



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج
Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences Biologiques



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences biologiques

Spécialité : Microbiologie appliquée

Intitulé :

**Activités biologiques des métabolites secondaires des microalgues :
Recherche bibliographique**

Présenté par :

BENDJEDDOU Medjda & BENDJEDDOU Yasmina & HAMZAOUI Ismahan

Soutenu le 25/06/2023, Devant le Jury

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
Président :	M ^{me} . IRATNI Nadjet	MAA	Université de Bordj Bou Arreridj
Encadrant :	M ^r . SADRATI Nouari	MCA	Université de Bordj Bou Arreridj
Examineur :	M ^{me} . TAMINE Milouda	MCB	Université de Bordj Bou Arreridj

Année Universitaire 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous remercions avant tout dieu qui nous a amé de patience et donné la force afin de mener à bien ce travail de recherche, et de réaliser notre rêve.

Nous tenons à exprimer nos remerciements et notre gratitude a

Dr. SADRATI NOUARI

*Nous devons remercies les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous
Ont fait, en acceptant dévaluer notre travail.*

Dédicace

Avec l'aide de ALLAH le tout puissant, j'ai pu achever ce travail que je dédie Aux deux être le plus chers au monde qui ont souffert nuit et jour pour nous couvrir de Leur amour mes parents.

la Source de puissance, de compassion et de tendresse, l'exemple de patience, la raison de mon existence et le soutien de ma vie « ma mère ». Les personnes qui sont encore en vie dans mon cœur et dans la miséricorde de Dieu « Mon père », « Ma grand-mère » ; « Mes oncles »

Je dédie ce modeste travail aussi à :

Mes très chers frères : Zahir, Mansour et Amar.

Mes très chères sœurs : Fatama, Raouia et samah.

Mes tantes et mes cousins qui m'ont soutenu toujours.

Je remercie vivement aussi Mes amies, Medjda, Souhila, Zouina qui m'ont aidé tout au long de mon parcours universitaire.

A tous mes camarades et les étudiants de la promo M2 Microbiologie.

Ismahan

Dédicace

Ma réussite est due en grande partie à ma mère dévouée (que Dieu lui fasse miséricorde)
et à mon père dévoué (que Dieu le protège).

J'adresse mes sincères remerciements à mes frères Salah Eddine et Abd alghafar et mes
sœurs Fatima, Mounira et Selma, qui sont la source de ma motivation.

Je remercie vivement aussi Mes amies Ismahan, Selsabil et Hamida, Mera qui m'ont aidé
tout au long de mon parcours universitaire.

Medjda

Dédicace

A maman et papa, qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. et qui m'ont permis de réussir dans mes études. À mon cher époux, pour la patience et le soutien dont il a fait preuve pendant toute la durée de ce travail et à qui je voudrais exprimer mes affections et mes gratitude. Merci infiniment. A mes sœurs : Amel et Chaima, Nour elhouda. A mon frère : Abd elrahman. A mes chers amis, Je vous aime

Yasmina

Table des matières

المخلص

Résumé

Abstract

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction 1

Chapitre I

I.1. Généralités sur les microalgues..... 3

I.2. Composés bioactifs de microalgues 4

I.2.1. Lipides..... 5

I.2.2. Protéines..... 6

I.2.3. Carbohydrates 8

I.2.4. Vitamines et les minéraux..... 8

I.2.5. Pigments..... 10

I.2.5.1. Les phycobiliprotéines 10

I.2.5.2. Caroténoïdes..... 11

I.2.5.3. Chlorophylles 13

Chapitre II

II. Les activités et rôles biologiques potentiels des métabolites d'origines microalgues 14

II.1. Activité antioxydant..... 14

II.2. Activité anti-inflammatoire..... 16

II.3. Activité anticancéreuse 17

II.4. Activité antimicrobienne 19

II.4.1 Activité antibactérienne 20

II.4.2 Activité antivirale 21

II.4.3 Activité antifongique 23

II.5. Activité antidiabétique..... 24

II.6. Activité antihypertenseur..... 25

Chapitre III

III. Autres applications 27

III.1. Nourriture humaine 27

III.2. L'alimentation animale..... 28

III.3. Traitement des eaux..... 30

III.4. Agriculture..... 32

III.5. Production de biocarburant..... 32

Chapitre IV

IV. Production et extraction des composés bioactifs des microalgues.....	34
IV Production et extraction des composés bioactifs des microalgues.....	35
IV.1. Croissance sous les conditions optimales.....	35
IV.1.1. Système ouvert.....	35
IV.1.2. Système fermé.....	35
IV.2. Collection de la biomasse.....	36
IV.3. Séchage.....	36
IV.4. Extraction des composés bioactifs spécifiques.....	37
IV.4. Purification et identification des composés bioactifs.....	38
IV.5. Tester et utiliser des composés bioactifs.....	39
Conclusion.....	40
Références.....	42

المُلخَص

مع التحديات المتزايدة في الحياة اليومية، بدأ البشر في البحث عن مصادر متجددة لتلبية احتياجاتهم. توجّه الانسان نحو استغلال الطحالب الدقيقة، وذلك بسبب قدرتها على القيام بالتمثيل الضوئي وتحويل أشعة الشمس وثاني اكسيد الكربون إلى مستقلبات ثانوية مثل الدهون، البروتينات، الكربوهيدرات، الاصباغ، الفيتامينات والمعادن. تستخدم هذه المركبات في مجال البيولوجيا كمضادات للأكسدة، مضاد الالتهاب، مضاد السرطان، مضاد السكري، مضاد ارتفاع ضغط الدم ومضادات للمكروبات. وبالنظر إلى قيمتها الغذائية، تُعتبر الطحالب مصدرًا جيدًا للغذاء وعلف. بالإضافة إلى ذلك، تُستخدم الطحالب أيضًا في الزراعة وتنقية المياه وإنتاج الطاقة. كما تتوفر طرق متعددة لزراعة وحصاد واستخراج هذه المركبات من الطحالب.

كلمات مفتاحية: الطحالب الدقيقة، الدهون، البروتين، مضادات الأكسدة، مضادات الالتهاب، مضادات الجراثيم.

Résumé

Avec les défis croissants de la vie quotidienne, les êtres humains ont commencé à rechercher des sources renouvelables pour répondre à leurs besoins. Les êtres humains se sont tournés vers l'exploitation des microalgues en raison de leur capacité à effectuer la photosynthèse et à convertir la lumière du soleil et CO₂ en métabolites secondaires tels que les graisses, les protéines, les carbohydrates, les pigments, les vitamines et les minéraux. Ces composés sont utilisés en activité biologique comme des antioxydants, des anti-inflammatoires, des antimicrobiens, antidiabétique et des antihypertenseurs. En raison de leur valeur nutritive, les algues sont considérées comme une bonne source de nourriture et de fourrage. De plus, les algues sont également utilisées dans l'agriculture, la purification de l'eau et la production d'énergie. Il existe plusieurs méthodes de culture, de récolte et d'extraction de ces composés à partir des microalgues.

Mots clés : microalgues, lipides, protéines, antioxydants, anti-inflammatoires, antimicrobiens.

Abstract

With the increasing challenges in daily life, humans have begun to search for renewable sources to meet their needs. Humans have turned to the exploitation of microalgae due to their ability to perform photosynthesis and convert sunlight and CO₂ into secondary metabolites such as fats, proteins, carbohydrates, pigments, vitamins, and minerals. These compounds are used in biological activities as antioxidants, anti-inflammatory agents, antimicrobials, antidiabetic and antihypertensive. Due to their nutritional value, algae are considered a good source of food and fodder. Additionally, algae are also used in agriculture, water purification, and energy production. There are multiple methods available for culturing, harvesting, and extracting these compounds from microalgae.

Keywords : microalgae, lipids, proteins, vitamins, antioxidants, anti-inflammatory, antimicrobial.

Liste des figures

Figure 1. Diversité morphologique des microalgues.....	04
Figure 2. Structure chimique d'acide gras.....	06
Figure 3. Structures chimiques des caroténoïdes.....	12
Figure 4. Teneur en caroténoïdes de différentes sources, y compris les fleurs, les légumes et microalgues.....	12
Figure 5. Structures chimiques de chlorophylle a.....	13
Figure 6. Principales classes de microalgues, leurs espèces les plus importantes et l'activité biologique associée.....	14
Figure 7. Antioxydants synthétiques utilisés dans les matériaux alimentaires et cosmétiques.....	16
Figure 8. Structure de certaines molécules anticancéreuses produites par les microalgues	19
Figure 9. Structure de certaines molécules antibactériennes produites par les microalgues.....	21
Figure 10. Les amphidinol.....	23
Figure 11. Aliments enrichis en microalgues.....	28
Figure 12. Microalgues utilisées dans la formulation des aliments et leur effet sur la nutrition des différents animaux.....	29
Figure 13. Procédé de traitement des eaux par les microalgues.....	31
Figure 14. : Illustration par étapes de la production de précieux métabolites bioactifs dérivés de microalgues.....	34
Figure 15. Systèmes de culture.....	35
Figure 16. Photobioréacteurs fermés.....	36

Liste des tableaux

Tableau I. La composition biochimique de diverses espèces de microalgues.....	04
Tableau II. Pourcentage de protéines de plusieurs souches de microalgues.....	07
Tableau III. Teneur en vitamines de quatre microalgues marines.....	10
Tableau VI. Les différentes méthodes d'extraction des métabolites secondaire des microalgues.....	38

Liste des abréviations

AAE : Acide Aminé Essentiels

AAE : Acides Aminés Non Essentiels

ABTS: Acide 2,2'-Azinobis 3-Ethylbenzo Triazoline- 6-Sulphonate.

ACE : Enzyme de Conversion de l'Angiotensine

AGPI : Acide Gras Polyinsaturées

AMs : Amphidinols

BHA : Butylhydroxyanisole

BHT : Butylhydroxytoluène

CAT : Catalase

CO₂ : Dioxyde de Carbone

CaCo-2 : Adénocarcinome de colon

CMI : Concentration Minimale Inhibitrice

DHA : Acide Docosahexaénoïque

DLD-1 : Une lignée cellulaire humaine d'adénocarcinome colorectal

EMCV : Encephalomyocarditis virus

EPs : Exopolysaccharides

EPA : Eicosapentaenoïc Acid

FTsZ : La protéine cytosquettique bactérienne.

IC₅₀ : Concentration inhibitrice a 50 %

GPX : Glutathion Peroxyde

GSH : Glutathion

GSSH : Glutathion oxyde

GP160 : Glycoprotéine du VIH

GTP : Guanosine-5'-triphosphate.

HDL : High density lipoproteins.

HCT-116 : Cellules cancéreuses du côlon

HSV-1 : Herpes simplex virus type 1.

HSV-2 : Herpes simplex virus type 2.

LDL : Low density lipoprotein.

PBP : Phycobiliprotéines

pH : Potentiel hydrogène

PrxP : Peroxirédoxine

PS : Polysaccharides

ROS : Reactive oxygen species

SOD: Superoxyde Dismutase

VIH: Virus de l'Immunodéficience Humaine.

VLDL: Very low density lipoprotein

Introduction

Introduction

L'augmentation préoccupante du nombre de personnes souffrant de problèmes de santé liés à divers cancers, aux bactéries résistantes aux médicaments, aux parasites protozoaires et aux champignons, constitue un défi mondial pour le secteur des soins de santé, tant dans les pays en développement que dans les pays développés (**Sadrati, 2021**). La résistance aux médicaments multi-antibiotiques ne cesse d'augmenter avec l'utilisation croissante d'antibiotiques pour le traitement de plusieurs maladies pathogènes. L'utilisation d'antibiotiques à large spectre a créé une résistance chez de nombreux agents pathogènes microbiens, ce qui constitue une menace majeure pour l'humanité (**Hembram et al., 2018**).

Un autre problème important, La future pénurie des combustibles fossiles, causée par l'épuisement des réserves de pétrole, constituera un obstacle économique majeur étant donné la demande croissante en énergie. La réalisation de la révolution industrielle est impossible sans des sources d'énergie durables. Par conséquent, les ressources d'énergie renouvelable sont considérées comme une alternative viable pour pallier à la diminution de l'accessibilité de l'énergie issue des combustibles fossiles (**Wu et al., 2021**).

De l'autre côté, la sécurité alimentaire est une préoccupation majeure à l'heure actuelle en raison de l'explosion démographique exponentielle. Cela exercera une pression sur le système agricole et exigera l'expansion des zones agricoles, la rotation des cultures et l'utilisation de technologies pour augmenter les rendements. Toutes ces pratiques aggraveront encore les problèmes existants tels que la dégradation des sols, la déforestation et la perte de biodiversité (**Kaur et al., 2023**).

Par conséquent, il est nécessaire de disposer d'une source alternative facile à produire, économique et capable de produire rapidement et en grande quantité des métabolites bioactifs précieux à partir de nutriments, notamment pour les populations à faible revenu. Les microalgues semblent être une telle source alternative potentiellement réalisable, étant donné qu'elles sont utilisées depuis des siècles par l'humanité (**Kaur et al., 2023**).

Les microalgues se caractérisent par leurs compositions riches et diverses de biomolécules telles que les protéines, les lipides, les vitamines et les pigments. Ces composés peuvent être exploités commercialement dans les industries alimentaires, cosmétique et pharmaceutique. Les activités pharmacologiques de divers composés bioactifs dérivés des microalgues ont été étudiées, notamment leurs propriétés antioxydants, antitumorales,

antimicrobiennes, antiprotozoaires, anti-inflammatoires, anticancéreuses et antivirales (**Bule et al., 2018**).

Les microalgues, étant neutres en carbone, sont considérées comme des candidats privilégiés pour atténuer le changement climatique. Elles servent d'efficaces bio-usines pour produire une large gamme de composés. L'industrie de la biotechnologie microalgale en plein essor est motivée par les préoccupations liées à la sécurité alimentaire, car la culture des microalgues et l'extraction des métabolites n'interfèrent pas avec la production alimentaire. Contrairement aux cultures telles que le maïs, le tournesol, le coton et le soja, la culture des microalgues nécessite moins de terres arables. De plus, elle ne nécessite pas de grandes quantités d'eau douce. Les systèmes de microalgues présentent une haute efficacité de conversion des photons, ce qui permet une récolte quasiment toute l'année par lots. Ils peuvent également utiliser l'eau salée et les eaux usées tout en séquestrant simultanément le CO₂ et en produisant des biocarburants non toxiques et hautement biodégradables (**Mutanda et al., 2020**).

Ce document présente une recherche bibliographique sur l'activité biologique des métabolites secondaires des microalgues. Le premier chapitre aborde les composés bioactifs présents dans les microalgues, tels que les lipides, les peptides, les glucides, les vitamines et les minéraux, ainsi que les pigments. Le deuxième chapitre traite des activités biologiques des métabolites secondaires, telles que leurs propriétés antioxydants, anti-inflammatoires, antimicrobiennes, antidiabétiques et antihypertensives. Dans le troisième chapitre, d'autres applications sont mentionnées, notamment la nutrition humaine, la nutrition animale, l'agriculture, le traitement de l'eau et les biocarburants. Enfin, le quatrième chapitre aborde la production et l'extraction des composés bioactifs des microalgues.

CHAPITRE I :
Composés Bioactifs des Microalgues

I.1. Généralités sur les microalgues

Les algues sont des organismes photosynthétiques qui poussent dans une variété d'habitats, principalement des milieux aquatiques, et sont capables de convertir l'énergie lumineuse et une source de carbone, le dioxyde de carbone ou « CO₂ », en une variété de substances organiques ou « biomasse ». Il existe deux grandes catégories d'algues. "Macroalgues" et "Microalgues" (**Filali, 2012**).

* **Les macroalgues** : également connues sous le nom d'algues marines, sont des algues multicellulaires de grande taille qui sont visibles à l'œil nu.

* **Les microalgues** : également connues sous le nom de microphytes, sont des microorganismes unicellulaires aquatiques que l'on retrouve à la fois dans les eaux douces et marines. Elles sont capables de faire la photosynthèse et se présentent dans une variété de formes et de tailles, allant de trois à dix micromètres (**de Freitas Coêlho et al., 2019**).

Les microalgues, selon la classification taxonomique, sont des microorganismes eucaryotes. Cependant, dans un sens plus large, le terme « microalgues » englobe les cyanobactéries procaryotes, les algues vertes, les diatomées et divers autres groupes eucaryotes (**Fu et al., 2017**), avec une fourchette estimée de 200 000 à plusieurs millions de souches distinctes. Les microalgues présentent une biodiversité remarquable par rapport aux plantes supérieures terrestres, qui comptent environ 250 000 espèces. Néanmoins, seule une fraction de cette diversité a été explorée et décrite, car moins de 10 000 espèces de microalgues ont été caractérisées à ce jour. Cela met en évidence l'immense potentiel inexploité et l'abondance inexploree de cette bio-ressource diversifiée pour des applications potentielles en biotechnologie (**Mutanda et al., 2020**).

Les microalgues présentent des formes variables souvent sphériques (Porphyridium), en forme de croissant (clostridium), de spirale (Arthrospira), de gouttelette (chlamydomonas) et Même d'étoile (Staurostrum) (**figure 1**) (**Filali, 2012**).

