



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



Université Abbès Laghrou -Khenchela Faculté
des Sciences de la Nature Et de la Vie

Département de Biologie Moléculaire et Cellulaire

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Option : **Microbiologie appliquée**

Thème :

Les algues microscopiques thermophiles :
Diversités et potentialités

Présenté par :

Latreche Djihed Mohamed
Rezaikia Aya

Devant le jury :

Président : **M^{elle} BENREDJEM L.** MAA Univ. Abbès Laghrou Khenchela

Encadreur : **M^{elle} BOUTARFA S.** MAA Univ. Abbès Laghrou Khenchela

Examineur : **Mme ARAB Y.** MAA Univ. Abbès Laghrou Khenchela

2020-2021

Remerciement

Tout d'abord nous remercions notre **Dieu** tout puissant de la bonne santé, la volonté et la patience.

Nous remercions sincèrement Madame **BOUTARFA Soumia**, enseignante chercheuse en biologie à l'université "Abbes Laghrour Khenchela" pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant d'encadrer ce travail, de ses encouragements incessants et de tous les efforts qu'elle a fait pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier M^{elle} **BENREDJEM L.** Maître de conférences B, Université Abbès Laghrour Khenchela, d'avoir accepté de présider notre travail ainsi que pour son soutien.

Nous remercions sincèrement Maître-assistante Mme **ARAB Y. A** à l'université Abbès Laghrour Khenchela, d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Nous remercions aussi chaleureusement tous les enseignants de notre département.

Enfin, nous remercions nos amis proches. Merci à nos parents de nous avoir permis d'aller aussi loin dans nos études et de nous avoir soutenu et supporté tout au long de ces années.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à :

- ♥ Nos très chers parents pour leur générosité et leurs sacrifices et nous vous disent merci pour tout ce que vous avez fait pour nous.

- ♥ Nos Frères, Nos Sœurs, Toute nos famille **Latrache** et **Rezaikia**.

- ♥ le mari de ma tante "Djoghlaï Mourad " Que Dieu lui fasse miséricorde.

- ♥ Tous nos amis (es) sans exception. Toutes les personnes qui de près ou de loin ont apporté leur aide. Tous, du fond de nos cœurs, nous vous dédions ce travail

Sommaire

INTRODUCTION.....	01
CHAPITRE I : Généralités sur les algues microscopiques	
1.Définition et structure d'une algue.....	03
2.Distribution /habitat.....	04
3.Composition et nutrition.....	05
4. Les bases de classification des grandes lignées d'algues.....	08
4.1.La pigmentation.....	09
4.2.Les polysaccharides de réserve.....	10
4.3.Les polysaccharides pariétaux.....	10
5.Classification des algues microscopiques.....	11
5.1. Les algues vertes.....	13
5.2. Les algues brunes.....	14
5.3. Les algues rouges.....	14
5.4. Les cyanobactéries.....	15
6. Facteurs de réparation des algues.....	16
7. Reproduction des algues.....	17
8.Caractéristique nutritionnels des macro algues.....	17
8.1.Composition chimique.....	17
8.2.La fraction minéral.....	18
8.3.Les polysaccharides.....	18
8.3.1.Les protéines.....	19
8.3.2.Les lipides.....	19
8.3.3.Les vitamines.....	20
8.3.4.Les caroténoïde.....	21
8.3.5.Les polyphénole.....	21
8.3.6.Les tanins.....	22
8.3.6. a.Les tanins condensés.....	22
8.3.6.b.Les tanins hydrolysables.....	22
8.3.6.c.Les phlorotanins.....	23
9. Les thermophiles.....	24
9.1.Les algues thermophiles.....	25

CHAPITRE II : Application des algues microscopiques

1. Application en alimentation et santé.....	28
2. Application en cosmétologie.....	33
3. Application en environnement.....	35
4. Application pour production de l'énergie.....	44
5. Application des micro-algue pour fabrication de biocarburants.....	45
6. Application en agriculture.....	46
7. Application des algues thermophil.....	49
Conclusion.....	51
Références.....	53

Liste des abréviation

CNRS	Le Centre national de la recherche scientifique
DHA	acide docosahexaénoïque
EPA	acide eicosapentaénoïque
GLA	acide gamma-linoléique
HCO₃⁻	Les ions bicarbonates
INRA	L'Institut national de la recherche agronomique
LBE	Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement
NO₂	Nitrite
N₂	Le di azote
NH₄⁺	ion ammonium
NO₃⁻	Ion Nitrate
PO₄⁻³	Phosphate

Liste des figures

01	Ultra structure de micro algue. Cellules de micro algue vert(a)rouge(b),cyanobactérie(c).	4
02	structure de la chlorophylle « a »	8
03	Répartition des divers groupes d'algues eucaryotes, au sens large, dans l'arbre phylogénétique	10
04	les algues vertes	12
05	Les algues brunes <i>Ascophyllum nodosum</i>	13
06	les algues rouges	14
07	Cyanobactéries (cyanophycées) – <i>Glaucocystis</i>	14
08	Algues thermophiles dans les eaux de ruissellement du printemps chaude	23
09	image microscopique de <i>chlorella sorokiniana</i>	25
10	complément alimentaire (<i>Spiruline</i>)	29
11	Micro Algue (<i>Spiruline</i>)	29
12	chlorella vulgaris sous microscope	30
13	complément alimentaire (micro algue <i>chlorella vulgaris</i>)	30
14	<i>Odontella aurita</i> (complément alimentaire)	31
15	Earthrise Farms ; Usine de production d'Arthrospira (Calipatria, CA, États-Unis).	32
16	extraction de la <i>spiruline</i> (produits cosmétiques)	33
17	extraits d' <i>Arthrospira</i> et de <i>Chlorella</i>	33

18	traitement des eaux usées par micro-algues	36
19	Principaux mécanismes de phytoremédiation	41
20	Les quatre principaux processus de valorisation énergétique de la biomasse de micro-algues	42
21	L'« algotron », procédé pilote parfaitement instrumenté couplant un « raceway » de 56 m ² à un digesteur anaérobie d'1 m ³ sur le site du LBE-INRA à Narbonne.	44
22	Diagramme représentant les processus de conversion de biomasse micro algale pour la production de biocarburant.	48
23	<i>Chlorella sorokiniana</i>	49

Liste des tableaux

01	Éléments majeurs constitutifs des microalgues	6
02	Répartition du fractionnement biochimique d'une cellule de micro algue	7
03	Résumé des groupements majeurs des algues selon les botanistes (Mitchell, 1974)	11
04	les facteurs influents la croissance algale	15
05	Contenu lipidique de diverses espèces (Cadoret, 2008)	19
06	Production mondiale de micro-algues	27
07	Composés bioactifs extraits du genre <i>Spiruline</i>	29
08	les différents composés bioactifs issus de micro algues et leurs utilisations potentielles en cosmétique	35
09	les mécanismes adoptés dans l'élimination du carbone, de l'azote et du phosphore par les micro algues	37

Résumé

Les algues microscopiques se sont des organismes photosynthétiques, présentant des caractéristiques écologiques très variées qui permettent de coloniser la plupart des habitats aquatiques ou terrestres.

Plusieurs espèces d'algues microscopiques colonisent des environnements extrêmes comme les sources chaudes (algues microscopiques thermophiles) grâce à des caractéristiques qui leur permettent de supporter des températures élevées.

Plusieurs applications commerciales des algues microscopiques sont identifiées. Elles peuvent être utilisées pour améliorer la valeur nutritionnelle des aliments en raison de leur composition chimique, et elles jouent un rôle crucial dans l'aquaculture et peuvent être ainsi incorporées dans des produits cosmétiques.

Actuellement, ces micro-algues sont cultivées comme source d'énergie renouvelable. En effet, le biodiesel, une forme de biocarburants, peut être produit par des micro-algues. Une attention croissante existe à travers le monde sur ce biocarburant, lequel est considéré comme une énergie propre pour l'avenir, pour remplacer les combustibles classiques.

Les algues microscopiques sont connues pour produire une large gamme de métabolites secondaires ayant des propriétés d'importance biotechnologique, biomédicale et industrielle.

Mot-clé : algues microscopiques, thermophiles, applications, biotechnologie.

Abstract

Microscopic algae are photosynthetic organisms, with a wide range of ecological characteristics that allow most aquatic or terrestrial habitats to be colonized.

Several species of microscopic algae colonize extreme environments such as hot springs (thermophilic microscopic algae) thanks to characteristics that allow them to withstand high temperatures.

Several commercial applications of microscopic algae are identified. They can be used to improve the nutritional value of foods because of their chemical composition, and they play a crucial role in aquaculture and can therefore be incorporated into cosmetic products.

Currently, these micro-algae are grown as a renewable energy source. Biodiesel, a form of biofuel, can be produced by micro-algae. There is growing attention around the world to this biofuel, which is considered clean energy for the future, to replace conventional fuels.

Microscopic algae are known to produce a wide range of secondary metabolites with properties of biotechnological, biomedical and industrial importance.

Keywords: microscopic algae, thermophilic, applications, biotechnology.

طحالب المجهرية هي كائنات حية تعمل بالتركيب الضوئي ولها مجموعة من الايكولوجية التي تسمح لها باستعمار معظم الموائل الارضية والمائية .

تستعمر عدة انواع من الطحالب المجهرية ببيئات مختلفة مثل الينابيع الساخنة ويطلق عليها الطحالب الحرارية بفضل الخصائص التي تسمح لها بتحمل درجات حرارة.

تم التعرف على العديد من التطبيقات التجارية للطحالب المجهرية. يكمن استخدامها لتسحين القيمة الغذائية للأغذية بسبب تركيبها الكيميائي انها حاسم في تربية المائيات كما يمكن ادماجها في المنتجات التجميلية .

في الوقت الراهن تزرع هذه الطحالب الدقيقة كمصدر للطاقة المتجددة . ويمكن انتاج الديزل الحي وهو شكل من اشكال الوقود الإحيائي بواسطة الطحالب الدقيقة .

ن المعروف الطحالب المجهرية تنتج مجموعة واسعة من الايضات الثانوية ذات الخصائص والأهمية التكنولوجية الحيوية والصناعية.

حي :طحالب المجهرية التطبيقات التكنولوجية الحيوية .

Introduction

Introduction

Les algues microscopiques sont des microorganismes photosynthétiques (photo autotrophe) peut produit la biomasse avec un grand rendement en utilisant : l'eau, CO₂, énergie solaire, qui se développent dans les milieux fortement aqueux, dotées d'une croissance rapide.

Elles possèdent des chloroplastes et donc capable de transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique. Les micro-algues se trouvent généralement dans l'eau douce et dans la plus part des systèmes marins.

Toutes les espèces de micro-algues ne sont pas connues, mais on estime leur nombre à 200 000, seulement environ 30 000 espèces ont été déjà analysées (10% du totale existant estime). Ces microorganismes représentent un grand groupe des espèces différentes.

La première utilisation de micro-algues par l'humain daté à 2000ans pour les chinois, qui sont utilisés *Nostoc* à survivre pendant la famine. La biotechnologie des algues microscopiques commencé à se développer au le milieu du siècle dernier. Les micro-algues peuvent être utilisées pour améliorer la valeur nutritive des aliments pour l'humain et pour les animaux. Elles jouent un rôle crucial dans l'aquaculture, cosmétique, pharmacologie. De plus, elles sont cultivées comme source de molécules de grande valeur. Au cours des dernières années, des études microbiologiques fondées sur des approches moléculaires et culturales ont révélé une grande diversité phylogénétique et physiologique des microorganismes colonisant les sources hydrothermales terrestres. En outre de la capacité de ces microorganismes à tolérer et à résister aux températures et aux conditions extrêmes. Plusieurs espèces d'algues microscopiques peuvent coloniser des environnements extrêmes comme les sources chaudes. Ce groupe de microorganismes dits thermophiles constitue une source d'enzymes thermostables potentiellement utiles pour des applications biotechnologiques et industriels.

- Notre étude consiste à étudier la diversité des algues microscopiques en général et thermophiles en particulier pour présenter l'importance de leur application dans divers domaines, notamment celui de la biotechnologie. A cet égard ce mémoire est divisé en deux grands volets ou chapitres : Le premier volet aborde des généralités sur les algues microscopiques, à savoir leur morphologie, leur classification et leurs métabolisme ;
- Le deuxième volet vise les applications biotechnologiques des algues microscopiques.

