrition humaine et animale (aquaculture) en raison de leur forte teneur en protéines (Harun et al., 2010) (tableau 10).

Tableau 10: Composition en protéines de différentes Sources d'aliments et des microalgues d'après

Eléments	protéine (% du poids sec).
baker's Yeats	39
Méat	43
Milk	26
Rice	8
Soybean	37
banabana cylindrica	43-56
chlamydomonas rheinhardii	48
<i>chlorella vulgaris</i>	51-58
dunaliella salina	57
prophyridium cruentum	28-39
scenedesmus obliquas	50-56
Spiruline maxima	60-61
Synechococcus sp.	63

### III.3 glucides

Les micro algues ont la capacité d'accumuler une grande quantité de carbohydrates qui peuvent être utilisés comme matière première dans la production de bioéthanol. Ces carbohydrates peuvent être sous forme d'amidon, glucose, cellulose, hémicellulose et divers types de polysaccharides (Borowitzka, 2013).

Ils agissent comme des composants structurels dans les parois cellulaires et

comme composants de stockage à l'intérieur de la cellule (Markou et *al.*, 2012). Certaines espèces ont des teneurs élevées en glucides : *Porphyridium cruentum*. (40-57 %), *Spirogyra* (33- 64 %)(Markou et *al.*, 2012).

### III.4. Pigments

Les colorants sont des particules complexes, qui ont la capacité de changer la couleur de la lumière réfléchiée en fonction de l'absorption de longueurs d'onde spécifiques. Les micro algues produisent des pigments essentiels à la photosynthèse.

Ils contiennent de la chlorophylle et des caroténoïdes. Les micro algues eucaryotes *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis* sont des organismes producteurs de pigments (Pignolet et *al.*, 2013) (fig. 22).

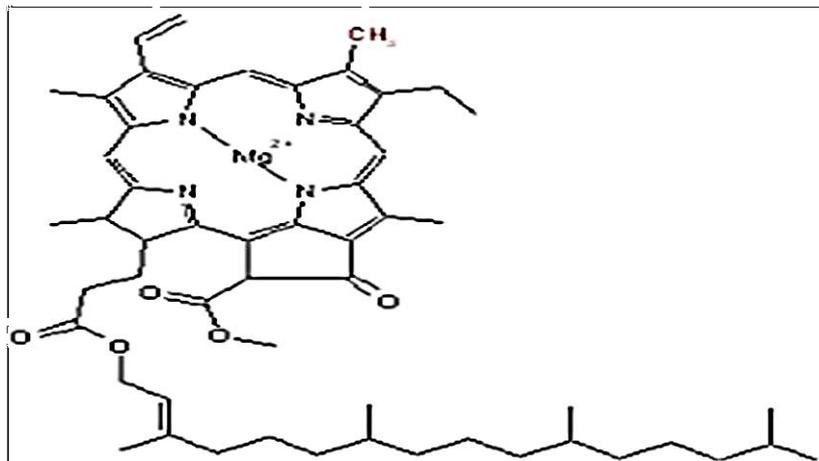


Figure 21: Structure de la chlorophylle

Les pigments tels que les caroténoïdes (orange – rose) et les phycoérythrine (rouge) sont utilisés comme colorants en cosmétique et en industries agro – alimentaires (Rebelloso et *al.*, 2000). Il existe deux principaux types de pigments :

#### ➤ Pigments actifs :

Ce sont les pigments qui ont la capacité de convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique, et parmi les pigments actifs les plus connus, la chlorophylle, car sa couleur verte indique sa grande capacité à absorber la lumière. (Rebelloso et *al.*, 2000).

➤ **Pigments accessoires :**

Ils n'ont pas la capacité de convertir l'énergie, mais ils contribuent à activer le transport de la chlorophylle.

**III.1 Caroténoïdes**

Les caroténoïdes sont des pigments plutôt orange et jaunes répandus chez de très nombreux organismes vivants. Liposolubles, ils sont en général facilement assimilables par les organismes.

Ils appartiennent à la famille chimique des trapézoïdes, formés à partir de la polymérisation d'une cinquantaine d'unités isopréniques à structure aliphatique ou alicyclique.

Il est généralement admis qu'ils suivent des voies métaboliques similaires à celles des lipides. Ils sont synthétisés par toutes les algues, toutes les plantes vertes et par de nombreux champignons et bactéries dont les cyanobactéries. Ils sont absorbés par les animaux dans leur nourriture. (Rebeloso et *al.*, 2000).