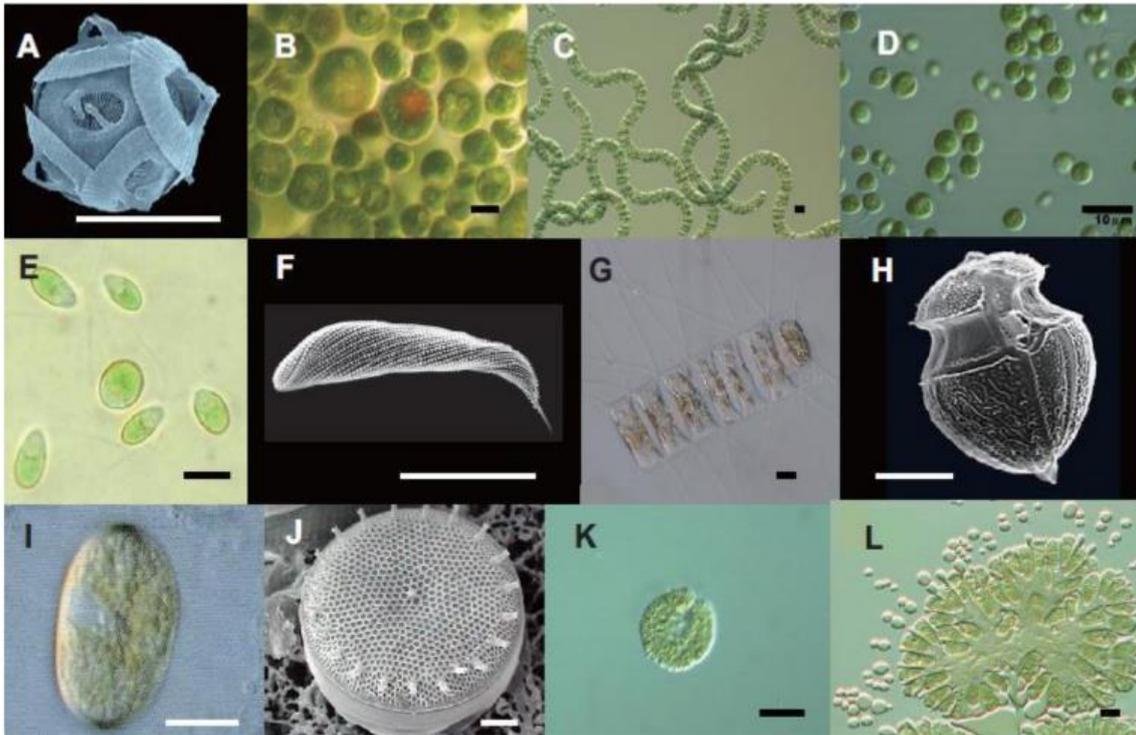


Figure 1: Diversité morphologique des microalgues. A : *Gephyrocapsa* ; B : *Haematococcus lacustris* ; C : *Spirulina platensis* ; D : *Chlorella vulgaris* ; E : *Dunaliella tertiolecta* ; F : *Chaetoceros calcitrans* ; H : *Dinophysis acuminata* ; I : *Alexandrium* ; J : *Bacillariophyceae* ; K : *Raphidophceae* ; L : *Botryococcus* (La longueur du trait dans chaque figure représente 10µm) (Filali, 2012).

I.2. Composés bioactifs de microalgues

Les précieuses substances bioactives présentes dans les microalgues peuvent être regroupées en lipides, glucides, protéines, pigments, vitamines et minéraux. Le tableau I ci-dessous présente la composition biochimique de diverses espèces de microalgues (Kaur et al., 2023).

Tableau I: composition biochimique de diverses espèces de microalgues :

Espèces de microalgues	Composition (%)		
	Protéines	Lipides	Carbohydrates
<i>Anabena cylindrica</i>	43 -56	-7	25-30
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	2	3	23
<i>Botryococcus braunii</i>	39-40	25-34	19-31
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	40	23	37
<i>Chaetoceros gracilis</i>	12	7.2	4.7
<i>Chaetoceros muelleri</i>	59	31	10
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	21	17
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	21	17

<i>Spirogyra sp.</i>	6-20	11-21	33-64
<i>Schizochytrium sp.</i>	-	55-77	-

I.2.1. Lipides

La teneur en lipides des microalgues peut varier de 30% à 70% de leur poids sec, selon l'espèce. Ces lipides servent de réserve d'énergie essentielle pendant les périodes difficiles et jouent un rôle crucial dans la division cellulaire (**Balasubramaniam et al., 2021**). La création de biodiesel était l'objectif principal des premières études sur les lipides d'algues (**Barkia et al., 2019**).

Les lipides des microalgues peuvent être divisés en deux catégories principales : les lipides créés lors de la photosynthèse qui sont conservés dans la cellule en tant que lipides de stockage (principalement des triglycérides) et les lipides qui sont une composante essentielle de la structure de la cellule (phospholipides et stérols) en tant que lipides structurels. Les acides gras sont un type de lipides que l'on trouve dans le stockage, ils constituent une sorte de métabolite principal. Les acides gras polyinsaturés (AGPI) sont les plus importants d'entre eux (**Levasseur et al., 2020**).

Les microalgues contiennent une quantité abondante d'AGPI essentiels à longue chaîne, tels que les huiles oméga-3 et oméga-6. Ces acides gras cruciaux ne peuvent pas être produits naturellement par les humains et de nombreux animaux, ce qui rend nécessaire de les incorporer régulièrement à leur alimentation (**Mahata et al., 2022**). Les acides gras oméga-3 présentent des propriétés qui combattent l'inflammation, préviennent la coagulation sanguine, régulent les rythmes cardiaques, réduisent les taux de lipides sanguins et favorisent la dilatation des vaisseaux sanguins. Ils sont essentiels pour le développement du cerveau et de la vision chez les fœtus et les nourrissons. Les principaux constituants des oméga-3 sont l'acide alpha-linolénique, l'acide eicosapentaénoïque (EPA) et l'acide docosahexaénoïque (DHA), qui sont respectivement des acides énoïques à 20 carbones et 22 carbones (**figure 2**) (**Wu et al., 2021**). Les poissons marins tels que le saumon et la morue sont actuellement la source principale de ces composés bénéfiques pour l'utilisation humaine. Cependant, en raison de la rareté des stocks d'huile de poisson, les chercheurs recherchent des sources alternatives de ces AGPI (**Mahata et al., 2022**). *Schizochytrium sp.* se révèle être une source prometteuse de DHA, avec la capacité d'accumuler jusqu'à 30 % de DHA dans les acides gras totaux. Un autre organisme marin, *Phaeodactylum tricornutum*, une diatomée, contient 46 à 52 % d'EPA dans sa composition totale en acides gras. *Nannochloropsis sp.*, *Tisochrysis lutea*, *Chaetoceros muelleri*

Chapitre I : Composés bioactifs des microalgues

et *Nitzschia* sp. Sont d'autres souches connues pour leur concentration élevée en AGPI (Mahata et al., 2022).

Les microalgues synthétisent la majorité des lipides dans des conditions environnementales ambiantes où l'eau ; la lumière et le CO₂ sont disponibles pour la production primaire par photosynthèse. Cependant, il a été établi que dans des situations physiologiquement exigeantes, telles que la contrainte alimentaire (en particulier, la limitation de l'azote), des quantités importantes de lipides sont produites au détriment d'autres macromolécules. La manipulation des paramètres de culture (l'intensité lumineuse, la température, le CO₂, le pH, la pénurie d'azote et limitation du phosphate) et la soumission des microalgues à des conditions de stress améliorent considérablement l'efficacité de la bioproduktivité (Mutanda et al., 2020).

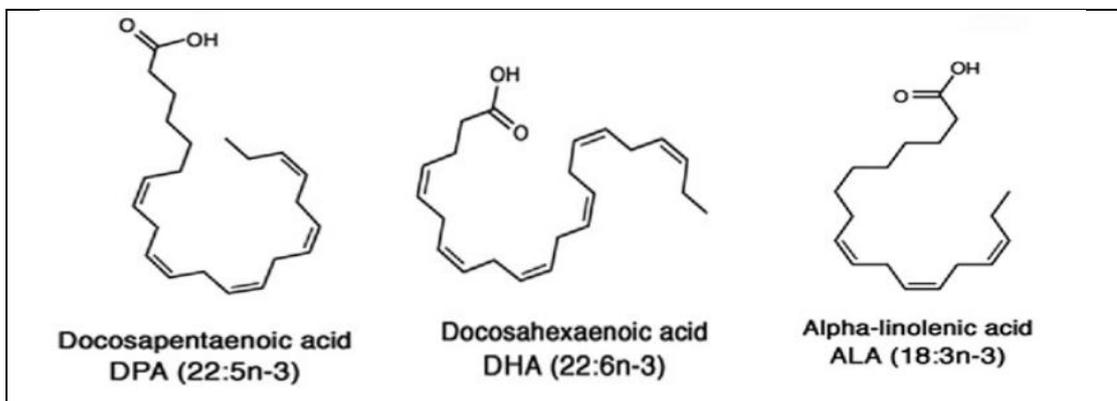


Figure 2 : Structure chimique d'acide gras (Encarnaç o et al., 2015).

I.2.2. Protéines

En raison de leur teneur élevée en protéines et de la diversité de leur composition en acides aminés, les microalgues ont été consid r es comme une source potentielle de protéines dès les années 1950 (Mahendran et al., 2021). Les protéines sont des macromolécules constitu es de chaînes d'acides aminés. Les protéines et les acides aminés remplissent des fonctions essentielles dans le maintien de l'homéostasie physiologique. Ils sont des composants essentiels des muscles, des enzymes dans les voies métaboliques, du système immunitaire (sous forme d'immunoglobulines) et des hormones qui régissent divers processus tels que la croissance et de nombreuses autres fonctions (Bhagea et al., 2022).

Les protéines d riv es des microalgues sont principalement utilis es comme nutraceutiques ou dans le développement d'aliments fonctionnels. Les microalgues sont consid r es comme une source inhabituelle de protéines pour la consommation humaine, en particulier dans les pays sous-développés, en raison de leur teneur élevée en protéines, que l'on

Chapitre I : Composés bioactifs des microalgues

trouve principalement dans *Arthrospira*, *Chlorella* et *Dunaliella salina*. Les protéines produites à partir d'algues ou d'insectes pourraient représenter environ 50 % de l'industrie des protéines de remplacement d'ici 2054 (Levasseur et al., 2020a) . Comme le montre le tableau suivant, les microalgues marines ont une teneur élevée en protéines, allant de 6 % à 70 % de leur poids sec (tableau II) (Wu et al., 2021).

De plus, les microalgues contiennent non seulement des acides aminés essentiels (AAEs), mais aussi des acides aminés non essentiels (AANEs), qui offrent d'importants bienfaits pour la santé. Les AANEs tels que l'arginine, l'acide aspartique, la proline, l'acide glutamique, la glycine, la cystéine, la sérine, la tyrosine et l'acide glutamique sont présents. La proportion des AANEs dans les profils d'acides aminés de *Chlorella vulgaris* et *Haematococcus pluvialis* est d'environ 51,03 % et 48,50 % (Kusmayadi et al., 2021) .

En raison de leur innocuité, les peptides issus des microalgues ont suscité un intérêt croissant en tant que molécules bioactives alternatives dans le domaine de la pharmacologie. Ils sont surtout reconnus pour leurs propriétés anti-inflammatoires, antihypertenseur, anticancéreux, antibactérien et antioxydant qui sont des propriétés pouvant être utilisées pour promouvoir la santé humaine (Levasseur et al., 2020) .

Tableau (II): Pourcentage de protéines de plusieurs souches de microalgues (Wu et al., 2021).

Microalgues	Protéines (%)
<i>Acutodesmus dimorphus</i>	28.1
<i>Arthrospira maxima</i>	60-71
<i>Botryococcus braunii</i>	39
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48
<i>Chlorella sorokinians</i>	18.81
<i>Dunaliella salina</i>	57
<i>Entomoneis punctulata</i>	15_25
<i>Nannachloropsis oceanica</i>	52.63
<i>Neochloris oldeabundans</i>	30.1
<i>Porphyridium cruentum</i>	28_39
<i>Scenedesmus almeriensis</i>	42.8
<i>Spirulina platensis</i>	46_63

I.2.3. Carbohydrates

Entre 20 et 45 % du poids sec de la biomasse des microalgues est constitué d'hydrates de carbone. L'amidon, le glucose, les sucres et les polysaccharides simples à complexes sont quelques exemples de glucides que l'on peut trouver dans les microalgues (Saha et al., 2015) .

Comme leur nature dépend de l'espèce, elle varie d'une espèce à l'autre. Contrairement à certaines microalgues, leur teneur peut atteindre jusqu'à 50 % du poids sec (Levasseur et al., 2020) . La teneur en hydrates de carbone est plus élevée dans des espèces comme *Porphyridium cruentum* (40-57%) et *Spirogyra* (33-64%) (Kaur et al., 2023) . La majorité des recherches actuelles sur les microalgues pour les hydrates de carbone se concentrent principalement sur la production de biocarburants de troisième génération dans le but de développer le bioéthanol. Les polysaccharides sont souvent divisés en trois types en fonction de leur rôle dans la physiologie des microalgues : les polysaccharides structurels, généralement associés aux parois cellulaires, les polysaccharides énergétiques, tels que l'amidon, et les polysaccharides impliqués dans la communication cellulaire et les sites de reconnaissance (Levasseur et al., 2020).

Il est possible de modifier la teneur en carbohydrate des microalgues en influençant les conditions de croissance, telles que le pH, la température, le CO₂ et d'autres facteurs. Par exemple, des microalgues comme la *Chlorella vulgaris* peuvent accumuler des carbohydrates allant de 9 à 41 % de leur matière sèche, selon les conditions de croissance favorable. De même, la *Scenedesmus obliquus* peut accumuler entre 10 et 47 % de carbohydrate dans sa matière sèche (Levasseur et al., 2020) .

Grâce à leur activité antivirale, antibactérienne, antioxydante, anti-inflammatoire et immunomodulatrice, les polysaccharides des microalgues ont déjà démontré leur potentiel en tant qu'agents prometteurs dans un certain nombre d'industries, y compris l'alimentation humaine et animale, les produits pharmaceutiques et la biomédecine (Saide et al., 2021) . Les genres *Porphyridium*, *Phaeodactylum*, *Chlorella*, *Tetraselmis*, *Isochrysis* et *Rhodella* sont les plus couramment utilisés pour produire des polysaccharides (Ampofo & Abbey, 2022) .

I.2.4. Vitamines et les minéraux

Les microalgues contiennent une variété de micronutriments essentiels tels que les vitamines et les minéraux. Les vitamines sont des micronutriments cruciaux pour les organismes vivants, qui ne peuvent pas être produits en quantités suffisantes par le corps et doivent donc être obtenues par le biais de sources alimentaires (Kaur et al., 2023).

Chapitre I : Composés bioactifs des microalgues

Mahendran et al., (2021) ont mené une étude pour déterminer la teneur en vitamines de différentes espèces de microalgues. Ils ont constaté que les microalgues présentaient des concentrations élevées de quatre vitamines : provitamine A, vitamine E, vitamine B1 et acide folique, par rapport aux sources alimentaires conventionnelles. Ils ont rapporté que *Dunaliella tertiolecta* était capable de synthétiser la vitamine B12 (cobalamine), la vitamine B2 (riboflavine), la vitamine E (tocophérol) et la provitamine A (β -carotène). De plus, *Tetraselmis suecica* a été identifiée comme une excellente source de vitamine B1 (thiamine), vitamine B3 (acide nicotinique), vitamine B5 (acide pantothénique), vitamine B6 (pyridoxine) et vitamine C (acide ascorbique) (**tableau III**) (**Krishna et al., 2019**). Des chercheurs ont mené des recherches et découvert qu'environ 9-18% des espèces de *Chlorella* sont des sources abondantes de vitamine B12 (**Ampofo & Abbey, 2022**).

La vitamine E, également connue sous le nom de tocophérol, est un antioxydant essentiel soluble dans les graisses qui est produit exclusivement par des organismes photosynthétiques. Elle offre de nombreux bienfaits pour le corps humain, tels que la réduction du risque de cancer, des maladies oculaires, des maladies cardiaques et d'autres affections (**Durmaz, 2007**). Dans une étude réalisée sur les effets de la source et de la dose d'azote sur la production de vitamine E (α -tocophérol) chez *Nannochloropsis oculata*. L'étude a révélé que la concentration la plus élevée d' α -tocophérol, de $2,3 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de biomasse, a été obtenue dans un milieu F/2 avec une source d'azote de $441 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ de NO_3^- (**Mahata et al., 2022**).

Les minéraux tels que le calcium, le phosphate, le potassium, le magnésium, le sodium, le fer, le zinc et le cuivre sont essentiels à la croissance et à l'entretien du corps. Une carence en calcium et en phosphate peut entraîner des déformations squelettiques, tandis qu'un régime alimentaire insuffisant en potassium peut provoquer des convulsions. De même, le magnésium, le fer, le cuivre et le zinc jouent un rôle important dans le mouvement musculaire, la formation du squelette, la vision et la prévention de la fatigue. Heureusement, les microalgues marines contiennent ces minéraux et peuvent être utilisées dans l'alimentation humaine ou animale. Les sources minérales prometteuses pour l'alimentation des poissons comprennent *Isochrysisgalbana*, *Chlorella stigmatophora*, *Tetraselmis suecica* et *Dunaliella tertiolecta*. La Spiruline marine (*Spirulina platensis*) peut être utilisée comme une source minérale idéale pour la préparation des aliments (**Mahata et al., 2022**).

Tableau (III) : teneur en vitamines de quatre microalgues marines (Fabregas & Herrero, 1990) .

	<i>T. suecica</i>	<i>I. galbana</i>	<i>D. tertiolecta</i>	<i>C. stigmataphora</i>
Vitamine A	493-750	127-500	137-500	82-300
Tocophérol (E)	421.8	58.2	116.3	669.0
Thiamine (B1)	32.3	14.0	29.0	14.6
Riboflavine (B2)	19.1	30.0	31.2	19.6
Pyridoxine (B6)	2.8	1.8	2.2	1.9
Cobalamine (12)	0.5	0.6	0.7	0.6
Acide folique	3.0	3.0	4.8	3.1
Acide Nicotinique	89.3	77.7	79.3	82.5
Pantothénique	37.7	9.1	13.3	21.4
Biotin (H)	0.8	1.0	0.9	1.1
Acide Ascorbique (C)	191.0	119.0	163.2	100.2

I.2.5. Pigments

Les genres *Porphyridium*, *Phaeodactylum*, *Chlorella*, *Tetraselmis*, *Isochrysis* et *Rhodella* sont les plus couramment utilisés pour produire des polysaccharides microalgaux. Les caroténoïdes, les chlorophylles et les PBP sont les trois classes de composés chimiques qui constituent les pigments photosynthétiques. Les organismes autotrophes comme les plantes, les algues et les cyanobactéries les utilisent donc pour absorber l'énergie solaire avant que la photosynthèse ne la convertisse en énergie chimique (Morocho-Jácome et al., 2020) .