Chapitre 1:

Généralité sur les Algues

Microscopique

Chapitre1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES ALGUES MICROSCOPIQUE

I- Généralités sur les algues

1. Définition et structure d'une algue

Les cotes marines ainsi que les océans possèdent les plus grandes richesses sur cette terre parmi lesquelles les algues. Ces organismes constituent exclusivement la masse végétale des eaux marines. Elles sont définies comme étant des organismes photosynthétiques simples, typiquement autotrophes, pluri ou unicellulaires et sont considérées comme source de vie dans l'océan puisqu'elles y produisent l'oxygène. Elles sont considérées parmi les organismes végétaux les plus anciens sur ce monde. (1)

Elles peuvent se développer dans l'eau ou dans des milieux très humides. En effet, elles habitent tous les écosystèmes aquatiques, tels que des océans, des lacs, des rivières et même des glaciers, ainsi que des systèmes terrestres y compris les roches et autres surfaces dures. (2)

les algues ont besoin de lumière afin de réaliser la photosynthèse pour survivre et se développer, d'eau pour leur nutrition ainsi que leur reproduction sexuée, d'éléments nutritifs, du dioxyde de carbone, de l'azote, du phosphate ainsi que du fer. (3)

Une cellule d'algue est composée de : une paroi partiellement cellulosique, un petit noyau et Des plastes pigmentés qui confèrent au thalle de l'algue sa couleur rouge, brune, verte ou bleue, Les algues sont caractérisées par leur **thalle** : est un appareil végétatif uni- ou pluricellulaire, ne possédant ni racine, ni tige et ni feuille. Ces thalles présentent une taille variable de moins d'un micromètre comme pour l'algue bleue *Prochlorococcus* à plusieurs dizaines de mètres dans le cas des *Macrocystis*. On distingue donc les macros et les micros algues. (4)

Les micro-algues regroupent des organismes variés à savoir des procaryotes (cyanobactéries) et des eucaryotes. Les micro-algues vivent dans des milieux fortement aqueux, la plupart d'entre elles peuvent posséder un ou plusieurs flagelles lui conférant ainsi une mobilité flagellaire., Elles peuvent aussi former une fine pellicule gluante ou biofilm, constitué par des algues, des sécrétions adhésives et des microorganismes. (5)

Chapitre1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES ALGUES MICROSCOPIQUE

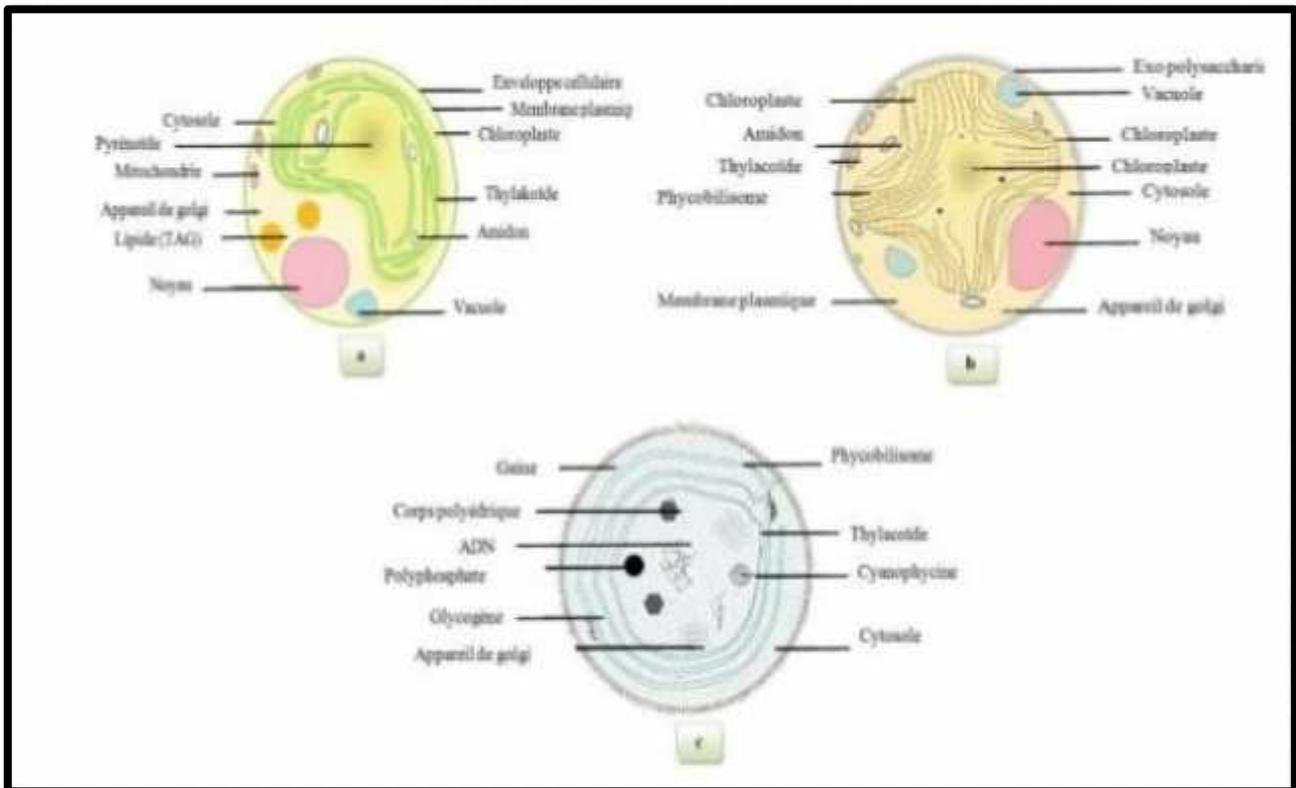


Figure 1: Ultra structure de micro algue. Cellules de micro algue vert(a)rouge(b), cyanobactérie(c) (Asroufi,2019)

2. Distribution/Habitats : des océans aux milieux extrêmes

Les micro-algues occupent la plupart des niches écologiques. Si elles sont surtout présentes dans les environnements aquatiques, elles ont su également coloniser les sols et une vaste gamme de supports comme les rochers, les arbres ou encore les édifices architecturaux. (6) Preuve de leur diversité d'habitats, certaines micro-algues se développent dans les eaux de fonte de la glace ou de la neige et on les rencontre également dans les déserts arides à semi- arides. L'atmosphère constitue également un environnement dans lequel une diversité notable de micro-algues eucaryotes et de cyanobactéries est signalée. (7) Enfin, cette capacité à coloniser l'ensemble de la biosphère est une propriété qui, comme pour les bactéries non photosynthétique, leur permet de se développer dans des conditions dites « extrêmes ». C'est grâce à l'absence de structure complexe autre que la cellule et à un métabolisme orienté principalement vers la production d'énergie que les micro-algues ont cette capacité à être notablement ubiquistes. (8)

85 % des biotopes de la terre présentent des conditions de températures inférieures à 5°C .

Chapitre 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES ALGUES MICROSCOPIQUE

Ces milieux hébergent une diversité remarquable de microorganismes photosynthétiques psychrophiles. Parmi ceux-ci, nous citerons par exemple *Chlamydomonas nivalis*, responsable des colorations rouges sur les neiges qui présente en outre une résistance aux radiations UV du fait d'une accumulation d'asthaxanthine dans son cytoplasme. A l'inverse, dans des conditions thermophiles, la cyanobactérie *Synecococcus* est capable de croître dans les sources d'eau chaude (60-80°C), par ailleurs alcalines. Dans des sources chaudes (38-57°C) et acides (pH 0,5-2,5), les micro-algues rouges *Cyanidioschyzon*, *Cyanidium* et *Galdieria* sont les seules représentantes des Eucaryotes identifiées à ce jour capables de se développer. (9)

Parmi les espèces acidophiles, *Dunaliella acidophila* croît dans une gamme de pH de 0 à 3 (10). Dans cette vaste classe des Chlorophyceae, *Dunaliella salina*, exploitée massivement pour la production de β -carotène et de glycérol, a la particularité de croître dans des conditions hyper-salines proches de la saturation. (10)

A l'instar des bactéries et *archae*, l'adaptation à ces conditions environnementales particulières mobilise des propriétés métaboliques qui recèlent un intérêt et des enjeux potentiels en biotechnologie, que nous abordons plus en détail dans la suite. (11)

3. Composition et nutrition:

Les besoins nutritifs des micro-algues sont similaires à ceux des plantes supérieures. (12) Redfield (1934) a proposé une composition élémentaire C:N:P de 106:16:1. Cette composition est relativement constante dans le milieu naturel. Défini par Vonshak (1986) le milieu de culture devra satisfaire les besoins en éléments majeurs (ou macroéléments) C, H, N, O, P, S et en micro-éléments encore appelés éléments traces. Le tableau suivant (Tableau 1) indique des ordres de grandeurs pour les éléments majeurs constitutifs des micro algues. (12)

Chapitre1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES ALGUES MICROSCOPIQUE

Tableau 1 : Eléments majeurs constitutifs des micro algues. (12)

Elément	Composition cellulaire
C	176-650
O	205-330
H	29-100
N	10-140
Na	0,4-47
K	1-75
P	0-80
S	1,6-16
Mg	0,5-75
Fe	0,2-34
Zn	0,005-1
Mn	0,02-0,24
Si	0-230

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

Chapitre1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES ALGUES MICROSCOPIQUE

Tableau 2 : Répartition du fractionnement biochimique d'une cellule de micro algue
(Becker, 2007)

Micro-algues	Protéines (%)	Polysaccharides (%)	Lipides (%)
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Spirulina platensis</i>	46-63	8-14	4-9
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11

Le carbone est le constituant majeur des micro algues. **(13)** Si, vis-à-vis de cet élément, la plupart des micro algues mobilisent un métabolisme exclusivement photo autotrophe (utilisation de lumière comme source d'énergie et du carbone inorganique), d'autres présentent un métabolisme hétérotrophe (utilisation du carbone organique en absence de lumière) voire mixotrophe (métabolismes photo autotrophe et hétérotrophe conjugués), simultanément ou séquentiellement. **(14)**

-L'azote compte pour 7 à 10 % de la composition de la biomasse. C'est un élément indispensable au métabolisme cellulaire qui intervient notamment dans la synthèse de protéines fonctionnelles et structurales. Il est assimilé préférentiellement sous les formes ammonium (NH_4^+) et nitrate (NO_3^-), mais nitrites et urée pourront également répondre aux besoins azotés. **(15)**

-L'élément trace le plus indispensable est le fer. Il intervient dans des réactions enzymatiques fondamentales : au niveau des cytochromes des chaînes respiratoires, de l'assimilation de l'azote, de la synthèse de la chlorophylle et des acides nucléiques. **(15)**

Enfin, Les bactéries hétérotrophes libres ou associées aux micro algues en relation symbiotique, subviennent à ces besoins en les excréant activement dans le milieu ou passivement au cours des lyses cellulaires. **(16)**

4. Les bases de classification des grandes lignées des algues

De nombreux critères écologiques, physiologiques ou biochimiques interviennent dans la phylogénie des algues comme les structures cellulaires, le mode de nutrition, l'habitat ou même la nature et la localisation des pigments et glucanes de réserve. Malgré une extrême diversité et complexité structurale, tant d'un point de vue macroscopique que microscopique, les algues peuvent néanmoins être classées en une dizaine d'embranchements, selon des critères basés sur leurs compositions pigmentaires, leurs polysaccharides de réserve ou des caractéristiques structurales. **(17)**

4.1. La pigmentation

Les pigments ont dès le début du 19^{ème} siècle constitué un critère important dans la classification des algues. Le rôle physiologique de ces molécules est de capter l'énergie lumineuse. Selon la nature des pigments surnuméraires associés à la chlorophylle, les plantes sont parfois verts (Chlorophytes), parfois jaunes ou bruns (Chromophytes), ou encore rouges (Rhodophytes). (17)

Des antennes collectrices de lumière **HCL** permettent le transfert de cette énergie vers le centre réactionnel de photosystème 2. Il existe deux grands types de pigments photosynthétiques ; les pigments actifs et les pigments accessoires.(17)

Les pigments actifs

Le pigment photosynthétique actif est la chlorophylle a qui est le pigment le plus important dans le processus de la photosynthèse. Les pigments actifs sont capables de convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique.(17)

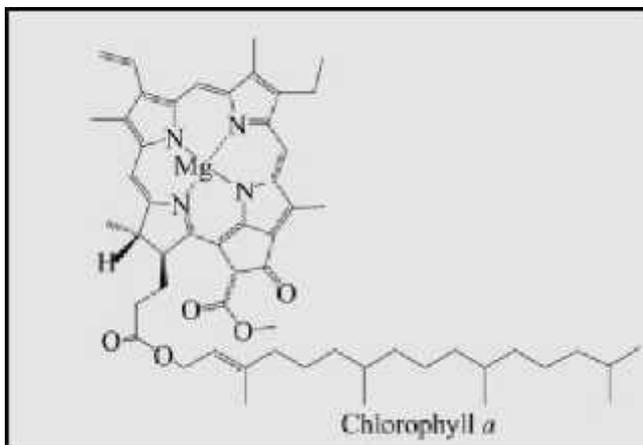


Figure 2 : structure de la chlorophylle « a »

Les pigments accessoires

Sont incapable de convertir l'énergie mais vont transférer l'énergie vers les chlorophylles. (17)

4.2. Les polysaccharides de réserve

Les polysaccharides ou glucanes sont des polymères de glucides qui résultent du mécanisme photosynthétique. Il en existe deux familles, les polysaccharides de réserve et les polysaccharides pariétaux. Il existe des glucanes de réserve solubles en solution dans les vacuoles et d'autres insolubles qui forment des grains observables en microscopie. Composés de D-glucose, les glucanes de réserve se rencontrent sous deux formes: liés en (-1,4) ils appartiennent à la catégorie des amidons et liés en (-1,3), ils font parti de la catégorie des laminaires.(17)

4.3. Les polysaccharides pariétaux

- La classification des grandes familles d'algues repose également sur la nature chimique des colloïdes qu'elles produisent à la périphérie de leurs cellules.(18)

-La paroi des cellules végétales est parfois considérée par les biologistes comme un organe à part entière. La paroi des algues diffère significativement de celles des autres organismes végétaux par son organisation et sa composition. Elle peut être interprétée comme étant généralement une structure biphasique, composée d'une phase fibrillaire cristalline squelettique et d'une phase matricielle dont les structures de compositions variables selon les espèces, sont parmi les plus complexes connues dans la nature.(19)

- Ainsi, malgré leur extrême diversité et complexité tant structurale que morphologique, il est possible de réaliser, sur la base de caractères chimiques, une classification des principales lignées d'algues.(19)

