



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Nature et sciences de la vie

Département de biologie

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master
académique en sciences biologiques

Spécialité : Biochimie Appliquée

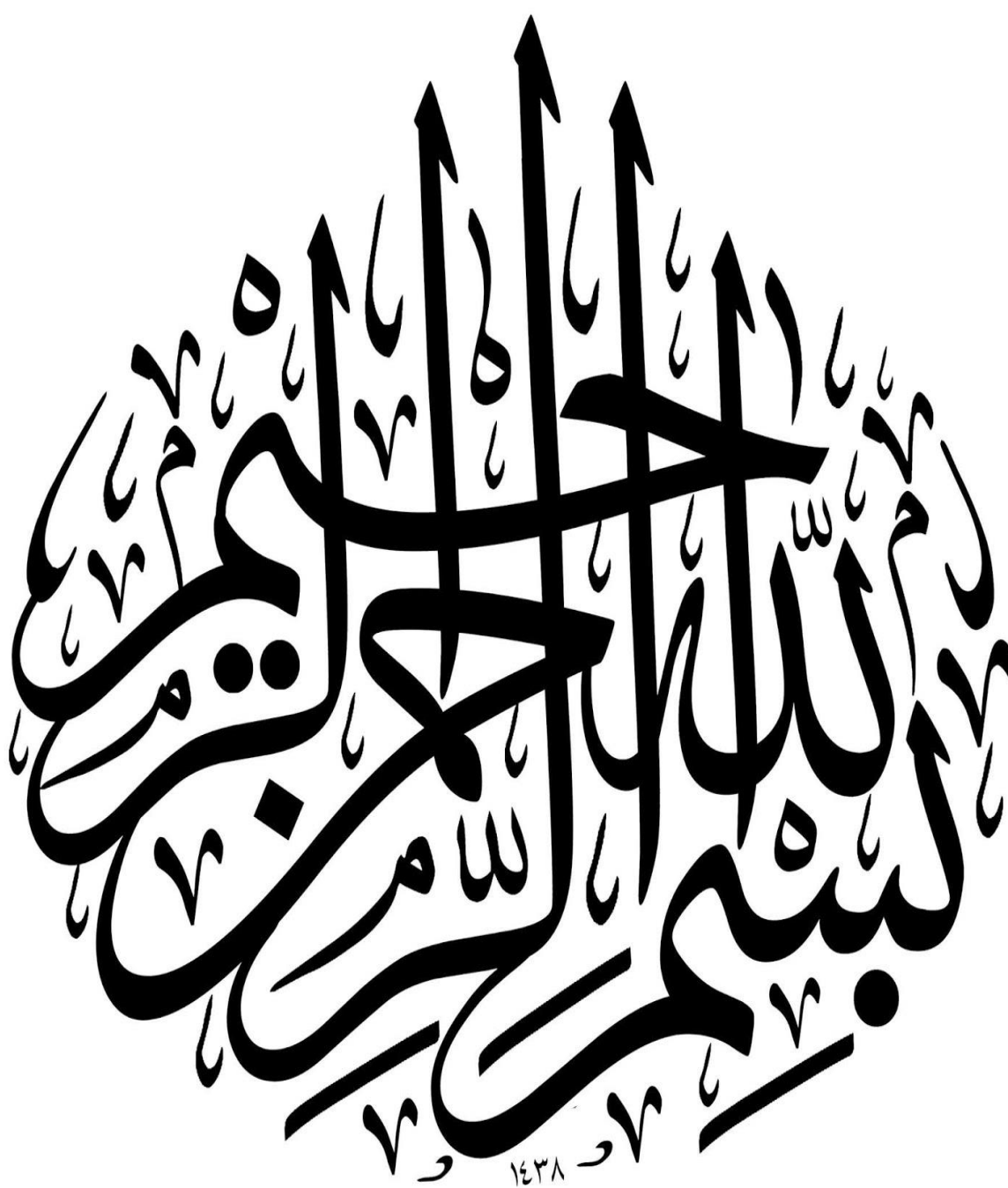
Thème

**Exploration des propriétés bioactives de *Chlorella vulgaris* et son
intégration dans les formulations cosmétiques
hydratantes : état des lieux et perspectives**

Réalisé par : Hammoudi Mamma

Devant le jury composé de:		
Dr. OTMANI Hadjer	Maître de conférences "A"	Président
Dr. ALLOUCHE Janet	Maître de conférences "A"	Examineur
Dr. FETNI Samira	Maître de conférences "A"	Encadrante
Pr. DEROUCHE Samir	Professeur	Co- Encadrant

2024-2025



١٤٣٨

Dédicaces

Tous d'abord, je remercie Dieu qui m'a accordé Sa bénédiction et m'a conduite à ce moment exceptionnel, ce moment de la remise de diplôme que j'ai toujours rêvé d'atteindre. Ce fut un parcours semé d'embûches, mais grâce à Dieu, puis au soutien de mes proches, j'ai réussi à réaliser cet accomplissement. Aujourd'hui, en levant mon diplôme, je souhaite dédier ce succès à ceux qui ont été à mes côtés à chaque étape, que ce soit par un mot gentil, un soutien ou une prière. Je leur adresse mes plus sincères félicitations et mon profond respect. Ce succès est le fruit de leurs efforts, de leur travail et de leur soutien constant, et je leur suis profondément reconnaissante.

À l'âme de mon cher père, Hammoudi Mohamed Al-Taher,
Tu nous as quittés physiquement, mais tu restes dans mon cœur, esprit, souvenir et prière ininterrompue.
À ma chère mère,
Source de tendresse, force et sacrifice... Sans tes prières et ta bénédiction, je ne serais pas là où je suis aujourd'hui.
À mon cher mari,
Compagnon de route, battement de cœur, et soutien dans la vie... Tu es le rêve devenu réalité.
À mon oncle généreux,
Mon deuxième père, qui m'a enveloppée de sa tendresse, générosité et son temps... Je te dédie ma profonde gratitude, tu as une place spéciale dans mon cœur.
À mes frères et ma sœur,
Vous êtes le soutien, le sourire et le refuge... Vous êtes la joie infinie dans mon âme, et l'amour sans limite dans mon cœur.
À mes chères amies,
Compagnes de voyage et partenaires de rêves... Vous êtes plus que des amies dans ma vie, vous êtes l'âme qui remplit les espaces de mon existence.
À ma grande famille,
À ceux dont je suis fière d'appartenir... Vous êtes les racines qui me donnent stabilité, et le soutien sur lequel je m'appuie à chaque étape.
À la famille de mon mari
Et à tous ceux qui ont contribué par un mot, une idée, ou une prière,
Je vous adresse mes sincères remerciements et mes vœux les plus sincères. Chaque mot, chaque instant a été une étincelle qui a éclairé mon chemin, et je suis reconnaissante envers chacun d'entre vous pour chaque étape que j'ai franchie j'espère que mon travail sera bénéfique aux générations futures.

Mamma Hammoudi

Remerciements

Je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir accordé la force, la patience et le succès dans l'aboutissement de ce travail.

*J'exprime mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à mon encadrante, **Dr. Samira FETNI**, ainsi qu'à **Pr. DEROUICHE Samir** pour leur supervision rigoureuse, leurs conseils avisés, leur accompagnement constant et la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long de ce travail de recherche.*

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury, que je remercie vivement pour avoir accepté de juger ce travail, pour le temps qu'ils y consacrent et pour leurs remarques constructives.

Je tiens enfin à remercier l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation tout au long de mon parcours, ainsi que toutes les personnes — de près ou de loin — ayant apporté leur aide ou leur soutien dans la réalisation de ce mémoire.

Table de matière

Dédicaces.....	I
Remerciements.....	II
Table de matière	III
Liste des figures.....	V
Liste des Tableaux.....	V
Liste des abréviations	VI
Introduction générale :.....	VII

Chapitre I. Généralités sur les microalgues et focus sur *Chlorella vulgaris*

I.1. Introduction aux microalgues et à leur rôle en cosmétique :	11
1.1.Définition de microalgues :.....	11
2.Diversité et classification Les microalgues :.....	13
3.Les différences entre macroalgues et microalgues :.....	13
4.Importance des microalgues en biotechnologie verte et durabilité :.....	15
I.2. Composition biochimique des microalgues en lien avec la cosmétique:.....	16
I.3. <i>Chlorella vulgaris</i> : caractéristiques et intérêt cosmétique :.....	23
1) Spécificités biochimiques et métaboliques de <i>Chlorella vulgaris</i> :.....	24
2) Conditions optimales de culture et bioproduction industrielle de <i>Chlorella vulgaris</i>	24
3) Développement de souches améliorées de <i>Chlorella vulgaris</i> pour des applications cosmétiques ciblées :.....	26
I.4. la SPIRULINE	28

Chapitre II. Propriétés bioactives de *Chlorella vulgaris* et son potentiel cosmétique

II.1. Activités biologiques générales des microalgues en cosmétique:	32
II.2. Activités spécifiques de <i>Chlorella vulgaris</i> sur la peau :	33
II.3. Évaluation scientifique des effets cosmétiques des microalgues :	37

Chapitre III. Technologies modernes pour l'extraction et l'incorporation de *Chlorella vulgaris* en cosmétique

III.1. Procédés d'extraction avancés des bioactifs de <i>Chlorella vulgaris</i> :	40
III.2. Techniques d'extraction assistée par ultrasons et microfluidisation :	43
III.3. Exemples d'applications industrielles et de produits sur le marché :	44
1. Sérums hydratants et crèmes anti-âge à base de <i>Chlorella vulgaris</i> :	44
2. Produits solaires et protection anti-pollution :	46
3. Innovations en cosmétique personnalisée et bio-impression 3D:	48

Chapitre IV. Défis, réglementation et perspectives d'innovation

IV.1. Contraintes technologiques et formulationnelles :	53
IV.2. Réglementation et acceptation sur le marché :	55
IV.3. Innovations et avenir des cosmétiques à base de microalgues :	56
Conclusion générale	59
Références bibliographiques.....	62
Résumés.....	66

Liste des Figures

Figure 01 : Microalgues.....	12
Figure 02 : Unicellulaires ou pluricellulaires indifférenciées sont des microalgues...	12
Figure 03: <i>Diversité des microalgues eucaryotes et procaryotes, marines et d'eau douce (Jeffrey et al., 1997 ; Sharma et Rai, 2011)</i>	13
Figure 04 : Différences entre macroalgues et microalgues.....	14
Figure 05 : Composition biochimique des microalgues.....	16
Figure 06 : Quantité en protéines dans les micro-algues.....	18
Figure 07 : Pigments bioactifs.....	20
Figure 08 : Structure de la phycocyanobiline et de la phycoérythrobiline.....	21
Figure 09 : <i>Chlorella vulgaris</i>	23
Figure 10 : Conditions optimales de culture.....	25
Figure 11 : Neutralisation des radicaux libres.....	32
Figure 12 : Procédés d'extraction des lipides de micro-algues.....	41
Figure 13 : Sérums hydratants et crèmes anti-âge à base de <i>Chlorella vulgaris</i>	44
Figure 14 : Innovations en cosmétique personnalisée et bio-impression 3D de <i>Chlorella vulgaris</i>	49
Figure 15 : Contraintes technologiques et formulationnelles.....	54

Liste des Tableaux

Tableau 1: position systématique du genre <i>Spiruline</i> (Audrey MANET).....	30
---	----

Liste des Abréviations

AA	Acides amines
ACGC	Acides gras à chaîne courte
AG	Acides gras
ATP	Adénosine triphosphate
CAT	Catalase
COV	Composés organiques volatils
CP	Composition Protéique
CPG	Chromatographie en Phase Gazeuse
DES	Solvants eutectiques profonds
DHA	Acide docosahexaénoïque
DPPH	2,2-Diphényl-1-picrylhydrazyle (méthode d'évaluation de l'activité antioxydante)
EPA	Acide eicosapentaénoïque
FRAP	Pouvoir antioxydant réducteur du fer
HBD	Donneur de liaison hydrogène
HTL	Liquéfaction hydrothermale
MAAs	acides aminés type mycosporine
NADES	Solvants naturels eutectiques profonds
PC	Polyphénols composent
ROS	Espèces réactives de l'oxygène
RPM	Révolutions par minute
TEWL	Perte insensible en eau à travers l'épiderme
UV	Ultraviolet

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, l'industrie cosmétique a connu une transformation marquée vers l'utilisation d'ingrédients naturels et durables, sous l'effet de la demande accrue de produits de cosmétique éco-responsable qui reposent sur des ingrédients respectueux de l'environnement et exempts de substances potentiellement toxiques. Les consommateurs sont de plus en plus conscients de l'importance de choisir des produits qui contribuent à la préservation de l'environnement et sont sans danger pour la peau, ce qui a conduit à une recherche continue d'ingrédients naturels à l'efficacité scientifiquement prouvée.

Parmi ces ingrédients, les microalgues se distinguent comme l'une des solutions innovantes, grâce à leur large gamme de composés bioactifs tels que les acides aminés, les vitamines, les peptides et les polysaccharides, qui jouent un rôle important dans l'hydratation de la peau, la stimulation du renouvellement cellulaire et la protection contre les facteurs environnementaux nocifs. **(Andersen et al.,1997)**

Dans ce contexte, *Chlorella vulgaris* est considérée comme l'une des microalgues prometteuses dans l'industrie cosmétique. Il a été démontré que cette microalgue riche en nutriments favorise l'hydratation et le rajeunissement de la peau, la rendant ainsi un ingrédient clé dans de nombreuses formulations cosmétiques modernes. Cependant, il existe encore des défis liés à la manière d'extraire efficacement ces composés bioactifs et de garantir leur stabilité et leur efficacité lorsqu'ils sont incorporés dans des produits cosmétiques.

Malgré l'intérêt croissant pour la *Chlorella vulgaris* en tant qu'ingrédient naturel dans les cosmétiques, de nombreuses questions restent encore insuffisamment élucidées, notamment :

- Quelles sont les propriétés bioactives de la *Chlorella vulgaris* qui la rendent bénéfique pour la peau?
- Quelles sont les méthodes les plus appropriées pour extraire ces composés et garantir leur efficacité lors de leur utilisation en cosmétique?
- Quels sont les défis technologiques qui freinent l'intégration généralisée de ces algues dans les produits cosmétiques ?
- Quelles exigences réglementaires et normes doivent être respectées pour garantir leur utilisation en toute sécurité dans les cosmétiques?

Partant de cette problématique, cette recherche vise à:

- ✓Analyse de la composition biochimique de *Chlorella vulgaris* et identification de ses composés actifs.
- ✓Étudiez son effet sur la peau et son rôle dans son hydratation et son renouvellement.
- ✓Explorez différentes techniques d'extraction qui peuvent maintenir leur biopotence.
- ✓Évaluer le potentiel futur de l'intégration de ces algues dans les cosmétiques et discuter des défis associés.

Pour atteindre les objectifs de cette recherche, une méthodologie scientifique multidimensionnelle sera suivie basée sur:

Recherche documentaire (recherche bibliographique) : Des informations seront collectées et analysées à partir de bases de données scientifiques fiables telles que PubMed, Scopus, Web of Science, dans le but de passer en revue les études antérieures liées aux propriétés de *Chlorella vulgaris* et à ses utilisations en cosmétique.

Analyse des techniques d'extraction et d'intégration dans les produits cosmétiques : Les dernières techniques utilisées pour extraire les composés actifs des algues seront passées en revue, en comparant les avantages et les inconvénients de chaque technique.

Évaluation des innovations récentes et des défis : Les derniers développements en matière de cosmétiques à base de *Chlorella vulgaris* seront étudiés, ainsi que les défis auxquels est confrontée l'utilisation de ces algues à grande échelle commerciale, tant d'un point de vue technique que réglementaire.