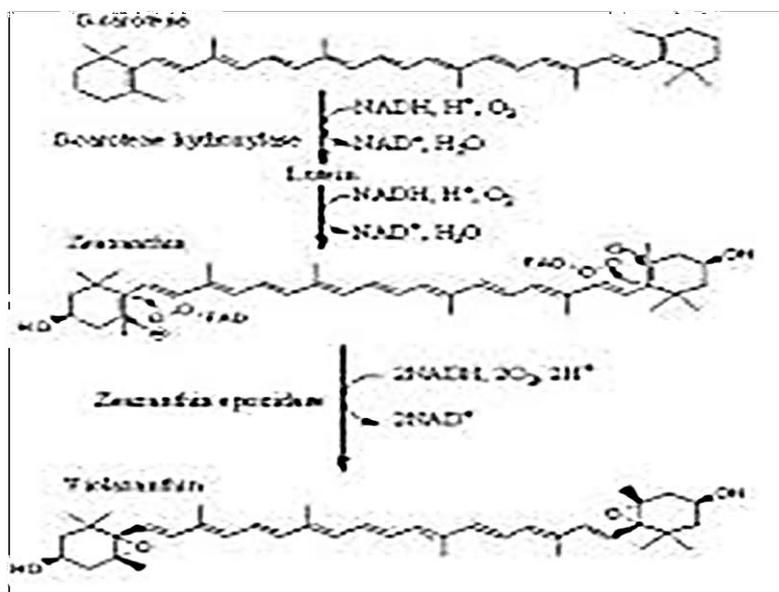
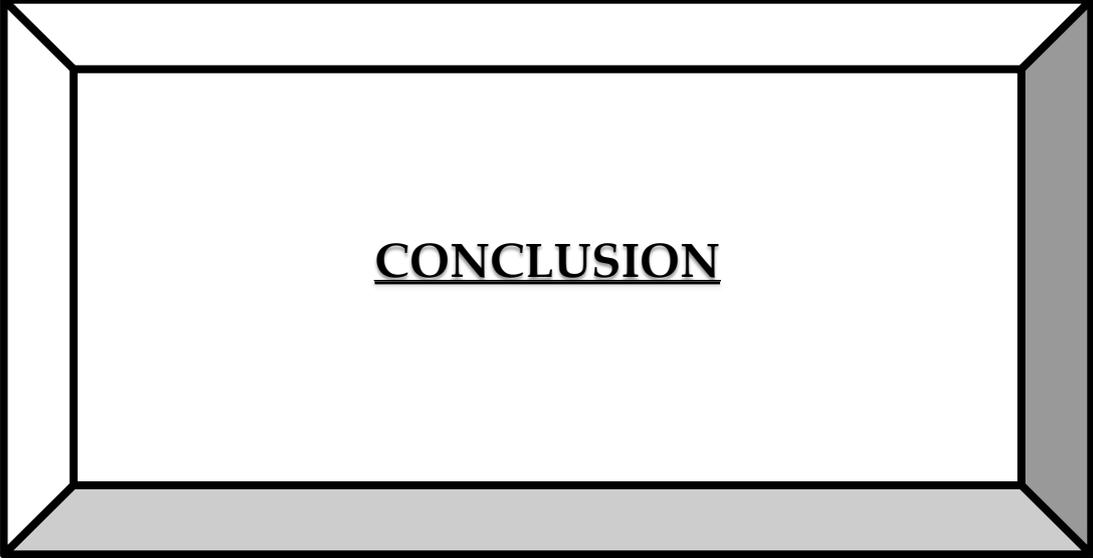


Figure 22: Exemple de structure de caroténoïdes



CONCLUSION

En conclusion et après avoir présenté cette étude nous avons précisé et défini les points positifs et l'importance de l'utilisation des micro algues leurs domaines d'application.