5. Classification des algues:

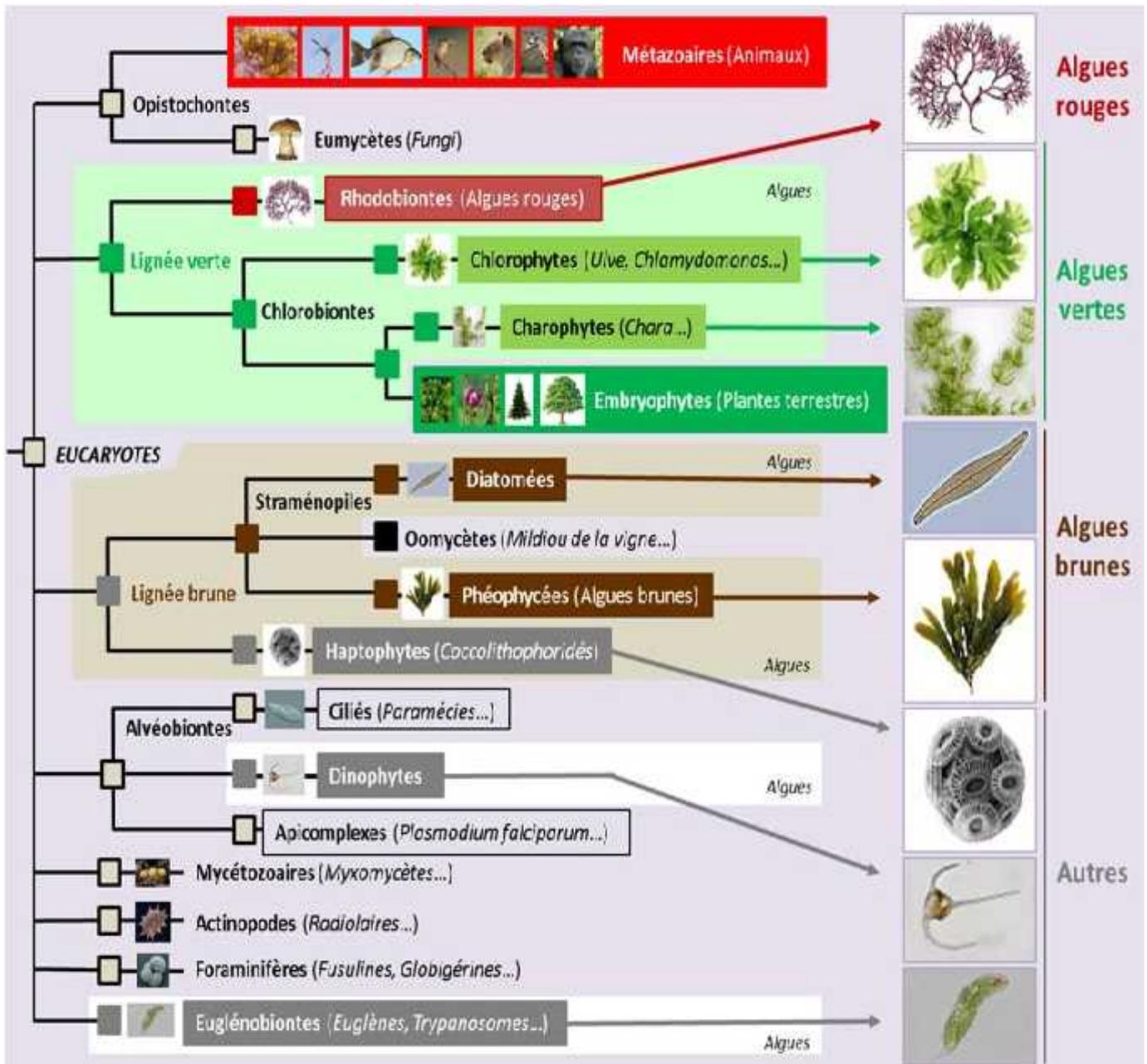


Figure 3: Répartition des divers groupes d'algues eucaryotes, au sens large, dans l'arbre phylogénétique (<https://www.encyclopedie-environnement.org/>)

Chapitre1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES ALGUES MICROSCOPIQUE

En général, les algues regroupent quatre groupes qui sont différenciées par rapport à la couleur, Chaque groupe contient des classes, et chaque classe contient des centaines d'espèces. (20)

- Les algues sont très diversifiées et constituent un ensemble hétérogène dans la mesure où elles n'appartiennent pas toutes à une même voie d'évolution mais à des groupes phylogénétiques très variés.(20)

- Cette diversification est illustrée par les variations importantes dans leurs physiologies et métabolisme, reflet d'une grande diversité génétique. (20)

- De ce fait, on distingue les organismes eucaryotes uni- ou pluricellulaires avec une pigmentation rouge relative aux algues rouges, une pigmentation jaune relative aux algues brunes, les algues vertes à pigmentation verte et les organismes procaryotes à savoir les bactéries bleues ou cyanobactéries communément appelées algues bleues.

-Seulement 3 types de pigments donnent aux algues leurs couleurs : les chlorophylles, les caroténoïdes et les phycobiliprotéines. (21)

Tableau (3): Résumé des groupements majeurs des algues selon les botanistes (Mitchell, 1974)

Phylum	Nom Commun et <i>Espèces</i>	Pigments	caractéristiques
Cyanophyte	Algues bleues- vertes <i>Spirulina</i> , <i>Anabaena</i>	Bleu vert: phycocyanine, phycoérythrine, chlorophylle a et b	Multicellulaire ou unicellulaire mais habituellement microscopique.
Euglenophyte	<i>Euglenoide</i> <i>Euglena</i>	Vert	unicellulaire, mobile, sans membrane cellulaire.
Chlorophyte	Algues vertes <i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i>	Vert: chlorophylle a et b.	Unicellulaire, multicellulaire, quelques unes microscopiques, membrane cellulaire formée de cellulose et de pectine

Chrysophyte	Algues jaune-vertes ou brunes claires Diatomées	Jaune - vert, brun clair: xanthophylle, carotènes et chlorophylle.	Microscopique, unicellulaire, leur membrane cellulaire contient de la silice.
Pyrophyte	Dinoflagellés, <i>Peredinium</i> , <i>Massartia</i>	jaune-vert, brun foncé Xanthophylle, chlorophylle a et c.	Unicellulaire, mobile, membrane cellulaire en cellulose.

5.1. Les algues vertes (Chlorophycées)

Elles sont de formes très variées, uni-ou pluricellulaires. Leurs plastes sont colorés en vert par les chlorophylles a et b, auxquelles sont associés des carotènes et des xanthophylles. La photosynthèse permet la formation d'amidon, comme pour les plantes supérieures, la plupart des algues vertes vivent en eau douce ou en milieux marins, mais certaines espèces peuvent également se développer sur terre. Elles jouent un rôle important dans l'oxygénation des eaux, favorisant ainsi la vie animale. (22)



Figure 4:Algue verte (<https://fr.dreamstime.com>)

5.2. Les algues brunes (Phéophycées)



Figure 5: Les algues brunes *Ascophyllum nodosum* (.www.futura-sciences.com)

La couleur brune de ces algues résulte de la dominance du pigment xanthophylle, la fucoxanthine, qui masque les autres pigments (chlorophylle a et c, ainsi que le bêta-carotène). Toutes possèdent une structure pluricellulaire, mais leurs dimensions varient depuis les éléments microscopiques jusqu'aux très grands spécimens. La grande majorité des algues brunes sont marines. (22)

5.3. Les algues rouges (Rhodophycées)

Les rhodophycées ou algues rouges forment un groupe très diversifié. Ces algues doivent leur couleur à la présence de plastides roses dans lesquels un pigment rouge, la phycoérythrine, est associé à plusieurs autres pigments dont les chlorophylles. La plupart de ces algues rouges sont pluricellulaires et marines, mais il existe quelques formes unicellulaires et quelques unes vivent également en eau douce. Les algues rouges sont divisées en deux groupes: celui des Bangiophycées (qualifiées de primitives) et celui des Floridéophycées (plus complexes)(23).



Figure 6: Algues rouges (<https://www.theriderpost.com>) (<https://www.aquaportail.com>)

5.4. Les Cyanobactéries

Les cyanobactéries ou les algues bleues sont constituées des colonies de taille, de forme et de couleur très variables. Comme les algues rouges, elles possèdent des pigments surnuméraires bleus (Phycocyanines) et rouges (Phycoérythrines) qui masquent la chlorophylle a. En dépit de leur nom ancien d'algues bleues, elles sont rarement bleues mais plus souvent rouges, vertes avec des reflets bleutés, violets, bruns, jaunes ou orangés. La plupart d'entre elles ont une consistance gélatineuse voire gluante en raison des mucilages qu'elles sécrètent .(23)

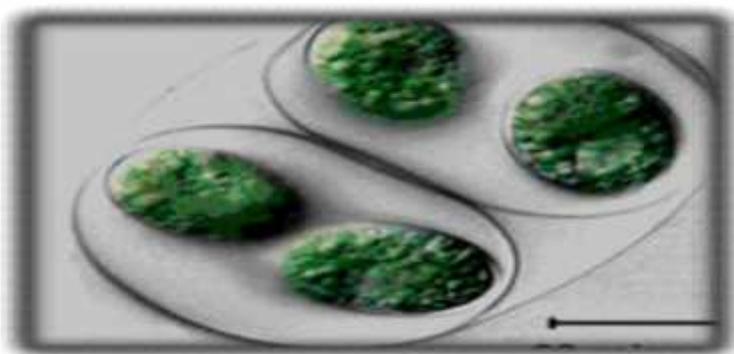


Figure 7:Cyanobactéries (cyanophycées)(<https://technologiemedi.net>)

6. Facteurs de répartition des algues

Les algues sont liées à l'eau et peuvent dès lors s'installer dans tous les types d'habitat suffisamment humides et éclairés. On peut les retrouver en eau douce, en mer, sur sol humide et même sur la neige. Les algues étant photosynthétiques, elles sont dépendantes de la présence de la lumière. Aussi, les algues nécessitent d'être fixées à un substrat, par conséquent, la texture, le degré de cohésion et la nature chimique du substrat ont une importance sur la répartition spatiale des espèces .(24)

Tableau 4: les facteurs influents la croissance algale.

Facteurs		
Abiotique		Luminosité
Physique/Chimique	Température	Concentration des nutriments O ₂ PH
Biotique		Pathogènes (virus ,champignons , bactéries)

7. Reproduction des algues

Dans de très nombreux cas, la reproduction des algues s'effectue par multiplication végétative. Il s'agit d'une multiplication sexuée qui consiste en la division d'une cellule isolée (cas des algues bleues), soit en une fragmentation de thalle aboutissant à la formation de plusieurs organismes identiques. Elle est souvent réalisée par la formation de cellules spécialisées: les spores. Les algues eucaryotes réalisent en plus une reproduction sexuée au cours de laquelle l'union de deux cellules reproductrices, ou gamètes, produit un œuf, ou zygote. (25)

La reproduction des algues se déroule ainsi selon une alternance de phases de reproduction asexuée assurée par les thalles (sporophytes), et de phases de reproduction sexuée, assurée par des thalles producteurs de gamètes (gamétophytes). (26)

8. Caractéristiques nutritionnelles des macro algues

8.1. Composition chimique

Les algues ont des potentialités nutritionnelles très riches, ceci se justifie par: la présence d'une fraction minérale variée et abondante qui constitue un apport important de macroéléments et oligoéléments, par la présence de protéines en générale bien équilibrées en acides aminés et présentes en quantités non négligeables dans certaines espèces, par un contenu vitaminique varié où la plupart des vitamines sont représentées, par une fraction lipidique faible mais cependant, dans certaines espèces riche en acides gras polyinsaturés et enfin par leur contenu en fibres ayant des structures variées et originales différentes des fibres des végétaux terrestres. (27)

La composition chimique des macro algues marines varie suivant plusieurs facteurs: L'espèce, le stade de maturité, l'habitat naturel et les conditions environnementales. (28)

8.2. La fraction minérale

Les algues puisent dans la mer une richesse incomparable d'éléments minéraux très variés. La teneur en minéraux varie entre 8 et 40% .(27) ,(28)

-Cette fraction minérale offre d'abord une grande diversité: macroéléments comme le sodium, calcium, magnésium, potassium, chlore, soufre, phosphore, mais également oligoéléments tels que l'iode, le fer, le zinc, le cuivre, le sélénium, le molybdène, ainsi que bien d'autres oligoéléments comme le fluor, le manganèse, le bore, le nickel, le cobalt.

-Selon certains auteurs, les trois phyllo d'algues (brunes, vertes, rouges) sont à peu près équivalente en quantités de matières minérales totales, on peut noter cependant un petit avantage pour les algues brunes et rouges. (29)

8.3. Les polysaccharides

Les algues constituent des sources importantes de polysaccharides de (33 à 61%) ayant des structures variées et originales, différentes des fibres des végétaux terrestres. Du point de vue nutritionnel, la majorité des polysaccharides algaux sont représentés par des polysaccharides non digestibles, excepté pour l'amidon chez les algues vertes et le floridoside chez les algues rouges .(29)

Selon ce même auteur, parmi les polysaccharides insolubles (21 à 40% des polysaccharides totaux), on trouve une fraction cellulosique, présente en faible proportion chez les trois phylla ainsi que de l'amidon floridéen, notamment chez les algues rouges. D'une manière générale, hormis la cellulose, les structures chimiques précises des polysaccharides insolubles restent très mal connues. Plus intéressante, la fraction des polysaccharides solubles représente de (51% à 56%) des polysaccharides totaux chez les algues vertes et rouges, de (67 à 87%) chez les algues brunes. La nature de ces polysaccharides solubles est variable en fonction de phylum considéré. (29)

-Les polysaccharides solubles des algues rouges sont les agars, carraghénanes, xylanes.