La recherche d'alternatives naturelles et sûres dans le domaine des cosmétiques est devenue une nécessité urgente au vu de la sensibilisation croissante des consommateurs aux questions environnementales et de santé. La *Chlorella vulgaris* est un modèle prometteur pour ces alternatives, de par sa richesse en composés bioactifs aux multiples bienfaits pour la peau. Cependant, comprendre comment les extraire efficacement et les incorporer dans les cosmétiques de manière à garantir leur stabilité et leur efficacité constitue un défi multidimensionnel qui nécessite des recherches supplémentaires. Cette recherche vise donc à fournir une vision globale du potentiel et des défis de l'utilisation de *Chlorella vulgaris* dans l'industrie cosmétique, en se concentrant sur les aspects scientifiques, techniques et réglementaires, afin de contribuer au développement de cosmétiques naturels plus efficaces et durables.

Chapitre I. Généralités sur les microalgues et focus sur *Chlorella vulgaris*

I.1. Introduction aux microalgues et à leur rôle en cosmétique :

Les microalgues représentent une ressource naturelle prometteuse aux multiples applications dans les domaines de la cosmétique, la santé, la nutrition et la biotechnologie. Grâce à leur richesse en métabolites secondaires, telles que les antioxydants, peptides bioactifs, polysaccharides, pigments et acides gras essentiels, elles offrent des solutions innovantes pour la protection et la régénération cellulaire (**khatab et toumi, 2019**)

1. Définition de microalgues :

Les microalgues sont des micro-organismes aquatiques. Dotées d'une croissance rapide, elles ont la particularité de pouvoir produire des substances industriellement intéressantes.

Déjà utilisées dans l'alimentaire, les cosmétiques et les fertilisants, les microalgues sont considérées comme une voie alternative aux carburants traditionnels et aux dérivés chimiques biosourcés. En effet, certaines espèces ont la capacité de produire des composés ayant un potentiel énergétique comme les lipides (source de biodiesel) ou l'amidon (source de bioéthanol). Les microalgues font partie des biocarburants dits de 3^e génération. Ils se distinguent des agrocarburants, issus de cultures destinées traditionnellement à l'alimentation et des biocarburants de 2^e génération, produits à partir de sources végétales non alimentaires telles que le bois et les déchets végétaux.

Les microalgues peuvent également intervenir dans la production de deux autres types de biocombustibles : l'hydrogène et le biogaz.

Leur potentiel est encore peu exploré : sur un million d'espèces estimées, seules 30 000 environ ont été étudiées.

Elles sont cultivées en milieu extérieur, dans des raceways, ou en milieu fermé, dans des photobioréacteurs.

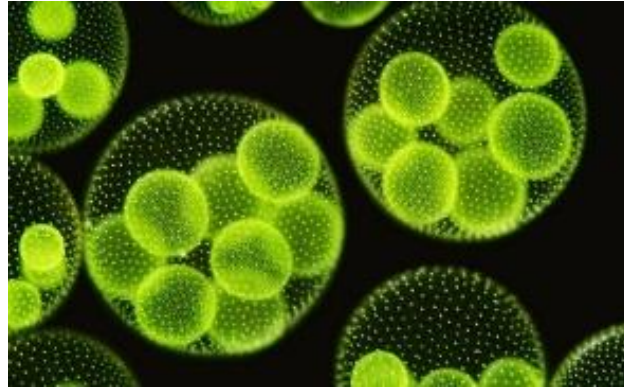


Figure 1 : Microalgues (Garrote, 2023).

Unicellulaires ou pluricellulaires indifférenciées, ce sont des micro-organismes généralement photosynthétiques eucaryotes ou procaryotes (cellules se distinguant respectivement par la présence ou l'absence d'un noyau et d'organelles). Vivant dans les milieux fortement aqueux, elles peuvent posséder une mobilité flagellaire. Elles colonisent tous les biotopes exposés à la lumière. Leur culture monoclonale est réalisée dans des photobioréacteurs ou des fermenteurs industriels. Toutefois, la grande majorité des microalgues sont capables la nuit de se nourrir par osmotrophie et sont donc de fait mixotrophes (Toor *et al.*, 2022).

Elles jouent un rôle important dans le cycle du carbone et de manière plus générale dans les cycles biogéochimiques des lacs et de l'océan.

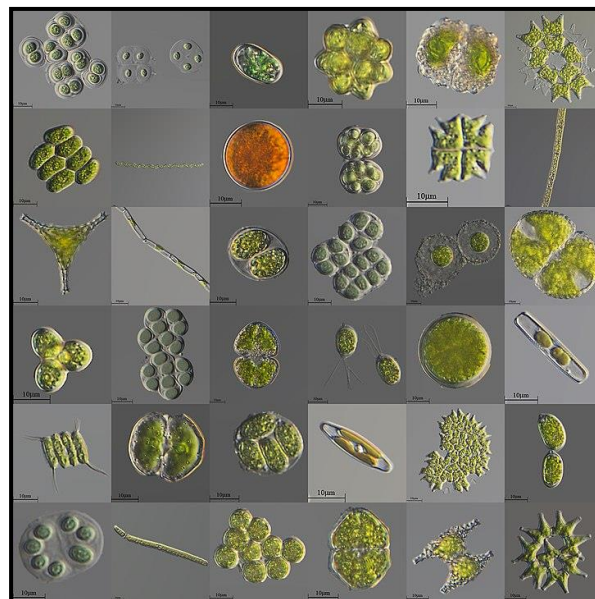


Figure 02 : Unicellulaires ou pluricellulaires indifférenciées sont des microalgues.

2. Diversité et classification Les microalgues :

Diversité et classification Les microalgues constituent un groupe extrêmement hétérogène rassemblé autour d'une cohérence physiologique : la photosynthèse oxygénique (Andersen, 1992). Cette famille rassemblerait de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions d'espèces selon les estimations, parmi lesquelles 47000 espèces sont décrites (Andersen et al., 1997 ; Sharma and Rai, 2011). Par comparaison, la diversité des plantes supérieures est de l'ordre de 400 000 espèces. La classification (Figure 03) de cette diversité est complexe et la taxonomie est sujette à de fréquents bouleversements du fait notamment de l'utilisation des techniques de phylogénie moléculaire.

Figure 03: Diversité des microalgues eucaryotes et procaryotes, marines et d'eau douce (Jeffrey et al., 1997 ; Sharma et Rai, 2011).

Règne	Embranchement/Classe
Procaryotes	Cyanophytes
	Prochlorophytes
Eucaryotes	Bacillariophytes
	Charophytes
	Chlorophytes
	Chrysophytes
	Cryptophytes
	Dinophytes
	Euglenophytes
	Glaucophytes
	Haptophytes
	Phaeophytes
	Rhodophytes

3. Différences entre macroalgues et microalgues :

Les microalgues sont des organismes unicellulaires qui vivent dans l'eau. Elles constituent une riche source de nutriments, notamment de protéines, de lipides, d'hydrates de carbone, de vitamines et de minéraux. Les microalgues lyophilisées sont des microalgues qui ont été déshydratées par le processus de lyophilisation. Ce processus consiste à congeler le produit et à éliminer l'eau dans un environnement sous vide. La lyophilisation permet de préserver les nutriments des microalgues sans altérer leurs propriétés organoleptiques. Contrairement aux microalgues, les macroalgues sont des plantes marines qui poussent dans

l'océan. Elles constituent une riche source de nutriments, notamment de protéines, de lipides, d'hydrates de carbone, de vitamines et de minéraux. Le processus de lyophilisation déshydrate les macroalgues, les congèle et élimine ensuite l'eau dans un environnement sous vide, préservant ainsi leurs nutriments sans altérer leurs propriétés organoleptiques. Les différences entre macroalgues et microalgues portent essentiellement sur leur taille et leur structure moléculaire (Toor et al., 2022). Les macroalgues, désignent les grandes algues et algues géantes. Elles se développent surtout dans les eaux peu profondes. Elles se fixent au fond de l'eau, grâce à leurs crampons (Toor et al., 2022).



Figure 04 : Différences entre macroalgues et microalgues (Garrote, 2023).

Les algues provenant des mers chaudes mesurent rarement plus de 30 cm, alors que celles des mers plus froides mesurent entre 1 et 10 mètres voire plus. Les plus grandes étant les macrocystis (algues brunes) qui peuvent atteindre une quarantaine de mètres (Andersen, 1992).

Les microalgues, ou algues microscopiques, composent le phytoplancton et sont à la base de la chaîne alimentaire marine. Elles flottent en pleine eau et leur taille varie, selon les espèces de quelques micromètres (μm) à quelques centaines de μm . Elles sont utilisées en aquaculture où elles sont à la base de l'alimentation de nombreux animaux d'élevage, comme les bivalves filtreurs. Elles leur apportent les vitamines et les acides gras polyinsaturés nécessaires à leur développement, qu'ils ne savent pas synthétiser eux-mêmes (Muller-Feuga et Arnaud, 2000).

4. Importance des microalgues en biotechnologie verte et durabilité :

Les microalgues intéressent des secteurs comme l'agriculture, l'aquaculture et la production de bioplastiques. Des professionnels et chercheurs européens font le pari des alternatives durables qu'elles offrent, dans la droite ligne des ambitions de l'UE. La moindre goutte d'eau de mer regorge de vie microscopique. En Europe, beaucoup pensent que l'une de ses formes, les microalgues, a le pouvoir de changer le monde, en rendant l'agriculture plus durable et en offrant des alternatives plus vertes aux plastiques. Ces minuscules organismes marins pourraient-ils nous aider à résoudre certains des plus grands défis que notre planète doit relever ? Nous rencontrons des professionnels et chercheurs en France, Portugal et Espagne qui en sont convaincus (**Brown et al., 2020**).

Almería, dans le sud de l'Espagne, est connue pour ses plages ensoleillées et son secteur agricole. La région abrite d'immenses étendues de serres, une "mer de plastique" comme on l'appelle. Un climat qui est idéal pour les microalgues, des organismes unicellulaires qui peuvent convertir la lumière du soleil, les nutriments et le CO₂ en biomolécules d'un grand intérêt (**Francisco et al., 2020**).

4.1.Des applications dans l'agriculture :

- **Culture de microalgues :**

La majorité des microalgues convertissent l'énergie solaire en utilisant du CO₂ et de l'eau pour produire de l'oxygène et de la biomasse algale (matière organique) par une réaction appelée la photosynthèse. Les microalgues sont caractérisées par un rendement photosynthétique très élevé (rapport entre l'énergie lumineuse incidente et l'énergie stockée dans la plante). Préalablement sélectionnées, les microalgues sont cultivées de manière contrôlée afin d'obtenir de grandes quantités de biomasse algale (**Amos, 2004**).

Habituellement, l'eau de mer enrichie en nutriments (comme les nitrates et les phosphates) est utilisée pour la croissance de ces microorganismes. Toutefois, le recours à de l'eau douce et saumâtre (provenant de lacs ou de rivières) est également possible (**Amos, 2004**).

Les principales méthodes de production sont :

Les bassins à ciel ouvert, peu coûteux à faire fonctionner. Néanmoins, ces systèmes ouverts voient leur productivité affectée par des contaminations microbiennes et une perte d'eau par évaporation ; Les photobioréacteurs, tubes transparents formant un système clos.

Leur coût s'avère plus élevé mais est compensé par des productivités supérieures (Wang et al., 2008).

I.2. Composition biochimique des microalgues en lien avec la cosmétique :

Les macro ou micro-algues sont principalement composées de protéines, lipides et polysaccharides et contiennent entre 35,2 % et 57 % de carbone, 24 et 35 % d'oxygène, 6 à 9 % d'hydrogène et entre 2 et 12 % d'azote, la quantité de soufre n'excède pas 1,5 %. Ces cellules photosynthétiques produisent également de nombreux pigments. On distingue cependant les micro- et macro-algues (Zou et al., 2010).

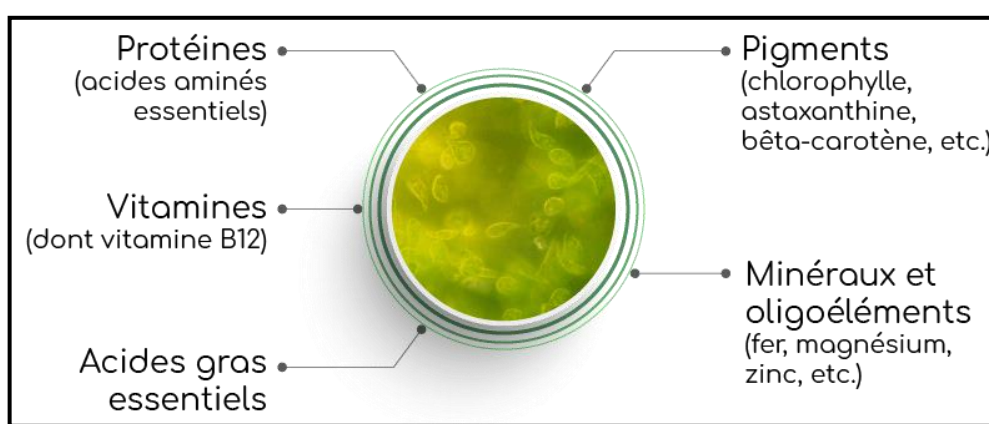


Figure 05 : Composition biochimique des microalgues (Schade et al., 2020).

- **Polysaccharides : propriétés hydratantes et filmogènes :**

Les macro-algues, le plus souvent récoltées en mer, ont généralement une quantité plus importante de polysaccharides que les micro-algues (environ 60 % contre 30-40 % pour les micro-algues). Raikova et son équipe (2019) ont regroupé toutes les HTL réalisées sur les macro-algues depuis 1988. Certaines problématiques sont spécifiques à cette ressource, comme la taille des particules pour un passage à échelle industrielle et le fait qu'elles produisent peu de lipides. Les micro-algues peuvent être d'eau douce ou marine, il existe plus de 200 000 espèces différentes et on peut distinguer les procaryotes, comme les cyanobactéries et les eucaryotes. Elles sont composées de diverses molécules valorisables aussi bien dans le domaine des cosmétiques, de la nutrition humaine ou animale et de l'énergie. Les polysaccharides issus des microalgues sont particulièrement intéressants pour leurs propriétés hydratantes et filmogènes, ce qui en fait des actifs précieux en cosmétique et en biotechnologie. Voici un aperçu de leurs principales caractéristiques :

1. Propriétés hydratantes :

Les polysaccharides des microalgues ont une grande capacité à capter et retenir l'eau, ce qui contribue à l'hydratation de la peau et des cheveux (Ying Ying Tang et al., 2020).

- Ils forment un réseau hydrophile qui limite la perte en eau transépidermique (TEWL).
- Certains, comme l'exopolysaccharide produit par *Porphyridium cruentum*, agissent comme des humectants naturels.
- Ils améliorent la souplesse et la douceur de la peau en maintenant son équilibre hydrique.

2. Propriétés filmogènes :

Ces polysaccharides forment un film protecteur à la surface de la peau ou des cheveux (Qingyuan W, et al.2024) :

- Ce film agit comme une barrière physique contre les agressions extérieures (pollution, UV, stress oxydatif).
- Il permet de protéger et réparer la barrière cutanée en évitant la déshydratation.
- Dans les formulations cosmétiques, ces films apportent un effet tenseur et lissent les ridules.

Exemples de microalgues riches en polysaccharides :

- *Chlorella vulgaris* : stimule l'hydratation et la régénération cutanée.
- *Spirulina platensis* : riche en phycocolloïdes qui forment un film protecteur.
- *Porphyridium cruentum* : contient des exopolysaccharides aux effets hydratants et anti-âge.

Grâce à ces propriétés, les polysaccharides de microalgues sont largement utilisés dans les soins hydratants, anti-âge et capillaires.

- **Peptides bioactifs de microalgues : stimulation cellulaire et régénération :**

La quantité en protéines dans les micro-algues excède la plupart du temps 50 % de la matière sèche, elle représente donc le principal constituant de la cellule. Ce sont des macromolécules composées d'acides aminés (A.A.) reliés entre eux par des liaisons peptidiques entre le groupement amine et acide. Un acide aminé est composé d'un atome de carbone lié à un groupement amine et à un groupement acide carboxylique, ce qui leur confère leur caractère basique et acide. C'est leur chaîne latérale variable qui les distingue les

uns des autres (Janus *et al.*, 2018) (Figure 05). Les acides aminés peuvent aussi être libres (non liés à une protéine) dans les cellules, ils représentent environ 40 % de l'ensemble des A.A. Ils peuvent être classés en fonction de leur polarité et de leur fonction réactionnelle en 6 groupes : les acides aminés hydroxylés (sérine (Ser), thréonine (Thr) ; aliphatiques (glycine (Gly), alanine (Ala), proline (Pro), valine (Val), isoleucine (Ileu), leucine (Leu)) ; acides (acide aspartique (Asp) et glutamique (Glu)) ; basiques (histidine (His), lysine (Lys), arginine (Arg)) ; aromatiques (tyrosine (Tyr), tryptophane (Trp), phénylalanine (Phe)) ; soufrés (cystéine (Cys), méthionine (Met)), (Janus *et al.*, 2018).

