

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie des Procédés



Mémoire de Fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master
en Génie de l'environnement

Présenté par
Ainennas Madjid

Thème

**Etude de la croissance de trois microalgues :
Les Entéromorphes, Cladophores et Spirogyres**

Soutenu le 25/06/2016 devant le jury composé de :

DIB Abdelhafid	Maître de conférences-A	Président
BEHLOUL Mourad	Maître de conférences-B	Examineur
HAMACHI Mourad	Maître de conférences-A	Encadreur

Promotion 2015/2016.

Remerciements

Je remercie particulièrement mon encadreur Monsieur Mourad HAMACHI, pour sa grande disponibilité, son apport scientifique indéniable, ses précieux et nombreux conseils ainsi que la qualité exceptionnelle de son encadrement.

Je remercie sincèrement Madame O'URARI pour sa constante disponibilité et son implication tout au long de mon travail

Je remercie Monsieur H. DIB d'avoir accepté de présider le jury.

Je remercie vivement Monsieur M. Behloul d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Nadia ZAIDI merci. C'est un mot trop simple. Ce que je souhaiterais exprimer est au-dessus de cela. Je suis à la fois touché et reconnaissant pour l'aide que tu m'as apportée...et je ne pourrai jamais te remercier assez

Je remercie tous les personnes qui m'ont aidé pour la réalisation de ce travail.

Dédicace

*Merci à mes parents, mes frères et sœurs pour être toujours là,
disponible tout le temps. Mille mercis seraient trop peu. Merci
aussi pour mes amis, bien que je sache que pour vous ce n'est que
du bonheur*

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION1

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Généralités sur les micro-algues

I.1 Définition	2
I.2 La photosynthèse.....	3
I.3 Les caractéristiques des microalgues.....	5
I.3.1 Les principales familles des microalgues.....	5
I.3.2 Les diatomées (bacillariophycées).....	5
I.3.3 Les algues vertes	6
I.3.4 Les algues bleues ou cyanobactéries.....	6
I.3.5 Les algues dorées.....	7
I.4 Mode de vie et reproduction.....	8
I.4.1 Milieu de vie.....	9
I.4.2Influence de milieu de vie	10
I.5 La culture des microalgues.....	11
I.5.1 La température.....	11
I.5.2 La luminosité.....	11
I.5.3 Le pH.....	11
I.5.4 Les nutriments.....	12

I.6 Les Molécules d'intérêts produites par les microalgues.....	12
I.6.1 Les lipides	12
I.6.2 Les protéines.....	12
I.6.3 Les pigments.....	12
I.6.4 Les polysaccharides.....	13
I.7 Les modes de culture chez les microalgue.....	13
I.7.1 La culture en batch.....	13
I.7.2 La culture en continu	13
I.8 Système de cultures des microalgues.....	14
I.8.1 Systèmes ouverts.....	14
I.8.2 Système fermé.....	15
I.8.3 Les fermenteurs.....	20
I.9 La récolte des microalgues.....	20
I.9.1 La filtration.....	21
I.9.2. La centrifugation.....	21
I.9.3. La floculation.....	21
I.9.4. La fraction de la mousse.....	21
I.10. Le séchage de la pâte algale.....	22
I.11. Les procédés d'extraction.....	22
I.11.1. Etape préalable à l'extraction.....	22
I.12. Méthode d'extraction.....	22
I.12.1 L'extraction par solvant organique.....	22
I.12.2 L'extraction en condition de haute température et haute pression.....	23
I.12.3 Procédé biocompatible.....	24

I.13 Domain d'application des microalgues.....	25
I.13.1 Alimentation humaine et animale.....	25
I.13.2 Pharmaceutique et cosmétique.....	25
I.13.3 Environnement et énergie.....	26
I.13.4 Production d'énergie.....	27
I.14 Conclusion	29

CHAPITRE II

Matériels et Méthode Expérimentales

II.1 Le dispositif expérimental	30
II.1.1. Le réacteur en plexiglas.....	30
II.1.2. La pompe à air.....	30
II.1.3. Le système d'éclairage.....	30
II.1.4. Ballon de CO ₂	31
II.1.5. pH mètre et thermomètre.....	31
II.1.6. Paroi optique (miroir).....	31
II.2 Matériel biologique.....	32
II.33 Technique d'analyse des microalgues.....	34

CHAPITRE III

III.1 Préparation du photobioréacteur	36
III.2 Etude de la croissance des micro-algues	37
III.2.2 Influence de l'intensité lumineuse a la croissance des micro-algues.....	38

III.2.3 Influence de l'agitation	39
III.3 Influence des nutriments a la croissance des micro-algues.....	42
III.2.4.1 Milieu de Gorham's.....	41
III.2.4.2 Milieu de bold.....	43
III.4 Conclusion	46
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	47
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	48

Liste des figures

N°	Titres	Page
1	Algue verte	1
2	Schéma d'un bilan photosynthèse	2
3	cycle de Calvin Benson	3
4	diatomées (Cocconeis)	5
5	Algue vertes (chlorophycées)	6
6	Algues blues (cyanobactéries)-Oscillatoria	6
7	Algues dorées Dinobryon	7
8	Organigramme pour déterminer si un organisme est autotrophe, hétérotrophe	9
9	Modélisation de la cinétique de croissance algale	10
10	différent bassins à system ouvert	15
11	photobioreacteur plan	17
12	- Photobioréacteurs de type colonne à bulles (Scobalit) utilisés classiquement en éclosion	18
13	Photobioréacteurs annulaires verticaux	19
14	photobioreacteur tubulaire	20
15	Concept de production d'huile de micro-algues visant à obtenir du biodiesel	24
16	Les quatre principaux processus de valorisation énergétique de la biomasse de micro-algues	28
17	différents domaine d'application des micro-algues	28
18	Schéma du dispositif expérimental	31
19	Algue verte (Enteromorpha)	32
20	Cladophora	33
21	Spirogyra	34
22	Le microscope binoculaire de type Zeiss	35
24	Micro-algue après et avant purification	36
25	effet de CO ₂ sur la croissance des micro-algues en fonction du temps	38
26	- effet de intensité lumineuse sur la croissance des micro-algues en fonction du temps	39
27	Influence de l'agitation sur la culture des micro-algues	42
28	Evolution de la masse des micro-algues en fonction du temps dans le milieu de Gorham's	43

Liste des tableaux

N°	Titres	Page
1	Effet de CO ₂ sur la croissance des micro-algues en fonction du temps	37
2	Effet de l'intensité lumineuse sur la croissance des micro-algues en fonction du temps	39
3	Influence de l'agitation sur la culture des micro-algues	40
4	Evolution de la masse des micro-algues en fonctions tu temps dans le milieu de Gorham's	43
5	Evolution de la masse de culture des micro-algues en fonction du temps dans le milieu de Bold	45

INTRODUCTION

Introduction

Actuellement, le réchauffement climatique dû notamment à l'utilisation massive d'énergies fossiles est responsable de fortes émissions de gaz à effet de serre en particulier le CO₂. Si la prise de conscience de l'opinion publique est réelle, les politiques mondiales ont du mal à se mettre d'accord sur les mesures à mettre en place pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. [1]

Une des solutions proposées serait l'utilisation de microorganismes photosynthétiques afin de capter le CO₂ au niveau des sites industriels. Dans ce but, l'utilisation des microalgues pour le piégeage et le stockage de CO₂ est actuellement un domaine de recherche en pleine expansion [2]

D'après certains auteurs la production de 100 tonnes de biomasse algale permettrait la capture de 180 tonnes de CO₂ (Chisti, 2007). Cependant il faut rester vigilant sur la faisabilité de ces chiffres qui se basent sur des calculs théoriques ; l'efficacité de la fixation de CO₂ par les microalgues est fortement dépendante des conditions environnementales. [3]

Ce manuscrite est organisé en trois chapitres :

- ✚ Dans le premier chapitre, une étude bibliographique est consacrée aux micro-algues et à leur mode de culture
- ✚ Le second chapitre s'intéresse à la présentation du matériel et des méthodes expérimentales ayant permis la réalisation pratique de cette étude.
- ✚ Le troisième chapitre permet de décrire et de discuter les résultats obtenus
- ✚ Une conclusion et des perspectives vont finaliser ce mémoire.

CHAPITRE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Généralités sur les microalgues

I.1. Définition

Les microalgues sont des organismes microscopiques unicellulaires. On utilise le terme «micro» car la taille d'une microalgues varie de quelques micromètres à une centaine de micromètres. Pour les étudier, il est nécessaire de les observer au microscope optique ou au microscope électronique, ce qui permet de voir plus de détails, en particulier ceux relatifs à leur morphologie.

La plupart des microalgues se développent en milieu aquatique d'eau douce, saline ou saumâtre, mais certaines sont terrestres et sont capables de se développer à même le sol ou sur le tronc des arbres.

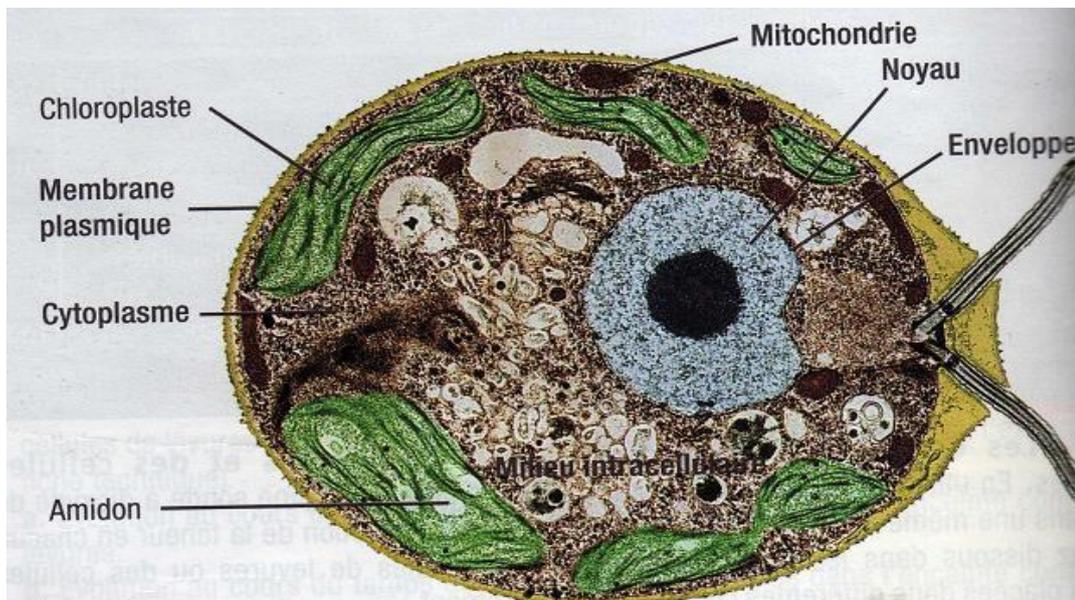


Figure 1: Structure d'une algue unicellulaire (coloré artificiellement)
Chlamydomonas sp. Observée au MET (x7000)

Comme chaque organisme possédant des chloroplastes, les microalgues sont capables de transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique pour leurs développements, c'est ce qu'on appelle la photosynthèse

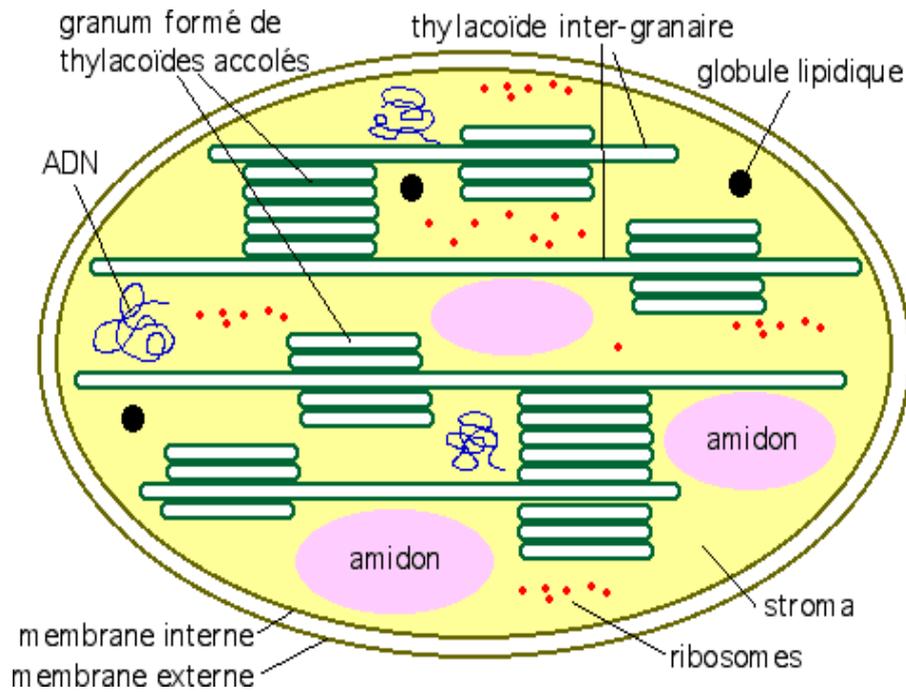


Figure 2 - Schéma d'un chloroplaste [9]

I.2. La photosynthèse

✚ Interception de l'énergie lumineuse

L'énergie lumineuse constitue l'apport initial permettant l'assimilation du carbone et d'autres éléments par les êtres vivants chlorophylliens lors de la photosynthèse : synthèse de matière organique à partir de la lumière. La photosynthèse se déroule dans les chloroplastes des tissus chlorophylliens comme le mésophylle.

Elle commence par une phase photochimique dans laquelle un réducteur fort (NADPH) et de l'énergie sous forme d'ATP (adénine tri phosphate) sont élaborés. L'énergie lumineuse absorbée par les photosystèmes assure un transfert d'électrons fournis par l'eau. Puis la phase chimique comporte une carboxylation catalysée par la RubisCO qui consiste à réduire le CO_2 . Dans cette phase ce sont les NADPH et ATP formés précédemment qui sont utilisés.