-Les polysaccharides solubles des algues brunes sont les laminaranes, alginates.

-Les polysaccharides solubles des algues vertes sont constitués par les ulvanes. (29)

8.3.1. Les protéines

La teneur en protéines des algues marines varie fortement entre les espèces et dépend des saisons et des conditions environnementales .(30)

Généralement, la fraction protéique des macro algues brunes est faible (3 à 15% de la matière sèche) comparée à celle des macro algues vertes et rouges (10-47% de la matière sèche).

La plupart des macro algues brunes industriellement exploitées (*Laminaria digitata*, *Ascophylum nodosum*, *Fucus vesiculosus* et *Himantalia elongata*) ont une teneur en protéines plus faible que 15 % (MS) excepté pour l'espèce *Undaria pinnatifida* (Wakamé) qui possède un niveau protéique variable de (11 à 24%) (MS). (30)

8.3.2. Les lipides

La teneur lipidique est très faible et varie de 1 à 3% de la matière sèche. Du point de vue qualitatif, les lipides des algues diffèrent de ceux des végétaux terrestres. Ils présentent une proportion en acides gras essentiels supérieure et les acides gras insaturés sont prédominants .(16) Les algues vertes dont la composition en acides gras est la plus proche de celle des végétaux supérieurs ont par rapport à ceux-ci, une teneur beaucoup plus élevée en acide oléique (C18:1) et en acide alpha-linolénique (3-C18:3).(31)

Les algues rouges contiennent des taux élevés d'acides gras polyinsaturés à 20 carbones. L'acide eicosapentaénoïque (EPA) en particulier constitue 50% des acides gras polyinsaturés chez *Porphyra* sp. et *Palmaria palmata*. (31)

L'étude de la fraction lipidique de l'algue brune *Cystoseira sedoïdes* des côtes algériennes, a montré une multitude d'acides gras de C12 à C20, parmi lesquels se distinguent les acides gras saturés et insaturés (32).

Tableau 5 : Contenu lipidique de diverses espèces (Cadoret, 2008)

Nom de l'espèce	Contenu maximum en lipide (%poids sec) 29-75
Botryococcus braunii	
Chlorella protothcooides	15_55 6-63
Nannochloris	9-59
Stichococcus	

8.3.3. Les vitamines

Les travaux concernant les teneurs en vitamines de différentes algues marines sont peu nombreux. Schiewer (1970) a mené une étude sur les proportions vitaminiques de plusieurs algues de la mer baltique, il a démontré des différences non significatives entre les trois groupes d'algues (brunes, vertes et rouges). Cependant, des variations en vitamines chez une même espèce sont très élevées pour trois raisons :

- L'état de développement annuel,
- L'influence du lieu de prélèvement

Variations annuelles saisonnières, maxima estival, minima hivernal. Les principales vitamines sont:

-Vitamine B12: Les algues contiennent une proportion non négligeable en vitamine B12, contrairement aux plantes terrestres qui en sont complètement dépourvues. Les travaux les plus récents semblent indiquer que la vitamine B12 des algues est bien bio disponible.(32)

-Vitamine C: La vitamine C est présente en quantités importantes dans certaines algues vertes et brunes, à des taux variant entre (500 et 3000mg/Kg sec) alors que les algues rouges ont des teneurs en vitamine C de l'ordre de (100 à 800 mg/Kg sec).(32)

-Vitamine E: Les algues brunes sont plus riches en vitamine E que les algues vertes et rouges. Parmi les algues brunes, les teneurs les plus élevées sont observées chez les Fucales (*Ascophyllum* et *Fucus* sp.) qui contiennent entre (200 et 600 mg de tocopherols/Kg sec).(32)

8.3.4. Les caroténoïdes

-Les caroténoïdes sont de puissants antioxydants. Les algues /brunes sont particulièrement riches en caroténoïdes et notamment en fucoxanthine, -carotène et violaxanthine.(33)

- Les principaux caroténoïdes des algues rouges sont le -carotène, -carotène et leurs dérivés dihydroxylés : zeaxanthine et lutéine. La composition en caroténoïdes des algues vertes reste voisine de celle des plantes supérieures : Les principaux caroténoïdes présents sont le carotène, la lutéine, la violaxanthine, l'antheraxanthine, la zeaxanthine, et la neoxanthine.(33)

-Un grand nombre d'études a démontré les propriétés antioxydantes des caroténoïdes algaux et le rôle qu'ils jouent dans la prévention de plusieurs pathologies liées au stress oxydatif .(33),(34)

8.3.5. Les polyphénols

Certaines algues marines contiennent des polyphénols appelés aussi phlorotannins. Ces derniers constituent un groupe très hétérogène de molécules selon leur structure et leur degré de polymérisation, fournissant ainsi une grande variété d'activités biologiques potentielles. Les teneurs les plus élevées sont retrouvées dans les algues brunes et varient entre 5 et 15% du poids sec. (35)

8.1.6. Les tanins

Les tannins sont des polyphénols naturels qui, à l'origine, sont connus pour leur capacité à précipiter les alcaloïdes et les protéines. Selon Bate-Smith (1973): « Les tannins sont des composés phénoliques hydrosolubles ayant un poids moléculaire compris entre (500 et 3000 Da) et qui ont à coté des réactions classiques des phénols, la propriété de précipiter les alcaloïdes, la gélatine, et d'autres protéines». Même si cette définition reste valable, elle a été complétée grâce aux méthodes récentes d'analyse qui ont permis d'éclaircir la structure de ces polyphénols. Ainsi, les tannins sont désormais définis comme des polyphénols de masse moléculaire allant jusqu'à 20000Da. (36),(37) Les tanins peuvent, selon leurs caractéristiques structurales, être divisés en trois classes:

8.3.6.a. Les tanins condensés : Nommés également proanthocyanidines, les tannins condensés sont des oligomères et des polymères de flavonoïdes. Les plus connus sont les procyanidines qui sont des chaînes de catéchine et/ou d'épicatéchine liées par des liaisons carbone-carbone en 4-6 ou 4-8 (38). En général, les tanins condensés ont des poids moléculaires plus élevés que ceux des tannins hydrolysables. (39)

8.3.6.b. Les tannins hydrolysables : Les tannins hydrolysables sont des oligo ou polyesters d'un sucre, en général le glucose, et de molécules d'acide-phénol. (40), (41), (42) Ils sont classés selon la nature de l'acide-phénol: les tannins galliques possèdent un acide gallique, alors que les tannins éllagiques ont un acide hexahydroxyphénique. (43) Le terme tannins hydrolysables indique leur sensibilité à l'hydrolyse acide. Ils sont notamment hydrolysés dans le tractus digestif des ruminants et leurs produits de dégradation sont absorbés. (44) Ils peuvent être responsables d'intoxications, lors d'ingestion trop massive, et provoquent des lésions hépatiques et rénales, décrites chez les ovins (45) ou les bovins (46).

8.3.6.c.Les phlorotanins : Chez les algues brunes (Phaeophyceae), le seul groupe de tannins présent est représenté par les phlorotannins. Ce sont des composés chimiques aromatiques uniques dans le monde végétal. Du fait de leur rôle d'antioxydants naturels, ces composés suscitent beaucoup d'intérêts pour la prévention et le traitement du cancer, des maladies inflammatoires, cardiovasculaires et neurodégénératives. Il s'agit de polymères de phloroglucinol (1,3,5-trihydroxybenzene) . Ils peuvent constituer jusqu'à 15% du poids sec des algues brune (47)

9. Les thermophiles

Sont des organismes ayant besoin d'une température élevée pour se développer. Plusieurs définitions ont été proposées pour définir les thermophiles. La plus reconnue est celle qui a été proposée par Thomas Brock, le microbiologiste à l'origine de la découverte des micro-organismes thermophiles. Les **organismes thermophiles** peuvent vivre et se multiplier entre 50 et 70 °C.

(<https://wwz.ifremer.fr>)

Ils peuvent croître entre 25 et 40 °C mais faiblement. Il existe des organismes thermophiles parmi les différents groupes d'organismes eucaryotes comme des protozoaires, des champignons, des algues, et des procaryotes comme des streptomycètes, des cyanobactéries, des *Clostridium*, des *Bacillus*.

les **thermophiles** sont classés en 3 catégories: les **thermophiles modérés** dont les conditions optimales de croissance se situent entre 55 et 65°C, les **thermophiles extrêmes** dont la température optimale de croissance est comprise entre 65 et 80°C et les **hyper thermophiles** dont la température optimale de croissance est supérieure à 80°C.

Les **thermophiles** sont dans leur immense majorité affiliés aux 2 domaines de procaryotes (=micro-organismes unicellulaires ne possédant pas de noyau) que sont les Bacteria et les Archaea, mais quelques eucaryotes (=organismes possédant un noyau) thermophiles ont également été décrits. Chez les eucaryotes, les températures maximales de croissance recensées à ce jour se situent aux alentours de 50°C chez les plantes et les animaux, de 60°C chez les algues unicellulaires, (<https://wwz.ifremer.fr>)

La vie à haute température est rendue possible par un certain nombre de mécanismes adaptatifs et/ou de molécules que l'on retrouve uniquement chez les (hyper)thermophiles. Les protéines des thermophiles et hyper thermophiles sont plus thermostables que celles de leurs homologues mésophiles et fonctionnent de manière optimale à haute température. Néanmoins, il n'existe aucune règle générale permettant d'expliquer cette thermo stabilité, chaque protéine adoptant sa propre stratégie de stabilisation. Cette thermo stabilité intrinsèque des protéines en général et des enzymes en particulier est le plus souvent due à des modifications mineures de la séquence en acides aminés favorisant le repliement de la protéine sous une forme compacte, avec un nombre réduit de cavités internes, un nombre élevé de ponts ioniques contribuant à maintenir l'ensemble et à résister à la dénaturation. (<https://www.lagrandepoubelle.com>)

10. Les algues thermophiles

Sont des micro-organismes capables de vivre à une température élevée (50-70 °C).

Appartiennent à ce groupe les Chlorophycées qui ont besoin pour vivre et se développer de conditions de milieu nettement délimitées et qui vivent, en général, dans les eaux de température modérée (jusqu'à 30° environ) faiblement chargées de sels minéraux ou de matières organiques (eaux des ruisseaux, des lacs, des torrents, des fossés ...) et exposées à la lumière solaire. (48)



figure 08: Algues thermophiles dans les eaux de ruissellement du printemps chaud

(<https://www.alamyimages.fr>)

Habitat

Certaines algues thermophiles sont adaptées à des environnements tels que les sources chaudes. Ils peuvent tolérer des températures élevées, un pH acides et des conditions variables d'éclairage toujours changeantes.

Les algues thermophiles : se trouvent en tant qu'habitants normaux des zones volcaniques continentales et sous-marines, des sédiments marins géothermiques et des événements hydrothermaux et sont donc considérés comme des extrémophiles. (48)

Exemples sur des algues thermophiles :

Chlorella sorokiniana

Chlorella sorokiniana est une espèce de micro-algue verte d'eau douce de la division Chlorophyta. Il a une couleur vert émeraude caractéristique et une agréable odeur d'herbe. Ses cellules se divisent rapidement pour produire quatre nouvelles cellules toutes les 17 à 24 heures

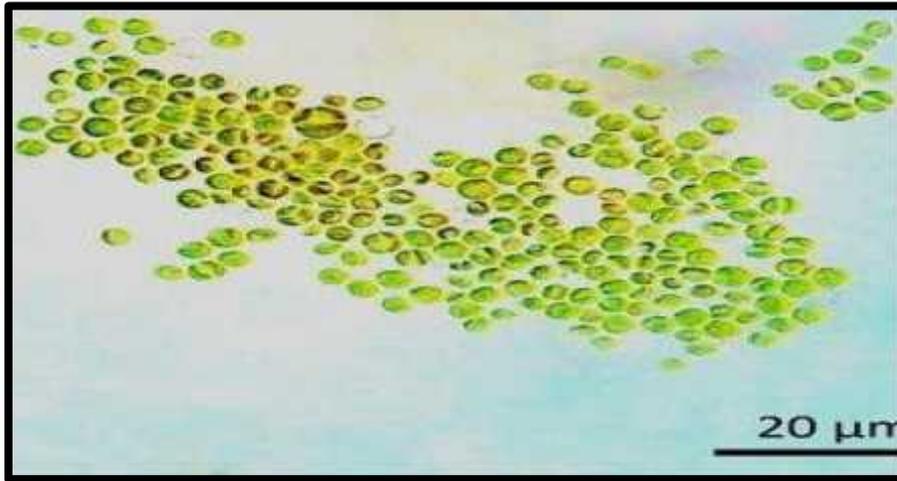


Figure 09 : *Chlorella sorokiniana* sous microscope

(<https://www.researchgate.net/>)

Chapitre 2:

Application des Algues Microscopiques (Potentialité)

Application des Algues-Microscopiques :

Dès les années 50, les micro-algues ont suscité un intérêt notable lorsque les sociétés d'après-guerre appréhendaient les perspectives d'une expansion démographique et ses conséquences sur l'alimentation mondiale. (49)

Un taux de croissance plus important que celui des plantes supérieures et une fraction protéique remarquable ont alors positionné le phytoplancton comme un gisement d'intérêt à l'avenir de la nutrition humaine. Ces travaux, vraisemblablement initiés dans l'Allemagne en guerre, ont marqué le début des enjeux scientifiques et industriels autour de ces cellules. La recherche et l'exploitation de métabolites d'intérêt pharmaceutique ont suivi ce mouvement.