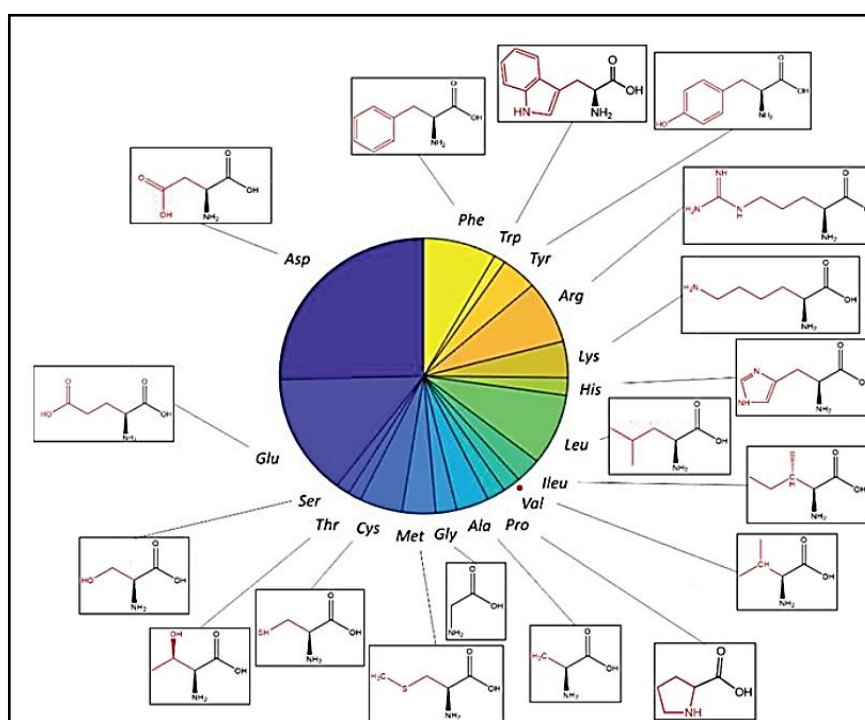


Figure 06 : Quantité en protéines dans les micro-algues (Andersen, 1992).

Les peptides bioactifs issus des microalgues sont des molécules naturelles aux propriétés remarquables pour la stimulation cellulaire et la régénération des tissus. Leur intérêt en cosmétique et en santé réside dans leur capacité à booster les mécanismes cellulaires et à favoriser la réparation cutanée.

1. Stimulation cellulaire :

Les peptides bioactifs de microalgues agissent directement sur les cellules cutanées en stimulant plusieurs processus biologiques (CHAGEN S. K.2016) :

- ❖ Activation de la production de collagène et d'élastine → Ils améliorent la fermeté et l'élasticité de la peau, retardant ainsi le vieillissement cutané.

- ❖ Augmentation de l'activité des fibroblastes → Ces cellules sont essentielles pour la régénération du derme et la cicatrisation.
- ❖ Action antioxydante et anti-inflammatoire → Ils protègent la peau du stress oxydatif et réduisent les inflammations, favorisant un teint plus éclatant.

Exemple : Les peptides extraits de *Chlorella vulgaris* activent les gènes impliqués dans la synthèse du collagène et réduisent la dégradation de la matrice extracellulaire.

2. Régénération et réparation cutanée :

Les peptides bioactifs favorisent le renouvellement cellulaire et accélèrent la cicatrisation(CHAGEN S. K.2016) :

- Réparation des tissus endommagés après des agressions extérieures (UV, pollution, blessures).
- Régénération de la barrière cutanée en renforçant la cohésion cellulaire.
- Réduction des signes de fatigue et des ridules grâce à leur effet revitalisant.

Exemple : Les peptides de *Spirulina platensis* sont connus pour leur effet anti-âge et cicatrisant, car ils stimulent les facteurs de croissance cellulaire.

3. Exemples d'utilisation en cosmétique et en santé :

- Soins anti-âge (crèmes raffermissantes, sérums régénérants).
- Produits cicatrisants et apaisants pour les peaux sensibles.
- Compléments alimentaires pour la régénération cellulaire globale.

Grâce à leurs effets stimulants et réparateurs, les peptides bioactifs de microalgues sont devenus des ingrédients de choix dans les formulations cosmétiques et les produits de soins avancés.

- **Pigments bioactifs (chlorophylles, caroténoïdes, phycobiliprotéines) :**

D'autres composés comme Les pigments bioactifs présents en moindre quantité mais important vis-à-vis de leur composition en azote sont retrouvés dans les micro-algues. Les acides nucléiques qui peuvent être sous forme d'ADN ou d'ARN, représentent environ 3 à 6 % de la composition de l'algue. Ils sont composés d'un assemblage de monomère appelés nucléotides reliés par des liaisons phosphodiester et composés d'une base azoté (variable) lié

à un sucre à 5 carbones et à une unité phosphate (*Schade et al., 2020*) (**Figure 06**) Leur stabilité a été étudiée à 250 °C, l'ADN est hydrolysé dans un premier temps puis une décomposition des nucléotides a lieu. La liaison N-glycosyl de l'adénine est la plus fragile elle est donc facilement détruite.

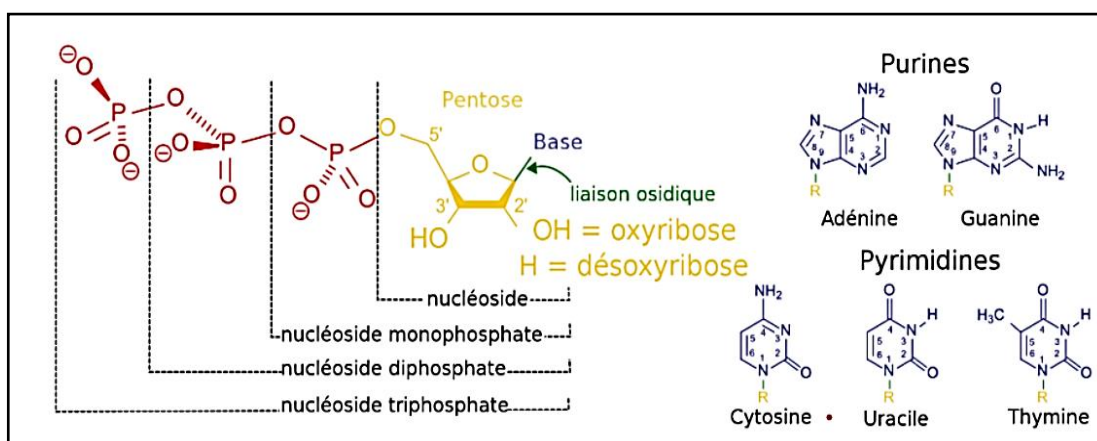


Figure 06 : Pigments bioactifs (*Schade et al., 2020*).

❖ Structure chimique d'un nucléotide (monomère d'acide nucléique) :

Les pigments bioactifs des microalgues ne sont pas seulement des colorants naturels, mais aussi des molécules aux propriétés antioxydantes, photoprotectrices et anti-inflammatoires. Ils jouent un rôle clé dans la protection cellulaire et la santé cutanée, ce qui en fait des actifs intéressants pour l'industrie cosmétique, alimentaire et pharmaceutique. Alors les microalgues sont également composées de pigments nécessaires à la photosynthèse. Ils permettent de capter la lumière à une longueur d'onde bien spécifique et de fournir l'énergie nécessaire à la vie cellulaire. Ils sont divisés en trois catégories : les chlorophylles, les caroténoïdes et les phycobiliprotéines (*Schade et al., 2020*).

1- La chlorophylle :

Les chlorophylles sont des pigments verts responsables de la photosynthèse (**Françoise, 2008**)

. Elles possèdent des propriétés antioxydantes puissantes et aident à éliminer les toxines du corps. La chlorophylle a est retrouvée dans tous les organismes photosynthétiques contrairement aux chlorophylles b, c et d, présentes seulement dans certaines espèces. Les chlorophylles sont composées d'un métal (Mg^{2+}) stabilisé par un cycle tétrapyrrole et diffèrent par leur chaîne latérale (**Anonyme II, 2012**)

Bienfaits :

- Neutralisent les radicaux libres et ralentissent le vieillissement cutané.
- Favorisent la cicatrisation et la régénération de la peau.
- Améliorent l'oxygénation cellulaire et la microcirculation.

Exemple : La chlorelle (*Chlorella vulgaris*) est riche en chlorophylle et utilisée pour ses effets détoxifiants et revitalisants sur la peau.

2- Caroténoïdes :

- Les caroténoïdes (β -carotène, astaxanthine, lutéine, etc.) sont des pigments jaunes, orange et rouges aux fortes propriétés photoprotectrices et anti-inflammatoires (**EFSA, 2016**).
- Protection contre les UV en réduisant les dommages causés par le soleil.
- Stimulation de la production de collagène, contribuant à l'élasticité de la peau.
- Effet bonne mine en améliorant l'éclat du teint.

Exemple : L'astaxanthine, extraite de *Haematococcus pluvialis*, est un antioxydant 6000 fois plus puissant que la vitamine C, idéale pour lutter contre le stress oxydatif et les rides.

3- phycobiliprotéines :

Les phycobiliprotéines incluent la phycocyanine, la phycoérythrine, la phycoérythrocyanine et l'allophycocyanine. Ces pigments, essentiellement retrouvés dans les algues rouges et les cyanobactéries (donc non présents dans les Chlorelles) sont composés de protéines et de chromophores, appelés phycobilines qui définissent le type de phycobiliprotéine. Par exemple, la phycocyanine et la phycoérythrine, ont tous deux une structure hexamérique avec des unités phycocyanobiline et phycoérythrobiline, respectivement. Contrairement aux chlorophylles, les phycobilines sont des tétrapyrroles non cycliques comme représenté en **figure 08** ci-dessous (**Sekar S., Chandramohan M.2008**):

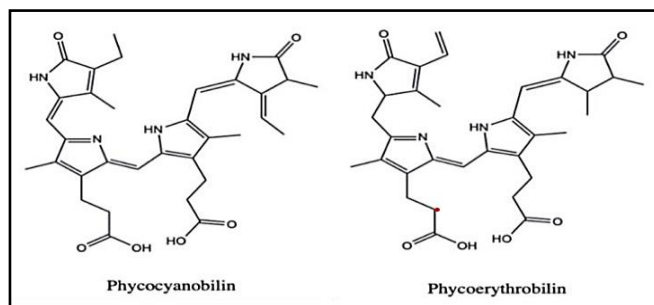


Figure 08 : Structure de la phycocyanobiline et de la phycoérythrobiline.

Les composés inorganiques Les micro-algues sont également riches en composés inorganiques, les composés suivants peuvent être retrouvés : P, K, Mg, Ca, S, Fe, Cu, Mn, Zn, Mo, Na, Co, V, Si, Cr, Cd, Cl, B, sachant que les micronutriments essentiels à toutes les micro-algues sont le fer, le manganèse, le cuivre, le zinc, le nickel, le potassium, le calcium et le silicium. Ils sont essentiellement apportés par le milieu de culture et représentent dans les micro-algues environ 2 à 5 % de la composition.

- **Métabolites secondaires : rôle dans la protection contre les agressions extérieures**

Les microalgues contiennent des métabolites secondaires tels que des polyphénols, des stérols et des terpènes, qui contribuent à sa bioactivité globale. Des composés polyphénoliques, notamment des catéchines et des acides chlorogéniques, ont été identifiés chez *C. vulgaris* et sont connus pour leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et antidiabétiques. Ces métabolites secondaires, bien que présents en plus petites quantités, améliorent considérablement le potentiel thérapeutique de *C. vulgaris* (Sekar S., Chandramohan M.2008).

Les microalgues produisent une large gamme de métabolites secondaires qui leur permettent de survivre dans des environnements extrêmes et de se protéger contre diverses agressions extérieures. Parmi ces composés, les caroténoïdes comme l'astaxanthine et le β -carotène possèdent de puissantes propriétés antioxydantes et photoprotectrices, aidant à neutraliser les radicaux libres et à limiter les dommages causés par les UV. D'autres molécules, comme les mycosporines-like amino acids (MAAs), agissent comme de véritables filtres solaires naturels, absorbant les rayonnements ultraviolets et protégeant ainsi les cellules des mutations et du vieillissement prématuré (Sekar S., Chandramohan M.2008).

En parallèle, certains sulfatés de polysaccharides extraits de microalgues comme *Porphyridium* possèdent des propriétés antivirales et antimicrobiennes, renforçant ainsi la barrière cutanée contre les infections. De plus, les phycobiliprotéines, telles que la phycocyanine issue de la spiruline, jouent un rôle essentiel dans la réduction de l'inflammation et la régénération cellulaire. Certaines microalgues, comme *Chlorella vulgaris*, ont également la capacité d'absorber et de neutraliser les métaux lourds et polluants, contribuant ainsi à la détoxification de la peau et de l'organisme. Grâce à ces propriétés protectrices et réparatrices, les métabolites secondaires des microalgues sont aujourd'hui largement exploités en cosmétique, en dermatologie et en biotechnologie, notamment dans les soins anti-âges, les crèmes solaires naturelles et les traitements détoxifiants.

I.3. *Chlorella vulgaris* : caractéristiques et intérêt cosmétique :

C. vulgaris est une microalgue verte unicellulaire reconnue pour sa composition chimique riche et complexe, ce qui la rend très précieuse dans divers secteurs, notamment l'agroalimentaire, la pharmacie, les nutraceutiques et l'alimentation animale (Algaktiv, 2023). *Chlorella vulgaris* est une microalgue appartenant à l'ordre des Chlorococcales, de la famille des Oocytaceae, du genre *Chlorella*. Sa couleur verte est due aux chloroplastes qu'elle contient. Sa forme est sphérique et sa taille varie de 1 à 10 microns. Outre la chlorophylle, cette microalgue contient une quantité importante de protéines intracellulaires, de glucides, de lipides, de vitamine C, de β -carotènes et de vitamines B (B1, B2, B6 et B12). C'est pourquoi elle est couramment utilisée pour la préparation de compléments alimentaires, la production de cosmétiques, les traitements cliniques et même la détoxification des métaux lourds dans les eaux usées. C'est pourquoi la présente analyse aborde la morphologie de la microalgue *C. vulgaris* et les récentes recherches sur ses métabolites primaires et secondaires.

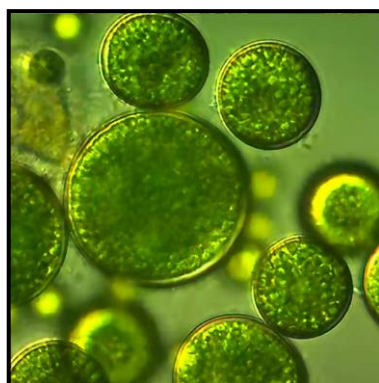


Figure 09 : *Chlorella vulgaris* (Algaktiv, 2023).

Des essais cliniques ont suggéré qu'une supplémentation en *C. vulgaris* pouvait améliorer l'hyperlipidémie et l'hyperglycémie, et protéger contre le stress oxydatif, le cancer et la bronchopneumopathie chronique obstructive. Sur le plan cosmétique, *Chlorella vulgaris* est reconnue pour ses propriétés régénérantes, antioxydantes et détoxifiantes. Sa richesse en chlorophylle lui confère un fort pouvoir purifiant, aidant à éliminer les toxines et à oxygéner les cellules de la peau. De plus, ses peptides et polysaccharides stimulent la synthèse du collagène et de l'élastine, améliorant ainsi la fermeté et l'élasticité cutanée, tout en réduisant l'apparence des rides et ridules. Grâce à ses propriétés anti-inflammatoires et cicatrisantes,

elle est également utilisée dans les soins apaisants pour les peaux sensibles ou sujettes aux rougeurs(Algaktiv, 2023).

