

Remerciements

Avant tout, nous remercions, DIEU le Tout-Puissant à qui nous rendons grâce, de nous avoir éclairé le chemin du savoir et de la sagesse et de nous avoir donné le courage, la force, la volonté et la patience d'entamer et de terminer ce travail.

*Au terme de ce modeste travail, nos vifs remerciements s'adressent à notre promotrice **Mme Jazdaït R.**, maître de conférences à l'UMMTO, qui a accepté de nous encadrer et de diriger ce travail. Nous la remercions pour son sérieux, son dévouement pour son travail et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire, mais aussi pour son aide fructueuse, ses précieuses recommandations et ses corrections sérieuses qui nous ont permis de mener à bien ce travail. Soyez rassurée de notre profonde gratitude.*

*Nous tenons également à remercier les membres de jury **Mme Senani N.** et **Mme Bedouhene S.**, maîtres de conférences à l'UMMTO, pour l'honneur qu'elles nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail et de siéger à notre soutenance.*

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles : nos parents que DIEU les protège et leur préserve une longue vie, et tous nos proches et ami(e)s, qui nous ont accompagnés, aidés, soutenus et encouragés tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Sarah et Dyhia

Dédicaces

Je tiens vivement à dédier ce travail :

À mes très chers parents, aucune dédicace ne saurait témoigner de mon affection et de ma reconnaissance éternelle pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon éducation, mes études et mon bien être.

*À mon cher père **Mohamed** qui m'a appris le sens de la persévérance tout au long de mes études. Merci pour ta compréhension, ta patience et ton soutien moral et financier.*

*À la lumière de mes yeux, le bonheur de ma vie et ma raison d'être, **mon adorable mère Fatma**, sans qui je ne serais pas là aujourd'hui. Mille fois merci pour tous tes conseils, tes encouragements, pour ton soutien inébranlable tout au long de mon parcours.*

*À ma chère grand-mère **Laldja**, qu'elle repose en paix, qui m'a toujours épaulé et qui a été un bon exemple pour moi.*

*À mon futur mari **INCHA ALLAH, Boussad** qui a toujours été mon appui et mon aide. Ton humour si particulier, m'a toujours égayé même dans les moments les plus durs. Je te dédie ce travail en implorant DIEU le tout puissant de nous accorder une longue vie de bonheur, de prospérité et de réussite.*

*À mon cher frère, **Ali** que DIEU le protège.*

*À ma chère amie, **Yasmine**. Je te souhaite que du bonheur et de la réussite.*

*À mon cher binôme **Dyhia** pour sa contribution à la réalisation de ce notre travail.*

*À toute ma famille, la famille **KORSO** et **KRIKEB**.*

À tous ceux et celles qui me sont très chers et que ma réussite leur tient à cœur...

Sarah

Dédicaces

Il m'est agréable de profiter de cette occasion, pour rendre un hommage particulièrement sincère à travers ce modeste mémoire, à tous ceux qui me sont chers, à tous ceux qui m'ont soutenu moralement et matériellement.

Je dédie ce modeste mémoire : A ma chère mère et à mon cher Père qui m'ont soutenus tout au long de mon cursus, pour leurs patiences, leurs aides et leurs encouragements et ainsi que leurs prières.

A mes chers frères : Mohand et Tarik.

A ma chère sœur : Kenza.

A tous mes enseignants, car j'ai eu le privilège de profiter de leurs vastes connaissances, ainsi que leur profond savoir.

A mes chères amies et collègues : Sarah, Meriem et Dahbia.

A ma famille et toutes les personnes que j'aime.

Dyhia

Table des matières

Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction	1
Chapitre I : Généralités sur les algues marines	
1. Définition	2
2. Les micro et macroalgues	2
2.1. Les microalgues	3
2.2. Les macroalgues	3
3. Classification des algues	3
4. Les grands groupes des algues marines	5
4.1. Les algues vertes	5
4.2. Les algues brunes	6
4.3. Les algues rouges	6
4.4. Les cyanobactéries	7
5. Habitat et conditions de vie	8
5.1. Habitat des algues	8
5.2. Conditions de vie des algues	8
5.2.1. La lumière	8
5.2.2. Le substrat	9
5.2.3. La température	9
5.2.4. La salinité de l'eau	9
6. Modalités de reproduction des algues	10

7. Composition chimique et caractéristiques nutritionnelles des algues	10
7.1. Les amines	11
7.1.1. Les protéines	11
7.1.2. Les lectines	12
7.1.3. Laminine	12
7.2. Les polysaccharides	12
7.2.1. Les ulvanes	13
7.2.2. L'alginate	13
7.2.3. Les fucanes	14
7.2.4. Laminarine	15
7.2.5. Les carraghénanes	15
7.2.6. Les galactanes	17
7.2.7. L'agar et l'agarose	17
7.2.8. Le porphyrane	17
7.3. Les lipides	18
7.3.1 Les lipides neutres	18
7.3.2. Les phospholipides (PL)	18
7.3.3. Les glycolipides	20
7.4. Les vitamines	21
7.5. Les éléments minéraux	21
7.6. Les pigments	22
7.6.1. Les caroténoïdes	22
7.6.2. Les chlorophylles	22
7.6.3. Les phycobiliprotéines	23
7.7. Les métabolites secondaires	23
7.7.1. Polyphénols	24
7.7.2. Les terpénoïdes	24
7.7.3. Les alcaloïdes	24
7.7.4. Acides aminés analogues de la mycosporine (MAA _S)	25

Chapitre II : Utilisations et activités biologiques des algues marines

1. Utilisations des algues	26
1.1. En alimentation humaine	26
1.2. En alimentation animale	27
1.3. Dans l'industrie alimentaire	28
1.4. En agriculture	29
1.5. Dans le traitement des eaux usées	30
1.6. Dans le domaine pharmaceutique	31
1.7. Dans le domaine médical	31
1.8. Dans le domaine cosmétique	32
1.9. En biotechnologie	33
1.10. En bioénergie	33
2. Activités biologiques des algues marines	34
2.1. Activité antivirale	35
2.2. Activité antimicrobienne	37
2.3. Activité anti-thrombotique	38
2.4. Activités anti-inflammatoire et immunomodulatrice	39
2.5. Activité anticancéreuse	41
2.6. Activité antioxydante	46
2.7. Activités préventives anti-obésité, anti-athérosclérose et anti-hypercholestérolémie	47
2.8. Activité gastroprotective	48

2.9. Activité anti-hyperglycémiante	49
Conclusion générale	51
Références bibliographiques	52
Résumé	

Liste des abréviations

°C : degré Celsius

AA : acide arachidonique

ADN : acide désoxyribonucléique

AGPI : acides gras polyinsaturés

ALA : acide α -linoléique

AP-1 : protéine activatrice 1

BP_s : bromophénols

CCR5 : récepteur à C-C chimiokine de type 5

CD4 : cluster of differentiation 4 / cluster de différenciation 4

CEVA : centre d'étude et de valorisation des algues

CO₂ : dioxyde de carbone

COX : cyclooxygénase

COX-2 : cyclooxygénase 2

Da : dalton

DAG : diacylglycérol

DCO : demande chimique en oxygène

DGDG : digalactosyl-diacylglycérol

DHA : acide docosahexaénoïque

EPA : acide eicosapentaénoïque

EPS : exopolysaccharides

Fe²⁺ : ion ferreux

GAGs : glycosaminoglycanes

gp 120 : glycoprotéine 120

gp 41 : glycoprotéine 41

H₂O₂ : eau oxygénée

HDL cholestérol : lipoprotéines de haute densité

HHV-6 : virus de l'herpès humain type 6

HO[·] : radicaux hydroxyles

HSV-1 : virus de l'herpès simplex 1

IL-1 : interleukine-1

IL-12 : interleukine -12

IL-1β : interleukine -1bêta

IL-6 : interleukine -6

Ino : inositolniacinate

iNOS : oxyde nitrique synthase inductible

kDa : kilodalton

Kg : kilogramme

LA : acide linoléique

LDL-cholestérol : lipoprotéines de basse densité

LPS : lipopolysaccharides

MAAs : Mycosporine-like amino-acides /acides aminés analogues de la mycosporine

MAG : monoacylglycérols

MAPK : protéine kinase activée par un mitogène

mg/L : milligramme/litre

MGDG : monogalactosyl-diacylglycérol

mL/g : Millilitre/grammes

mm : millimètre

NF-κB : facteur nucléaire κB

O₂ : oxygène

PC : phosphatidylcholine

PE : phosphatidyléthanolamine

PG : phosphatidylglycérol

pH : potentiel Hydrogène

PL : phospholipide

P-sélectine : protéine de type sélectine

PTP1B : protéine-tyrosine phosphatase 1B

RNS : reactive nitrogen species / espèces azotées réactives

ROS : reactive oxygen species / espèces réactives de l'oxygène

sPLA2 : phospholipases A2 sécrétoire

SQDG : sulfoquinovosyl-diacylglycérol

STA : acide stéarique

T2DM : diabète de Type 2 Mellitus / Diabète sucré de type 2

TAG : triacylglycérol

TBT : tributylétain

TNF- α : facteur de nécrose tumorale

UV : rayons ultraviolets

VIH : virus de l'immunodéficience humaine

VIH-1 : virus de l'immunodéficience humaine type 1

α -carotène : alpha-carotène

β -carotène : bêta-carotène

θ : thêta

ι : Iota

κ : Kappa

λ : Lambda

μ : Mu

μm : micromètre

ν : Nu

ξ : Psi

ω3 : oméga 3

Liste des figures

Figure 01 : Photographie de l'algue verte <i>Ulva lactuca</i>	5
Figure 02 : Photographies des bradypes présentant un pelage bleu-vert, dû à des cyanobactéries <i>Cyanoderma bradypii</i>	8
Figure 03 : Facteurs de répartition des algues marines	9
Figure 04 : Photographies des algues : <i>Laminaria angustata</i> et <i>Chondria armata</i>	12
Figure 05 : Structure de l'ulvane	13
Figure 06 : Structure chimique de l'alginate	14
Figure 07 : Structure primaire des chaînes de fucoses liés en α (1 \rightarrow 2) des fucanes d'algue brune	14
Figure 08 : Structure des différentes carraghénanes	16
Figure 09 : Structure de l'agarose	17
Figure 10 : Structure moléculaire de résidu 4-6-O-sulfo- α -L-galactopyranose et de résidu 3-6-O-méthyl- β -D-galactopyranose	18
Figure 11 : Structure chimique des phospholipides des algues	19
Figure 12 : Structure chimique des principaux acides gras poly-insaturés oméga 3 (ω 3) des algues : l'acide alpha-linoléique, l'acide eicosapentaénoïque, l'acide docosahexaénoïque	20
Figure 13 : Structure chimique des principaux glycolipides des algues marines : la structure chimique des principaux glycolipides des algues marines : le monogalactosyl-diacylglycerol ; le digalactosyl-diacylglycerol et le sulfoquinovosyl-diacylglycerol	21
Figure 14 : Structure moléculaire de la chlorophylle a et b	23

Figure 15 : La molécule d'isoprène	24
Figure 16 : Structure de l'acide domoïque et de l'acide kainique	25
Figure 17 : Photographie de l'algue <i>Dunaliella salina</i>	29
Figure 18 : Photographie d'une Chlorophycée <i>Chlorella vulgaris</i>	30
Figure 19 : Photographie de l'algue <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	32
Figure 20 : Biocarburants issus de microalgues lipidiques	34
Figure 21 : Mécanisme d'attachement du VIH sur les cellules hôtes	36
Figure 22 : Structure chimique du kahalalide F	43
Figure 23 : Structure chimique du dehydrothysiferol et de la lophocladine	44
Figure 24 : Effets d'ulvanes et les fractions d'ulvanes sur la dégradation du foie du rats sous régime hypocholestérolémiant	48
Figure 25 : Niveau de sécrétion des mucines du colon des rats après l'administration orale d'ulvanes à divers concentrations	49

Liste des tableaux

Tableau I : Caractéristiques importantes des groupes d'algues	4
Tableau II : Analyse globale moyenne des algues	10
Tableau III : Analyse moyenne des matières sèches	11
Tableau IV : Algues autorisées pour l'alimentation humaine	27

Introduction générale

Les algues (phycophytes) reconnues depuis le début du XX^{ème} siècle regroupent, principalement, les végétaux aquatiques chlorophylliens. Elles occupent une place importante dans le milieu marin, de part leur abondance et leur accessibilité. Elles comptent plus de 150000 espèces appartenant à différents niveaux d'évolution. Il en existe deux types: les microalgues unicellulaires et les macroalgues. Selon la nature de leurs pigments, les algues peuvent être divisées en quatre catégories : les algues brunes, les algues rouges, les algues vertes et les cyanobactéries

La diversité d'espèces en algues et leur richesse en métabolites permettent une large gamme d'applications dans de nombreux secteurs industriels. Les produits issus des algues sont commercialisés pour les secteurs de la santé, l'alimentation humaine, le cosmétique et la pharmaceutique. On les retrouve aussi dans le domaine de l'alimentation animale et de l'énergie.

Les algues possèdent un grand nombre de molécules naturelles potentiellement actives. Une série d'études a permis d'isoler et d'identifier de nouvelles molécules algales de grande originalité structurale. Parmi ces biomolécules, on trouve: les lipides, les vitamines, les polysaccharides (agar, carraghénane, protéoglycane et alginates), les protéines, les pigments comme les caroténoïdes, les antioxydants (les polyphénols et les alcaloïdes). En raison de leur composition riche et diversifiée en métabolites, les algues ont de nombreuses propriétés biologiques fonctionnelles différentes et intéressantes, notamment les activités : antimicrobienne, antivirale, anti-inflammatoire, anticoagulante, anticancéreuse et antioxydante ainsi que d'autres activités.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail de recherche dont l'objectif est de présenter une synthèse bibliographique sur les algues marines, ainsi qu'un aperçu sur leur composition chimique et leurs activités biologiques.

Chapitre I

Généralités sur les algues marines

1. Définition

Les algues sont des organismes chlorophylliens autotrophes, qui poussent en abondance dans les océans, les lacs, les étangs, les mares, les eaux courantes et les eaux thermales ; elles se trouvent généralement sur les rochers humides et sur terre. Les algues peuvent être endophytes de tissus animaux ou végétaux (ROLAND et VIAN, 1999 ; OZENDA, 2000). Elles présentent entre 20 000 à 30 000 espèces dans le monde, soit 18% du règne végétal (MORERE *et al.*, 2002).

La survie et le développement des algues nécessitent la lumière pour la photosynthèse, l'eau pour la nutrition et la reproduction, le dioxyde de carbone, l'azote, le phosphore ainsi que du fer (RAVEN, 2007).

L'appareil végétatif de l'algue est représenté par un thalle (un appareil végétatif unicellulaire ou multicellulaire sans racines, tiges et feuilles), sa forme et sa taille varient considérablement.

Les cellules d'algues ont une paroi cellulaire partiellement cellulosique, des petits noyaux et des plastes pigmentés ou chromatophores contenant de la chlorophylle souvent masquée par des pigments surnuméraires qui donnent aux thalles des couleurs variées (rouge, brune, verte ou bleue) (GARON-LADIERE, 2004).

Les algues peuvent être libres ou fixées sur des supports, et leur taille varie de moins d'un micron (0,5 μm pour la cyanobactérie *Prochlorococcus*) à des dizaines de mètres (60 mètres pour l'algue brune *Macrocystis*) (LECLERC, 2010). Par conséquent, il existe deux principaux types d'algues: les microalgues et les macroalgues qui sont généralement fixées. Par rapport aux plantes supérieures, leurs pigments ont une grande diversité, ce qui permet de distinguer les algues vertes, les algues rouges et les algues brunes.

2. Les micro- et macroalgues

La base de données internationale sur les algues "AlgaeBase" répertorie environ 30 000 noms d'espèces, dont la plupart sont des microalgues (GUIRY et GUIRY, 1996).

2.1. Les microalgues

Les microalgues sont plus diversifiées que toutes les plantes terrestres. Ces organismes constituent un groupe polyphylétique représenté par des procaryotes (les algues bleues ou cyanobactéries), et par des eucaryotes (uni ou multicellulaire) à structure complexe, comportant un noyau et plusieurs organites entourés d'une membrane (PULZ *et al.*, 2004 ; ABED *et al.*, 2009).

Les espèces de microalgues vertes les plus connues sont *Chlorella*, *Chlamydomonas*, *Dunaliella* ainsi que *Haematococcus*, *Nannochloropsis* et la diatomée *Odontella* (PULZ *et al.*, 2004 ; ABED *et al.*, 2009).

2.2. Les macroalgues

Les macroalgues englobent tous les organismes aquatiques photosynthétiques multicellulaires à l'exception des plantes terrestres (plantes vertes ou plantes germinales) (BARRINGTON *et al.*, 2009). Il y aurait environ 25 000 espèces de macroalgues (GUIRY et GUIRY, 1996).

3. Classification des algues

La phylogénie des algues implique de nombreux critères écologiques, physiologiques ou biochimiques, tels que la structure cellulaire, le mode de nutrition, l'habitat et même la nature et la localisation des pigments et des glucanes.

Les algues présentent une grande diversité et complexité structurelle d'un point de vue macroscopique et microscopique, mais elles peuvent être divisées en une dizaine de branches selon leur composition pigmentaire, leurs réserves de polysaccharides ou leurs caractéristiques structurales (DE REVIERS, 2002 ; RUIZ, 2005).

La classification des algues repose sur cinq critères :

- ❖ Trois critères biochimiques qui sont :
 - la nature des pigments photosynthétiques ;
 - la nature des polysaccharides de réserve ;

- la nature des polyholosides de soutien.

❖ Deux critères morphocytologiques qui concernent :

- le type de flagelle ;
- certains détails de la structure cellulaire.

Selon ces critères, les algues sont réparties en plusieurs divisions: les Chlorophycées (algues vertes), les Phéophycées (algues brunes), les Rhodophycées (algues rouges) et les Cyanobactéries (algues bleues) (Tableau I).

Tableau I : Caractéristiques importantes des groupes d'algues (DEMOULAN et LEYMERGIE, 2009).

