

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 08 ماي 1945 -قالة-



Mémoire en vue de l'OB'

DIPLOME DE MASTER

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Alimentaires

Spécialité/Option : Production et Transformation Laitier

Département : Ecologie et Génie de L'Environnement

Thème(Recherche bibliographique)

Extraction des composés bioactifs des algues et leur application à la fabrication des produits laitiers fonctionnels

Présenté Par :

– KHATTABI Assala

Devent le jury composé de :

Président : Dr. Ksouri Samir	MCA	Université 08 Mai 1945 -Guelma-
Examinatrice : Dr. Djemaa Fatma	MCB	Université 08 Mai 1945 -Guelma-
Encadrant : Dr. Mezroua El yamine	MCB	Université 08 Mai 1945 -Guelma-

Juin 2025

REMERCIEMENT

Avant tout, je rends grâce à **Allah**, le Tout-Puissant, le Miséricordieux, qui m'a accordé la force, la patience et la santé tout au long de mes années d'études, ainsi que le courage nécessaire pour mener à bien ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements à **Dr. KSOURI S** et **Dr. DJEMAA F.** pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour le temps et l'attention qu'ils lui ont consacrés.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, **Dr MEZROUA EL yamine**, pour ses orientations précieuses, ses encouragements, son aide, son soutien et sa patience tout au long de ce projet. Son accompagnement a été d'un grand appui dans la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je remercie du fond du cœur ma famille, pour son soutien inconditionnel, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

DÉDICACE

À ma chère mère « **Aoudimounira** », Ma raison d'être, mon soutien, mon guide et mon inspiration. Ton amour inconditionnel a été la lumière qui a éclairé mon chemin, et tes prières le secret de ma réussite. Tes sacrifices et ta persévérance sont l'exemple que je m'efforce de suivre. Je te dédie ce mémoire, fruit de mes efforts, en témoignage de mon amour et de ma reconnaissance pour ton rôle inestimable dans ma vie.

À mon cher époux, « **Benyoubadem** » Compagnon de route, partenaire de vie et pilier de cette aventure, Tu as été mon appui à chaque instant, un véritable père pour moi, me protégeant, me guidant et me motivant. Grâce à ton amour et à ton soutien, j'ai pu surmonter toutes les difficultés. Ta présence à mes côtés m'a donné la force et la détermination. Je te remercie du fond du cœur pour chaque mot d'encouragement, chaque moment de patience et d'attention. Cette réussite est aussi le fruit de ton amour et de ton propre succès.

À mes chers frères « **Asma, Zineb et May** » merci pour votre soutien constant et vos encouragements sincères. Votre présence a eu un grand impact, et je vous en suis profondément reconnaissante. .

À mes nièces chéries, Fleurs et joie de la famille « **Rined, Bissen, Soundous, Taym et Racha** »

À mon amie chère, « **Rayane** », Ma sœur de cœur, celle que la vie m'a offerte, présente à mes côtés dans tous les instants. Merci pour ton amitié sincère qui a été d'un grand réconfort tout au long de ce parcours

À mes amies « **Maha, Amina** », Mon amie, au cœur pur.

Liste des abréviations

% :Pourcentage.

ALA :Acide alpha-linolénique.

BC :Composés bioactifs.

Cu :Cuivre.

DHA:Docosahexaenoic Acid.

EPA:Eicosapentaenoic Acid.

FAO:Food and Agriculture Organization.

FDA:Food and Drug Administration.

Fe:Fer.

HPSA :Extraction par solvant haute pression.

I :Iode.

k :Indice de consistance.

K : Potassium.

MAE : Extraction assisté par micro-onde.

MAP:Polysaccharide d'algue.

n:Indice d'écoulement.

Pc : Pression critique.

PLE : Extraction par liquide pressurisé.

PUFA : PolyunsaturatedFattyAcids.

SCWE : Extraction par eau sous-critique.

Se : Sélénium.

SLE : Extraction par solide-liquide.

UAE : Extraction assisté par ultrason.

UV : Ultraviolets.

Zn: Zinc.

Listes de tableaux

N°	Titre	Page
1	Comparaison de la composition nutritionnelle chez les algues vertes, rouges et brunes. (alghazeer et al., 2022)	6
2	Comparaison entre les techniques conventionnelles et modernes. (Pérez-	13 ; 14

	vaque et al., 2023)	
3	Principaux impacts des aliments fonctionnels infusés aux algues.(Siddhanth et al., 2024)	22...25

Liste des figures

N°	Titre	Page
1	Les algues vertes (phodophyta).	5
2	Les algues rouges.	5
3	Les algues brunes.	6
4	Différentes méthodes d'extraction conventionnelles et alternatives pour isoler les bio-composés des algues.	7
5	Composés bioactifs des algues.	16
6	Propriétés bioactives des algues.	16
7	Résumer graphique.	33

Tables des matières

Remerciement

Dédicace

Liste d'abréviation

Liste des tableaux

Listes des figures

Introduction.....1

Chapitre I : Technique d'extraction des composés bioactifs des algues.

1. Généralité.....	3
2. Les algues.....	3
2. 1. Définition des algues.....	3
2. 2. Classification des algues.....	4
2. 2. 1. Les algues vertes.....	4
2. 2. 2. Les algues rouges.....	4
2. 2. 3. Les algues brunes.....	5
2. 3. Valeur nutritionnelle des algues.....	5
3. Techniques d'extraction des composés bioactifs des algues.....	6
3. 1. Techniques conventionnelles.....	7
3. 1. 1. Extraction solide liquide.....	7
3. 1. 2. Extraction par la macération.....	7
3. 1. 3. Extraction par solvant organique.....	8
3. 1. 4. Extraction soxhlet.....	8
3. 2. Techniques modernes.....	8
3. 2. 1. Extraction assistée par ultrasons (UAE).....	8
3. 2. 2. L'extraction par eau sous-critique (SCWE).....	9
3. 2. 3. Extraction par fluide supercritique (SFE).....	9

3. 2. 4. Extraction assisté par micro-ondes (MAE).....	10
3. 2. 5. Extraction par liquide pressurisé.....	10
4. comparaison entre les techniques conventionnelles et modernes.....	11

Chapitres II : Composés bioactifs des algues

1. Généralité.....	13
2. Définition.....	13
3. Les compose bioactifs.....	14
3. 1. Les phénols.....	14
3. 2. Les protéines.....	15
3. 3. Polysaccharides.....	15
3. 4. Les acides gras.....	17
3. 5. Les pigments.....	18
3. 6. Les stérol.....	19
3. 7. Les minéraux	19
3. 8. Les vitamines.....	19
4. Les applications industrielles des algues marines	20
4. 1. Industrie pharmaceutique.....	20
4. 2. Industrie nutraceutique.....	20
4. 3. Industrie alimentaire.....	21
4. 4. Alimentation animale.....	25
4. 5. Engrais agricole et amendements du sol.....	26
4. 6. Produits chimique.....	26

5. Contraintes économique liées à la production à grande échelle des composés bioactifs des algues.....	26
---	----

Chapitre III : Produits laitiers fonctionnelles

1. Définition.....	27
2. Les intérêts nutritionnels et sanitaires des produits laitiers.....	27
3. Intégration des composés bioactifs des algues dans les produits laitiers.....	28
4. Les effets des composés bioactifs des algues sur les produits laitiers.....	28
4. 1. Yaourt.....	28
4. 2. Fromage.....	29
4. 3. Les glaces.....	29
5. les limites d'utilisation des algues dans les produits laitiers.....	29
Conclusion.....	31
Références Bibliographique.....	32
Résumé.....	36

Introduction

Introduction

Introduction

Les aliments fonctionnels, une catégorie en plein essor dans le secteur de la santé et du bien-être, sont définis comme des aliments qui apportent des bienfaits supplémentaires pour la santé, au-delà de la nutrition de base. Ces bienfaits sont attribués à la présence de composés bioactifs qui favorisent la santé et réduisent le risque de maladies chroniques. Face à l'augmentation de la prévalence mondiale de maladies telles que les maladies cardiovasculaires, le diabète et l'obésité, le rôle des aliments fonctionnels dans la prévention des maladies a suscité une attention particulière de la part des chercheurs, des professionnels de santé et des consommateurs. Les aliments fonctionnels comprennent une gamme variée de produits, tels que des produits enrichis, des aliments naturels aux propriétés bénéfiques pour la santé et des aliments génétiquement modifiés conçus pour offrir des bienfaits spécifiques (Worqlul, 2024).

Les algues, sont les plus anciennes espèces du règne végétal, avec une histoire remontant à plusieurs centaines de millions d'années. Grâce à leurs pigments photosynthétiques, les macroalgues marines peuvent être classées en trois groupes : les algues vertes, communément appelées Chlorophytes, les algues brunes, ou Phéophytes, et les algues rouges, également appelées Rhodophytes. En réponse à différents types de stress environnementaux, les algues marines développent des stratégies de défense qui se traduisent par une importante diversité chimique structurale, issue de différentes voies métaboliques. Elles contiennent des minéraux, des acides aminés, des protéines, des acides gras, des lipides, des polysaccharides, des fibres alimentaires, des vitamines et divers métabolites secondaires, tels que des phénols, des alcaloïdes, des terpènes et des pigments. Nombre de ces constituants présentent une grande valeur économique et peuvent être extraits pour obtenir des produits antioxydants, anti-inflammatoires, anticancéreux, antimicrobiens, antifongiques, antiviraux, anti-obésité, antidiabétiques et antihypertenseurs. C'est pourquoi une nouvelle tendance a émergé : isoler et identifier des composés et constituants bioactifs issus d'algues marines (Ghaliaoui, Hazzit, & Mokrane, 2024).

Ainsi, l'extraction de ces composés bioactifs à haute valeur ajoutée représente un enjeu stratégique majeur dans les domaines de la santé, de l'alimentation fonctionnelle, de la cosmétique et de la pharmacie. Ces composés, tels que les phénols, les stérols, les polysaccharides ou encore les caroténoïdes, font aujourd'hui l'objet d'un intérêt croissant

Introduction

en raison de leurs propriétés biologiques remarquables. Toutefois, leur concentration, leur stabilité et leur efficacité dépendent fortement des méthodes d'extraction employées. De manière générale, les techniques d'extraction peuvent être divisées en deux grandes catégories : **techniques conventionnelles** sont simples à mettre en œuvre mais présentent souvent une efficacité limitée. **Techniques modernes** qui offrent un meilleur rendement, consomment moins de solvant. L'adoption de procédés d'extraction adaptés, souvent qualifiés de « verts » ou durables, est donc essentielle afin de préserver l'intégrité des molécules extraites tout en répondant aux exigences de qualité, de rendement et de respect de l'environnement. De nombreux paramètres influencent la réussite de ces procédés, notamment la nature de la matrice algale, le choix du solvant, le pH, la température ou encore la durée du traitement (Sosa-Hernandez, Escobedo-Avellaneda, Iqbal, & Chanes, 2024).