Son utilisation en cosmétique s'étend aux soins anti-âges, hydratants et détoxifiants, ainsi qu'aux produits pour peaux acnéiques en raison de son action purifiante. Intégrée dans des crèmes, sérums ou masques, *Chlorella vulgaris* apporte un effet revitalisant et protecteur, renforçant la barrière cutanée contre les agressions extérieures comme la pollution et le stress oxydatif(Algaktiv, 2023).

1) Spécificités biochimiques et métaboliques de *Chlorella vulgaris* :

Chlorella vulgaris est une microalgue unicellulaire caractérisée par une composition biochimique riche et diversifiée, qui lui confère un fort potentiel en biotechnologie, nutrition et cosmétique. Sur le plan biochimique, elle contient environ 50 à 60 % de protéines (Safi, C. ; et al;2014), ce qui en fait l'une des sources végétales les plus riches en acides aminés essentiels. Elle est également une excellente source de vitamines (B12, C, E, provitamine A) (Orusmurzaeva, et al;2022), de minéraux (fer, magnésium, zinc) et d'acides gras essentiels (oméga-3 et oméga-6) (Panahi, Y et al;2016).

, qui jouent un rôle clé dans le métabolisme cellulaire et la régénération des tissus. D'un point de vue métabolique, *Chlorella vulgaris* se distingue par sa capacité à effectuer une photosynthèse très efficace grâce à sa teneur élevée en chlorophylle, qui favorise l'oxygénation cellulaire et la détoxification. Elle produit également des polysaccharides et des peptides bioactifs qui stimulent la synthèse du collagène et renforcent la barrière cutanée. Par ailleurs, elle synthétise des métabolites secondaires aux propriétés antioxydantes, comme les caroténoïdes (lutéine, β -carotène) et des composés phénoliques, qui protègent contre le stress oxydatif et les dommages environnementaux. Grâce à ces spécificités biochimiques et métaboliques, *Chlorella vulgaris* est largement exploitée pour ses bénéfices en cosmétique, santé et nutrition, notamment pour ses effets anti-âges, détoxifiants et réparateurs.

2) Conditions optimales de culture et bioproduction industrielle de *Chlorella vulgaris* :

La culture de *Chlorella vulgaris* nécessite des conditions spécifiques pour maximiser sa croissance et sa production de biomasse. Elle peut être cultivée en systèmes ouverts

(bassins, raceways) ou en bioréacteurs fermés, qui offrent un meilleur contrôle des paramètres environnementaux et une production plus homogène (Wang et al., 2017).

1. Conditions optimales de culture :

▪ Lumière :

Chlorella vulgaris étant une microalgue photosynthétique, elle nécessite une intensité lumineuse optimale d'environ 100-300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, avec un spectre adapté (lumière blanche ou bleue/rouge pour optimiser la photosynthèse) (Guéret, 2004).

- **Température** : La croissance optimale se situe entre 25 et 30°C. Une température trop basse ralentit la croissance, tandis qu'une chaleur excessive (>35°C) peut endommager les cellules(Guéret, 2004)..
- **pH** : Un pH légèrement alcalin, entre 6,5 et 8, est idéal pour son développement. Un pH trop acide ou trop basique peut inhiber la croissance(Guéret, 2004)..
- **CO₂ et aération** : L'apport en dioxyde de carbone (CO₂) est essentiel pour la photosynthèse et la production de biomasse. Une concentration de 0,5 à 2 % de CO₂ dans l'air injecté favorise la croissance. Une bonne agitation et aération sont également nécessaires pour éviter la sédimentation des cellules(Guéret, 2004)..
- **Nutriments** : *Chlorella vulgaris* a besoin de sources de carbone (CO₂ ou acétate), d'azote (nitrates, urée), de phosphore (phosphates) et d'oligo-éléments (fer, magnésium, zinc, cuivre) pour sa croissance(Guéret, 2004).

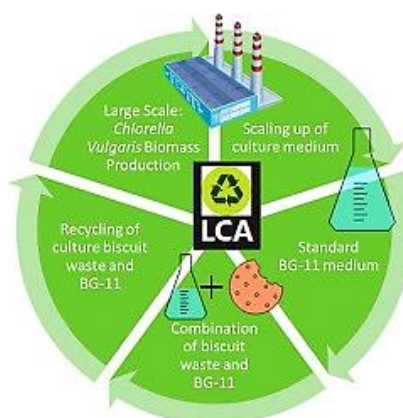


Figure 10 : Conditions optimales de culture (Algaktiv, 2023).

2. Bioproduction industrielle :

À l'échelle industrielle, *Chlorella vulgaris* est cultivée principalement pour l'alimentation humaine et animale, les cosmétiques, la pharmacutique et les biocarburants. La production suit plusieurs étapes :

1. Culture en conditions contrôlées dans des photobioréacteurs ou bassins ouverts.
2. Récolte par centrifugation ou floculation pour concentrer la biomasse.
3. Séchage (spray drying ou lyophilisation) pour préserver les composants bioactifs.
4. Extraction des composés d'intérêt (protéines, pigments, polysaccharides, acides gras).

Les systèmes de photobioréacteurs fermés sont de plus en plus utilisés pour garantir une production stable, pure et exempte de contaminations, tout en optimisant le rendement et la qualité des produits dérivés de *Chlorella vulgaris* (Yu et Zhang, 2011).

3) Développement de souches améliorées de *Chlorella vulgaris* pour des applications cosmétiques ciblées :

L'amélioration des souches de *Chlorella vulgaris* est un domaine clé pour optimiser ses propriétés bioactives et répondre aux besoins spécifiques de l'industrie cosmétique. Grâce aux avancées en biotechnologie, des techniques de sélection, mutagenèse et ingénierie génétique permettent d'augmenter la production de molécules d'intérêt comme les antioxydants, polysaccharides, peptides et pigments naturels (Ghobrini et al., 2014).

1. Objectifs d'amélioration des souches pour la cosmétique :

- Augmenter la production d'antioxydants (ex. caroténoïdes, chlorophylle, composés phénoliques) pour une meilleure protection contre le stress oxydatif et le vieillissement cutané.
- Optimiser la biosynthèse des peptides bioactifs stimulant la régénération cellulaire et la synthèse du collagène.
- Renforcer la production de polysaccharides sulfatés aux propriétés hydratantes et filmogènes, idéales pour les soins de la peau.

- Maximiser la teneur en acides gras essentiels (oméga-3, oméga-6) pour une action nourrissante et protectrice contre les agressions extérieures.
- Améliorer la tolérance aux stress environnementaux (UV, salinité) pour des formulations plus efficaces en protection solaire et anti-pollution.

2. Méthodes d'amélioration des souches :

- Sélection et mutagenèse dirigée : Induction de mutations (UV, produits chimiques) pour sélectionner des souches hyperproductrices de métabolites cosmétiques.
- Optimisation des conditions de culture : Ajustement de la lumière, du CO₂ et des nutriments pour stimuler la production des composés ciblés.
- Ingénierie métabolique et CRISPR-Cas9 : Modification des voies biosynthétiques pour améliorer la production de molécules d'intérêt, comme l'astaxanthine ou la phycocyanine.

3. Applications cosmétiques des souches améliorées :

- **Soins anti-âges** : Souches enrichies en antioxydants pour protéger la peau des radicaux libres.
- **Crèmes hydratantes et apaisantes** : Polysaccharides améliorés pour un effet filmogène et protecteur.
- **Produits solaires naturels** : Algues optimisées pour produire plus de MAAs (filtres UV naturels).
- **Sérums revitalisants et cicatrisants** : Peptides et acides gras renforçant la régénération cutanée (Ghobrini et al., 2014).

Enfin, les microalgues s'imposent comme des ingrédients clés pour répondre aux enjeux actuels de naturalité, durabilité et performance, en offrant des alternatives respectueuses de l'environnement aux ingrédients synthétiques. Leur potentiel reste encore largement exploré, ouvrant la voie à de nouvelles innovations dans de nombreux secteurs industriels. Avec les avancées en biotechnologie et en ingénierie métabolique, *Chlorella vulgaris* représente un atout majeur pour l'industrie cosmétique, offrant une alternative efficace, naturelle et respectueuse de l'environnement aux ingrédients synthétiques. Son potentiel continue d'être exploré pour répondre aux nouvelles attentes des consommateurs en quête de produits sains et durables, intégrant les bienfaits des microalgues dans des formulations innovantes et performantes (Wang et al., 2017).

I.4. la SPIRULINE

1. Définition

La SPIRULINE est une algue unie ou multicellulaire appartenant au groupe de cyanobactéries (utiliser l'énergie de la lumière pour la photosynthèse), elle vit en eau salée, alcaline et chaude de température environ 30°C à 40°C. Son nom dérive de la configuration physique hélicoïdale et spiralée de ses filaments. Ces derniers prennent la forme hélicoïde quand l'environnement est favorable (**Audrey MANET**)

La SPIRULINE possède une morphologie proche celle des algues, et sa teneur en pigments vert et bleu fait les classer parmi les algues bleu-vert (**Jarisoa, 2005.**)

En effet, elle est longtemps restée classée parmi « les algues bleu-vert », ce pour plusieurs raisons (**Hélène CRUCHOT2008**)

La présence d'un système photosynthèse producteur d'oxygène.

- Son morphologie proche de celle des algues.
- Son habitat aquatique. Son aptitude à développer des biomasses importantes.
- Sa couleur liée à sa teneur en pigments bleu (phycocyanine) et vert (chlorophylle).

2. Les compositions chimiques de la SPIRULINE

La SPIRULINE contient les éléments suivants (**HIRI Abdelkader**) : Des enzymes : possèdent une action anti-inflammatoire, protègent des bactéries et des virus, facilitant la digestion et régulant les fonctions hépatiques. • Des vitamines : la SPIRULINE contient les vitamines A, E (biotine), B1, B3, B5, B6, B8, B9 (acide folique), et aussi la vitamine B12. Des acides aminés : elle contient environ 20 acides aminés, parmi ces acides aminés en trouvant : l'acide aspartique, la proline, la théanine, l'isoleucine, la leucine, la sérine, la lysine, l'arginine et l'acide glutamique. Des pigments : elle contient des caroténoïdes et de la chlorophylle, du superoxyde et de puissants antioxydants. De l'acide silicique : elle possède une action antibactérienne. De l'antraquinone : c'est le seul pigment naturel de couleur bleu qui peut servir comme colorant alimentaire. L'antraquinone : (appartient à la famille

chimique des hydrocarbures aromatiques polycyclique), la spiruline possède une importance antibactérienne et une action antivirale. Du saccharide De la saponine De la cellulose.

3. Classification taxonomique

La classification de SPIRULINE est décrite comme suit (**Audrey MANET.2016**)

Règne	Monera
Sous règne	Procarvota
Phylum	Cyanophvta
Classe	Cyanophyceae
Ordre	Nastocales
Famille	Oscillatoriacées
Genre	Arthrospira stizenberger ou Spirulina Turpin

Tableau 1: position systématique du genre Spiruline (Audrey MANET)

Chapitre II.

Propriétés bioactives de *Chlorella vulgaris* et son potentiel cosmétique

II.1. Activités biologiques générales des microalgues en cosmétique :

A. Antioxydation et neutralisation des radicaux libres :

▪ **Antioxydante :**

La Chlorelle contribuerait à prévenir le vieillissement prématuré de la peau du fait de sa teneur en antioxydants.

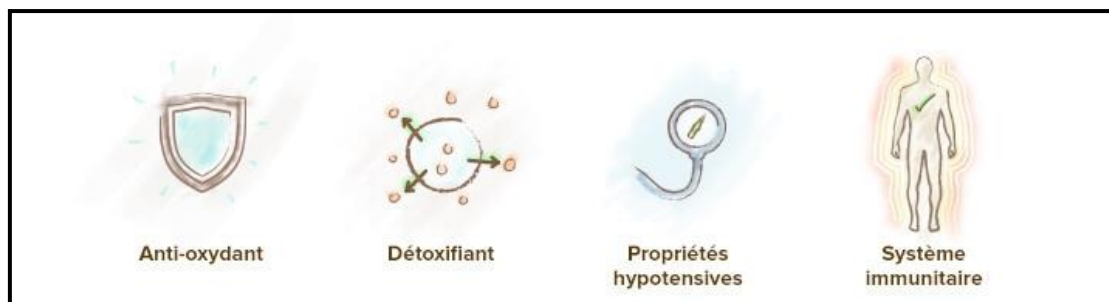


Figure 11 : Neutralisation des radicaux libres.

La chlorelle contient de nombreux composés antioxydants. Leur activité antioxydante est particulièrement intéressante pour lutter contre le stress oxydatif et les dommages causés par les radicaux libres. Une étude scientifique a d'ailleurs confirmé l'intérêt d'une supplémentation en chlorelle pour assurer un apport optimal en nutriments antioxydants. Menée sur des fumeurs masculins, cette étude a également révélé une amélioration de l'activité antioxydante de plusieurs enzymes dont l'érythrocyte catalase et la superoxide dismutase (**Yu et Zhang, 2011**). Les antioxydants présents dans la Chlorella, tels que la chlorophylle, aident à neutraliser les radicaux libres responsables du vieillissement prématuré de la peau. Cela contribue à une peau plus radieuse et à un teint éclatant.

▪ **Détoxification :**

Au-delà de son pouvoir antioxydant naturel, la chlorelle est connue pour son action détoxifiante. Cette activité bénéfique a été étudiée par de nombreux chercheurs à travers le monde. Leurs travaux ont montré que cette algue favoriserait l'activité normale du foie. Or, celui-ci joue un rôle clé pour détoxifier l'organisme. Certaines études suggèrent que la microalgue pourrait également être bénéfique pour lutter contre l'accumulation de métaux lourds tels que l'arsenic, le mercure et le chromium. Des études complémentaires sont actuellement en cours pour confirmer ces résultats.

B. Hydratation et maintien de l'équilibre hydrolipidique :

Certains utilisateurs de la *Chlorella* rapportent une amélioration de l'hydratation de la peau après sa consommation régulière. Les acides gras essentiels présents dans la *Chlorella* contribuent à maintenir la barrière cutanée et à prévenir la déshydratation. Si cela vous séduit, découvrez sans attendre un de nos best-seller, la Crème Sublime Repulp. Des chercheurs attribuent des propriétés hypotensives à la *chlorella*. D'après leurs travaux, cette algue pourrait contribuer à la régulation de la pression artérielle. Cette microalgue pourrait ainsi s'avérer bénéfique en cas d'hypertension artérielle. Des résultats positifs ont d'ailleurs été obtenus lors d'une supplémentation en GABA, associé à la chlorelle, auprès de personnes hypertendues.

C. Effets anti-inflammatoires et protection cellulaire :

Certains composés de la *Chlorella* ont montré des effets anti-inflammatoires. Une réduction de l'inflammation contribue à une peau plus calme et moins sujette à l'irritation. La *Chlorella* en raison de son effet anti-inflammatoire (lié à la chlorophylle et aux polysaccharides) pourrait aider à prévenir les maladies chroniques liées à une inflammation de bas grade telles que les maladies cardiovasculaires, le diabète de type 2, l'obésité, les maladies neurodégénératives, dépression, certains cancers. La *Chlorella* aiderait à lutter contre la constipation grâce à ses fibres qui favorisent le transit telles que le β -glucane qui est métabolisé en acides gras à chaîne courte (AGCC) comme le propionate et le butyrate. Ces AGCC sont connus pour avoir des effets bénéfiques sur la santé de l'hôte, grâce à leur effet sur le microbiote intestinal. La *Chlorella* permettrait également d'améliorer les symptômes du côlon irritable et d'autres maladies chroniques inflammatoires de l'intestin (ou MICI), (Janus et al., 2018).

II.2. Activités spécifiques de *Chlorella vulgaris* sur la peau :

a. Effet anti-âge des microalgues : stimulation de la synthèse de collagène et d'élastine :

Par voie topique, elle améliorerait la synthèse de collagène au niveau des fibroblastes humains, et donc par conséquent la structure et la tonicité de la peau. Elle préviendrait la dégradation des fibres d'élastine, améliorant alors l'élasticité et la fermeté de la peau (Morvan, 2007).