Ainsi, si la nutrition constitue à l'heure actuelle l'essentiel des revenus industriels de ces organismes, ils s'adressent également de façon marginale aux marchés de la cosmétique, de la pharmacie et de l'environnement et bien plus récemment à celui de l'énergie. Actuellement, la production mondiale de micro algues était estimée à un peu plus de 10 000 tonnes de matière sèche par an (Tableau 5). Plus de 60 ans après un certain enthousiasme, l'ampleur de l'exploitation du phytoplancton demeure toutefois anecdotique par rapport à la production de macro algues (15 millions de tonnes/an dans le monde, essentiellement en Asie) et de Procaryotes non photosynthétiques (eg., la seule production de boues activées est de l'ordre de 1 MT de matière sèche/an pour la France). (49)

Tableau 6 : Production mondiale de micro-algues (d'après Spolaore et al., 2006)

Algue	Production annuelle	Pays producteurs	Application et produits
<i>Spirulina</i>	2,000	Chine, Inde, USA, République de, Japon	nutrition animale et humaine, phycobiliprotéines, cosmétique
<i>Chlorella</i>	2,000	Australie, USA,	Nutrition humaine, cosmétique, b carotène
<i>Dunaliella</i>	1,200	Chine	Nutrition humaine

1-Application en alimentation et santé

Micro- algues pour la nutrition humaine sont actuellement commercialisés sous différentes formes telles que comprimés, capsules liquides. Ils peuvent également être incorporés dans les pâtes, les collations, les barres de bonbons ou les gommages et les boissons .En raison de leurs diverses propriétés chimiques, ils peuvent agir comme un supplément nutritionnel ou représente une source d'aliments naturels colorants .Les applications commerciales sont par quatre souches : *Arthrospira*, *Chlorelle*. (50)

a- La spiruline : une micro algue bleue existe depuis 3,5 milliards d'années (www.doctissimo.fr) Courante chez les populations **Aztèques(51)**. Elle pousse de façon naturelle dans les eaux chaudes des lacs en **Inde**, au **Tchad** et au **Mexique** (www.doctissimo.fr) .Utilisée dans l'alimentation comme un complément protéique .Elle est riche en protéine , vitamines (E) (B12) , oligo-aliments (calcium, phosphore ,magnésium ,cuivre ..), (**51**) bêta-carotène, minéraux , chlorophylle. (**51**) Dans certains pays , la spiruline est utiliser pour combattre la dénutrition grâce à sa richesse en nutriment et sa culture.

Certaines études ont démontré l'utilisation de cette micro algues pour la production de pigments grâce à son antioxydant propriétés. -Carotène représente approximativement 80% des caroténoïdes présents dans la *spiruline*, et d'autres composants, comme les tocophérols, la phycocyanine et phycoerythrine, font également partie de sa composition .En Algérie il existe deux fermes de culture de *spiruline* non –industrielles: ferme de "**BEHATAM**" à Tamanrasset et ferme de "**M.REDOUANE**» à Oran. (**51**)

	
<p>Figure10: complément alimentaire <i>Spiruline</i></p>	<p>Figure 11 : Micro Algue (<i>Spiruline</i>)</p>

Tableau 7 : Composés bioactifs extraits du genre Spiruline.(Michele Greque de Morais ,2015)

Micro-algue	Composés bioactifs	Concentration
<i>Spirulina platensis</i>	C-phyco cyanin	9.6
<i>Spirulina fusiformis</i>	C-phyco cyanin	46.0
<i>Spirulina maxima</i>	Phenolic	0.71
<i>Spirulina sp</i>	Allophyco cyanin	20.0

b-Chlorella vulgaris :

Algue microscopique verte de famille des *chlorellaceae*, plus intéressante sur le plan nutritionnel par rapport aux vingtaines espèces de *chlorella*(www.consoglobe.com) . Contrairement à la spiruline qui fait partie de la famille des cyanobactéries (procaryotes), chlorella est une micro algue eucaryote possède un noyau entouré par une membrane riche en chlorophylle et cellulose (www.consoglobe.com)

Elle est utilisée dans l'alimentation humaine grâce à sa richesse nutritionnel : les acides gras saturés et insaturés, les vitamines, les minéraux, les oligo-aliments, les protéines (50-60 %). (51) Elle est considérée comme aliment d'intérêt national de santé. (51) *Chlorella* est produit par plus de 70 entreprises qui sont les plus grands producteurs avec 400 t de biomasse séchée produite par année. Une production importante est également réalisée à Klötze, en Allemagne (130 à 150 t de biomasse sèche par an) avec un photo bioréacteur tubulaire. La substance la plus importante en Chlorella est le -1,3-glucane, qui est un immun stimulateur actif, un radical scavenger et un réducteur de lipide. (51)

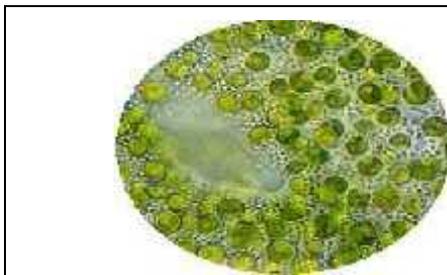


Figure 12: *chlorella vulgaris* sous microscope

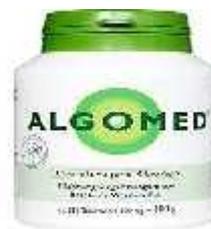


Figure 13: complément alimentaire (micro algue *chlorella vulgaris*)

C- les pigments :

C.1. Les caroténoïdes

Famille de substances liposolubles utilisées comme colorant alimentaire naturelle et antioxydant. Sont des pigments végétales collèrent les fruits , légumes , fleurs et les algues. (www.vidal.fr)

Plusieurs entreprises telles que : EUROCAROTEN (réseau espagnol de caroténoïdes) et IBERCAROT (réseau ibéro-américain pour l'étude des caroténoïdes en tant que des ingrédients alimentaires) font des applications sur les caroténoïdes pour l'exploitation des nouvelles sources alimentaires. (51)

C.2. les phycocyanines

Extrait à partir de *Spirulina* et *Porphyridium cruentum* , appliquées en alimentation naturelle nutritionnelle et en cosmétique et aussi utilisées comme colorants

D- les acides gras polyinsaturés :

Notamment les omégas 3(EPA,DHA) et les omégas 6 (acide -linoléinique, GLA, et acide arachidonique) ont des propriétés antifongique ,antibactérienne ,antivirales.

Les acides gras polyinsaturés sont des extraits d'huiles de poisson (lipides)et joue un rôle de protection contre les maladies cardiovasculaire et de cancer. (52)

- ☞ la diatomée *Odontella aurita*, utilisée comme complément alimentaire en tant que source d'acides gras polyinsaturés . *Odontella aurita* une micro algue marine qui appartient à la classe d'algue des diatomées . *L'Odontella* riche en silicium, vitamines, minéraux, oméga-3 et oligo-éléments. *L'odontella* grâce à sa forte teneur naturelle en oméga-3 complète donc avantageusement notre alimentation.(53)
- ✓ L'odontella est aussi une source de **chlorophylle** -et de fibres végétales riches en magnésium- fortifiante et purifiante de la flore et de **caroténoïdes** -aux propriétés **anti-oxydantes**- qui donnent à la peau une couleur "bonne mine".(53)



Figure 14 : *Odontella aurita* (complément alimentaire)

-*Arthrospira* est utilisé dans la nutrition humaine en raison de sa haute teneur en protéines et son excellente valeur nutritive .En outre, cette micro-algue a diverses possibilités de promotion de la santé effets : l'atténuation de l'hyperlipidémie, la suppression hypertension, protection contre l'insuffisance rénale, croissance la promotion de Lactobacillus intestinal et la suppression de taux de glucose sérique élevé. Une importante quantités de production d'Arthrospira est réalisée en Chine et Inde.(53)



Figure 15 : Earthrise Farms ; Usine de production d'Arthrospira (Calipatria, CA, États-Unis). <https://>

2-Application en cosmétologie :

Les algues microscopiques sont utilisées en cosmétique du façon très intéressante à cause de leur exposition naturelle au stress oxydant ,fonction **(53)**

Certaines espèces de micro algues sont établies dans le soin de la peau , les principales étant *Arthrospira* et *Chlorella* .Les extraits de micro -algues peuvent être principalement trouvé en face et la peau produits de soins . Les micro-algues sont également représentées dans soleil protection et les cheveux produits de soins.**(53)**

- Des extraits des micro algues notamment : les pigments (photosynthétiques tels que les caroténoïdes (-carotènes et astaxanthine)) , acides aminés , polyphénols sont utilisés comme des agents épaississants ,agents régénérant ,antioxydants.

Chlorella vulgaris ,*Nostoc* , *Spirulina platensis*_ des espèces (micro algues) produits des métabolites qui absorbent les Ultra-violets (UV) donc , les micro algues joues un rôle du protection contre les UV et rétablir l'équilibre de la peau . **(53)**



Figure 16 : extraction de la *spiruline* (produits cosmétiques)

- Des extraits d'*Arthrospira* et de *Chlorella* empêchent la formation des raies , poussent la synthèse du collagène ,diminution de rides



Figure17 : extraitsd'*Arthrospira* et de *Chlorella*

-*Chlorella* ,*Porphyridium* ,*Nostoc flegelliforme*_ sont des espèces riches en -glucane , utilisés comme gélifiants , hydratants . (53)

- *Nannochloropsis oculata* micro algues marines, produit le **PEPHA** pour le raffermissment de la peau. (53)

- ✓ LE PEPHA : est une solution aqueuse d'un extrait de la micro algue *Nannochloropsis oculata*, riche en vitamine C et vitamine B12 et un mélange de polysaccharides pour les produits de soins de la peau .le pepha est soluble dans l'eau et stable dans des solutions aqueuses dont le pH se situe entre 5 et 7. Ce produit est utilisé comme ingrédient cosmétique pour les produits de soins de la peau. Il doit être incorporé dans la formulation à des températures inférieures à 50 °C. (www.ulprospector.com)
Porphyridium cruentum micro algue rouge , produit EPSILINE prépare la peau au soleil et a un effet activateur et prolongateur du bronzage. (www.greentech.fr)

Tableau(08) représente : les différents composés bioactifs issus de micro algues et leurs utilisations potentielles en cosmétique

Molécule bioactive	Micro algues	Potentiels activités dans la cosmétique
polysaccharides sulfatés	<i>Porphyridium et Rhodella reticulata</i>	- antioxydant
Extrait de Chlorella vulgaris	<i>Chlorella vulgaris</i>	-Anti âge -Réparation du collagène
phycocyanobiline phycoérythrobiline	<i>Spirulina</i> <i>Porphyridium</i>	-antioxydant -pigments utilisés la fabrication du maquillage
-1,3-glucane	<i>Chlorella Skeletonema</i> <i>Porphyridium Nostoc flegelliforme</i>	-anti-inflammatoire - stimuler le système immunitaire
Canthaxanthine	<i>Nannochloro psissalina</i> <i>Nannochloro psioculata</i> <i>Nannochloropsi gaditana</i>	-Couleurs pour les produits cosmétiques

3-Application en environnement

L'algue microscopique joue un rôle important dans l'environnement. Depuis plusieurs années elles sont utilisées comme dépolluants pour le traitement des eaux usées, par l'élimination des éléments pollués ou les transformés en produits valorisables. Aussi elles sont capables d'absorber le CO₂ qui est à la suite converti en biomasse. (54)

✓ Traitement des eaux usées

a-Caractéristiques des eaux usées :

contiennent des quantités de nutriments propices à la croissance des algues

contiennent des nutriments classé en : source de carbone (CO₂) ,source d'énergie (lumière), source d'azote (nitrate) ,vitamines ...

b-traitement des eaux usées par les micro-algues:

les micro-algues sont importantes pour les usines de traitement des eaux usées , grâce à leur capacité de réduire les taux de phosphates et nitrates , de fixer les métaux lourds et dépolluer les eaux contaminés (54)

- *Chlorella vulgaris* applique dans l'élimination des métaux lourds et la dégradation de contaminants toxiques (tributylétain) présents dans les eaux usées.
- *Arthrospira ,Botryococcus ,Phormidium* ces espèces sont capable de réduire les concentrations élevés de phosphore et nitrate dans le milieu . (55)



Figure 18: traitement des eaux usées par micro-algues (“Algae Control « Thrive Water – Alternative Wastewater Treatment Solutions,”)

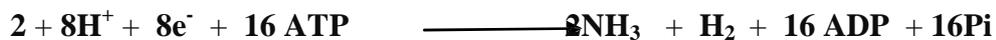
Dans le but de valoriser les processus de dépollution des eaux usées en utilisant des micro algues, il est très important de comprendre les mécanismes impliqués dans l'élimination des nutriments.