L'intérêt de ces applications est illustré par plusieurs exemples concrets d'intégration des composés bioactifs algaux dans les produits laitiers. Les composants bioactifs des algues sont utilisés dans la production de divers produits laitiers pour améliorer leurs indicateurs de qualité. En particulier, les composés phénoliques présentent des propriétés antioxydantes et peuvent donc augmenter l'activité antioxydante du fromage lorsqu'ils sont ajoutés au caillot de lait. L'introduction d'algues déshydratées peut également améliorer la rétention du lactosérum dans le caillot de lait et a un effet positif sur la couleur et la texture du fromage. Les oligosaccharides d'alginate ont un effet antifongique potentiel contre certaines levures responsables de l'altération du lait. Dans les ferments lactiques de yaourt, les oligosaccharides d'alginate extraits de *Laminaria hyperborea* ont diminué la croissance des micro-organismes *Candida parapsilosis*, *Debaryomyces hansenii* et *Meyerozyma guilliermondii*. Ainsi, ces oligomères peuvent assurer un stockage sûr des produits laitiers et des produits contenant du lait dont la durée de conservation est réduite par les levures. L'utilisation de mousse alimentaire bioactive contenant de l'alginate de sodium peut remplacer les matières grasses et le sucre dans les crèmes glacées. Ces produits fonctionnels peuvent bénéficier aux consommateurs en surpoids, obèses ou souffrant d'autres complications liées au poids (Alloyarova, Kolotova, & Derkach, 2024).

Mon travail se base sur une recherche bibliographique portant base sur les différentes techniques d'extraction des composés bioactifs et leur application à la fabrication des produits laitiers fonctionnelles.

Chapitre I

Technique d'extraction des composés bioactifs des algues

1. Généralité

Les algues sont une source alimentaire essentielle dans plusieurs pays, comme l'Amérique, le Vietnam, la Chine et la Corée du Sud. Il existe plus de 30 000 espèces d'algues, dont 50 types sont propres à la consommation humaine. Les algues sont classées en fonction de leur taille (macroalgues et microalgues) ou de leurs couleurs, comme les algues vertes, brunes et rouges]. Plusieurs algues ayant une capacité de photosynthèse, comme *Dunaliella salina*, *Spirulina plantensis* et *Chlorella vulgaris*, peuvent être considérées comme des algues comestibles. Actuellement, les algues comestibles sont une source de composés bioactifs (BC) en Europe et en Amérique car elles sont une riche source de nutriments, de pigments et d'antioxydant.

L'extraction est le processus de récupération des BC à partir d'algues, suivi de la purification des extraits bruts. Les techniques d'extraction traditionnelles pour récupérer les BC sont la macération, l'hydrodistillation, le pressage mécanique et la distillation à la vapeur. Cependant, ces approches présentent plusieurs limites, telles qu'un faible rendement d'extraction, un temps d'extraction important et une grande quantité de solvant requise. De nouvelles techniques d'extraction, telles que l'extraction par micro-ondes, enzymatique, ultrasonique et par fluide supercritique, peuvent remédier aux limites mentionnées ci-dessus. Les améliorations apportées aux techniques d'extraction sont moins intensives en produits chimiques, très efficaces, peu coûteuses et durables. Les extraits obtenus par ces techniques peuvent être utilisés dans les produits alimentaires comme additifs alimentaires et conservateurs. Les extraits enrichis en composants bioactifs d'algues brunes sont ajoutés comme ingrédient fonctionnel dans les jus, la viande, les produits laitiers, la boulangerie et les pâtes (vo et al., 2024).

2. Les algues

2. 1. Définition des algues

Les algues sont des plantes primaires qui ne portent ni fleurs, ni racines, ni tiges, ni feuilles. On les trouve au fond de la mer jusqu'à 180 m de profondeur, principalement dans des substrats solides jusqu'à une profondeur de 30 à 40 m. Elles poussent dans les estuaires et se fixent aux rochers, coquillages, pierres et autres matières végétales.

La production d'algues se fait à partir de deux sources : la nature sauvage (système marin naturel) et l'aquaculture (système contrôlé). En considérant toutes les algues, le type

sauvage représente environ 4,5 % de la production tandis que la production d'algues cultivées a augmenté d'environ 50 % au cours de la dernière décennie. Selon les statistiques de la FAO, au cours des 10 dernières années (2003 à 2012), la production d'algues à partir de stocks sauvages est restée stable et en 2012, les principaux producteurs étaient le Chili (436 035 tonnes) suivi de la Chine (257 640 tonnes) et du Japon (98 514 tonnes). La production annuelle indienne était de 1 tonne au cours des dix dernières années. Il a également été souligné dans le rapport de la FAO que la production d'algues issues de l'aquaculture (24,9 millions de tonnes) était supérieure à celle de la nature (1 million de tonnes), les principaux producteurs et cultivateurs étant la Chine et le Japon (Y. kumar, tarafdar, & Badgujar, 2021).

2. 2. Classification des algues

2. 2. 1. Algue vertes(chlorophyta)

Ilya environ 4000 espèces d'algues vertes, qui doivent leur couleur aux pigments chlorophylliens. Les algues vertes habitent les environnements marins et d'eau douce ainsi que les sols humides, se trouve couramment dans les eaux marines côtières et les bassins de marée (France et al., 2024).



Figure 01 : Les algues vertes.

2. 2. 2. Algues rouges(phodophyta)

Environ 7000 espèces d'algues rouges, qui se distinguent par leur coloration vive due au pigment phycoérythrine. Les pigments rouges multicellulaires et ont une teinte rougeâtre, prospèrent à des profondeurs plus importantes, car elles absorbent efficacement la lumière bleue (Cadar, Popescu, Dragan, & Prasacu, 2025). Elles sont de petite taille, allant de quelques centimètres à environ un mètre de long (France et al., 2024).

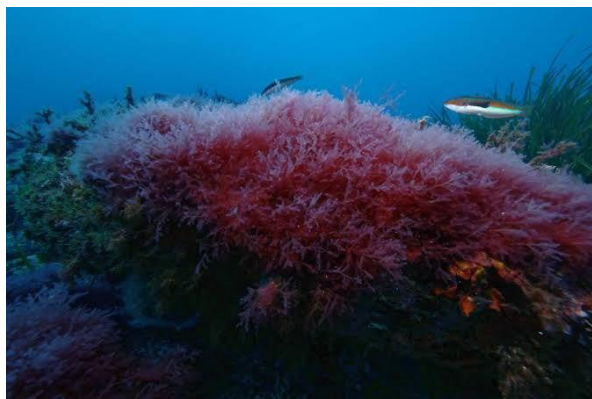


Figure 02 : Les algues rouges.

2. 2. 3. Les algues brunes (Phaeophyceae)

La couleur des algues brunes est due à la présence du pigment xanthophyle, la fucoxanthine. Elles sont grandes et mesurent environ 2 à 65 m de long, sont épaisses et ressemblent à du cuir (Y. kumar et al., 2021). Les algues brunes sont abondantes sur les rivages rocheux des régions tempérées (cadar et al., 2025). Les algues brunes (Phaeophyceae) jouent un rôle clé dans la structuration des écosystèmes marins et la production de biomasse, tout en étant utilisées dans des applications industrielles variées, telles que l'alimentation et l'agriculture durable (france et al., 2024).



Figure 03 : Les algues brunes

2. 3. Valeur nutritionnelle des algues

Les macroalgues constituent une source précieuse de métabolites primaires et secondaires hautement bioactifs, susceptibles d'avoir des applications biologiques intéressantes. La teneur en cendres variait de 3,15 à 25,23 % pour les algues vertes, de (5 à 29,78 %) pour les algues brunes et de (7 à 31,15 %) pour les algues rouges. La teneur en protéines brutes variait entre (5 et 9,8 %) chez les Chlorophyta, (5 et 7,4 %) chez les

Chapitre I Technique d'extraction des composés bioactifs des algues

Rhodophyta et entre (4,6 et 6,2 %) chez les Phaeophyceae. Les teneurs en glucides bruts, les algues vertes ayant la teneur la plus élevée (22,5-42 %), suivies des algues brunes (21-29,5 %) et des algues rouges (20-29 %). La teneur en lipides s'est avérée faible chez tous les taxons étudiés, d'environ 1 à 6 %, à l'exception de Caulerppaprolifera (Chlorophyta), qui avait une teneur en lipides sensiblement plus élevée, soit 12,41 % (alghazeer et al., 2022).

Tableau 01 : comparaison de la composition nutritionnelle chez les algues vertes, rouges et brunes. (alghazeer et al., 2022)

Composants	Algues vertes (chlorophyta)	Algues rouges (rhodophyta)	Algues brunes (Phaeophyceae)
Cendre	3,15-25,23%	7-31,15%	5-29,78%
Protéines	5-9,8%	5-7,4%	4,6-6,2%
Glucides	22,5-42 %	20-29%	21-29,5%
Lipides	12,41%(caulerppaprolifera)	1-6%	1-6%

Il a été démontré que les algues présentent une teneur élevée en glucides et en protéines, ce qui suggère qu'elles peuvent constituer une source alimentaire saine et prometteuse (alghazeer et al., 2022).

3. Les techniques d'extraction des composés bioactifs des algues

Pour l'extraction des composés bioactifs à partir des algues on utilise différentes techniques. Les méthodologies d'extraction peuvent être classées en deux groupes : les techniques d'extraction traditionnelles et les nouvelles techniques d'extraction (Pérez-vaque et al., 2023).

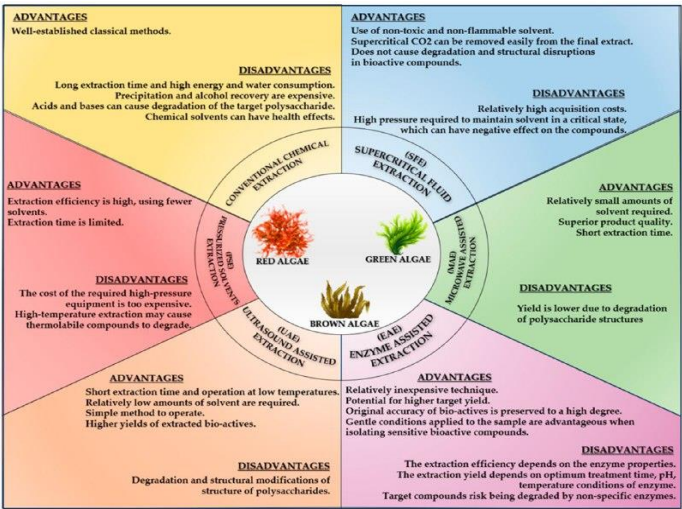


Figure 04 : Différents méthodes d'extraction conventionnelles et alternatives utilisées pour isoler les bio-composés des algues.