Les microalgues sont devenues des ingrédients phares dans les soins anti-âge grâce à leur capacité à stimuler la synthèse de collagène et d'élastine, deux protéines fondamentales pour maintenir la fermeté, l'élasticité et la jeunesse de la peau (Yu et Zhang, 2011).

1. Stimulation de la synthèse de collagène et d'élastine :

Certaines microalgues, comme *Chlorella vulgaris* ou *Dunaliella salina*, contiennent des peptides bioactifs et des acides aminés essentiels qui activent les fibroblastes, cellules responsables de la production de collagène et d'élastine dans le derme. Des études ont montré que des extraits de *Chlorella vulgaris* augmentent l'expression des gènes codant pour le collagène de type I, favorisant ainsi une peau plus ferme et tonique. La présence de vitamine C naturelle, de caroténoïdes (comme la lutéine ou l'astaxanthine) et de polyphénols renforce cet effet en neutralisant les radicaux libres responsables de la dégradation des fibres de soutien de la peau (Chloé, 2022).

2. Prévention du vieillissement cutané :

En protégeant les fibres de collagène et d'élastine contre la dégradation enzymatique (notamment par inhibition des enzymes comme la collagénase ou l'élastase), les microalgues ralentissent visiblement le vieillissement cutané. Elles améliorent également la microcirculation cutanée, favorisant l'apport en nutriments et en oxygène aux cellules de la peau agit sur la microcirculation cutanée : ce qui a pour conséquence de favoriser un drainage lymphatique, de diminuer la survenue des cernes et de conserver un teint lisse et unifié (Chloé, 2022).

b. Rôle des microalgues dans l'hydratation profonde et le renforcement de la barrière cutanée :

Les microalgues jouent un rôle essentiel dans l'hydratation de la peau et le renforcement de la barrière cutanée, grâce à leur richesse en composés bioactifs naturels comme les polysaccharides, acides aminés, lipides et minéraux. Ces molécules agissent en synergie pour maintenir l'équilibre hydrique de la peau, améliorer sa texture et la protéger des agressions extérieures.

1. Hydratation profonde :

- Les polysaccharides sulfatés produits par certaines microalgues forment un film protecteur non occlusif à la surface de la peau, qui limite la perte en eau tout en laissant la peau respirer.
- Ils attirent et retiennent l'eau dans les couches supérieures de l'épiderme, assurant une hydratation longue durée.
- Des microalgues comme *Chlorella vulgaris* ou *Spirulina platensis* sont riches en acides aminés et sucres complexes, qui participent à la réhydratation des cellules cutanées en profondeur.

2. Renforcement de la barrière cutanée :

- Les peptides et lipides extraits de microalgues stimulent la synthèse des céramides, essentiels pour restaurer la fonction barrière de l'épiderme.
- Ils renforcent la cohésion cellulaire et la résistance de la peau aux agressions (pollution, UV, stress oxydatif).
- Certaines microalgues activent également la production de protéines structurales comme le collagène et l'élastine, améliorant la fermeté et l'élasticité de la peau.

3. Résultat cosmétique :

- Une peau mieux hydratée, plus souple et lumineuse.
- Une diminution des sensations de tiraillement, sécheresse et inconfort.
- Une peau renforcée, plus résistante aux agressions extérieures et au vieillissement prématuré.

c. Protection contre les UV, la pollution et le stress oxydatif :

La Chlorella a des propriétés antioxydantes qui permettent de diminuer les effets du stress oxydatif sur la peau qui entraîne l'apparition d'altérations du fonctionnement des cellules de la peau, fibroblastes et mélanocytes. La Chlorella diminue, par conséquent, le risque de vieillissement prématuré de la peau qui en subissant les effets oxydants des rayonnements UV ou autre (fumée de cigarette, etc) s'altère en vieillissant avec l'apparition de rides et de taches cutanées. Par ailleurs, en raison de ses propriétés détoxifiantes et anti-inflammatoires, la Chlorophylle pourrait réduire les symptômes de certaines maladies de peau

avec inflammation comme la dermatite atopique ou l'eczéma. La Chlorella, grâce à sa richesse en micronutriments essentiels pour la matrice du bulbe capillaire, pourrait aider à renforcer le cheveu et à améliorer sa vitalité et sa brillance. Ses propriétés antioxydantes permettent de diminuer le risque oxydatif contribuant à sa dégénérescence et à l'apparition de cheveux abîmés, frisottés, plus fins et blancs. Son action détoxifiante sur le cuir chevelu permet d'éliminer les substances perturbatrices endocriniennes à l'origine d'un déséquilibre hormonal pouvant entraîner une perte des cheveux, notamment une alopécie androgénique (Janus et al., 2018). Les microalgues développent naturellement des mécanismes de défense puissants pour survivre à des environnements extrêmes. Ces capacités se traduisent par des propriétés protectrices exceptionnelles pour la peau, en particulier contre les rayons UV, la pollution atmosphérique et le stress oxydatif (Janus et al., 2018).

❖ Protection contre les UV :

- Certaines microalgues, comme Porphyridium ou Anabaena, produisent des acides aminés de type MAAs (Mycosporine-Like Amino Acids) qui agissent comme de filtres solaires naturels, absorbant les rayons UV et protégeant les cellules des dommages causés par l'exposition solaire.
- Les caroténoïdes, comme l'astaxanthine, la lutéine ou le β -carotène, offrent également une photoprotection cellulaire en neutralisant les radicaux libres générés par les UV.
- Ces composés réduisent l'inflammation, les rougeurs et préviennent la dégradation du collagène.

❖ Protection contre la pollution :

- Les polysaccharides sulfatés produits par certaines microalgues forment un film protecteur à la surface de la peau, empêchant l'adhésion des particules fines, des métaux lourds et autres polluants.
- Ce bouclier naturel prévient la pénétration des toxines environnementales qui altèrent la fonction barrière et accélèrent le vieillissement cutané.

❖ Action antioxydante contre le stress oxydatif :

- Les microalgues sont riches en molécules antioxydantes puissantes (vitamine E, C, caroténoïdes, polyphénols, phycobiliprotéines) qui neutralisent les radicaux libres, responsables de l'oxydation cellulaire.

- Cette action antioxydante protège les lipides membranaires, l'ADN cellulaire et les protéines structurales de la peau, ralentissant ainsi le processus de vieillissement prématuré.

❖ Résultat cosmétique :

- Peau mieux protégée, plus résistante aux agressions environnementales.
- Réduction des taches pigmentaires, des rides précoces et des signes de fatigue.
- Teint plus uniforme, éclatant et peau visiblement plus saine.

II.3. Évaluation scientifique des effets cosmétiques des microalgues :

L'intérêt croissant pour les microalgues dans le domaine cosmétique s'accompagne de nombreuses études scientifiques visant à évaluer leur efficacité, leur tolérance et leur potentiel d'intégration dans des formules innovantes et brevetées. Cette évaluation repose sur des recherches *in vitro*, *in vivo*, ainsi que sur des tests cliniques et des analyses de la perception sensorielle des utilisateurs (Janus *et al.*, 2018).

✓ Études récentes *in vitro* et *in vivo* :

Les études *in vitro* ont permis d'observer que des extraits de *Chlorella vulgaris* stimulent la prolifération des fibroblastes et la synthèse de collagène, confirmant leur effet anti-âge. D'autres travaux montrent une inhibition de l'élastase (enzyme qui dégrade l'élastine) et une activité antioxydante marquée par la neutralisation des radicaux libres (DPPH, ROS). Des études *in vivo* sur des modèles animaux ou humains démontrent une amélioration visible de l'hydratation cutanée, une réduction des rides et une augmentation de l'élasticité après l'application topique d'extraits de microalgues sur plusieurs semaines.

✓ Tests cliniques et perception sensorielle des formulations :

- Des tests cliniques sur volontaires ont confirmé la bonne tolérance cutanée des ingrédients à base de microalgues, même sur les peaux sensibles.

• L'analyse de la perception sensorielle (texture, absorption, confort, parfum) révèle une bonne acceptation par les utilisateurs : les formulations sont souvent jugées fraîches, légères, non grasses et apaisantes.

- Certaines études rapportent un effet apaisant immédiat, une sensation de peau lissée, et une amélioration du teint après seulement quelques jours d'utilisation.

✓ **Intégration dans des formulations brevetées :**

- Plusieurs laboratoires cosmétiques ont développé des brevets intégrant des extraits de microalgues dans des formules anti-âge, hydratantes, anti-pollution ou protectrices UV.

Exemples :

Un sérum anti-âge breveté à base de *Chlorella vulgaris* associée à l'acide hyaluronique pour renforcer la synthèse de collagène. Une crème urbaine anti-pollution intégrant des polysaccharides de microalgues formant un film protecteur contre les particules fines. Des formulations solaires naturelles enrichies en MAAs (acides aminés mycosporine-like) issus de microalgues, brevetées comme filtres UV biodégradables (Yang et al., 2016).

Chapitre III.

Technologies modernes pour l'extraction et l'incorporation de *Chlorella vulgaris* en cosmétique

III.1. Procédés d'extraction avancés des bioactifs de *Chlorella vulgaris* :

A. Extraction enzymatique et son rôle dans l'obtention de peptides bioactifs :

-Extraction conventionnelle selon la méthode de Bligh et Dyer (lipides totaux)

L'extraction conventionnelle des lipides totaux a été réalisée selon la méthode de Bligh et Dyer (1959), considérée comme une méthode de référence. Pour ce faire, 100 mg de biomasse de microalgues (contenant 20 % de matière sèche) sont homogénéisés avec 3 mL d'un mélange méthanol/chloroforme (2:1, v/v). L'ensemble est agité pendant 10 minutes. Ensuite, 1 mL de chloroforme pur ainsi que 0,8 mL d'une solution de chlorure de potassium à 0,8 % (m/v) sont ajoutés afin d'induire la séparation des phases. Le mélange est à nouveau agité pendant 10 minutes, puis centrifugé à 4000 tr/min pendant 5 minutes à 4 °C. Après centrifugation, la phase inférieure (chloroformique), contenant les lipides, est soigneusement récupérée. Elle est ensuite utilisée pour des analyses chromatographiques, notamment la chromatographie sur couche mince haute performance (HPTLC) et la chromatographie en phase gazeuse (CPG).

-Extraction par Soxhlet au n-hexane et solvants alternatifs

Une seconde méthode d'extraction des lipides a été réalisée par extraction continue selon Soxhlet, décrite initialement par F. Soxhlet (1879). Environ 10,0 g de biomasse sèche sont placés dans une cartouche en cellulose (30 mm × 80 mm, Macherey-Nagel). Le dispositif Soxhlet est monté sur un ballon de 500 mL contenant 300 mL de solvant, surmonté d'un réfrigérant à reflux. L'extraction est conduite pendant 8 heures de chauffage à reflux, conformément à la norme ISO 659:1988. À la fin du processus, le solvant est évaporé sous pression réduite à l'aide d'un rotavapor, et le résidu lipidique est séché puis pesé. Dans le cas des solvants terpéniques, l'évaporation est réalisée par distillation azéotropique. Pour cela, le système Soxhlet est remplacé par une verrerie de type Clevenger (**Figure 12**). Une quantité d'eau distillée est ajoutée au mélange terpènes/lipides, puis le système est chauffé. Le solvant terpénique est entraîné par la vapeur d'eau et condensé dans un récepteur séparateur, permettant la récupération du solvant (moins dense) séparé des lipides (plus denses), lesquels restent dans le ballon (**Zighmi souad 2017**) .

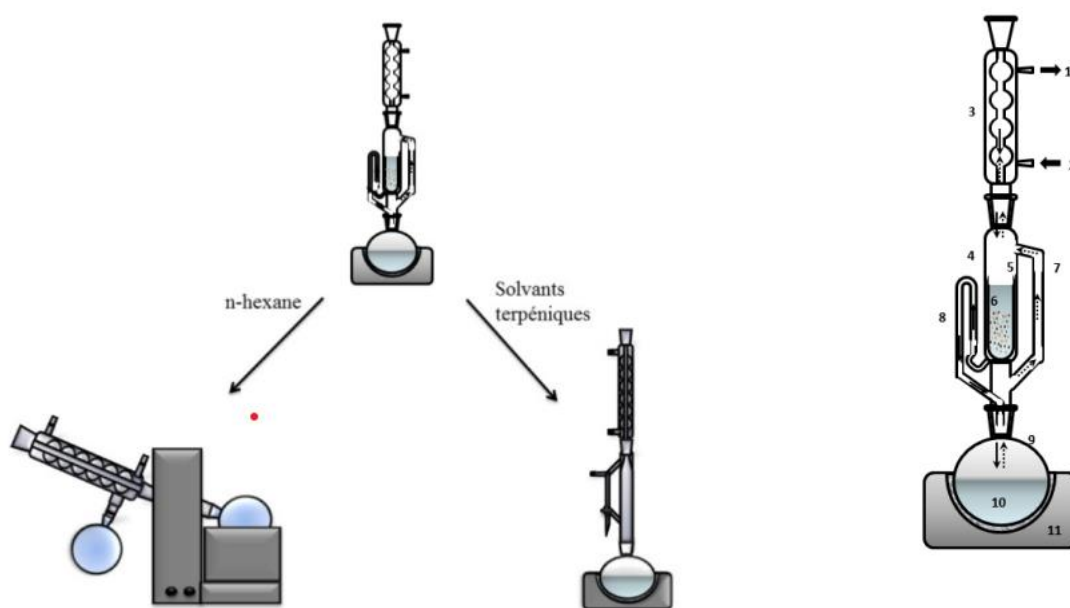


Figure 12 : Procédés d'extraction des lipides de micro-algues (Duan et al., 2019)

L'exploitation des composés bioactifs de *Chlorella vulgaris* nécessite des techniques d'extraction efficaces permettant de préserver la qualité, l'intégrité et l'activité biologique des molécules ciblées. Les approches modernes privilégient des procédés performants, sélectifs et durables, adaptés à l'industrie cosmétique (Duan et al., 2019).

1. Extraction enzymatique : obtention de peptides bioactifs :

- L'extraction enzymatique consiste à utiliser des enzymes spécifiques (protéases) pour hydrolyser les protéines de *Chlorella vulgaris* et libérer des peptides bioactifs.
- Ces peptides présentent des propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et régénérantes, idéales pour les soins anti-âges ou apaisants.
- L'avantage de cette méthode est sa sélectivité et sa douceur, préservant l'activité des peptides sans recours à des solvants chimiques.
- Elle permet également d'ajuster le profil des peptides selon le choix des enzymes et les conditions de réaction (pH, température, temps).

Dans une ancienne étude sur les extraits phénoliques. Les résultats de l'extraction de composés phénoliques (PC) soulignent l'efficacité des solvants eutectiques profonds (DES) dans l'extraction de composés bioactifs de la biomasse de microalgues. Plus précisément, le DES2, formulé avec de l'acide citrique comme donneur de liaison hydrogène (HBD), a

démontré une performance supérieure dans l'extraction de composés phénoliques, en fait, de polyphénols avec 9,05 mg EAG/g MS, de flavonoïdes avec 199,69 mg/g et de tanins avec 13,80 mg/g. Ce résultat est cohérent avec les recherches antérieures de (Duan et *al.*, 2019) qui ont utilisé un DES à base de chlorure de choline avec une base acide pour l'extraction de quatre acides phénoliques. Ils ont documenté un rendement remarquable en acide phénolique de 22,80 mg/g, surpassant les rendements obtenus avec des solvants organiques conventionnels. L'équipe de Mulia (2019) ont expliqué que la polarité des ChCl-DES diminue à mesure que le nombre de groupes hydroxyles dans les molécules HBD entourant l'anion chlorure de ChCl augmente. Ils ont constaté que les ChCl-DES à base d'acide présentent une plus grande extractibilité du PC attribuée à la présence d'ions H⁺ libres, agissant ainsi comme donneurs d'hydrogène, ce qui a souligné l'efficacité des solvants eutectiques profonds à base d'acide citrique pour l'extraction des composés phénoliques.