✚ La réduction du CO₂

Les microalgues contiennent différents pigments essentiels parmi lesquels la chlorophylle. Il s'agit d'une métalloprotéine c'est à dire un noyau tétra-pyrrolique substitué et centré sur un ion métallique.

Elle possède une longue chaîne hydrophobe ce qui augmente sa solubilité dans le milieu apolaire de la membrane. Son rôle est d'absorber l'énergie lumineuse puis la convertir en énergie chimique (ATP et NADPH, H⁺). Chez les microalgues, on trouve de la chlorophylle avec une concentration supérieure à 10 µg/l. Elles contiennent également la lutéine en forte concentration qui est un pigment caroténoïde, fréquemment utilisé en pharmacologie pour soigner les maladies oculaires du vieillissement.

Les réactions photochimiques de la photosynthèse vont permettre la réduction du CO₂ et former les glucides. Ce recyclage est réalisé grâce au cycle de Calvin Benson [4]

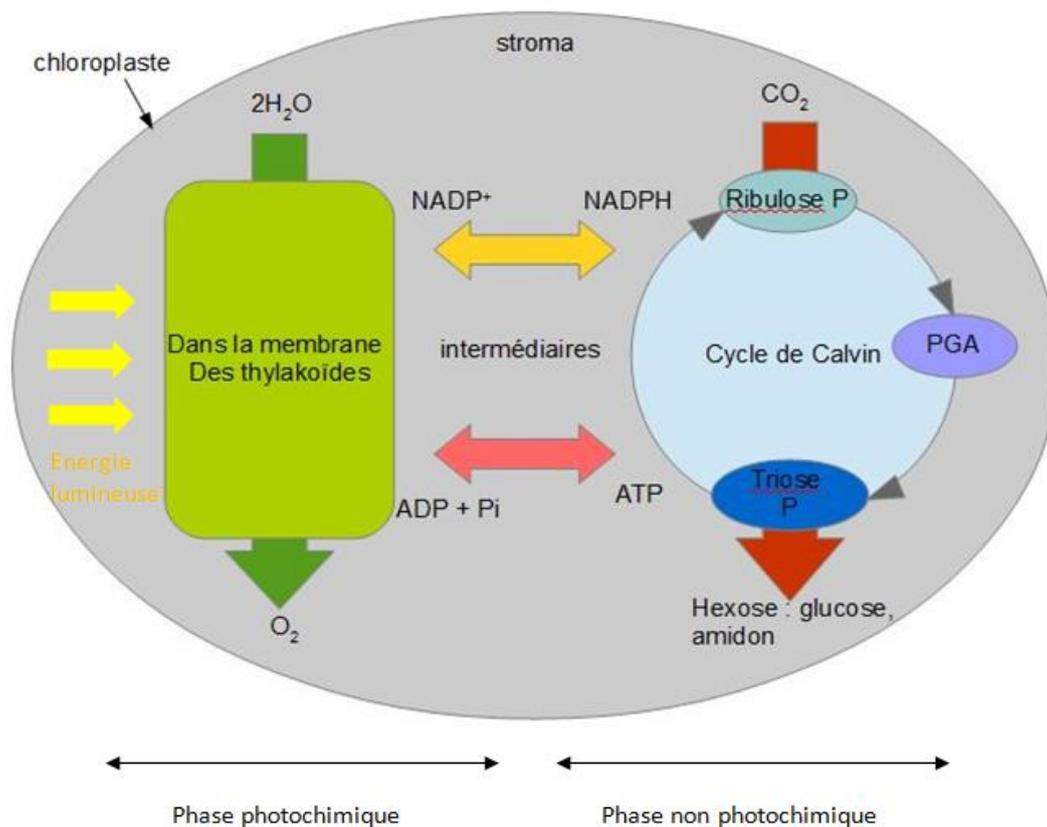


Figure 3 : bilan de la photosynthèse [9]

I.3. Les caractéristiques des microalgues

I.3.1. Les principales familles des microalgues

Toutes les espèces de microalgues ne sont pas connues mais on estime leur nombre à 200 000 mais seulement environ 30 000 espèces ont déjà été analysées. Ce qui représente moins de 10 % du total existant estimé. Il existe différents groupes de microalgues, les plus connus sont les algues vertes (chlorophytes) : Environ 17 000 espèces, et les algues rouges (rodophytes) Il s'agit principalement d'espèces marines.

Les scientifiques ont analysé les microalgues pour les distinguer et les diviser en plusieurs classes selon des critères généraux. Des critères comme la pigmentation, la structure biologique et le métabolisme, Ainsi les espèces sont classées en 11 divisions et en 29 classes. Les quatre classes les plus communes sont les diatomées (bacillariophycées), les algues vertes (chlorophycées), les cyanobactéries (cyanophycées) et les algues dorées (chrysophycées)

I.3.2. Les diatomées (bacillariophycées)

Les Diatomées forment la majeure partie du phytoplancton dans les zones les plus froides de l'océan et représentent la seule source d'alimentation pour les animaux vivant dans ces régions. On peut trouver jusqu'à 1 000 000 de diatomées par litre d'eau de mer.

Lorsque les diatomées meurent, leur contenu cellulaire se décompose et il ne reste plus que cette paroi externe qui sédimente et qui forme une roche que l'on appelle la diatomite ou terre de diatomées ('diatomaceous').

Les diatomées sont un indicateur de la pollution de l'eau, les tolérances de différentes espèces ont été déterminées vis à vis de facteurs environnementaux (concentration en sels, pH, éléments nutritifs, azote, température)



Figure 4- diatomées (Cocconeis)

I.3.3 Les microalgues vertes

Les algues vertes sont aussi appelées chlorophycées venant du mot latin chlorophyceae. Elles désignent un groupe d'organismes variés comprenant au moins 17 000 espèces et dont les tailles sont différentes : elles peuvent atteindre une épaisseur de 25 cm et une longueur de plus de 8 m. Leur origine et leur date d'apparition sur la Terre sont encore très discutées, mais grâce à la chlorophylle et à l'énergie lumineuse, elles vont apparaître et devenir les ambassadrices des végétaux terrestres. Ces êtres vivants sont favorables à la planète non seulement car ils assurent la vie de nombreux animaux qui s'en nourrissent, mais aussi car ils sont favorables à l'écologie en oxygénant les mers et océans. Certaines espèces d'algues vertes sont défavorablement célèbres car elles ont le rôle d'indiquer les dérèglements causés par l'homme : par exemple certaines sont impliquées dans l'extension des marées vertes alors que d'autres sont source d'envahissement des fonds méditerranéens. Cette variété d'algues se trouve en général dans les eaux douces et particulièrement à la surface de l'eau, au niveau haut des eaux.



Figure 5: microalgue vertes (chlorophycées)

I.3.4 Les microalgues blues ou cyanobactéries

L'algue bleue est une sorte de bactérie. Les scientifiques l'appellent d'ailleurs cyanobactérie.

Elle tire son nom d'un pigment bleu, la phycocyanine, qui, de concert avec la chlorophylle, lui donne son apparence bleu vert. Les cyanobactéries se forment dans les eaux peu profondes et les phosphates en sont un des principaux catalyseurs [5]

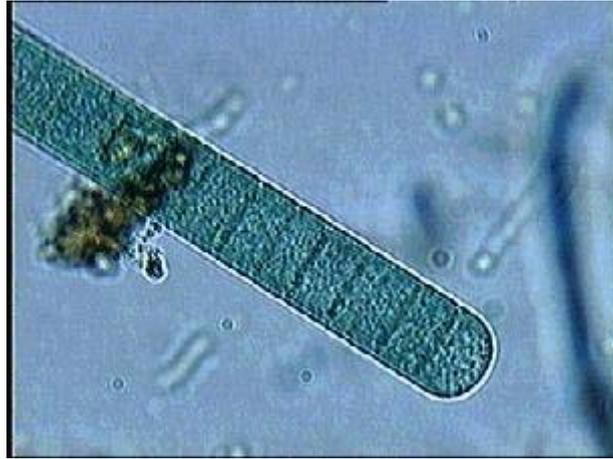


Figure 6- microalgues blues (cyanobactéries)-Oscillatoria

I.3.5 Les microalgues dorées (chrysophycées)

Les chrysophycées sont des algues unicellulaires de couleur brun-jaune vivant souvent parmi le plancton en eau salée ou en eau douce. Leur couleur caractéristique est due aux pigments caroténoïdes qu'elles contiennent. Une chrysophycée possède généralement deux flagelles situés à l'une des extrémités de la cellule. Elles sont toutes photosynthétiques. Par exemple : *Dinobryon* , vivant en colonies en eau douce [5]



Figure 7 - microalgues dorées Dinobryon

I.4. Mode de vie et reproduction

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

Mode autotrophe

Un organisme autotrophe est un organisme capable de générer sa propre matière organique à partir d'éléments minéraux. Il utilise pour cela l'énergie lumineuse soit par photosynthèse, soit par chimiosynthèse chez quelques espèces. [6]

Mode hétérotrophe

C'est le mode de nutrition qui permet l'assimilation directe des substances organiques, de façon plus ou moins indépendante de la photosynthèse. La croissance algale à l'obscurité, sur des milieux contenant des matières organiques, est connue depuis longtemps. Les algues sont en effet capables d'utiliser et d'assimiler des substances organiques dissoutes et même particulières par phagotrophie. Longtemps ignoré, ce mode de nutrition fait actuellement l'objet de nombreuses études, d'une part pour déterminer les différentes matières organiques que les algues peuvent utiliser, d'autre part pour étudier la signification écologique de ce mode de nutrition [6]

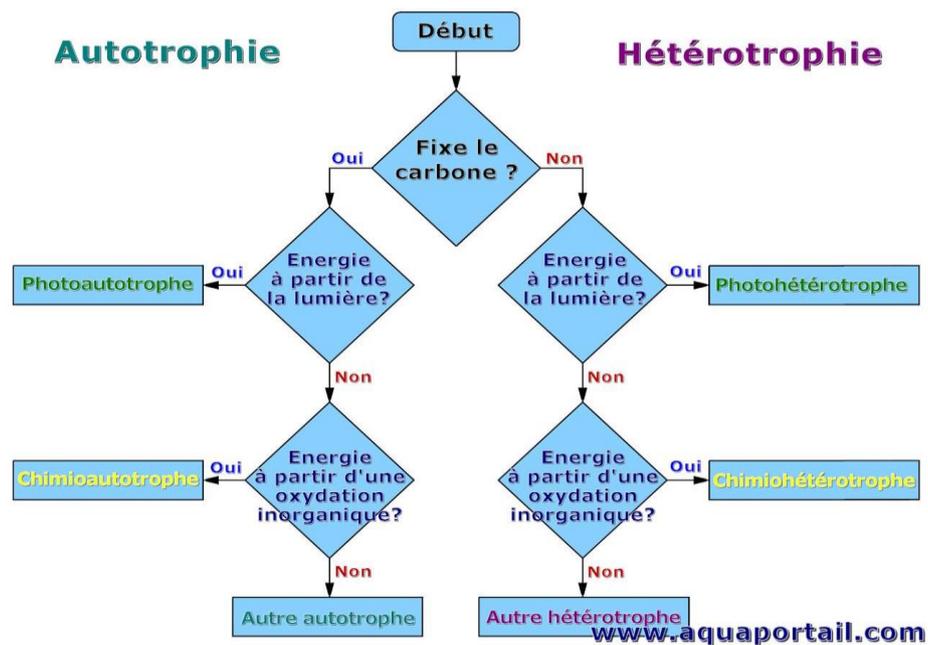


Figure 8 - Organigramme pour déterminer si un organisme est autotrophe ou hétérotrophe [7]

I.4.1. Milieu de vie

Les microalgues sont des êtres photosynthétiques, c'est-à-dire qu'elles sont capables de produire de la matière organique à partir d'éléments minéraux grâce aux processus d'assimilation photosynthétique. Dès lors qu'elles disposent de la lumière, elles vont assimiler les éléments minéraux nutritifs comme le potassium, le sodium, le calcium et le magnésium, des oligo-éléments (molybdène, zinc, cuivre) et le CO₂ dissous dans l'eau pour produire leurs constituants cellulaires. Dans leur cytoplasme, elles possèdent des chloroplastes, organites renfermant des pigments chlorophylliens. Ces pigments assurent le captage de l'énergie lumineuse, qui est ensuite utilisée pour synthétiser la matière organique nécessaire à la cellule, à partir des éléments minéraux nutritifs. Les microalgues sont donc des êtres autotrophes par photosynthèse mais il est possible que certaines d'entre elles, comme les euglènes, deviennent hétérotrophes lorsqu'elles sont placées dans des conditions défavorables de survie. Par exemple, si des microalgues sont placées dans le noir, elles perdent leurs chloroplastes et deviennent dépigmentées : elles vont s'alimenter alors grâce à la matière organique présente dans le milieu. Notons que chez certaines microalgues, en majorité les cyanobactéries filamenteuses, sont capables de fixer l'azote de l'air, grâce à des structures spécialisées appelées hétérocystes, qui contiennent une enzyme la nitrogénase. Cet hétérocyste n'est pas capable de photosynthèse mais il est en relation avec les cellules

somatiques adjacentes qui lui fournissent les matières carbonées en échange de composés azotés

I.4.2. Influence de milieu de vie

La croissance d'une culture de microalgues est contrôlée par un très grand nombre de facteurs dont les plus importants qui sont la lumière (intensité et photopériode), le pH, les nutriments, les concentrations en CO₂ et O₂ et l'état physiologique. Ainsi une augmentation soudaine de l'intensité lumineuse favorise la production de lipides.[7]

✚ Modélisation de la cinétique de croissance algale

La maîtrise de la cinétique de croissance est également importante : les microalgues sont capables de se multiplier de manière rapide dans des conditions favorables (selon un cycle de développement en 4 temps : phase de latence, croissance exponentielle, phase stationnaire, décroissance rapide). Ainsi garder la culture en phase de croissance exponentielle le plus longtemps possible permet de bénéficier d'un matériel biologique en abondance. [7]