3. 1. Les techniques conventionnelles

Les techniques conventionnelles d'extraction reposent toujours sur une simple procédure solide-solvant, incluant la macération, l'extraction assistée par la chaleur, la percolation, l'extraction solide-liquide et l'extraction soxhlet. Elles font souvent appel à des solvants organiques et nécessitent un volume important de solvant ainsi que de longues périodes d'extraction, la méthode la plus courante étant l'extraction par solvant (Zekry et al., 2022).

Les techniques conventionnelles d'extraction dépendent de solvants et d'hydrodistillation est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour extraire les composés bioactifs des micro-algues. Cette méthode implique l'utilisation de solvants organiques, tels que l'éthanol, le méthanol et l'acétone, pour dissoudre et extraire les composés souhaités. Le choix du solvant est crucial car il affecte la sélectivité, l'efficacité et la sécurité du processus d'extraction (Siddhanth et al., 2024).

3. 1. 1. L'extraction solide-liquide

La technique d'extraction solide-liquide est l'une des méthodes traditionnelles les plus anciennes et les plus simples utilisées pour l'extraction de composés bioactifs à partir des algues. L'extraction électrolytique sélective (SLE) est une technique utilisée depuis longtemps pour extraire des composés de différentes sources naturelles. Elle se caractérise par l'utilisation de solvants organiques. Elle consiste à extraire les constituants solubles souhaités d'une matrice solide ou semi-solide à l'aide d'une phase liquide adaptée. Le procédé consiste à mélanger le solvant avec la matière naturelle pendant une durée déterminée, suffisante pour assurer la migration du soluté de la matrice solide vers le solvant. Avant ce procédé, il est recommandé de sécher les matériaux contenant de l'eau afin d'augmenter la récupération des composés organiques non polaires et de réduire les échantillons en poudre pour augmenter leur surface.

L'efficacité de cette méthode d'extraction traditionnelle est influencée par de nombreux facteurs corrélés tels que la polarité/solubilité des composés d'intérêt et du solvant, les caractéristiques du solvant, le rapport solvant: solide et la taille et les caractéristiques de l'échantillon, entre autres facteurs pratiques comme le temps, la température, le pH et la pression (Eva, Clara, Ricardo, Cristina, & Cristina, 2022).

3. 1. 2. Extraction par la macération

La macération est une technique traditionnelle d'extraction facile des composés bioactifs des algues qui consiste à immerger les algues dans un solvant approprié pendant une période prolongée. Cette méthode est utilisée pour l'extraction de composant thermolabile,

mais il présente l'inconvénient d'être long et d'avoir une faible d'extraction (ahmed, M, zekry, mohammed, & ramadan, 2024).

Cette méthode d'extraction de solide caractérisée par son faible cout et la simplicité de son équipement(Pérez-vaque et al., 2023).

3. 1. 3. Extraction par solvant organique

L'extraction à l'aide de solvants organiques est l'une des approches les plus courantes pour isoler les composés bioactifs à partir des algues. Le succès de cette méthode dépend fortement du choix du solvant (comme l'éthanol, souvent utilisé), ainsi que des paramètres d'extraction comme la température, le temps d'exposition et le prétraitement de l'échantillon. Ces facteurs influencent directement l'efficacité de l'extraction et la pureté des substances obtenues(ahmed et al., 2024).

3. 1. 4. Extraction Soxhlet

La méthode d'extraction à l'aide de l'appareil Soxhlet est l'une des techniques traditionnelles les plus couramment utilisées pour l'extraction des lipides totaux à partir des algues. Cette méthode repose sur l'utilisation d'une matière sèche, à faible granulométrie, combinée à un chauffage continu permettant le reflux répété du solvant organique, assurant ainsi une extraction efficace des composés ciblés. Bien que cette méthode soit performante, elle demeure fortement énergivore en raison du chauffage constant et de la recirculation du solvant. De plus, elle peut s'avérer inadaptée pour les composés thermosensibles, en raison des températures élevées impliquées dans le processus(samraj, barik, ponnusamy, & ganesan, 2021).

3. 2. Les techniques modernes

3. 2. 1. Extraction assistée par ultrasons (UAE)

L'extraction assistée par ultrasons (Ultrasound-Assisted Extraction – UAE) est une technique d'extraction moderne. Étant l'une des méthodes les plus simples et les plus économiques pour obtenir des composés bioactifs à partir d'algues, l'extraction assistée par ultrasons (UAE) revêt une importance considérable dans divers secteurs. Associée à une caractérisation phytochimique approfondie par des techniques analytiques avancées, l'UAE peut ouvrir la voie à la recherche sur les algues. L'association de l'UAE à d'autres techniques d'extraction durables peut certainement ouvrir la voie à la création de bioraffineries d'algues performantes(L. r. kumar et al., 2024).

Chapitre I Technique d'extraction des composés bioactifs des algues

La méthode d'extraction assistée par ultrasons a été largement utilisée ces dernières années afin d'extraire divers BC d'un large spectre d'algues, en particulier des polysaccharides comme l'alginate et les carraghénanes ; des pigments comme la fucoxanthine, les chlorophylles ou le β -carotène ; et des composés phénoliques, entre autres. Donc la technique de l'extraction assistée par ultrasons est une méthode productive et respectueuse de l'environnement pour explorer davantage leur caractérisation approfondie en tant que nouvelle source de BC, particulièrement adaptée aux régimes végétaliens et végétariens(sekar, jeyachandran, giri, & aman, 2025).

3. 2. 2. L'extraction par eau sous-critique (SCWE)

L'extraction par eau sous-critique est une technique moderne utilisé pour l'extraction des composés bioactifs en utilisant l'eau à l'état liquide sous des conditions de température et de pression élevées. L'eau sous-critique (ESC) est définie comme de l'eau à des pressions et températures permettant de la maintenir en phase liquide, même au-dessus de son point d'ébullition normal. Cela se traduit par des pressions comprises entre 10 et 221 bars et des températures comprises entre 100 et 374 °C.

L'extraction à l'eau sous-critique (ESC) utilise l'ESC comme solvant vert, également appelée extraction à l'eau chaude sous pression (EHP) ou extraction à l'eau surchauffée. L'ESC offre toutes deux des taux d'extraction plus rapides, une consommation de solvant réduite et des rendements supérieurs. Cette technique est plus facilement adaptable à une utilisation industrielle grâce à sa capacité à fonctionner à des pressions plus basses (pression de vapeur d'eau)(zhangYu, hawboldtKelly, & Stephanie, 2024).

3. 2. 3. Extraction par fluide supercritique (SFE)

L'extraction par immersion à chaud (SFE) fait partie des nouvelles techniques d'extraction, plus respectueuses de l'environnement, permettant de produire des substances indigènes utiles dans divers secteurs à partir de sources durables telles que les herbes, les épices, les plantes aromatiques et médicinales. Cette technologie avancée consiste à isoler/extraire des composés bioactifs ciblés par fluides supercritiques(uwinea & waskiewicz, 2020).

Un fluide supercritique est une substance maintenue à une température supérieure à son point critique (T_c) et à sa pression critique (P_c). Lorsqu'une substance est maintenue dans

Chapitre I Technique d'extraction des composés bioactifs des algues

de telles conditions, ses propriétés physiques et thermodynamiques diffèrent. Les propriétés physiques telles que la viscosité, la diffusibilité, le constant diélectrique, la densité et la tension superficielle changent toutes considérablement par rapport à la substance dans sa condition atmosphérique standard (getachew, jacobson, & holdt, 2020).

3. 2. 4. Extraction assisté par micro-ondes (MAE)

D'extraction par micro-ondes est utilisée technique moderne utilisée pour l'extraction de composés bioactifs à partir d'algues marines peut être appliquée aux composés polysaccharidiques, aux composés phénoliques, aux polyphénols, à la chlorophylle, ainsi qu'aux caroténoïdes.

Cette méthode repose sur l'utilisation du potentiel des micro-ondes, qui provoque des modifications de la structure cellulaire en raison des ondes électromagnétiques. Cette énergie électromagnétique est convertie en énergie thermique par conduction ionique et rotation dipolaire. Le chauffage interne rapide entraîne une rupture efficace des cellules, ce qui libère les composés cibles dans le solvant.

La méthode d'extraction assistée par micro-ondes est plus rapide que l'extraction conventionnelle pour produire des composés bioactifs. Les paramètres fondamentaux à prendre en compte pour optimiser cette méthode sont : la puissance et la fréquence des micro-ondes, le rapport échantillon/solvant, la température, la pression et le temps. De plus, les variables les plus importantes influençant cette méthode sont la nature et la concentration du solvant, suivies par la durée et la puissance de l'irradiation (muhammad, mohammad, ketut, & Rahmatang, 2023).

3. 2. 5. Extraction par liquide pressurisé

Le PLE est une technique d'extraction verte qui consiste à extraire des composés bioactifs des algues à haute température et pression généralement entre 20° et 50°C et 3,5 à 20MPs. Cette méthode permet l'utilisation de plusieurs solvants, y compris des solvants d'extraction verts tels que l'eau et un mélange d'eau avec des liquides ioniques ou des solvants eutectiques. Dans le cas en utilisant l'eau comme solvant, cette technique est également connue sous le nom d'extraction par solvant haute pression (HPSA). Le PLE permet d'obtenir des rendements plus élevés (Pérez-vaque et al., 2023).

Chapitre I Technique d'extraction des composés bioactifs des algues

Cette méthode à déjà prouvé sa grande capacité d'extraction pour une variété des composés bioactifs à partir de différentes espèces d'algues(sekar et al., 2025).

4. Comparaison entre les techniques conventionnelles et modernes

- Les méthodes conventionnelles d'extraction les composés bioactifs des algues sont la macération, la et l'extraction par solvant, extraction solide-liquide et par Soxhlet. Dans ces techniquesest généralement utilisé, un solvant organique, de grands volumes, une longue durée d'extraction sont nécessaires et une température et pression haut. Ces inconvénients ont motivé la recherche de nouvelles alternatives aux techniques d'extraction traditionnelles, généralement liées au concept de révolution verte. Les technologies alimentaires de conservation, de transformation, d'extraction et d'analyse ont évolué de ces procédures conventionnelles vers des procédés plus innovants et respectueux de l'environnement, réduisant l'utilisation d'énergie fossile et de solvants dangereux, tout en évitant les pertes d'eau et la génération de résidus. Par conséquent, la conception de procédés verts et durables, et en particulier de procédés d'extraction verts, reste un sujet d'actualité dans l'industrie alimentaire(Pérez-vaque et al., 2023).
- Les nouvelles techniques d'extraction se caractérisent par des temps d'extraction plus courts, des températures de fonctionnement plus basses, une quantité réduite de solvant et l'automatisation des procédés. De plus, en raison des avantages mentionnés précédemment, ces techniques sont considérées comme respectueuses de l'environnement.