I.2.5.1. Les phycobiliprotéines

Les phycobiliprotéines (PBP) sont des composants hydrosolubles et fluorescents des complexes d'antennes qui captent la lumière chez les cyanobactéries, les algues rouges, quelques cryptophytes et les dinoflagellés rouges, de quelques cryptophytes et de dinoflagellés. Sur la base des propriétés d'absorption, les PBP sont classées en phycocyanine de couleur bleue (les maxima d'absorption, λ_{max} , se situent entre 610 et 620 nm), en phycoérythrine de couleur rouge/rose foncé (les maxima d'absorption se situent entre 540 et 570 nm), en allophycocyanine de couleur vert bleuâtre (λ_{max} : 652 nm) et en phycoérythrocyanine de couleur magenta (λ_{max} : 575 nm), qui est peu fréquente (Nair et al., 2018) . Les PBP peuvent être obtenues des cellules microalgales par diverses techniques physiques telles que la centrifugation, le séchage,

Chapitre I : Composés bioactifs des microalgues

l'homogénéisation centrifugation, le séchage, l'homogénéisation, les processus répétés de congélation-décongélation consécutifs (Mutanda et al., 2020). L'*Aphanizomenon flos-aquae* et *Spirulina* sp. Sont parmi les espèces des microalgues les plus reconnues par leur capacité de produire les PBP (Yaakob et al., 2015).

En outre, les PBP ont des applications majeures en tant que colorants naturels dans l'industrie alimentaire et les produits pharmaceutiques. Les PBP présentent des propriétés antioxydantes, antivirales, anticancéreuses, antiallergiques, anti-inflammatoires et neuroprotectrices, anticancéreuses, antiallergiques, anti-inflammatoires et neuroprotectrices, ce qui en fait des biomatériaux prometteurs pour les applications liées à la santé dans le domaine de la santé (Mutanda et al., 2020).

I.2.5.2. Caroténoïdes

Les êtres vivants ont principalement des couleurs violette, rouge, orange et jaune grâce aux caroténoïdes, qui sont des pigments solubles dans les lipides. Environ 600 structures de caroténoïdes ont été identifiées. Les caroténoïdes sont des tétraterpènes une structure à 40 carbones composée de huit unités isoprènes (Ampofo & Abbey, 2022). En fonction de leurs composants structurels, les caroténoïdes sont divisés en deux classes principales : les carotènes, qui sont composés de carbone et d'hydrogène (comme le β -carotène, le α -carotène et le lycopène), et les xanthophylles, qui sont composées de carbone, d'hydrogène et d'oxygène en plus (comme la lutéine, la zéaxanthine, l'astaxanthine et la fucoxanthine (figure 3) (Mutanda et al., 2020). Dans une étude, Henríquez et al., (2016), ont déclaré que ces composés se trouvent dans *Dunaliella salina* (pigment orange β -carotène), *Haematococcus pluviialis* (pigment rouge astaxanthine), ainsi que *Scenedesmus* sp. et *Chlorella* sp. (Pigment lutéine). Cependant, la microalgue *Dunaliella salina*, qui peut exprimer jusqu'à 98,5 % de β -carotène par rapport à ses caroténoïdes totaux et environ 13 % de sa biomasse sèche, est la source la plus riche pour la production commerciale de β -carotène naturel (Levasseur et al., 2020).

En fonction des conditions environnementales de croissance, les rendements en caroténoïdes des plus grands producteurs de microalgues varient entre 0,1 % et 2 % du poids sec de la biomasse (Levasseur et al., 2020). Les caroténoïdes sont thérapeutiques dans les troubles liés au stress oxydatif et les séquelles associées, tels que le diabète, le vieillissement, le cancer, l'obésité et les accidents vasculaires cérébraux, en raison de leur importante activité antioxydante. En piégeant les radicaux libres et en réduisant le stress oxydatif, le β -carotène et

Chapitre I : Composés bioactifs des microalgues

l'astaxanthine ont des effets significatifs sur le système de défense antioxydant enzymatique (figure 4) (Krishna et al., 2019).

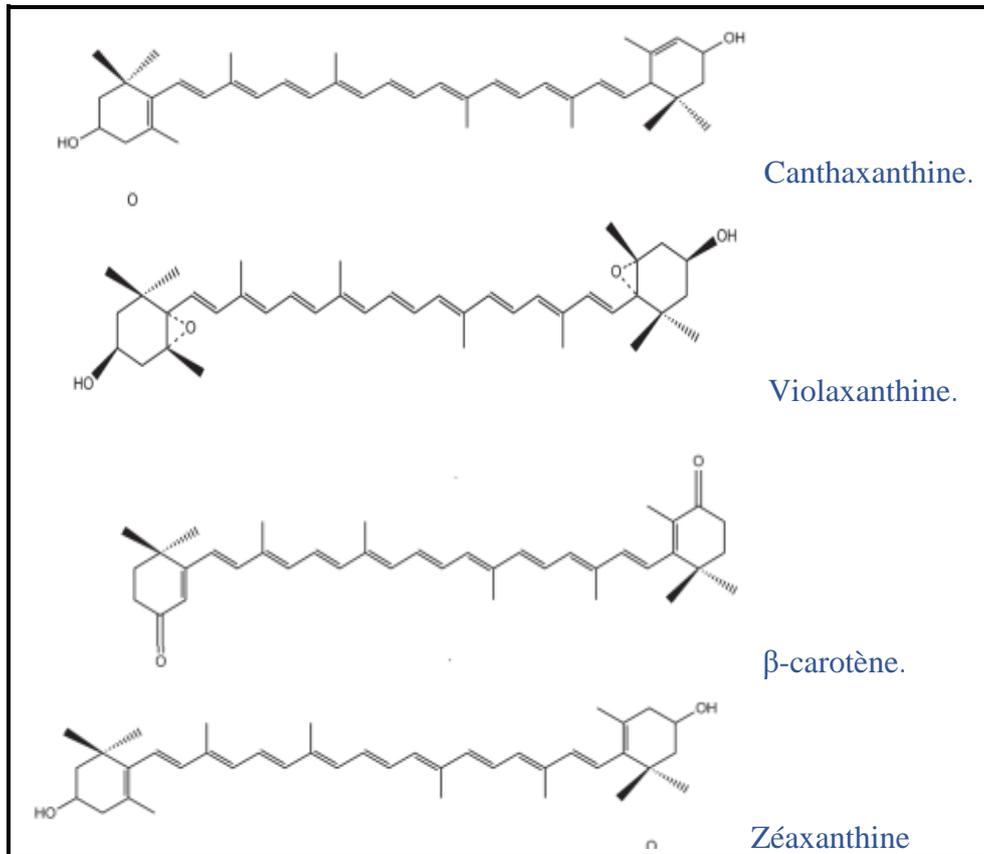


Figure 3 : Structures chimiques des caroténoïdes (Bule et al., 2018).

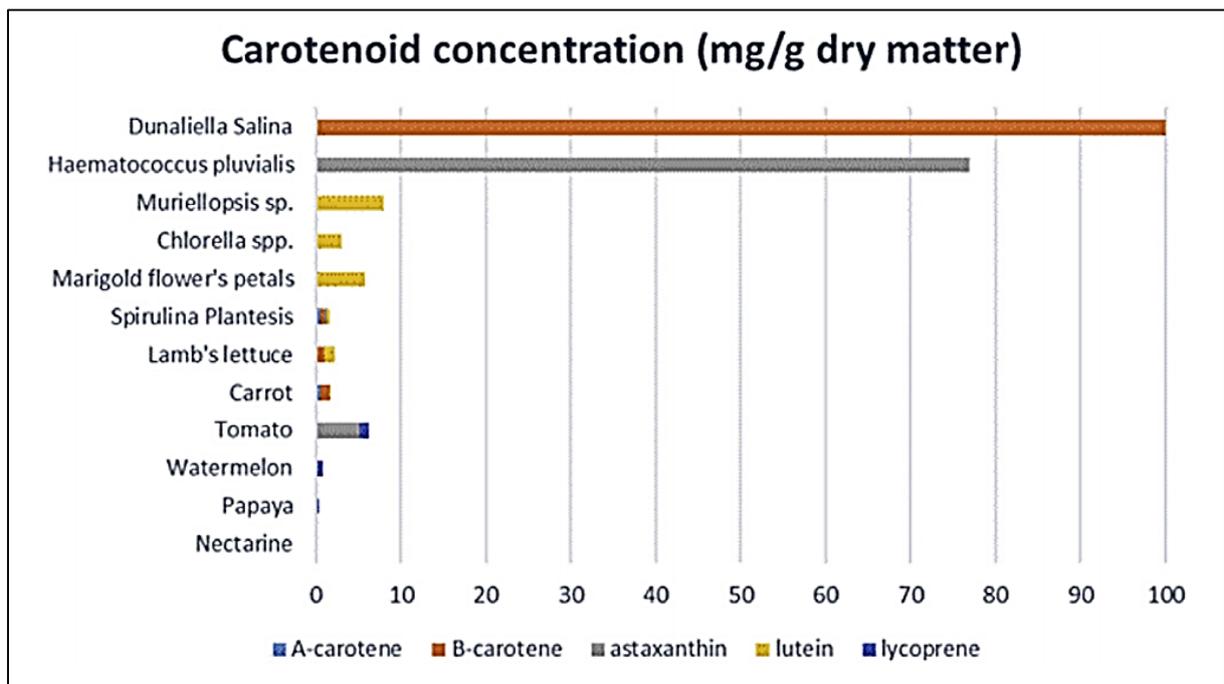


Figure 4 : Teneur en caroténoïdes de différentes sources, y compris les fleurs, les légumes et microalgues (Krishna et al., 2019) .

I.2.5.3. Chlorophylles

Un pigment vert naturel appelé chlorophylle est essentiel pour que les organismes photosynthétiques puissent extraire l'énergie de la lumière du soleil. On les trouve sous forme de chlorophylle a (**figure 5**), chlorophylle b ou chlorophylle c. Les seules algues vertes qui possèdent de la chlorophylle C sont les algues brunes. Les espèces de *Chlorella* fournissent la majorité de la chlorophylle, de petites quantités étant également produites par la *Spiruline* et l'*Arthrospira*. Le pourcentage de chlorophylle dans une cellule individuelle peut varier de 0,5 à 4 % de sa masse sèche totale, en fonction de la souche de microalgue et des circonstances de développement (Hosikian et al., 2010). Valcareggi et al., (2021) ; ont mené une étude pour déterminer la teneur en composés chimiques appelés "Chlorophylle a" et "Chlorophylle b" dans les espèces *Chlorella sorokiniana* et *Heterochlorella luteoviridis*. Les résultats de l'étude ont montré que les microalgues de type *C. sorokiniana* produisent environ 12,66 (mg/g) de Chlorophylle a et 4,8 (mg/g) de Chlorophylle b. En revanche, microalgue *H. luteoviridis* produisent environ 10,86 (mg/g) de Chlorophylle a et 6,66 (mg/g) de Chlorophylle b.

L'industrie alimentaire utilise généralement ce pigment comme colorant naturel pour les aliments et les boissons. Le développement des outils biotechnologiques nécessaires à la production de chlorophylles à partir de microalgues présente un intérêt considérable, même si la majorité des chlorophylles industrielles proviennent de sources végétales (Hamed, 2016).

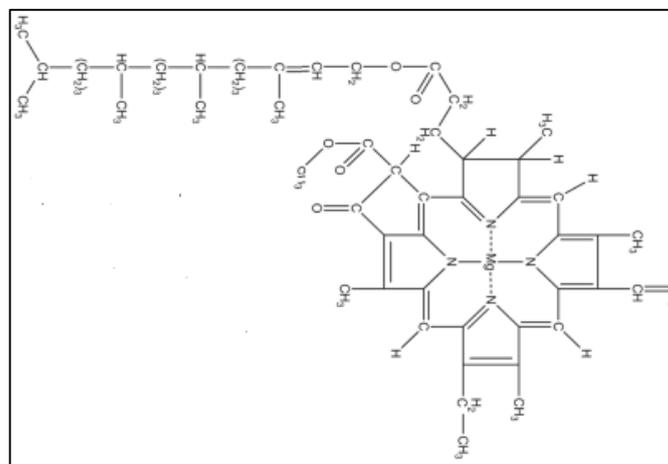


Figure 5 : Structures chimiques de chlorophylle a (Encarnaç o et al., 2015) .

Chapitre II:

*Les activités et rôles biologiques
potentiels des métabolites d'origines
microalgues*

II. Les activités et rôles biologiques potentiels des métabolites d'origines microalgues

Ces dernières années, plusieurs chercheurs ont établi dans la littérature que les produits chimiques bioactifs extraits de diverses espèces de microalgues ont plusieurs applications biologiques telles que des propriétés anti-inflammatoires, antibactériennes et antioxydants, ainsi que la capacité d'améliorer la santé et de réduire le risque de troubles dégénératifs (**figure 6**) (Kaur et al., 2023).

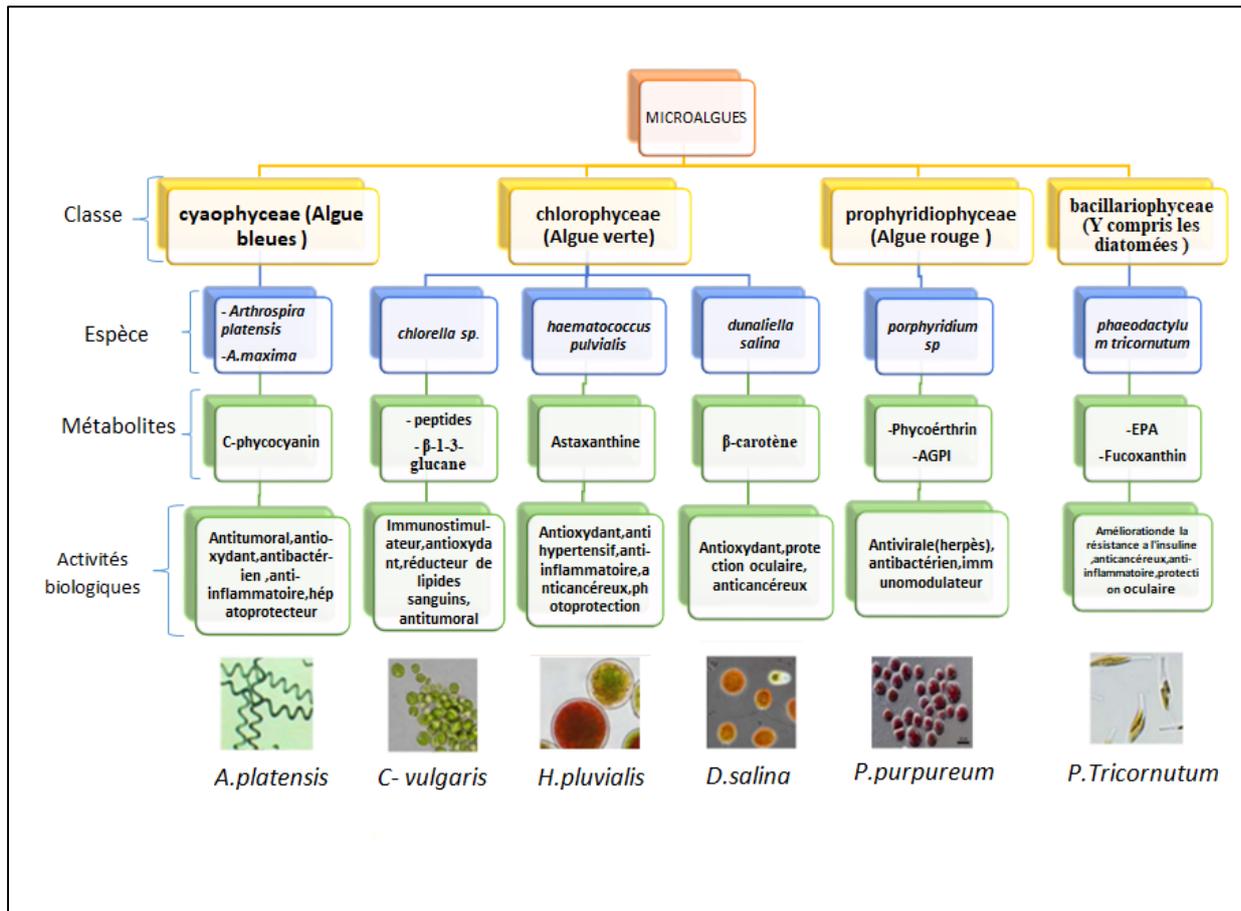


Figure 6 : Principales classes de microalgues, leurs espèces les plus importantes et l'activité biologique associée (Vieira et al., 2020).

II.1. Activité antioxydant

Les antioxydants sont des substances, naturelles ou synthétiques, qui ont le potentiel d'entraver ou de retarder les dommages oxydatifs aux cellules causés par des oxydants physiologiques ayant des potentiels de réduction nettement positifs. Ces oxydants incluent les espèces réactives de l'oxygène (ROS) et les espèces réactives de l'azote (Mart et al., 2022).

Chapitre II : Les activités et les rôles biologiques potentiels

L'utilisation d'antioxydants pour prolonger la durée de conservation des denrées alimentaires est généralisée. Aujourd'hui, ce sont principalement des antioxydants synthétiques tels que le butylhydroxytoluène (BHT) ou le butylhydroxyanisole (BHA) qui sont utilisés. Cependant, étant donné que ces composés sont soupçonnés d'être des agents cancérigènes (**figure 7**) (Goiris et al., 2012) .

La demande d'un antioxydant sûr et puissant provenant d'un produit naturel est en constante augmentation à l'échelle mondiale. Cela est dû à la nécessité de réduire au minimum les dommages oxydatifs aux cellules vivantes et de prévenir la détérioration des produits commercialisés tels que les aliments, les produits pharmaceutiques ou cosmétiques (**Bule et al., 2018**).

D'après des études récentes, il a été démontré que les microalgues constituent de bonnes sources d'antioxydants naturels. Les algues possèdent plusieurs systèmes de défense antioxydants, à la fois enzymatiques et non enzymatiques, qui permettent de maintenir la concentration de ROS (O₂- et H₂O₂) afin de protéger les cellules contre les dommages. Parmi ces systèmes de défense enzymatique, on trouve la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT), la glutathion peroxydase (GPX) et la peroxirédoxine (PrxR).

Les molécules antioxydants des microalgues, notamment les caroténoïdes, les composés phénoliques, les acides gras, le tocophérol, les flavonoïdes et les alcaloïdes, jouent un rôle majeur dans la maîtrise du processus d'oxydation (**Bule et al., 2018**) . Parmi les composés caroténoïdes, le β -carotène et l'astaxanthine sont des éléments les plus importants. Ces composés ont des applications dans les industries alimentaire et pharmaceutique en raison de leurs propriétés antioxydantes et de leur capacité de pigmentation. Dans le métabolisme des microalgues, ils protègent les tissus photosynthétiques contre les dommages causés par la lumière et l'oxygène. *Dunaliella salina* est une microalgue reconnue comme une source biologique majeure de pigment β -carotène, produisant plus de 14% en biomasse sèche. De même *Haematococcus pluvialis* est une source de pigment astaxanthine, produisant entre 1 et 8% d'astaxanthine en biomasse sèche (**De Morais et al., 2015**) .