Tableau 09 : Mécanismes impliqués dans l'élimination des nutriments (carbone, ammonium, phosphore) par les micro algues (Gonçalves *et al.*, 2017)

Nutriments	Mécanismes	Incorporation cellulaire
CO ₂	Intégration du cycle de Calvin	(5<pH<7) Transport actif (pH>7)
Carbone organique	Intégration de la respiration	Diffusion-Transport actif
Ammonium NH ₄ ⁺ N	Conversion directe en acide-aminé	Transport actif

-Les micro algues jouent un rôle important dans la fixation et l'assimilation de l'azote. Les micro-algues procaryotes notamment les cyanobactéries sont capables de fixer l'azote moléculaire atmosphérique (N^2-N) et de le convertir en azote ammoniacal (NH^3-N), qui peut être incorporé dans les acides aminés et les protéines ou être excrété dans l'environnement selon l'équation suivante :**(56)**

Nitrogénase



-Les micro algues eucaryotes, à leur tour, sont capables d'assimiler l'azote fixé, tel que NH^4-N , NO^3-N et nitrite-azote (NO^2-N). Cependant, l'assimilation de cette source d'azote nécessite une réduction en NH^4-N , par un processus en deux étapes catalysées par les enzymes nitrate réductase et nitrite réductase :**(56)**

Nitrate réductase



-Puisque l'assimilation du NH^4-N ne nécessite pas des étapes de réduction on pense que c'est la forme préférée d'azote pour les micro algues. Par conséquent, en plus de l'absorption de micro algues, l'élimination du NH^4-N peut se produire en réponse à une augmentation du pH et de la température, où de grandes quantités de NH^4-N peuvent être volatilisées. L'élimination du PO^4-P peut également être influencée par les conditions environnementales, telles que le pH et la concentration d'oxygène dissous. Pour des valeurs de pH supérieures à 8,0 et des concentrations élevées en oxygène, une précipitation du phosphore peut se. Ce nutriment pénètre dans les cellules de micro algues via un transport actif au niveau de la membrane plasmique sous forme de dihydrogène de phosphate ($H_2PO^4^-$) et de hydrogène de phosphate ($HPO^4^-_2$). **(56)**

➤ Remédiation du CO₂:

la culture des micro-algues a un principale avantage, qui est la capacité de photosynthèse à absorber le CO₂ et le convertit en biomasse .le dioxyde de carbone émis par : les centrales thermiques, les industries de la sidérurgie, cimenterie, pétrochimie, permet d'obtenir la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la production de combustibles au bilan carburants neutres et des produits biologiques recyclables. (57)

-La conversion biologique du CO₂ par les micros algues photosynthétiques entraine également la production de précieux métabolites photosynthétiques ayant diverses applications industrielle. (58)

-L'avantage majeur de l'utilisation des micro algues dans ce processus est que leur biomasse contient environ 50% de carbone par matière sèche de cellules avec 1,83 kg de CO₂ capturé par kg de biomasse produite.(58)

-Ainsi, il a été démontré que la production de 100 T de biomasse algale fixe environ 183 T de gaz carbonique. En effet, la teneur en carbone peut fournir une estimation plus précise de la quantité de CO₂ consommée par les cellules de micro algues.

Sur cette base, le taux de capture de CO₂ peut être estimé comme suite($RCO_2 = P \cdot CCO_2 (MCO_2/MC)$ où RCO_2 est le taux de fixation du CO₂ (g. L-1.jour-1), P est la productivité biomasse (g. L) MCO_2 est le poids moléculaire du dioxyde de carbone, et MC est le poids moléculaire du carbone. CCO_2 est le contenu de carbone dans la biomasse algale obtenue à partir de CO₂. (58)

Cependant, des études menées par rapportent la variation de la concentration maximale de la biomasse entre 0,099 g. L pour des concentrations de 15% et 2% de CO₂, respectivement. Par conséquent, bien que les microalgues puissent se développer dans unelarge gamme de concentrations de CO₂, elles préfèrent une concentration de CO₂ optimale pour maximiser leur biomasse.(58)

Pendant le temps de culture, il est fréquent d'observer une augmentation du pH due à l'absorption de CO₂ en raison des équilibres chimiques établis entre les espèces suivantes: CO₂, H₂CO₃, HCO₃⁻ et CO₃²⁻



-Une fois le CO₂ gazeux réagit avec l'eau, l'acide carbonique H₂CO₃ se forme puis se dissocie instantanément pour former du carbonate d'hydrogène (HCO₃⁻) et carbonate CO₃²⁻ .

L'absorption de CO₂ par les cellules de micro algues est principalement réalisée en ces deux formes autres que le CO₂ direct qui se produit avec un taux beaucoup plus réduit. (58)

➤ Traitement des effluents gazeux

-Des travaux et recherches confirme le pouvoir d'utilisées les micro-algues pour le bio-traitement de gaz rejetés par les installations métallurgiques et l'industrie cc humiques...

-Le traitement se réaliser par {**phytoremédiation**} : Technologie utilise le métabolisme des plantes pour accumuler, transformer, dégrader, volatiliser les molécules organiques et inorganiques, métaux et radioéléments, contenus dans les eaux et surfaces contaminés. (Son efficacité sur l'épuration de l'air reste à valider. Pourtant, de premiers résultats scientifiques montrent que certaines plantes sont capables de purifier un air intérieur. Elles agissent notamment sur les concentrations en monoxyde de carbone ou en formaldéhyde. [.\(www.cea.fr\)](http://www.cea.fr))

En conjonction avec les microorganismes du sol, les plantes, les champignons et les algues sont capables de réduire la mobilité de certains polluants (**phytostabilisation**), de les absorber (**phytoextraction**), de les fixer dans leurs tissus (**phytostabilisation**) ou de les métaboliser, permettant leur détoxification et leur élimination (**phytodégradation** et **phytovolatilisation**).

(www.cea.fr)

La phytoremédiation bénéficie de sa générale innocuité, de son faible coût -estimé à 10 à 100 fois moindres que celui d'un traitement physico-chimique -- et de la possibilité de valoriser la matière végétale ou les éléments fixés -- ou du moins, de leur réserver un traitementspécifique. **La phytoremédiation** est également adaptée à des traitements de grandes surfaces, allant jusqu'à des dizaines d'hectares.(www.cea.fr)

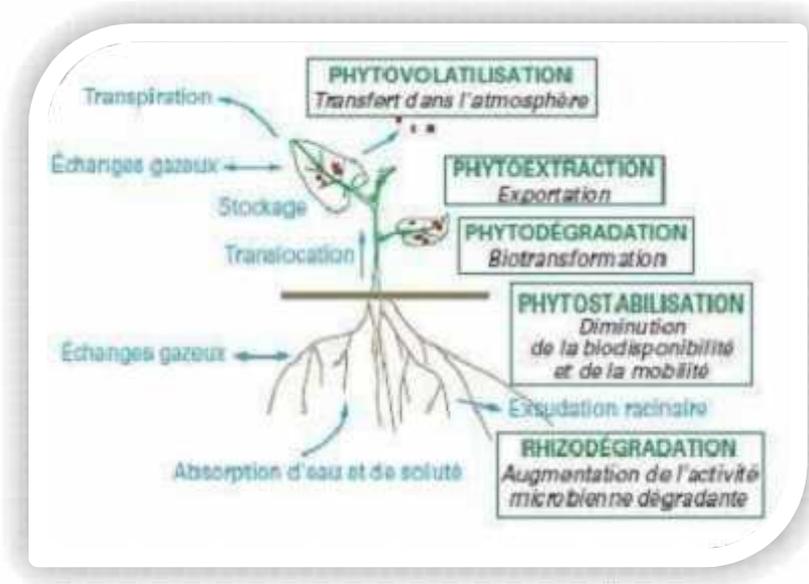


Figure 19: Principaux mécanismes de phytoremédiation (Sterckeman et al. 2012)

4. Application pour production d'énergie

La production d'énergie à partir de micro-algues 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 XXIème 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. (59)

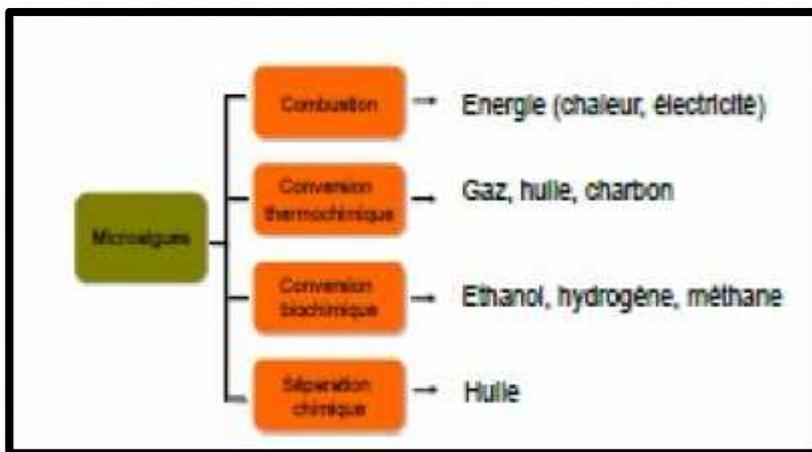


Figure 20 : Les quatre principaux processus de valorisation énergétique de la biomasse de micro-algues. (59)

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. **(59)**

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. **(60)**

Cette filière de conversion permet également de produire de l'hydrogène par fermentation de tout ou partie de la cellule. **(60)** Enfin, les lipides intracellulaires peuvent être extraits par séparation chimique pour intégrer une filière biodiesel après transestérification.

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

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

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

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

- le potentiel des micro algues dans un contexte de bioénergie. **(59)**
- le potentiel des micro algues dans un contexte de filière méthanisation. **(60)**
- l'analyse expérimentale d'un couplage entre un procédé de culture de microalgues et un procédé de digestion anaérobie. **(61)**

- L'optimisation des prétraitements pour la production. (62) ; (63)
- la croissance de micro algues sur des résidus de méthanisation. (64)
- les impacts environnementaux des procédés de culture de micro algues. (65) ; (66)
- la modélisation de la digestion anaérobie des micro algues dans une filière biogaz. (67)
- l'extrapolation de ces résultats à la culture de macro algues. (68)

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

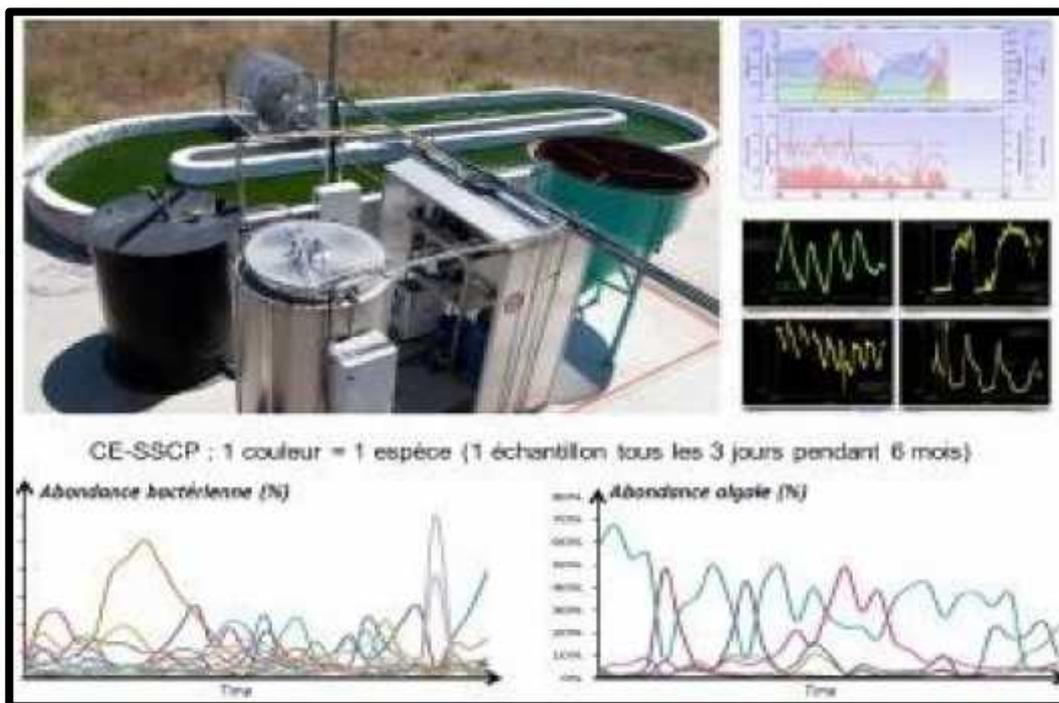


Figure 21 : L'« algo-tron », procédé pilote parfaitement instrumenté couplant un « raceway » de 56 m² à un digesteur anaérobie d'1 m³ sur le site du LBE-INRA à Narbonne.

Les micro algues possèdent une capacité biotechnologique manifeste. La phyco-culture est une activité jeune et entière de promesses. Son expansion doit être supportée par un effort de recherche, afin d'en diminuer les coûts de production et de améliorer les rendements des cultures à l'échelle industrielle.

Les technologies de culture sont déterminantes pour le rendement économique des productions phytoplanctoniques. La mise en œuvre de grandes masses d'eau conduit à une charge énergétique élevée : l'agitation des cultures, qui garantit l'étalement périodiques des cellules à la lumière et leur accès aux éléments nutritifs, est très consommatrice d'énergie ; la cueillette des quelques grammes de matière sèche par litre d'eau est également chère. Le développement de nouvelles technologies, limitant ces rendements, est donc une voie prometteuse pour un développement industriel à plus large échelle. (69)

5. Application des micro-algues pour fabrication des biocarburants :

Les micro-algues sont des organismes prometteurs pour la production des biocarburants grâce à leur richesse de lipide, pouvant se substituer aux agro carburants (biocarburants de première génération) source de déséquilibre des écosystèmes et des biocarburants d'origine lignocellulosique (2ème génération) d'abondance limitée. (70)

5.1. Biocarburants issus de ressources agricoles : la 1^{re} génération

Le développement des biocarburants a connu des hauts et des bas et n'a pas échappé à un effet de mode. Leur apparition date de la naissance de l'industrie automobile

En 1992, la Politique Agricole Commune donne l'occasion de développer les biocarburants en instituant les jachères et la première unité industrielle de production de biodiesel est créée.