Mais il est nécessaire d'ajuster et d'optimiser les facteurs influençant le processus d'extraction afin d'obtenir le meilleur rendement possible en composés bioactifs. Parmi les paramètres qu'il convient de prendre en compte, on peut citer notamment : la ration de solvant, le solvant d'extraction, le pH, la température et la granulométrie(Pérez-vaque et al., 2023).

Tableau 02 :Comparaisons entre les techniques d'extraction conventionnelles et modernes(Pérez-vaque et al., 2023).

Critère	Conventionnelles.	Modernes.
---------	-------------------	-----------

Chapitre I Technique d'extraction des composés bioactifs des algues

Méthode d'extraction	Macération, SLE, Solvant organique, Soxhlet	UAE, ESC, SFE, MAE, PLE
Solvant	Grande quantité	Petite quantité
Duré d'extraction	Longue	Court
Température et pression	Elevées	Basses
Consommation d'énergie	Haute	Réduite
Impact environnemental	Forte	Faible
Automatisation	Faible ou inexistante	Présente
Nécessité d'optimisation des paramètres	Moins mise en avant	Essentiellement pour améliorer le rendement
Rendement en composés bioactive	Moins efficace dans certains cas	Plus efficace si les paramètres sont bien ajustés

Chapitre II

Composés bioactifs des algues

1. Généralité

Les algues marines comptent parmi les principales ressources végétales marines actuellement exploitées, et trouvent de nombreuses applications dans les procédés culinaires, cosmétiques, pharmaceutiques et biotechnologiques. Elles ont fait l'objet d'une attention particulière en raison de leurs bienfaits avérés pour la santé. Elles sont considérées comme une source importante de métabolites bioactifs structurellement différents, utiles à la découverte de nouveaux pharmacophores/médicaments fonctionnels à base d'aliments(Rengasamy, Mohomoodally, Aumeeruddy, Zenging, & Jianb Xiaod, 2020).

Les algues ont une valeur nutritionnelle élevée, un faible apport calorique et sont riches en fibres, protéines, acides gras insaturés oméga 3 et 6, vitamines et minéraux. De plus, plusieurs sous-produits d'algues présentent des caractéristiques intéressantes pour l'industrie alimentaire(Leandro et al., 2020).

Elles sont considérées comme une source importante de macronutriments notamment de protéines et de lipides, et de micronutriment représenté par les vitamines et les minéraux, ainsi que par les fibres alimentaires et d'autre constituant minoritaire, comme les polyphénols(Echave et al., 2021).

2. Définition des composés bioactifs

Les composés bioactifs sont des substances naturelles produites par les algues, en particulier les algues marines (les algues vertes, rouges et brunes), qui possèdent des propriétés biologiques bénéfique, telles que : anticancéreuse, antivirales et antioxydant, etc...Parmi ces composés bioactifs, on retrouve notamment les polysaccharides, phénol, stérols, les acides gras, les protéines, les pigments, les vitamines et les minéraux.

3. Les composebioactifs

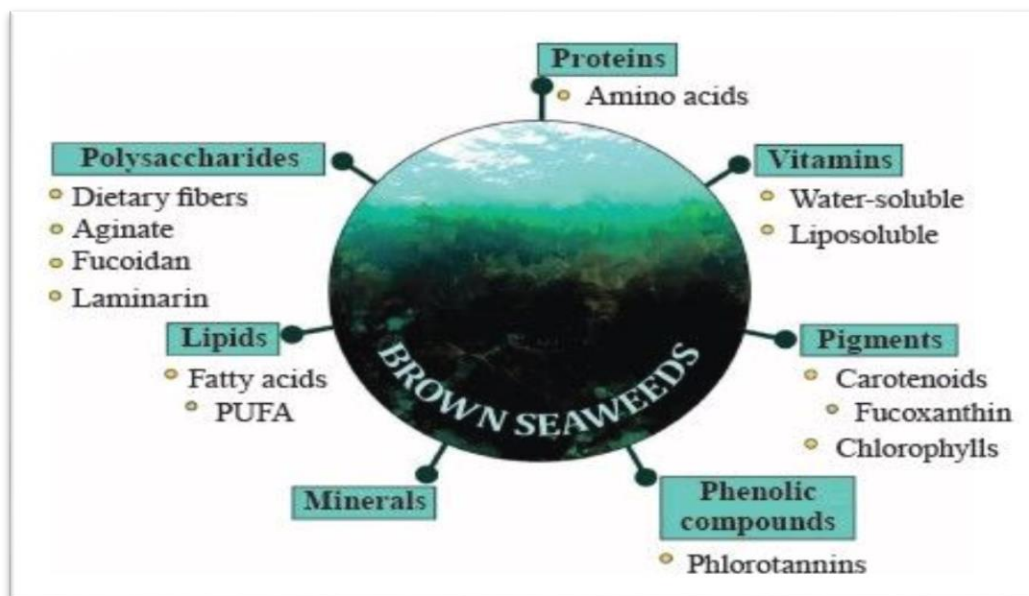


Figure 05 : Les composés bioactifs des algues

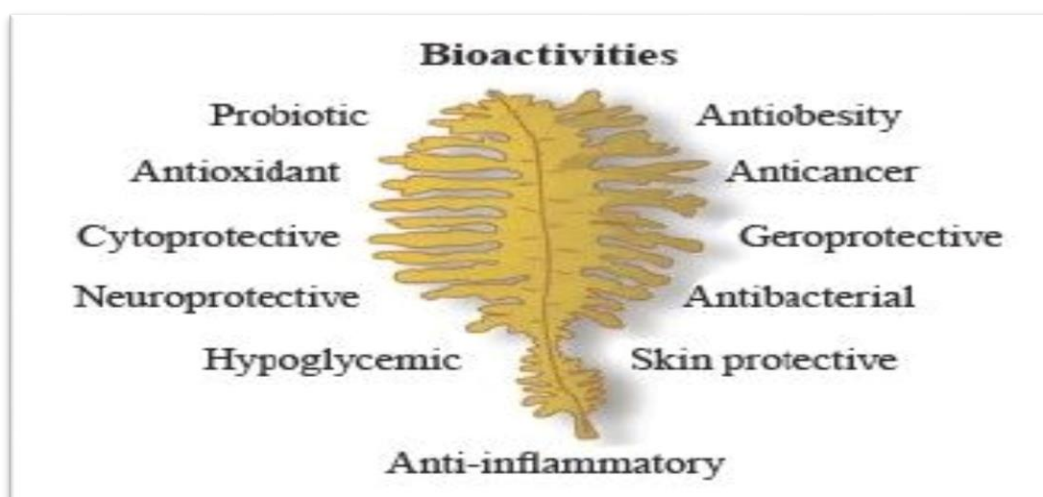


Figure 06 : Les propriétés bioactifs des algues.

3. 1.Les phénols

Les phénols, sont un groupe de composés chimiques contenant un ou plusieurs groupes hydroxyles ($-OH$) directement liés à un groupe benzène ou à un groupe hydrocarboné aromatique. Selon le nombre d'unités phénoliques dans une molécule, les substances phénoliques peuvent être classées en phénols simples ou en polyphénols (Abbas, Ali, Nafise, Meygoli, & Amanollah, 2024).

- **Bio-activité des phénols**

Les phénols possèdent diverses propriétés pour diverses applications. Ils présentent un large éventail de bienfaits potentiels pour la santé, notamment des propriétés : antioxydant, anti-inflammatoires, anticancéreuses, antimicrobiennes, immun-modulatrices et anti-hypertensives. Mais les bioactives les plus étudiées comprennent les propriétés cytotoxiques, antimicrobiennes, anti-inflammatoires et antioxydants (Abbas et al., 2024).

3. 2. Les protéines

Les protéines d'algues sont précieuses sur le plan nutritionnel et comprennent plusieurs enzymes spécifiques, des glycoprotéines, des protéines fixées à la paroi cellulaire, des phycobiliprotéines, des lectines ou des peptides (Echave et al., 2021)

- **Bio-activité des protéines (les peptides)**

Les peptides bioactifs dérivés des algues marines présentent une large gamme d'activité biologique, notamment des propriétés anti-oxydantes, anti-inflammatoires, antimicrobiennes, antihypertensives et antitumorales. Ces bio-activités dépendent de la composition en acides aminés, du degré d'hydrolyse des protéines. Parmi les activités les plus fréquemment rapportées figurent les effets antioxydants, anti-inflammatoires et antihypertenseurs, lesquels sont souvent attribués à la libération de peptides bioactifs à faible poids moléculaire, riches en acides aminés soufrés comme la cystéine et la méthionine (Echave et al., 2021).

3. 3. Polysaccharides

Les polysaccharides d'algues marines (MAP) sont des composants nutritionnels essentiels présents dans toutes les algues. En fonction de la taille et de la complexité moléculaires, ils sont classés en monosaccharides, disaccharides, oligosaccharides et polysaccharides (cadar et al., 2025).

- **Bio-activité des polysaccharides**

Les polysaccharides bioactifs dérivés des algues marines présentent une large gamme d'activité biologique. Activités antivirale, antibactérienne et antifongique, l'activité

antivirale contre plusieurs types de virus et de rétrovirus, enveloppés ou nus. Activité anti-inflammatoire et immuno-modulatrices, l'activité anti-inflammatoire cela se fait par interférence avec la migration leucocytaire, liaison directe aux cellules immunitaire, inhibition complète de la migration leucocytaire et sans production de cytokines pro-inflammatoires. Activités anticoagulantes et anti-thrombotiques, les Activités anticoagulantes et anti-thrombotiques des polysaccharides dérivés des algues par inhibition direct de la thrombine, prolongation du temps de coagulation par les voies intrinsèques et extrinsèques, augmentation du pouvoir de l'antithrombine, inhibition de l'action médiée par le cofacteur de l'héparine et augmentation de temps de formation du caillot. Activités antiprolifératives, suppressives de tumeurs, apoptotiques et cytotoxiques, ces activités agissent en induisant l'apoptose des cellules cancéreuses, en bloquant les voies de signalisation impliquées dans les survies cellulaires, inhibant la prolifération cellulaire et stimuler la réponse immunitaire contre les cellules tumorales. Activité antilipidémique cette activité agit en inhibition du cholestérol estérase pancréatique, modulation du profil lipidique, séquestration des extraits biliaires, activité antioxydant et hépatoprotectrice et réduction de la synthèse des lipides dans les cellules hépatiques (reposito, morais, & morais, 2015).