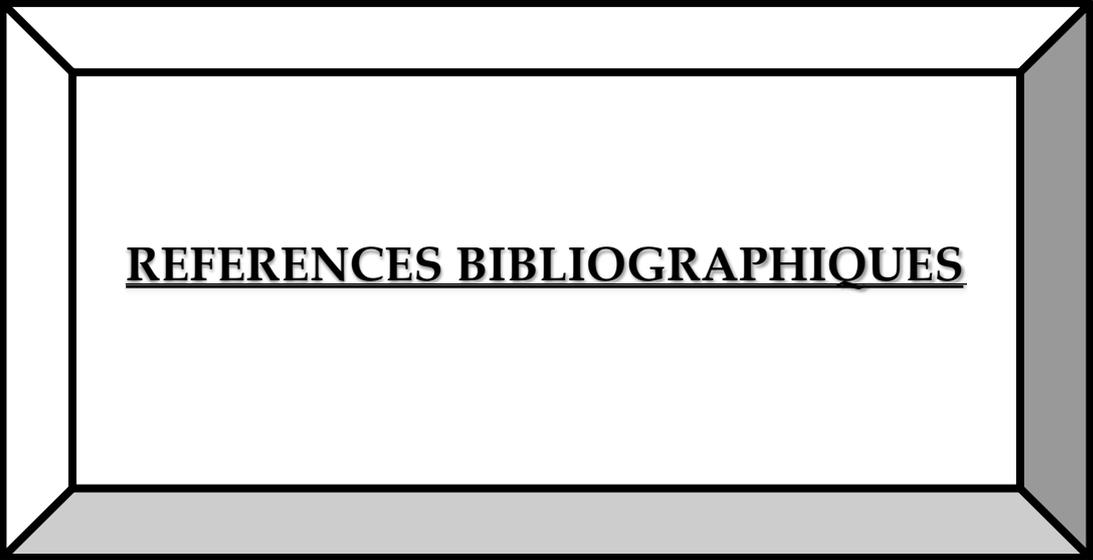
Par ailleurs, il ressort de tout ce qu'il a été dit :

A. L'existence de plusieurs barrières et verrous technologiques qui empêche le développement de la filière algale parmi lesquels le prix des cultures et de récolte.

Afin de trouver des solutions à ces problèmes de culture et de réduire le budget couteux de cultures algales. Une transplantation d'une nouvelle technologie algale qui utilisant des effluents laitiers qui sont riches en matière organique et autres substances qui aide à la croissance des micro algues comme base de milieu de culture peut répondre la problématique des coûts de production.

B. Le rôle que peut jouer les micro algues dans la bio remédiation s'avère à double effet. En effet, la culture des micro algues sur les effluents laitiers peut d'une part réduire les coûts de production des composés biologiques actifs mais d'autre part il réduit les pourcentages de ces effluents et minimiser ainsi leur impact sur l'environnement.

Néanmoins, les technologies actuelles sont encore en cours de recherche et nécessite plus de connaissances scientifiques et des études à l'avenir pour améliorés les rendements de ces cultures à base d'effluents pour être compétitif comparé aux cultures sur un milieu commerciale.



**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Djillali Ghobrini, Tomáš Brányik, Saliha Yakoub-Bougdal, Kamal Aïboud, Leila Kebbab, Djamel Daoud, Nacéra Lahouel Rachid Bouarab, Mohammed Oumsalem, and Lyes Zanoun. (2019)** Production of biodiesel from locally isolated yellow strain of *Chlorella* sp. using wastewater from dairy effluents as a growth medium. AIP Conference Proceedings 2190, 020097 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5138583>.
- Djillali Ghobrini, Tomáš Potocar, Jana Smolova, Gabriela Krausova, Saliha Yakoub-Bougdal and Tomáš Brányik. Heterotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* using saline waste water from the demineralization of cheese whey. *Biotechnology Letters* 42(2) : 209–217 (2020).
- Andrad L., Motta G, and Amaral, M. (2013).**Treatment of dairy wastewater with a membrane bioreactor, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 30, n°04, p. 759-770.
- Barbara, Clemeut-Larosière.(2012).** Etude de la croissance de *Chlorella vulgaris* en photo bioréacteur batch et continu, en présence de concentrations élevées de CO<sub>2</sub>. Autre. Ecole Centrale Paris, Français. NNT: 2012ECAPO005.
- Bardy S,Bentz M.,Bussleret.,Chatras J ET Fontaine L ET Gaugler M. Lechat A ET Langronne O.,( 2016).** Rapport de projet " valorisation du lactosérum ".(2016).
- Benjamine Moutel.** Etude de l'intérêt pharmaceutique et d'une Production industrielle des lipides issus de la Micro algue *Botryococcus bruni*. université de Nantes UFR Sciences Pharmaceutiques et Biologiques.
- Bouchia Khawla., Lemgoud Lamisse.(2018).** Caractérisation biochimique de la souche *Chlorella*. spSG1 durant le processus de la lipogenèse (effect du NaCl). Université Larbi Ben Mhidi Oum el Bouaghi. ( 2018).
- Bourbon B.,(2018).** Gestion des effluents et des boues issus de la transformation laitière.Eds.Actalia,18p. (2018).
- Burgaud. J. L.** Les eaux résiduaires dans l'industrie laitière. *Le Lait*, INRA Editions, 1969, 49(487), pp.417-433. fihal-00928495
- Celine Dejoye.(2013)** . Eco-extraction et analyse de lipides de micro-algues pour la production d'algo- carburant, Autre, Université d'Avignon. 2013. Français. NNT: 2013AVIG0251.