Embranchement (Règne)	Nom commun	Nombre d'espèces	Pigments	Habitat
Chlorophytes (Protistes)	Algues vertes	7500	Chlorophylle (a,b), xanthophylles et carotènes	Eau douce, saumâtre, salée et terrestre
Phéophytes (Plantes)	Algues brunes	1500	Chlorophylle (a,c),xanthophylles et carotènes	Eau salée et saumâtre
Rhodophytes (Plantes)	Algues rouges	3900	Chlorophylle (a, rarement d), xanthophylles,carotè nes,zéaxanthine, phycocyanine C, phycoérythrine	Eau douce, saumâtre et salée
Cyanophytes, (Procaryotes)	Cyanobactéries, algues bleues	15000	Chlorophylle (a), allophycocyanines, phycocyanine, phycoérythrine, phycoérythrocyanine	Eau riche en minéraux

4. Les grands groupes des algues marines

4.1. Les algues vertes

Appelées aussi chlorophycophytes, ces algues d'un vert franc (Figure 01), à chloroplastes pariétaux porteurs de pyrénoides et élaborant de l'amidon, ont une membrane cellulaire souvent associée à une couche externe de pectine.

Le thalle est unicellulaire dans une grande partie des chlorophycées ; il est filamenteux dans les autres, foliacé ou massif dans les plus évaluées. Ces algues sont caractérisées par des zoospores typiques piriformes à 2 flagelles apicaux égaux, des vacuoles contractiles et de taches oculiformes rouges (OZENDA, 2007). Elles désignent un groupe d'organismes variés comprenant au moins 17 000 espèces (PEREZ, 1997).

Ce groupe est très uniforme en termes de composition pigmentaire et de métabolisme glucidique. Toutes les algues appartenant à cet embranchement contiennent de la chlorophylle a et b, du β -carotène et des oxycarotènes (lutéine, zéaxanthine, violaxanthine) (BEZANGER *et al.*, 1990).



Figure 01 : Photographie de l'algue verte *Ulva lactuca* (ANONYME 01).

La majorité des algues vertes vivent dans l'eau douce et les milieux marins, mais certaines espèces peuvent également pousser sur terre. Elles favorisent la vie animale en jouant un rôle important dans l'oxygénation des eaux (GARON-LARDIERE, 2004).

4.2. Les algues brunes

Les algues brunes sont également appelées chromophytes, jamais unicellulaires, à appareil végétatif souvent complexe et de dimensions très variables. Elles possèdent toutes une structure pluricellulaire renfermant des plastes pariétaux bruns (phéoplastes), généralement nombreux discoïdes ou bilobés, rarement uniques ou en forme de plaquettes irrégulières ou de bandelettes ramifiées (OZENDA, 2007).

Leur couleur brunâtre est due à l'abondance de la xanthophylle et de la fucoxanthine, qui dominent les autres pigments comme la chlorophylle a et c, ainsi que le β -carotène (GARON-LARDIERE, 2004).

La laminarine et le mannitol représentent la majorité des produits du métabolisme dissous dans les vacuoles. Il y a souvent des lipides mais jamais d'amidon. Leurs parois cellulaires pauvres en cellulose, sont surtout formées d'alginate et de fucoïdane (OZENDA, 2007).

Les cellules germinales sont généralement flagellées (zoïdes) avec deux flagelles inégaux, rarement immobiles (aplanospores) et leurs parties antérieures sont pourvues de barbules (OZENDA, 2007).

Aujourd'hui près de 1500 espèces d'algues brunes sont entièrement marines. Elles représentent les algues les plus abondantes des mers tempérées et froides où elles forment les grandes forêts sous-marines (GILLAUME, 2010).

4.3. Les algues rouges

Les algues rouges sont nommées aussi rhodophycophytes. Elles sont des thallophytes eucaryotes et forment un taxon très diversifié (RAMDANI et ELKHIATI, 1998).

On connaît de 4000 à 6000 espèces réparties dans environ 680 genres, avec plus de 564 espèces qui se trouvent sur les bords de mer à travers le monde (RAVEN *et al.*, 2003).

Les algues rouges se divisent en deux groupes : celui des Bangiophycées (qualifiées de primitives) et celui des Floridéophycées (plus complexes) qui se distinguent par leur cycle de reproduction particulièrement complexe (GILLAUME, 2010).

Les algues rouges ne produisent pas de l'amidon, mais un glucide de plus faible poids moléculaire, analogues au glycogène, appelé amidon floridéen. Celui-ci se colore, par l'iode, en brun contrairement à l'amidon qui se colore en bleu (OZENDA, 1990). Les rhodophycées sont dépourvues de flagelles, de centrioles, et des chlorophylles b et c (YOON *et al.*, 2007).

La phycoérythrine, un pigment rouge, hétéroprotidique, à noyaux pyrroliques associé à d'autres pigments comme la chlorophylle a « le centre réactionnel de la photosynthèse », la phycocyanine et l'allophycocyanine, présentes dans les plastes roses permettent d'attribuer la couleur rouge à ces algues (CABIOC'H, 1992 ; PEREZ, 1997 ; RAVEN *et al.*, 2011).

La reproduction des algues rouges ne fait jamais intervenir d'éléments flagellés. Les gamètes mâles (spermaties) sont dépourvus de mobilité et transportés passivement sur une partie réceptrice de l'oogone et le trichogyne. En effet, la fécondation est comparable à une oogamie (OZENDA, 2007).

Les Rhodophycées peuvent être pluricellulaires ou unicellulaires, vivant dans l'eau douce ou salée (GARON-LARDIERE, 2004).

4.4. Les cyanobactéries

Les colonies des cyanobactéries, anciennement nommées algues bleues, sont de tailles, de formes et de couleurs très variables. Comme les algues rouges, la chlorophylle "a" est masquée par la présence de pigments surnuméraires bleus (phycocyanines) et rouges (phycoérythrine). En raison des mucilages qu'elles sécrètent, la plupart d'entre-elles ont une consistance gélatineuse voire visqueuse (GARON-LARDIERE, 2004 ; AINANE, 2011).

Les cyanobactéries sont répandues dans tous les types d'habitats aquatiques, et présentent une forte tolérance vis-à-vis des températures extrêmes. Parmi les espèces de cyanobactéries les plus connues, on trouve: *Arthrospira plantensis* (la spiruline, qui représente 50% de la production mondiale), *Nostoc commune* et *Aphanizomenon flos-aquae* (PULZ et GROSS, 2004).

5. Habitat et conditions de vie

5.1. Habitat des algues

Dans le milieu aquatique, les algues peuvent être planctoniques (en suspension dans l'eau) ou benthiques (fixées ou étroitement liés au fond). Le même type d'algues peut être représenté de manière proéminente à la fois dans le plancton et le benthos (algues vertes, diatomées), ou principalement dans le plancton (les haptophytes), ou presque exclusivement benthique (algues rouges et algues brunes). Les algues peuvent également être aériennes, se développent sur les plantes, les animaux aquatiques ou terrestres telle que la cyanobactérie *Cyanoderma bradypii*, retrouvée sur les poils des bradypes (paresseux à trois doigts) (DE REVIERS, 2016).



Figure 02 : Photographies des bradypes présentant un pelage bleu-vert, dû à des cyanobactéries *Cyanoderma bradypii* (FOGDEN et FOGDEN, 2015).

5.2. Conditions de vie des algues

Comme tous les organismes marins, les algues sont soumises à un ensemble de conditions spécifiques à leur environnement (CABIOC'H *et al.*, 1992). Comme :

5.2.1. La lumière

Les algues étant des végétaux photosynthétiques, la lumière est indispensable à leur vie. La lumière affecte les algues de diverses manières par : l'intensité lumineuse, la nature des radiations et la durée du cycle lumière-obscurité (CABIOC'H *et al.*, 1992).

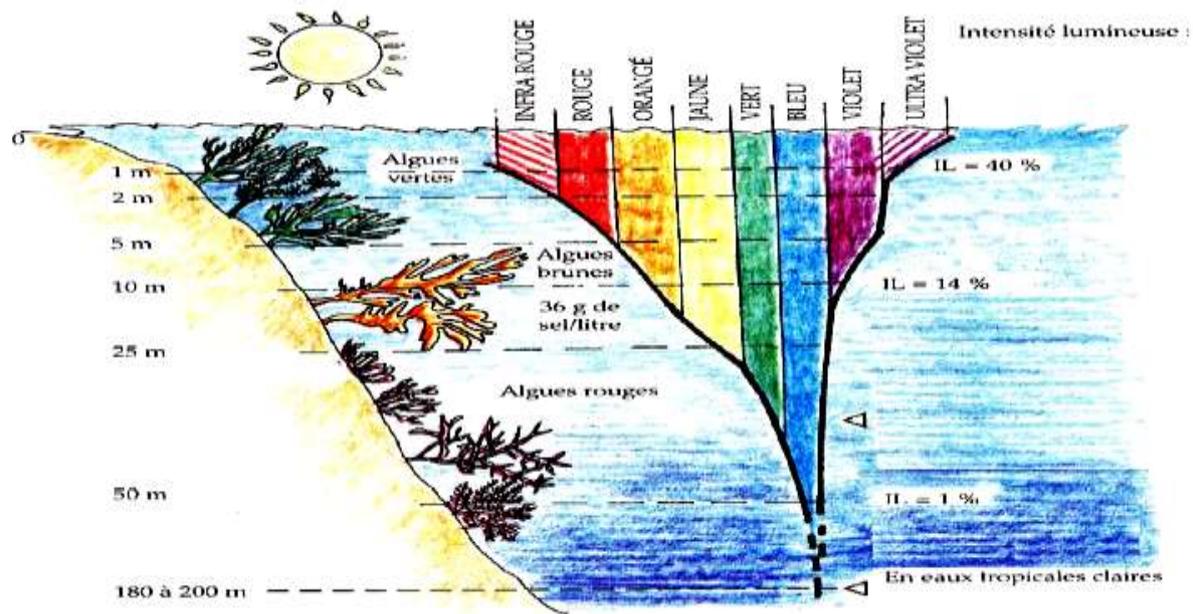


Figure 03 : Facteurs de répartition des algues marines (LECLERC, 2010).

5.2.2. Le substrat

La majorité des algues pluricellulaires exigent en effet d'être fixées sur un support pour acquérir un développement normal et accomplir leur cycle de vie. N'ayant pas de système racinaire, elles ne tirent pas leurs éléments nutritifs de leur substrat mais directement du milieu dans lequel elles se trouvent.

Les algues peuvent également se développer sur des organismes vivants animaux ou végétaux.

5.2.3. La température

Les variations de température peuvent agir sur la dispersion ou la régression des peuplements en influençant sur le système métabolique et reproducteur de l'algue.

5.2.4. La salinité de l'eau

Les modifications de la salinité peuvent s'effectuer soit dans le sens d'une dilution, soit dans le sens d'une surconcentration en sels. Tout comme la température, la variabilité de la

salinité perturbe le métabolisme ce qui entraîne parfois la disparition des espèces (CABIOC'H *et al.*, 1992).

6. Modalités de reproduction des algues

Il existe deux modes de reproduction chez les algues: la reproduction asexuée (multiplication végétative) et la reproduction sexuée impliquant la combinaison de gamètes mâles et femelles. Dans certains groupes (cyanobactéries), le mode asexué est le seul connu. Dans d'autres cas, il coexiste avec la reproduction sexuée, en particulier chez les characées (famille d'algue verte) dans lesquelles ce dernier mode est dominant (LAPLACE-TREYTURE, 2014).

7. Composition chimique et caractéristiques nutritionnelles des algues

Selon l'analyse globale moyenne, les algues marines sont constituées de 80 % d'eau contenue essentiellement dans les vacuoles, ainsi que le cytoplasme et la paroi cellulaire et 20% de matières sèches (DONADIEU et BASIRE, 1985) (Tableau II).

Tableau II : Analyse globale moyenne des algues (DONADIEU et BASIRE, 1985).

Composition des algues		Pourcentage (%)
Eau		80%
Matières sèches	Matières organiques	15%
	Matières minérales	5%

Les algues ont des potentialités nutritionnelles très riches. L'analyse de leur matière sèche révèle une richesse en glucides et en protéines qui sont généralement bien équilibrées en acides aminés et présentes en quantités non négligeables dans certaines espèces. La teneur en lipides est faible, mais certaines espèces sont riches en acides gras polyinsaturés et en vitamines, en minéraux (macroéléments et oligoéléments), en fibres de structures variées et en pigments (chlorophylles, caroténoïdes, xanthophylles et phycobilines) (DONADIEU et BASIRE, 1985 ; ISMAIL et HONG, 2002 ; DUAN *et al.*, 2006 ; GANESAN *et al.*, 2008) (Tableau III) .

Tableau III : Analyse moyenne des matières sèches (DONADIEU et BASIRE, 1985).

Matières organiques (75%)	Glucides (60%)	Alginate, carraghénanes, fucosanes, gélose, laminarine et cellulose
	Protides (10%)	Aspartate, glutamate, alanine, arginine, asparagine, cystéine, glycine, histidine, etc.
	Lipides (5%)	Phospholipides, glycolipides, etc.
	Vitamines	A, B1, B2, B3, B6, B12, C, D, E et K
	Pigments	Chlorophylles, carotènes, xanthophylles et phycobilines
Matières minérales (25%)	Macroéléments	Potassium, chlore, sodium, magnésium, soufre, iode, fer cuivre et manganèse
	Oligoéléments	Aluminium, argent, arsenic, baryum, chrome, cobalt, fluor, nickel, or, plomb, sélénium et zinc

La composition chimique des algues marines varie selon plusieurs facteurs: l'espèce, le stade de maturité, l'habitat naturel et les conditions environnementales (KAIMOUSSE *et al.*, 2004 ; ORTIZ *et al.*, 2006).

7.1. Les amines

7.1.1. Les protéines

La teneur en protéine des algues marines diffère d'un phylum à l'autre. Les algues rouges et les algues vertes contiennent souvent des niveaux élevés de protéines (en % de poids sec) ; contrairement aux algues brunes (DAWCZYNSKI *et al.*, 2007 ; HOLDT et KRAAN, 2011).

Chez les algues brunes, la teneur en protéines est faible (5% à 15% de matière sèche). L'algue connue pour sa haute teneur en protéines est la spiruline (microalgue d'eau douce) ou on retrouve la plupart des acides aminés essentiels (LECLERC et FLOC'H, 2010).

Dans les algues rouges et bleues, il existe une protéine qui constitue le pigment principal de ces algues: la phycobiliprotéine.

7.1.2. Les lectines

Les lectines sont des glycoprotéines qui se trouvent principalement dans les corps protéiniques des cellules algales (MATSUBARA *et al.*, 1996). Elles se lient aux carbohydrates et interviennent dans divers processus biologiques (CHOJNACKA *et al.*, 2012).

7.1.3. Laminine

La laminine est une choline isolée de plusieurs algues, et surtout à partir des extraits d'eau de *Laminaria angustata* et *Chondria armata* (Figure 04) par une résine d'échange ionique (GIRARD *et al.*, 1988).

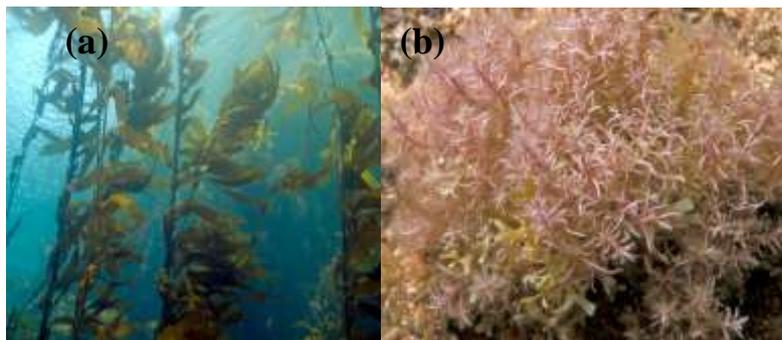


Figure 04 : Photographies des algues : *Laminaria angustata* (a) et *Chondria armata* (b)
(ANONYME 02 ; ANONYME 03).

7.2. Les polysaccharides

Les algues constituent des sources importantes de polysaccharides (32 à 74%), ayant des structures variées et originales, différentes des fibres des végétaux terrestres (LAHAYE, 1991).

Les phycocolloïdes sont les polysaccharides particuliers des algues. Chez les algues brunes, ils peuvent représenter entre 18 à 45% de leur masse sèche.

7.2.1. Les ulvanes

Les ulvanes sont des hétéropolysaccharides hydrosolubles hautement sulfatés extraits des parois cellulaires de certaines algues vertes appartenant au genre *Ulva*.

L'ulvane (Figure 05) est composé principalement d'acide 4- β -D-glucuronique glycosyl (1 \rightarrow 4) - α -L-rhamnose-3-sulfate (LAHAYE *et al.*, 1997 ; JAULNEAU *et al.*, 2010) qui est ramifié de manière variable par des résidus de mannose, xylose, galactose et glucose (SHANMUGAM *et al.*, 2002; MAO *et al.*, 2008).

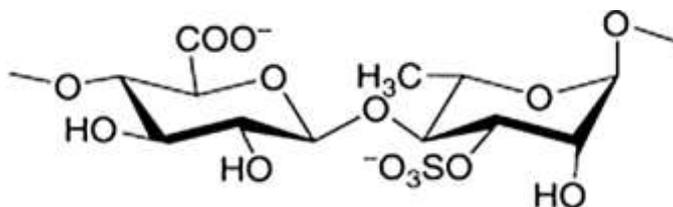


Figure 05 : Structure de l'ulvane (JIAO *et al.*, 2011).

7.2.2. L'alginate

L'alginate est un polysaccharide matriciel des algues brunes. Situé dans la zone médullaire, il est retrouvé chez les genres *Fucus* et *Macrocystis*. Il donne de la flexibilité aux thalles, prévient la dessiccation et intervient dans les échanges d'ions (FALLER, 2011).

L'alginate (Figure 06) est un sel dérivé de l'acide alginique, c'est un polymère linéaire constitué d'un diholoside anionique d'acide β -D-mannuronique et d'acide α -L-guluronique relié par une liaison osidique β (1-4) (REVIERS *et al.*, 2002). Dans ces chaînes d'alginate, on distingue les blocs polymannuroniques (notés poly-M ; (-M-) n ou MM), les blocs polyguluroniques (notés poly-G ; (-G-)n ou GG), et les blocs mixtes mannuroniques/guluroniques (notés poly-MG ; (-M-G-)n ou MG) (FALLER, 2011).