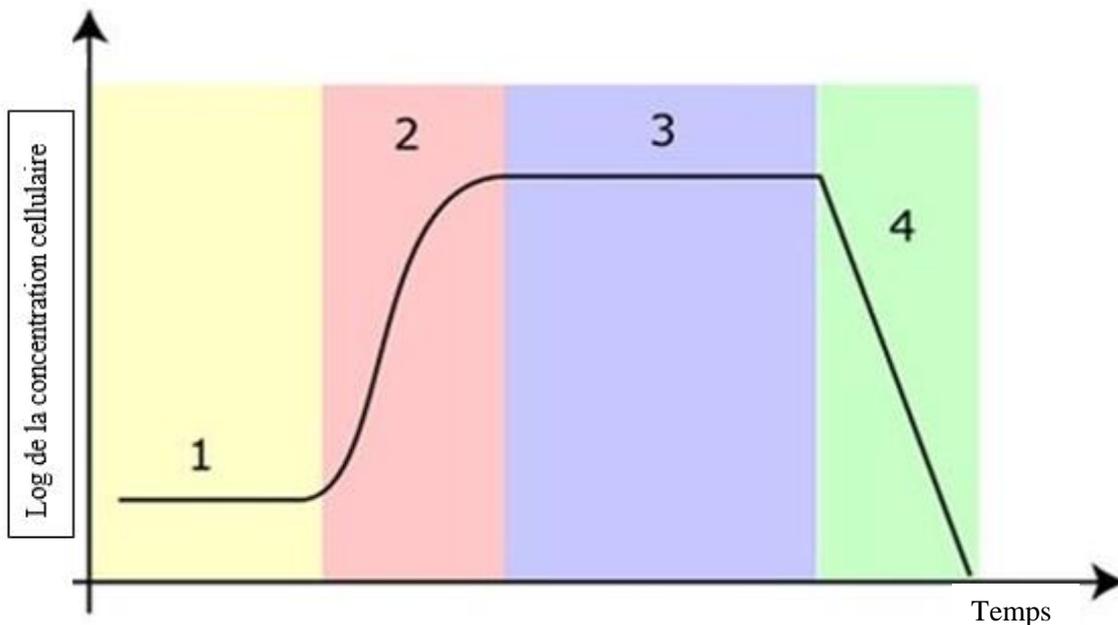


Figure 9 –Modélisation de la cinétique de croissance algale

I.5. La culture des microalgues

Une culture des microalgues doit respecter des paramètres physiques précis qui sont nécessaire à la reproduction de celles-ci.

I.5.1. La température

La température permet de réguler la vitesse des réactions. Une microalgue peut se trouver dans des endroits complètement différents en fonction de l'espèce. Ainsi, chaque espèce de microalgue a un optimum de température précise. Par exemple une microalgue qui est prélevée à l'état naturel dans un climat tropical entre 28 et 30 degré, nous permet de déduire que cette température correspond à celle dans laquelle la microalgue se développe le mieux. Si elle est prélevée dans une zone plus fraîche, sa température de production va diminuer un peu. [8]

I.5.2. La luminosité

Les microalgues ont besoin de lumière pour vivre et ce facteur physique est très important. Plus la culture est exposée à la lumière et plus les conditions de cultures seront optimales. De plus les régions les plus ensoleillées seront les plus efficaces pour cultiver des microalgues. Une lumière artificielle peut aussi être utilisée mais il faut que celle-ci émet à des longueurs d'ondes précises comme celle dans le rouge et celle dans le violet et le bleu. En effet ce sont celles que les algues utiliseront pour la photosynthèse. Cependant, l'exposition à la lumière doit quand même être régulée car l'excès de lumière peut entraîner une photo-inhibition, c'est-à-dire la diminution de la vitesse de photosynthèse, ce qui peut être nuisible à la production. [8]

I.5.3. Le pH

Chaque microalgue a un pH particulier. Avec un pH optimal, la microalgue aura plus de facilité à se reproduire et la culture sera plus rentable. Il faut donc étudier le pH des milieux de culture en fonction de l'algue à cultiver. De plus le pH est un facteur à contrôler souvent car les microalgues ont tendances à alcaliniser le milieu. C'est pourquoi ce facteur physique doit être contrôlé pour que le milieu de culture ne s'alcalinise pas trop. [8]

I.5.4. Les nutriments

L'ajout de nutriments dans le bassin de culture permet un rendement meilleur mais il faut savoir quels minéraux choisir pour produire plus de microalgues. Ces nutriments diffèrent en fonction de la zone géographique où l'algue a été prélevée. Des algues prélevées en eau douce n'auront pas les mêmes besoins en nutriments que les algues en eau de mer. [8]

I.6. Les Molécules d'intérêts produites par les microalgues

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

I.6.1. Les lipides

Les lipides sont des constituants indispensables des cellules de microalgues. On les retrouve au niveau structural (phospholipides constitutif des membranes) et énergétique (molécules de réserve). Globalement, les microalgues peuvent être composées de lipides à hauteur de 16 à 75% de leur masse sèche en fonction des espèces. Les microalgues stockent les lipides sous forme de triglycérides. Les lipides sont principalement utilisés pour la fabrication de biocarburants. L'environnement et les conditions de cultures impactent la composition et la teneur en lipides des microalgues. [9]

I.6.2. Les protéines

Les microalgues produisent une quantité non négligeable de protéines à hauteur de 6 à 71% de leur masse sèche en fonction des espèces. A titre d'exemple, *Chlorellavulgaris* accumule jusqu'à 46% de protéines et *Arthrospiraplatensis* 70%. Les protéines issues des microalgues constituent donc une fraction importante de la biomasse et elles sont une source importante d'acides aminés dont des acides aminés essentiels. La production de protéines par les microalgues diminue logiquement lors de carences en azote. Elle est maximale lorsque les microalgues sont en phase exponentielle de croissance. [9]

I.6.3. Les pigments

Les microalgues produisent des pigments qui sont indispensables à la photosynthèse. Les pigments sont des molécules complexes qui ont la capacité de changer la couleur de la lumière réfléchiée ou transmise en fonction de l'absorption de longueurs d'onde spécifiques. [9]

Les pigments tels que les caroténoïdes (orange-rose) et les phycoérythrine (rouge) sont utilisés comme colorants en cosmétique et en industries agroalimentaires. Ils peuvent également être utilisés pour leur fluorescence, dans les immunotests diagnostiques. [9]

I.6.4. Les polysaccharides

Les saccharides ou glucides sont les macronutriments les plus répandus dans la matière vivante et la majeure partie d'entre eux est produite lors de la photosynthèse. Ils représentent 5% de la masse sèche des animaux et jusqu'à 70% de celle des végétaux et sa formule chimique est $C_n(H_2O)_n$. Les polysaccharides sont des molécules de haute masse molaire pouvant atteindre plusieurs millions de g/mol. Les microalgues produisent différents types de polysaccharide. Ainsi, les micro-algues produisent en fonction des espèces, des polysaccharides de structure également qualifiés de polysaccharides fibrillaires qui participent à la formation de la paroi des cellules, des polysaccharides de réserve énergétique et des exopolysaccharides qui forment un mucilage autour des microalgues rouges et encapsulent les cellules.[9]

I.7. Les modes de culture chez les microalgues

I.7.1. La culture en batch

En mode de culture semi-batch tous les éléments essentiels à la croissance de l'algue (lumière, azote, phosphore, carbone, microéléments) sont apportés au temps zéro de la culture. Tout au long de la culture, ils vont être consommés par les algues et leur concentration va diminuer dans le milieu.

L'augmentation de la concentration cellulaire dans le réacteur va cesser lorsque l'un de ces nutriments sera en quantité trop réduite pour soutenir le métabolisme de reproduction des cellules. La composition biochimique, les capacités physiologiques et la vitesse à laquelle la cellule se divise vont alors être modifiées. [10]

I.7.2. la culture en continu

Le milieu de culture est apporté dans le réacteur de façon continue afin que le volume de la culture reste le même. Le but de la culture en continu est de maintenir la concentration cellulaire à l'intérieur du réacteur stable. La culture est débutée en mode batch jusqu'à ce que la concentration cellulaire souhaitée soit obtenue puis le milieu de culture est injecté en continu. Ainsi, théoriquement, la culture se trouvera continuellement en phase exponentielle de croissance. [10]

I.8. 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.

Deux moyens principaux de cultures de microalgues ont été développés, 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 des photobioréacteurs. Le choix du système de production dépend du degré de contrôle nécessaire à la production du produit voulu et de sa valeur. 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.

I.8.1. Systèmes ouverts

Les systèmes ouverts sont des systèmes d'exploitation qui ont été majoritairement utilisés pour la culture industrielle des microalgues dans les dernières décennies.

Les systèmes ouverts sont plus faciles et moins chers à construire et à exploiter que les réacteurs fermés. Ces systèmes sont les moins énergivores et ont une maintenance et un nettoyage facile. C'est pour ces raisons qu'ils sont toujours considérés à l'heure actuelle comme des systèmes de cultures viables, malgré leur faible productivité.

Les systèmes ouverts utilisent généralement que la lumière naturelle, il n'y a donc pas de coût associé à l'apport de lumière pour ces systèmes de culture. Cependant, les microalgues dans ces systèmes de culture n'ont qu'une utilisation faible de la lumière et sont soumises aux variations journalières et saisonnières de la température et de l'intensité lumineuse.

Des problèmes de contaminations existent (par des bactéries, champignons, protozoaires et d'autres micro-algues) et de grosses pertes d'eau par évaporation sont observées dans ce type de système de culture.

Les conditions de cultures sont peu contrôlables et il existe seulement quelques microalgues assez résistantes pour croître sous les conditions extrêmes qui sont habituelles aux bassins ouverts (haut pH, haute température ou haute salinité).

Les bassins varient par leur forme, le type de matériaux utilisés et le système de mélange du milieu. Plusieurs familles de bassin existent :

✚ Les bassins naturels

Ces bassins sont souvent utilisés pour la culture de *Dunaliella salina* ou pour la Spiruline. Ils ont en général une faible productivité

✚ Les bassins circulaires

Principalement utilisés en Asie pour la culture de *Chlorella*, ils nécessitent un fort investissement en matériel et leur agitation par un bras rotatif placé au centre, consomme beaucoup d'énergie

✚ Les raceways

Ce sont les bassins les plus utilisés depuis leur début dans les années 50 majoritairement pour la culture de Spiruline. Leur principe est de faire circuler les algues sur une faible largeur et profondeur (entre 15 et 50 cm) mais sur une grande distance. La productivité de ces bassins est d'environ $20\text{-}25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$, pour une concentration cellulaire inférieure à 0,6 g/l.

L'utilisation de CO_2 n'est pas efficace dans les raceway et il y a un faible mélange.



Figure 10- Différent bassins à système ouvert [11]

I.8.2. Système fermé

Les photobioréacteurs sont des réacteurs fabriqués à partir des matériaux transparents. Leur conception est basée sur la surface éclairée, l'efficacité du mélange et le contrôle des paramètres de culture (température, teneur en dioxyde de carbone et en oxygène, pH), pour atteindre une productivité maximale et permettent un meilleur contrôle des conditions de cultures, la température est contrôlée efficacement, l'accès à la lumière est augmenté par rapport au bassin, l'évaporation du milieu de culture est minimisé, l'approvisionnement en CO₂ est facilité et ses pertes sont limitées. Grâce à ce contrôle des paramètres, des microalgues plus fragiles peuvent y être cultivées. Les photobioréacteurs permettent la reproductibilité des conditions de culture ainsi qu'une forte concentration cellulaire et une forte productivité. Les photobioréacteurs existent sous de nombreuses formes, mais ils peuvent être séparés en plusieurs catégories : les photobioréacteurs plans, les photobioréacteurs cylindriques, les photobioréacteurs « Plastic bag » et un type particulier de réacteurs pour la culture de microalgues en l'absence de lumière : les fermenteurs.

Photobioréacteurs plans

Les photobioréacteurs plans sont des réacteurs de faibles épaisseurs, généralement inférieures à 10 cm, cela permet de réduire le chemin lumineux, Ils sont disposés verticalement ou horizontalement avec une certaine inclinaison pour maximiser l'intensité lumineuse incidente. La productivité de ce système va de 24 à 50 g.m⁻².j⁻¹
L'avantage de ce système est une grande surface d'illumination, le problème principal de ce type de photobioréacteur est que le CO₂ est très mal absorbé. Ces systèmes peuvent aussi accumuler une forte concentration en oxygène dissous, ce qui inhibe la photosynthèse, et le contrôle de la température est difficile [11]



Figure 11 - Photobioréacteur plan [11]

Les photobioréacteurs de type cylindrique

Un photobioréacteur cylindrique se compose d'un ou plusieurs tubes transparents, de diamètres et longueurs variables, de configurations diverses et au sein desquels circule la culture. Pour les photobioréacteurs cylindriques, les variantes de configuration sont multiples

Type colonne

Ce photobioréacteur se compose d'une colonne verticale, dont la dimension varie tant en hauteur qu'en diamètre. En général, les dispositifs utilisés dans les écloséries font 2 m de haut pour environ 30 à 50 cm de diamètre et sont éclairés latéralement par des tubes fluorescents [11]



Figure 12- Photobioréacteurs de type colonne à bulles (Scobalit) utilisés classiquement en Ecloserie [11]

✚ Les photobioréacteurs de type annulaire

Les photobioréacteurs annulaires sont des photobioréacteurs cylindriques agencés d'une manière particulière : ils sont fabriqués à partir de deux tubes de diamètres différents emboîtés l'un dans l'autre pour constituer ainsi un espace annulaire dans lequel circule la culture [11]



Figure 13-Photobioréacteurs annulaires verticaux [11]

Photobioréacteur tubulaire

Les photobioréacteurs tubulaires sont des tubes de faibles diamètres (entre 2 à 6 cm environ, pour permettre la disponibilité de la lumière au centre de la culture. Les photobioréacteurs tubulaires sont les seuls systèmes fermés à être utilisés à grande échelle, ces systèmes ont une bonne productivité en biomasse. Cependant, ce type de photobioréacteur rencontre des problèmes d'accumulation d'oxygène et de contrôle de la température et ils ont aussi des problèmes d'encrassement. De plus, ils occupent une grande surface au sol et sont chers à construire. [11]