Les biocarburants de cette première génération sont issus de betterave, céréales et canne à sucre pour l'éthanol, de colza, tournesol, soja et palme pour le biodiesel. (70)

5.2. Biocarburants issus de la biomasse lignocellulosique : la 2^e génération

Face aux limites de la première génération de biocarburants, la recherche s'oriente vers les matériaux lignocellulosique issus de végétaux non alimentaires : bois, pailles, résidus agricoles, déchets forestiers, macro algues ou encore plantes cultivées spécialement pour cette utilisation comme le Miscanthus Giganteus, le Switchgrass et le Peuplier à courte rotation. Cette 2^{em} génération concerne les filières éthanol et biodiesel avec des technologies différentes de celles de la première. (70)

5.3. Une troisième génération de biocarburants sous les microscopes

Cette génération de biocarburants en est encore au stade de la recherche mais s'avère très prometteuse : plus d'une centaine de projets sur la valorisation de la biomasse sont identifiés au niveau international. Grâce à des acteurs scientifiques tels que le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) et le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), la France fait partie des leaders de la recherche sur les micro algues et se situe au 1^{er} rang mondial pour les publications et au 4^e rang pour les dépôts de brevets. (www.cerig.pagora.grenoble-inp.fr)

Les composants des algues peuvent servir à la production de carburant et de nourriture ou encore dans les domaines pharmaceutiques et cosmétiques, les micro algues peuvent produire les molécules souhaitées, telles que des lipides ou des bio polymères, avec de forts rendements grâce à leurs propriétés de croissance exceptionnelle . Cette capacité est due à la composition mixte, mi-animale mi-végétale, de leur cellule unique contenant deux "centrales énergétiques" essentielles à leur croissance : la mitochondrie et le chloroplaste.

6.Application en agriculture :

Les humains pratiquent l'agriculture depuis plus de 10 000 ans, mais ce n'est qu'au cours des quelque 50 dernières années que les agriculteurs sont devenus très dépendants des engrais chimiques synthétiques et des pesticides. Il contribue à de nombreuses formes de dégradation de l'environnement, notamment la pollution de l'air et de l'eau, Les pesticides et les engrais chimiques de synthèse polluent le sol, l'eau et l'air, ce qui nuit à l'environnement et à la santé humaine. les engrais peuvent augmenter progressivement l'acidité du sol jusqu'à ce qu'il commence à entraver la croissance des plantes.(71)

La meilleure façon, ,est d'utiliser autant que possible des produits microbiens, des bio-engrais fonctionnels et des bio-contrôleurs et de réduire la quantité d'engrais chimiques ou de pesticides .Les cyanobactéries hétéro kystiques et plusieurs cyanobactéries non hétéro kystiques sont connues pour leur capacité à fixer l'azote atmosphérique. Les algues comme bio engrais sont une alternative prometteuse pour éviter la pollution des sols causée par les produits agrochimiques. (<https://www.intechopen.com>)

En outre, ils récupèrent les nutriments contenus dans le sol en sécrétant des exopolysaccharides qui améliorent la structure du sol et les substances bioactives qui améliorent la croissance des plantes. On sait que les algues sont l'une des sources les plus prometteuses d'agents de lutte biologique contre les résidus, ce qui a un impact positif sur la santé humaine. Les algues bleu-vert constituent un groupe important de microorganismes capables de fixer l'azote. La plupart des espèces possèdent une capacité de fixation de l'azote à l'ordre **Nostocales** et **Stigonematales** (<https://www.intechopen.com>)

Aujourd'hui, les producteurs de micro algues utilisent des espèces sauvages, issues du milieu naturel. Des stratégies de valorisation des espèces, notamment par progression dirigée, se dessinent actuellement. Elles devraient conduire – comme ce fut le cas en agriculture – à des gains substantiels de productivité et contribuer ainsi au développement de la filière. La stabilité des performances des cultures constitue un dernier enjeu pour la phyoculture industrielle. Elle nécessite d'approfondir notre connaissance de la physiologie des espèces cultivées, pour mieux comprendre leurs besoins en éléments minéraux – comme l'azote et le phosphore – et les interactions avec les *consortia* bactériens et les facteurs environnementaux.(71)

Les avancées techniques et scientifiques, dans leur dynamique actuelle, permettent d'envisager des progrès rapides sur ces axes biologiques et technologiques, qui conduiront à l'expansion des cultures industrielles de micro algues au cours des prochaines années. La diversité et l'originalité de ces organismes, leur productivité élevée, la variété des domaines d'application envisagée reliée au concept de bio raffinerie, sont autant d'assurances d'un grand avenir pour ces micro algues.(71)

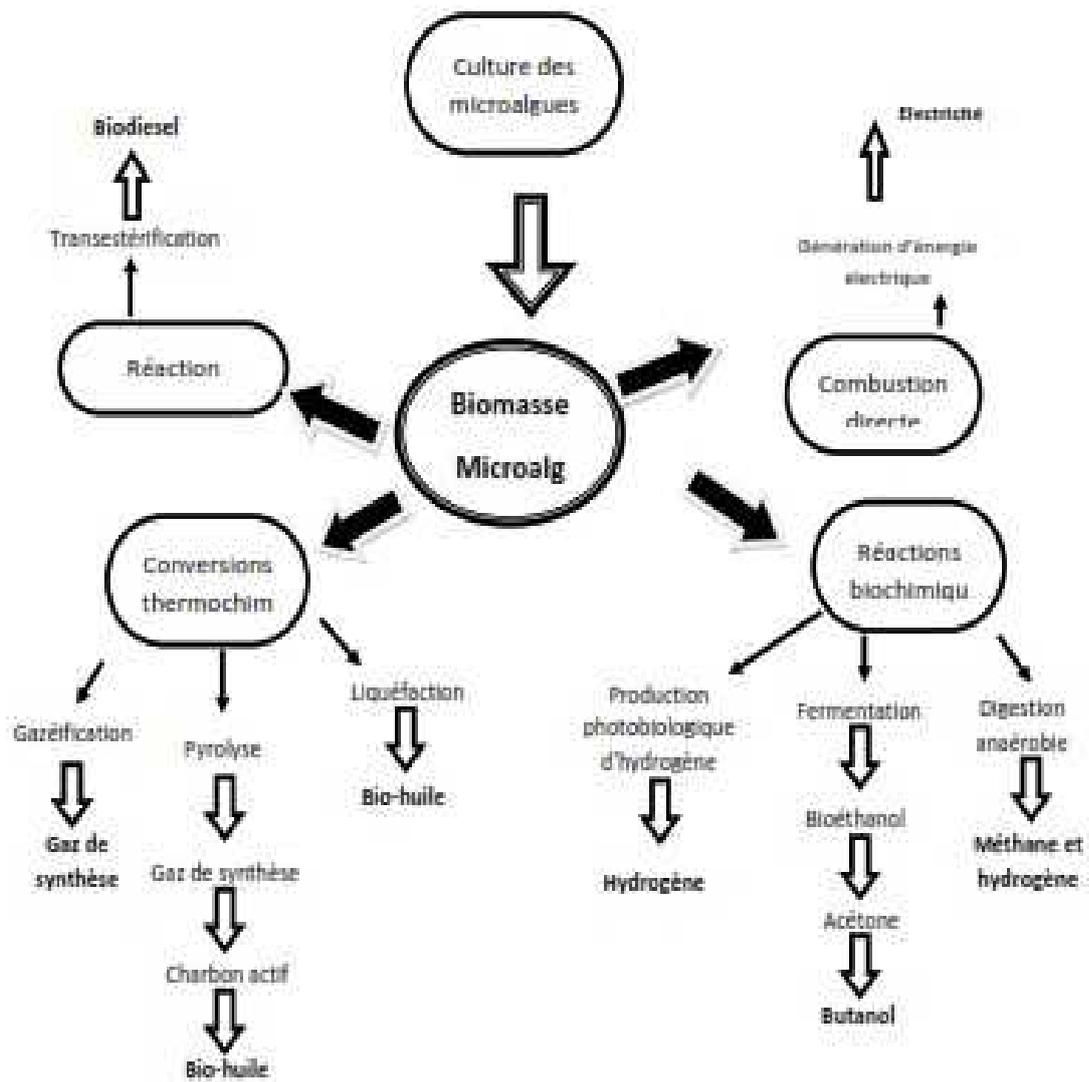


Figure22: Diagramme représentant les processus de conversion de biomasse micro algale pour la production de biocarburant. (Dragon et al,2010)

7. Application des algues thermophiles :

Les algues (et tout les microorganismes) thermophiles et hyper thermophiles sont des habitants normaux des zones volcaniques continentales et sous-marines, des sédiments marins géothermiques et les événements hydrothermaux, et donc sont considérés comme des extremophiles. En particulier les algues thermophiles ont une importance dans la biotechnologie blanche définies dans l'utilisation d'organismes et d'enzymes pour la transformation industrielle et la production de matériaux, de produits chimiques et énergétiques. (72)

Les applications des enzymes extremophiles sont examinées, en particulier les enzymes d'hydrolyse des polymères comme les enzymes amylolytiques et hémicellulolytiques (72) Exemple d'algue thermophiles :

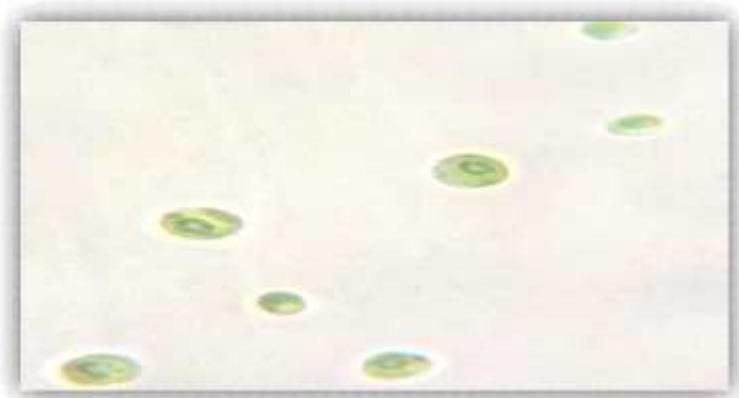


Figure 23 : *Chlorella sorokiniana* (www.algaeexpert.com)

-*Chlorella sorokiniana* est l'une des souches de chlorella les plus couramment utilisées pour la culture de masse . *Chlorella sorokiniana* a été signalée pour la première fois en 1953 , et a été identifiée comme un candidat idéal pour la culture mixotrophe qui offre un grand potentiel dans la production de biomasse renouvelable pour des applications bioénergétique

(www.algaeexpert.com)

- *Chlorella sorokiniana* été une source attrayante de composés bioactifs, d'aliments pour animaux et de carburants. *Chlorella sorokiniana* une biomasse intéressante et stimulante qui pourrait être utilisée pour trouver de nouvelles molécules bioactives plus précieuses.

(www.algaeexpert.com)

-*Chlorella sorokiniana* est commercialisé aux États-Unis complément alimentaire pour les troubles cognitifs dépendants de l'âge et généralement considéré comme sans danger. Bien mais il faut porter attention à l'utilisation de ce complément naturel pour ses effets toxiques masqués possibles. (www.algaeexpert.com)

-Diverses sources de carbone organique, y compris les polysaccharides, les disaccharides, les monosaccharides, l'amidon et l'acétate d'ammonium, ont été utilisées pour la culture de *Chlorella sorokiniana* dans un photo bioréacteur tubulaire. (www.algaeexpert.com)

Les enzymes des thermophiles extrêmes ont été de intérêt considérable pour la biotechnologie depuis le développement de la réaction en chaîne de la polymérase

Les enzymes et des thermophiles sont convoités pour divers procédés se déroulant à haute température et intéressant des domaines aussi variés que la chimie, la pharmacie, l'agro-alimentaire, ou encore la biologie moléculaire. Les enzymes issus des microorganismes des sources hydrothermales présentent un potentiel important en raison de leur thermostabilité et leur aptitude à résister à la dénaturation sous pression du fait de la piézophilie ou de la piézotolérance de leurs hôtes. Les enzymes de thermophiles ont déjà trouvé ou pourraient trouver des applications dans le blanchiment du papier, la conversion de l'amidon en dérivés sucrés, la dégradation de composés protéiques résistants, l'industrie textile ou le travail de laboratoire sur l'ADN. Plusieurs enzymes provenant de thermophiles des sources hydrothermales sont commercialisées : nombreuses polymérases, ligases, diverses protéases, phosphatases alcalines, beta-mannanase, etc. (72)

CONCLUSION

Conclusion

Les algues microscopiques sont exploitées depuis des millénaires. À l'heure actuelle ils ont plusieurs applications ; en biotechnologie pour la production des molécules de haute, en valeur, aux cosmétiques, en agriculture et pour la nutrition humaine et la nutrition animale.

Les algues microscopiques constituent une source importante pour la production d'une large gamme de molécules bioactives, qui peuvent être utilisées pour la conservation et le développement durable de l'environnement. La capacité éprouvée des algues microscopiques à produire des composés bioactifs place ces micro-organismes dans le projecteur pour des applications dans divers domaines biotechnologiques.