L'acide alginique est insoluble dans l'eau, mais très hydrophile, il peut donc stocker 140 fois son propre volume d'eau (KORNPROBST *et al.*, 2005 ; PEREZ, 1997).

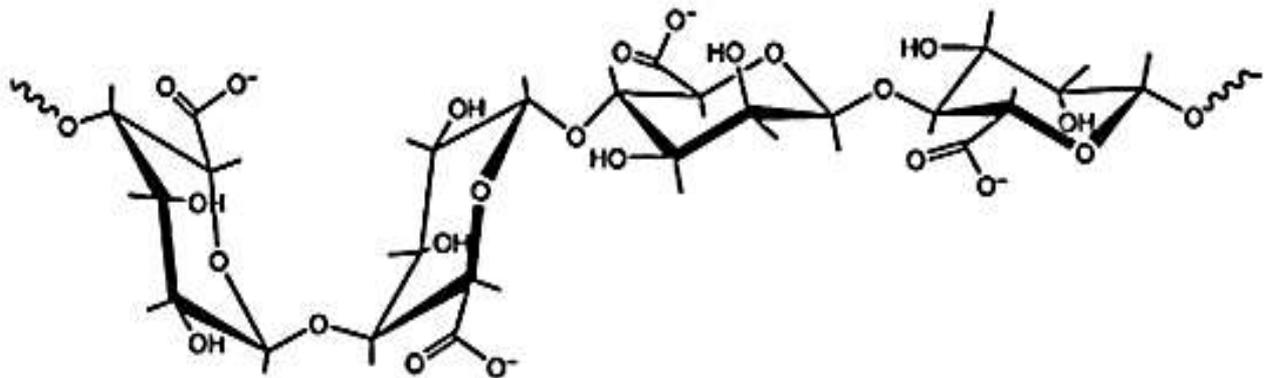


Figure 06 : Structure chimique de l'alginate (COVIELLO *et al.*, 2007).

7.2.3. Les fucanes

Les fucanes sont des constituants de la paroi cellulaire de certaines algues brunes. Ils agissent sur la régulation de l'hydratation et du stress osmotique au sein des cellules algales. Ils sont composés essentiellement des unités répétées de fucose sulfaté, d'autres sucres neutres (galactose, mannose, xylose) et d'acide uronique qui peut être acétylé. Leur teneur peut aller de 3 à 30% du poids sec de l'algue (FALLER, 2011).

Les fucanes sont divisées en trois familles de compositions différentes : les fucoïdanes (LI *et al.*, 2008), les xylofuranoglycanes et les glycuronofucoglucanes (LAHAYE, 1998). Le fucoïdane est composé uniquement d' α -L-fucose, mais le polymère peut avoir deux structures différentes : avec des fucoses liés par des liaisons α (1-2) sulfatés en position 4 (Figure 07) ou des fucoses liés par des liaisons α (1-3) sulfatés en position 4 (CHOUIKHI, 2013).

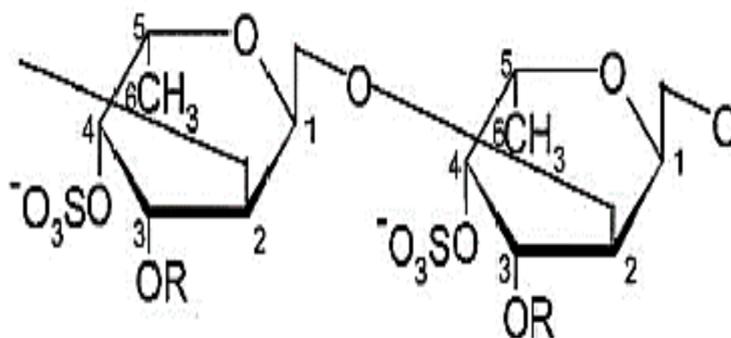


Figure 07 : Structure primaire des chaînes de fucoses liés en α (1 \rightarrow 2) des fucanes d'algue brune (GARON-LARDIERE, 2004).

7.2.4. Laminarine

Il s'agit d'un polymère linéaire de β -1,3-glucane, avec des points de ramification occasionnels à 6 atomes de carbone et différents rapports de chaîne terminale de glucose, ce qui peut réduire le potentiel de réduction. Il représente 35% du poids sec de l'algue brune *Laminaria cloustoni*. Le sulfate de laminaire formé par deux radicaux de sulfate liés à la molécule de glucose confère une grande stabilité (YOU *et al.*, 2010).

7.2.5. Les carraghénanes

Le carraghénane est un terme général pour les polysaccharides extraits de certains types d'algues rouges de l'ordre des Gigartinales (du genre *Chondrus*, *Gigartina*, *Kappaphycus*, *Hypnea*) et des Cryptoménales (FALLER, 2011).

Les carraghénanes sont composés de D-galactose et forment des unités diglycosides [... 3 (D-galactose) β 1-4 (D-galactose) α 1 ...] *n*, appelées carrabiose, (PEREZ, 1997; LECLERC et FLOC 'H, 2010).

Ils sont variablement sulfatés et présentent différents taux d'unités Dalton (Da), de sorte qu'elles peuvent être divisées en différentes familles. On distingue donc les types Lambda (λ), Kappa (κ), Iota (ι), Nu (ν), Mu (μ), Theta (θ) et Psi (ξ) (Figure 09) (PRAJAPATI *et al.*, 2014).

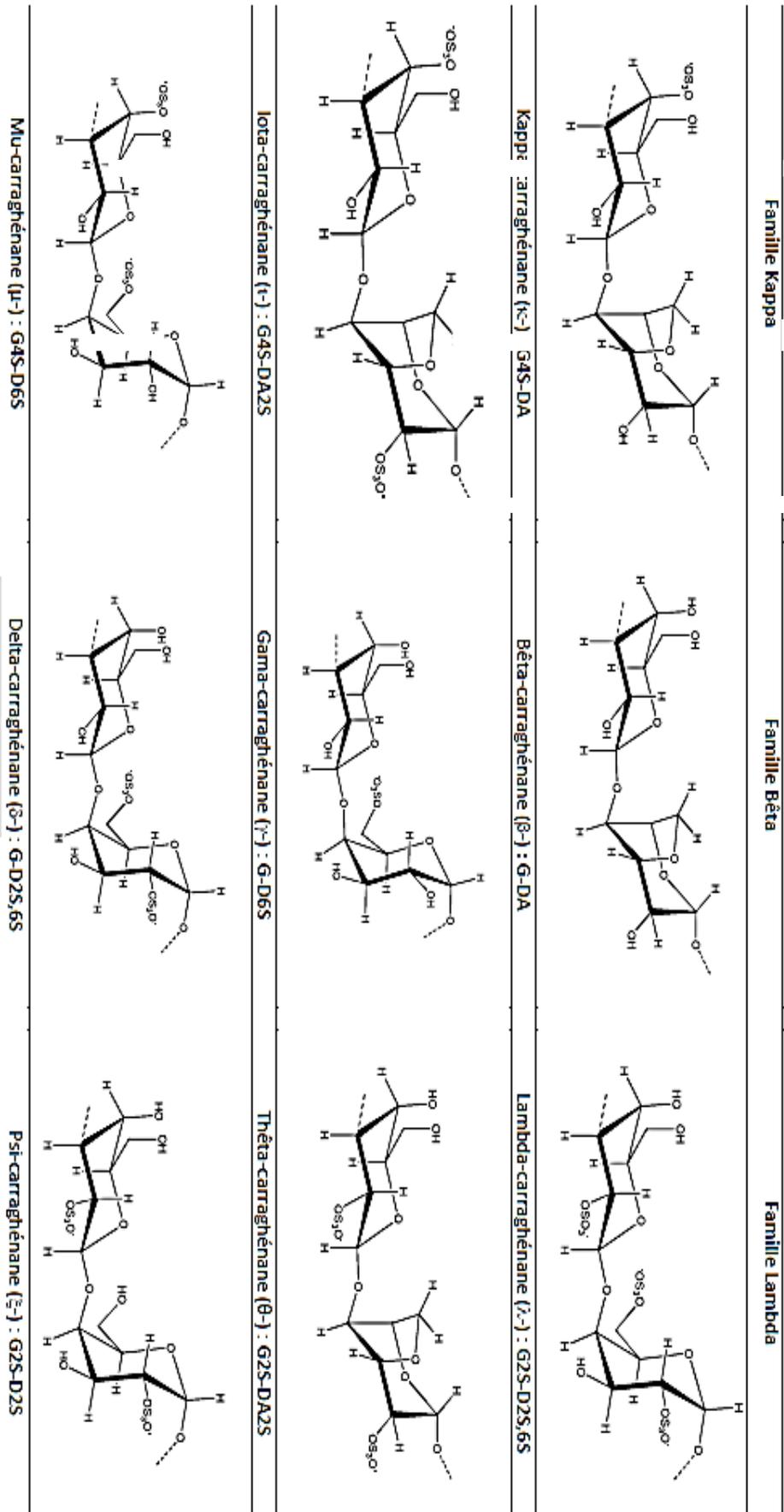


Figure 08 : Structure des différentes carraghenanes (KNUTSEN, 1994).

7.2.6. Les galactanes

Le sulfate de galactane et ses dérivés désulfurés sont des carraghénanes de faible poids moléculaire. Ces polymères de galactose sont extraits de *Grateloupia indica* et *Bostricia montagnei* (CHOUIKHI, 2013).

7.2.7. L'agar et l'agarose

L'agar est le polysaccharide matriciel (en moyenne 30% à 70% du poids sec) présent dans le thalle (KORNPROBST *et al.*, 2005). L'agar est composé de 70% d'agarose (Figure 09) et de 30% d'agaropectine. Les principales sources d'agar et d'agarose (E 406) sont les algues rouges.

L'agar est un polymère sulfaté de D- et L-galactose et / ou 3,6- α -anhydrogalactose. Il est composé de répétitions régulières d'unités diosidiques [... 3 (D-galactose) β 1-4 (L-galactose) α 1...] n (CHOUIKHI, 2013).

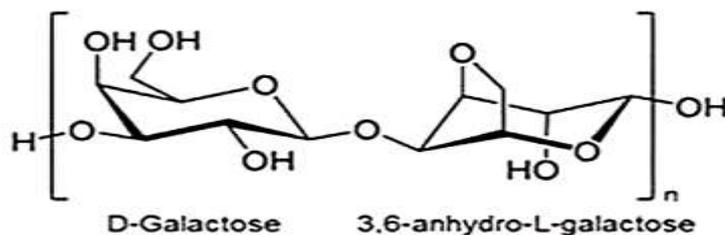


Figure 09 : Structure de l'agarose (CHOUIKHI, 2013).

7.2.8. Le porphyrane

Le porphyrane est un polysaccharide sulfaté, avec une structure répétée de résidu 4-6-O-sulfo- α -L-galactopyranose et de résidu 3-6-O-méthyl- β -D-galactopyranose (Figure 11), dérivé de l'algue rouge *Porphyra* sp. (MAO *et al.*, 2006).

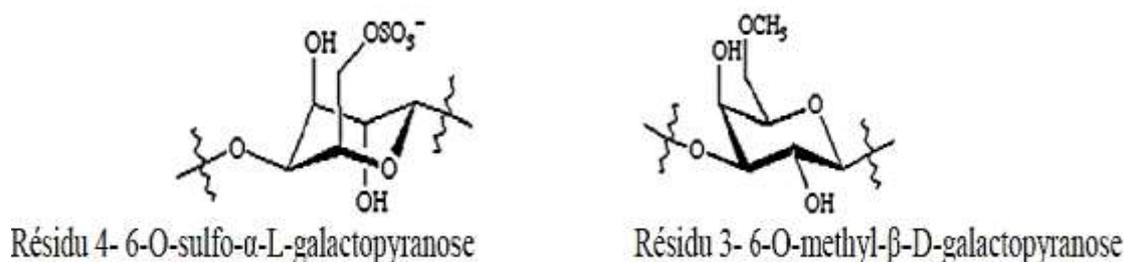


Figure 10 : Structure moléculaire de résidu 4-6-O-sulfo- α -L-galactopyranose et de résidu 3-6-O-méthyl- β -D-galactopyranose (CHOUIKHI, 2013).

7.3. Les lipides

La teneur en lipides des algues est différente de celle des plantes terrestres. Elle est très faible et représente entre 1 à 3% de la matière sèche. Les algues contiennent beaucoup d'acides gras essentiels et la teneur en acides gras polyinsaturés (AGPI) est nettement plus élevée. La composition en acides gras des algues vertes est la plus proche des plantes supérieures, leur teneur en acide oléique (C18: 1) et en acide α -linoléique (α 3-C18: 3) est beaucoup plus élevée (MARFAING, 2004). Les algues rouges contiennent une teneur élevée en acides gras polyinsaturés à 20 carbones. L'acide eicosapentaénoïque (EPA) représente notamment 50% des acides gras polyinsaturés chez *Porphyra* sp. et *Palmaria palmata* (MARFAING, 2004).

Les lipides neutres, les glycolipides et les phospholipides sont les trois classes des lipides présents chez les algues.

7.3.1. Les lipides neutres

Les lipides neutres sont illustrés par les stérols, les triacylglycérols (TAG), les diacylglycérols (DAG) et les monoacylglycérols (MAG), représentant 40% des lipides totaux. Ils sont principalement présents dans les membranes cellulaires et les cytosols.

7.3.2. Les phospholipides (PL)

Les phospholipides (Figure 11) ont d'importantes fonctions structurelles et métaboliques dans les cellules vivantes (DOWHAN et BOGDANOV, 2002). Ils sont les principaux composants de toutes les membranes cellulaires (EASTMOND *et al.*, 2010).

Les phospholipides représentent 10-20 % des lipides totaux des algues (DEMBITSKY et ROZENTSVET, 1996). Chez les algues vertes, le phosphatidylglycérol (PG) est le principal phospholipide ; il représente 20% à 47% des phospholipides totaux. La teneur en phosphatidylcholine (PC) chez les algues rouges est supérieure à 60% chez les algues brunes, la PC et la phosphatidyléthanolamine (PE) sont dominantes avec des valeurs allant de 11,3% à 29,3% des PLs totaux (LAKHDAR, 2018).

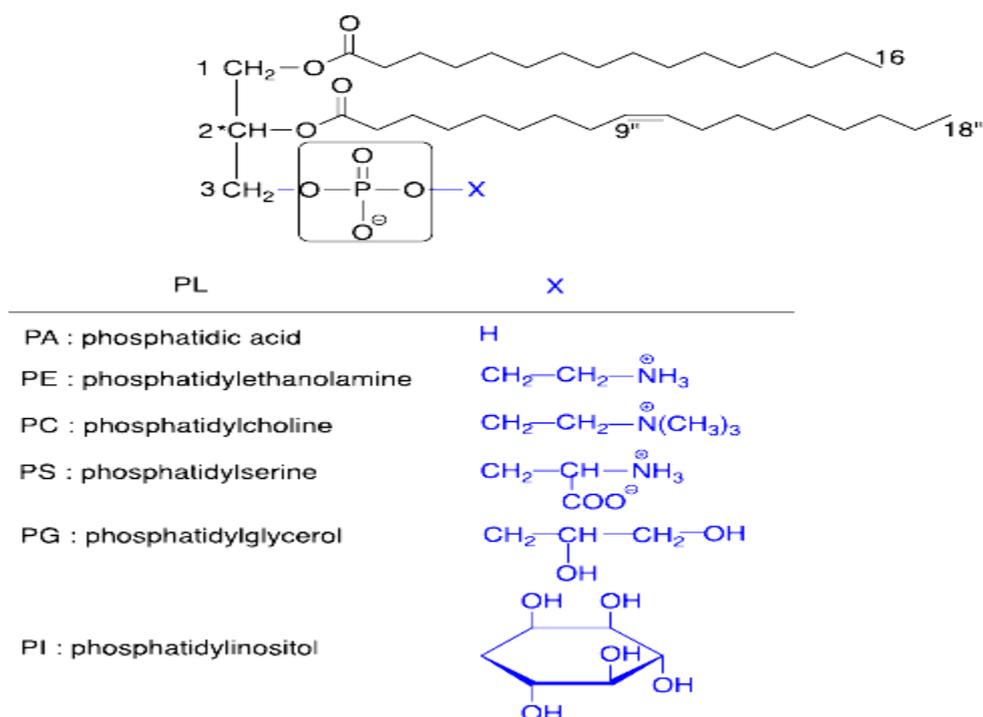


Figure 11 : Structure chimique des phospholipides des algues (LAKHDAR, 2018).

L'acide oléique, l'acide palmitique, l'acide stéarique, l'acide arachidonique (C20:4 n-6, AA) et l'acide eicosapentaénoïque (C20:5 n-3, EPA) (Figure 12) sont les principaux acides gras présents dans les phospholipides (TREMOLIERES et SIEGENTHALER, 1998).

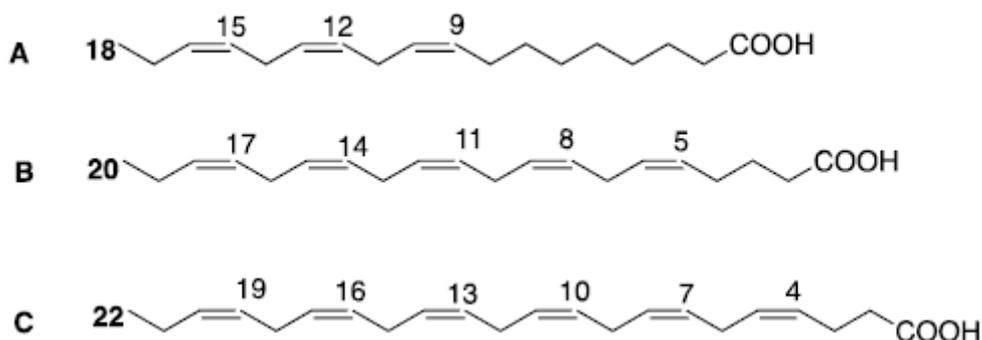


Figure 12 : Structure chimique des principaux acides gras poly-insaturés oméga 3 (ω 3) des algues : l'acide alpha-linoléique ALA (A), l'acide eicosapentaénoïque EPA (B), l'acidedocosahexaénoïque DHA (C) (TREMOLIERES et SIEGENTHALER, 1998).