Figure 14 - Photobioréacteur tubulaire [11]

Photobioréacteur « Plastic-bag » ou gaine

Ces photobioréacteurs sont des gaines en plastiques, suspendues à chaque extrémité à une structure en métal et généralement éclairées par des néons. D'environ une centaine de litres de culture, le milieu est mélangé par aération. La culture peut se faire en continu ou en batch. Ce système a un faible ratio surface/volume et peut avoir des problèmes d'encrassement. Ce système est encore utilisé par certaines entreprises pour sa simplicité et sa facilité d'utilisation. [11]

I.8.3. Les fermenteurs

Certaines productions se font dans des fermenteurs. Il s'agit soit de microalgues, soit d'autres micro-organismes cultivés en conditions hétérotrophes à l'aide de carbone organique (comme les sucres). Les procédés n'utilisent pas la réaction de photosynthèse de l'algue qui se développe alors en consommant les sucres du milieu de culture. Ce type de culture reste limité, les rendements n'étant pas aussi élevés qu'en autotrophie. [12]

I.9. La récolte des microalgues

La récolte des microalgues est parfois facile à réaliser, comme la filtration pour la spiruline (spiruline en spirales 0,1 mm), mais la plupart du temps la récolte nécessite une étape préparatoire de floculation [13]. La plupart des techniques de séparation solide-liquide sont employées [14] la centrifugation, la fraction de mousse, la floculation. La méthode de la

récolte dépend de l'espèce elle-même, de la densité des cellules et souvent des conditions de la culture [15]

I.9.1. La filtration

La filtration nécessite l'utilisation d'une membrane de cellulose modifiée ainsi que d'une pompe. Cette méthode convient pour une taille supérieure à 30 μm [16], il faut passer à une micro- et ultrafiltration si la taille est inférieure à 30 μm . Les microalgues de très faible densité peuvent ainsi être retenues par la membrane, cependant, cette technique est limitée par le volume traité, puisque la succion exercée par la pompe entraîne fréquemment l'obstruction de la membrane. Certaines techniques peuvent par contre être utilisées afin d'éviter cette problématique, soit en utilisant une pompe exerçant une pression au-dessus du filtre. Cette façon de faire permet de traiter des volumes plus importants. La technique de filtration est applicable principalement pour les microalgues formant des colonies. [17]

I.9.2. La centrifugation

La centrifugation est énergivore, mais efficace et permet de concentrer les microalgues d'une solution initiale ayant une concentration en biomasse de 10 à 20 g/l en une pâte de 100 à 200 g/l. Cette méthode nécessite l'utilisation d'une centrifugeuse qui fonctionne par rotation autour d'un axe principal, ce qui permet d'exercer une force perpendiculaire à cet axe et de récolter les algues ayant une densité plus importante que le substrat de croissance. Cette technique est toutefois considérée comme étant trop dispendieuse et énergivore pour la production d'algocarburants. [18]

I.9.3. La floculation

Pour la récolte par floculation, les flocculant utilisés sont le chlorure de fer et le chlorure d'aluminium. Par ailleurs, la floculation peut être effectuée naturellement par l'arrêt d'alimentation en CO_2 , cette floculation s'appelle l'auto-floculation. [19]

I.9.4. La fraction de la mousse

Dans le cas de la fraction de la mousse, le milieu de culture est exposé à une aération pour se transformer en mousse, par la suite les algues sont séparées de l'eau. [20]

I.10. Le séchage de la pâte algale

La pâte algale obtenue, à 5-15 % en solide, périssable, est séchée par technologies conventionnelles (sous vide, sur tambour, en lit fluidisé, en spray), qui sont souvent dégradatives. La lyophilisation est un procédé de séchage qui peut être utilisé, même s'il conserve les propriétés des métabolites, son coût est relativement élevé. Le séchage solaire, faisable en air très sec, est d'autant plus long que l'air est humide. [21]

I.11. Les procédés d'extraction

I.11.1. Etape préalable à l'extraction

Après récolte et concentration, les microalgues forment alors une sorte de pâte humide. Il est possible de rajouter une étape de séchage avant la phase d'extraction des lipides afin de concentrer d'avantage la matière sèche. [22]

I.12. Méthode d'extraction

De très nombreuses méthodes d'extraction existent. Ils reposent notamment sur les propriétés physico-chimiques des molécules à extraire et sur le degré d'humidité du substrat. Il est possible de distinguer plusieurs types de traitement [23]

I.12.1. L'extraction par solvant organique

Les lipides des microalgues sont stockés au sein des cellules qui peuvent être protégées par une épaisse paroi. Leur extraction nécessite donc souvent une étape visant à rompre les parois cellulaires afin de les rendre accessibles aux solvants. Pour ce faire, il est possible d'utiliser des traitements très variés : le broyage, les ultrasons [24], les micro-ondes [25], les chocs osmotiques, les lyses enzymatiques [26], etc. Le choix de la technique d'éclatement dépend principalement des caractéristiques cellulaires et du taux de matière sèche de la «pâte» algale. [27]

Les lipides sont généralement extraits par un solvant organique non miscible à l'eau tel que le n-hexane, le chloroforme, l'éther de pétrole, etc. ou d'un mélange de solvants sur la base de la méthode développée par Bligh et Dyer (1959) [28]. L'extraction peut également être optimisée par une intensification des conditions de température et de pression permettant ainsi d'augmenter le pouvoir de solvation du solvant mis en jeu.[29]

Toutefois les procédures mettant en jeu des solvants organiques d'origine pétrolière ont des limites car elles nécessitent une biomasse sèche et, par ailleurs, ne sont pas toujours

transposable à l'échelle industrielle du fait des volumes de solvant mis en jeu et de leur toxicité vis-à-vis de l'opérateur et de l'environnement. Actuellement, le n-hexane est utilisé industriellement pour extraire les lipides qu'ils soient d'origine végétale ou marine. Cependant, compte tenu des problèmes environnementaux et de santé publique qu'il pose, il est urgent d'explorer des alternatives à ces solvants d'origine pétrolière. [30]

I.12.2. L'extraction en condition de haute température et haute pression

De façon générale, le mécanisme est le suivant : en condition de pression et de température élevées, les composés organiques deviennent miscibles avec le solvant. Puis, une seconde étape de diminution de la température et de la pression permet de séparer facilement le solvant et les produits extraits. Plusieurs techniques d'extraction se basant sur ce mécanisme existent

Extraction à l'eau sub-critique

Cette technique, utilisant de l'eau juste en dessous de la température critique et à une pression suffisamment élevée pour rester à l'état liquide [31], a déjà été utilisée pour l'extraction sélective de composés de microalgues [32]. Les avantages de cette technique est l'utilisation de l'eau comme solvant, ce qui rend inutile l'étape de séchage et constitue un procédé propre. La durée d'extraction est courte, les produits extraits sont de haute qualité et les agents d'extraction sont de faibles coûts. Cependant la consommation énergétique n'est pas négligeable.

Extraction aux fluides supercritiques

Ce procédé se base sur l'augmentation de la capacité de solvation des agents d'extraction au-dessus de leur point critique. L'un des principaux agents utilisés est le CO₂, mais l'on peut aussi citer l'éthane, l'eau, le méthanol. [33]

Le CO₂ à l'état supercritique est le plus utilisé notamment pour ces conditions critiques facilement accessibles ($T_c = 31,1$ °C et $P_c = 72,9$ atm). Par ailleurs, il est peu coûteux, non toxique, ininflammable et chimiquement inerte. La technologie au CO₂ supercritique apparaît comme adaptée à l'extraction de lipides à partir de microalgues pour les raisons suivantes :

- ✓ le pouvoir solvant à géométrie variable
- ✓ le transfert de matière favorisé
- ✓ l'obtention d'extrait sans résidus de solvant

Les microalgues lipidiques possèdent un double atout, d'abord leur teneur en huile, qui peut aller jusqu'à 80 % de la matière sèche. Leur productivité peut atteindre des valeurs très élevées, entre 20 et 80 tonnes d'huile par hectare, contre deux à peine pour le colza ou le tournesol. Le deuxième avantage de ces micro-organismes est leur développement qui ne nécessite pas de terres arables ou de sources d'eau potable et peut aider à absorber le CO₂ issu de divers procédés tout en purifiant des eaux usées. Néanmoins, la production de biocarburant à partir de microalgues devra, pour être viable, lever des verrous sur l'ensemble de la filière, de l'identification d'espèces d'intérêt, à l'extraction des lipides et des autres composés valorisables. [34]

I.12.3. Procédé biocompatible

Il existe, par ailleurs, un procédé d'extraction de lipides de microalgues humides biocompatible qui permet de garder les cellules vivantes lors de l'étape d'extraction. Dans ce cas, les algues sont mises en contact avec un solvant organique d'extraction, le décane, et on procède à une opération d'extraction liquide/liquide, suivie d'une séparation de phases. Les algues traitées sont ensuite remises en culture, avec dans certains cas des taux de survie proches de 100 %, ce procédé est appelé le «milking» [3]

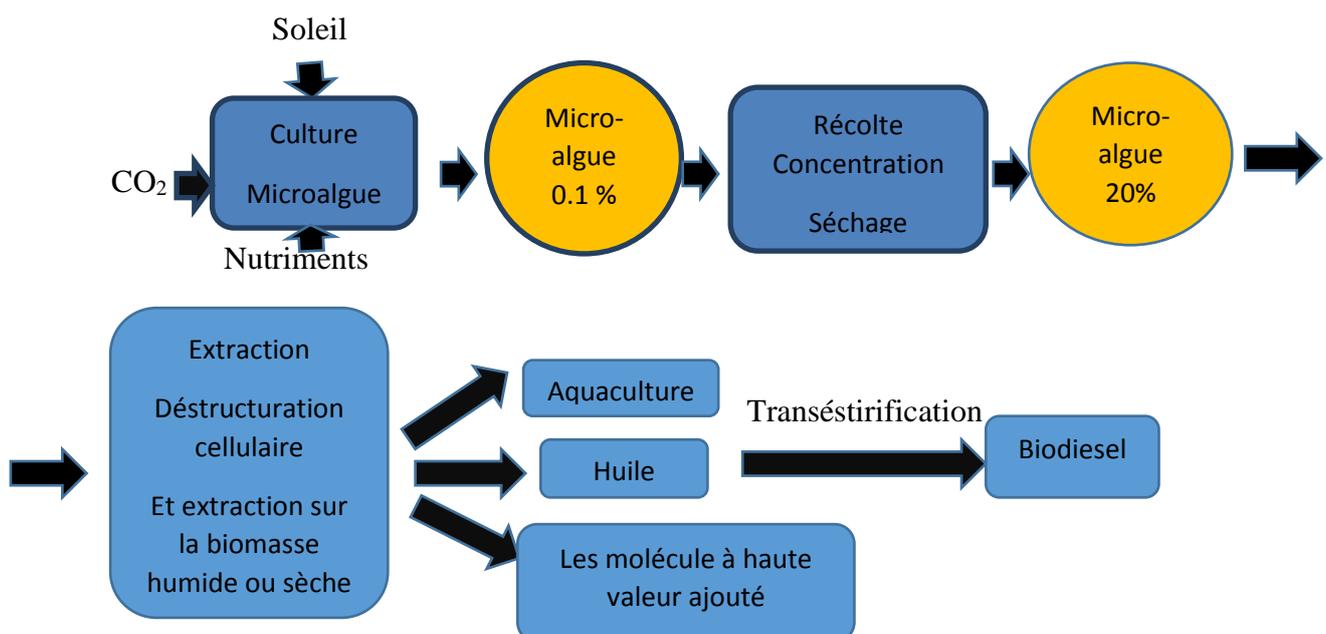


Figure 15- Concept de production d'huile de microalgues visant à obtenir du biodiesel

I.13. Domain d'application des microalgues

Au vu de leur biodiversité et leur biochimie, les microalgues se révèlent très prometteuses pour de nombreuses applications dans des domaines variés tels que l'industrie pharmaceutique, agro-alimentaire, l'environnement et l'énergie renouvelables. [36]

I.13.1. Alimentation humaine et animale

Depuis des millénaires, macroalgues et microalgues sont récoltées pour un usage alimentaire. Utilisée par les Mayas, la Spiruline est par exemple encore récoltée et consommée par les habitants des bords du lac Tchad. Si certains pigments sont utilisés comme colorants alimentaires (β -carotène, phycobiliprotéines), la contribution à la nutrition humaine des sociétés modernes reste essentiellement confinée à la nutraceutique. [37]

Le phytoplancton en tant que producteur primaire des milieux aquatiques est par ailleurs tout « Naturellement » exploité comme ressource nutritive pour l'aquaculture. Dans cette filière majeure de la production mondiale, les microalgues sont utilisées directement pour subvenir aux besoins des stades larvaires des mollusques bivalves et des crustacés ou indirectement comme complément alimentaire et comme substrat pour le zooplancton, base alimentaire de nombreuses espèces aquacoles. [38]

I.13.2. Pharmaceutique et cosmétique

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

Les lipides constituent également une très large classe de molécules que la plupart des micro-algues peuvent accumuler dans d'importantes proportions de leur poids sec. Les acides gras polyinsaturés qui dans le milieu naturel se retrouvent concentrés dans les organismes marins en position inférieure dans la chaîne trophique appartiennent à la classe des oméga-3 et oméga-6 comme les DHA et EPA.

Egalement, des molécules élaborées par des diatomées, dinoflagellées et cyanobactéries font l'objet de travaux de recherche car elles présentent des propriétés anticancéreuses.