La fucoxanthine, un antioxydant présent dans *Phaeodactylum tricornutum*, a démontré in vitro des effets bénéfiques tels que l'inhibition de l'explosion oxydative dans les cellules sanguines primaires humaines, le piégeage des radicaux et l'augmentation du rapport entre le glutathion réduit (GSH) et le glutathion oxydé (GSSH) (**Saïde et al., 2021**) .

Chapitre II : Les activités et les rôles biologiques potentiels

Les flavonoïdes et les alcaloïdes issus de la microalgue *Scenedesmus bajacalifornicus*, notamment le BBKLP-07, ont montré une activité antioxydante significative. À une concentration de 50 µg/mL, ces composés ont présenté des effets importants de piégeage des radicaux libres, avec des réductions de 60,45 % et 63,57 % respectivement (Saïde et al., 2021).

Des chercheurs mènent une étude pour évaluer l'activité antioxydante d'extraits aqueux de neuf espèces différentes de microalgues : *Nostoc muscorum*, *Anabaena flos aquae*, *Anabaena oryzae*, *Nostoc humifusum*, *Oscillatoria sp.*, *Spirulina platensis*, *Phormidium fragile*, *Wolleea saccata* et *Chlorella vulgaris*. Parmi les microalgues testées, *Spirulina platensis*, *Oscillatoria sp.*, *Anabaena flos aquae* et *Nostoc muscorum* ont présenté la plus forte activité antioxydante avec la méthode ABTS, avec des pourcentages de 75,9 %, 75,6 %, 73,6 % et 72,8 % respectivement (Mostafa, 2012).

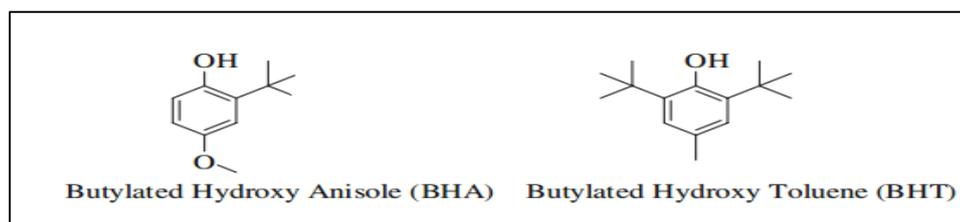


Figure 7: Antioxydants synthétiques utilisés dans les matériaux alimentaires et cosmétiques (Karmee, 2020).

II.2. Activité anti-inflammatoire

L'inflammation est une réponse protectrice aux stimuli nocifs (Varela et al., 2018), caractérisée par une rougeur, un gonflement, de la chaleur, de la douleur et une perte de fonction tissulaire au niveau des tissus. Cette réponse implique l'activation des cellules immunitaires, vasculaires et inflammatoires, ce qui conduit à des changements de la perméabilité vasculaire, au recrutement et à l'accumulation de leucocytes et à la libération de médiateurs inflammatoires (Chen et al., 2018).

La consommation de composés anti-inflammatoires peut renforcer la réponse immunitaire et aider à prévenir les maladies. Plusieurs genres de microalgues, dont *Phaeodactylum tricomutum*, *Thalassiosira*, *Dunaliella salina* et d'autres, peuvent produire plusieurs composés anti-inflammatoires dans leur biomasse. Les AGPI, les polysaccharides sulfurisés, les pigments et les caroténoïdes sont quelques-uns des composés microalgaires essentiels qui présentent de telles propriétés (De Morais et al., 2015).

Chapitre II : Les activités et les rôles biologiques potentiels

Dans une étude menée par **Jean et al. en (2010)** il a été constaté que la supplémentation quotidienne de 2 ou 8 mg d'astaxanthine, dérivée de la microalgue *Haematococcus pluvialis*, a entraîné un changement dans la réponse des lymphocytes T chez de jeunes femmes adultes en bonne santé, ainsi qu'une réduction des activités inflammatoires. Plus précisément, l'étude a démontré une transition d'une réponse Th1 dominée par l'interféron-gamma (IFN- γ) à une réponse Th1/Th2 caractérisée par la Co-dominance de l'IFN- γ et de l'interleukine-4 (IL-4), tout en régulant l'inflammation.

La phycocyanine, un composé bioactif présent dans *Spirulina platensis*, a été étudiée pour ses propriétés anti-inflammatoires. Elle a la capacité de supprimer la production de cytokines pro-inflammatoires IL-6 et IL-8, tout en augmentant la production de TGF- β 1, une cytokine anti-inflammatoire. Cela suggère que la phycocyanine a le potentiel d'être utilisée comme agent thérapeutique pour traiter les maladies inflammatoires. *Spirulina platensis*, une algue bleu-vert, est connue pour sa haute valeur nutritionnelle et a été utilisée pendant des siècles en médecine traditionnelle. Les résultats de cette étude s'ajoutent à l'ensemble croissant de preuves suggérant que *Spirulina platensis* et ses composés bioactifs pourraient avoir d'importantes applications thérapeutiques dans le traitement des affections inflammatoires (**Tabaradz et al., 2020**) .

II.3. Activité anticancéreuse

Le cancer représente une menace majeure pour la santé humaine à travers le monde, étant reconnu comme l'une des maladies les plus graves. La chimiothérapie, un traitement couramment utilisé, vise à éliminer ou entraver la croissance des cellules cancéreuses. Cependant, cette approche présente des inconvénients inhérents, notamment la toxicité et les effets secondaires désagréables des médicaments utilisés, pouvant même mettre la vie en danger. Par conséquent, il y a eu une attention croissante portée à l'exploration des ressources biologiques marines, en particulier les microalgues, pour leur potentiel à fournir des substances bioactives pour le traitement du cancer (**Fayyad et al., 2019**).

Les différents types de caroténoïdes, tels que la lutéine, le bêta-carotène, l'astaxanthine et la violaxanthine, ont démontré des propriétés anticancéreuses. Les microalgues sont d'excellentes sources de caroténoïdes. En particulier, le bêta-carotène a été trouvé pour avoir un effet inhibiteur sur la croissance du cancer. Il y parvient en supprimant la polarisation des macrophages M2, qui jouent un rôle important dans la métastase et la progression des tumeurs. De plus, le bêta-carotène réduit la migration et l'invasion des cellules cancéreuses du côlon

HCT116. Dans une étude *in vitro*, des souris infectées par un cancer du côlon ont reçu du bêta-carotène deux fois par semaine pendant 11 semaines, à des doses de 5 et 15 mg/kg. Cette supplémentation a entraîné une réduction de la croissance des tumeurs (**Kaur et al., 2023**).

Palozza et al., (2009) ont étudié l'effet d'un extrait d'*Haematococcus pluvialis* riche en astaxanthine (**figure8**) sur les cellules cancéreuses du côlon HCT-116. Selon l'étude, l'extrait a supprimé la croissance cellulaire de manière dose-dépendante et temps-dépendante en empêchant la progression du cycle cellulaire et en augmentant l'apoptose.

Saide et al., (2021) ont réalisé une étude dans laquelle ils ont isolé trois aldéhydes polyinsaturés à partir de diatomées marines, à savoir *Thalassiosira rotula*, *Skeletonema costatum* et *P. delicatissima*. Ils ont constaté que le 2-trans-4-cis-7-cis-décatriénel, le 2-trans-4-trans-7-cis-décatriénel (**figure8**) et le 2-trans-4-trans-décadiénel présentaient une activité anti-proliférative contre la lignée cellulaire humaine d'adénocarcinome du côlon (Caco-2). Pour évaluer les effets anti-prolifératifs, ils ont exposé les cellules Caco-2 à diverses concentrations de PUA allant de 0 à 20 µg/mL pendant 48 heures.

La fucoxanthine (**figure 8**), un caroténoïde présent dans les algues marines et les diatomées, possède diverses bioactivités, dont certaines sont efficaces contre le cancer. On la retrouve notamment dans des espèces de diatomées telles que *Chaetoceros* sp. *Cylindrotheca closterium*, *Phaeodactylum tricornutum*, et d'autres. Des études ont démontré que la fucoxanthine réduisait la viabilité des lignées de cellules cancéreuses suivantes : la leucémie promyélocytaire, le Caco-2 (adénocarcinome du côlon), le DLD-1 et le cancer de la prostate (**Bratchkova & Kroumov, 2020**).

Les polysaccharides de microalgues sont largement connus pour leurs effets préventifs et anticancéreux (**Imamoglu & Deniz, 2017**). Le fucoïdan est un polysaccharide sulfaté, obtenu à partir de diverses microalgues telles que *Fucus vesiculosus*, *Sargassum henslowianum*, *Cladosiphon fucoïdan* et *Coccophora longsdorfi*. Il inhibe l'angiogénèse et la métastase en régulant à la baisse l'activité des kinases et en activant la caspase-3/7 dans les lignées cellulaires de lymphome humain, de mélanome, carcinome pulmonaire, de cancer du côlon humain, de cancer du sein, de et de leucémie promyéloïde humaine (**Khavari et al., 2021**).

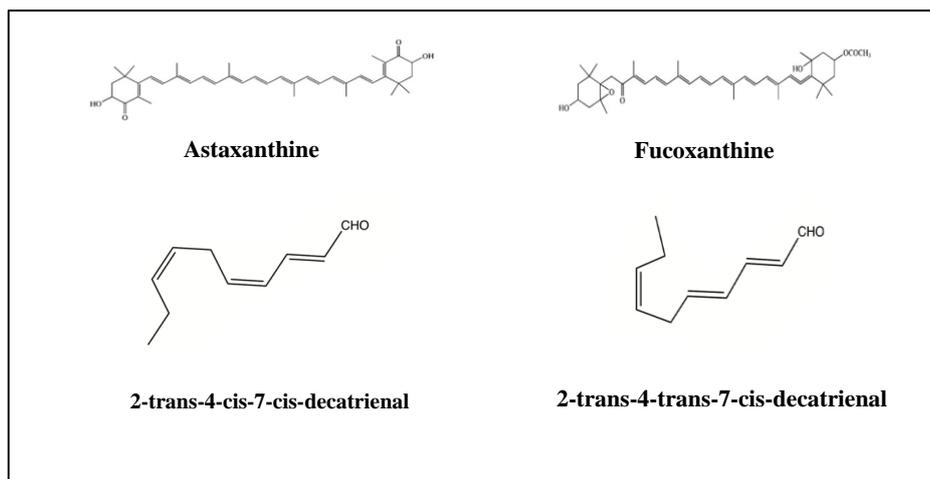


Figure 8 : Structure de certaines molécules anticancéreuses produites par les microalgues (**Bule et al., 2018**) .

II.4. Activité antimicrobienne

Actuellement, la communauté mondiale recherche activement des options alternatives d'antibiotiques en réponse à l'émergence de microorganismes résistants aux antibiotiques. Dans cette quête, les microalgues ont suscité un intérêt considérable en tant que réservoir potentiel d'antibiotiques et de substances antimicrobiennes. Grâce à des méthodes de dépistage rigoureuses et à une exploration approfondie des constituants chimiques présents dans les microalgues, de nombreuses espèces ont été découvertes pour produire des composés antimicrobiens soit à l'intérieur de leurs cellules, soit à l'extérieur (**Mishra et al., 2021**).

Ces microorganismes présentent une activité antimicrobienne en synthétisant divers composés, tels que des acides gras, des acides acryliques, des composés aliphatiques halogénés, des terpénoïdes, des stérols, des composés hétérocycliques soufrés, des glucides, des acétogénines et des phénols (**De Morais et al., 2015**).

En réponse à des conditions défavorables, les microalgues utilisent un mécanisme de défense en produisant et en libérant des acides gras libres dans le milieu environnant. Cela sert de défense contre les bactéries pathogènes, les virus et les autres algues coexistantes. Ces acides gras et leurs dérivés présentent une activité antibactérienne en induisant la lyse des cellules bactériennes. Divers composés antimicrobiens ont été criblés et montrent un potentiel pour le développement de nouveaux antibiotiques, bien que leur utilisation soit encore au stade préliminaire (**Mishra et al., 2021**).

CHAPITRE I : Composés Bioactifs Des Microalgues

II.4.1 Activité antibactérienne

Au cours des dernières décennies, la résistance croissante des bactéries pathogènes à de nombreux antibiotiques est devenue un problème majeur, présentant des risques importants pour la santé humaine. En conséquence, d'importants efforts ont été entrepris pour explorer de nouveaux composés antibactériens capables de combattre efficacement ce problème (**Falaise et al., n.d.**).

L'objectif principal de ces efforts a été d'étudier la résistance aux antibiotiques chez les bactéries, qui est influencée par plusieurs facteurs. Tout d'abord, les infections bactériennes sont la principale cause d'infections acquises en communauté et nosocomiales. Deuxièmement, la disponibilité de nombreuses classes d'antibactériens offre une large gamme de mécanismes de résistance. Enfin, la capacité de transférer des caractères de résistance bactérienne dans des souches bactériennes bien étudiées permet des investigations approfondies sur les mécanismes moléculaires sous-jacents (**Mostafa, 2012**). Plusieurs études de recherche ont indiqué que les microalgues ont le potentiel d'être une précieuse source de composés chimiques capables de freiner la prolifération des bactéries nuisibles. Parmi ces composés se trouve une substance appelée « chlorelline », qui a été initialement extraite de *Chlorella*. Ce mélange d'acides gras a démontré des propriétés inhibitrices à la fois contre les bactéries à Gram positif et à Gram négatif (**Najdenski et al., 2013**).

Khavari et al., (2021) ont réalisé une étude révélant les propriétés antibactériennes des acides gras à chaîne courte extraits de *Haematococcus pelvis* contre *Escherichia coli* et *Staphylococcus aureus*, il a donné une activité puissante. Dans une étude réalisée par des chercheurs ils ont découvert que les extraits de *Chlorococcum humicola* présentent des effets

antibactériens variés sur différentes espèces bactériennes. Cette activité antibactérienne a été attribuée à la présence de composés phénoliques et de pigments tels que le β -carotène et la chlorophylle II. Ils démontré des effets antibactériens contre *Vibrio cholerae*, *Salmonella typhimurium*, *S. aureus* et *Bacillus subtilis*.

Les chrysophaentines provenant des microalgues *Chrysophaeum taylorii* présentent une activité antibiotique contre les bactéries Gram-positives, y compris *Staphylococcus aureus* résistant aux médicaments. Parmi eux, la chrysophaentine A, qui est chlorée et macrocyclique, présente une puissance activité supérieure de plusieurs fois par rapport à l'analogie linéaire chrysophaentine E (**figure 9**). En termes de mécanisme, à la fois la chrysophaentine A et l'analogie synthétique hémichrysophaentine (**figure 9**) inhibent la protéine cytosquelettique bactérienne FtsZ par une inhibition compétitive sur son site de liaison GTP. De plus, ils entravent la division cellulaire bactérienne et la formation de l'anneau Z de FtsZ chez les bactéries vivantes (**Davison & Bewley, 2021**).

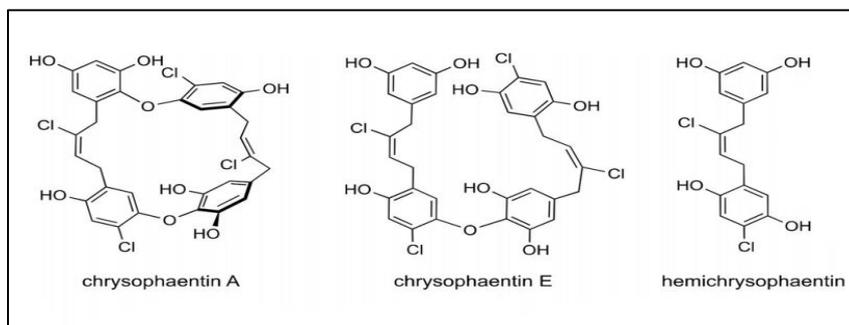


Figure 9 : Structure de certaines molécules antibactériennes produites par les microalgues (**Davison & Bewley, 2021**) .

Le décadiénal produit par *Skeletonema costatum* et *Thalassiosira rotula* présente une forte activité contre d'importants pathogènes humains tels que le SARM et *Haemophilus influenza* - avec des valeurs CMI de 7,8 et 1,9 g/mL, respectivement ainsi que *E. coli* et *Pseudomonas aeruginosa*, et *S.aureus* Il inhibe également la croissance d'une large gamme de bactéries marines, y compris *Aeromonas hydrophila*, *Listonella anguillarum*, *Alteromonas haloplankti*, *Photobacterium phosphoreum*, *Psychrobacter immobilis*, *Planococcus citreus* et *Micrococcus luteus* (**Mostafa, 2012**).

II.4.2 Activité antivirale

Compte tenu de l'évolution de nouvelles souches de virus redoutables causant des effets Terribles sur les vies humaines, la recherche de nouvelles molécules Antivirales naturelles est

nécessaire (**Sadrati, 2021**). C'est pourquoi les microalgues ont suscité un intérêt considérable en tant que sources prometteuses d'agents antiviraux (**Mostafa, 2012**).

De nombreux scientifiques ont également utilisé des polysaccharides sulfatés comme moyen de lutter contre les infections virales. Un excellent exemple est le Naviculan, un polysaccharide sulfaté obtenu à partir de la diatomée *Navicula directa*. Les recherches menées par des chercheurs ont confirmé que le Naviculan présente de puissantes propriétés antivirales contre HSV-1 et HSV-2 (IC₅₀ : 7–14 µg/mL) ainsi que le virus de la grippe. Son activité antivirale est principalement observée dans l'inhibition des premières étapes de la réplication virale. Fait intéressant, cette étude a également révélé l'effet inhibiteur du Naviculan sur l'infection par le VIH. Le mécanisme inhibiteur du polysaccharide consiste à interférer avec les processus de liaison et de pénétration du virus. Le Naviculan entrave la fusion entre les cellules exprimant le récepteur CD4 et la lignée cellulaire HeLa, qui exprime la glycoprotéine Gp160 du VIH (**Fu et al., 2017 ; Bratchkova & Kroumov, 2020**).