7.3.3. Les glycolipides

Les glycolipides sont principalement localisés dans les membranes photosynthétiques, représentés par le monogalactosyl-diacylglycerol (MGDG) ; le digalactosyl-diacylglycerol (DGDG) et le sulfoquinovosyl-diacylglycerol (SQDG) (Figure 13) (GUSKOV *et al.*, 2009). Ces glycolipides représentent plus de la moitié des lipides ; le MGDG représente 31 à 56% (KHOTIMCHENKO, 2003 ; YAN *et al.*, 2011).

Au niveau de certaines algues rouges, le DGDG est un glycolipide caractéristique, représentant 35,7 à 64% des lipides totaux (KHOTIMCHENKO, 2003; ILLIJAS *et al.*, 2009). Au niveau des algues brunes, la teneur en SQDG est comprise entre 36,8% et 48,8% (KUNOTIMENKO, 2003). De plus, dans les algues vertes, le MGDG et le DGDG contiennent de l'acide hexadécadiénoïque (C16: 4n-3), l'acide α -linoléique (ALA), l'acide stéarique (C18: 4n-3, STA) et l'acide linoléique (C18: 2n-6, LA). Les algues rouges contiennent de l'AA et l'EPA. Les algues brunes contiennent de l'EPA (KHOTIMCHENKO, 2003 ; ILLIJAS *et al.*, 2009).

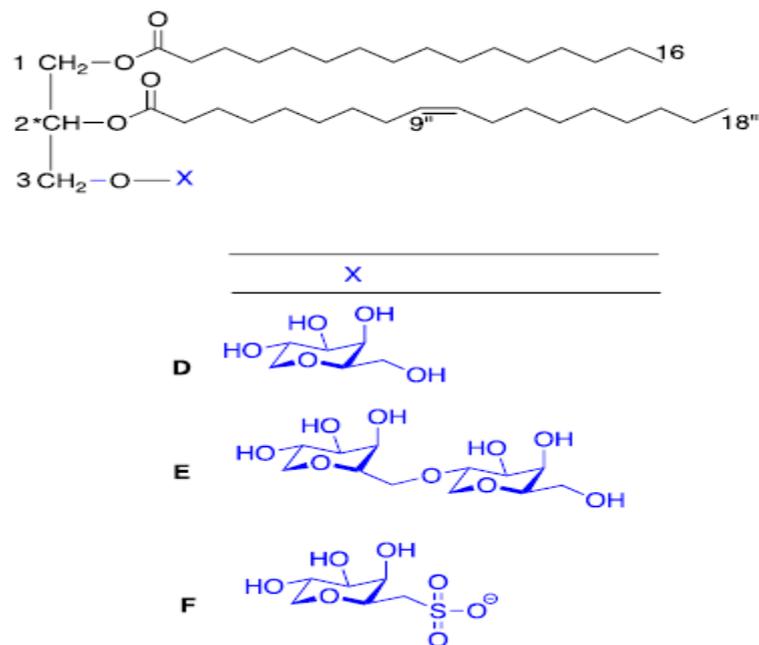


Figure 13 : Structure chimique des principaux glycolipides des algues marines : le monogalactosyl-diacylglycerol MGDG (D) ; le digalactosyl-diacylglycerol DGDG (E) et le sulfoquinovosyl-diacylglycerol SQDG (F) (GUSKOV *et al.*, 2009).

7.4. Les vitamines

Il existe peu d'études sur la teneur en vitamines dans les algues.

Les principales vitamines retrouvées selon MARFAIG (2004), sont : vitamine B12, vitamine C et vitamine E.

7.5. Les éléments minéraux

Les algues ont une composition minérale élevée, qui peut représenter jusqu'à 40% de la matière sèche.

L'eau de mer contient beaucoup de minéraux, de sorte que les algues piègent les minéraux rares et assimilables par l'organisme. Les algues constituent un véritable mélange de minéraux, dans lequel on peut trouver un grand nombre d'éléments, tels que le magnésium, le potassium, le calcium, le phosphore, l'iode, le zinc, le fer et le manganèse. Il est aussi possible de trouver des éléments toxiques tels que l'aluminium, le nickel, l'argent, le plomb, l'arsenic, et le titane. Par conséquent, il est essentiel de cultiver les algues dans un environnement non-pollué (HORTENSE, 2011). La teneur totale en minéraux des algues

brunes, vertes et rouges est la même. Cependant, le ratio d'algues vertes est légèrement inférieur à celui des deux autres types d'algues (PERSON, 2010).

7.6. Les pigments

On distingue 3 types de pigments (caroténoïdes, chlorophylles et phycobiliprotéines) responsables de la couleur des algues suivantes : vertes, rouges, roses, jaunes, brunes, oranges, noires, grises, blanches, violettes et bleues.

7.6.1. Les caroténoïdes

Les unités d'isoprènes sont les composés essentiels des caroténoïdes (des pigments liposolubles).

Les algues brunes sont particulièrement riches en caroténoïdes et notamment en fucoxanthine, β -carotène et violaxanthine. Le β -carotène, α -carotène et leurs dérivés dihydroxylés (zeaxanthine et lutéine) sont les principaux caroténoïdes des algues rouges. Les principaux caroténoïdes présents chez les algues vertes sont le β -carotène, la lutéine, la violaxanthine, l'antheraxanthine, la zeaxanthine, et la neoxanthine (YAN *et al.*, 1999 ; MARFAING, 2004).

7.6.2. Les chlorophylles

Les chlorophylles sont des pigments photosynthétiques qui colorent en vert la plupart des feuilles des végétaux. Leur nom provient des mots grecs *chlorós* et *phyllon* qui signifient vert des feuilles (JUBERT et BAILY, 2007 ; FERRUZZI et BLAKESLEE, 2007).

Dans la nature, les algues vertes et les plantes terrestres supérieures sont riches en chlorophylles a et b (Figure 14), cependant les chlorophylles c et d sont rencontrées dans les algues brunes et les algues rouges incluant les espèces diatomiques (FERRUZZI et BLAKESLEE, 2007; SCHOEFS, 2002).

Les chlorophylles constituent une famille variée de pigments existant sous différentes formes. Ces molécules font partie d'un groupe de pigments tétrapyrroliques avec des fonctions et des éléments structuraux communs. Elles sont caractérisées par un isocycle à cinq membres contenant un ion de magnésium dans leur centre et par la présence d'une longue chaîne latérale hydrophobe, appelée phytol (HAMES *et al.*, 2000 ; CUBAS *et al.*, 2008).

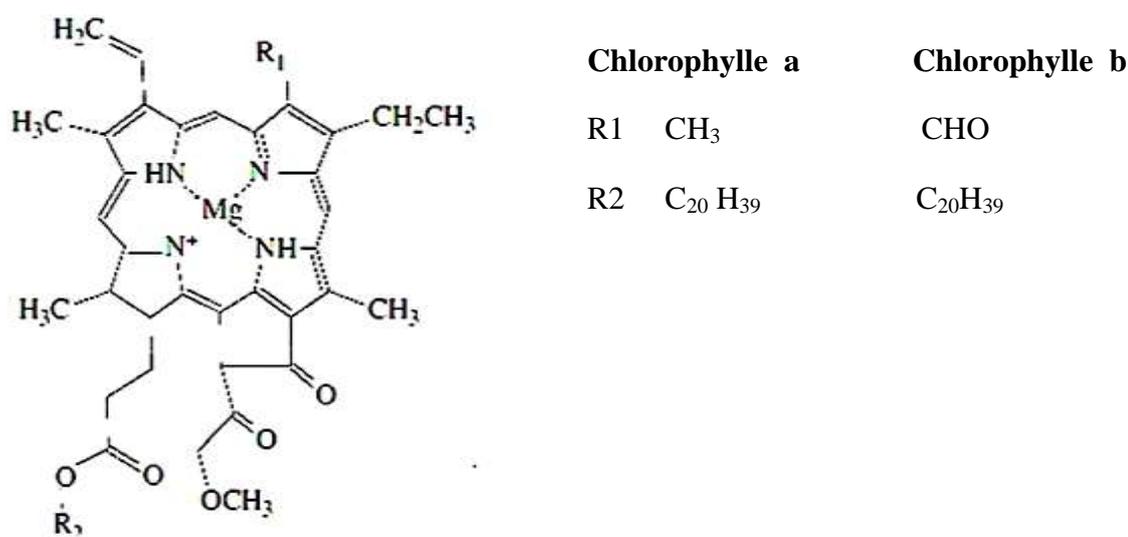


Figure 14 : Structure moléculaire de la chlorophylle a et b (CUBAS *et al.*, 2008).

7.6.3. Les phycobiliprotéines

Les phycobiliprotéines sont des molécules hydrosolubles comportant une partie protéique liée de façon covalente à des chromophores ou bilines. On distingue trois familles de phycobiliprotéines qui sont : les phycoérythrines, les phycocyanines et les allophycocyanines dont les chromophores sont respectivement les phycoérythrobilines, les phycocyanobilines et les phycourobilines (LAHAYE, 1991).

7.7. Les métabolites secondaires

Les métabolites secondaires sont des molécules organiques complexes synthétisées et accumulées en petites quantités par les plantes autotrophes. Leurs activités pharmacologiques et biologiques prometteuses ont été mises en évidence chez plusieurs espèces d'algues; ils constituent environ 35% des substances chimiques nouvellement découvertes.

Les polyphénols, les terpènes et les alcaloïdes sont les principales trois grandes familles de métabolites secondaires (LUTGE *et al.*, 2002 ; MAROUF et REYNAUD, 2007).

7.7.1. Polyphénols

Les polyphénols des algues appelés aussi phlorotannins. Ils diffèrent des polyphénols des plantes terrestres puisque ces derniers dérivent de l'acide gallique et de l'acide éllagique, alors que les polyphénols algaux proviennent des unités de phloroglucinol (1,3,5-trihydroxybenzène). La large gamme d'activités biologiques qui est conférée aux phlorotannins est due à la diversité structurale et à la diversité de degrés de polymérisation (BURTIN, 2003 ; KOIVIKKO, 2008).

Les algues brunes représentent les teneurs les plus élevées en polyphénols et qui varient entre 5 et 15% du poids sec (MARFAING, 2004).

7.7.2. Les terpénoïdes

Les algues brunes, vertes et rouges sont caractérisées par la production des terpénoïdes comme métabolites secondaires. Les terpénoïdes sont composés d'unités isoprènes (C₅) (Figure 15). Ils sont divisés en plusieurs catégories : les monoterpènes (C₁₀), les diterpènes (C₂₀), les triterpènes (C₃₀), les sesquiterpènes (C₁₅) et les tétraterpènes (C₄₀) (HARPER *et al.*, 2001 ; BLUNT *et al.*, 2011).

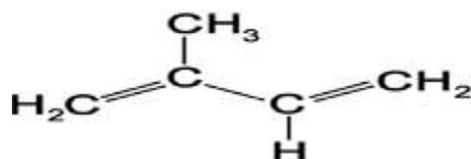


Figure 15 : La molécule d'isoprène (CALIXTO, 2005).

7.7.3. Les alcaloïdes

Il y a relativement peu de composés azotés trouvés dans les algues ; les alcaloïdes en font partie et peuvent être divisés en trois catégories : alcaloïdes phénéthylamine, alcaloïdes halogènes indoles et autres alcaloïdes. Structurellement, la plupart des alcaloïdes isolés des algues appartiennent aux groupes phénéthylamines et indoles. L'activité biologique de ces alcaloïdes n'a pas été complètement étudiée (GROSS *et al.*, 2006). Les algues marines contiennent des composés hétérocycliques azotés, les plus intéressants sont l'acide domoïque et l'acide kaïnique (Figure 16).

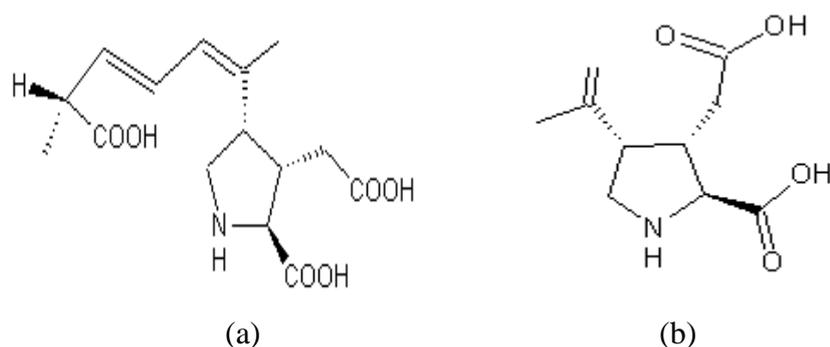


Figure 16 : Structure de l'acide domoïque (a) et de l'acide kainique (b) (QUILLIAM et WRIGHT, 1989).

7.7.4. Acides aminés analogues de la mycosporine (MAA_S)

Parmi les différentes stratégies de protection contre les rayons ultraviolets (UV), les algues ont la capacité de synthétiser des MAA_S (composés qui agissent comme un écran solaire). Ces composés sont de faible poids moléculaire (<400 Da), hydrosolubles et consistent en un anneau de cyclohexenone ou cyclohexenimine, conjugué à une grande variété de substitués azotés d'acides aminés par exemple la mycosporine-glycine (NAKAMURA *et al.*, 1982).

Au niveau des macroalgues la concentration en MAA_S varie selon la profondeur, l'altitude et les classes. Par exemple, les rhodophycées accumulent plus de MAA_S que les phéophycées et les chlorophycées (SINGH *et al.*, 2008).

Chapitre II

Utilisations et activités biologiques des algues marines

1. Utilisations des algues

Compte tenu de toute cette richesse et de toute cette diversité, de nombreuses applications ont été trouvées aux algues. A l'heure actuelle, on ne cesse d'identifier de nouvelles espèces et de nouvelles propriétés à ces organismes, ce qui leurs confère un potentiel biotechnologique important.

On porte de plus en plus d'intérêt aux algues, du fait de la facilité de leur culture (elles croissent même dans les eaux usées), et de leur récolte rapide. De plus, les algues se développent 100 fois plus rapidement que les végétaux supérieurs (LU, 2009).

1.1. En alimentation humaine

Le plus grand intérêt pour ces organismes demeure en raison de leurs propriétés nutritionnelles (SHALABY, 2011).

Depuis longtemps, les algues marines ont été également utilisées comme source d'alimentation par de nombreuses populations notamment les asiatiques qui sont les premiers consommateurs; chaque japonais consomme en moyenne 1,6 kg d'algues (poids sec) par an (FLEUREUNCE, 1999). Dans les pays occidentaux, cette consommation directe d'algues est plus marginale (MABEAU et FLEURENCE, 1993).

Les macroalgues contiennent des protéines, lipides, vitamines et minéraux et constituent donc une source précieuse d'aliment (SANCHEZ-MACHADO *et al.*, 2004 ; NOZIAH et CHING, 2000 ; WONG et CHEUNG, 2000). Environ 75% de la production d'algues produites mondialement (8 millions de tonnes d'algues fraîches) est destinée à l'alimentation humaine directe. A ce jour, 24 algues dont 3 micro-algues sont utilisables. Parmi les macroalgues, on dénombre 8 algues brunes, 11 algues rouges et 2 algues vertes (Tableau IV).

Tableau IV: Algues autorisées pour l'alimentation humaine (CEVA, 2014).

Nom scientifique	Nom commun
<i>Ascophyllum nodosum</i>	Ascophylle noueuse
<i>Fucus vesiculosus</i>	Fucus
<i>Fucus serratus</i>	Fucus
<i>Himanthalia elongata</i>	Spaghetti de mer
<i>Undariapinnatifida</i>	Wakame
<i>Laminaria digitata</i>	Kombu
<i>Laminaria saccharina</i>	Kombu royal
<i>Laminaria japonica</i>	Kombu
<i>Alaria esculenta</i>	Atlantic wakamé
<i>Palmariapalmata</i>	Dulse
<i>Porphyra umbilicalis</i>	Nori, Porphyra
<i>Porphyra tenera</i>	Nori, Porphyra
<i>Porphyra yezoensis</i>	Nori, Porphyra
<i>Porphyra dioica</i>	Nori, Porphyra
<i>Porphyra purpurea</i>	Nori, Porphyra
<i>Porphyra laciniata</i>	Nori, Porphyra
<i>Porphyra leucostica</i>	Nori, Porphyra
<i>Chondrus crispus</i>	Pioca, lichen
<i>Gracilaria verrucosa</i>	Ogonori
<i>Lithothamnium calcareum</i>	Maerl
<i>Ulva</i> sp.	Laitue de mer
<i>Enteromorpha</i> sp.	Aonori
<i>Arthrospiraplantensis</i>	Spiruline
<i>Odontella aurita</i>	Non déterminé
<i>Chlorella</i> sp.	Chlorelle

1.2. En alimentation animale

Les algues sont principalement utilisées comme ingrédient dans la fabrication d'aliment pour le bétail.

Les premiers essais de suppléments de la ration alimentaire d'animaux d'élevage ont fait apparaître une bonne acceptabilité, une bonne digestibilité et une bonne assimilation des algues (CHOUIKHI, 2013).

Aujourd'hui, la disponibilité de macroalgues pour animaux s'est accentuée avec la production de farines. Les macroalgues utilisées en alimentation animale comme *Ascophyllum nodosum* et *Laminaria digitata* fraîchement coupées, sont broyées en fines particules et séchées. Leur analyse a montré qu'elles contenaient des quantités importantes de minéraux, oligoéléments et vitamines (CHOUIKHI, 2013).

Habituellement, en aquaculture, la nourriture se compose des déchets de viande d'animaux terrestres et de poissons mélangés avec des additifs secs contenant des nutriments supplémentaires (macroalgues), pour former une masse pâteuse servant à la préparation des granulés. L'addition des macroalgues, dans les granulés, leur permet de ne pas se désagréger ou se dissoudre (CHOUIKHI, 2013).

Le phytoplancton est exploité comme une ressource nutritive pour l'aquaculture (SPOLAORE *et al.*, 2006). Dans cette filière, les microalgues sont utilisées directement pour subvenir aux besoins des stades larvaires des mollusques bivalves et des crustacés ou indirectement comme complément alimentaire, substrat pour le zooplancton et base alimentaire de nombreuses espèces aquacoles (MULLER-FEUGA *et al.*, 2003).