Il existe de nombreux types de polysaccharide qui possèdent des fonctions biologiques :

- **Gélose** : l'agar est un polysaccharide extrait des algues rouges. Il s'agit d'un mélange d'agarose et d'agar pectine où l'agarose est une chaîne linéaire de polymère. L'agar-agar a une activité biologique importante car il agit comme agent antitumoral, réduit le stress oxydatif et diminue le taux de glucose sanguin dans le corps humain (Y. kumar et al., 2021).
- **Laminar** : Le laminarane est un polysaccharide de réserve (β -glucane) composé de 20 résidus de glucose reliés par une liaison β -1,3. Il existe deux types de laminarane : un « laminarane soluble » et un « laminarane insoluble ». L'activité biologique du laminarane comprend une activité antitumorale, une activité anti-apoptose et des effets immunomodulateurs (Y. kumar et al., 2021).
- **Fucoïdane** : Le fucoïdane est un polysaccharide sulfaté extrait d'algue brune contenant des activités biologiques importantes en raison d'une quantité différente de groupe sulfate dans sa structure chimique. Il possède une activité anticoagulante,

immunomodulatrice, anticancéreuse, antivirale, anticomplémentaire, antithrombotique et antiproliférative(Y. kumar et al., 2021).

- **Ulvane** :L'ulvane est un polysaccharide sulfaté, extrait d'algues vertes. Il possède plusieurs activités biologiques telles qu'une activité antihyperlipidémique, antivirale, antitumorale, anticoagulante et antioxydante. L'activité antioxydante de l'ulvane dépend de la concentration en polysaccharides sulfatés(Y. kumar et al., 2021).

3. 4. Les acides gras

Des études récentes indiquent que les algues marines constituent une source riche en différentes classes de lipides présentant un intérêt biologique et nutritionnel. Les glycolipides représentent la classe prédominante de lipides dans plusieurs espèces d'algue, constituant entre 60% et 70% de la teneur lipidique totale. Ensuite on trouve 10% et 25% de phospholipides, quant aux lipides neutres, ils représentent entre 10% et 15%. Cette diversité lipidique reflète le fort potentiel des algues en tant que source des lipides bioactifs. Les études ont démontré que les algues sont une source importante d'AGPI essentiels, tels que les acides ALA, C18 :3 et n-3 et les acides LA, C18 :2 et n-6 que les mammifère ne peuvent pas synthétiser.(cadar et al., 2025). Les lipides des algues contiennent principalement des acides gras à long chaîne glucidique(alloyarova et al., 2024).

- **Bio-activité des lipides**

L'activité biologique des lipides extrait des algues se manifeste par leur capacité à influencer positivement la santé humaine, notamment en réduisant les risques de maladies cardiovasculaires, de trouble neurologique et d'inflammations(cadar et al., 2025).Les acides gras jouent un rôle essentiel dans le métabolisme cellulaire et tissulaire, en régulant la fluidité membranaire, le transport des électrons et de l'oxygène, ainsi que l'adaptation à la température, l'interaction conjointe entre les acides gras polyinsaturés oméga-3 et oméga-6 entraine un effet antioxydant et le complexe lipidique de algue réduit la dyslipidémie et l'hypercholestérolémie, et normalise le rapport des acides gras dans les lipides totaux du plasma sanguin et des membranes érythrocytaires en raison de la présence de divers acides gras polyinsaturés(alloyarova et al., 2024).

3. 5. Les pigments

Les algues sont reconnues comme productrices naturelles de pigments bioactifs commerciaux. Les algues sont reconnues comme productrices naturelles de pigments bioactifs commerciaux. Les pigments présents dans les algues sont classés en chlorophylles, phycobilines et caroténoïdes. Parmi les caroténoïdes les plus courants, on trouve l'astaxanthine, la lutéine, la fucoxanthine, la canthaxanthine, la zéaxanthine et la β -cryptoxanthine. Grâce à leurs doubles liaisons, ils présentent de nombreuses applications pour la santé, tout en protégeant d'autres molécules du stress oxydatif induit par les radicaux libres par divers mécanismes. Ces caroténoïdes sont synthétisés par certaines espèces comme produits principaux, mais ils sont également présents comme sous-produits chez plusieurs espèces, selon leur voie de synthèse et leur potentiel génétique (patel et al., 2022).

- **Bio-activité des pigments**

Les pigments extraits des algues présentent une bio-activité remarquable, leur conférant des propriétés bénéfiques pour la santé humaine, notamment des propriétés : propriétés antioxydantes, anti-cancérigènes, anti-inflammatoires, anti-obésité, anti-angiogéniques et neuroprotectrices. Elles peuvent renforcer le système immunitaire, ce qui pourrait les impliquer dans plus de 60 maladies potentiellement mortelles telles que le cancer, les cardiopathies ischémiques, la progéria et l'arthrose (patel et al., 2022).

- **Caroténoïdes**

Elles sont des pigmentsextraphotosynthétiques qui sont produits par caroténogénèse dans des conditions environnementales spécifiques. Les caroténoïdes ont de nombreuses activités fonctionnelles telles qu'une activité antioxydant et une activité de stimulation immunitaire et réduisent le risque de maladies chroniques telles que les maladies cardiovasculaires, l'inflammation, les maladies musculaires liées à l'âge, le cancer, l'obésité et les maladies neurologiques (Y. kumar et al., 2021).

- **Chlorophylles** : la chlorophylle est reconnue pour son utilisation en tant qu'agent préventif contre le cancer. Elle présente des activités antioxydantes et antimutagènes, en

plus de sa capacité à piéger les mutagènes et à réguler, le métabolisme des xénobiotiques(Wu et al., 2021).

3. 6. Stérols

Les stérols extraits des algues contiennent du fucostérol, possède des bienfaits pour la santé notamment :contre le diabète, l'obésité, la maladie d'Alzheimer, le vieillissement, le cancer et l'hépatoprotection, entre autres. Ces propriétés antioxydants, anti-inflammatoire, immun modulatriceethypocholestérolémiantes sont attribuées à ces stérols, ce qui témoigne de leur potentiel thérapeutique."Ces stérols interagissent avec des enzymes et diverses autres protéines participant activement à différentes voies cellulaires, notamment le système de défense antioxydant, l'apoptose et la survie cellulaire, le métabolisme et l'homéostasie(Md.abdul et al., 2020).

3. 7. Les minéraux

Les algues notamment les microalgues sont des sources abondantes de presque tous les minéraux importants et sont riches en Cu, I, Fe, K, Zn,Se etc. Le sélénium (Se) est un élément indispensable à la construction de la glutathion peroxydase. La glutathion peroxydase participe au processus antioxydant du corps humain, prévient l'oxydation des acides gras insaturés et évite la production de certains métabolites toxiques, réduisant ainsi le risque de cancer et préservant l'homéostasie du corps humain. De plus, le Se participe également à la réponse immunitaire en améliorant la prolifération et l'activité biologique des lymphocytes B, en améliorant la fonction physiologique des lymphocytes T et en protégeant le système immunitaire de l'organisme en évitant les dommages oxydatifs aux cellules(Wu et al., 2021).

3. 8. Les vitamines

Les vitamines présentes dans les algues notamment microalgues comprennent la vitamine B1, la vitamine B2, la vitamine B6, la vitamine B12, la vitamine C, la vitamine E, la niacine, la biotine et l'acide folique. La vitamine E, appelée tocophérol, est un antioxydant liposoluble vital synthétisé uniquement par les organismes photosynthétiques(Wu et al., 2021).La vitamine E améliore l'état des vaisseaux sanguins et réduit leurs lésions, ralentir le vieillissement(vitamine B12), effet antihypertenseur

(vitamine C), contrôle des taux de lipides et réduction du risque de cancer du poumon et du col de l'utérus (vitamine E)(alloyarova et al., 2024).

4. Les applications industrielles des algues marines

4. 1. Industrie pharmaceutique :

Le marché mondial des produits pharmaceutiques naturels est en constante croissance et l'on s'attend à ce que les algues puissent répondre à une partie de cette demande croissante :(orejuela-escobar, gualle, ochoa-herrera, & philippidis, 2021)

- La biomasse des micro-algues est riche en composés bioactifs ont un potentiel médicinal, anticancéreux, antiviral et antimicrobien.
- Les métabolites primaires et secondaires peuvent être utilisés comme ingrédients pour la fabrication de divers médicaments, les espèces les plus largement utilisées étant *Arthrospira*, *Chlorella*, *Dunaliella* et *Haematococcus*
- les microalgues produisent des substances neuroprotectrices qui contribuent à ralentir ou à stopper la progression des maladies qui affectent le système nerveux. Par exemple, *Spirulina platensis* produit des substances neuroprotectrices qui ont montré des résultats positifs contre les maladies d'Alzheimer et de Parkinson.
- L'utilisation de plusieurs molécules bioactives issues de micro-algues pour des thérapies anti-allergéniques car elles agissent comme des inhibiteurs de l'histamine avec la capacité de moduler le système immunitaire.
- Elles soient utilisées comme médicaments fonctionnels pour la suppression des réponses immunitaires dans le corps humain et pour le développement de vaccins oraux contre la grippe A, le virus Zika et le VIH.
- Des études en laboratoire ont montré la possibilité d'utiliser des extraits de micro-algues comme traitement potentiels contre le cancer, certains espèces ayant démontré une capacité à détruire des cellules cancéreuses.

4. 2. Industries nutraceutiques, cosmétiques et de soins personnels

- Les algues peuvent être incorporées dans la fabrication de nutraceutiques car elles possèdent certaines caractéristiques nutritionnelles et fonctionnelles qui offrent des bienfaits pour la santé ou réduisent le risque de maladie La production de

nutraceutiques à base d'algues a débuté au Japon en 1960 avec la culture de *Chlorella*. Cette espèce est une source importante de nutraceutiques incorporés dans les compléments alimentaires quotidiens, les aliments fonctionnels et les aliments sains.

- Les propriétés biologiques des algues notamment les micro-algues suscitent un intérêt croissant dans l'industrie des cosmétiques, notamment en raison de la demande grandissante des consommateurs pour des produits d'origine naturelle. Les microalgues présentent une activité biologique notable, en particulier grâce à leur pouvoir antioxydant, ce qui les rend prometteuses dans le traitement de diverses affections cutanées telles que le vieillissement cutané, les troubles pigmentaires et la protection contre les effets nocifs des rayons ultraviolets (UV). Cette efficacité est attribuée à la présence de composés bioactifs favorisant le renouvellement cellulaire et l'hydratation de la peau. Les extraits de algues sont ainsi intégrés comme ingrédients fonctionnels dans une large gamme de produits de soins personnels, notamment les exfoliants, les nettoyants pour le visage, les lotions hydratantes, les produits régénérant, les protections solaires, les soins bucco-dentaires, capillaires, ainsi que la parfumerie. Il est à noter qu'à l'échelle mondiale, plus de 350 produits cosmétiques contenant des extraits des algues sont actuellement commercialisés.
- *Chlorella vulgaris* et *Spirulina Maxima* sont utilisées pour traiter les pellicules et stimuler la croissance des cheveux grâce à leurs huiles (orejuela-escobar et al., 2021).