De plus, le DES4 (à base de glucose) a montré une efficacité d'extraction notable, en particulier dans l'extraction des polyphénols, avec une concentration de 9,88 mg/g, soulignant encore le potentiel du DES dans l'extraction des composés bioactifs, ce qui concorde avec les conclusions de Várfalvyová et *al.* (2023) qui ont comparé différents DES à base de sucre à des COV tels que l'eau ou le méthanol, le DES a montré une plus grande extraction des polyphénols. Français Comparés aux solvants organiques conventionnels tels que l'hydroéthanol (EHE), le méthanol (EM) et l'éthanol (EA), nos résultats corroborent ceux de Bulut et *al.* (2019) avec des valeurs similaires observées pour l'hydroéthanol et les solvants méthanoliques. Cependant, nos résultats d'extrait aqueux dépassent nettement ceux rapportés par Bulut. Alors que certaines études, telles que Safafar et *al.* (2015), ont rapporté des teneurs en composés phénoliques plus élevées que les nôtres.

L'analyse de la teneur en flavonoïdes de différents extraits a révélé des variations de concentrations, les extraits DES présentant généralement une teneur en flavonoïdes plus élevée que les COV. En effet, DES2 a montré une concentration en flavonoïdes de 199,69 mg/g, tandis que les extraits COV variaient entre 29 mg/g et 76 mg/g. De même, les extraits DES ont montré une teneur en tanin plus élevée que les COV, soulignant l'efficacité d'extraction supérieure des formulations DES. Français La variation de la teneur en tanins ou en flavonoïdes selon le type d'extrait peut être expliquée par les travaux de Prabakaran et *al.*, en 2018, qui ont extrait ce type de composé de la microalgue *Chlorella vulgaris* et ont constaté que les composés phénoliques sont mieux extraits par des solvants polaires. Pour l'activité antioxydante, les extraits DES ont systématiquement démontré un potentiel

antioxydant plus fort que les COV. Dans l'activité de piégeage du DPPH, les extraits DES ont présenté des valeurs de CI_{50} plus faibles, indiquant une efficacité plus élevée dans la neutralisation des radicaux libres. DES2 a montré une valeur de CI_{50} de 3,98 mg/l, tandis que les extraits COV variaient entre 5,58 mg/l et 6,54 mg/l. De même, d'autres recherches ont démontré que les extraits de NADES ont de fortes propriétés anti-radicalaires car ils peuvent extraire une concentration élevée de substances bioactives. De plus, le test FRAP a révélé des tendances similaires, avec SIDES1 et CVDES1 présentant un potentiel antioxydant significatif, suggérant l'influence de la composition du solvant sur l'activité antioxydante. De même, parmi les extraits de COV, SIS1 et CVS1 ont montré une efficacité antioxydante notable, renforçant l'importance de l'extraction avec un solvant hydroéthanolique dans la modulation de l'activité antioxydante, ce qui est conforme aux recherches antérieures. De plus, les extraits de DES ont affiché des valeurs de catalase (CAT) plus élevées que les COV, indiquant une activité antioxydante supérieure (Várfalvyová et al., 2023).

III.2. Techniques d'extraction assistée par ultrasons et microfluidisation :

- **Ultrasons :** L'ultrasonication crée des ondes de cavitation qui rompent les parois cellulaires de la microalgue, facilitant la libération des composés intracellulaires comme les pigments, les lipides, ou les polysaccharides.
- Méthode rapide, à faible consommation d'énergie et compatible avec des solvants verts (eau, éthanol).
- **Microfluidisation :** Cette technique fait passer la biomasse à haute pression à travers des microcanaux, provoquant une désintégration fine des cellules.
- Elle améliore la récupération des molécules sensibles (vitamines, antioxydants) tout en réduisant la taille des particules, ce qui est idéal pour des applications cosmétiques à pénétration cutanée optimisée.

3. Approches écoresponsables : extraction supercritique et bioraffinage :

- **Extraction supercritique (CO2 supercritique) :**

Utilise le dioxyde de carbone à l'état supercritique comme solvant propre et non toxique pour extraire des composés lipophiles (caroténoïdes, acides gras). Méthode écologique, sans résidu, avec une excellente capacité d'extraction et une grande pureté des extraits.

- **Bioraffinage :**

Approche intégrée qui vise à valoriser toutes les fractions de la biomasse de *Chlorella vulgaris* (protéines, lipides, polysaccharides, pigments) via une succession d'étapes douces. Permet une exploitation complète, zéro déchet et économiquement viable, en phase avec les principes de la chimie verte.

III.3. Exemples d'applications industrielles et de produits sur le marché :

1. Sérums hydratants et crèmes anti-âge à base de *Chlorella vulgaris* :

Ce sérum anti-âge est infusé d'huile de micro-algue ultra-corrective, un actif green qui concentre en une seule goutte la puissance de 4 milliards de cellules actives pour renforcer votre peau au quotidien. 3 gouttes suffisent pour une peau lissée, souple et tonifiée instantanément.



Figure 13 : Sérums hydratants et crèmes anti-âge à base de *Chlorella vulgaris* (Sylviane haufroid, 2023).

- Il possède de +32% de fermeté dès 1 mois. Plus forte, plus résistante, la peau paraît visiblement plus jeune.
- L'allié idéal de toutes les peaux grâce à une texture huile non grasse et non collante.
- Une efficacité anti-âge et un plaisir ultime aux délicats accords floraux et musqués...
- Soin formule et fabriqué en France.
- Huile de micro-algue ultra-corrective :
- NUXE a sélectionné la *Chlorella Vulgaris*, une algue verte microscopique d'eau douce qui possède d'exceptionnelles capacités de régénération. Apparue il y a 2,5 milliards d'années, elle a survécu jusqu'à notre ère grâce à son étonnante résistance, qu'elle doit à sa membrane impénétrable.

- L'Huile de micro-algue est obtenue grâce à une technologie verte de pointe, qui permet d'extraire des molécules actives de la membrane, difficiles à atteindre autrement.
- Une goutte d'Huile de micro-algue concentre la puissance anti-âge de 4 milliards de cellules actives.
- Formule végétale sans ingrédients ni dérivés d'origine animale.
- Les listes d'ingrédients entrant dans la composition des produits de notre marque sont régulièrement mises à jour. Avant d'utiliser un produit de notre marque, veuillez lire la liste d'ingrédients située sur son emballage afin de vous assurer que les ingrédients sont adaptés à votre utilisation personnelle.

- **Huile de micro-algue ultra-corrective :**

- NUXE a sélectionné la *Chlorella Vulgaris*, une algue verte microscopique d'eau douce qui possède d'exceptionnelles capacités de régénération.
- Apparue il y a 2,5 milliards d'années, elle a survécu jusqu'à notre ère grâce à son étonnante résistance, qu'elle doit à sa membrane impénétrable.
- L'Huile de micro-algue est obtenue grâce à une technologie verte de pointe, qui permet d'extraire des molécules actives de la membrane, difficiles à atteindre autrement.
- Une goutte d'Huile de micro-algue concentre la puissance anti-âge de 4 milliards de cellules actives.
- Formule végétale, 97% d'origine naturelle.
- **Conseils d'utilisation :** Appliquer 3 gouttes le matin et/ou le soir sur le visage, le cou et le décolleté.

Ingrédients :

- Huile de graine de *Macadamia integrifolia*.
- Huile de graine de *Simmondsia chinensis* (jojoba).
- Huile de graine de *Sesamum indicum* (sésame).
- Polyglycérides d'oléique, linoléique et linolénique.
- Huile de graine de *Helianthus annuus* (tournesol).
- Parfum/Fragrance.

- Tocophérol (vitamine E).
- Triglycéride caprylique/caprique.
- Extrait de *Chlorella vulgaris*.
- Extrait de feuille de *Rosmarinus officinalis* (romarin).
- Linalool.
- Alpha-isométhyl ionone.
- Géraniol.
- Citronellol.
- Limonène.

2. Produits solaires et protection anti-pollution :

Qui donne :

- Un regard plus jeune.
- Un lifting du contour de l'œil.
- Des rides et ridules moins marquées.
- Une atténuation des pattes d'oie.
- Une peau hydratée, renforcée et tonique.

Cette crème est utilisée comme actif restructurant, la *chlorella vulgaris* permet à la peau de retrouver toute sa tonicité et sa fermeté. Elle augmente également la production de collagène, une protéine indispensable à notre organisme. Retrouvée dans toutes les structures du corps, comme la peau ou les tissus conjonctifs, elle assure la cohésion, l'élasticité et la régénération de tous ces tissus. Grâce à cette action, le vieillissement de la peau est ralenti et la peau conserve sa jeunesse plus longtemps. Le biophytex™ est un complexe végétal qui combine les propriétés anti-âge et anti-rides de plusieurs actifs naturels. Ces actifs améliorent la circulation sanguine et réduisent les cernes et les veines d'araignée (petites veines près de la surface de la peau ayant une apparence proche d'une « toile d'araignées »). Ils améliorent aussi la régularité du teint et diminuent la sensibilité de la peau.

La *centella asiatica* est aussi appelée « l'herbe du tigre ». Elle possède des pouvoirs anti-âges connus. Son action cicatrisante et réparatrice prend soin des peaux sénescents et

des peaux sensibles. Les saponosides et les triterpènes présents dans les cellules de la *centella asiatica* agissent sur la synthèse de collagène. Elle augmente sa production ainsi que sa qualité. D'origine naturelle, le tocophérol est composé de vitamine e, un antioxydant aux pouvoirs anti âge puissant pour lutter contre les rides et ridules. Il protège la peau des agressions extérieures (pollution, exposition aux uv, tabac...) en bloquant l'action des radicaux libres sur la peau. Également, son activité anti-inflammatoire permet de réduire et de soulager les symptômes de coups de soleil ou d'érythèmes par exemple. Enfin, le tocophérol aide à maintenir l'élasticité et l'hydratation de la peau en renforçant le film hydrolipidique cutané tout en améliorant la microcirculation cutanée. La glycérine et le beurre de karité sont utilisés pour leurs pouvoirs hydratants et nourrissants.

Ce produit me correspond-il tous les types de peaux tolèrent la crème absolu regard de floxia lift, même les plus sensibles. Mais la crème sera d'autant plus adaptée pour les peaux sénescences, abîmées, sèches et déshydratées, à imperfection et enflammées.

Elle se compose de :

- Eau (Aqua).
- Butylène glycol.
- Carbonate de dicaprylyle.
- Triglycéride caprylique/caprique.
- Glycérine.
- Citrate de stéarate de glycéryle.
- Polyacrylate de sodium.
- Beurre de karité (*Butyrospermum parkii*).
- Extrait de *Chlorella vulgaris*.
- Extrait de feuille de *Centella asiatica*.
- Poudre de *Chondrus crispus* (algue rouge).
- Extrait de racine d'Iris florentina.
- Extrait de racine de *Ruscus aculeatus* (petit houx).

- Extrait de fleur de *Calendula officinalis* (souci).
- Tocophérol (vitamine E).
- Glucose.
- Glycine capryloyle.
- Protéines de levure hydrolysées.
- Acétate de tocophéryle (forme stable de vitamine E).
- Éthylhexylglycérine.
- Gomme xanthane.
- Citrate de sodium.
- Glycine undécylénoyle.
- Diacétate de tétrasodium glutamate.
- Escine (principes actifs du marron d'Inde).
- Glycyrrhizate d'ammonium (dérivé de réglisse).
- Panthénol (provitamine B5).
- Trométhamine.
- Caprylyl glycol.
- Phénoxyéthanol.
- ÉDTA disodique (agent chélateur).

3. Innovations en cosmétique personnalisée et bio-impression 3D :

La Bio-impression cellulaire 3D est basé sur la technologie de fabrication additive de l'impression 3D, générant des structures cellulaires tridimensionnelles en ajoutant un matériau couche par couche sans avoir besoin de moule. Le matériel qui est ajouté couche par couche est ce qu'on appelle la « biotine », un matériau qui est chargé dans les injecteurs de la bio-imprimante et qui permet de mimer l'architecture du tissu cellulaire d'intérêt. Pour l'expert Ainia, les principaux composants sont : des cellules vivantes représentatives du tissu à imprimer, soit d'un type cellulaire, soit de plusieurs ; biomatériaux pour la génération de

structures ou d'échafaudages (appelés échafaudages), entre autres collagène, gélatine ou hydrogels à base d'acide hyaluronique ou de polyéthylène glycol, composants pour l'entretien cellulaire, ainsi que d'autres composés ou molécules qui permettent la solidification ou la capacité de réticulation (réticulants), (Bioresour Technol, 2020).

Puisqu'il est difficile pour un seul matériau de réunir toutes les propriétés pour obtenir les caractéristiques nécessaires, « l'une des tendances est d'utiliser des biotinks à plusieurs composants, de sorte que les matériaux sont généralement des combinaisons de plusieurs matériaux pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées et faciliter l'opération d'impression », explique (Seon-won yoon et al. 2024).

L'évolution des technologies et la **montée** en puissance de la cosmétique sur-mesure ont ouvert la voie à des innovations de pointe, parmi lesquelles l'intégration de *Chlorella vulgaris* dans des approches de cosmétique personnalisée et de bio-impression 3D.

Dans le domaine de la cosmétique personnalisée, *Chlorella vulgaris* se distingue par sa richesse en composés actifs multifonctionnels (antioxydants, peptides, polysaccharides, pigments) pouvant être adaptés aux besoins spécifiques de chaque type de peau : hydratation ciblée, anti-âge, protection urbaine, régénération cutanée, etc. Grâce à des diagnostics de peau assistés par l'intelligence artificielle et à des dispositifs de formulation sur-mesure, les extraits de *Chlorella* peuvent être dosés de façon personnalisée, intégrés à des sérums ou crèmes créés en temps réel pour l'utilisateur (Seon-won yoon et al., 2024).

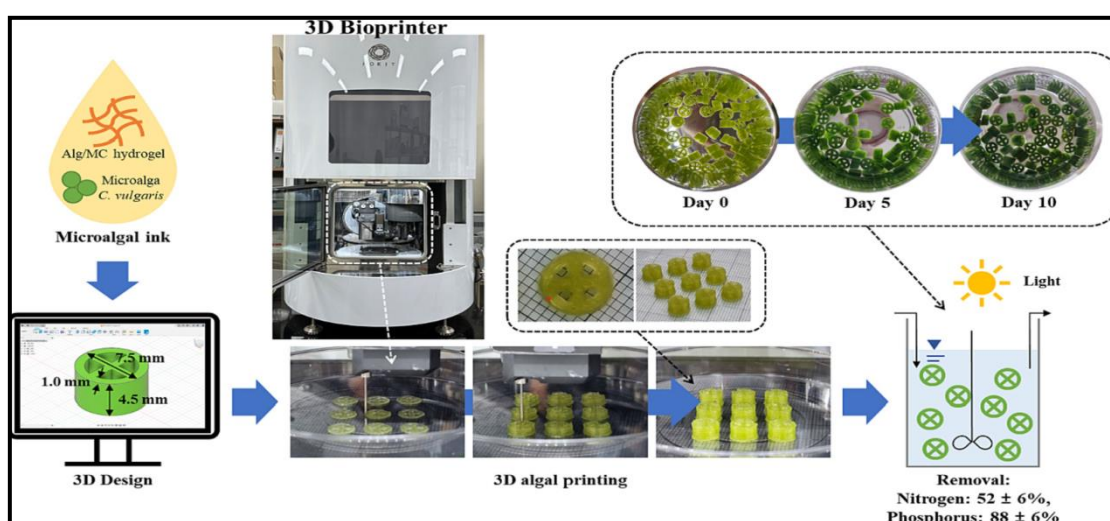


Figure 13 : Innovations en cosmétique personnalisée et bio-impression 3D de *Chlorella vulgaris* (Seon-won yoon et al., 2024).