1.3. Dans l'industrie alimentaire

Il y a plus de 60 ans que l'industrie agro-alimentaire a découvert les propriétés physico-chimiques des algues (DEMOULAIN et LEYMERGIE, 2009).

L'agar, l'alginate et les carraghénanes sont devenus des ingrédients incontournables de l'industrie agroalimentaire (MARFAING, 2007). Ces hydrocolloïdes permettent la formation de gelée (NAEGELE et NAEGELE, 1967).

L'agar, l'alginate et les carraghénanes sont aussi utilisés pour leur qualité d'épaississants, capables d'augmenter la viscosité des préparations industrielles ainsi que des stabilisants pour maintenir la qualité des denrées en les conservant de manière optimale ou en intensifiant leurs couleurs (DEMOULAIN et LEYMERGIE, 2009).

Le glycérol issu de l'algue verte *Dunaliella salina* (Figure 17) est exploité comme édulcorant (FILALI, 2012).

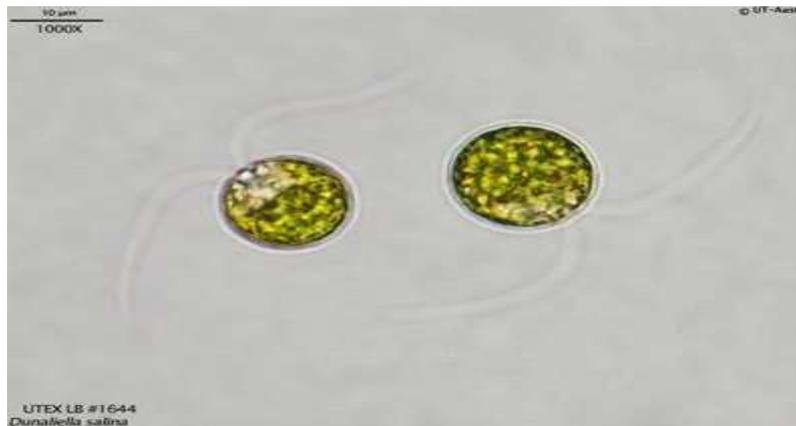


Figure 17 : Photographie de l'algue *Dunaliella salina* (Anonyme 04).

Les phospholipides extraits des microalgues sont utilisés par ailleurs comme bio-surfactant ou émulsifiant.

Les caroténoïdes, tels que le β -carotène, un pigment synthétisé par l'algue verte *Dunaliella*, l'astaxanthine synthétisée par l'algue verte *Haematococcus*, la lutéine, la zéaxanthine et la canthaxanthine sont de plus en plus utilisées en tant que, colorant pour la préparation de la margarine, pour les produits de boulangerie, les glaces, les jus de fruits, les boissons gazeuses, les sucreries et en tant qu'additifs alimentaire sous le code E160a (PERSON, 2010).

Les polyphénols sont également employés comme additifs, colorants, arômes ou agents de conservation (BRUNETON, 1999).

1.4. En agriculture

L'intérêt historique pour les algues est renaissant et de nombreuses études montrent que l'application des algues ou de leurs extraits sur les cultures ont un apport positif certain au développement et à la protection des plantes (SHARMA *et al.*, 2014 ; HERNANDEZ-HERRERA *et al.*, 2014).

Les algues par l'apport important en macro et micro nutriments, en vitamines, en acides aminés et en hormones végétales jouent le rôle de biofertilisants, stimulent le conditionnement des graines et la croissance, stimulent les défenses des plantes contre les parasites et les maladies, favorisent l'adaptabilité aux variations environnementales avec une meilleure

tolérance à la chaleur, au manque d'eau et à l'augmentation de la concentration en sels (DAUME, LONG et CROUCH, 2003 ; ALLEN *et al.*, 2001 ; CLUZET *et al.*, 2004 ; ZHANG et ERVIN, 2004 ; MANCUSO, 2006 ; ZHANG et ERVIN, 2008 ; KUMAR et SAHOO, 2011).

1.5. Dans le traitement des eaux usées

L'intérêt de l'utilisation des macroalgues comme biofiltres pour le traitement des eaux usées en eau salée a été démontré dès la fin des années 70 dans des mélanges d'eau usée avec l'eau de mer (LAHAYE, 1991).

Les microalgues ont des capacités d'absorption particulièrement intéressantes de l'azote et du phosphore pour la décontamination de milieux pollués et la lutte contre l'eutrophisation (BOUGARAN et SAINT-JEAN, 2014).

Les travaux de ASLAN et KAPDAN (2006) ont porté sur l'implication de *Chlorella vulgaris* (Figure 18) dans l'absorption de l'azote et du phosphore des eaux usées et ont montré que l'oxygénation du milieu est facilitée par la production *in situ* de O₂ par la photosynthèse, permettant ainsi de réduire l'aération extérieure et limitant la fuite dans l'air des composés organiques volatils (OLGUIN, 2003 ; MUÑOZ *et al.*, 2006).

De nombreux travaux ont déjà été menés sur l'élimination des métaux lourds présents dans les eaux usées et sur la dégradation des contaminants toxiques comme le tributylétain (TBT) par *Chlorella vulgaris* (LUAN *et al.*, 2006 ; PERALES-VELA *et al.*, 2006).

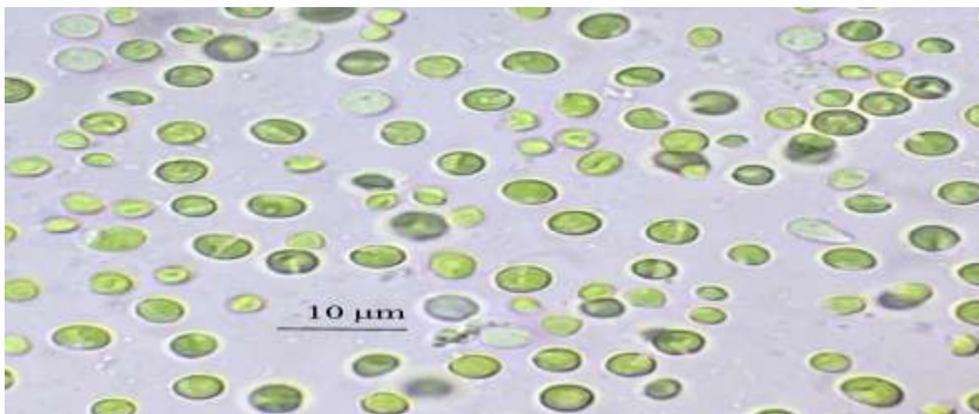


Figure 18 : Photographie d'une Chlorophycée *Chlorella vulgaris* (RAMARAJ *et al.*, 2016).

1.6. Dans le domaine pharmaceutique

Aujourd'hui, plusieurs composés chimiques isolés des algues possèdent une activité pharmacologique efficace.

L'application principale des composés extraits des algues marines est l'utilisation des phycocolloïdes comme agent texturant, mucoprotecteur (sirop contre les ulcères, pommades contre les hémorroïdes, etc. (YAN, NAGATA et FAN, 1998).

En raison de leur capacité de chélation et de leur capacité à former une solution très visqueuse, les alginates sont largement utilisés dans l'industrie pharmaceutique. Ils se trouvent dans les pâtes pour empreintes dentaires, ils peuvent aussi servir de matrice d'encapsulation pour véhiculer des molécules actives ou sensibles telles que des vaccins, des vitamines et des bactéries probiotiques (CHEN *et al.*, 2007 ; LI *et al.*, 2008 ; DING *et al.*, 2009 ; PERSON, 2010).

Les carraghénanes présentent, quant à eux, plusieurs possibilités d'utilisation comme produits pharmaceutiques en tant qu'anti-tumoraux, antiviraux, anticoagulants, et même des activités d'immunomodulation sont explorées (PERSON, 2010).

Les principes actifs extraits des microalgues *Chlorella* peuvent être utilisées pour l'amélioration du confort des diabétiques en modulant l'absorption intestinale du glucose et la réponse insulinique à l'alimentation. Par ailleurs, des oligosaccharides extraits des microalgues peuvent améliorer l'équilibre de la flore intestinale du colon, en favorisant la croissance des probiotiques (MICHEL *et al.*, 1999).

1.7. Dans le domaine médical

Les études menées sur la biomasse algale ont mis en exergue plus de 15000 composés naturels prometteurs par leurs activités biologiques suggérant une application potentielle dans le secteur de la médecine (NASERI, HOLDT et JACOBSEN, 2016).

Les pigments qui retiennent les plus grands intérêts sont les phycobiliprotéines et les caroténoïdes. Les propriétés colorantes et fluorescentes de la phycoérythrine et de la phycocyanine, extraites de la spiruline sont exploitées, comme immunotraceurs, pour le diagnostic médical, en immunologie ou encore en biologie cellulaire (GLAZER, 1994 ; SEKAR et CHETRAMOHAN, 2008 ; SENTHILKUMAR *et al.*, 2013).

Les algues vertes *Chlamydomonas reinhardtii* (Figure 19) et *Dunaliella salina* sont utilisées comme des systèmes d'expression modèles de protéines recombinantes à but thérapeutique (LU, 2009).

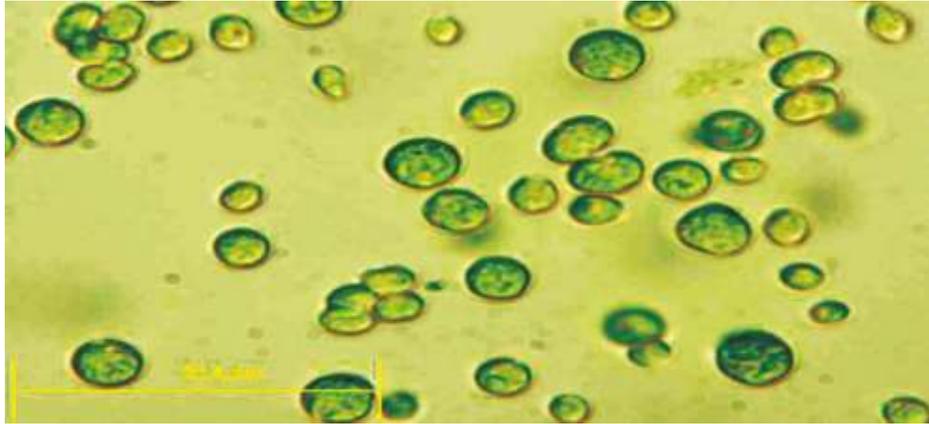


Figure 19 : Photographie de l'algue *Chlamydomonas reinhardtii* (MAUGUIT, 2012).

En thalassothérapie, on utilise les bains d'algues pour traiter l'ostéoporose, les rhumatismes ou certaines affections de l'appareil locomoteur. En chirurgie ou en gynécologie, on utilise des stipes de laminaires pour débrider une plaie ou dilater une voie naturelle (FALSHAW *et al.*, 2005).

Les macroalgues ont également un intérêt dans le domaine médical du fait de la quantité importante en vitamine C. Ce composé est reconnu pour renforcer le système de défense immunitaire, améliorer l'absorption du fer au niveau intestinal, de piéger la vitamine E et ainsi limiter l'oxydation de lipoprotéine de faible densité (LDL). La présence de gamma et alpha tocophérol est également intéressante pour la prévention des risques cardiovasculaires (BURTIN, 2003 ; HOLDT et KRAAN, 2011).

1.8. Dans le domaine cosmétique

L'extrait d'algue est souvent trouvé sur la liste des ingrédients des cosmétiques, particulièrement dans les crèmes et lotions du visage ou des mains (CHOUIKHI, 2013).

Les extraits d'algues peuvent être employés comme excipients (2-20%) pour leurs propriétés gélifiantes ou épaississantes. Sous forme de poudres capables de se dessoudre dans l'eau, ils entrent alors dans la formulation de gels aqueux, de gels solaires protecteurs comme des gels cicatrisants après-soleil, des gels anti-inflammatoires, ou utilisés comme agents gainants pour les cheveux dans les lotions capillaires. Ils peuvent intervenir également comme actifs (0,2-2%) pour leurs propriétés tonifiantes, hydratantes, nourrissantes ou anti-radicalaires. Enfin, les extraits d'algues peuvent être intégrés comme additifs (<0,2%) pour leurs propriétés colorantes, aromatisantes ou conservatrices dans les masques et enveloppements (BEDOUX *et al.*, 2014).

1.9. En biotechnologie

L'ingénierie biotechnologique des macroalgues marines pour l'identification des stratégies de biosynthèse de métabolites secondaires est un nouveau domaine émergent de la biotechnologie marine (RORRER et CHENEY, 2004).

La phycoérythrine, une protéine particulière des rhodophycées, qui peut intéresser les domaines biotechnologiques pour être utilisée en tant que marqueur dans des réactions d'immunofluorescence (FLEURENCE, 1999).

Bien que les macroalgues offrent déjà de nombreux avantages pour la biorestauration des eaux marines, leur utilité est perfectible par l'introduction, dans les génomes algaux, de gènes bactériens pour la production de métallothionéines, qui peuvent aider à l'accumulation et la détoxification des métaux lourds ou l'amplification génétique de gènes cibles pour accroître la production de glutathion-S-transférase et du cytochrome P-450 impliqués dans la biotransformation et l'élimination des composés toxiques (CHOUIKHI, 2013).

1.10. En bioénergie

En raison de sa contribution dans la réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère, de nombreuses études se sont focalisées sur la production d'énergie alternative aux combustibles habituels à partir de la biomasse algale (KARRAY, 2015).

Par rapport aux microalgues, les macroalgues permettent une plus grande production du biocarburant en raison de leur volume. De plus, leur composition chimique en fait une plateforme de bioraffinerie à base de lipides et de biomasse lignocellulosique. C'est dans ce

contexte que l'étude de KARRAY (2015) a montré la production de biogaz à partir d'*Ulva rigida* avec un rendement allant jusqu'à 626,5mL/g DCO (demande chimique en oxygène).

Le taux de production de biocarburant dépend de la nature des prétraitements des algues (chimique, enzymatique ou mécanique). Après une digestion anaérobie, l'hydrolyse enzymatique fournit le meilleur rendement en biogaz car elle permet une meilleure réduction des sucres.

À partir de la biomasse microalgale, il est possible de produire du méthane, de l'éthanol, de l'hydrogène, etc. (Figure 20).

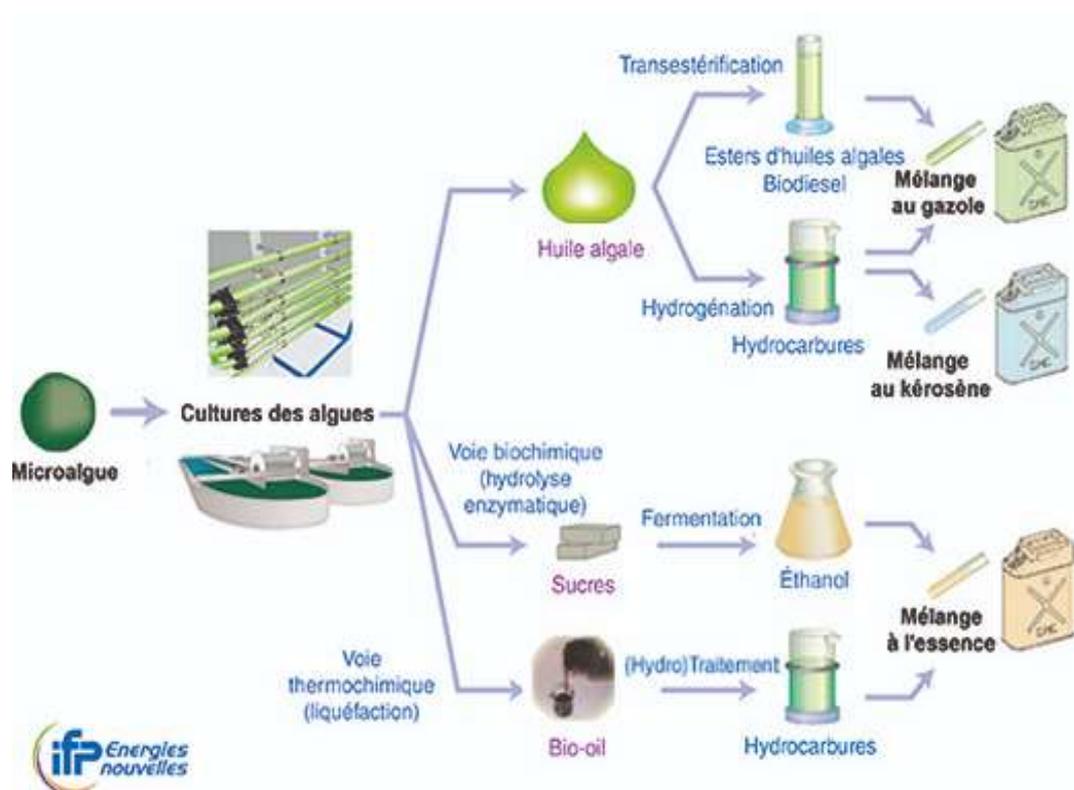


Figure 20 : Biocarburants issus de microalgues lipidiques (DAPHNE, 2011).

2. Activités biologiques des algues marines

Les produits d'origine naturelle occupent une place importante dans la découverte de nouveaux médicaments, les algues sont parmi les principales sources. Cela est dû à leur composition et production en métabolites secondaires qui sont des molécules de grandes originalités structurales et biologiquement actives.

Sur le plan pharmacologique, la présence de différentes activités a été mise en évidence depuis longtemps chez plusieurs espèces d'algues marines. Les activités antivirales, antibactériennes, antitumorales, anti-inflammatoires, anti-thrombotiques, anti-diabétiques et d'autres propriétés comme celles qui entrent dans la régulation du taux du cholestérol sanguin ou dans la régulation du système immunitaire ont été également étudiées.