4. 3. Industrie alimentaire

- La biomasse de microalgues est une riche source de nutriments, tels que les glucides, les vitamines, les protéines et les lipides, qui sont utilisés comme additifs dans les aliments, les pâtes, les produits laitiers et les produits de boulangerie approuvés par la Food and Drug Administration (FDA) des États-Unis.
- *Spirulina* et *chlorella* sont utilisées pour la fabrication de complément alimentaire sous forme de comprimés ou de capsule et de liquides qui sont vendus comme source de vitamine et d'antioxydant.
- Les colorants alimentaires sont généralement extraits des espèces d'algue *chlorella* et *spirulina*. Ils sont utilisés comme additifs alimentaires naturels en remplacement des colorants synthétiques.
- nouvelles applications de produits à base de microalgues ont été développées, telles que des boissons à la spiruline pour les athlètes, des pâtes à contenu nutritionnel

amélioré, des huiles riches en PUFA (tels que l'EPA et le DHA), du lait enrichi en DHA, du yaourt à la ténacité et à l'élasticité améliorées, et des probiotiques (orejuela-escobar et al., 2021).

Tableau 03 : Principaux impacts des aliments fonctionnels infusés aux algues (Siddhanth et al., 2024)

Produit alimentaire	Les algues	Formulation	Principaux impacts
Bol de smoothie	Spiruline (poudre)	2 à 3 g mélangés avec de la banane, des baies, des épinards, du lait végétal, garnis de graines de chia et de granola	Augmente les protéines, le profil antioxydant (phycocyanine), la santé intestinale (prébiotiques)
Comprimés de spiruline pour l'immunité	Poudre entière d' <i>Arthrospiraplatensis</i> (comme <i>Spirulinaplatensis</i>)	Comprimés à partir de biomasse séchée et pulvérisée	Protéines concentrées, antioxydants, phycocyanine (spiruline), soutien immunitaire, regain d'énergie naturel
Soupe déshydratée	Microalgues riches en astaxanthine	Les microalgues sont extraites à l'aide de solvants tels que l'eau, l'éthanol, le méthanol, le chloroforme, l'acétone, etc. L'extrait est ensuite utilisé pour enrichir la soupe	Haute capacité antioxydante
Boissons fonctionnelles	Spiruline	La biomasse entière de spiruline ou les composés purifiés extraits sont utilisés	Valeur nutritionnelle, bienfaits pour la

		dans la formulation de ces boissons	santé
Compléments alimentaires	Spiruline, Chlorella, Astaxanthine, DHA, EPA	Les microalgues sont extraites à l'aide de solvants GRAS Les extraits sont ensuite utilisés comme ingrédients entiers ou comme compléments alimentaires.	Riche en nutriments et favorisant la santé
Gels alimentaires végétariens	Limnospira maxima	0,1 à 1% p/p	Gélification, texture et enrichissement en PUFA ω -3 améliorés
Produits laitiers	Arthrospiraplatensis (Cyanophycées)	3 g/L	Protéines, vitamines et minéraux améliorés
Lait enrichi en oméga-3	Huile de chlorella	Microencapsulé et homogénéisé dans le lait	Augmentation des oméga-3 (DHA) pour la santé du cerveau, légère saveur de noisette de la chlorella
Fromage à tartiner probiotique	Huile de Schizochytrium sp. (DHA).	Huile de DHA, cultures probiotiques, flocons d'algues	Ajout de DHA pour le développement du cerveau, bienfaits probiotiques, saveur umami savoureuse (algues)
Yaourt nature et probiotique	A. platensis	0,1–0,8 % p/p	Modification de texture, potentiel antioxydant et probiotique
Boisson au yaourt	Astaxanthine	Astaxanthine	Amélioration de la

enrichie	(Haematococcus salinarum, H. pluvialis)	microencapsulée mélangée à une base de yaourt, des purées de fruits et des probiotiques	santé de la peau, récupération après l'exercice (astaxanthine), santé intestinale (probiotiques), couleur rose naturelle, boost antioxydant
Biscuit	A. platensis, extrait de phycocyanine	A. platensis : 0,3 à 0,9 %, Phycocyanine : 0,3 % p/p	Apport nutritionnel (protéines, fer), couleur améliorée
Pain	Spiruline	La biomasse entière de spiruline est mélangée à la pâte à pain pendant le processus de formulation	Amélioration nutritionnelle
Pain multigrains	Extrait d'astaxanthine	Ajouté à la pâte avec des grains entiers, des graines, des noix.	Richesse en antioxydants (astaxanthine), durée de conservation prolongée, teinte rose subtile
Produits de boulangerie.	Nannochloropsis oculata, Porphyridium purpureum	La biomasse de microalgues est extraite à l'aide d'un mélange méthanol/eau/acide acétique comme solvant d'extraction. L'extrait est ensuite utilisé dans la	Activité antioxydante, teneur plus élevée en caroténoïdes et en polyphénols

		formulation de produits de boulangerie	
Pâte	Spiruline	La biomasse entière de spiruline ou des composés purifiés extraits sont incorporés dans la formulation de ces produits	Valeur nutritionnelle, bienfaits pour la santé
Compléments alimentaires et nutraceutiques	Extraits de microalgues	Les microalgues sont extraites à l'aide de solvants GRAS Les extraits sont ensuite directement utilisés dans la formulation de ces produits.	Composés antioxydants et anti-inflammatoires
Barres protéinées	Poudre de chlorella	Mélangé à la base de la barre avec des noix, des graines, des fruits secs et un édulcorant	Protéines et acides aminés essentiels accrus (chlorella), fer et vitamine B12 améliorés, saveur légèrement terreuse, taches vertes
Capsules d'oméga-3 végétaliennes	Huile de Crypthecodini umcohnii (Dinophyceae) (DHA et EPA)	Huile encapsulée dans des gélules molles adaptées aux végétaliens	Source d'oméga-3 d'origine végétale pour la santé du cœur et du cerveau (DHA et EPA), évite les contaminants de l'huile de poisson

4. 4. Alimentation animale

- La chlorella a été signalée pour la première fois en 1952 comme ingrédient d'alimentation animale qui améliorait la croissance des poulets. Les animaux d'élevage et les animaux de

compagnie bénéficient des vitamines, des minéraux et des acides gras essentiels des algues qui améliorent la réponse immunitaire et la fertilité, et contribuent à une peau saine et à une apparence extérieure(orejuela-escobar et al., 2021).

4. 5. Engrais agricoles et amendements du sol

- Les biostimulants extraits par les algues sont favoriser la croissance et le développement de diverses cultures dans des conditions optimales et stressantes, car ils captent l'azote et le phosphore de l'écosystème et rendent ces nutriments disponibles pour les sols appauvris par une utilisation agricole intensive.
- Elles sont utilisées pour la culture de ris(orejuela-escobar et al., 2021).

4. 6. Produits chimiques

- Les algues sont utilisées comme une source renouvelable pour un large gamme de produits chimique :les colorant, les peintures, les pigments, les biopolymères et les nanoparticules. (orejuela-escobar et al., 2021).
- L'utilisation des microalgues pour la production mondiale de bioplastique.(mogany, bhola, & bux, 2024).
- Production de biocarburants à partir de biomasse (mogany et al., 2024).
- Elles sont utilisées pour le traitement des effluents (hashmi et al., 2023).

5. Contraintes économiques liées à la production à grande échelle des composés bioactifs des algues

Coûts de production élevés. L'un des principaux obstacles à l'exploitation des .production à grande échelle est économiquement irréalisable en raison des coûts de culture, de récolte et d'extraction. Par exemple, les photobioréacteurs et les technologies avancées utilisées dans le traitement en aval des composés bioactifs augmentent les dépenses globales. Des systèmes de culture alternatifs rentables, tels que les systèmes hybrides combinant sources de lumière naturelle et photobioréacteurs, ainsi que les bassins ouverts, sont utilisés pour atténuer ces coûts. De plus, les modifications par génie génétique pourraient augmenter la productivité des souches d'algues, réduisant ainsi le coût total par unité de composé bioactif. L'émergence de techniques de récolte plus efficaces, telles que la centrifugation, la filtration membranaire et la floculation, peut également réduire les dépenses(eladl, elnabawy, & elthanahy, 2024).

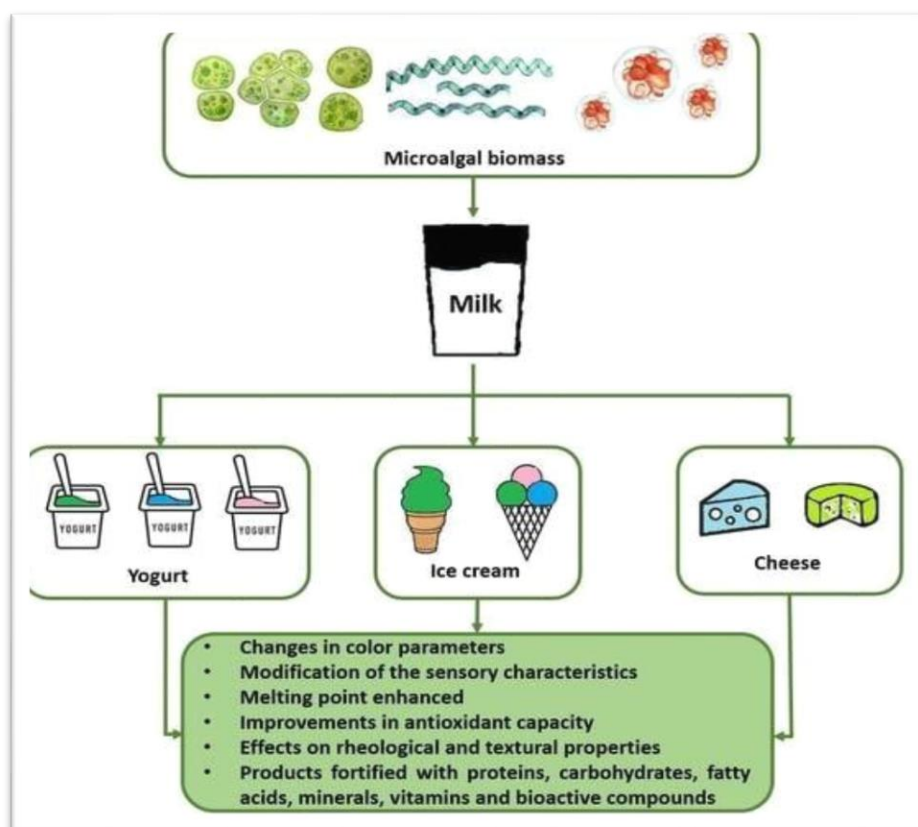
Chapitre III

Les produits laitiers fonctionnels

1. Définition

Les produits laitiers fonctionnels sont des produits laitiers qui, au-delà de leurs valeurs nutritionnelles de base, offrent des bénéfices supplémentaires pour la santé.