Les algues microscopiques thermophiles peuvent servir de source prometteuse en biotechnologie. Récemment, les algues microscopiques thermophiles ont été exploitées de manière lucrative dans divers domaines de recherche et de développement, notamment l'agriculture, l'industrie pharmaceutique, la bio-remédiation et la production de biocarburants. Cependant, d'autres investigations sont nécessaires pour l'amélioration de ces recherches. Il existe de nombreuses applications pour les enzymes thermiques des algues thermophiles les plus stables qui sont maintenant utilisées.

Il est évidemment nécessaire d'étudier les composés identifiés exploiter des algues microscopiques thermophiles et leurs activités dans le traitement et la prévention de diverses maladies, en plus d'une recherche d'autres métabolites non encore détectés.

Références

Références

- (1).Cabioch J. FJY, Le Toquin A., Boudouresque C.F., Meinesz A., Verlaque M. (1992). Guide des algues des mers d'Europe. Manche/Atlantique, p272.
- (2).Floc'h J. Y. LV. (2010). Les secrets des algues, p168.
- (3).Raven P. H. ERF, Eichhorn S. E., Evrardt C. (2007). Biologie végétale, p725.
- (4).Floc'h J. Y. LV. (2010). Les secrets des algues, p168.
- (5).Reinjenders M. GaVR, M.C. Lam C, A. Scaife M., A.P. Martins Dos Santos M., G. Smith A., J. Schaap P. (2014). Green genes: bioinformatics and systems-biology innovations drive algal biotechnology. Trends in Biotechnology, p32.
- (6).Macedo M.F., Miller A.Z., Dionísio A., Saiz-Jimenez C. (2009). Biodiversity of cyanobacteria and green algae on monuments in the Mediterranean Basin: an overview. Microbiology (Reading, England), p 90.
- (7).Sharma Naveen Kumar, Rai A.K., Singh S., Brown R.M. (2007). Airborn algae: their present status and relevance, Journal of Phycology, p615.
- (8).Falkowski P.G., Raven J.A. (1997). Aquatic Photosynthesis. Blackwell Science, p 14.
- (9).Margesin R., Miteva V. (2011). Diversity and ecology of psychrophilic microorganisms, p346.
- (10).Assunção P., Jaén-Molina R., Caujapé-Castells J., Jara A., Carmona L., Freijanes K., Mendoza H.(2011). Phylogenetic position of *Dunaliella acidophila* (Chlorophyceae) based on ITS and *rbcL* sequences. Journal of Applied Phycology, p 635.
- (11).Pulz O., Gross W. (2004). Valuable products from biotechnology of microalgae. Applied microbiology and biotechnology, p 635.
- (12).Becker E. W. (1994). Microalgae Biotechnology and microbiology. Cambridge Press University, p 90.
- (13).Van Den Hende S., Vervaeren H., Boon N. (2012). Flue gas compounds and microalgae: (bio) chemical interactions leading to biotechnological opportunities. Biotechnology advances, p143.
- (14).Bumbak F., Cook S., Zachleder V., Hauser S., Kovar K. (2011). Best practices in heterotrophic high-cell-density microalgal processes: achievements, potential and possible limitations. Applied microbiology and biotechnology, p 31.
- (15).Becker E. W. (1994). Microalgae Biotechnology and microbiology. Cambridge Press University, p 90.
- (16).Pelmont. (2008). Glossaire de biochimie environnementale. edp sciences, p 43.

- (17).Hamedi Chahinez. (2019). Caractérisation génétique, physiologique, biochimique et biodiversité des diatomées. Thèse de doctorat. Université Oran, Algérie, p146.
- (18) .Mc Candless, E.L. (1978). The importance of cell wall constituents in algal taxonomy. In: Irvine, D.E.G., Price, J.H. (Eds), Modern approaches to the taxonomy of red and brown algae, Academic Press, London. Biologie et phylogénie des algues, p 351.
- (19).Mc Neil M., Darvill A.G., Fry S.C. and Albersheim P. (1984). Structure and function of the primary cell walls of plants. Ann. Rev. Biochem., p 625.
- (20).Reinjenders M. GaVR, M.C. Lam C, A. Scaife M., A.P. Martins Dos Santos M., G. Smith A., J. Schaap P. (2014). Green genes: bioinformatics and systems-biology innovations drive algal biotechnology. Trends in Biotechnology, p 32.
- (21).Kelbouz Noura. (2020). Contribution à la production des micros algues isolées à partir du Barrage Foug Elgherza-Biskra. Mémoire de master .Faculté des sciences exact et des sciences de la nature et de la vie. Algérie, p60.
- (22).Faller H. (2011). Les applications et la toxicité des algues marines, p132.
- (23) .Garon-Ladiere S. (2004). Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge *Asparagopsis armata*, p 54.
- (24).Kaimoussi, A., Mouzdahir, A., Saih, A. (2004). Variations saisonnières des teneurs en métaux (Cd, Cu, Fe, Mn et Zn) chez l'algue *Ulva lactuca* prélevée au niveau du littoral de la ville d'El Jadida (Maroc). Comptes Rendus Biologies, p 361.
- (25).Reinjenders M. GaVR, M.C. Lam C, A. Scaife M., A.P. Martins Dos Santos M., G. Smith A., J. Schaap P. (2014). Green genes: bioinformatics and systems-biology innovations drive algal biotechnology. Trends in Biotechnology, p 32.
- (26).Faller H. (2011). Les applications et la toxicité des algues marines, p132.
- (27).Mac Artain, P., Gill, C.I.R., Brooks, M., Campbell, R., Rowland, I.R. (2007). Nutritional Value of Edible Seaweeds, p535.
- (28).Mabeau, S., Fleurence, J. (1993). Seaweed in food products: Biochemical and nutritional aspects. Trends Food Sci Tech, p107.
- (29). Marfaing, H. (2004). Les algues dans notre alimentation : Intérêt nutritionnel et utilisations. Revue de nutrition pratique. Dietecom Bretagne.CEVA, p9.
- (30).Dawczynski, C., Schubert, R., Jahreis, G. (2007). Amino acids, fatty acids, and dietary fibre in edible seaweed products. Food Chem, p899.
- (31).Marfaing, H. (2004). Les algues dans notre alimentation : Intérêt nutritionnel et utilisations. Revue de nutrition pratique. Dietecom Bretagne.CEVA, p9.

- (32).Benchabane, O. (1989). Etude de la fraction lipidique de *Cystoseira sedoides*: Algue brune endémique des cotes d'Algérie. Ann.Inst. Nat.Agro.El Harrac, p655.
- (33).Okuda, T., Yoshida, T., Hatano, T. (1993). Classification of oligomeric hydrolysable tannins and specificity of their occurrence in plants. *Phytochemistry*, p521.
- (34).Yang, W., Beauchemin, Z., Rode, L.M. (1999). Effects of enzyme feed additives on extent of digestion and milk production of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 82, p403.
- (35).Marfaing, H. (2004). Les algues dans notre alimentation : Intérêt nutritionnel et utilisations. *Revue de nutrition pratique. Dietecom Bretagne.CEVA*, p 9.
- (36).Haslam, E. (1989). Plant polyphenols. In: Haslam E(Ed) *Vegetable tannins*. Cambridge University press, p89.
- (37).Hagerman, A.E. (2002). Tannin chemistry.www.users.muohio.edu/tanni.pdf
- (38).Haslam, E. (1975). Natural proanthocyanidins. In *The Flavonoids*; Harborne, J. B., Mabry, T. J., Mabry, H. Ed. Chapman and Hall: London, p560.
- (39).Hagerman, A.E. (2002). Tannin chemistry.www.users.muohio.edu/tanni.pdf
- (40).Jouany, J.P., Ushida, K. (1998). The role of protozoa in feed digestion. *Asian-Australian Journal of Animal Science.* 12, p128.
- (41).Blümmel, M., Aiple, K.P., Steingass, H., Becker, K. (1999). A note on the stoichiometrical and voluntary intake of hay fed to sheep: Comparison between using fibre components, in animals, p225.
- (42).Mueller-Harvey, I., McAllan, A.B. (1992). Tannins: their biochemistry and nutritional properties. *Adv. Plant Cell Biochem. Biotechnol.* p217.
- (43).Hagerman, A.E. (2002). Tannin chemistry.www.users.muohio.edu/tanni.pdf
- (44).Plumlee, k.h., Johnson, b., Galey, F.D. (1998). Disease in cattle dosed orally with oak or tannic acid. In: *toxic plants and other natural toxicants*. Cab international, wallingford, p553.
- (45).Zhu, J., Filippich, L.J., Alsalami, M.T. (1992). Tannic acid intoxication in sheep and mice. *Res. Vet. Sci.* p280-292.
- (46).Targett, N.M., Arnold, T.M. (1998). Predicting the effects of brown algal phlorotannins on marine herbivores in tropical and temperate oceans. *J. Phycol.* p195-205.
- (47).Ragan, M.A., Glombitza, K.W.(1986). Phlorotannins, brown algal polyphenols. In *Progress in Phycological Research*, Round FE and Chapman DJ (ed). Biopress Ltd: Bristol, p129-241.
- (48).Ch. Vuathier. (1926) Notes sur la flore thermale des eaux sulfureuses de Mérens (Ariège), *Bulletin de la Société Botanique de France*, p388-398.

- (49).Becker E.W. (2003). Microalgae in Human and Animal Nutrition. In A. Richmond (Ed.), Handbook of Microalgal Culture. Blackwell Publishing Ltd, p 312.
- (50).Pauline Spolaore et al. (2005). Commercial Applications of Microalgae, p10.
- (51).Hamedi Chahinez. (2019).Caractérisation génétique, physiologique, biochimique et biodiversité des diatomées. Thèse de doctorat. Université Oran.Algérie, p146.
- (52).Bougaran Gaël, Saint-Jean Bruno .(2014). Microalgues: de petits végétaux aux grandes promesses. Lab Physiol & Biotechnol Algues, Nantes, France, p 231.
- (53).Pauline Spolaore et al. (2005).Commercial Applications of Microalgae, p1263.
- (54).Céline DEJOYE TANZI. (2013). Eco-Extraction et Analyse de lipides de micro-algues pour la production d’algo-carburant. Thèse de doctorat. Marseille, p177.
- (55).El Hifnawy Chanel. (2016). Identifier des micro algues pour le traitement des eaux usées et la production de biocarburant. Thèse de doctorat. Lebanon, p69.
- (56).Olfa BEJI. (2018).Traitement des eaux usées dans des bioréacteurs multi trophiques grâce à des floes de micro algues bactéries valorisables en biogaz. Thèse de doctorat. France, p 223.
- (57).Céline DEJOYE TANZI. (2013). Eco-Extraction et Analyse de lipides de micro-algues pour la production d’algo-carburant. Thèse de doctorat. Marseille, p 177.
- (58).El Hifnawy Chanel. (2016). Identifier des micro algues pour le traitement des eaux usées et la production de biocarburant. Thèse de doctorat. Lebanon, p69
- (59).González-Fernández C., Sialve B., Bernet N., Steyer J-Ph. (2012). "Thermal treatment to improve methane production of Scenedesmus ecosystem", Biomass and Bioenergy, p143.
- (60).Sialve B., Bernet N., Bernard O. (2009). Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. Biotechnology advances, p416.
- (61).Ras M., Lardon L., Sialve B., Bernet N., Steyer J-Ph. (2011)."Experimental study on a coupled process of production and anaerobic digestion of Chlorella vulgaris , p206.
- (62).González-Fernández C,Sialve B., Bernet N., Steyer J-Ph.(2012)."Thermal treatment to improve methane production of Scenedesmus ecosystem, p67.
- (63).Vasseur C., Bougaran G., Garnier M., Hamelin J., Leboulanger C., Le Chevanton M., Mostajir B., Sialve B., Steyer J-Ph., Fouilland E.(2012). "Carbon conversion efficiency and population dynamics of a marine algae–bacteria consortium growing on simplified synthetic

digestate: First step in a bioprocess coupling algal production and anaerobic digestion". *Bioresource Technology*, p87.

(64). Lardon L., Hélias A., Sialve B., Bernard O., Steyer J-Ph.(2009). "Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae", *Environ. Sci. Technol.*, 43, 17, p6475–6481 **(65)**.Collet P., Hélias A., Lardon L., Ras M., Goy R-A, Steyer J-

Ph. (2011). "Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production". *Bioresource Technology*, p 214.

(66). Mairet F., Bernard O., Ras M., Lardon L., Steyer J-Ph. (2011). "Modeling anaerobic digestion of microalgae using ADM1". *Bioresource Technology*, p6829.

(67).Langlois J., Sassi J-F., Jard G., Steyer J-Ph., Delgenes J-Ph., Hélias A. (2012). "Life cycle assessment of biomethane from offshore cultivated seaweed", *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, p1330.

(69).Pauline Spolaore et al. (2005). *Commercial Applications of*

Microalgae;1263;p10. **(70)**.Hamedi Chahinez. (2019).Caractérisationgénétique, physiologique, biochimique et biodiversité des diatomées. Thèse de doctorat. Université Oran.Algérie, p146.

(71). Pauline Spolaore et al. (2005).*Commercial Applications of Microalgae*, p10.

(72). Carolina M.M.C. Andrade Nei Pereira Jr.; Garo Antranikian. (1999).

Exytremlly, p156. Thermophilic micro organisms and their polymer-hydrolytique enzymes. Germany, p12.