2.1. Activité antivirale

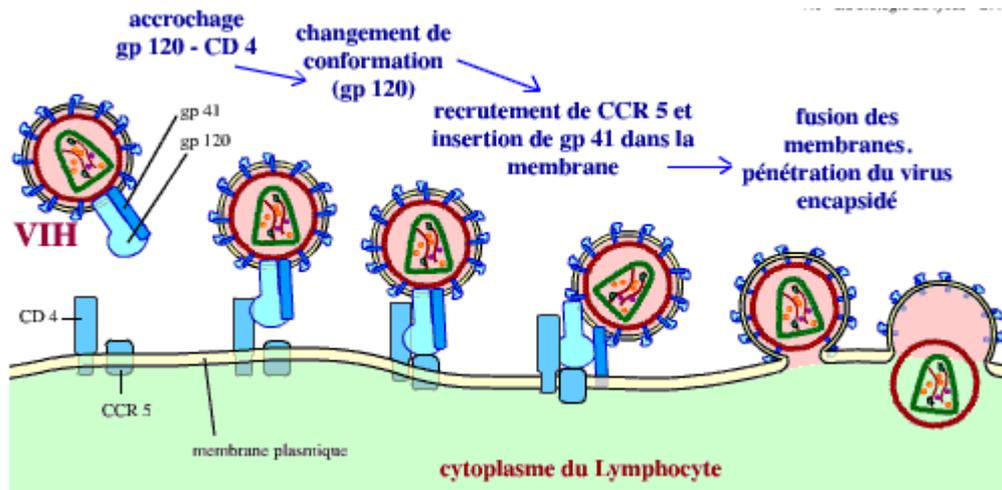
Les algues marines représentent également une source naturelle d'agents antiviraux (PONCE *et al.*, 2003). Différents travaux de recherche sur les composés bioactifs possédant des propriétés fonctionnelles intéressantes, ont permis de détecter des activités antivirales aussi bien chez des macroalgues que des microalgues.

De nombreux polysaccharides sulfatés algaux ont une forte activité antivirale contre des agents pathogènes pour l'homme parmi lesquels l'Herpes simplex virus, le cytomégalo virus, le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) et celui de la dengue (WEI WANG *et al.*, 2012). Leurs activités antivirales sont généralement liées à la structure spécifique du sucre, son poids moléculaires et son degré de sulfatation (JIAO *et al.*, 2011).

Une activité antivirale des exopolysaccharides sulfatés, de la cyanobactérie *Arthrospira platensis*, a été révélée envers le virus de l'immunodéficience humaine type 1 (VIH-1), le virus de l'herpès simplex 1 (HSV-1) et le virus de l'herpès humain type 6 (HHV-6) (AYEHUNIE *et al.*, 1998 ; HERNANDEZ-CORONA *et al.*, 2002). Des essais *in vitro*, sur les exopolysaccharides (EPS) de *Porphyridium purpureum*, montrent une activité antivirale contre le cytomégalo virus humain (HCMV) (RECHTER *et al.*, 2006).

Les fucoïdanes extraits de *Saccharina longicuris* possèdent des activités antivirales *in vitro* en inhibant l'infection des cellules hôtes par l'herpes simplex, le cytomégalo virus et le VIH (BABA *et al.*, 1988 ; HOSHINO *et al.*, 1998 ; ADHIKARI *et al.*, 2006).

Les fucoïdanes agissent contre ces virus par inhibition de l'attachement du virus sur les cellules hôtes (BABA *et al.*, 1988 ; HOSHINO *et al.*, 1998). Dans le cas du VIH, les fucoïdanes empêchent la liaison entre la GP 120 (glycoprotéine 120) et le récepteur CD4 (cluster de différenciation 4) des cellules hôtes (Figure 21) ce qui empêche la formation d'un syncytium (BABA *et al.*, 1990 ; MCCLURE *et al.*, 1991).



CCR 5 : récepteur à C-C chimiokine de type 5, gp 120 : glycoprotéine 120, gp 41 : glycoprotéine 41,
CD 4 : cluster de différenciation 4.

Figure 21 : Mécanisme d'attachement du VIH sur les cellules hôtes (FURELAUD et PAVIE, 2012).

Une étude *in vitro* sur le virus d'herpes simplex type 2 (HSV-2) a montré que les fucoïdanes doivent être présents lors de la phase d'attachement du virus afin d'éviter l'appariement du virus avec les cellules hôtes (FELDMAN *et al.*, 1999). D'autres tests *in vitro* ont montré, que même 2 heures après l'infection, les fucoïdanes inhibaient la réplication de HSV-1 (HOSHINO *et al.*, 1998).

D'après ADHIKARI *et al.* (2006), l'étude réalisée sur la relation entre la structure et l'activité antivirale de fucoïdanes extraits de l'algue brune *Stoechospermum marginatum* a montré qu'une fraction à haute teneur en fucose, faiblement sulfatée (13%) et de poids moléculaire d'environ 40 kDa, a un potentiel antiviral contre l'herpes simplex, tandis que les fractions désulfatées ont montré une diminution du potentiel antiviral de 14 à 64 fois. Aussi, l'activité antivirale des fucoïdanes pourrait être induite par la conformation en L des fucoses (VENKATESWARAN *et al.*, 1989). Pour le caractère anti-VIH, les fucoïdanes doivent avoir un poids moléculaire supérieur à 5000 Da et idéalement être di-sulfatés pour inhiber la formation de syncytium (BABA *et al.*, 1990 ; BERESS *et al.*, 1993).

Les fucanes sulfatés des algues *Dictyota mertensii*, *Lobophora variegata*, *Spatoglossum schroederi* et *Fucus vesiculosus* sont capables d'inhiber l'activité de la transcriptase inverse du VIH (RT-VIH) (HEMON *et al.*, 2007).

Les carraghénanes possèdent des propriétés antivirales qui s'expliquent par un blocage de l'adsorption des virus (VIH, herpes simplex, hépatite A) à la surface des cellules (CARLUCCI *et al.*, 1997).

2.2. Activité antimicrobienne

Les algues macroscopiques ou microscopiques, sont riches en molécules à activités antimicrobiennes. Plusieurs travaux se sont intéressés à l'activité antimicrobienne d'extraits riches en différents polymères matriciels (KTARI *et al.*, 2010). Dans ce sens, des études réalisées sur l'extrait d'*Ulva lactuca* (algue verte) ont montré une activité antimicrobienne vis-à-vis de *Staphylococcus aureus* (FARID *et al.*, 2009).

Un grand nombre de composés appartenant à plusieurs classes chimiques (indoles, terpènes, acetogénines, phénols, acides gras et hydrocarbures halogènes volatils) extraits de microalgues ont un potentiel antimicrobien important (CARDOZO *et al.*, 2007).

PRATT *et al.* (1944) ont isolé le premier composé antibactérien de la microalgue *Chlorella*, nommé chlorelline, responsable de l'activité inhibitrice vis-à-vis des bactéries à Gram⁺ (Gram positif) et à Gram⁻ (Gram négatif).

Les extraits ethanoliques d'*Haematococcus pluvialis* possèdent une activité antimicrobienne, envers *Staphylococcus aureus* et *Escherichia coli*, due à la présence d'acides gras à chaîne courte et des acides butanoïque et méthyl-lactique (SANTOYO *et al.*, 2009).

SUSHANT et RAJASHEKHAR en 2015 ont rapporté que l'extrait d'hexane de *Nannochloropsis oceanica*, présente une activité antimicrobienne contre *Streptococcus pyogenes* (17mm).

Les esters méthyliques des acides gras de *Nannochloropsis oculata* ont la capacité d'inhiber les bactéries *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis* et *Staphylococcus aureus*, et la levure *Candida albicans* alors que *Nannochloropsis* sp. a montré une activité antibactérienne élevée contre *Salmonella paratyphi* et *Shigella boydi* (KRISHNIKA *et al.*, 2011 ; DURAIARASAN *et al.*, 2014).

Les polyphénols sont doués d'activités antimicrobiennes importantes, probablement dues à leurs diversités structurales. Les sites et le nombre des groupes hydroxyles sur les groupes phénoliques sont supposés être reliés à leur relative toxicité envers les

microorganismes, avec l'évidence que le taux d'hydroxylation est directement proportionnel à la toxicité (COWAN, 1999).

Les flavonoïdes ont une activité antibactérienne très vaste et très diversifiée. En effet, ils s'attaquent à un grand nombre de bactéries (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, *Enterobacter cloacae*, *Proteus mirabilis*) avec une intensité différente selon le microorganisme et l'écosystème dans lequel ils se trouvent (DIDRAK, 1999 ; BABAYI *et al.*, 2004 ; ULAWONSKA *et al.*, 2006).

Les tanins ont une action antibactérienne puissante leur permettant d'inhiber la croissance des bactéries ruminales (dont certaines sont sporogènes) comme *Clostridium aminophilum*, *Clostridium proteoclasterium*, ainsi que les bactéries responsables de différentes infections chez l'homme (*Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Helicobacter pylori* et *Proteus mirabilis*). L'inhibition bactérienne par les tanins est influencée par leur structure et leur degré de polymérisation (CHATTERJEE *et al.*, 2004 ; SIVAKUMARAN, 2004 ; LEITAO *et al.*, 2005).

DE SOUZA *et al.* (2005) ont isolé de l'algue *Giffithsia* sp., un nouveau type de lectine : la griffithsine. *In vitro*, ce métabolite a montré des propriétés microbiocides pour prévenir la transmission sexuelle du VIH.

Une étude menée par BERRI *et al.* (2016) a démontré *in vitro*, que les ulvanes ont présenté des propriétés d'inhibition sélective et dose dépendante de la croissance des bactéries à Gram⁺ et à Gram⁻ : *Pasteurella multocida*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Mannheimia haemolytica*, *Erysipelothrix rhusiopathiae*, *Streptococcus suis*, et *Enterococcus cecorum*.

2.3. Activité anti-thrombotique

Les algues marines sont une source de polysaccharides sulfatés qui présentent d'intéressantes propriétés anticoagulantes (MAO *et al.*, 2006). De manière générale, l'activité anticoagulante des fucoïdanes est l'une des activités les plus importantes de ce polysaccharide.

Lors d'une transfusion sanguine ou d'une opération, la coagulation du sang n'est pas un phénomène souhaitable. Pour limiter ce phénomène, des médicaments comme l'héparine sont administrés aux patients. Les fucoïdanes ont été proposés comme alternative à l'héparine, car ils ont moins de risque de contenir des virus ou des prions. Une étude a dévoilé l'effet des

fucoïdanes sur l'activation plaquettaire (DURIG *et al.*, 1997). Les résultats ont montré que l'effet dépend de la dose, le poids moléculaire et le nombre de groupement sulfaté des fucoïdanes. Curieusement, les fractions les plus actives étaient celles les moins sulfatées et de hauts poids moléculaires (MOURAO *et al.*, 1999). La coagulation serait influencée par le degré de ramification du polysaccharide. Plus le fucoïdane est ramifié, plus la coagulation des plaquettes serait importante (SEN *et al.*, 1994 ; CARLUCCI *et al.*, 1997 ; FARIAS *et al.*, 2000 ; YAMADA *et al.*, 2000).

D'autres études *in vivo*, ont démontré le potentiel anticoagulant des fucoïdanes en agissant sur la thrombose. Les résultats ont montré que les fucoïdanes, injectés par intraveineuse à des lapins dix minutes avant induction de la thrombose, ont une action antithrombose qui persiste plus longtemps qu'avec l'héparine (MAURAY *et al.*, 1995).

Plusieurs travaux ont montré que les fucoïdanes extraits de *Fucus vesiculosus* étaient plus efficaces que l'héparine au niveau du retard de l'action de la thrombine sur le fibrinogène (ITO *et al.*, 1989). Aussi, par des tests *in vitro*, les fucoïdanes extraits de *Fucus vesiculosus* et *Pelvetia canaliculata* ont affiché une activité anticoagulante en agissant comme activateur de l'antithrombine III et de l'héparine cofacteur II, deux inhibiteurs de thrombine (COLLIEC *et al.*, 1991 ; SINNIGER *et al.*, 1993). Des effets similaires ont aussi été rapportés par un test *in vitro* avec des fucoïdanes extraits de *Laminaria cichorioides* (Yoon *et al.*, 2007).

Selon JOUANNEAU (2010) et SILVA *et al.* (2012), les activités anticoagulantes des carraghénanes sont attribuées à leur similarité structurale avec les glycosaminoglycanes (GAGs). Certains carraghénanes pourraient ainsi être utilisés comme substitut de l'héparine sans en avoir les effets secondaires (SEN *et al.*, 1994 ; CARLUCCI *et al.*, 1997 ; FARIAS *et al.*, 2000 ; YAMADA *et al.*, 2000).

2.4. Activités anti-inflammatoire et immunomodulatrice

Les microalgues et macroalgues contiennent plusieurs principes actifs, dont la phycocyanine, le β -carotène, les oméga-3 polyinsaturés, les stérols, les polyphénols, les flavonoïdes, la fucoxanthine, le fucoïdane, les diterpénoïdes et les bromophénols qui ont des effets anti-inflammatoires efficaces (KHERRAF, 2018).

En 1998, pour la première fois les propriétés anti-inflammatoires de la phycocyanine ont été signalées. La phycocyanine inhibe la formation de cytokines pro-inflammatoires

comme le TNF α (facteur de nécrose tumorale alpha), inhibe l'expression de COX-2 (la cyclooxygénase 2) et réduit la production de prostaglandine E2. De plus, la phycocyanine inhibe l'activation du NF κ B (facteur nucléaire κ B) en empêchant la dégradation de l'I κ B- α (inhibiteur facteur nucléaire κ B- α) cytoplasmique.

Le bêta-carotène est un autre composant de la spiruline et on pense qu'il a une activité anti-inflammatoire. Des études ont montré que le β -carotène inhibe la production d'oxyde nitrique et de prostaglandine E2, et inhibe iNOS (oxyde nitrique synthase inductible), COX-2, TNF- α et IL-1 β (interleukine -1bêta). L'effet inhibiteur du β -carotène sur les médiateurs inflammatoires peut être dû à l'inhibition de l'activation de NF- κ B en bloquant la translocation nucléaire de la sous-unité p65 du NF- κ B. De plus, le β -carotène inhibe la transcription des cytokines inflammatoires IL-1 β , IL-6 (Interleukine -6) et IL-12 (interleukine -12) dans les lignées cellulaires de macrophages animaux stimulées par les lipopolysaccharides (LPS) (KATSUURA *et al.*, 2009).

Les propriétés anti-inflammatoires des polyphénols sont exercées à plusieurs niveaux soit en régulant la voie de signalisation de la protéine kinase activée par un mitogène (MAPK) et la transcription de NF- κ B et AP-1 (protéine activatrice 1), l'inhibition de la production des cytokines inflammatoires et des chimiokines, la suppression de l'activité de la cyclooxygénase (COX) et réduisant ainsi la production d'espèces réactives d'oxygène et d'azote (ROS / RNS) (BALAZS, 2012).

Les flavonoïdes sont de puissants inhibiteurs de la prolifération des lymphocytes B et T (NAMGOONG *et al.*, 1994) donc ils sont capables de moduler le fonctionnement du système immunitaire (MIDDLETON et ELLIOTT, 1996).

L'activité anti-inflammatoire du bromophénol est fournie par divers extraits de différentes macroalgues, comme les vidalols A et B extraits de l'algue *Vidalia obtusiloba* ; les vidalols A et B étant des inhibiteurs d'expression de sPLA2 (phospholipases A2 sécrétoire) qui permettent de réduire les œdèmes (WIEMER *et al.*, 1991).

Les néotriphénols diterpénoïdes bromés tricycliques isolés à partir de l'extrait organique de l'algue rouge *Laurencia glandulifera* ont montré une activité anti-inflammatoire *in vivo* et *in vitro* (COLON *et al.*, 1987).

Selon certaines études réalisées *in vivo*, les fucanes peuvent empêcher deux types de leucocytes (neutrophiles et éosinophiles) de migrer vers les sites d'inflammation (SHIMAOKA *et al.*, 1996 ; TEIXEIRA *et al.*, 1997). D'autres effets ont été rapportés. Par

exemple, il a été constaté que la perfusion de fucane peut être utilisée pour réduire l'infiltration de neutrophiles dans les cellules myocardiques après reperfusion ou ischémie chez le rat (OMATA *et al.*, 1997).

La capacité anti-inflammatoire du fucoïdane commercial a été testée pendant la méningite bactérienne (GRANERT *et al.*, 1999). Dans la méningite, la réponse inflammatoire est provoquée par les cytokines suivantes: TNF- α et IL-1 (Interleukine-1). Ces cytokines provoquent une accumulation des globules blancs dans le liquide céphalo-rachidien, ce qui peut endommager le système nerveux. Des études ont montré que la réduction des globules blancs dans l'espace sous-arachnoïdien peut réduire les risques de mortalité (TUOMANEN *et al.*, 1989).

In vivo, l'utilisation des fucanes permet de réduire la concentration de TNF- α et d'IL-1, ce qui conduit à réduire la concentration de leucocytes (GRANERT *et al.*, 1999). Pour finir, une vaste étude portant sur les fucanes de neuf algues brunes a montré des résultats intéressants sur l'inhibition des P-sélectines par des tests *in vitro* et *in vivo*. Les résultats ont montré que les fucanes de *Laminaria saccharina*, *Laminaria digitata*, *Fucus evanescens*, *Fucus serratus*, *Fucus distichus*, *Fucus spiralis* et *Ascophyllum nodosum* inhibent de manière significative la P-sélectine (protéine de type sélectine) (CUMASHI *et al.*, 2007).

2.5. Activité anticancéreuse

Un certain nombre d'études ont montré que les personnes qui consomment beaucoup de soja mais aussi d'algues, sont moins susceptibles de développer un cancer que celles qui consomment ces aliments en petite quantité. Sous l'action de certaines substances algales comme les fucanes, les caroténoïdes, les phytostérols et les fucoxanthines, certaines cellules cancéreuses meurent (QUEVA, 2011).

La carence en iode et en sélénium peut favoriser le développement d'un cancer du sein. Cependant, les algues contiennent une grande quantité de ces oligo-éléments et contiennent aussi des lignanes, qui régulent la production d'œstrogènes et permettent de combattre certains cancers. Les algues rouges *Lithothamnium calcareum* riche en minéraux, ont montré un effet inhibiteur sur la croissance des cellules cancéreuses du côlon humain (ASLAM *et al.*, 2009).