Le lait et les produits laitiers jouent un rôle important dans la production d'aliments fonctionnels car ils contiennent des peptides bioactifs, des bactéries probiotiques, des antioxydants, des vitamines, des protéines spécifiques, des oligosaccharides, des acides organiques, du calcium hautement assimilable, de l'acide linoléique conjugué et d'autres composants biologiquement actifs aux bioactivités variées. Les produits laitiers fermentés sont traditionnellement considérés comme bénéfiques pour la santé, notamment en modulant les fonctions digestives et gastro-intestinales, l'hémodynamique, en contrôlant la croissance microbienne probiotique et en favorisant l'immunorégulation, des bienfaits reconnus depuis de nombreuses années(Elkot, 2022).



Figures 07 : Les produits laitiers fonctionnelles.

2. Les intérêts nutritionnels et sanitaires des produits laitiers fonctionnels

- **Source des peptides bioactifs** : jouent un rôle dans la régulation immunitaire.
- **Riches en probiotiques et postbiotiques** : améliorent la santé digestive
- **Propriétés antioxydantes** : Les antioxydants naturels et les composants bioactifs issus de différentes sources alimentaires jouent un rôle important dans le maintien des

fonctions corporelles, notamment dans la prévention de diverses maladies dégénératives comme le cancer, le diabète, les maladies cardiovasculaires, les inflammations, l'hypertension artérielle, le vieillissement, etc.

- **Meilleure digestibilité** : Elles sont favorisées la digestion du lactose et des lipides, tout en améliorant l'absorption des nutriments.
- **Effet antimicrobiens et anti-inflammatoires** : Ces produits à protéger contre les infections et les inflammations (aslam et al., 2021).

3. Intégration des composés bioactif des algues dans les produits laitiers

L'intégration des composés bioactifs des algues tel que *Himanthaliaelongata*, *laminariaochroleuca* et *undarapinnatifida* à été réalisée dans la production de divers produits laitiers fonctionnelles pour améliorer leur indicateur de qualité. En particulier, les composés phénoliques, les oligosaccharides et la mousse alimentaire bioactive contenant de l'alginate de sodium Cette intégration se manifeste comme suit :

- **Fromage** : des composés phénoliques ont été incorporés dans les ajoutant directement au caillé de lait. Ils permettent d'augmenter l'activité antioxydante d'améliorer la couleur et la texture.
- **Yaourt** : des oligosaccharides d'alginate ont été utilisés dans les ferments lactiques afin de contribuer au développement du produit. Les oligosaccharides d'alginate jouent un rôle antifongique potentiel contre certaines levures responsables de l'altération de lait, diminué la croissance des micro-organismes *candida parapsilosis*, *debarymyceshansenii* et *meyerozymaguilliermodii* et à prolongé la durée de conservation.
- **Les crèmes glacées** : une mousse alimentaire bioactive contenant de l'alginate de sodium à été intégrée comme substitut de matières grasses et de sucre lors de la préparation, permettant la formulation de produits fonctionnelles adaptés aux personnes en surpoids ou souffrant de troubles liés au point (alloyarova et al., 2024).

4. Les effets des composés bioactifs des algues sur les produits laitiers

4. 1. Yaourt

- Augmentation la teneur de protéine
- Augmentation le pH
- Augmentation de l'activité antioxydante
- Réduction de la synérèse ce qui le produit plus stable
- Amélioration de la texture et augmentation de la viscosité

- Fournit un environnement riche en nutriments qui favorise la croissance et la viabilité des bactéries lactiques et probiotiques(hernandez, Nunes, prista, & raymundo, 2022).

4. 2. Fromage

- Augmentation de la teneur de protéine
- Diminution du pH
- Diminution des valeurs de l'indice de fusion
- Amélioration de la stabilité de l'émulsion
- Augmentation de la fermeté de fromage
- Augmentation de l'activité antioxydant (hernandez et al., 2022).

4. 3. La crème glacée

- Augmentation de la teneur de protéine et lipide.
- Diminution du ph et augmentation de l'acidité.
- Allongement du temps de fusion.
- Augmentation du foisonnement.
- Modification les paramètres de la couleur due à la présence des pigments dans les algues.
- Augmentation de l'intensité des couleurs rouges et jaunes.
- Meilleure stabilité de la couleur pendant le stockage (les pigments naturel présente maintiennent une couleur stable sur de longues périodes.
- Les effets sur les paramètres rhéologiques : diminution de la viscosité, diminution de la valeur de l'indice d'écoulement(n), augmentation de l'indice de consistance(k). (hernandez et al., 2022).

5. Les limites d'utilisation des algues dans les produits laitiers

Malgré ces avantages, l'incorporation des algues altère les qualités sensorielles des produits laitiers, ce qui constitue une contrainte majeure. Ces contraintes se manifestent aux niveaux sensoriels :

- La saveur de poisson
- Une couleur peu attrayante
- Un aspect visuel hétérogène dû à la sédimentation
- Des arômes désagréables

De manière générale, l'incorporation de microalgues dans le yaourt est un processus complexe, qui doit prendre en compte de nombreuses propriétés susceptibles d'affecter la qualité sensorielle du produit final. Par conséquent, afin de contourner ces problèmes et

d'accroître l'acceptabilité globale des produits laitiers fermentés enrichis en microalgues, il est nécessaire de mener des études complémentaires et de trouver des stratégies pour minimiser la saveur et l'arôme des algues, ce qui n'est pas attendu dans ce type de produit(hernandez et al., 2022).

Conclusion

Conclusion

L'extraction des composés bioactifs à partir des algues représente une voie prometteuse pour enrichir les produits laitiers en substances naturelles bénéfiques pour la santé. Grâce à leur richesse en antioxydants, vitamines, minéraux et fibres, les algues constituent une source innovante d'ingrédients fonctionnels.

Ce travail a permis de mettre en évidence l'intérêt croissant pour l'intégration des extraits d'algues dans les produits laitiers, en tant qu'agents antioxydants, antimicrobiens ou encore comme texturants naturels. Cependant, plusieurs défis demeurent, notamment au niveau de l'optimisation des procédés d'extraction, de la stabilité des composés bioactifs lors de la transformation, ainsi que de l'acceptabilité sensorielle par les consommateurs.

À travers cette étude, nous avons démontré que l'utilisation des algues dans l'industrie laitière n'est pas seulement une innovation technologique, mais aussi une réponse aux attentes actuelles des consommateurs en matière de produits plus sains, naturels et durables. Des recherches complémentaires sont néanmoins nécessaires pour améliorer l'efficacité des procédés d'extraction, évaluer la bioaccessibilité des composés, et développer des formulations stables à l'échelle industrielle.

Références

Références

1. Abbas, S., Ali, R., Nafise, N., Meygoli, N. N., & Amanollah, Z.-A. (2024). Seaweed-derived phenolic compounds as diverse bioactive molecules: A review on identification, application, extraction and purification strategies. *Biological Macromolecules*, 266. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131147>
2. ahmed, Z., M, E.-s. h., zekry, A. e., mohammed, R., & ramadan, A. u. (2024). Adopting biorefinery and circular bioeconomy for extracting and isolating natural products from marine algae. [Review article]. *frontiers in Natural products*, 3. doi: 10.3389/fntpr.2024.1425242
3. alghazeer, R., fatah, H. e., azwai, S., elghmasi, S., sidati, M., fituri, A. e., . . . eskandrani, A. a. (2022). Nutritional and Nonnutritional content of Underexploited edible seaweeds. *National library of medicine*, 15. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/8422414>
4. alloyarova, Y. V., kolotova, D. S., & derkach, S. R. (2024). nutritional and therapeutiques potential of functional components of brown seaweed: A review. *Food processing; Techniques and technology*, 12(2). doi: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-616>
5. aslam, A. M., mostafa, K. M., hafizur, R. M., siddiqui, S. M. n., azizul, H. M., kumar, S. k., & atikur, R. M. (2021). Functional dairy products as a source of buiactive peptides and probiotics: current trends and future perspectives. *Journal of fppd Science and Technology*, 59(4), 1263-1279. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05091-8>
6. cadar, E., popescu, A., dragan, a.-m.-l., & prasacu, I. (2025). Bioactive compounds of marine algae and their potential health and nutraceutical applications: A review. *Marine drugs*, 23(4). doi: <https://doi.org/10.3390/md23040125>
7. Echave, J., fraga-corral, M., garcia-perez, P., popovic-djordjevs, J., avdovic, E. h., raduolvic, L., . . . simal-gandara, J. (2021). Seaweed protein hydrolysates and bioactive peptides: Extraction, purification and application. *Marine drugs*, 19(9). doi: <https://doi.org/10.3390/md19090500>
8. eladl, S. N., elnabawy, A. M., & elthanahy, E. G. (2024). Recent biotechnological applications of value added bioactive compounds from microalgae and seaweeds. *botanici studies*, 65. doi: <https://doi.org/10.1186/s40529-024-00434-y>
9. Elkot, W. F. (2022). Functional dairy foods. A review. *Journal of Agroalimentary processes and technologies*, 28(3), 223-225.