D'autres composés aux propriétés antifongiques, antibactériennes, antivirales et antihistaminiques comptent également parmi les molécules à intérêt pharmaceutique. [39]

I.13.3. Environnement et énergie

+ Traitement des effluents liquides

Etant donné que leurs conditions de croissance et leur activité métaboliques requièrent de l'eau et des éléments nutritifs (macro et microéléments), les micro-algues ont la capacité de croître sur une vaste gamme d'effluents [40]. La littérature scientifique rapporte un grand nombre de gisements auxquels les micro-algues furent confrontées avec succès : eaux résiduaires urbaines, effluents d'élevages et effluents industriels comme les digestats [41]

+ Traitement des métaux

Indispensables au métabolisme de tous les êtres vivants à l'état de trace, les ions métalliques se révèlent toxiques pour des concentrations excessive la différence des polluants organiques, ils sont non biodégradables et s'accumulent dans les organismes vivants, directement ou concentrés via la chaîne trophique, et expriment alors leur toxicité. Ils sont transférés en excès dans le milieu naturel portés dans les rejets d'un grand nombre d'activités industrielles (métallurgie, exploitation minière, production de fertilisants et de pesticides,...). Le traitement de ces métaux en solution se réalise couramment via des techniques physico-chimiques (précipitation/chélation, filtration membranaire...) et biologiques. Parmi ces dernières solutions, les micro-algues se distinguent à la fois par une certaine tolérance à la présence de ces métaux et des rendements importants de fixation. A ce titre et étant donné leur position dans la chaînes trophique des milieux aquatiques, ces organismes sont utilisés comme indicateurs écotoxicologiques de la qualité des eaux vis-à-vis des métaux lourds. Un mécanisme de fixation des métaux qui se décompose en deux temps : [42]

✓ Adsorption

L'Adsorption peut se réaliser directement sur la paroi des cellules et/ou indirectement dans un mucus exo-polysaccharidique. Cette première étape, rapide et réversible, mobilise les charges portée par les groupes fonctionnels chargés négativement portés par la paroi.

✓ Assimilation dans le cytoplasme

Cette réaction est plus lente, elle mobilise un mécanisme actif qui est irréversible. Les ions rejoignent leur destination et leur fonction métabolique ou expriment leur toxicité. [42]

Traitement des effluents gazeux

Le CO₂, identifié comme le gaz contributeur majeur à l'effet de serre, voit sa concentration en constante augmentation dans l'atmosphère depuis la révolution industrielle. Avec un impact avéré sur le réchauffement climatique, cette problématique a notamment motivé la recherche de solutions de piégeage de ce gaz avant sa libération et sa dilution dans l'atmosphère.

Parmi les technologies envisageables, sont étudiées les procédés physiques (capture et stockage du CO₂) et les solutions biologiques de fixation. Les solutions physiques de capture et de stockage se révèlent toutefois particulièrement coûteuses mais font l'objet de nombreuses expérimentations aux échelles pilotes et pré-industrielles.

La croissance des microalgues en conditions non limitantes en carbone compte parmi les enjeux clés de la production de masse. L'utilisation de la photosynthèse pour la fixation de CO₂ d'origine anthropique répond ainsi à la fois à un enjeu environnemental du point de vue des activités industrielles particulièrement émettrices et à un enjeu économique sur le versant culture de masse des microalgues. [43]

I.13.4. Production d'énergie

La production d'énergie à partir de microalgues est sans aucun doute le moteur de l'engouement et des activités de recherches croissantes mobilisées autour du potentiel offert par ces organismes depuis le début du XXI^{ème} siècle. A l'instar des gisements de biomasses mobilisés dans les filières bioénergies, et du fait d'une expression phénotypique métabolique identique aux plantes supérieures, les travaux portant sur la valorisation énergétique des microalgues concernent pour l'essentiel les mêmes filières. D'autres voies sont également explorées, comme la production directe d'hydrogène et l'utilisation de ces organismes dans des piles microbiennes. [44]

A titre illustratif, la biomasse sèche peut servir à produire de l'énergie par combustion directe. Liquéfaction, pyrolyse ou hydrogénation de ces organismes permettent de produire un biocarburant gazeux ou une « huile » brute par conversion thermochimique. Méthane et éthanol peuvent être produits par conversion biochimique à partir respectivement de toute la biomasse ou de la fermentation des sucres accumulés dans la cellule. Cette filière de conversion permet également de produire de l'hydrogène par fermentation de tout ou partie de la cellule. Lipides intracellulaires peuvent être extraits par séparation chimique pour intégrer

une filière biodiesel après trans-estérification. Dans ce champ des possibles, les filières lipides, éthanol carburant et méthanisation sont les voies qui suscitent le plus d'intérêt et, à priori, de grands potentiels de développements industriels. En effet, comme pour les autres gisements de biomasse, ces formes d'énergie peuvent compléter ou se substituer à la plupart des énergies fossiles (gasoil, essence et gaz naturel) et bénéficier des mêmes filières de valorisation, réseaux de distribution et stockage. [45]

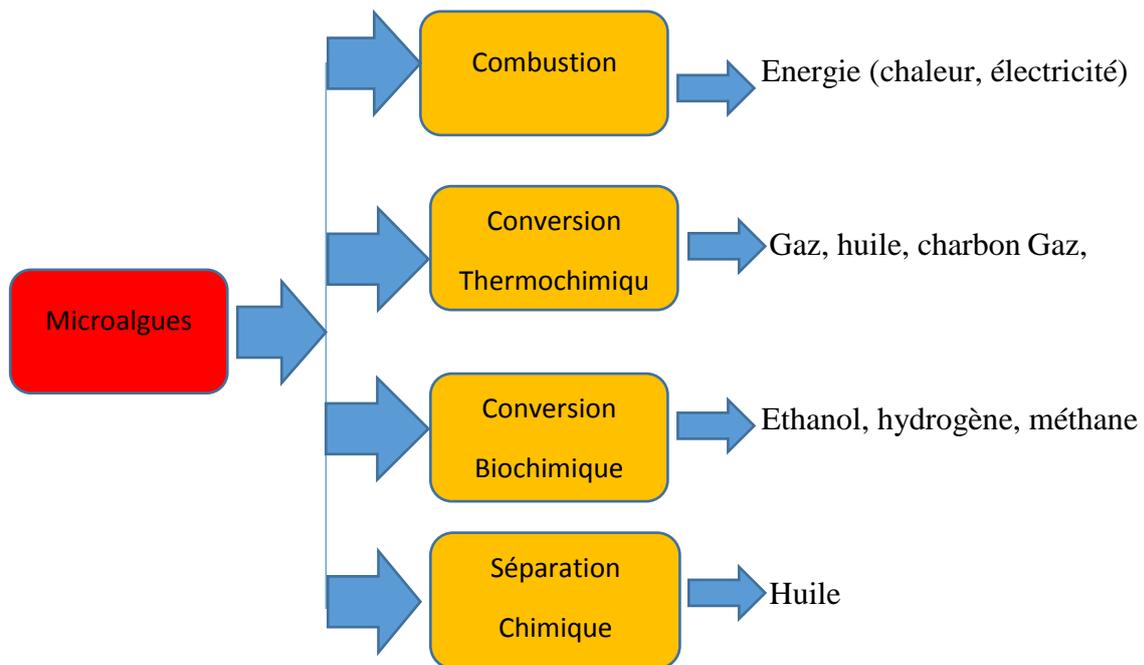


Figure 16 - Les quatre principaux processus de valorisation énergétique de la biomasse de microalgues

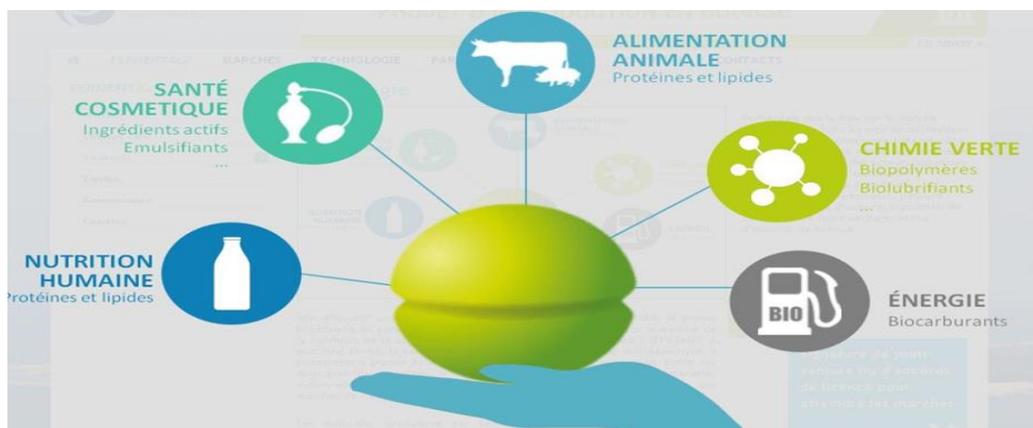


Figure 17-différents domaine d'application des microalgues

I.14. Conclusion

Les microalgues suscitent de plus en plus d'intérêts. Pour de nouvelles applications, notamment énergétiques, une grande quantité de biomasse et donc une forte productivité sont nécessaires. Mais le système doit être viable au niveau économique, énergétique et environnemental. Les systèmes de production des microalgues qui sont de deux types : fermé et ouvert, présente chacun des avantages et des inconvénients. En effet, les systèmes ouverts sont économiques plus avantageux puisque la source d'énergie utilisée est le soleil mais ils présentent des difficultés de contrôle des conditions opératoire ce qui conduit à une faible productivité. En revanche, les photobioréacteurs fermés sont bien plus chers mais la productivité obtenue est nettement supérieure car la régulation des paramètres de culture sont maîtrisables.

CHAPITRE II
MATÉRIELS ET MÉTHODES
EXPÉRIMENTALES

Matériels et méthodes expérimentales

II.1 Le dispositif expérimental

L'installation complète, constituant le photobioréacteur, pour la culture des microalgues comporte 5 parties essentielles qui sont :

- Le réacteur en plexiglas ;
- Paroi optique (miroir)
- La pompe à air ;
- Le système d'éclairage ;
- Ballon de CO₂ ;
- Le pH mètre et le thermomètre.

II.1.1. Le réacteur en plexiglas

Le réacteur en plexiglas de type plat et disposé verticalement et permet de contenir un milieu de culture pouvant atteindre un volume de 2 litres. La biomasse d'algues est plongée dans le réacteur pour un temps de culture bien déterminée.

II.1.2. La pompe à air

Afin d'accélérer le développement des microalgues, il est important de maintenir le milieu de culture sous agitation d'où l'utilisation d'une pompe à air (type A-3500 d'une puissance de 2.3 W) qui envoie de l'air à l'intérieur de réacteur (sous forme de petites bulles) par deux orifices en dessous du réacteur via des circuits en plastique. Les bulles d'air générées par la pompe créent une agitation (circulation de l'eau en surface) qui permet une amélioration d'oxygénation du réacteur.

II.1.3. Le système d'éclairage

L'éclairage artificiel est réalisé par deux lampes de consommation économiques de 18 W de type TORCH. Les deux lampes sont placées verticalement à une distance de 10 cm du réacteur.

II.1.4. Ballon de CO₂

C'est un ballon en latex qu'on remplit régulièrement de CO₂, il est relié directement au réacteur par un circuit en plastique qu'on plonge directement à l'intérieur du milieu.

II.1.5. pH mètre et thermomètre

La mesure du pH et de la température du milieu de culture se fait d'une façon régulière chaque 2 heures. Le contrôle de ces deux paramètres est essentiel car, d'une part la consommation de CO₂ à une incidence directe sur le pH du milieu de culture et d'autre part l'augmentation de la température au-delà d'une valeur seuil ralenti le développement des microalgues.

II.1.6. Paroi optique (miroir)

L'utilisation de paroi optique (miroir) peut réfléchir de la lumière artificielle ce qui conduit à l'augmentation de l'intensité lumineuse

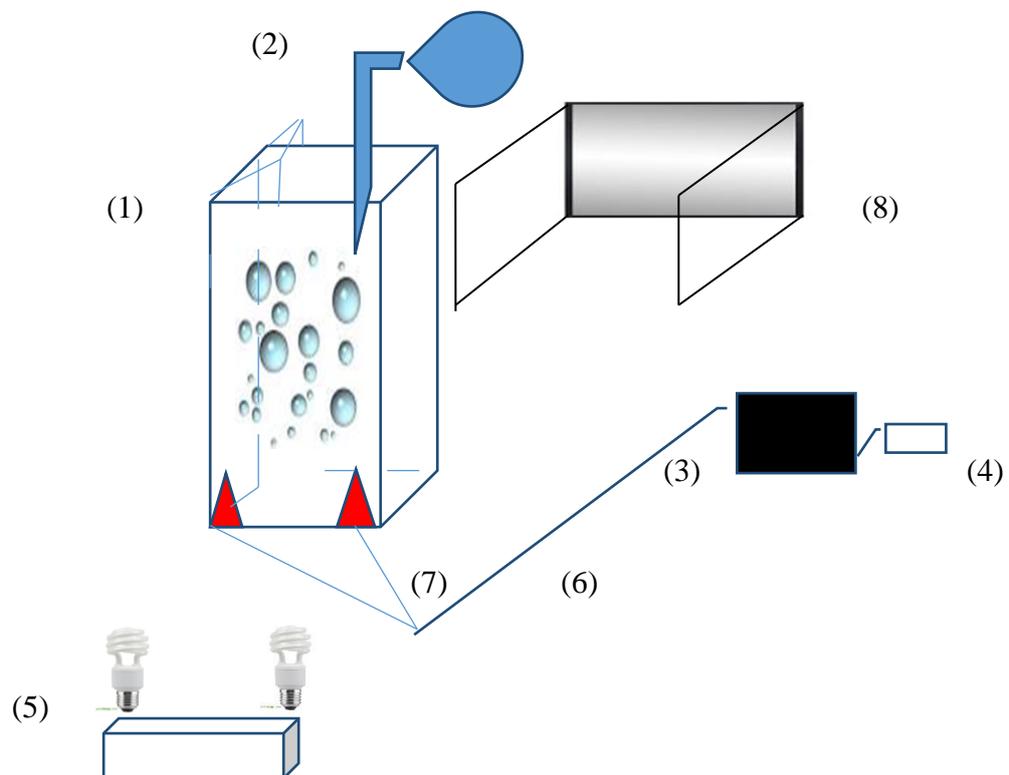


Figure 18- Schéma du dispositif expérimental

(1 : Réacteur, 2 : Ballon de CO₂, 3 : Pompe à l'air 4 : Prise électrique, 5 : Lampes, 6 : Circuits en plastique, 7 : L'Orifice de l'aire, 8 : Paroi optique)

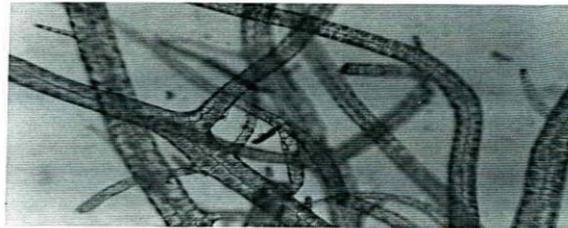
II.2. Matériel biologique

Dans ce travail, on se propose de cultiver des microalgues issues de l'oued de Berchiche et un lac d'IL-Maten dans la Daïra d'El-Kseur. Chaque prélèvement de microalgue est isolé et purifié.