L'efficacité anticancéreuse élevée des extraits aqueux d'algues a été démontrée contre les lignées cellulaires EACC (cancer du canal auditif externe) et HepG2 (Hépatoblastome

humain) (87,25 et 89,4% respectivement pour *Nostoc muscorum* et 67,40 et 77,8% pour *Oscillatoria* sp.) (SHANAB *et al.*, 2012). Ces extraits, riches en composés polaires (phycobiline, composés phénoliques et polysaccharides), induisent l'apoptose des cellules cancéreuses (ABOUL-ENEIN *et al.*, 2011 ; SHANAB *et al.*, 2012).

Les extraits d'algues brunes *Bifurcaria bifurcata* induisent de manière irréversible l'arrêt de la prolifération cellulaire sur la lignée NSCLC-6 du cancer du poumon (MOREAU *et al.*, 2006a). De même, un extrait éthanolique issu de l'algue *Corallina pilulifera* induit l'apoptose sur les cellules HeLa (adénocarcinome du col de l'utérus) (KWON *et al.*, 2007).

Des études ont montré que des extraits de *Bifurcaria bifurcata*, de *Cystoseira tamariscifolia*, de *Demarestia ligulata* et de *Dictyota dichotoma* présentent des activités cytotoxiques sur trois lignées cellulaires cancéreuses (Daudi : lymphôme, Jurkat et K562: leucémies) (ZUBIA *et al.*, 2009).

Les extraits des algues *Palmaria palmata*, *Laminaria setchellii*, *Macrocystis integrifolia* et *Nereocystis luetkeana* ont des activités antiprolifératives sur la lignée HeLa (YUAN et WALSH, 2006). L'extrait de *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* aussi des effets antiprolifératifs et apoptotiques sur les lignées de neuroblastome SHSY5Y et Kelly (CAVAS *et al.*, 2006).

D'autres recherches ont été consacrées aux hydrolysats de macroalgues obtenus par des méthodes enzymatiques. Par exemple, l'hydrolysat de l'algue brune *Ecklonia cava* a une activité antiproliférative contre la souche de cancer du côlon murin CT-26, les souches de leucémie humaine THP-1 et U937 et les cellules de mélanome de souris B-16 (ATHUKORALA *et al.*, 2006).

Kahalalide F (Figure 22) est l'exemple le plus connu d'une molécule anti-tumorale chez les *Chlorophyta* qui présente une activité significative *in vitro* contre diverses lignées de cellules tumorales solides, mais une moindre activité contre les cellules leucémiques (exemple P388). En particulier, les tumeurs de la prostate hormono-indépendantes ont montré une sensibilité au kahalalide F à la fois *in vitro* et *in vivo* (HAMANN et SCHEUER, 1993 ; HAMANN *et al.*, 1996 ; SMIT, 2004).

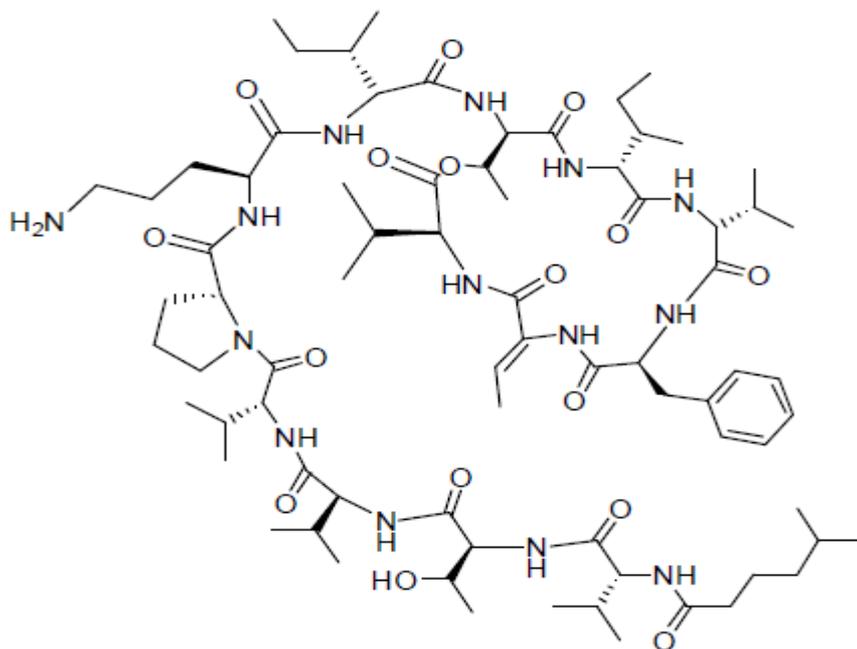


Figure 22 : Structure chimique du kahalalide F (PASQUET, 2011).

Les polysaccharides sulfatés présentent également des activités cytotoxiques, l'exemple le plus connu étant les fucanes qui possèdent des propriétés anticancéreuses et anti-métastases avérés chez la souris (SMIT, 2004).

Des études ont montré qu'après l'injection du sarg A (un polysaccharide extrait de l'algue brune *Sargassum strenophyllum*) à des souris SWISS inoculées avec des tumeurs de mélanome cancéreux B16F10, la croissance tumorale a diminué et son effet était dose-dépendant (DIAS *et al.*, 2008). De même, l'apoptose des lignées cellulaires cancéreuses gastriques AGS peut être induite par des polysaccharides issus de l'algue *Capsosiphon fulvescens* (KWON et NAM, 2007).

Les propriétés anticancéreuses des carraghénanes sont liées à leur structure qui leur permet de se lier à certains facteurs de croissance notamment ceux impliqués dans la prolifération tumorale (PARISH *et al.*, 1987 ; HOFFMAN, 1993 ; HOFFMAN *et al.*, 1995).

Les activités anti-apoptotiques et antitumorales de laminarine ont été prouvées. Elle peut induire l'apoptose dans les cellules cancéreuses humaines du colon LOVO à travers une voie mitochondriale (YOU *et al.*, 2010).

Le triterpène squalénoïde marin dehydrothysiferol (Figure 23) isolé des algues rouges *Laurencia viridis* a montré une activité cytotoxique sur différentes lignées cellulaires cancéreuses P-388 (lignée leucémique), A-549 (cancer du poumon), MEL28 (mélanome

humain non pigmenté) et HT29 (cancer colique). Il peut également induire l'apoptose des cellules T47D, ZR-75-I, HS578 et MDA-MA-231 du cancer du sein (PEC *et al.*, 2003).

La lophocladine B (alcaloïde) (Figure 25) a été isolée à partir de l'algue *Lophocladia* sp.. Cette molécule est cytotoxique pour les lignées cellulaires cancéreuses du sein (MDA-MB435) et du poumon (NCI-H460) (GROSS *et al.*, 2006).

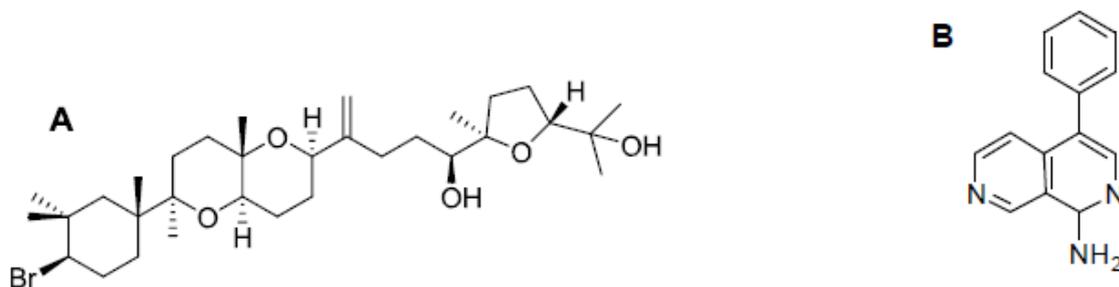


Figure 23 : Structure chimique du dehydrothysiferol (A) et de la lophocladine (B) (PASQUET, 2011).

La fucoxanthine extraite de la microalgue *Odontella aurita* présente un potentiel antiprolifératif et apoptotique sur les lignées cellulaires de cancer du poumon (MOREAU *et al.*, 2006b). L'activité de la fucoxanthine sur nombreuses lignées cellulaires cancéreuses a été vérifiée : elle inhibe les cellules neuroblastes GOTO, le cancer du côlon (Caco-2) et résiste au HL-60 (leucémie humaine) (YANG *et al.*, 2010).

Le β -carotène et la lutéine jouent un rôle préventif dans plusieurs pathologies liées au stress oxydatif, grâce à leurs effets antimutagènes et protecteurs contre le cancer du sein (YAN *et al.*, 1999).

Enfin, des extraits de *Chlorella* ont montré une activité anti-proliférative dans les lignées cellulaires de cancer du poumon H1299, A-549 et H1437 (WANG *et al.*, 2010) et des activités anti-prolifératives et d'apoptose dans la lignée cellulaire de cancer du côlon HCT116 (CHA *et al.*, 2008).

Les cultures cellulaires cancéreuses ou les animaux prétraités par des réactifs chimiques cancérigènes utilisés dans de nombreuses études *in vitro*, ont prouvé les propriétés anticancéreuses des polyphénols. Cependant, les données disponibles sur les effets des polyphénols sur les cancers chez l'homme sont plus disparates. Les polyphénols ont des effets

protecteurs et induisent une réduction du développement des tumeurs pulmonaires (KATIYAR *et al.*, 1993 ; KOMORI *et al.*, 1993 ; MENON *et al.*, 1995 ; SAZUKA *et al.*, 1995 ; YANG *et al.*, 1998 ; YUAN *et al.*, 2006). Un autre rapport montre que l'épicatéchine renforce l'effet inhibiteur de la curcumine sur la croissance et l'apoptose des cellules cancéreuses du poumon humain (SAHA *et al.*, 2010). L'inhibition de la croissance cellulaire peut se faire également par d'autres mécanismes, à savoir : la stabilisation du collagène, les modifications de l'expression génique et la réduction des radicaux libres (LANDOLFI *et al.*, 1984). En effet, les catéchines augmentent la résistance du collagène et inhibent l'activité de la collagénase (MAKIMURA *et al.*, 1993). Les flavonoïdes ont également montré une protection contre le cancer de la prostate, le cancer du côlon et le cancer du poumon (DUTHIE *et al.*, 2000).

Les lipides algaux présentent également des activités cytotoxiques, des propriétés anticancéreuses et anti-métastases. Des études ont montré que la supplémentation en AGPI peut réduire la cachexie chez les patients atteints d'un cancer du côlon, et ces acides gras ont une activité antitumorale sur les cellules de carcinome (KURATKO et BECKER, 1998). Les effets anti-leucémiques et anti-tumoraux de certains glycolipides et phosphoglycolipides résultent de l'inhibition de l'incorporation de choline dans la phosphatidylcholine humaine (COLOMBO *et al.*, 1999). Il a été démontré aussi que les acides gras de la famille des oméga-3 empêchent la production d'eicosanoïdes (ISHIHARA *et al.*, 1998). Les sulfolipides induisent aussi l'inhibition des ADN polymérases α et β de mammifères, conduisant ainsi à des effets anti-prolifératifs sur les lignées cellulaires cancéreuses humaines (HANASHIMA *et al.*, 2000). Enfin, la cytotoxicité des fucostérols (stérols) oxygénés isolés de l'algue brune *Turbinaria conoides* a été étudiée sur diverses lignées cellulaires cancéreuses y compris P-388, A-549 et les lignées de cellules HT-29 (SHEU *et al.*, 1999).

L'apoptose dans les cellules épithéliales de souris (W2) est induite par deux monoacylgalactosyl diacylglycérols isolés de la diatomée *Phaeodactylum tricornutum* (ANDRIANASOLO *et al.*, 2008).

Plusieurs études ont rapporté que les bromophénols (BPs) peuvent inhiber la prolifération de nombreuses lignées de cellules cancéreuses *in vitro* et la croissance de tumeurs *in vitro*. Les dérivés de BP isolés à partir de *Leathesia nana* contiennent également des unités de 2,3-dibromo-4,5-dihydroxybenzyl, qui sont cytotoxiques pour une variété de lignées cellulaires cancéreuses humaines. Son extrait riche en BP peut inhiber la croissance

des tumeurs dans le sarcome et améliorer le système immunitaire (SHI *et al.*, 2009). Ce qui les rend potentiellement utiles dans le traitement du cancer.

2.6. Activité antioxydante

Les antioxydants peuvent protéger le corps humain de diverses maladies, telles que le cancer, l'inflammation, le diabète, les maladies neurodégénératives et les maladies cardiovasculaires causées par la réaction des ROS avec des biomolécules. Ces radicaux libres peuvent gravement endommager l'ADN, les protéines et les lipides (TRIGUI, 2013).

Une étude de GODARD *et al.* en 2009, a attribué cet effet antioxydant aux ulvanes ; l'ajout d'*Ulva* dans l'alimentation des hamsters athérosclérotiques diminue le stress oxydatif.

Une autre étude a montré que l'extrait méthanolique d'*Ulva rigida* a une grande capacité à désactiver les ROS. En outre, ce travail a mis en évidence l'absence de corrélation entre l'activité antioxydante de l'algue et sa teneur totale en phénol, ce qui suggère que les polyphénols peuvent jouer un rôle mineur dans la capacité à chélater les produits du stress oxydatif. D'autres composés tels que les polysaccharides, les protéines et les acides organiques peuvent également contribuer à ces propriétés (YILDIZ, 2012).

Une activité antioxydante a aussi été rapportée pour le fucoïdane. Les résultats ont montré que les oligo-fucoïdanes pouvaient lier les radicaux hydroxyles (HO^\cdot), inhiber l'hémolyse des erythrocytes (globule rouge) et chélater le Fe^{2+} .

L'action antioxydante et les effets potentiels, sur la formation des calculs rénaux, de l'alginate extrait de l'algue brune *Sargassum graminifolium* a été évaluée (ZHANG *et al.*, 2012).

La cyanobactérie *Arthrospira platensis* a montré une activité antioxydante élevée grâce à sa teneur en pigments phycobiliprotéiques totaux et en métabolites secondaires hautement produits connus pour leur haute action antioxydante (SHANAB *et al.*, 2012).

La phycocyanine possède de puissantes propriétés antioxydantes. Elle peut piéger les radicaux libres (les radicaux alcoyle, hydroxyle et peroxy). Elle réduit également la production de nitrite, inhibe l'expression de l'Inos et inhibe la peroxydation des lipides microsomaux du foie (ROMAY *et al.*, 1998 ; MANCONIA *et al.*, 2009).

Chlorella ellipsoïde et *Spirulina maxima* sont riches en composés antioxydants, qui contribuent à la protection biomoléculaire contre les ROS formés dans des conditions de stress (ABD EL-BAKY *et al.*, 2008).

Des chercheurs coréens ont mis en contact l'extrait alcoolique de l'algue rouge *Callophyllis japonica* avec des cellules pulmonaires de hamster soumises à l'effet nocif de l'eau oxygénée (H₂O₂).

L'effet antioxydant de l'extrait s'est manifesté de différentes manières:

- en inhibant la peroxydation lipidique;
- par un effet anti-radicalaire en protégeant la viabilité des cellules pulmonaires;
- en réduisant l'apoptose induite par l'H₂O₂;
- en augmentant l'activité des enzymes antioxydantes telles que la superoxyde dismutase et la catalase (KANG *et al.*, 2005).

2.7. Activités préventives anti-obésité, anti-athérosclérose et anti-hypercholestérolémie

L'obésité est un phénomène submergeant sur le plan mondial qui se définit par un trouble métabolique chronique causé par un déséquilibre entre la consommation d'énergie et les dépenses. Suite à l'accumulation excessive de graisse, de nombreux problèmes de santé s'en suivent ; l'hypertension artérielle, le diabète de type 2, l'hypercholestérolémie (taux de cholestérol sanguin élevé) et l'athérosclérose.

L'étude des effets exercés par *Ulva* sur des hamsters hypercholestérolémiques, a révélé une réduction significative des taux du cholestérol et des triglycérides. Ceci a également permis la diminution de la formation des produits de la peroxydation lipidique et le taux d'anion superoxide et surtout une diminution de 70% de l'accumulation du gras au niveau de l'aorte ce qui limite le développement de l'athérosclérose (GODARD *et al.*, 2009). Il a été démontré que les japonais et les habitants d'Alaska qui consomment beaucoup de produits marins et en particulier les algues, souffrent moins de maladies cardiovasculaires (KINSELLA, 1986).

Les ulvanes algaux peuvent présenter une action hypolipédémiant, lorsque leur structure est décomposée en deux fractions de poids moléculaires différents. En effet, l'étude pharmacologique expérimentale menée par PENGZHAN *et al.* (2003) sur six groupes de dix rats nourris pendant 21 jours avec un régime hypercholestérolémiant contenant ces deux fractions moléculaires (U1 et U2), a permis de montrer une diminution de l'altération du foie chez les rats ayant ingéré les fractions d'ulvanes par comparaison aux rats témoins. De plus,

les fractions U1 et U2 ont montré une activité similaire, voir meilleure que l'inositoléniate (Ino) (Figure 24), utilisé ici comme témoin positif, et déjà connu pour son efficacité dans le traitement de l'hyperlipidémie de type 2 (WECHSLER, 1980). L'effet obtenu est ainsi accompagné d'une réduction significative de la concentration sanguine du cholestérol total, des taux de triglycérides et des taux de lipoprotéines de basse densité (LDL-cholestérol). Par rapport à celle du groupe contrôle n'ayant reçu que le régime hypercholestérolémiant, ces deux fractions induisent même une augmentation de la concentration des lipoprotéines de haute densité (HDL cholestérol).