Saide et al.,(2021) ont réalisé une étude démontrant que les polysaccharides sulfatés (PS) peuvent inhiber l'entrée des particules virales dans les cellules hôtes. Plus spécifiquement, ils ont examiné les effets inhibiteurs du *calcium spirulan* et du *dextran* sulfate sur la réplication du Virus de l'Immunodéficience Humaine de type 1 (VIH-1) et du Virus de l'Herpès Simplex de type 1 (HSV-1). Les chercheurs ont déterminé que la concentration de calcium spirulan et de dextran sulfate nécessaire pour atteindre une inhibition de 50% (IC₅₀) était respectivement de 9,3 et 9,6 µm/mL.

Les exopolysaccharides sulfatés (EPS) ont été découverts pour perturber l'absorption et l'entrée de certains virus enveloppés dans les cellules hôtes. *Gyrodinium impudicum*, une microalgue marine, produit un polysaccharide sulfaté appelé p-KG03, qui a montré une efficacité antivirale remarquable dans des études en laboratoire. Les tests *in vitro* ont révélé que le p-KG03 présentait une activité antivirale exceptionnelle contre le virus de l'encéphalomyocardite (EMCV), avec une valeur EC₅₀ de 26,9 µg mL⁻¹. La composition du p-KG03 se compose d'un mélange uniforme d'unités de galactose liées à l'acide uronique, ainsi que de groupes sulfatés ramifiés. De plus, ce composé, le p-KG03, a également présenté des propriétés antivirales contre les virus de la grippe de type A et de type B (**Encarnação et al., 2015**).

II.4.3 Activité antifongique

Les infections fongiques entraînent plus de 1,5 million de décès dans le monde chaque année, provoquant une perte de vies considérable (Mostafa, 2012). Les microalgues se sont révélées être de redoutables concurrentes dans le développement d'agents antifongiques en raison de leur capacité remarquable à synthétiser des métabolites bioactifs. Diverses souches de microalgues ont démontré leur potentiel dans la lutte contre les infections fongiques causées par *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida albicans*, *Candida tropicalis*, *Chlorococcussp.* et *Oscillatoriasp* (Kaur et al., 2023).

Par exemple, une étude examinant l'inhibition de la croissance mycélienne des agents pathogènes fongiques du complexe *Fusarium* par *Nannochloropsis* sp. a découvert que les caroténoïdes (comme le β -carotène et l'astaxanthine) ainsi que divers extraits phénoliques démontrent des activités antagonistes. De plus, les extraits éthanoliques de *Haematococcus pluvialis* contenant du lactate de méthyle et de l'acide butanoïque ont démontré une activité antifongique contre *Aspergillus Niger* (Nagappan et al., 2021).

Les polysaccharides sulfatés, produits en abondance par les microalgues rouges *Porphyridium cruentum* et/ou *Rhodella reticulata*, qui sont reconnus pour leur activité contre les bactéries pathogènes ainsi que la levure *Candida albican* (Gacheva & Gigova, 2014).

Les amphidinols (AMS) sont un groupe de polykétides linéaires découverts il y a 30 ans. Jusqu'à présent, tous les amphidinols connus ont été examinés pour leurs propriétés antifongiques, notamment, l'amphidinol 2 (figure 10) (Qi et al., 2007). L'amphidinol 6 a montré une activité contre *Aspergillus Niger* à une concentration de 6 μ g par disque. Dans une étude menée par Assunta et ses collègues (2021), les AM2, AM4 extraits de *l'amphidinuim Klebsin* et AM9 extraits de *l'Amphidiniuim Klebsin* ont démontré une activité antifongique significative contre *A. Niger* aux concentrations respectives de 44,3 μ g, 58,2 μ g et 32,9 μ g par disque respectivement. L'amphidinol 18 (figure10), dérivé de *l'Amphidiniuim carterae*, a montré une forte activité contre la levure *Candida albicans*, avec une concentration inhibitrice minimale (CIM) de 9 μ g/mL (Saide et al., 2021).

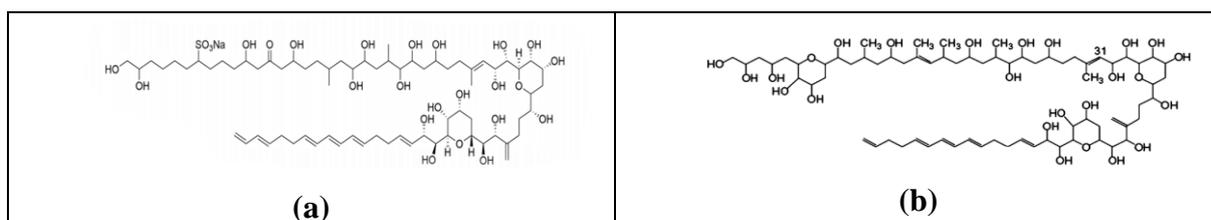


Figure 10: (a) chaîne courte, amphidinol 18; (b) amphidinol 2 (Saide et al., 2021).

En 2012, Mostafa et ses collaborateurs ont examiné l'effet des filtrats de culture de neuf espèces de microalgues (*Anabaena flosaquae*, *Anabaena oryzae*, *Chlorella vulgaris*, *Nostoc muscorum*, *Nostoc humifusum*, *Oscillatoria sp.*, *Phormidium fragile*, *Spirulina platensis* et *Wolleea saccata*) sur la croissance des champignons phytopathogène *Cercospora beticola* causant la maladie des taches foliaires chez la betterave sucrière. Ils ont constaté qu'en général, tous les filtrats de culture d'algues réduisaient la croissance du mycélium fongique, mais que les pourcentages les plus élevés d'inhibition de la croissance du mycélium fongique étaient atteints par *Spirulina platensis*, *Oscillatoria sp.* et *Nostoc muscorum*.

II.5. Activité antidiabétique

En 2013, on estimait à plus de 382 millions de personnes atteintes de diabète dans le monde, et ce nombre devrait atteindre 500 millions d'ici à 2030, date à laquelle le diabète devrait se classer au septième rang des causes de décès (Lauritano & Ianora, 2016). L'insuline, produite par les cellules β du pancréas, contrôle la glycémie et permet aux cellules de l'utiliser comme source d'énergie. Une insuffisance d'insuline ou une insensibilité tissulaire entrave l'absorption du glucose, entraînant son accumulation dans le sang et provoquant des symptômes du diabète (Abo-shady et al., 2023).

Ces dernières années, la recherche de nouveaux produits chimiques bioactifs pour traiter cette maladie a suscité un intérêt croissant. De nombreuses espèces aquatiques, y compris des bactéries, des microalgues et des macroalgues, ont été examinées pour déterminer leur activité antidiabétique potentielle. Selon certains rapports, un certain nombre de microalgues produisent des substances bioactives telles que des caroténoïdes, des AGPI, de l'astaxanthine, etc. qui ont des propriétés antidiabétiques (Mutanda et al., 2020).

Les biotopes d'eau douce et d'eau de mer contiennent un certain nombre de microalgues ayant une action antidiabétique, telles que *Chlorella spp.*, *Nitzschia laevis*, *Isochrysis galbana* et *Chaetoceros* (Mutanda et al., 2020). Des études ont montré que la microalgue *Phaeodactylum tricornerutum* contient des composés bioactifs susceptibles d'être utilisés comme agents antidiabétiques. L'un de ces composés est la fucoxanthine. Dans le contexte du diabète, la fucoxanthine s'est révélée être un agent anti-hyperglycémique, c'est-à-dire qu'elle peut aider à réduire les niveaux élevés de sucre dans le sang. On pense que cet effet est dû à la capacité de la fucoxanthine à améliorer la sensibilité à l'insuline et à favoriser l'absorption du glucose dans les cellules (Kaur et al., 2023).

Le diabète peut être prévenu et traité de manière plus efficace grâce à l'astaxanthine en maintenant l'activité des cellules bêta du pancréas, en améliorant la résistance à l'insuline (RI) et en stimulant la production d'insuline, l'astaxanthine peut réduire les niveaux de glucose sanguin (**Landon et al;2020**).

L'EPA et le DHA sont des composés bioactifs présents dans les microalgues des classes *Chlorophyceae* et *Eustigmatophyceae*. Dans une étude sur des souris diabétiques, l'administration d'EPA et de DHA a augmenté les cytokines IL17A, IL-12, IL-4, IL-6, IL-10 et TGF- β , tout en diminuant les niveaux d'IFN- γ , de TNF- α et d'IL-5. Ces résultats suggèrent que l'EPA et le DHA peuvent moduler la réponse immunitaire dans le diabète et potentiellement améliorer le contrôle de la glycémie (**Saïde et al., 2021**).

II.6. Activité antihypertenseur

En raison de sa prévalence élevée et de sa corrélation avec une morbidité et une mortalité élevée, l'hypertension est un problème de santé mondial majeur. Elle est considérée comme le facteur de risque le plus important pour les maladies cardiovasculaires précoces, surpassant d'autres facteurs tels que le tabagisme, la dyslipidémie et le diabète. L'hypertension est responsable d'environ 54% de tous les AVC et 47% de tous les cas de maladie cardiaque ischémique dans le monde (**Zhao et al., 2015**).

Kaur et al., (2023) ont démontré dans leur recherche que des peptides bioactifs extraits de *Chlorella vulgaris* et *Spirulina platensis* avaient des effets antihypertenseurs significatifs. Plus précisément, un peptide (Val-Glu-Cys-Tyr-Gly-Pro-Asn-Arg-Pro-Gln-Phe) isolé des hydrolysats de protéines de *Chlorella vulgaris* a montré un effet antihypertenseur en inhibant l'enzyme de conversion de l'angiotensine I (ACE) par un mode de liaison non compétitif, la valeur d'IC₅₀, qui représente la concentration nécessaire pour inhiber 50 % de l'activité de l'enzyme de conversion de l'angiotensine (ACE), a été déterminée à 29,6 μ m.

Différents types de peptides bioactifs ayant une activité inhibitrice de l'ACE ont été découverts à partir de différentes sources, telles que les *Spirulines*, *Vischeria Helvetica KGU-Y001* et *Chlorella sorokiniana* son inhibition est considérée comme une stratégie efficace pour traiter l'hypertension (pression artérielle élevée). Ces peptides bioactifs ont le potentiel d'être utilisés comme agents antihypertenseurs à des fins thérapeutiques (**Zhao et al., 2015**).

L'athérosclérose est déclenchée par l'hyperlipidémie, qui est la principale cause de maladie cardiaque et de décès. Le cholestérol joue un rôle important dans la structure et la fonction des membranes cellulaires et des hormones stéroïdes. Il se combine avec les lipoprotéines pour

Chapitre II : Les activités et les rôles biologiques potentiels

former différentes particules, notamment les lipoprotéines de haute densité (HDL), de basse densité (LDL) et de très basse densité (VLDL). Les niveaux élevés de LDL et de VLDL sont les principaux facteurs de risque indépendants des événements cardiovasculaires. Une augmentation de 10 mg/dL de cholestérol LDL est associée à une augmentation de 12 % du risque de maladies cardiovasculaires (**Zhao et al., 2015**) .

Une élévation du taux de cholestérol peut entraîner une hypertension artérielle élevée, affectant finalement la fonction de divers organes tels que le cœur, les reins, le foie et les poumons, et modifiant plusieurs voies biochimiques. Les extraits liquides de *Spirulina* ont démontré leur capacité hypolipidémiant en réduisant les niveaux de triglycérides, en maintenant les niveaux de cholestérol et en prévenant l'accumulation de graisse dans le foie. Des études ont rapporté que la supplémentation en *Spirulina* a réduit les niveaux de lipides (cholestérol, triglycérides et LDL) chez les patients atteints du syndrome néphrotique hyperlipidémique (**Kaur et al., 2023**) .

La protéine extraite de *Nannochloropsis oculata*, une espèce de microalgue, présente une activité antihypertensive significative en inhibant l'enzyme de conversion de l'angiotensine (ECA). Cette enzyme joue un rôle crucial dans la régulation de la pression artérielle (**Kaur et al., 2023**).

Chapitre III : Autres applications

III. Autres applications

III.1. Nourriture humaine

Depuis des centaines d'années, les microalgues sont utilisées comme complément alimentaire ou comme source de nourriture dans des pays tels que la Chine, le Mexique, le Japon et la Corée. Les microalgues (*Nostoc*) ont été consommées pour la première fois en Chine il y a environ 2000 ans, puis la *spiruline* et la *chlorelle* ont été consommées au Mexique, à Taïwan et au Japon (**Kaur et al., 2023**).

La *spiruline*, également connue sous le nom d'*Arthrospira*, gagne en popularité à l'échelle mondiale en raison de sa teneur en protéines, en phycocyanine, en phénols, en pigments, en acides gras polyinsaturés et en vitamines. La *spiruline* est promue comme un complément alimentaire nutritionnel ou un "super-aliment" et est disponible sous forme de gélules, de poudre séchée ou de flocons (**figure 11**) (**Kaur et al., 2023**).

Dans les études menées par **El-baz et al., (2022)**, où ils ont examiné l'effet de l'ajout de poudre d'algue *Dunaliella salina* à la semoule sur la qualité des pâtes. *D. salina* a des teneurs élevées en protéines, en matières grasses et en cendres (22,42, 3,0 et 52,8 %, respectivement). Par conséquent, l'augmentation de la quantité d'algues (1-3 %) mélangée à la semoule a stimulé la teneur nutritive des pâtes. *D. salina* est riche en minéraux, les pâtes aux algues à 3% contenant 66,60 mg/100g de calcium, 7,72 mg/100g de fer, 23,80 mg/100g de magnésium et 100,34 mg/100g de potassium.

Selon les recherches de **Balanho et al. (2014)**, la demande d'aliments fonctionnels contenant des acides gras oméga-3 augmente en raison de leurs avantages. Ils ont découvert que *Nannochloropsis oculata* est bénéfique en raison de son taux de croissance relativement rapide, de sa teneur élevée en lipides et de sa résistance au mélange et à la contamination. La couleur, la dureté, le profil des acides gras et les qualités sensorielles des biscuits et des pâtes ont été examinés après l'introduction de la biomasse de *N.Oculata*. Les valeurs de couleur se sont avérées constantes après deux mois de stockage, et la rigidité s'est améliorée lorsque la biomasse microalgale a été ajoutée. Les niveaux d'acides gras polyinsaturés (AGPI) oméga-3 (EDA et DHA) de 98 mg par 100 g et 63 mg par 100 g, respectivement, ont été trouvés dans les biscuits et les pâtes supplémentés en AGPI.

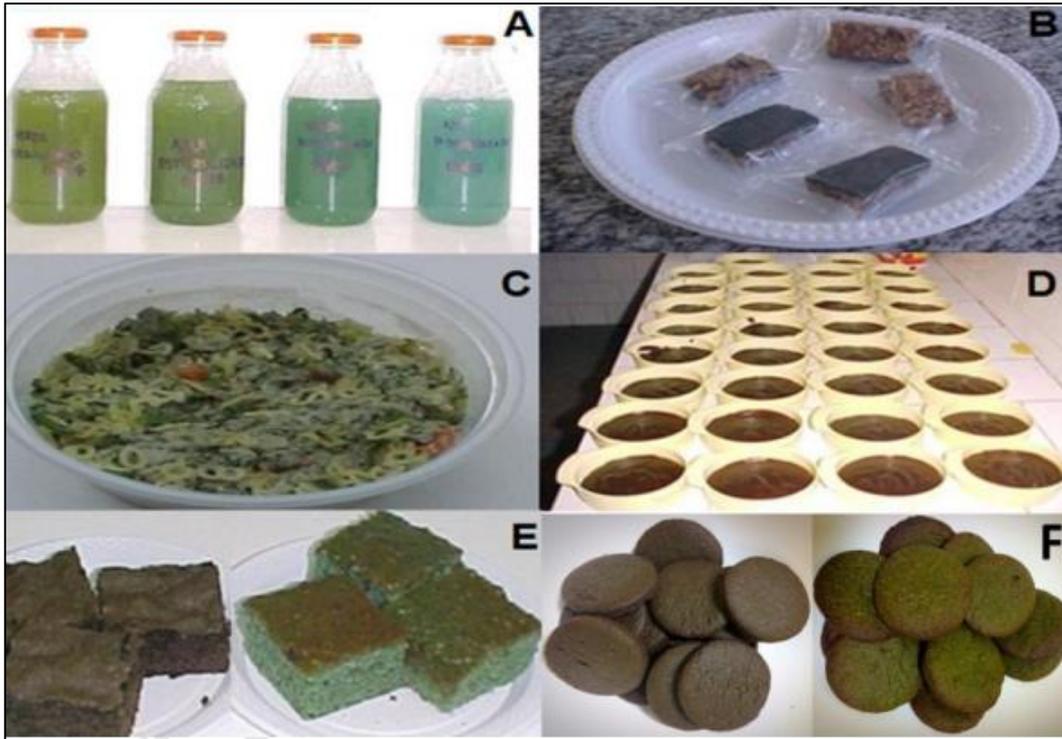


Figure 11 : Aliments enrichis en microalgues : boissons isotoniques (A), barres de céréales (B), soupes instantanées (C), pouding (D) poudre à gâteau (E) et biscuits (F) (Da Silva Vaz, 2016).

III.2. L'alimentation animale

L'utilisation de la biomasse microalgale a démontré un potentiel significatif pour améliorer la qualité et, dans certains cas, la quantité de l'alimentation animale. Selon une étude de **Dineshbabu et al., (2019)** environ 30% de la biomasse de microalgues produite est utilisée pour l'alimentation animale ou pour la préparation d'aliments pour animaux. La composition nutritionnelle de différentes espèces de microalgues a été examinée et s'est révélée hautement adaptée en tant que complément dans l'alimentation animale. Les microalgues peuvent enrichir l'alimentation habituelle en fournissant des AGPI essentiels et des pigments qui améliorent la coloration de la viande.

La potentialité d'utiliser les microalgues comme alimentation pour le bétail dépend de plusieurs éléments, qui englobent les espèces spécifiques de microalgues utilisées et leur composition nutritionnelle, comprenant les protéines, les glucides, les lipides, les vitamines et les antioxydants. La capacité des animaux à s'adapter à cet élément est également une considération cruciale. Des études explorant l'utilisation des algues comme alimentation animale sont en cours depuis les années 1950 (**Kusmayadi et al., 2021**). De manière générale, l'incorporation de microalgues dans les formulations d'aliments pour animaux a des effets positifs sur plusieurs aspects tels que l'amélioration de la prise de poids, l'augmentation de la

production de lait et l'augmentation de l'accumulation des AGPI dans les tissus, les œufs et le lait (figure 12) (Amorim et al., 2021).