La bio-impression 3D constitue une autre innovation émergente, offrant la possibilité de créer des matrices cutanées ou patchs dermocosmétiques sur-mesure, contenant des extraits actifs de *Chlorella vulgaris*. Grâce à ses propriétés anti-inflammatoires, antioxydantes et protectrices, *Chlorella* est intégrée dans des encres biologiques utilisées pour imprimer des structures mimant la peau, voire des dispositifs capables de libérer progressivement les actifs selon les besoins du tissu cible. Ces technologies ouvrent la voie à une cosmétique régénérative, intelligente, et hautement personnalisée. En somme, *Chlorella vulgaris* se positionne comme un actif de nouvelle génération, parfaitement compatible avec les tendances futuristes de la beauté, combinant efficacité, naturalité et innovation technologique. Et dans une ancienne étude sur l'impression tridimensionnelle (3D), également connue sous le nom de fabrication additive, est une technologie d'empilement de divers matériaux à partir de fichiers de modèles numériques 3D. En génie biomédical, la recherche sur la bio-impression 3D continue de progresser, visant à fabriquer et à fonctionnaliser des tissus et des organes biologiques. En bio-impression 3D, il est très difficile d'empiler des bio-encres fluides le long de l'axe z. De plus, les cellules intégrées doivent conserver une viabilité et une activité élevées et l'encre doit avoir une imprimabilité élevée. L'alginate est un polymère naturel doté d'une excellente biocompatibilité. Il a été utilisé comme matériau pour la bio-impression 3D en le mélangeant à d'autres polymères, en raison de sa faible viscosité et de sa faible résistance. Un hydrogel bio-imprimé en 3D mélangé à 2,5 % (p/v) d'alginate et 8 % (p/v) de gélatine s'est avéré s'empiler sur 15 mm de hauteur, avec peu de différence en termes de dommages cellulaires par rapport à ceux des échantillons moulés, selon He et al. Dans Habib et al., un hydrogel mélangé à 4 % (p/v) d'alginate et 4 % (p/v) de carboxyméthylcellulose a conservé une excellente imprimabilité et une excellente fidélité de forme, et a montré une viabilité cellulaire de 86 % après 23 jours, confirmant son potentiel comme biomatériau pour le procédé de bio-impression 3D. Récemment, des recherches ont été menées sur l'impression 3D à l'aide de micro-organismes. L'impression 3D à l'aide de micro-organismes implique la sélection de micro-organismes appropriés et leur mélange avec des hydrogels pour les utiliser comme matériaux. Comme pour la bio-impression 3D, la survie et la fonction des micro-organismes sont essentielles. En utilisant *Pseudomonas putida* imprimé en 3D, Schaffner et al. ont démontré que *P. putida* peut dégrader le phénol et le convertir en biomasse. Plus récemment, des études sur l'application d'hydrogels contenant des algues bio-imprimées ont mis en évidence le potentiel des matériaux à base d'algues Français. Dans le domaine biomédical, une tentative a été faite pour imprimer en 3D des cellules humaines avec la

microalgue *Chlamydomonas reinhardtii*, dans le but de fournir de l'oxygène (O₂) aux cellules humaines. De plus, plusieurs études ont montré que les algues imprimées en 3D peuvent survivre et se développer dans des échafaudages et ont montré une viabilité élevée et aucune perte de fonction même après un stockage à long terme. Thakare et *al.* ont utilisé un filtre hydrogel imprimé en 3D contenant des cellules d'algues pour éliminer le cuivre de l'eau contaminée et ont obtenu une efficacité d'élimination du cuivre plus élevée (80 %) qu'un filtre hydrogel sans cellules d'algues (50 %). La bio-impression 3D avec des cellules de mammifères a fait l'objet de beaucoup d'attention de la part des chercheurs ; cependant, peu de recherches ont été menées sur les algues, les champignons et les bactéries (Seon-won yoon et *al.*, 2024).

Chapitre IV.

Défis, réglementation et perspectives d'innovation

IV.1. Contraintes technologiques et formulationnelles :

Les propriétés antibactériennes de la *Chlorella* dépendent de la souche et sont affectées par les conditions de croissance et les procédures d'extraction. Cette variabilité pose un défi majeur en matière de standardisation et d'homogénéité de la qualité des produits (Hussein et *al.*, 2018). Les différentes espèces de *Chlorella* présentent des effets biologiques différents, déterminés par leurs caractéristiques génétiques et leurs conditions de croissance. Par exemple, l'intensité lumineuse, l'apport en nutriments et le pH peuvent affecter les activités métaboliques au sein des cellules de *Chlorella*, provoquant des fluctuations dans la synthèse des composés bioactifs. Cependant, les méthodes utilisées pour isoler ces composés de la matière végétale, telles que l'extraction par solvant ou par fluide supercritique, ont également un impact sur leur qualité et leur activité. Ces paramètres concernent une activité antibactérienne régulière et efficace, et leur réglementation stricte implique certains défis pour une utilisation à grande échelle. Ce défi exige une recherche constante des méthodes les plus adaptées de culture et de transformation de la *Chlorella* afin de développer un procédé fiable et reproductible de manière cohérente pour les lots suivants (Tong et *al.*, 2010).

La *chlorella* peut accumuler des métaux lourds dans son environnement, ce qui constitue un problème pour la santé des consommateurs, d'où la nécessité d'une normalisation (Zeraatkar et *al.*, 2016). Elle contient des métaux lourds, dont le cadmium, le plomb et le mercure. La capacité d'extraction de ces métaux rend cette algue idéale pour les produits de bioremédiation, mais elle peut s'avérer dangereuse si elle est ajoutée à la liste des aliments et des sources de nutriments. Pour minimiser ce risque, les producteurs doivent mettre en place des programmes de surveillance et de tests réguliers afin d'identifier la teneur en métaux lourds des produits à base de *chlorella*. Cela nécessite des procédures analytiques rigoureuses telles que la spectroscopie d'absorption atomique et/ou la spectrométrie de masse à plasma inductif, des procédés à forte intensité de capital qui ont un impact négatif sur les coûts de production. Maintenir des produits sûrs et de bonne qualité est essentiel pour les clients et pour respecter la réglementation, mais cela entraîne également un coût important et un coût d'opportunité pour les producteurs.

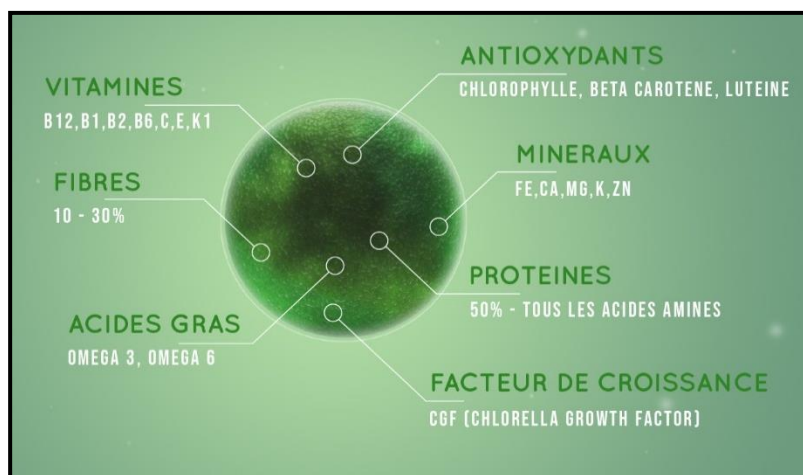


Figure 15 : Contraintes technologiques et formulationnelles (Nakano et al., 2007).

Certains clients se plaignent du goût et de l'odeur désagréables de la chlorella, ce qui réduit les chances d'utilisation dans les aliments et les boissons (Nakano et al., 2007). Cependant, la chlorella a un goût et une odeur prononcés et herbacés que de nombreux consommateurs pourraient difficilement tolérer. L'utilisation de la chlorella présente certains défis, notamment son goût peu attrayant pour la plupart des utilisateurs. Les producteurs doivent donc trouver des moyens de le masquer, ou bien le produit dans lequel elle sera utilisée doit être difficilement détectable. Cela peut se faire en diluant la chlorella avec des agents aromatisants dans des solutions buvables, des aliments fonctionnels tels que des barres nutritionnelles, ou lorsque la chlorella a un goût prononcé, comme dans les applications culinaires, où des arômes associés peuvent masquer le goût de la chlorella. La recherche dans les technologies de transformation des aliments, comme l'encapsulation ou la microencapsulation, peut contribuer à masquer le goût et l'odeur tout en préservant les valeurs nutritionnelles. L'élimination de ces problèmes est essentielle pour une acceptation massive des produits à base de chlorella par les consommateurs et une pénétration du marché.

1.Stabilité des extraits de microalgues dans les formulations :

- Les extraits de microalgues peuvent être sensibles à la lumière, à la chaleur ou à l'oxygène, ce qui peut diminuer leur efficacité.
- Il est donc nécessaire de développer des formules stables qui conservent les propriétés actives pendant toute la durée de vie du produit.

2.Odeur et couleur – Acceptabilité sensorielle :

- Certains extraits ont une odeur forte ou une couleur verte intense qui peuvent gêner les consommateurs.
- Le défi est d'améliorer l'aspect sensoriel du produit sans altérer ses bienfaits naturels.

3.Synergie avec d'autres ingrédients cosmétiques :

- L'efficacité des microalgues peut être renforcée en les associant à d'autres ingrédients comme des antioxydants ou des vitamines.
- Il faut cependant s'assurer de la compatibilité chimique pour garantir la stabilité du produit.

IV.2. Réglementation et acceptation sur le marché :

Dans les préparations commerciales, la paroi cellulaire de *la chlorella* est difficilement digérée, ce qui réduit sa valeur nutritionnelle. De ce fait, des méthodes de transformation appropriées sont nécessaires pour améliorer l'appétence de cette source alimentaire pour l'homme. Des techniques telles que l'activation mécanique, la dégradation enzymatique ou les ultrasons sont utilisées pour affaiblir et augmenter la perméabilité de la paroi cellulaire, ce qui favorise une meilleure assimilation des nutriments par l'organisme. Cependant, ces procédés entraînent des coûts et des problèmes supplémentaires pour la production. Le broyage mécanique utilise des équipements de broyage et est plus coûteux en énergie, tandis que le traitement enzymatique utilise des enzymes spécifiques et peut détruire certains composés dangereux. Le procédé d'ultrasonication, basé sur l'application d'ondes sonores pour détruire les structures cellulaires, est également assez précis et coûteux. Un problème essentiel encore non résolu dans l'industrie est la formulation et la transformation appropriées de *la chlorella* pour garantir son absorption facile par l'organisme (Yang et al., 2016).

1.Réglementation cosmétique (INCI, REACH) :

- Tous les ingrédients doivent être déclarés selon la nomenclature INCI et conformes aux réglementations européennes comme REACH.
- Ces règles visent à garantir la sécurité des consommateurs et la traçabilité des composants.

2.Certification biologique et labels écoresponsables (COSMOS, Ecocert) :

- Les labels comme COSMOS ou Ecocert assurent que les produits respectent des normes écologiques et biologiques strictes.
- Ces certifications renforcent la confiance des consommateurs.

3.Sécurité et toxicité :

- Avant leur mise sur le marché, les extraits de microalgues doivent être testés pour vérifier leur non-toxicité et leur innocuité pour la peau.

C'est une étape essentielle pour obtenir l'autorisation de mise en vente (Yang et *al.*, 2016).

IV.3. Innovations et avenir des cosmétiques à base de microalgues :

En améliorant les caractéristiques souhaitées et en influençant positivement des caractéristiques telles que la teneur en nutriments, le taux de croissance et l'adaptabilité environnementale grâce à diverses manipulations génétiques et méthodes de sélection, les scientifiques peuvent produire une souche de *Chlorella* de meilleure qualité. Par exemple, il pourrait s'agir d'améliorer la composition en protéines, vitamines et acides gras essentiels de *C. vulgaris* pour en faire un meilleur complément. Cependant, pour industrialiser la production de *Chlorella*, il est nécessaire de concevoir de nouveaux systèmes de culture améliorés permettant d'augmenter le rendement à moindre coût. Cela implique des aspects allant du choix de bioréacteurs à l'ajustement des facteurs lumière et nutriments, en passant par l'amélioration des confinements stériles. Des informations sur des aspects tels que les différences entre les systèmes de culture ouverts et fermés et leurs effets sur la productivité et la qualité seront également très utiles aux producteurs. Les méthodes couramment utilisées sont le broyage mécanique, l'utilisation d'enzymes pour traiter la paroi cellulaire de *Chlorella* et l'ultrasonisation, qui peuvent augmenter la biodisponibilité des nutriments pour l'organisme. Des techniques telles que les champs électriques pulsés pourraient être plus efficaces et économiquement viables pour améliorer la digestibilité sans augmenter significativement les coûts de production (Tong et *al.*, 2010).

Il sera nécessaire de procéder à une évaluation sensorielle de l'encapsulation, du mélange ou des arômes naturels afin de masquer le goût indésirable de la *Chlorella*. Ces améliorations seront réalisées grâce à des analyses sensorielles et à des tests consommateurs. Les mesures de sécurité comprennent la prévention de l'absorption de métaux lourds, les méthodes de culture, l'utilisation de techniques de biorestauration et l'amélioration des méthodes d'analyse. Des recherches cliniques rigoureuses peuvent étayer et justifier les bienfaits de la *Chlorella*, facilitant ainsi le processus d'approbation et renforçant la confiance des consommateurs. Les normes de référence pour la production et la transformation des aliments couvrent tous les niveaux de production requis, tandis que le cadre de référence pour l'approbation des aliments sur le marché renforce également la sécurité alimentaire. Cela peut se faire par le biais de smoothies, de snacks et de compléments alimentaires à base de *Chlorella* afin d'accroître sa popularité et ses ventes. Une autre solution consiste à mettre en œuvre des stratégies de gestion environnementale telles que les énergies renouvelables, la conservation de l'eau et la gestion des déchets, ainsi que la durabilité économique. Grâce à l'amélioration de ces domaines, les possibilités d'utilisation de la *Chlorella* dans l'industrie alimentaire peuvent être considérablement élargies, ce qui se traduira par une amélioration de la qualité, de la sécurité et de la durabilité des produits (Tong et *al.*, 2010).

1. Cosmétiques biomimétiques :

- Inspirés du fonctionnement naturel des algues, ces produits reproduisent leurs mécanismes de défense pour protéger la peau (ex. : filtre UV naturel).
- Cela permet de développer des soins innovants et respectueux de l'environnement.

2. Intelligence artificielle et formulation personnalisée :

- L'IA permet de créer des produits adaptés à chaque type de peau, selon les besoins individuels, l'âge, ou même la météo.
- Une nouvelle ère de cosmétiques sur-mesure s'ouvre.

3. Biodesign et impression 3D :

- Le design biologique et l'impression 3D permettent de fabriquer des formes de produits originales, tout en réduisant le gaspillage.
- C'est une avancée majeure vers une cosmétique plus durable et créative.

Malgré ces contraintes, les perspectives d'innovation autour de la chlorella sont prometteuses. En nutrition, elle est valorisée pour sa richesse en protéines, vitamines, antioxydants et chlorophylle. On l'intègre de plus en plus dans des compléments alimentaires, des produits véganes ou des aliments fonctionnels. Sur le plan environnemental, elle offre des solutions durables pour la captation du CO₂ ou la dépollution des eaux. Enfin, les biotechnologies ouvrent la voie à des améliorations génétiques de souches pour optimiser la production de composés bioactifs ou développer des applications en économie circulaire, comme la fabrication de biocarburants ou de bioplastiques. Ainsi, la chlorella représente un enjeu stratégique à la croisée de la santé humaine, de l'innovation alimentaire et de la transition écologique.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce travail de recherche a permis d'explorer en profondeur le potentiel biotechnologique, cosmétique et industriel des microalgues, avec un accent particulier sur *Chlorella vulgaris*, une microalgue d'eau douce aux propriétés remarquablement riches et diversifiées. L'étude a démontré que ces organismes unicellulaires, longtemps considérés comme de simples ressources biologiques, sont aujourd'hui devenus de véritables plateformes naturelles de bioactifs à fort intérêt dans l'univers de la cosmétique moderne.