Les microalgues collectées sont : Enteromorphe, spirogyre et cladophora (avec 2 espèces différentes)

✚ Les microalgues vertes (Les entéromorphes)

Les Entéromorphes sont des algues vertes formées par un tube aplati plus ou moins ramifié alternant des segments gonflés et des étranglements. Le thalle vert clair peut atteindre plusieurs centimètres. Ce sont des algues que l'on rencontre toute l'année mais surtout au printemps.



Photos microscopiques de *Enteromorpha* sp. proliférante.

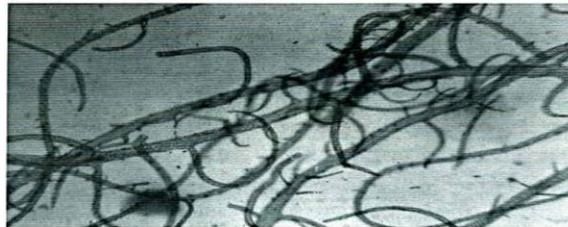


Figure 19 : Algue verte (Entéromorphe)

✚ Les Microalgues verts (Cladophora)

Ces microalgues sont un genre d'algues vertes de la famille des Cladophoraceae, appelées communément « cladophores ». C'est une espèce parfois envahissante mais que de nombreux invertébrés et quelques vertébrés peuvent exploiter. Leur présence massive indique souvent une pollution organique ou minérale. Un fort éclaircissement est favorable à la croissance et à l'apparition de fortes biomasses.

L'échantillon a été prélevé au lac Il-Maten (commun fenaia il- Maten)



Figure 20-Cladophora

✚ Les microalgues vertes (spirogyre)

Les spirogyres sont formées de filaments coloniaux désordonnés et ne possèdent qu'un ou deux chloroplastes rubanés en forme de spirale (d'où le nom de Spirogyre), elles sont de la famille des Zygnemataceae.

Ces algues apprécient les eaux claires et fraîches au printemps (qui peuvent devenir plus chaudes en été). Elles colonisent le milieu aquatique de manière libre (non-fixée) dans la colonne d'eau et sur les sédiments dans les eaux stagnantes ou à faible courant, et/ou plus rarement de manière fixée sur des rochers. L'échantillon a été prélevé au Lac d'Il-Maten (Commune Fenaia Il-Maten)

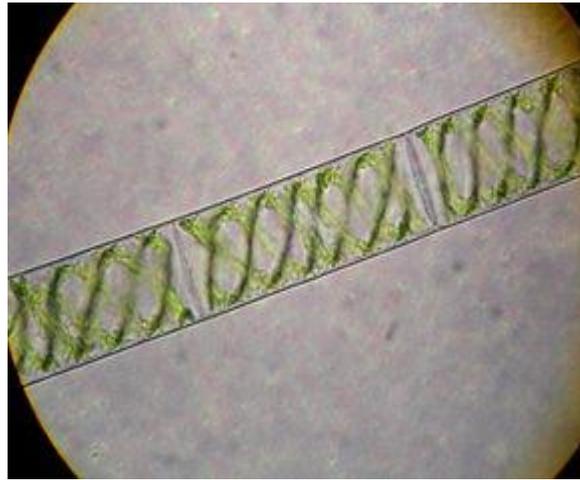


Figure 21 - Spirogyre

II.3. Les techniques d'analyse des microalgues : la microscopie

L'analyse et l'identification des microalgues est faite à l'aide d'un microscope binoculaire de type Zeiss. Les parties essentielles du microscope sont représentées sur la figure 21.

✚ Démarche à suivre pour effectuer une observation à travers le microscope :

Une fois que tous les échantillons sont prêts à être observés par le microscope, il faudra les poser sur une lame et les couvrir avec une lamelle. Les échantillons sont posés dans le microscope pour effectuer l'observation. À l'aide d'une mise au point micrométrique bilatérale, on obtient une image claire et une vision parfaite des échantillons.

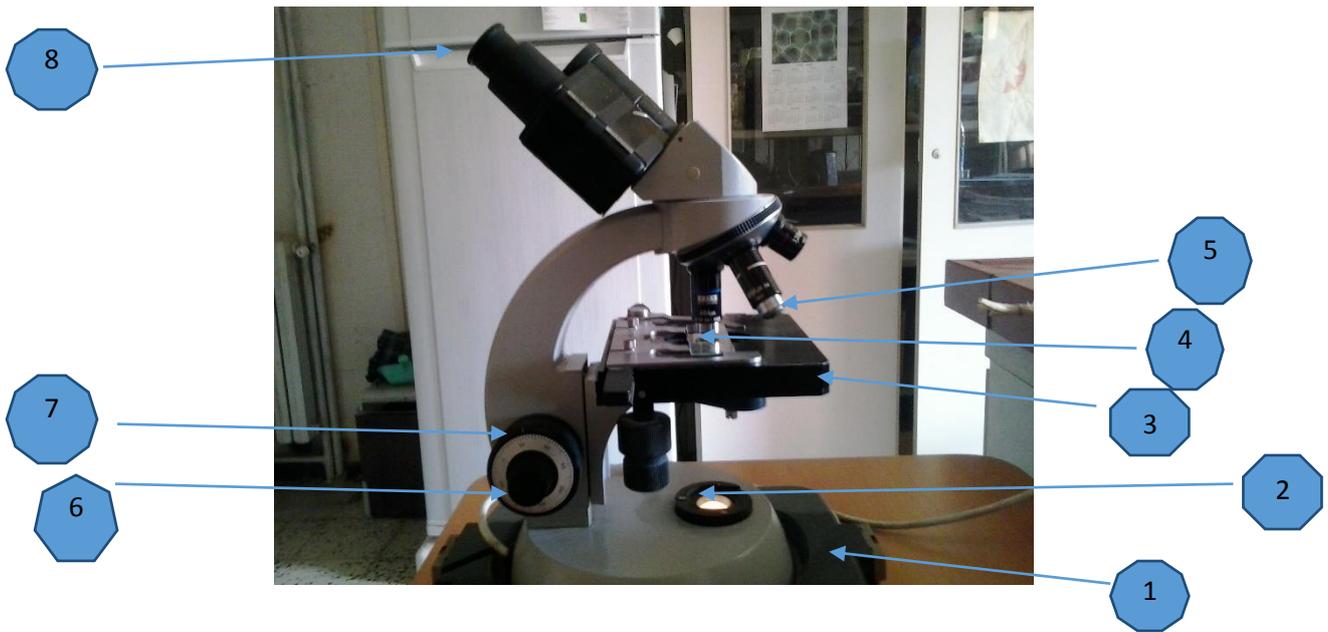


Figure 22- Le microscope binoculaire de type Zeiss

(1 : Support, 2 : Source de lumière, 3 : Platine, 4 : Lame et lamelle, 5 : Objectifs, 6 : Mise au point micrométrique bilatérale, 7 : Mise au point rapide, 8 : Tube observation binoculaire)

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSION

Résultats et discussions

L'étude cinétique de la croissance des microalgues a été réalisée sur trois espèces toutes de types verts : Les entéromorphes, Cladophora et spirogyra. L'influence des paramètres physico-chimiques ci-dessous sur la culture des microalgues choisies a été étudiée :

- ✓ L'influence de l'ajout de CO₂ sur la croissance des microalgues
- ✓ L'influence de l'intensité lumineuse
- ✓ L'influence de l'agitation
- ✓ L'influence de l'ajout des nutriments sur la croissance des microalgues

III.1. Préparation du photobioréacteur

Avant toute manipulation, le réacteur est stérilisé avec de l'eau de javel et de l'eau bouillante suivie par un nettoyage avec l'eau distillée. Après une purification des microalgues, on introduit quelques-unes dans le réacteur contenant 0,5 à 1,5 litre d'eau distillée. On met la pompe à l'air en marche, on allume les deux lampes en mode continue et on ouvre le robinet du ballon de CO₂. L'ensemble de l'installation est isolé de la lumière du jour par un couvercle.

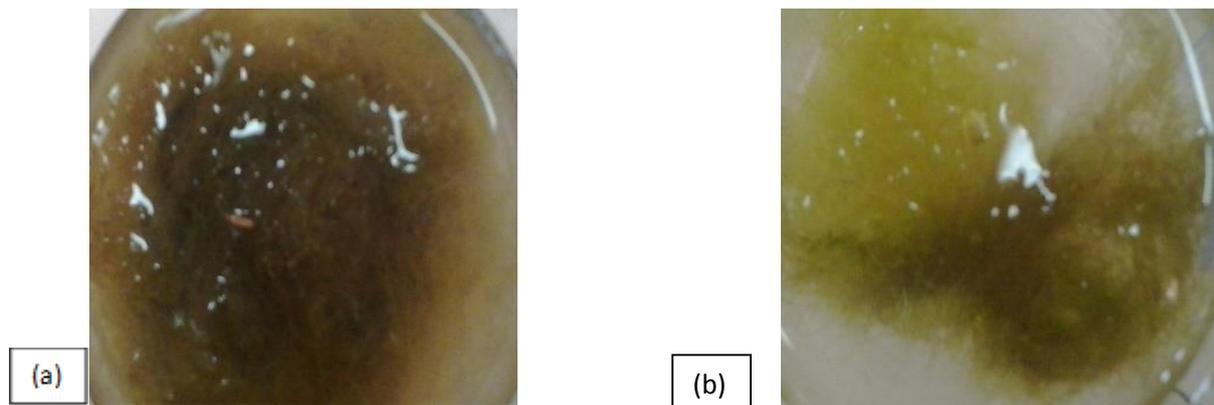


Figure 24- (a) :Microalgue avant purification,

(b) :Microalgue après purification

III.2. Etude de la croissance des microalgues

➤ **Influence de l'ajout de CO₂ sur la croissance des microalgues de type entéromorphes de la famille Ulvacées**

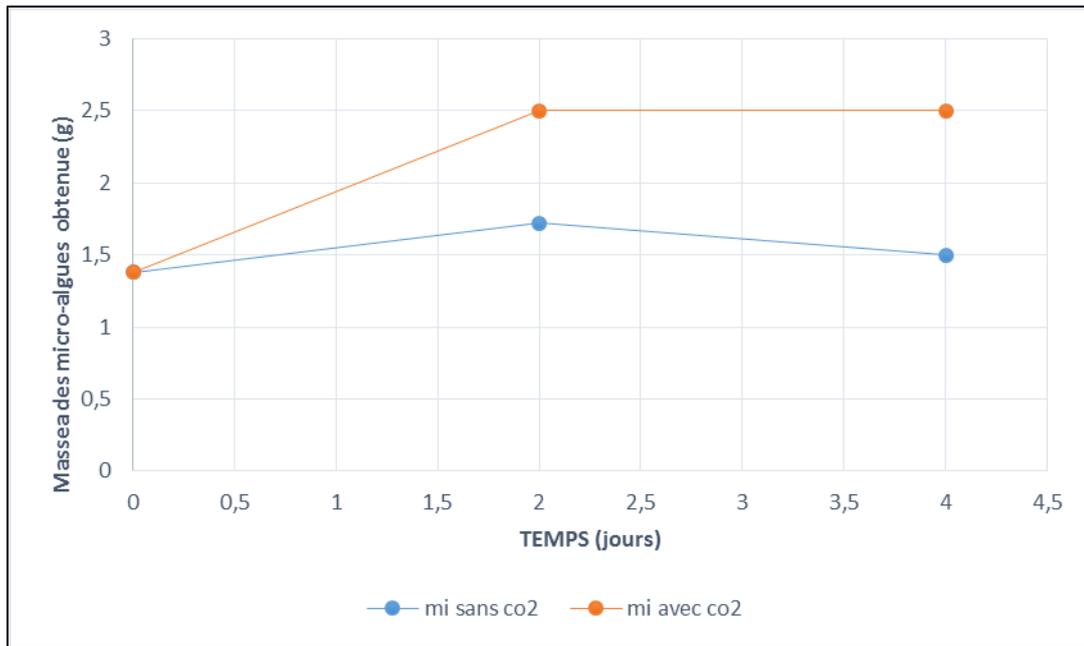
❖ **Mode opératoire**

- ✚ Dans un photobioréacteur contenant 1,25l d'eau distillée (T=22C° et pH=7.2), on introduit une masse mi= 1,38 g de l'échantillon à étudier.
- ✚ L'injection de l'aire est assurée par la pompe dans le photobioréacteur pendant une durée de 4 jours
- ✚ Les 2 lampes étant allumées en mode continu pendant 4 jours
- ✚ L'ensemble de l'installation est isolé de la lumière de jour par une chambre noire
- ✚ A la fin de l'expérience, les microalgues sont récupérées par filtration et pesées à l'aidé d'une balance électrique

Quatre essais ont été réalisés avec et sans apport de CO₂, et les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

Temps de culture (jours)	0	2	4
Masse des microalgues en g (sans apport de CO ₂)	1,38	1,78	1,5
Masse des microalgues en g (avec apport de CO ₂)	1,38	2,5	2,5

Tableau 1- Effet de CO₂ sur la croissance des microalgues en fonction du temps



Figures 25 : Effet de CO₂ sur la croissance des microalgues en fonction du temps

Dans le cas des expériences menées sans ajout de CO₂ (figure25), les résultats obtenus montrent une croissance massique légère des microalgues de l'ordre de 0,4g au bout de 2 jours de culture. Par contre, on note une décroissance massique des microalgues à partir du 2^{ème} jour, et cette diminution est de l'ordre de 0,28g quand on atteint le 4^{ème} jour. Ceci montre que le CO₂ dissous dans l'eau est complètement épuisé.