- Djillali Ghobrini, Tomáš Brányik, Leila Kebbab, Bastien Poutout, Kamal Aïboud et Saliha Yakoub-Bougdal.** Cultivation of *Chlorella vulgaris* Using Medium From a Dairy Effluent. Publisher IEEE Xplore 02 May 2019. Published in: 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) Rabat, Morocco, Morocco. DOI: 10.1109/IRSEC.2018.8702962
- Dollé, J. B., et Smati, M., (2005).** Les effluents et boues des industries laitières, Institut de l'élevage (2005).
- Maref Noureddine (2019).** Polycopie de cours. Traitement et 'épuration des eaux. Université Djillali Liab`es de Sidi Bel Abb`es. 2019/2020.
- Ghenabzia Sara(39077089)., Ghenabzia Sara(39077093).(2019).** Contribution à l'inventaire des micro algues d'intérêt bio remédiable isolées de la région de Biskra et d'El-oued. Université Echahid Hamma Lakhdar -El OUED.(2019).
- Burgaud. J.L .(1969).** Les eaux résiduaires dans l'industrie laitière. Le Lait, INRA Editions, 1969, 49(487), pp.417-433. fhal-00928495f
- Jacky V, (2020).** Scientific Director Bioeconomy Innovation Manager –Biobased Chemical and Bio technology. biomasse marine: plongez au cœur de l'innovation & des marchés» (2020).
- Rayen Filali.(2012).** Estimation et commande robustes de culture de micro algues pour la valorisation biologique de CO<sub>2</sub>.. Autre. Supélec, 2012. Français. ffNNT : 2012SUPL0007ff. fftel-00765421f
- Khaldi Hafidha. et Zeggaoui Zohra .** Contribution à l'étude de la production de biomasse chez un micro algue verte *Chlorella sp* souche isolée dans le parc national du Djurdjura (forêt de Darna). Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques.
- Mélanie Salomez.** «Promouvoir la maîtrise de l'énergies et l'utilisation rationnelle des énergies renouvelables, et préserver les ressources naturelles locale dans une perspective de Développement durable et d'adaptation aux changements climatiques » Prenez contact avec notre équipe.
- Hela Ben Amor Ben Ayed.** Etude et optimisation de la bioaccumulation de magnésium

dans les micro algues « *Chlorella vulgaris* ». L'Université paris-Saclay et de l'université de Sfax.

-**Asfour Nadia Yasmine.(2019)** Production en masse de micro algues : optimisation des paramètres physico-chimiques. Université Oran .(2019) .

- **Ben Mehraz Ahcene, Louelh Djamel** .Contribution à l'évaluation de la qualité des effluents industriels au niveau de l'Entreprise Nationale des Industries de l'Electroménager « ENIEM »p8-18.

-**Olfa Beji.(2018)**. Traitement des eaux usées dans des bioréacteurs multi trophiques grâce à des floccules de micro algues-bactéries valorisables en biogaz. Génie des procédés. Université de Lorraine: Université de Carthage (Tunisie), 2018. Français. NNT: 2018LORRO289.

-**Rayan filali** .Estimation et commande robustes de culture de micro algues pour la valorisation biologique de CO<sub>2</sub>.Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes.

-**René Moletta., Michel Torrijos**. Impact environnemental de la filière laitière. F 1 500.© Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés.

**Céline Dejoye. (2013)**. Eco-extraction et analyse de lipides de micro-algues pour la production d'algocarburant. Autre. Université d'Avignon, 2013. Français. ffNNT : 2013AVIG0251ff. fftel-01712195f.

-**Taghezout Fatima,(2015)**.Impact Environnemental Des Rejet D'eau le long Du littoral occidental Algérien ,Université De Oran.(2015).

-**Samah Ikram , (2018)**. Détermination et identification des bactéries lactiques dans le lactosérum issu du processus de fabrication du fromage (camembert) à base de laits de vaches , université Abdel Hamid Ibn Badis Mostaganem.(2018).