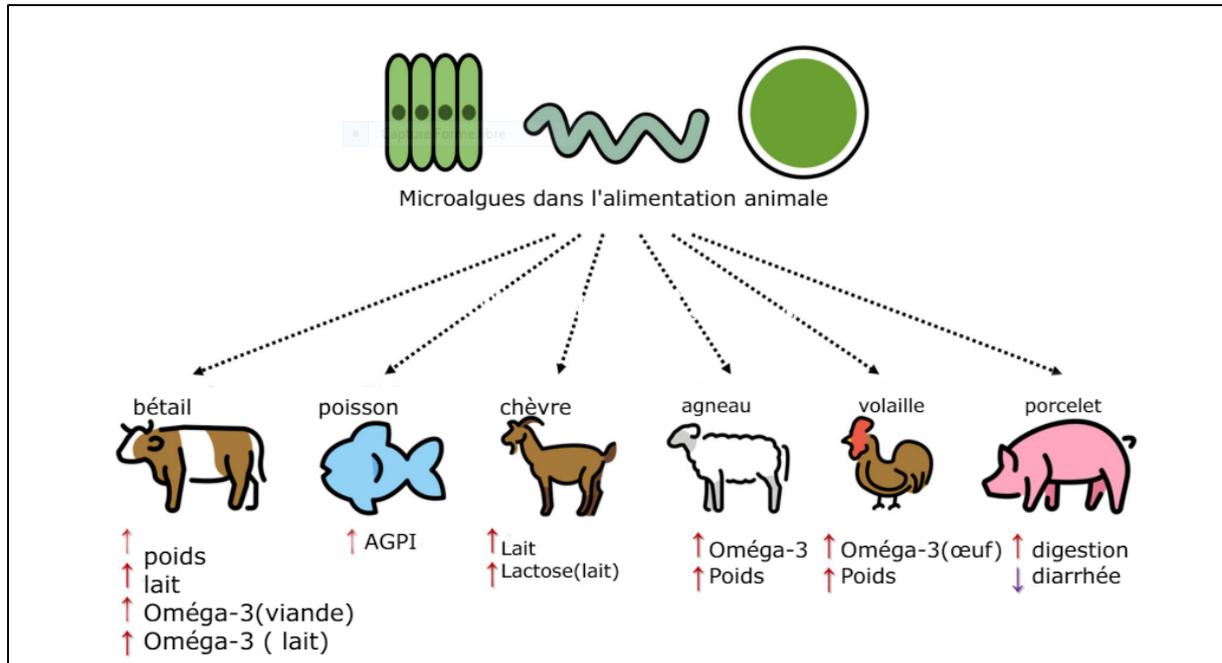


Figure 12: Microalgues utilisées dans la formulation des aliments et leur effet sur la nutrition des différents animaux (Amorim et al., 2021).

Les microalgues *Schizochytrium* sp. , *Cryptocodinium cohnii* et *Phaeodactylum tricornutum*, comme la peuvent être utilisées dans l'alimentation des poissons. Elles sont considérées comme de bonnes sources APGI, ce qui contribue à améliorer la santé et la qualité des poissons (Pufa, 2022). Kusmayadi et al., (2021) Ont mentionnée dans leur étude que l'ajout de 39% et 26% de biomasse algale en poudre de *Criptonemia crenulata* et *Hypnea cervicornis* à l'alimentation des crevettes pourrait augmenter le taux de croissance de 95,2% à 97% par rapport à l'absence d'algale de biomasse.

Une étude a examiné l'impact de l'introduction d'algues *Porphyridium* sp. dans l'alimentation des poulets, les résultats ont montré que l'ajout de ces algues en tant que supplément entraînait une réduction de 10% des taux de cholestérol dans le jaune d'œuf et produisait une couleur plus sombre, indiquant une production accrue de caroténoïdes. Il est sûr d'inclure des microalgues dans l'alimentation des volailles à un taux de 5 à 10 %, en remplaçant partiellement les protéines conventionnelles. Cependant, l'utilisation de concentrations plus élevées d'algues sur une période prolongée peut avoir des effets néfastes. De plus, l'alimentation à base de microalgues peut influencer la teinte jaune de la peau des poulets de chair, des tibias et des jaunes d'œufs, ce qui est une caractéristique importante. En outre, l'Institut für

Getreideverarbeitung en Allemagne produit un aliment naturel appelé Algrow, qui contient des microalgues *Chlorella* sp. et *Arthrospira* sp. (Yaakob et al., 2015) .

L'ajout de 10% de biomasse de *Spirulina* pourrait augmenter le poids moyen le plus élevé chez les agneaux jusqu'à environ $41,9 \pm 0,7$ kg (Kusmayadi et al., 2021). En 2016, Olaia et al. et ses collègues ont constaté que l'ajout de 3,89 % de graines de lin et de 5 % de microalgues *Schizochytrium* sp dans l'alimentation des agneaux pourrait améliorer la qualité de la viande tout en réduisant la consommation d'aliments.

Les chèvres ont consommé plus d'aliments et ont eu une meilleure digestibilité, une meilleure fermentation dans le rumen et une meilleure production de lait lorsque des doses quotidiennes de 5 à 10 g de *Chlorella vulgaris* ont été ajoutées à leur régime alimentaire. Le profil des acides gras des chèvres a également été amélioré par l'ajout de *Chlorella vulgaris* à l'alimentation, avec une augmentation des acides gras liés aux avantages pour la santé, notamment les acides gras insaturés et l'acide linoléique conjugué, et une diminution des acides gras saturés (Amorim et al., 2021).

Chlorella vulgaris affecte spécifiquement le profil des acides gras du lait en réduisant la quantité de résidus d'acides gras saturés et en augmentant simultanément la proportion de DHA dans l'alimentation des vaches laitières. L'inclusion d'*Arthrospira platensis* dans les aliments pour porcs et volailles a augmenté le gain de poids, même si cela s'est fait aux dépens d'une diminution de l'indice de conversion alimentaire. L'ajout de microalgues aux aliments destinés aux agneaux et aux chevaux a augmenté la teneur en acides gras de la viande obtenue. En termes de saveur, de couleur ou de texture, l'amélioration de la qualité de la viande a contribué à accroître l'acceptation par les consommateurs (Camacho et al., 2019).

III.3. Traitement des eaux

Le traitement traditionnel des eaux usées est devenu rétrograde et coûteux. Ils ne font que transférer les contaminants de l'eau, ce qui entraîne également une pollution secondaire. Le traitement des eaux usées par les microalgues est un processus biologique qui élimine les polluants tout en fixant le CO₂, et la biomasse microalgale récoltée peut être transformée en divers produits de grande valeur (figure12) (Song et al., 2022).

La contamination est un risque majeur lors de l'utilisation d'eaux usées pour la production de microalgues. Il est possible de gérer ce risque en employant des méthodes de prétraitement appropriées pour éliminer la vase et désactiver (stériliser) l'effluent (Li et al., 2008). L'avantage significatif d'une bioraffinerie à base de microalgues intégrée aux eaux usées est qu'elle résout

les problèmes environnementaux tout en produisant des biocarburants et d'autres substances à valeur ajoutée telles que des pigments, des microéléments, des acides gras omégas, des antioxydants et des aliments pour animaux (Srimongkol et al., 2022).

Les microalgues sont particulièrement intéressantes pour le bio-traitement en raison de leur capacité de photosynthèse, transformant l'énergie solaire en biomasses utiles et intégrant des nutriments tels que l'azote et le phosphore, qui sont à l'origine de l'eutrophisation (Çakirsoy et al., 2022). Plusieurs microalgues sont utilisées pour le traitement des eaux usées, comme *Chlorella zofingiensis*, *Nannachloropsis*, *S.obiliquus* et *H pulvialis* (Srimongkol et al., 2022).

Chlorella vulgaris a démontré son efficacité dans l'élimination des nutriments, avec un taux de 86 % d'élimination de l'azote inorganique et 78 % d'élimination du phosphore inorganique. Dans une étude antérieure, le traitement des eaux usées industrielles a réussi à éliminer 85,7 % du phosphore et 50,2 % de l'azote, tandis que les eaux usées domestiques traitées avec des algues ont atteint un taux d'élimination de 97,8 % pour le phosphore (Filali, 2012).

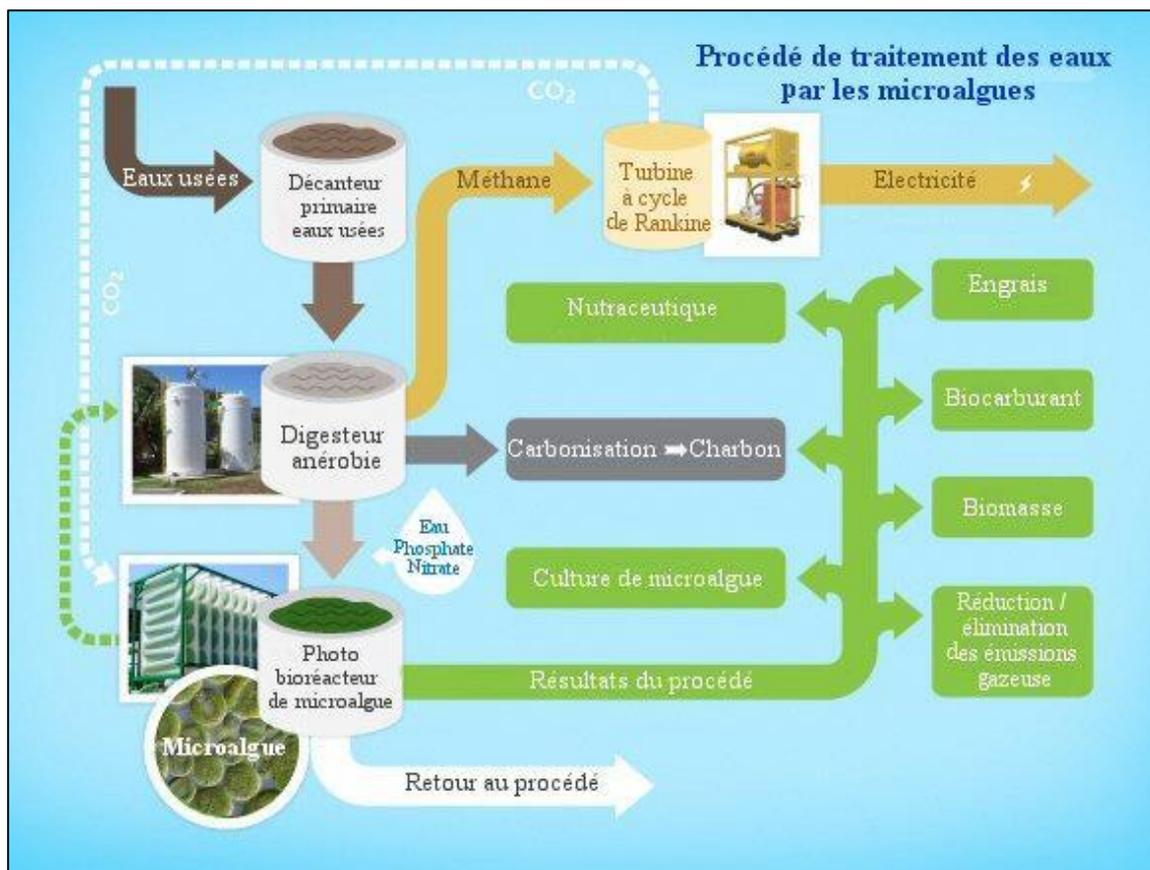


Figure 13: Procédé de traitement des eaux par les microalgues (Filali, 2012).

III.4. Agriculture

Les microalgues et les produits agrochimiques qui en sont dérivés sont des sources uniques de stimulants de croissance des plantes, augmentant la productivité agricole et renforçant la résistance aux maladies. Diverses biomolécules peuvent contribuer à ces résultats positifs. De plus, les microalgues sont intéressantes en raison de leur nature phototrophe, de leur efficacité photosynthétique élevée et de leur flexibilité environnementale (**Parmar et al., 2023**) tels que les conditionneurs de sol, les engrais organiques, les biostimulants et les substances de biocontrôle (**Alvarez et al., 2021**).

Song et al., (2022) ont étudié l'effet des biofertilisants microalgaires sur les agrégats du sol, et ont constaté que la présence de *Chlorella* sp. Améliorait la rétention d'eau et favorisait la croissance des racines. Une autre étude a montré des augmentations significatives de l'azote, de la matière organique, du phosphore et du potassium dans le sol après l'irrigation de différents légumes avec un fertilisant liquide dérivé de microalgues. L'activité des enzymes dans le sol, telle que la protéase et la catalase, a également été améliorée de manière variable.

L'utilisation de la biomasse sèche obtenue à partir de *Chlorella minutissima* a réduit la libération de nitrate des terres agricoles et a augmenté la teneur en azote dans les feuilles des plantes d'épinards (*Spinacia oleracea*). L'application des extraits d'*Asterarcys quadricellulare* a notablement favorisé l'assimilation de l'azote et l'activité du nitrate réductase chez les plantes de pomme de terre (*Solanum tuberosum*). Lors de la comparaison des effets sur l'absorption de l'azote par les parties aériennes chez les plantes de blé (*Triticum aestivum*), l'application de la biomasse de *C. vulgaris* et de l'engrais chimique a produit des résultats similaires. Ces résultats démontrent l'efficacité de l'utilisation d'engrais à base de microalgues (**Çakirsoy et al., 2022**). Des preuves de plus en plus nombreuses soutiennent l'efficacité des microalgues et des composés dérivés des microalgues en tant que biopesticides et agents de lutte biologique (**Alvarez et al., 2021**).

III.5. Production de biocarburant

L'un des thèmes majeurs du siècle en cours a été la nécessité de substituer les combustibles fossiles par des carburants à base d'énergie renouvelable afin de faire face à l'augmentation des niveaux de CO₂ atmosphérique. Des efforts ont été déployés pour utiliser des microalgues telles que *Dunaliella* et *Spirulina* dans la production de biocarburants en tant que solution potentielle (**Gilmour, 2019**), comme le biodiesel, le biosyngas et le biohydrogène (**Li et al., 2008**). Les biocarburants dérivés des microalgues offrent plusieurs avantages :

Chapitre III : Autres applications

1. Production toute l'année : Les microalgues assurent une production constante et une productivité en huile supérieure aux cultures traditionnelles. Elles peuvent produire environ 12000 litres de biodiesel par hectare, tandis que le colza n'en produit que 1 190 litres par hectare.

2. Utilisation réduite de l'eau : Les microalgues nécessitent moins d'eau.

3. Impact minimal sur les terres et l'environnement : Les microalgues peuvent être cultivées dans de l'eau saumâtre et sur des terres non cultivables.

4. Potentiel de croissance rapide : Les microalgues ont des taux de croissance rapide, et de nombreuses espèces ont une teneur élevée en huile, allant de 20% à 50% de leur biomasse sèche.¹

5. Amélioration de la qualité de l'air : La production de biomasse de microalgues contribue à la biofixation du dioxyde de carbone (CO₂) résiduel. Environ 1 kilogramme de biomasse microalgue sèche utilise environ 1,83 kilogramme de CO₂ (**Brennan & Owende, 2010**).

Plusieurs espèces ont montré une véritable capacité à produire les différents types de biocarburant. Pour le biodiesel, *Cladophora fracta*, *C. protothecoides* et *B. braunii* ; pour le biohydrogène, *C. protothecoides*, *S. platensis* et *Chlamydomonas reinhardtii* ; pour le bioéthanol, *Palmaria*, *Porphyra*, *Ascophyllum*, *Ulva lactuca*, *Tetraselmis sp.* et *Chlorococum sp.* (**Marquez-rocha et al., 2019**).

CHAPITRE IV :
Production et extraction des
composés bioactifs des
microalgues

IV. Production et extraction des composés bioactifs des microalgues

La procédure de culture et de récolte est essentielle pour la production de composés bioactifs dérivés des microalgues. Grâce à leur adaptabilité, les microalgues peuvent se développer dans divers environnements, notamment dans des cultures phototrophes, mixotrophes et hétérotrophes. Pour extraire les produits nécessaires, il faut perturber les cellules des microalgues afin de libérer les molécules d'intérêt, puis utiliser l'une des différentes techniques (Kaur et al., 2023).

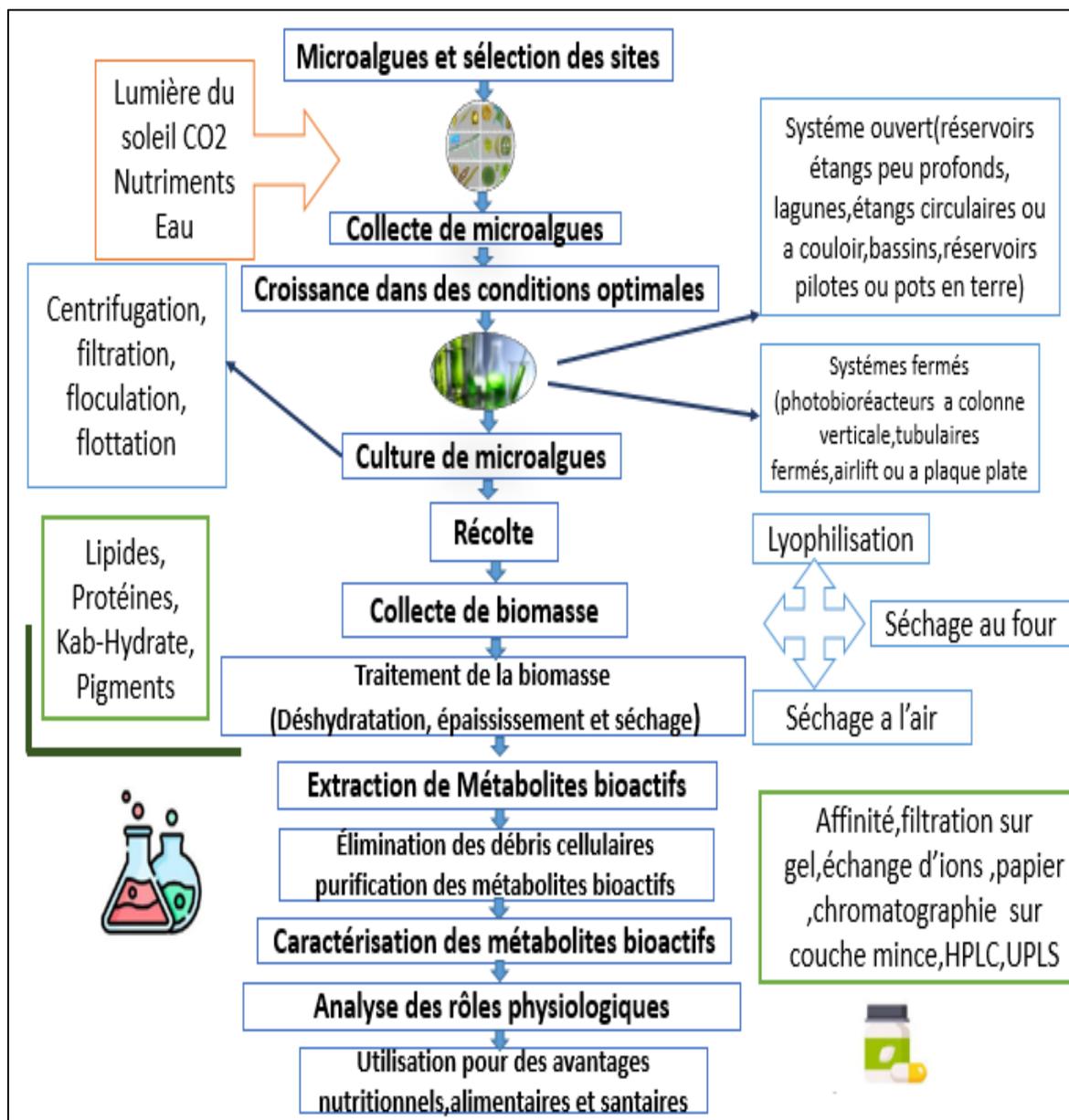


Figure 14 : Illustration par étapes de la production de précieux métabolites bioactifs dérivés de microalgues (Kaur et al., 2023).