Pour ce qui est des expériences réalisées avec apport de CO₂, on note une croissance massique importante des microalgues atteignant une masse de 2.5 g au bout des 2 premiers jours. Cette quantité reste stable durant les 2 jours qui suivent. Cette stabilisation peut s'expliquer par le début d'épuisement de milieu en CO₂.

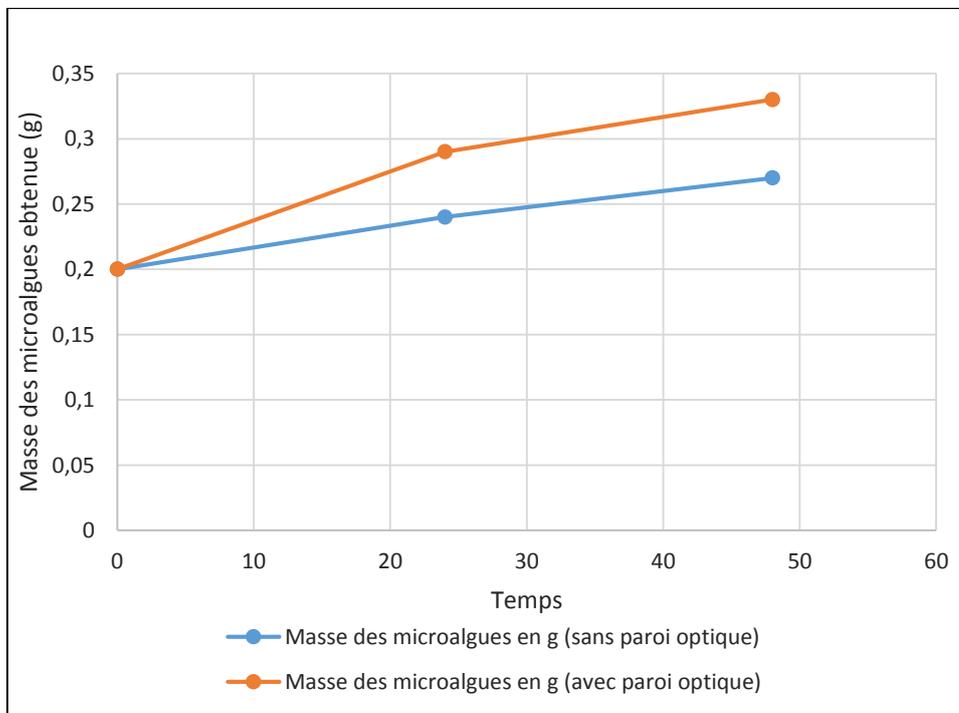
Ces résultats montrent que le CO₂ est un élément essentiel de la photosynthèse car d'une part, il favorise la croissance massique des microalgues, et d'autre part, il joue un rôle important dans la stabilisation du pH. Les résultats obtenus durant la première expérience montrent que les microalgues se développent mieux dans un milieu riche en CO₂ [46].

✚ Influence de l'intensité lumineuse

On s'intéresse dans cette 2^{ème} partie à l'influence de l'intensité de la lumière artificielle sur la croissance des microalgues. Deux expériences ont été réalisées avec les spirogyres, pour des masses initiales identiques et selon le mode opératoire décrit précédemment à (T=20C° et pH=7.4) Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 2

Temps d'exposition à la lumière (jours)	0	24	48
Masse des microalgues en g (sans paroi optique)	0.2	0.24	0.27
Masse des microalgues en g (avec paroi optique)	0.2	0.29	0.33

Tableau 2- Effet de l'intensité lumineuse sur la croissance des microalgues en fonction du temps



Figures 26 : effet de intensité lumineuse la sur la croissance des microalgues en fonction du temps

✓ **Sans paroi optique**

La masse de la division cellulaire des microalgues dans cette expérience pendant 1 jour est de 0.24g et on atteint une masse de 0.27 g à la fin de l'expérience

✓ **Avec paroi optique**

Une fois que l'intensité lumineuse est intensifiée, le rendement de croissance cellulaire est augmenté jusque 60.60 %.

Donc l'exposition à la lumière des microalgues avec une forte intensité lumineuse est probablement parmi les solutions à rechercher pour obtenir une cinétique de croissance importante [47]

✚ **Influence de l'agitation**

On cultive une masse $m_i = 0.2$ g de 2 espèces de cladophores dans un photobioréacteur rempli de 1.25 d'eau distillée ($T=22C^\circ$ et $pH=6.9$) et en présence de la lumière et du CO_2 . Deux expériences ont été réalisées avec la même masse, l'une avec agitation et l'autre sans agitation suivant les mêmes conditions opératoires décrites précédemment. Les résultats expérimentaux obtenus sont résumés dans le tableau 3 et représentés graphiquement.

Temps de culture (jours)	0	2	3
Masse des micro-algues en g (avec agitation)	0.2	0.35	0.38
Masse des micro-algues en g (sans agitation)	0.2	0.25	0.29

Tableau 3- Influence de l'agitation sur la culture des microalgues

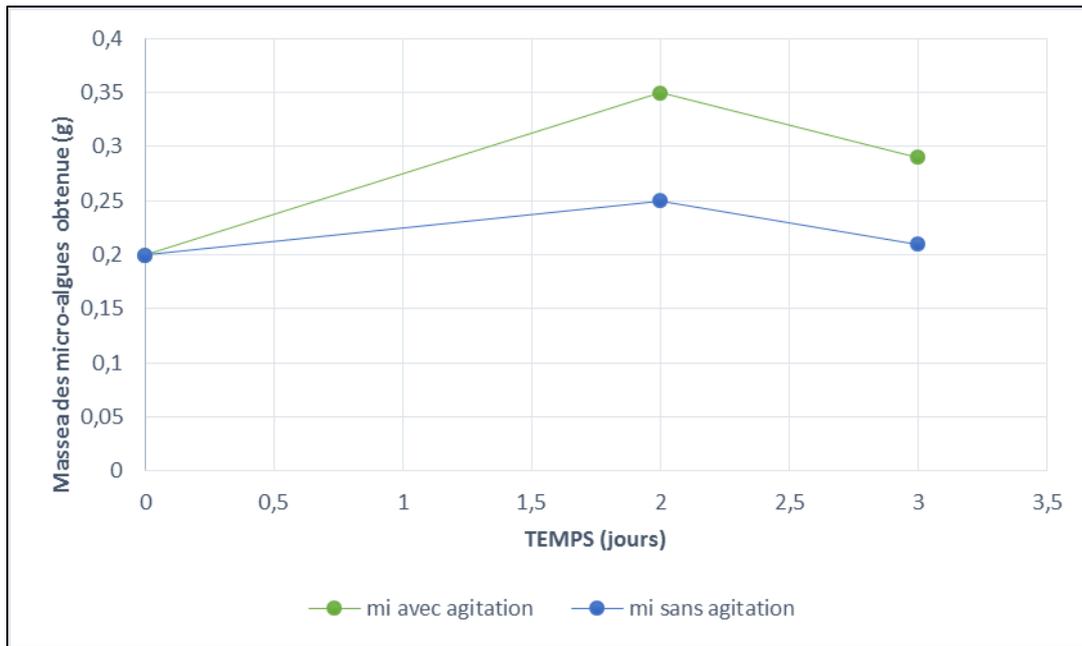


Figure 27- Influence de l'agitation sur la culture des microalgues

✓ **Avec agitation**

On remarque une multiplication maximale des cellules jusqu'à une masse de 0,35 g pour une durée de 2 jours mais après 1 jour on observe que cette croissance est devenue légère et cela peut être interprété par le début de la phase stationnaire de croissance.

✓ **Sans agitation**

La croissance massique des microalgues est faible durant 3 jours et on a obtenu que 0,29 g à la fin de l'expérience.

Ces quatre résultats montrent que l'agitation est un facteur important pour la culture des microalgues et on remarque que l'agitation évite la sédimentation et permet la régénération de l'air à la surface pour avoir une cinétique de croissance plus importante.

[48]

III.3. Influence des nutriments sur la croissance des microalgues

Dans cette partie nous allons choisir un milieu de culture où on peut suivre l'évolution d'une quantité de microalgues pendant 3 jours pour la première expérience et 4 jours pour la deuxième expérience.

Il est à souligner qu'il existe de nombreuses « recettes » du milieu de culture, certaines sont adaptées à des microalgues particulières ou à des conditions particulières (eau douce, eau de forage, eau marine etc.....) mais les principaux milieux de cultures utilisés en aquaculture sont le Conway, le milieu de Walnes. Les dilutions intermédiaires que l'on doit préparer dans ces recettes servent à faciliter les dosages.

Dans notre cas, on a choisi d'utiliser deux milieux le premier est celui de Gorham's et le deuxième est celui de Bold très utilisé pour les algues verts unicellulaires.

Milieu de Gorham's

Première étape : la préparation du milieu de Gorham's

- NaNO_3 496 mg
- K_2PHO_4 39 mg
- $\text{MgSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$ 75 mg
- $\text{CaCl}_2, 2\text{H}_2\text{O}$ 36 mg
- Citrate de fer 6 mg
- $\text{Na}_2\text{SiO}_3.9\text{H}_2\text{O}$ 58 mg
- Na_2CO_3 20 mg
- Acide citrique 6 mg
- EDTA 1 mg

Les produits ci-dessus doivent être dilués dans 1 litre d'eau distillée et il faut ajuster le pH à 7 ± 0.5

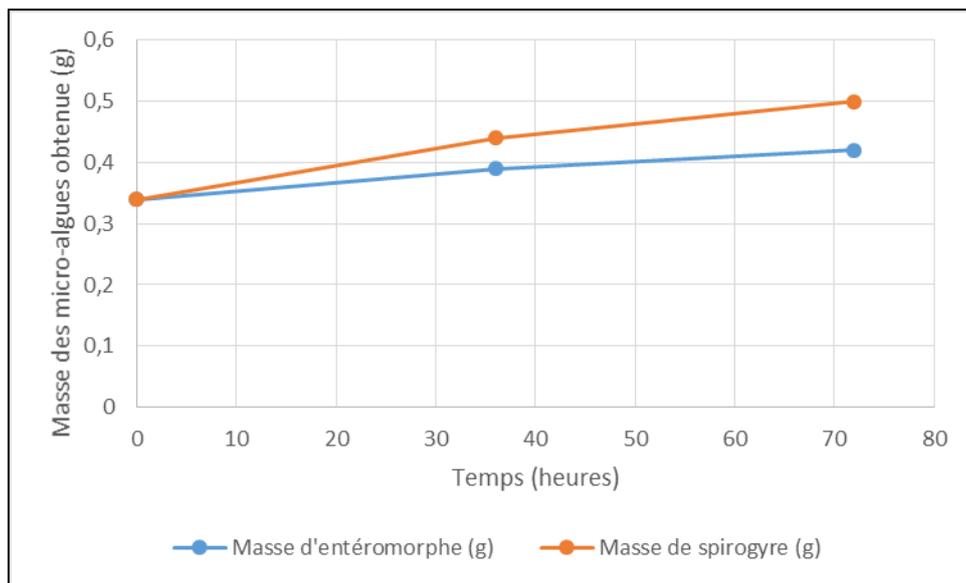
Ce milieu a été préparé sans Citrate de fer ainsi que $\text{Na}_2\text{SiO}_3.9\text{H}_2\text{O}$ car ils ne sont pas disponibles au laboratoire.

En remplissant le photobioréacteur avec 1 litre de solution préparée à une température de 23°C et un pH de 6,96. Ce milieu est utilisé pour la culture des entéromorphes et des spirogyres.

Les expériences sont menées sous agitation en présence de la lumière avec l'ajout de CO₂

Temps de cultures (heures)	0	36	72
Masse d'entéromorphe en g	0.34	0.39	0.42
Masse de spirogyre en g	0.34	0.44	0.5

Tableau 4 : Evolution de la masse des microalgues en fonctions du temps dans le milieu de Gorham's



Figures 28 : Evolution de la masse des microalgues en fonctions tu temps dans le milieu de Gorham's

✓ Microalgues d'entéromorphes

Au bout de 36 heures de culture pour une masse initiale 0,34g de d'entéromorphes introduite on récupère 0,39 g et on obtient une masse 0,42 g après 72 heures.

✓ Microalgues spirogyre

Une croissance jusqu'à une masse de 0,44 g au bout de 36 heures et à la fin de l'expérience on récupère une masse de 0,5 g (72 h)

Les résultats obtenus montrent que le milieu de Gorham's est adapté au développement des microalgues de type verte puisqu' on a constaté que les deux espèces ont gardé leur teinte vertes, mais la croissance n'était pas importante surtout pour les premiers types des microalgues. Pour ce qui est du deuxième type de microalgues, il est mieux adapté au milieu de Gorham's.

Il est probable que cette faible croissance est dû au manque de certains réactifs constituant le milieu de Gorham's et qui sont essentiels.

✚ Milieu d'usage général pour algues vertes unicellulaires (Bold, 1967)

Solutions stocks (pour chaque solution stock, masse à dissoudre dans un litre d'eau distillée)

1. NaNO_3 : 25 g
2. $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: 2,5 g
3. K_2HPO_4 : 7,5 g
4. KH_2PO_4 : 17,5 g
5. $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 7,5 g
6. NaCl : 2,5 g
7. EDTA : dissoudre 50 g d'acide éthylène-diamine-tétra-acétique et 31 g de potasse (KOH) dans un litre d'eau distillée
8. Solution de fer : dissoudre 4,98 g de sulfate de fer heptahydrate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) dans un litre d'eau acidifiée préparée en ajoutant 1 mL d'acide sulfurique à 999 mL d'eau distillée.