Chlorella vulgaris présente un fort potentiel en tant que source influente de nutriments riches et de compléments alimentaires à court terme. Sa richesse en protéines, lipides, glucides, vitamines et minéraux augmente sa valeur nutritive et son applicabilité à divers aliments. Cependant, la *Chlorella* présente des difficultés, notamment une activité antibactérienne fluctuante, des coûts de production élevés, un entartrage et des problèmes sensoriels. La découverte de la *Chlorella* démontre ses nombreuses qualités qui en font un ingrédient alimentaire essentiel, notamment son activité antioxydante, son soutien au système immunitaire et ses propriétés détoxifiantes.

Sur le plan biochimique, *Chlorella vulgaris* se distingue par sa teneur élevée en protéines, peptides bioactifs, polysaccharides, pigments (chlorophylles, caroténoïdes) et acides gras essentiels. Ces composés lui confèrent des effets bénéfiques multiples sur la peau : hydratation, stimulation cellulaire, régénération cutanée, protection antioxydante et anti-inflammatoire, tout en contribuant au renforcement de la barrière cutanée et à la prévention du vieillissement prématuré.

Les avancées en bioproduction et en procédés d'extraction avancés (ultrasons, enzymatique, supercritique) ont permis de mieux isoler ces molécules actives, tout en respectant une approche écoresponsable, en phase avec les attentes des consommateurs modernes. L'étude a également mis en lumière les innovations en matière de formulation cosmétique, notamment à travers l'usage de l'encapsulation, des nanoémulsions ou de la formulation synergique avec d'autres actifs naturels, afin d'optimiser la biodisponibilité, la stabilité et la sensorialité des produits.

Toutefois, cette valorisation des microalgues en cosmétique ne se fait pas sans défis. Sur le plan technologique, la gestion de la stabilité des extraits, de leur couleur et de leur odeur spécifique reste une contrainte majeure en formulation. Sur le plan réglementaire, l'utilisation d'ingrédients d'origine algale doit répondre aux normes strictes imposées par les

règlements internationaux (INCI, REACH, COSMOS, Ecocert), impliquant des tests approfondis de sécurité, de tolérance et d'innocuité.

Par ailleurs, ce mémoire a permis d'envisager les perspectives futures liées à l'intégration de *Chlorella vulgaris* dans des solutions de cosmétique de demain : formulation personnalisée grâce à l'intelligence artificielle, biodesign, bio-impression 3D, et cosmétiques biomimétiques inspirés des mécanismes naturels de défense des algues. Ces approches illustrent une convergence croissante entre science, nature, technologie et développement durable.

En conclusion, *Chlorella vulgaris* s'impose comme un ingrédient stratégique et prometteur dans la transition vers une cosmétique plus verte, plus innovante et plus respectueuse de la peau et de l'environnement. Sa valorisation, bien que complexe, s'inscrit pleinement dans les grandes tendances actuelles : naturalité, efficacité, durabilité et personnalisation. Elle représente ainsi un modèle exemplaire de bio-ressource au service d'une cosmétique de nouvelle génération, où l'alliance entre biotechnologie et nature ouvre des horizons inédits pour les chercheurs, les industriels et les consommateurs.

Références bibliographiques

- Algaktiv. (sd). Algaktiv BioSKN [Fiche technique du produit]. Consulté le 25 avril 2023 sur Algaktiv BioSKN.
- Andersen, R. A., et al. "Phylogenetic Analysis of Chloroplasts and Mitochondria Based on Molecular Data." *Journal of Phycology*, vol. 33, 1997, pp. 1–15.
- Andersen, R. A., the biodiversity of eukaryotic algae. *biodiv.conserv.* 1, 1992 : 267-292
- Angela Paul Peter ", Xuefei Tan b & IS, juin Yau Lim , Kit Wayne Chew de , Apurav Krishna Koyande ° Pau Loke Show Environmental analysis of *Chlorella vulgaris* cultivation in large scale closed system under waste nutrient source 2022.
- Anonyme II., 2012: FLAMANT VERT, - Mentions légales - Réalisation CH1.2p. BOURGES en ligne]. [Consulté <http://www.flamantvert.com/pure-chlorelle.html> c23-05-2012]. Disponible
- Audrey MANET. 2016 : LA SPIRULINE : Indications thérapeutiques, risques sanitaires et conseils à l'officine P11.
- B. Brown, C. Immethun, M. Wilkins, R. Saha *Rhodospseudomonas palustris* CGA009 polyhydroxybutyrate production from a lignin aromatic and quantification via flow cytometry *Bioresour. Technol. Rep.*, 11 (2020), Article 100474
- Bulut, C., et al. "Extraction of Polyphenols Using Various Solvents." *Food Chemistry*, vol. 278, 2019, pp. 202–209.
- Chloé BRIQUETEUR 2022- Le vieillissement cutané : physiopathologie et revue des dernières innovations cosmétiques 124P
- Duan, L., et al. "Application of Deep Eutectic Solvents in the Extraction of Bioactive Compounds." *Separation and Purification Technology*, vol. 237, 2019, 116373.
- **EU Register on nutrition and health claims**, EFSA, 03/2016
- Fida Hussain a b, Syed Z. Shah b, Habib Ahmad c, Samar A. Abubshait d e, Haya A. Abubshait e f, A. Laref g, A. Manikandan h, Heri S. Kusuma i, Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review 2018

- Francesco Romagnoli, Baiba Ievina. Unveiling underlying factors for optimizing light spectrum to enhance microalgae growth 2020
- Françoise Cambayrac, 2008 : Vérités sur les maladies émergentes, Embourg, Marco Pietteur, coll. « Résurgence », 416 p. (ISBN 2874340391)
- Ghobrini D., Aiboud K. et Yakoub-Bougdal S. (2014). Effect of red and far-red light on biomass productivity on *Chlorella vulgaris* cultivated on photobioreactor. BioTech 2014 and Czech-Swiss symposium, 11 - 14 Jun 2014, Praha Czech Republic.
- Janus, R.; Vos, M. P.; Brilman, D. W. F. *Effect of Process Conditions on Bio-Oil Obtained through Continuous Hydrothermal Liquefaction of Scenedesmus Sp. Microalgae*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 2018, 134, 415–426. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.07.008>
- Jeffrey, S. W., et al. "Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods." *UNESCO Publishing*, 1997.
- Khettab Zakaria, Toumi Fatna (2019) Contribution à la production de microalgues riche en lipides isolées de la région d'Oued Righ Mémoire de fin 'étude Biochimie Appliqué Université Echahid Hamma Lakhdar -El OUED P59
- Manuel Garrote; lipophilization micro algues et macro algues 2023
- Morvan P.Y Effect of *Chlorella* extract on skin, November 2007, Codif International, France
- Mulia, K., et al. "Effect of HBD Structure in ChCl-Based Deep Eutectic Solvents on Solubility and Extraction." *Journal of Molecular Liquids*, vol. 278, 2019, pp. 123–131.
- Nakano Sho a, Kwang-Hyeon Chang a, Atsushi Shijima b, Hiroyuki Miyamoto c, Yukio Sato c, Yuji Noto c, Jin-Yong Ha c, Masaki Sakamoto A usage of CO₂ hydrate: Convenient method to increase CO₂ concentration in culturing algae 2007
- Orusmurzaeva, Z. ; Maslova, A. ; Tambieva, Z. ; Sadykova, E. ; Askhadova, P. ; Umarova, K. ; Merzhoeva, A. ; Albogachieva, K. ; Ulikhanyan, K. ; Povetkin, S. Étude de la composition chimique et des propriétés physicochimiques de la biomasse de

- Chlorella vulgaris traitée par décharges pulsées en vue d'une utilisation potentielle dans l'industrie alimentaire. Potravin. Slovak J. Food Sci. 2022 , 16 , 777–789.
- OUALI MOUHAMMED,EL; SMAIL, B;(2017). Effet de la supplémentation du milieu de culture en carbone sur la croissance et la composition biochimique d'une souche microalgale marine « Nannochloropsis gaditana ». univ- mostaganeme 179p
 - Panahi, Y. ; Darvishi, B. ; Jowzi, N. ; Beiraghdar, F. ; Sahebkar, A. Chlorella vulgaris : un complément alimentaire multifonctionnel aux propriétés médicinales variées. Curr. Pharm. Des. 2016 , 22 , 164–173.
 - Qingyuan W, et al. Recent advances on application of polysaccharides in cosmetics. *Journal of Dermatologic Science and Cosmetic Technology* (2024).
 - Raikova sofia 'michael j,allen Hydrothermal liquefaction of macroalgae for the production of renewable biofuels 2019
 - Richmond, Amos. Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Science, 2004.
 - Safi, C. ; Zebib, B. ; Merah, O. ; Pontalier, P.-Y. ; Vaca-Garcia, C. Morphologie, composition, production, transformation et applications de Chlorella vulgaris : une revue. Renew. Sustain. Energy Rev. 2014 , 35 , 265–278.
 - SCHAGEN S. K *Topical peptide treatments with effective anti-aging results.* Cosmetics (2016)
 - Sekar S., Chandramohan M. Phycobiliproteins as a commodity: trends in applied research, patents and commercialization. J Appl Physiol 2008; 20: 113-6.
 - S.schade Distinct microalgae species for food—part 1: a methodological (top-down) approach for the life cycle assessment of microalgae cultivation in tubular photobioreactors 2020
 - Seon-Won Yoon 9, Sang-Yeob Kim a, Joon-Seong Jeon a Seungdae Oh b, Sang-Yeop Chung", Ji-Su Kim Sung-Kyu Maeng 3D-printed Chlorella vulgaris biocarriers: A novel approach to wastewater treatment2024
 - Sharma, N. K., and A. K. Rai. "Biodiversity and Biotechnological Potential of Microalgae: An Overview." *African Journal of Biotechnology*, vol. 10, no. 3, 2011, pp. 410–417.

- Tang Ying Zhong .Proc Natl Acad Sci U S A. Most harmful algal bloom species are vitamin B1 and B12 auxotrophs 2010.
- Toor, S. S., et al. "Bio-Crude Production from Protein-Extracted Grass." *Energies*, vol. 15, no. 1, 2022, 364.
- Toor, S. S.; et al. *Bio-Crude Production from Protein-Extracted Grass Residue through Hydrothermal Liquefaction*. *Energies* 2022, 15 (1), 364. <https://doi.org/10.3390/en15010364>
- Várfalvyová, A., et al. "Comparison of Sugar-Based DES with COVs for Polyphenol Extraction." *Molecules*, vol. 28, no. 1, 2023, 1124.
- Wang, B., et al. "CO₂ Bio-Mitigation Using Microalgae." *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 79, no. 5, 2008, pp. 707–718.
- Watson, J.; Si, B.; Li, H.; Liu, Z.; Zhang, Y. *Influence of Catalysts on Hydrogen Production from Wastewater Generated from the HTL of Human Feces via Catalytic Hydrothermal Gasification*. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017, 42 (32), 20503–20511. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.083>
- Yang, L.; Nazari, L.; Yuan, Z.; Corscadden, K.; Xu, C. (Charles); He, Q. (Sophia). *Hydrothermal Liquefaction of Spent Coffee Grounds in Water Medium for Bio-Oil Production*. *Biomass and Bioenergy* 2016, 86, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.005>
- Ying Ying Tang, D., Shiong Khoo, K., Wayne Chew, K., Tao, Y., Ho, S.-H., & Loke Show, P. (2020). Potential Utilization of Bioproducts from Microalgae for the Quality Enhancement of Natural Products. *Bioresource Technology*, (304),122997.
- ylviane HAUFROID NUXE HUILE PRODIGIEUSE OR FLORALE FLACON 50ML 2023
- Yu, G.; Zhang, Y.; Schideman, L.; Funk, T.; Wang, Z. *Distributions of Carbon and Nitrogen in the Products from Hydrothermal Liquefaction of Low-Lipid Microalgae*. *Energy Environ. Sci.* 2011, 4 (11), 4587–4595. <https://doi.org/10.1039/C1EE01541A>

- Zeraatkar, A.K.; Ahmadzadeh, H.; Talebi, A. F.; Moheimani, N. R. and Henry, M. P. (2016). Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review. J Environ. Manage., 181: 817-831.
- ZIGHMI Souad : production de biodiésel et optimisation des paramètres des procédés de culture des microorganismes. Le 6 juillet 2017 (thèse doctorat).
- Zou, S.; Wu, Y.; Yang, M.; Li, C.; Tong, J. *Bio-Oil Production from Sub- and Supercritical Water Liquefaction of Microalgae Dunaliella Tertiolecta and Related Properties*. Energy Environ. Sci. 2010, 3 (8), 1073–1078.
<https://doi.org/10.1039/C002550J>

Résumé :

Ce mémoire explore le potentiel cosmétique des microalgues, avec un focus particulier sur *Chlorella vulgaris*, une microalgue d'eau douce reconnue pour sa richesse en composés bioactifs tels que les peptides, polysaccharides, pigments et antioxydants. Ces molécules lui confèrent des propriétés multiples : hydratation profonde, régénération cellulaire, effet anti-âge, protection contre les agressions extérieures (UV, pollution, stress oxydatif), et renforcement de la barrière cutanée. L'étude met en évidence les avancées technologiques en matière d'extraction (enzymatique, ultrasons, supercritique), de formulation (nanoémulsions, encapsulation) et d'intégration dans des produits cosmétiques durables et innovants. Elle aborde également les contraintes technologiques, les exigences réglementaires internationales, ainsi que les perspectives futures telles que la cosmétique personnalisée, la bio-impression 3D et les cosmétiques biomimétiques. En somme, *Chlorella vulgaris* s'impose comme une ressource naturelle stratégique dans le développement de la cosmétique verte et intelligente de demain.

Mots-clés : Microalgues, *Chlorella vulgaris*, hydratation, cosmétique.

Abstract:

This thesis explores the cosmetic potential of microalgae, with a particular focus on *Chlorella vulgaris*, a freshwater microalgae known for its richness in bioactive compounds such as peptides, polysaccharides, pigments, and antioxidants. These molecules provide it with multiple properties: deep hydration, cell regeneration, anti-aging effects, protection against external aggressions (UV, pollution, oxidative stress), and strengthening of the skin barrier. The study highlights technological advances in extraction (enzymatic, ultrasound, supercritical), formulation (nanoemulsions, encapsulation), and integration into sustainable and innovative cosmetic products. It also addresses technological constraints, international regulatory requirements, as well as future prospects such as personalized cosmetics, 3D bioprinting, and biomimetic cosmetics. In short, *Chlorella vulgaris* is emerging as a strategic natural resource in the development of tomorrow's green and smart cosmetics.

Keywords: Microalgae, *Chlorella vulgaris*, hydration, cosmetics.

الملخص:

تستكشف هذه الأطروحة الإمكانيات التجميلية للطحالب الدقيقة، مع التركيز بشكل خاص على طحلب الكلوريلا الشائع (*Chlorella vulgaris*) ، وهو طحلب دقيق يعيش في المياه العذبة، يُعرف بغناه بالمركبات النشطة بيولوجيًا، مثل الببتيدات، والسكريات المتعددة، والأصبغ، ومضادات الأكسدة. تُزوده هذه الجزيئات بخصائص متعددة: الترطيب العميق، وتجديد الخلايا، وتأثيرات مضادة للشيخوخة، والحماية من العوامل الخارجية الضارة (مثل الأشعة فوق البنفسجية، والتلوث، والإجهاد التأكسدي)، وتقوية حاجز البشرة.

تُسلط الدراسة الضوء على التطورات التكنولوجية في الاستخلاص (بالإنزيمات، والموجات فوق الصوتية، والطرق فوق الحرجة)، والتركيب (المستحلبات النانوية، والتغليف)، والتكامل في منتجات تجميل مستدامة ومبتكرة. كما تتناول القيود التكنولوجية، والمتطلبات التنظيمية الدولية، بالإضافة إلى الآفاق المستقبلية، مثل مستحضرات التجميل الشخصية، والطباعة الحيوية ثلاثية الأبعاد، ومستحضرات التجميل المُحاكاة للطبيعة.

باختصار، تبرز طحلب الكلوريلا الشائع كمورد طبيعي استراتيجي في تطوير مستحضرات التجميل الخضراء والذكية للمستقبل.

الكلمات المفتاحية: الطحالب الدقيقة، الكلوريلا الشائعة، الترطيب، مستحضرات التجميل.