IV Production et extraction des composés bioactifs des microalgues

IV.1. Croissance sous les conditions optimales

IV.1.1. Système ouvert

En raison de leur simplicité et de leur facilité d'utilisation, les étangs ouverts, qu'ils soient naturels ou artificiels, sont souvent utilisés pour la culture de microalgues à grande échelle. Il en existe deux types : les systèmes aquatiques naturels (lacs, lagunes et étangs) et les systèmes aquatiques artificiels (étangs artificiels, réservoirs et conteneurs) (**figure15**) (**Klinthong et al., 2015**). Les systèmes de culture de microalgues en plein air sont considérés comme rentables mais présentent plusieurs inconvénients. Il s'agit notamment de la diffusion du CO₂, des besoins en terre, des pertes d'eau et d'une mauvaise utilisation de la lumière. Les systèmes ouverts sont exposés aux éléments atmosphériques, ce qui rend difficile le contrôle des conditions de culture et entraîne de faibles rendements en biomasse. Il est également difficile d'équilibrer la profondeur du bassin pour la lumière du soleil et le mélange. La biomasse maximale dans les systèmes ouverts est généralement comprise entre 0,1 et 0,5 g/L (**Brennan & Owende, 2010**).

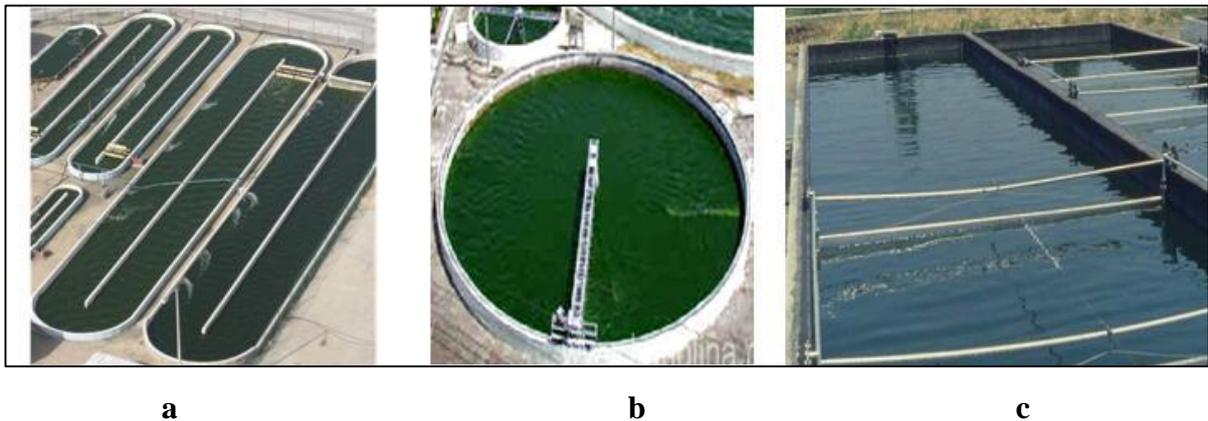


Figure 15: Systèmes de culture : (a) étang non brassé, (b) étang à couloir, (c) étang circulaire (**Klinthong et al., 2015**)

IV.1.2. Système fermé

Il existe différents types de systèmes de culture fermés, parfois appelés photobioréacteurs. L'architecture du compartiment de culture, qui peut être constitué de réacteurs tubulaires, de réacteurs laminaires (ou à panneaux plats) (**figure 16**), de manchons en plastique suspendus ou de réacteurs à cuve de type fermenteur, est à l'origine de la plupart des différences entre les systèmes. Selon la région et le produit fabriqué, ils peuvent être éclairés artificiellement ou non. Les systèmes fermés régulent les variables de culture bien mieux que

les systèmes ouverts. La productivité de la biomasse surfacique varie considérablement d'une technique agricole à l'autre, mais elle est souvent plus élevée dans les systèmes fermés (**Jerney & Spilling, 2020**).



Figure 16: Photobioréacteurs fermés ; a : photobioréacteur tubulaire, b : photobioréacteur à plaques (**Jerney & Spilling, 2020**).

IV.2. Collection de la biomasse

Il existe actuellement plusieurs méthodes de récolte des microalgues, notamment la récolte en vrac, qui consiste à séparer les microalgues de la suspension en utilisant la sédimentation par gravité naturelle, la floculation et la flottaison, puis l'épaississement, qui consiste à concentrer la boue de microalgues en utilisant la centrifugation et la filtration (**Klinthong et al., 2015**). Les cellules des microalgues sont agrégées à l'aide de flocculant tels que des cations multivalents dans la technique de floculation. Il en résulte la formation de particules plus grosses appelées floccs. La flottation est un processus qui consiste à faire flotter les cellules d'algues à la surface de l'eau à l'aide de microbulles d'air et sans produits chimiques. Il s'agit d'une méthode plus rentable. La centrifugation est une méthode rapide et efficace pour récupérer la biomasse algale, mais elle est coûteuse en raison des besoins énergétiques élevés et de la maintenance. Elle peut également provoquer des dommages aux cellules intérieures et une perte de nutrition. La filtration est une méthode qui utilise une membrane poreuse avec des gammes de tailles de particules variées pour isoler la biomasse algale des milieux de culture liquides. Elle est très utile pour recueillir de minuscules microalgues (**Balasubramaniam et al., 2021**).

IV.3. Séchage

Après avoir été extraite du milieu de culture, la biomasse d'algues est immédiatement traitée pour passer à l'étape suivante afin d'éviter qu'elle ne pourrisse ou d'augmenter sa durée

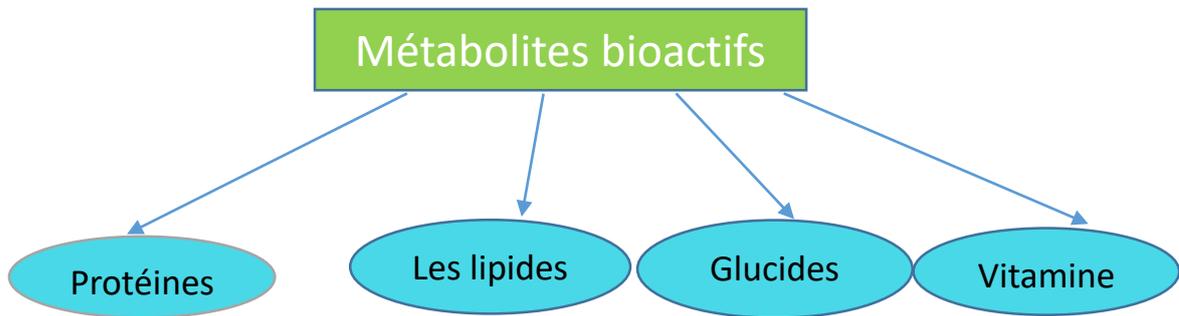
de conservation. Le séchage au soleil, le séchage par pulvérisation et la lyophilisation sont les trois types de processus de séchage ou de déshydratation les plus courants. L'approche utilisée est entièrement déterminée par le résultat final souhaité (**Balasubramaniam et al., 2021**).

Le choix de la meilleure méthode de séchage dépend de l'échelle et de la valeur du produit. Le séchage au soleil est bon marché mais lent et nécessite une grande surface. Il n'est pas stérilisé et ne convient pas aux produits de grande valeur. Le séchage par pulvérisation est coûteux et peut détériorer les algues. La lyophilisation est préférable pour les conditions douces et la réduction des cellules en poudre fine, mais elle est lente et nécessite un investissement important. Le séchage thermique n'est pas recommandé en raison de la dégradation des lipides et de la taille non uniforme de la poudre. (**Klinthong et al., 2015**).

IV.4. Extraction des composés bioactifs spécifiques

Les microalgues sont constituées d'hydrates de carbone, de lipides, de protéines, de minéraux et d'une variété d'autres composants. Pour extraire tous les composants souhaités, les parois cellulaires seront lysées de différentes manières : physique, mécanique (broyage de billes, homogénéisation, micro-ondes, ultrasons et champ électrique pulsé), chimique (solvant, acide et alcali) et biologique (enzymes). La méthode de prétraitement choisie est déterminée par les produits finis souhaités (**Tableau VI**) (**Balasubramaniam et al., 2021**).

Tableau VI. Les différentes méthodes d'extraction des métabolites secondaire des microalgues (Kaur et al., 2023):



	Protéines	Les lipides	Glucides	Vitamine
Les types	<ul style="list-style-type: none"> -Protéines de cellules entières -Concentrés et isolats de protéines -Phycobiliprotéines -Lectines -Peptides bioactifs peptides -Antioxydants peptides antioxydants -Acides aminés similaires à la mycosporine 	<p>Lipides polaires</p> <ul style="list-style-type: none"> -Phospholipides -Glycolipides -Bétaïne lipides <p>Lipides non polaires</p> <ul style="list-style-type: none"> -Triacylglycérols -Acides gras -Oxylipides -Stérols -Eicosanoïdes 	<ul style="list-style-type: none"> -Alginates -Carraghénanes -Fucoïdes -Laminaires -Ulvans 	<ul style="list-style-type: none"> -Riboflavine -Ascorbate -Niacine -Rétinoïde -Folate -Cobalamine -Tocophérol -Thiamine -Pantothénique -Acide -Pyridoxine
Méthodes d'extraction	<p>Perturbation des cellules</p> <ul style="list-style-type: none"> *Champ électrique pulsé *Sonication *Broyage de billes *Homogénéisation à haute pression *Méthode enzymatique <p>Concentrés de protéines</p> <ul style="list-style-type: none"> *Filtration sur membrane *Précipitation des protéines *Perturbation cellulaire * Chromatographie d'échange d'ions * Chromatographie d'exclusion * Ultracentrifugation * dialyse * Système à trois solvants 	<p>Mécanique</p> <p>Homogénéisateur (haute pression, ultrasons, haute vitesse, hydrodynamique, microfluidiseur), Broyeur à billes</p> <p>Enzymatique :</p> <p>Autolyse, Phage, lyse. Séchage</p> <p>- Physique :</p> <p>Décompression, Micro-ondes, lyophilisation, Thermolyse.</p> <p>Chimique : Solvant, Supercritique CO₂, Antibiotique, Détergent</p>	<p>Hydrolyse acide</p> <p>Extraction ultrasonique</p> <p>L'hydrolyse enzymatique</p> <p>Extraction en lit fluidisé</p> <p>Extraction Chimique</p> <p>par solvant conventionnel</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Chromatographie liquide à ultra-haute pression -Traitement enzymatique -Méthode microbiologique -Chromatographie liquide -spectrométrie de masse -Extraction par fluide supercritique -Dispersion en phase solide de la matrice -Extraction au CO₂ supercritique

IV.4. Purification et identification des composés bioactifs

Après l'extraction, les biomolécules sont généralement mélangées à un solvant ou mélangées en une seule phase, ce qui nécessite la séparation des composés intéressants de ceux qui le sont moins ou l'élimination des contaminants qui diminuent leur valeur ou introduisent une certaine forme de toxicité. Par conséquent, des procédures de séparation sont souvent nécessaires pour purifier les produits chimiques récupérés. Ces procédures comprennent

l'électrophorèse, la séparation par membrane, l'ultracentrifugation et d'autres encore, dont les propriétés, la chromatographie, les avantages et les inconvénients seront examinés (**Brennan & Owende, 2010**). Lorsque des solvants organiques sont utilisés comme solvants, la chromatographie est la méthode de purification la plus couramment utilisée (**Ventura et al., 2017**).

IV.5. Tester et utiliser des composés bioactifs

Les microalgues sont une source renouvelable polyvalente capable d'envahir divers domaines. Elles peuvent être utilisées dans le domaine biologique en tant qu'antioxydant, antidiabétique, anti-inflammatoire, anticancéreux et antimicrobienne. De plus, elles sont considérées comme une source prometteuse dans l'alimentation et l'alimentation animale. Leur utilisation dans la photosynthèse et CO₂ confère des avantages pour leur application dans les domaines de l'agriculture, de la production de biocarburants et du traitement des eaux usées. Les méthodes utiliser pour tester l'efficacité des composés purifiés sont variables selon le teste et l'activité biologiques que nous volons examiné (**Khan et al., 2018 ; Krishna et al., 2019 ; Gilmour, 2019**).

Conclusion

Conclusion

Les algues microscopiques, également connues sous le nom de microalgues, sont un type de petites algues marines qui ne peuvent pas être vues à l'œil nu et qui sont composées de cellules très petites. Ces algues englobent de nombreuses espèces telles que *Chlorella*, *Spirulina*, *Dunaliella*, *Haematococcus* et autres. Les microalgues se distinguent par leur capacité à effectuer la photosynthèse et à convertir l'énergie solaire en composés organiques.

Les microalgues sont utilisées dans divers domaines en raison de leur capacité à produire une gamme diversifiée de composés secondaires précieux. Ces composés sont utilisés dans de nombreuses industries, notamment l'industrie alimentaire, pharmaceutique, agricole et environnementale. Les algues microscopiques se distinguent également par leur valeur nutritionnelle élevée, contenant une proportion élevée de protéines, d'acides gras essentiels, de vitamines et de minéraux.

Plusieurs méthodes sont disponibles pour la culture, la récolte et l'extraction de ces composés à partir des algues. Des bassins de culture spécialisés peuvent être utilisés pour cultiver les algues et fournir des conditions de croissance appropriées, telles que des températures et un éclairage adéquats. De plus, des systèmes de recyclage de l'eau et l'apport de nutriments appropriés peuvent être utilisés pour stimuler la croissance des algues. Après la croissance des algues, elles sont récoltées et les composés bénéfiques peuvent être extraits à l'aide de diverses techniques telles que la distillation ou l'extraction par solvant. Avec l'avancée de la technologie et l'intérêt croissant pour l'exploitation du potentiel des microalgues, des efforts sont déployés pour développer des méthodes plus efficaces et rentables de culture des microalgues et de leur utilisation dans différents domaines.

Références bibliographique

Références

- Abo-shady, A. M., Gheda, S. F., Ismail, G. A., & Pereira, L.** (2023). Antioxidant and antidiabetic activity of algae. *Life*, *13*(2), 460.
- Alvarez, A. L., Weyers, S. L., Goemann, H. M., Peyton, B. M., & Gardner, R. D.** (2021). Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, *54*(February), 102200. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>
- Amorim, M. L., Soares, J., Coimbra, J. S. dos R., Leite, M. de O., Albino, L. F. T., & Martins, M. A.** (2021). Microalgae proteins: production, separation, isolation, quantification, and application in food and feed. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *61*(12), 1976–2002. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1768046>
- Ampofo, J., & Abbey, Lord.** (2022). Microalgae: bioactive composition, health benefits, safety and prospects as potential high-value ingredients for the functional food industry. *Foods*, *11*(12), 1744.
- Balasubramaniam, V., Gunasegavan, R. D. N., Mustar, S., Lee, J. C., & Noh, M. F. M.** (2021). Isolation of industrial important bioactive compounds from microalgae. *Molecules*, *26*(4), 1–45. <https://doi.org/10.3390/molecules26040943>
- Barkia, I., Saari, N., & Manning, S. R.** (2019). Microalgae for high-value products towards human health and nutrition. *Marine Drugs*, *17*(5), 1–29. <https://doi.org/10.3390/md17050304>
- Bhagea, R., Hossen, A. M., Ruhee, D., Puchooa, D., Bhoyroo, V., & Boodia, N.** (2022). Microalgae as sources of green bioactives for health-enhancing food supplements and nutraceuticals: A review of literature. *American Journal of Biopharmacy and Pharmaceutical Sciences*, *2*(10), 10. https://doi.org/10.25259/ajbps_6_2022
- Bratchkova, A., & Kroumov, A. D.** (2020). Microalgae as producers of biologically active compounds with antibacterial, antiviral, antifungal, antialgal, antiprotozoal, antiparasitic and anticancer activity. *Acta Microbiol Bulg*, *36*(3), 79-89.
- Brennan, L., & Owende, P.** (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(2), 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Bule, M. H., Ahmed, I., Maqbool, F., Bilal, M., & Iqbal, H. M. N.** (2018). Microalgae as a source of high-value bioactive compounds. *Frontiers in Bioscience - Scholar*, *10*(2), 197–216. <https://doi.org/10.2741/s509>
- Çakirsoy, I., Miyamoto, T., & Ohtake, N.** (2022). Physiology of microalgae and their application to sustainable agriculture: A mini-review. *Frontiers in Plant Science*, *13*(November), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1005991>
- Camacho, F., Macedo, A., & Malcata, F.** (2019). Potential industrial applications and commercialization of microalgae in the functional food and feed industries: A short review. *Marine Drugs*, *17*(6). <https://doi.org/10.3390/md17060312>
- Chen, L., Deng, H., Cui, H., Fang, J., Zuo, Z., Deng, J., Li, Y., Wang, X., & Zhao, L.** (2018). Oncotarget 7204 www.impactjournals.com/oncotarget Inflammatory responses and inflammation-associated diseases in organs. *Oncotarget*, *9*(6), 7204–7218. www.impactjournals.com/oncotarget/
- Complications, Landon, R., Gueguen, V., Petite, H., Letourneur, D., Pavon-Djavid, G., & Anagnostou, F.** (2020). Impact of astaxanthin on diabetes pathogenesis and chronic complications. *Marine drugs*, *18*(7), 357.