Références

10. eva, Q., clara, G., ricardo, F., cristina, D.-m., & cristina, S. (2022). A critical comparison of the advenced extraction technique applied to obtain health-promoting compounds from saeweeds *Marine drugs*, 20(11). doi: <https://doi.org/10.3390/md20110677>
11. france, D., godfroy, O., cruaud, C., heesch, S., nehr, Z., & tadrent, N. (2024). l'évaluation des algues brunes révélée par leur génome. *187*(25), 4957-4973.e4924. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2024.10.021>
12. getachew, A. t., jacobson, C., & holdt, S. l. (2020). Emerging technologies for the extraction of marine phenolics: Opportunities and challenges. *Marine drugs*, 18(8). doi: 10.339/md18080389
13. ghalioui, N., hazzit, M., & mokrane, H. (2024). Seaweeds as a potential source of bioactive compounds. *Biotechnology environmental science*, 3(1). doi: <https://doi.org/10.58803/rbes.v3i1.19>
14. hashmi, Z., bilad, M. r., Fahrurrozi, ziani, J., lim, J. w., & wibisono, Y. (2023). Recent progress in microalgae- based technologies for industrial wastewater treatment. *fermentation*, 9(3). doi: <https://doi.org/10.3390/fermentation9030311>
15. hernandez, H., Nunes, M. c., prista, C., & raymundo, A. (2022). Innovation and healthier dairy products through the addition of microalgae: A review. *Foods*, 11(5). doi: <https://doi.org/10.3390/foods11050755>
16. kumar, L. r., tejpai, C., anas, K., vishnu, K., mohanan, V., pavithra, P., & venkatesan, J. (2024). Exploration de la polyvalence de l'extraction assistée par ultrasons en tant que plateforme durable émergente vers la mise en place d'une bioraffinerie d'algues. 22.
17. kumar, Y., tarafdar, A., & Badgujar, P. C. (2021). Seaweed as a Source of natural antioxidants: Therapeutic activity food application. *food quality*, 2021(1). doi: <https://doi.org/10.1155/2021/5753391>
18. Leandro, A., Pacheco, D., Cotas, J., Marque, J. C., Pereira, L., & Gonçalves, A. M. (2020). Seaweed's bioactive candidate compounds to food industry and global food security. *10*(8). doi: <https://doi.org/10.3390/foods10080140>
19. Md.abdul, h., sohag, A. a. m., dash, R., Md.mohibbiullah, oktaviani, D. f., hossain, M. t., . . . moon, I. s. (2020). phytosterols of marine algae: Insights health benefits and molecular pharmacology. *Phytomedicine*, 69. doi: <https://doi.org/10.1016/J.PHYMED.2020.153201>

Références

20. mogany, T., bhola, V., & bux, F. (2024). Algal-basef bioplastique: global trends in applied research, technologies, and commercialization. *31*, 38022-38044. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33644-9>
21. muhammad, M., mohammad, S., ketut, S. i., & Rahmatang. (2023). Environmental-Friendly Extraction methods to produce bioactive compounds in seaweed. *Chen environ* 27(11). doi: <https://doi.org/10.25303/2711rjce1140121>
22. orejuela-escobar, L., gualle, A., ochoa-herrera, v., & philippidis, G. P. (2021). Prospects of microalgae for biomaterial production and environmental. *sustainability*, 13(6), 3063. doi: <https://doi.org/10.3390/su13063063>
23. patel, A. k., albarico, F. p. j., vadril, A., nian, C. T., chau, H. t., & wani, H. m. u. d. (2022). Algae as an emerging source of bioactive pigments. *Bioresource Technology*, 351. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126910>
24. Pérez-vaque, A., carpena, M., barciela, P., cassani, L., simal-gandara, J., & prieto, M. a. (2023). Pressuried liquid extraction for the recovery of bioactive compounds from seaweed for food industry application. *Antioxydant*, 12(3). doi: [10.3390/antiox12030612](https://doi.org/10.3390/antiox12030612)
25. Rengasamy, k. R., Mohomoodally, M. F., Aumeeruddy, M. Z., Zenging, G., & Jianb Xiaod, D. H. k. (2020). Bioavtive compounds saeweed: An oveiew of their biological properties and safety. *Food and chemicl toxicology*, 135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.111013>
26. reposo, M. f. d. j., morais, a. m. b. d., & morais, R. m. s. c. d. (2015). Marine polysaccharides from algae with potential biomedical application. *marine drugs*, 13(5). doi: [10.3390/md13052967](https://doi.org/10.3390/md13052967)
27. samraj, A., barik, D., ponnusamy, R., & ganesan, V. (2021). Investigation on anglae oil extraction from algar spirogyra Soxhlet extraction method. *Materials Today: Proceedings*, 43. doi: [10.1016/j.matpr.2020.11.668](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.668)
28. sekar, S., jeyachandran, S., giri, J., & aman, M. (2025). Advancing sustainable agriculture : the potential of seaweed-derived bio pesticides from marine biomss. *Bioresources and Bioprocessing*, 12. doi: <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00849-w>
29. Siddhanth, surasani, V. k. r., singh, A., singh, S. m., l, H., murthy, N., & gopalbhi, K. (2024). Bioavtive compounds from micro-algae and its application on food: areview.4. doi: <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00096-6>

Références

30. sosa-hernandez, J. e., escobedo-avellaneda, Z., iqbal, H. m. n., & chanes, J. w. (2024). State-of-the-art extraction methodologies for bioactive compounds from algal biome to meet bio-economy challenges and opportunities. *molecules*, 12(11). doi: <https://doi.org/10.3390/molecules23112953>
31. uwinea, p. a., & waskiewicz, A. (2020). Recent advances in supercritical fluid extraction of natural bioactive compounds from natural plant materials. *Molecules* 25(17). doi: <https://doi.org/10.3390/molecules25173847>
32. vo, T. p., nguyen, D. q., ho, T. a. t., nguyen, T. m., ha, N. m. h., & vo, P. h. (2024). Novel extractiob of bioactive compounds from algae using green solvent: Principles, Applications, and future perspectives. *Journal of Agriculture and food research*, 18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101535>
33. worqlul, A. (2024). Functional food and their role in preventing chronicdiseases. *Nutrition and human health*, 8(6). doi: <https://doi.org/10.35841/aajnh-8.6.242>
34. Wu, J., gu, X., yang, D., xu, s., wang, S., chen, X., & wang, Z. (2021). Bioavtive substances and potentiality of marine microalgae *Food science & nutrition*, 9(9). doi: <https://doi.org/10.1002/fsn3.2471>
35. zekry, A. e., hassan, Y. n., hani, S., mohammed, R., am, A. r. i., g, D. a., & ramadan, a. o. (2022). les extrait d'halmeda opuntia et de padina pavonica améliorent la métabolique du mais dans des conditions de sol salin. *journal de phycologie appliquée*, 34, 3189-3203. doi: 10.1007/s10811-022-02844-6
36. zhangYu, hawboldtKelly, & Stephanie, m. (2024). Extraction de composés bioactive compounds from beach-cast brown algae: a review on accelerated solvent extraction and subcritical water extraction. [Critical review]. *RSC Sustainability*(8). doi: <https://doi.org/10.1039/D4SU00204K>

Résumé

Abstract

The incorporation of bioactive compounds into human nutrition is generating increasing interest, particularly in the context of developing functional dairy products. Marine algae, true reservoirs of biologically valuable molecules (polyphenols, carotenoids, sulfated polysaccharides, omega-3 fatty acids, bioactive peptides, vitamins, etc.), represent a promising natural alternative to enhance the nutritional and functional value of foods. The extraction of these compounds depends on several factors, such as the species of algae used, the extraction method whether conventional or modern (solvents, ultrasound, microwaves, etc.) as well as the operating conditions (temperature, pH, duration...). The addition of these extracts to dairy products can significantly improve their nutritional profile and functional properties, providing antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory, and even cholesterol-lowering effects. This type of formulation meets the growing demand of consumers for natural and health-promoting foods, while also promoting the valorization of underexploited marine resources. In this manuscript, we aim to explore the different families of bioactive compounds extracted from algae, their properties, the most suitable extraction techniques, and their potential application in the formulation of innovative functional dairy products.

Keywords: algae, bioactives compound, extraction, dairy products.

Résumé

L'incorporation des composés bioactifs dans l'alimentation humaine suscite un intérêt croissant, notamment dans le cadre du développement de produits laitiers fonctionnels. Les algues marines, véritables réservoirs de molécules d'intérêt biologique (phénols, caroténoïdes, polysaccharides sulfatés, acides gras oméga-3, peptides bioactifs, les vitamines etc.), représentent une alternative naturelle prometteuse pour enrichir la valeur nutritionnelle et fonctionnelle des aliments. L'extraction de ces composés dépend de plusieurs facteurs, tels que l'espèce d'algue utilisée, la méthode d'extraction soit les méthodes conventionnelle soit moderne (solvants, ultrasons, micro-ondes, etc.), ainsi que les conditions opératoires (température, pH, durée...). L'ajout de ces extraits dans les produits laitiers peut améliorer significativement leur profil nutritionnel et leurs propriétés fonctionnelles, en apportant des effets antioxydants, antimicrobiens, anti-inflammatoires ou encore hypocholestérolémians. Ce type de formulation permet de répondre à la demande des consommateurs en quête d'aliments naturels et bénéfiques pour la santé, tout en valorisant des ressources marines encore sous-exploitées. Dans ce manuscrit, nous allons explorer les différentes familles de composés bioactifs extraits des algues, leurs propriétés, les techniques d'extraction les plus adaptées, ainsi que leur application potentielle dans la formulation de produits laitiers fonctionnels innovants.

Mots clés: Algue, Composés bioactifs, Extraction, Produits laitiers.

الملخص

يُثير إدماج المركبات النشطة بيولوجيًا في تغذية الإنسان اهتمامًا متزايدًا، لا سيما في إطار تطوير المنتجات اللبنية الوظيفية. وتُعد الطحالب البحرية خزانات حقيقية للجزيئات ذات القيمة البيولوجية (مثل البوليفينولات، الكاروتينات، السكريات الكبريتية، الأحماض الدهنية أوميغا-3، الببتيدات النشطة، الفيتامينات... إلخ)، وتمثل بديلًا طبيعيًا واعدًا لتعزيز القيمة الغذائية والوظيفية للأغذية. وتعتمد عملية استخلاص هذه المركبات على عدة عوامل، من بينها نوع الطحالب المستخدمة، وطريقة الاستخلاص سواء كانت تقليدية أو حديثة (مثل المذيبات، أو الموجات فوق الصوتية، أو إن إضافة (...الميكروويف)، إضافة إلى الظروف التشغيلية (مثل درجة الحرارة، ودرجة الحموضة، والمدة الزمنية هذه المستخلصات إلى المنتجات اللبنية يمكن أن تُحسن بشكل كبير من تركيبها الغذائي وخصائصها الوظيفية، من خلال توفير تأثيرات مضادة للأكسدة، ومضادة للميكروبات، ومضادة للالتهابات، بل وحتى خافضة للكوليسترول. وتتيح هذه التركيبات تلبيّة احتياجات المستهلكين الباحثين عن أغذية طبيعية ومفيدة للصحة، مع تعزيز استغلال الموارد البحرية التي لا تزال غير مستغلة بشكل كافٍ. في هذا العمل، سنستعرض مختلف عائلات المركبات النشطة المستخلصة من الطحالب، وخصائصها، وأفضل تقنيات الاستخلاص، إضافة إلى تطبيقها المحتمل في صياغة منتجات لبنية وظيفية.

الكلمات المفتاحية: طحالب، مركبات نشطة بيولوجيًا، استخلاص، منتجات لبنية .