9. Solution de bore : dissoudre 11,42 g d'acide borique (H_3BO_3) dans un litre d'eau distillée.

10. Microéléments : dissoudre les sels suivants dans un litre d'eau acidifiée :

$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$: 8,82 g

$MnCl_2, 4 H_2O$: 1,44 g

MnO_3 : 0,71 g

$CuSO_4 \cdot 5H_2O$: 1,57 g

$Co(NO_3)_2, 6H_2O$: 0,49 g

Pour préparer un litre du milieu de culture à partir des 10 solutions stocks préparées à l'avance. On mélange 10 mL de chacune des solutions 1 à 6, 1 mL de chacune des solutions 7 à 10 et on complète à un litre avec de l'eau distillée.

Dans cette partie, nous avons réalisé deux expériences avec une masse initiale de 2g de *Spyrogera*. La culture des microalgues dans le photobioréacteur rempli d'un litre d'une solution du milieu de Bold, en présence de la lumière et de CO_2 sous agitation continue nous a permis d'obtenir les résultats ci-dessous (tableau 5).

A noter que dans cette expérience on travaille avec un pH=6,8 et la température $23C^\circ$

Temps de culture (jours)	0	2	4
Milieu de pH=6.8	2	2.7	2.3

Tableau 5- Evolution de la masse de culture des microalgues en fonction du temps dans le milieu de Bold

Pour cette expérience avec pH de 6,8 l'échantillon a gardé sa couleur vert et la croissance de la masse des microalgues est de 2,7g durant 2 jours et la décroissance de la masse jusqu'au 2,3 g après 4 jours de culture qui est peut-être le début de phase final.

Donc on peut dire que le milieu neutre c'est le milieu le plus favorable pour une croissance des microalgues dans le milieu de Bold même avec l'absence des nutriments comme MnO_3 et K_2HPO_4

III.4. Conclusion

Un certains facteurs ralentisseur de croissance des microalgues ont été obtenus comme la température qui est une barrière de la diffusion du dioxyde de carbone dans l'eau alors que ce dernier est essentiel pour la croissance des microalgues.

L'absence de plusieurs nutriments dans les deux dernières expériences est à l'origine du ralentissement de la croissance des microalgues.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion

Partout dans le monde, l'intérêt pour les micro-algues est de plus en plus grand et ce dans divers domaines tels que les biocarburants de troisième génération, la pharmacologie, la médecine et l'aquaculture. En effet, elles présentent un rendement photosynthétique élevé et permettent ainsi un fort recyclage du CO₂ industriel. Leur utilisation comme source d'énergie permet aussi d'éviter les compétitions pour l'eau potable et les surfaces cultivables.

Notre travail comporte une mise en place d'une installation complète pour la culture de micro-algues vertes (cladophore, spirogyre et entéromorphe). Le plan d'expérience se base sur deux grandes parties, celle effectuée dans un milieu sans nutriment et autre dans un milieu utilisant une préparation de nutriment.

La culture est une étape très importante, car sans elle il n'y aurait pas d'algues tout simplement. Une culture de micro-algues doit respecter des paramètres physiques précis qui sont nécessaires à la reproduction. Les résultats obtenus montrent une augmentation de la masse cellulaire des micro-algues en fonction de plusieurs paramètres (agitation, CO₂, nutriment et meilleure exposition à la lumière).

En revanche les milieux de culture utilisés n'ont pas été très fructueux car on n'a pas constaté une très grande évolution dans celui de Gorham's et pour le milieu de Bold.

L'univers des micro-algues reste un domaine assez vaste où toutes les espèces n'ont pas encore été testées. Pour les prochaines années à venir, il faudra donc étudier les différentes espèces d'algues pour pouvoir en donner les caractéristiques et la possibilité de leur utilisation en biocarburant. Ensuite l'optimisation des différentes étapes pour un coût de production moins cher ou encore la création de nouveaux matériels industriels sont des thèmes à étudier. Nous devons aussi réfléchir aux quantités de lumières et de nutriments pour un rendement optimal. Pour cela, on estime qu'une dizaine d'années est nécessaire.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] T. Mata, A.A. Martins, and N.S. Caetano (2010) Microalgae for biodiesel production and other applications: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (1), 217-232
- [2] Chisti, Y., May 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25 (3), 294–306.
- [3] Livre Turquoise, (2011).
- [4] Danielo O. (2005) Un carburant à base d'huile d'algue. *Biofutur* 255, 33-36
- [5] LIVRE TURQUOISE Algues, filières du futur
- [6] LIVRE TURQUOISE Algues, filières du futur
- [7] LIVRE TURQUOISE Algues, filières du futur
- [8] Sitographie <http://algue-production-energie.e-monsite.com/pages/comment-produire-du-biocarburant/comment-cultiver-les-micro-algues.html>
- [9] Sitographie <http://algue-production-energie.e-monsite.com/pages/comment-produire-du-biocarburant/comment-cultiver-les-micro-algues.html>
- [10] I. Cantin, 'La Production de Biodiesel à Partir des Micro Algues ayant un Métabolisme Hétérotrophe', Canada, Centre Universitaire de Formation en Environnement, Université de Sherbrooke, 87 p., 2010, A. Demirbas and M.F. Demirbas, 'Algae Energy: Algae as a New Source of Biodiesel', London, Springer, pp. 29 – 47, 2010.
- [11] Modélisation et conception d'un système de culture de microalgues Aurelie Lucchetti
- [12] Degen, J.; Uebele, A.; Retze, A.; Schmid-Staiger, U. & Trösch, W. A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect. *Journal of Biotechnology*, 2001, 92, 89–94.
- [13] J.P. Cadoret, and O. Bernard, 'La Production de Biocarburant Lipidique avec des Microalgues: Promesses et Défis', *Journal de la Société de Biologie*, Vol. 202, N°3, pp. 201 -211, 2008
- J. Jenck, O. Lépine, J. Legrand, P. Dreno, D. Grizeau and C. Dupré, 'Valorisation Industrielle des Micro Algues Photosynthétiques', Ed., *Technique de l'Ingénieur*, 13 p., 2011.
- [14] J. Jenck, O. Lépine, J. Legrand, P. Dreno, D. Grizeau and C. Dupré, 'Valorisation Industrielle des Micro Algues Photosynthétiques', Ed., *Technique de l'Ingénieur*, 13 p., 2011.
- [15] I. Cantin, 'La Production de Biodiesel à Partir des Micro Algues ayant un Métabolisme

Hétérotrophe', Canada, Centre Universitaire de Formation en Environnement, Université de Sherbrooke, 87 p., 2010

[16] J.P. Cadoret, and O. Bernard, 'La Production de Biocarburant Lipidique avec des Micro-algues : Promesses et Défis', Journal de la Société de Biologie, Vol. 202, N°3, pp. 201 -211, 2008. J. Jenck, O. Lépine, J. Legrand, P. Dreno, D. Grizeau and C. Dupré, 'Valorisation Industrielle des Micro Algues Photosynthétiques', Ed., Technique de l'Ingénieur, 13 p., 2011

[17] J. Jenck, O. Lépine, J. Legrand, P. Dreno, D. Grizeau and C. Dupré, 'Valorisation Industrielle des Micro Algues Photosynthétiques', Ed., Technique de l'Ingénieur, 13 p., 2011

[18] I. Cantin, 'La Production de Biodiesel à Partir des Micro Algues ayant un Métabolisme Hétérotrophe', Canada, Centre Universitaire de Formation en Environnement, Université de Sherbrooke, 87 p., 2010.

[19] I. Cantin, 'La Production de Biodiesel à Partir des Micro Algues ayant un Métabolisme Hétérotrophe', Canada, Centre Universitaire de Formation en Environnement, Université de Sherbrooke, 87 p., 2010. J. Jenck, O. Lépine, J. Legrand, P. Dreno, D. Grizeau and C. Dupré, 'Valorisation Industrielle des Micro Algues Photosynthétiques', Ed., Technique de l'Ingénieur, 13 p., 2011

[20] I. Cantin, 'La Production de Biodiesel à Partir des Micro Algues ayant un Métabolisme Hétérotrophe', Canada, Centre Universitaire de Formation en Environnement, Université de Sherbrooke, 87 p., 2010.

[21] I. Cantin, 'La Production de Biodiesel à Partir des Micro Algues ayant un Métabolisme Hétérotrophe', Canada, Centre Universitaire de Formation en Environnement, Université de Sherbrooke, 87 p., 2010

[22] A. Demirbas and M.F. Demirbas, 'Algae Energy: Algae as a New Source of Biodiesel', London, Springer, pp. 29 – 47, 2010.

[23] Techniques conventionnelles et innovantes, et solvants alternatifs pour l'extraction des lipides de micro-organismes

- [24] Ehimen EA, Sun Z, Carrington GC. 2012. Use of Ultrasound and Co-Solvents to Improve the In-Situ Transesterification of Microalgae Biomass. *Procedia Environ. Sci.* 15: 47–55.
- [25] Koberg M, Cohen M, Ben-Amotz A, Gedanken A. 2011. Bio-diesel production directly from the microalgae biomass of *Nannochloropsis* by microwave and ultrasound radiation. *Bioresour. Technol.* 102: 4265–4269
- [26] Yoo G, Park W-K, Kim C-W, Choi Y-E, Yang J-W. 2012. Direct lipid extraction from wet *Chlamydomonas reinhardtii* biomass using osmotic shock. *Bioresour. Technol.*
- [27] Micro-organismes producteurs de lipides Techniques conventionnelles et innovantes, et solvants alternatifs pour l'extraction des lipides de micro-organismes
- [28] Yoo G, Park W-K, Kim C-W, Choi Y-E, Yang J-W. 2012. Direct lipid extraction from wet *Chlamydomonas reinhardtii* biomass using osmotic shock. *Bioresour. Technol.*
- [29] Walker TH, Cochran HD, Hulbert GJ. 1999. Supercritical carbon dioxide extraction of lipids from *Pythium irregulare*. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 76, 595–602.
- [30] Techniques conventionnelles et innovantes, et solvants alternatifs pour l'extraction des lipides de micro-organismes
- [31] Soto Ayala R, Luque de Castro M. 2001. Continuous subcritical water extraction as a useful tool for isolation of edible essential oils. *Food Chem.* 75: 109–113.
- [32] Herrero M, Cifuentes A, Ibañez E. 2006. Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae: A review. *Food Chem.* 98: 136–148
- [33] Herrero M, Cifuentes A, Ibañez E. 2006. Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae: A review. *Food Chem.* 98: 136–148
- [34] Techniques conventionnelles et innovantes, et solvants alternatifs pour l'extraction des lipides de micro-organismes
- [35] Hejazi MA, Wijffels RH. 2004. Milking of microalgae. *Trends Biotechnol.* 22: 189–194.]
- [36] Micro-organismes producteurs de lipides, Techniques conventionnelles et innovantes, et solvants alternatifs pour l'extraction des lipides de micro-organismes
- [37] Milledge J., 2011. Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 10(1), 11
- [38] Becker E. W., 1994. *Microalgae Biotechnology and microbiology*. Cambridge Press University.

- [39] Folmer F., Jaspars M., Dicato M., Diederich M., 2010. Photosynthetic marine organisms as a source of anticancer compounds. *Phytochemistry Reviews*, 9(4), 557–579.
- [40] Mulbry W., Kondrad S., Pizarro C., Kebede-Westhead E., 2008. Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: algal productivity and recovery of manure nutrients using pilot-scale algal turf scrubbers. *Bioresource technology*, 99(17), 8137–42
- [41] (Eminenour-Muzalina et al, 2011 ; Lin et al, 2007 ; Richards et al, 2013).
- [42] Monteiro C.M., Castro P.M.L., Malcata F.X., 2012. Metal uptake by microalgae: underlying mechanisms and practical applications. *Biotechnology progress*, 28(2), 299–311.
- [43] Benemann J., Woertz I., 2012. Life Cycle Assessment for Microalgae Oil Production, 1(2), 68–78
- [44] Kadam K., 2002. Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring. *Energy*, 27(10), 905–922.
- [45] Carver S.M., Hulatt C.J., Thomas D.N., Tuovinen O.H. 2011. Thermophilic, anaerobic co-digestion of microalgal biomass and cellulose for H₂ production. *Biodegradation*, 22(4), 805–14.

Résumé

Le domaine de recherche lié à la valorisation des microalgues photosynthétique est en plein essor depuis quelques années. En effet, ces microalgues présentent en potentiel important dans divers domaines, en particulier celui d'énergie.

Bien que la découverte des gisements de pétrole et charbon ait servi l'humanité, ces derniers resteront épuisables et déclineraient un jour. De plus l'utilisation des carburants fossiles présente une menace considérable de points vue pollution de l'environnements terrestre et marin et détérioration de qualité de l'air. Les microalgues s'avèrent alors comme nouvelle source de carburants. Avant d'arriver à un biocarburant près à l'utilisation, les microalgues sont cultivées dans des étangs ou dans les photobioréacteurs, récoltées puis séchées, en suite l'huile ou amidon son extrait. Les biocarburants issus des microalgues pressentent plusieurs avantages, ils peuvent être liquidés comme alcools et biodiesel ou gazeux, c'est le cas de biohydrogène.

Le sujet proposé est consacré à l'étude de cinétique de croissance de certaines microalgues dans un photobioréacteur. Notre objectif est d'arriver à isoler dans notre région (Wilaya de Bejaia) une souche de microalgues ayants une cinétique de croissance intéressante.

Abstract

The field of research related to the photosynthetic valorization of the microalgae has been in full rise for a few years. Indeed,, these microalgues presents in important potential in various fields, in particular that of energy.

Although the discovery of the oilfields and coal served humanity, the latter will remain épuisable and decline one day. Moreover the use of the fossil fuels a considerable threat of points seen pollution of the environments terrestrial and marine and deterioration of air quality presents.

The microalgues prove then like new source of fuels. Before arriving at a biomass fuel meadows at the use, the microalgues are cultivated in ponds or the photobioréacteurs, are collected then dried, in continuation oil or starch its extract. Biomass fuel resulting from the microalgues has several advantages, they can be liquidated like alcohols and biodiesel or gas, it is the case of biohydrogene

The subject suggested is devoted under investigation kinetics of growth of some microalgues in a photobioreactor. Our objective of managed to isolate in our area (Wilaya de Bejaia) a stock from microalgues having kinetics from interesting growth.