- Da Silva Vaz, B., Moreira, J. B., de Morais, M. G., & Costa, J. A. V.** (2016). Microalgae as a new source of bioactive compounds in food supplements. *Current Opinion in Food Science*, 7, 73-77.
- Davison, J. R., & Bewley, C. A.** (2021). Antimicrobial Chrysosphaentin Analogs Identified from Laboratory Cultures of the Marine Microalga *Chrysosphaeum taylorii*. *Journal of natural products* 82(1), 148–153. <https://doi.org/10.1021/acs.jnat-prod.8b00858>.Data
- De Freitas Coêlho, D., Tundisi, L. L., Cerqueira, K. S., da Silva Rodrigues, J. R., Mazzola, P. G., Tambourgi, E. B., & de Souza, R. R.** (2019). Microalgae: Cultivation aspects and bioactive compounds. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019180343>
- De Morais, M. G., Vaz, B. D. S., De Morais, E. G., & Costa, J. A. V.** (2015). Biologically Active Metabolites Synthesized by Microalgae. *BioMed Research International*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/835761>
- Dineshbabu, G., Goswami, G., Kumar, R., Sinha, A., & Das, D.** (2019). Microalgae–nutritious, sustainable aqua- and animal feed source. *Journal of Functional Foods*, 62(August 2019), 103545. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103545>
- Durmaz, Y.** (2007). Vitamin E (α -tocopherol) production by the marine microalgae *Nannochloropsis oculata* (Eustigmatophyceae) in nitrogen limitation. *Aquaculture*, 272(1–4), 717–722. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.07.213>
- El-baz, F. K., Abdo, S. M., & Hussien, A.** (2022). Microalgae *Dunaliella salina* for use as food supplement to improve pasta quality. *Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res*, 46(2), 45-51.
- Encarnação, T., Pais, A. A. C. C., Campos, M. G., & Burrows, H. D.** (2015). Cyanobacteria and microalgae: A renewable source of bioactive compounds and other chemicals. *Science Progress*, 98(2), 145–168. <https://doi.org/10.3184/003685015X14298590596266>
- Fabregas, J., & Herrero, C.** (1990). Vitamin content of four marine microalgae . Potential use as source of vitamins in nutrition. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 5(4), 259-263 5, 259–263.
- Falaise, C., François, C., Travers, M., Morga, B., Haure, J., Tremblay, R., Turcotte, F., Pasetto, P., Gastineau, R., Hardivillier, Y., Leignel, V., & Mouget, J.** (n.d.). Antimicrobial Compounds from Eukaryotic Microalgae against Human Pathogens and Diseases in Aquaculture. *Marine drugs*, 14(9), 159. <https://doi.org/10.3390/md14090159>.
- Fayyad, R. J., Ali, A. N. M., Dwaish, A. S., & Al-Abboodi, A. K. A.** (2019). Anticancer activity of spirulina platensis methanolic extracts against l20b and mcf7 human cancer cell lines. *Plant Archives*, 19, 1419–1426.
- Filali, R.** (2012). Estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique de CO₂. *Doctoral dissertation*, Supélec. <Http://Www.Theses.Fr>, 1–227. <http://www.theses.fr/2012SUPL0007%0Ahttps://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00765421>.
- Fu, W., Nelson, D. R., Yi, Z., Xu, M., Khraiwesh, B., Jijakli, K., Chaiboonchoe, A., Alzahmi, A., Al-Khairiy, D., Brynjolfsson, S., & Salehi-Ashtiani, K.** (2017). Bioactive Compounds From Microalgae: Current Development and Prospects. *Studies in Natural Products Chemistry*, 54, 199–225. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63929-5.00006-1>.
- Gacheva, G. V., & Gigova, L. G.** (2014). *Biological activity of microalgae can be enhanced by manipulating the cultivation temperature and irradiance*. 9(12). <https://doi.org/10.2478/s11535-014-0350-x>.
- Gilmour, D. J.** (2019). Microalgae for biofuel production. In *Advances in Applied Microbiology* (1st ed., Vol. 109). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2019.10.001>.

- Goiris, K., Muylaert, K., Fraeye, I., Foubert, I., De Brabanter, J., & De Cooman, L.** (2012). Antioxidant potential of microalgae in relation to their phenolic and carotenoid content. *Journal of applied phycology*, 24, 1477-1486. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9804-6>
- Hamed, I.** (2016). The Evolution and Versatility of Microalgal Biotechnology: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(6), 1104–1123. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12227>.
- Hembram, K. C., Kumar, R., Kandha, L., Parhi, P. K., Kundu, C. N., & Bindhani, B. K.** (2018). Therapeutic prospective of plant-induced silver nanoparticles: application as antimicrobial and anticancer agent. *Artificial Cells, Nanomedicine and Biotechnology*, 46(sup3), S38–S51. <https://doi.org/10.1080/21691401.2018.1489262>.
- Henríquez, V., Escobar, C., Galarza, J., & Gimpel, J.** (n.d.). Carotenoids in Microalgae. : (Vol. 79). *Springer* 219–237. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39126-7>.
- Hosikian, A., Lim, S., Halim, R., & Danquah, M. K.** (2010). Chlorophyll Extraction from Microalgae : A Review on the Process Engineering Aspects. 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/391632>.
- Imamoglu, E., & Deniz, I.** (2017). Trends in red biotechnology: Microalgae for pharmaceutical applications. In *Microalgae-based biofuels and bioproducts* (pp. 429-460). *Woodhead Publishing*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00018-2>.
- Jerney, J., & Spilling, K.** (2020). Large Scale Cultivation of Microalgae: Open and Closed Systems. *Methods in Molecular Biology*, 1980, 1–8. https://doi.org/10.1007/7651_2018_130.
- Karmee, S. K.** (2020). Biocatalytic synthesis of ascorbyl esters and their biotechnological applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 81, 1013-1022 June. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1781-y>.
- Kaur, M., Bhatia, S., Gupta, U., Decker, E., Tak, Y., Bali, M., Gupta, V. K., Dar, R. A., & Bala, S.** (2023). Microalgal bioactive metabolites as promising implements in nutraceuticals and pharmaceuticals: inspiring therapy for health benefits. In *Phytochemistry Reviews* (Vol. 7). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11101-022-09848-7>
- Khavari, F., Saidijam, M., Taheri, M., & Nouri, F.** (2021). Microalgae : therapeutic potentials and applications. *Molecular Biology Reports*, 48(5), 4757–4765. <https://doi.org/10.1007/s11033-021-06422-w>
- Klinthong, W., Yang, Y. H., Huang, C. H., & Tan, C. S.** (2015). A Review: Microalgae and their applications in CO2 capture and renewable energy. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(2), 712–742. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.11.0299>
- Krishna, A., Wayne, K., Rambabu, K., Tao, Y., Chu, D., & Show, P.** (2019). Food Science and Human Wellness Microalgae : A potential alternative to health supplementation for humans. *Food Science and Human Wellness*, 8(1), 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.03.001>
- Kusmayadi, A., Kit, Y., Yen, H., Huang, C., & Chang, J.** (2021). Chemosphere Microalgae as sustainable food and feed sources for animals and humans e Biotechnological and environmental aspects. *Chemosphere*, 271, 129800. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129800>
- Lauritano, C., & Ianora, A.** (2016). *Marine Organisms with Anti-Diabetes Properties*. <https://doi.org/10.3390/md14120220>
- Levasseur, W., Perré, P., & Pozzobon, V.** (2020a). A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification. *Biotechnology Advances*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107545>.
- Levasseur, W., Perré, P., & Pozzobon, V.** (2020b). A review of high value-added molecules

- production by microalgae in light of the classification. *Biotechnology Advances*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107545>.
- Li, Y., Horsman, M., Wu, N., Lan, C. Q., & Dubois-Calero, N.** (2008). Biofuels from microalgae. *Biotechnology Progress*, 24(4), 815–820. <https://doi.org/10.1021/bp.070371k>.
- Mahata, C., Das, P., Khan, S., Thaher, M. I. A., Quadir, M. A., Annamalai, S. N., & Jabri, H. Al.** (2022). The Potential of Marine Microalgae for the Production of Food , Feed , and Fuel (3F) *Fermentation*, 8(7), 316.
- Mahendran, M. S., Dhanapal, A. C. T. A., Wong, L. S., Kasivelu, G., & Djearamane, S.** (2021). Microalgae as a Potential Source of Bioactive Food Compounds. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 9(3), 917–927. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.9.3.18>.
- Marquez-rocha, F. J., Sandra, I., & Morales, S.** (2019). We are IntechOpen , the world ’ s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists. *September*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88531>.
- Mart, M., Alberto, C., Kim, D., Santiesteban-romero, B., Reyes-pardo, H., Villaseñor-zepeda, K. R., Ricardo, E., Ram, D., D, A. L., Eduardo, J., Coronado-apodaca, K. G., Mar, A., Iqbal, H. M. N., & Parra-saldivar, R.** (2022). Microalgae Bioactive Compounds to Topical Applications Products. *Molecules*, 27(11), 3512.
- Mishra, N., Gupta, E., Singh, P., & Prasad, R.** (2021).. Application of microalgae metabolites in food and pharmaceutical industry. In *Preparation of phytopharmaceuticals for the management of disorders* (pp. 391-408). Academic Press.
- Morocho-Jácome, A. L., Ruscinc, N., Martinez, R. M., de Carvalho, J. C. M., Santos de Almeida, T., Rosado, C., Costa, J. G., Velasco, M. V. R., & Baby, A. R.** (2020). (Bio)Technological aspects of microalgae pigments for cosmetics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(22), 9513–9522. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10936-x>
- Mutanda, T., Naidoo, D., Bwapwa, J. K., & Anandraj, A.** (2020). Biotechnological Applications of Microalgal Oleaginous Compounds: Current Trends on Microalgal Bioprocessing of Products. *Frontiers in Energy Research*, 8(December), 1–21. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.598803>
- SADRATI.N** (2021). Isolement, identification et culture des champignons endophytes isolés à partir des plantes médicinales algériennes pour la production des métabolites secondaires biologiquement actifs. These de Doctorat en Sciences. univesité farhat abbas sétif 1. 2015, 195.
- Nagappan, S., Das, P., Abdulquadir, M., Thaher, M., Khan, S., Mahata, C., Al-jabri, H., Kristin, A., & Kumar, G.** (2021). Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. *Journal of Biotechnology*, 341(September), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.003>
- Nair, D., Krishna, J. G., Panikkar, M. V. N., Nair, B. G., Pai, J. G., & Nair, S. S.** (2018). Identification, purification, biochemical and mass spectrometric characterization of novel phycobiliproteins from a marine red alga, *Centroceras clavulatum*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 114, 679–691. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.03.153>
- Najdenski, H. M., Gigova, L. G., Iliev, I. I., Pilarski, P. S., Lukavsk, J., Iva, V., Ninova, M. S., & Kussovski, V. K.** (2013). Original article Antibacterial and antifungal activities of selected microalgae and cyanobacteria. *nternational journal of food science & technology*, 48(7), 1533-1540 . <https://doi.org/10.1111/ijfs.12122>.
- Palozza, P., Torelli, C., Boninsegna, A., Simone, R., Catalano, A., Cristina, M., & Picci, N.** (2009). Growth-inhibitory effects of the astaxanthin-rich alga *Haematococcus pluvialis* in human colon cancer cells. *Cancer Letters*, 283(1), 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2009.03.031>
- Parmar, P., Kumar, R., Neha, Y., & Srivatsan, V.** (2023). Microalgae as next generation plant growth additives: Functions, applications, challenges and circular bioeconomy based solutions. *Frontiers*

- in Plant Science*, 14(March), 1–37. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1073546>
- Pufa, M. N.-.** (2022). *Health Benefits, Food Applications, and Sustainability of Microalgae-Derived N-3 PUFA*. 1–32 *Foods*, 11(13), 1883.
- Qi, X., Yu, B., Huang, X., & Guo, Y.** (2007). The cytotoxicity of lingshuiol : A comparative study with amphidinol 2 on membrane permeabilizing activities. *Toxicon*, 50(2), 278-282.. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2007.04.001>.
- Saha, S. K., Mchugh, E., Murray, P., & Walsh, D. J.** (2015). C H A P T E R 12 Microalgae as a source of nutraceuticals. *Phycotoxins: chemistry and biochemistry*, 255-291.
- Saide, A., Martínez, K. A., Ianora, A., & Lauritano, C.** (2021). Unlocking the health potential of microalgae as sustainable sources of bioactive compounds. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9). <https://doi.org/10.3390/ijms22094383>
- Song, X., Bo, Y., Feng, Y., Tan, Y., Zhou, C., Yan, X., Ruan, R., Xu, Q., & Cheng, P.** (2022). Potential applications for multifunctional microalgae in soil improvement. *Frontiers in Environmental Science*, 10(October), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1035332>
- Srimongkol, P., Sangtanoo, P., Songserm, P., Watsuntorn, W., & Karnchanatat, A.** (2022). Microalgae-based wastewater treatment for developing economic and environmental sustainability: Current status and future prospects. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10(September), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.904046>
- Tabarzad, M., Atabaki, V., & Hosseinabadi, T.** (2020). Anti-inflammatory Activity of Bioactive Compounds from Microalgae and Cyanobacteria by Focusing on the Mechanisms of Action. *Molecular Biology Reports*, 47(8), 6193–6205. <https://doi.org/10.1007/s11033-020-05562-9>.
- Valcareggi, A., Andrade, S., & Crescente, C. L.** (2021). Extraction of Chlorophylls and Carotenoids from Microalgae : *COSMO-SAC-Assisted Solvent Screening*. 7, 1–7. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100008>.
- Varela, M. L., Mogildea, M., Moreno, I., & Lopes, A.** (2018). Acute Inflammation and Metabolism. *Inflammation*, 41(4), 1115–1127. <https://doi.org/10.1007/s10753-018-0739-1>.
- Ventura, S. P. M., Nobre, B. P., Ertekin, F., Hayes, M., García-Vaquero, M., Vieira, F., Koc, M., Gouveia, L., Aires-Barros, M. R., & Palavra, A. M. F.** (2017). Extraction of value-added compounds from microalgae. *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products*, 461–483. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00019-4>.
- Vieira, M. V., Pastrana, L. M., & Fuciños, P.** (2020). Microalgae Encapsulation Systems for Food, Pharmaceutical and Cosmetics Applications. *Marine Drugs*, 18(12). <https://doi.org/10.3390/md18120644>.
- Wu, J., Gu, X., Yang, D., Xu, S., Wang, S., Chen, X., & Wang, Z.** (2021). Bioactive substances and potentiality of marine microalgae. *Food Science and Nutrition*, 9(9), 5279–5292. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2471>.
- Yaakob, Z., Ali, E., Zainal, A., Mohamad, M., & Takriff, M. S.** (2015). *An overview : biomolecules from microalgae for animal feed and aquaculture*. 1–10.
- Zhao, C., Wu, Y., Yang, C., Liu, B., & Huang, Y.** (2015). *Review Hypotensive , hypoglycaemic and hypolipidaemic effects of bioactive compounds from microalgae and marine*. 1705–1717. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12860>.
- Mostafa .S.M..S** (2012).microalmgal biotechnology prospects and application *plant science*.

المخلص

مع التحديات المتزايدة في الحياة اليومية، بدأ البشر في البحث عن مصادر متجددة لتلبية احتياجاتهم. توجه الإنسان نحو استغلال الطحالب الدقيقة، وذلك بسبب قدرتها على القيام بالتمثيل الضوئي وتحويل أشعة الشمس وثاني أكسيد الكربون إلى مستقلبات ثانوية مثل الدهون، البروتينات، الكربوهيدرات، الاصباغ، الفيتامينات والمعادن. تستخدم هذه المركبات في مجال البيولوجيا كمضادات للأكسدة، مضاد الالتهاب، مضاد السرطان، مضاد السكري، مضاد ارتفاع ضغط الدم ومضادات للمكروبات. وبالنظر إلى قيمتها الغذائية، تُعتبر الطحالب مصدرًا جيدًا للغذاء وعلف. بالإضافة إلى ذلك، تُستخدم الطحالب أيضًا في الزراعة وتنقية المياه وإنتاج الطاقة. كما تتوفر طرق متعددة لزراعة وحصاد واستخراج هذه المركبات من الطحالب.

كلمات مفتاحية: الطحالب الدقيقة، الدهون، البروتين، مضادات الأكسدة، مضادات الالتهاب، مضادات الجراثيم

Résumé

Avec les défis croissants de la vie quotidienne, les êtres humains ont commencé à rechercher des sources renouvelables pour répondre à leurs besoins. Les êtres humains se sont tournés vers l'exploitation des microalgues en raison de leur capacité à effectuer la photosynthèse et à convertir la lumière du soleil et CO₂ en métabolites secondaires tels que les graisses, les protéines, les carbohydrates, les pigments, les vitamines et les minéraux. Ces composés sont utilisés en activité biologique comme des antioxydants, des anti-inflammatoires, des antimicrobiens, antidiabétique et des antihypertenseurs. En raison de leur valeur nutritive, les algues sont considérées comme une bonne source de nourriture et de fourrage. De plus, les algues sont également utilisées dans l'agriculture, la purification de l'eau et la production d'énergie. Il existe plusieurs méthodes de culture, de récolte et d'extraction de ces composés à partir des microalgues.

Mots clés : Microalgues, Lipides, Protéines, Antioxydants, Anti-inflammatoires, Antimicrobiens.

Abstract

With the increasing challenges in daily life, humans have begun to search for renewable sources to meet their needs. Humans have turned to the exploitation of microalgae due to their ability to perform photosynthesis and convert sunlight and CO₂ into secondary metabolites such as fats, proteins, carbohydrates, pigments, vitamins, and minerals. These compounds are used in biological activities as antioxidants, anti-inflammatory agents, antimicrobials, antidiabetic and antihypertensive. Due to their nutritional value, algae are considered a good source of food and fodder. Additionally, algae are also used in agriculture, water purification, and energy production. There are multiple methods available for culturing, harvesting, and extracting these compounds from microalgae.

Keywords : Microalgae, Lipids, Proteins, Vitamins, Antioxydants, Anti-inflammatory, Antimicrobial.