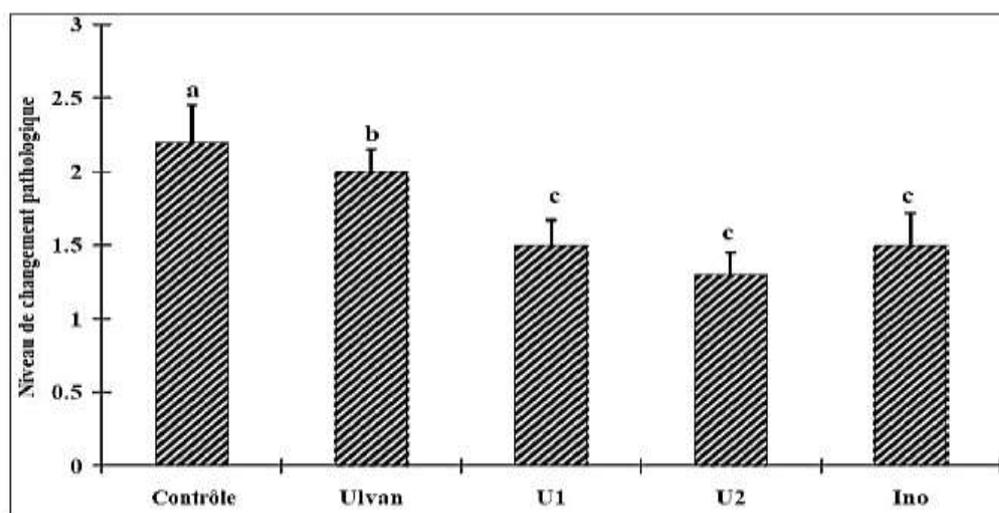


Figure 24 : Effets d'ulvanes et les fractions d'ulvanes sur la dégradation du foie du rats sous régime hypocholestérolémiant (niveau de dégradation : doux=1, modérée=2, sévère=3) (PENGZHAN, 2003).

2.8. Activité gastroprotective

L'étude expérimentale menée en 2000 par BARCELO *et al.* sur l'emploi d'alginate et d'ulvanes chez des rats comme stimulant de la sécrétion de mucine, a permis de démontrer leur potentiel comme médicament protecteur de la muqueuse gastrique. Les résultats obtenus démontrent, en effet, une réponse importante du colon des rats par sécrétion de mucines pour une concentration en ulvanes de 10 mg/L (Figure 25).

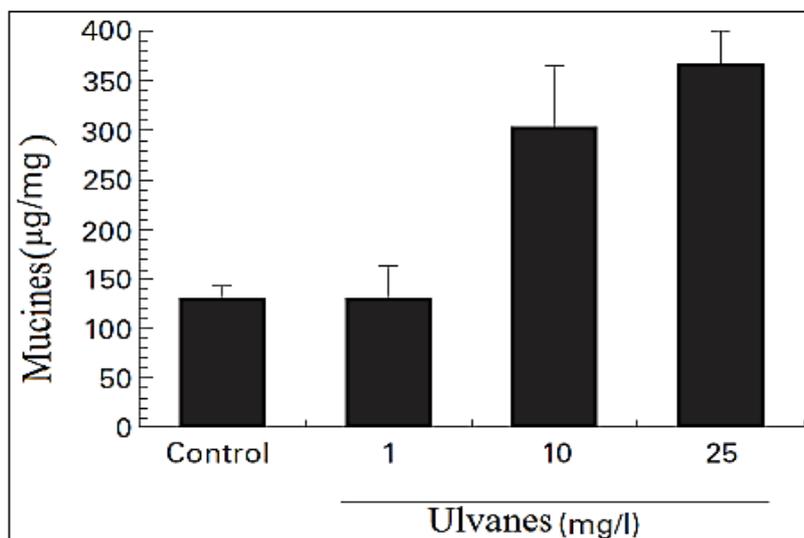


Figure 25 : Niveau de sécrétion des mucines du colon des rats après l'administration orale d'ulvanes à divers concentrations (BARCELO *et al.*, 2000).

Des études ont montré le caractère fermentescible de l'alginate de sodium par des bactéries du colon (MICHEL *et al.*, 1996). Lors de la fermentation des oligo-alginates, la formation de dérivés d'alginate produits par la flore intestinale pourrait avoir des effets positifs sur la muqueuse digestive (MICHEL *et al.*, 1999).

2.9. Activité anti-hyperglycémiant

Les études expérimentales et cliniques démontrent que le stress oxydatif causé par l'hyperglycémie joue un rôle majeur dans les signes cliniques du diabète sucré, celui-ci est généralement accompagné par une augmentation des dommages oxydatifs. Cet effet a été contrecarré par l'administration pendant 30 jours d'un extrait éthanolique d'*Ulva rigida* chez des rats diabétiques accompagné d'une augmentation du poids corporel et du taux d'insuline dans le sang. Cet effet pourrait être dû à une régénération des cellules β des îlots du pancréas et/ou à une augmentation de la libération d'insuline (CELIKLER, 2009).

Les dérivés de bromophénols de *Rhodomela confervoides*, qui contiennent une ou deux unités de 2,3-dibromo-4,5-dihydrobenzyl et fortement bromés, ont inhibé l'activité PTP1B (protéine-tyrosine phosphatase 1B) et ont diminué la glycémie chez le rat diabétique (SHI *et al.*, 2008). Ces études indiquent que l'activité anti-hyglycémiant *in vivo* pourrait être partiellement due à l'inhibition de PTP1B. Les bromophénols du *Symphycladia latiuscula* présentent une activité inhibitrice de l'aldose réductase et pourraient être utilisés dans le traitement des complications du diabète comme les dommages oculaires et du système nerveux chez les patients T2DM (diabète sucré du type 2) (FAULKNER, 2001).

Conclusion générale

Durant cette dernière décennie, la filière des algues marines a suscité un intérêt croissant de part la qualité nutritionnelle relativement intéressante et la richesse en molécules bioactives de ces organismes, eucaryotes pour la plupart et procaryotes dans le cas des cyanobactéries.

Sur la base de notre étude bibliographique, nous avons pu nous rendre compte des potentialités d'applications des algues. Leurs principaux domaines d'intérêt et d'utilité sont : l'alimentation, l'industrialisation sous toutes ses formes, l'agriculture, la médecine et le domaine énergétique.

Le présent travail a pour but de contribuer à la connaissance de la composition en métabolites actifs et leurs effets biologiques *in vivo* et *in vitro* de certaines espèces d'algues. Des études expérimentales réalisées sur des extraits d'algues, ont permis de mettre en évidence un large éventail de leurs activités biologiques variées : antivirale, antimicrobienne, anti-tumorale, anti-inflammatoire, antioxydante, etc.

Nous concluons à partir de cette étude, que les algues marines fournissent de nombreuses substances aux caractéristiques biologiques intéressantes et le grand intérêt qu'elles convergent, a élargi le spectre de leur exploitation.

L'Algérie, pays connu par ces ressources marines naturelles, avec un littoral de 1200 Km, est une source potentiel d'algues marines qui malheureusement reste encore inexploree et inexploitée. En perspective, il serait intéressant de pousser nos investigations à la caractérisation nutritionnelle de ces algues, et de faire un screening plus complet de leurs principaux groupes chimiques potentiellement actifs ainsi que la compréhension fondamentale des mécanismes biologiques et physico-chimiques mis en jeu via ces substances serait indispensable à leur valorisation industrielle ou thérapeutique.

Actuellement, les scientifiques visent à identifier une nouvelle génération de métabolites bioactives d'origine algale pour remplacer celles de synthèse. De même, un certain nombre de secteurs industriels se tournent de nouveau vers l'incorporation de ces molécules dans leurs formulations pour améliorer notre alimentation et affecter positivement notre santé.

Références bibliographiques

A

- ABD EL-BAKY H.H., EL-BAZ F.K. et EL-BAROTY G.S. (2008). Evaluation of marine alga *Ulva lactuca* L. as a source of natural preservative ingredient. American-Eurasian journal of agricultural and environmental sciences, 3, 434-444.
- ABED R.M., DOBRETSOV S. et SUDESH K (2009). Applications of cyanobacteria in biotechnology. Journal of Applied Microbiology, 106 (1), 1-12.
- ABOUL-ENEIN A., SHALABY E., ABUL-ELA F., NASR-ALLAH A., MAHMOUD A.M., ELSHEMY H.(2011). Back to nature : Spotlight on cancer therapeutics. Vital Signs, 10, 8-9.
- ADHIKARI U., MATEII C.G, CHATTOPADHYAY K., PUJOL C.A., DAMONTE E.B. et RAY B. (2006). Structure and antiviral activity of sulfated fucans from *Stoechospermum marginatum*. Phytochemistry, 67(22), 2474-2482.
- AINANE T. (2011). Valorisation de la biomasse algale du Maroc : Potentialités pharmacologiques et applications environnementales, cas des algues brunes *Cystoseira tamariscifolia* et *Bifurcaria bifurcata*. Doctorat en chimie, Université Hassan II - Casablanca, Maroc.
- ALLEN V.G., POND K.R., SAKER K.E., FONTENOT J.P., BAGLEY C.P., IVY R.L., EVANS R.R., SCHMIDT R.E., FIKE J.H., ZHANG X., AYAD J.Y., BROWN C.P., MILLER M.F., MONTGOMERY J., MAHAN J., WESTER D.B. et MELTON C. (2001). Tasco : Influence of a brown seaweed on antioxidants in forages et livestock-A review. Journal of Animal Science, 79(E-Suppl), E21-E31.
- ALWAYN I.P.J., APPEL III J.Z., GOEPFERT C., BUHLER L., COOPER D.K.C. et ROBSON S.C. (2001). Inhibition of platelet aggregation in baboons: therapeutic implications for xenotransplantation. Xenotransplantation, 7(4), 247-257.
- ANDRIANASOLO E.H., HARAMATY L., VARDI A., WHITE E., LUTZ R. et FALKOWSKI P. (2008). Apoptosis-Inducing Galactolipids from a Cultured Marine Diatom, *Phaeodactylum tricornutum*. Journal of Natural Products, 71(7), 1197-1201.
- ASLAM M.N., BHAGAVATHULA N., PARUCHURI T., HU X., CHAKRABARTY S. et VARANI J. (2009). Growth inhibitory effects of a mineralized extract from the red marine algae, *Lithothamnion calcareum*, on Ca²⁺-sensitive and Ca²⁺ resistant human colon carcinoma cells. Cancer Letters, 283(2), 186-192.

- ASLAN S. et KAPDAN I.K. (2006). Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. *Ecological Engineering*, 28(1), 64-70.
- ATHUKORALA Y., KIM K.N. et JEON Y.J. (2006). Antiproliferative and antioxidant properties of an enzymatic hydrolysate from brown alga, *Ecklonia cava*. *Food and Chemical Toxicology*, 44(7), 1065-1074.
- AYE HUNIE S., BELAY A., BABA T.W. et RUPRECHT R.M. (1998). Inhibition of HIV-1 replication by an aqueous extract of *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*). *Journal of Acquired Immune*, 18(1), 7-12.

B

- BABA M., SCHOLS D., PAUWELS R., NAKASHIMA H. et DECLERCQ E. (1990). Sulfated polysaccharides as potent inhibitors of HIV-induced syncytium formation - A new strategy towards aids chemotherapy. *Journal of Acquired Immune Deficiency Syndromes and Human Retrovirology*, 3(5), 493-499.
- BABA M., SNOECK R., PAUWELS R. et DECLERCQ E. (1988). Sulfated polysaccharides are potent and selective inhibitors of various enveloped viruses, including herpes simplex virus, cytomegalovirus, vesicular stomatitis virus, and human immunodeficiency virus. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 32(11), 1742-1745.
- BABAYI H., KOLO I. et OKOGUM J.I. (2004). The antimicrobial activities of methanolic extracts of *Eucalyptus camaldulensis* and *Terminalia catappa* against some pathogenic microorganisms. *Biochemistry*, 16(2), 102-5.
- BALAZS V. (2012). *Anti-Inflammatory Role of Natural Polyphenols and Their Degradation Products*. FERNANDEZ R. (2012). *Severe Sepsis and Septic Shock - Understanding a Serious Killer*. IntechOpen.
- BARCELO A., CLAUSTRE J., MORO F., CHAYVIALLE J.A., CUBER J.C. et PLAISANCIE P. (2000). Mucin secretion is modulated by luminal factors in the isolated vascularly perfused rat colon. *Gut*, 46(2), 218-224.
- BARRINGTON K., CHOPIN T. et ROBINSON S. (2009). Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters. *Integrated mariculture*. FAO, Fisheries and Aquaculture Technical Paper. Rome, Italy. 7-46, 529.

- BEDOUX G., HARDOUIN K., MARTY C., TAUPIN L., VETANJON L. et BOURGOUGNON N. (2014). Chemical characterization and photoprotective activity measurement of extracts from the red macroalga *Solieria chordalis*. *Botanica Marina*, 57(4), 291-301.
- BERESS A., WASSERMANN O., BRUHN T., BERESS L., KRAISELBURD E.N., GONZALEZ L.V., DEMOTTA G.E. et CHAVEZ P.I. (1993). A new procedure for the isolation of anti-HIV compounds (polysaccharides and polyphenols) from the marine alga *Fucus vesiculosus*. *Journal of Natural Products*, 56(4), 478-488.
- BERRI M., SLUGOCKI C., OLIVIER M., HELLOIN E., JACQUES I., SALMON H., DEMAIS H., LE GOFF M. et COLLEN P.N. (2016). Marine-sulfated polysaccharides extract of *Ulva armoricana* green algae exhibits an antimicrobial activity and stimulates cytokine expression by intestinal epithelial cells. *Journal of Applied Phycology*, 28(5).
- BEZANGER B., PINKAS M., TOTCK M. et TROTIN F. (1990). Les plantes médicinales des régions tempérées. Maloine. Paris, France. 1,469p, 12-13p.
- BLUNT J.W., COPP B.R., MUNRO M.H.G., NORTHCOTEC P.T. et PRINSEP M.R. (2011). Marine natural products. *Natural Product Reports*, 27, 165.
- BOROWITZKA M.A. (2018). Biology of Microalgae. In : LEVINE I.A. et FLEURENCE J.. *Microalgae in Health and Disease Prevention*. 1st Ed. Academic Press. 23-72p. 354p.
- BOUGARAN G. et SAINT-JEAN B. (2014). Microalgues : de petits végétaux aux grandes promesses !. *Biofutur*, (360), 28-31.
- BRUNETON J. (1999). *Pharmacognosie, Phytochimie, Plantes médicinales*. Lavoisier Technique & Documentation. 3ème Ed. Paris, France. 227-310-312-313-314, 494.
- BURTIN P. (2003). Nutritional value of seaweeds. *Electronic journal of Environmental, Agricultural and Food chemistry*, 2(4), 498-503.

C

- CABIOC'H J., FLOC'H J.Y., LE TOQUIN A., BOUDOURESQUE C.F., MEINEZ A. et VERLAQUE M. (1992). *Guide des algues des mers d'Europe : Manche, Atlantique, Méditerranée*. Delanchoix et Niestlé, Paris, France. 1, 231-272p. 272p

- CALIXTO J.B. (2005). Twenty-five years of research on medicinal plants in Latin America : A personal view. *Journal of Ethnopharmacology*, 100(1-2), 131-134.
- CARDOZO K.H.M., GUARATINI T., BARROS M.P., FALCÃO V.R., TONON A.P., LOPES N.P., CAMPOS S., TORRES M.A., SOUZA A.O., COLEPICOLO P. et PINTO E. (2007). Metabolites from algae with economical impact. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part C, Toxicology & Pharmacology*, 146(1-4), 60-78.
- CARLUCCI M.J., SCOLARO L.A., ERREA M.I., MATULEWICZ M.C. et DAMONTE E.B. (1997). Antiviral activity of natural sulphated galactans on herpes vims multiplication in cell culture. *Planta Medica*, 63(5), 429-432.
- CAVAS L., BASKIN Y., YURDAKOC K. et OLGUN N. (2006). Antiproliferative and newly attributed apoptotic activities from an invasive marine alga : *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 339(1), 111-119.
- CELIKLER S., TAS S., VATAN O., ZIYANOK-AYVALIK S., YILDIZ G. et BILALOGLU R. (2009). Anti-hyperglycemic and antigenotoxic potential of *Ulva rigida* ethanolic extract in the experimental diabetes mellitus. *Food and Chemical Toxicology*, 47, 1837-1840.
- CEVA (2014). Réglementation algues alimentaires, Synthèse CEVA. Centre d'Etude et de Valorisation des Algues. France. 1p.
- CHA K.H., KOO S.Y. et LEE D. (2008). Antiproliferative Effects of Carotenoids Extracted from *Chlorella ellipsoidea* and *Chlorella vulgaris* on Human Colon Cancer Cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 10521-10526.
- CHATTERJEE A., YASMIN T., BAGCHI D. et STOHS S.J. (2004). Inhibition of *Helicobacter pylori* *in vitro* by various berry extracts, with enhanced susceptibility to clarithromycin. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 265(1-2), 19-26.
- CHOJNACKA K., SAEID A., WITKOWSKA Z. et TUHY L. (2012). Biologically Active Compounds in Seaweed Extracts – the Prospects for the Application. *The Open Conference Proceedings Journal*, 3, 20-28.
- CHOUIKHI A. (2013). Potential applications of marine seaweeds and pharmacological activities of their metabolites. Institute of Marine Sciences & Technology, Dokuz Eylul University. Inter-Islamic Science & Technology Network on Oceanography, Izmir, Turkey. 40p.

- CIAVATTA M. L., GAVAGNIN M., MANZA E., VILLANI G., VARCAMONTI M. et ZANFARDINO A. (2009). Diterpene content of the alga *Dictyota ciliolata* from a Moroccan lagoon. *Phytochemistry Letters*, 2(4), 211-215.
- CLUZET S., TORREGROSA C., JACQUET C., LAFITTE C., FOURNIER J., MERCIER L. et DUMAS B. (2004). Gene expression profiling and protection of *Medicago truncatula* against a fungal infection in response to an elicitor from green algae *Ulva* spp. *Plant, Cell & Environment*, 27(7), 917-928.
- COLLIEC S., FISCHER A.M., TAPONBRETAUDIÈRE J., BOISSON G., DURAND P. et JOZEFONVICZ J. (1991). Anticoagulant properties of a fucoidan fraction. *Thrombosis Research*, 64(2), 143-154.
- COLOMBO D., COMPOSTELLA F., RONCHETTI F., SCALA A., TOMA L., TOKUDA H. et NISHINO H. (1999). Chemoenzymatic synthesis and Antitumor promoting activity of 6'- and 3-esters of 2-O-beta- D-glucosylglycerol. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 7(9), 1867-1871.
- COLON M., GUEVARA P., GERWICK WH. et BALLANTINE D. (1987). 5'-Hydroxyisoavrainvilleol, a new diphenylmethane derivative from the tropical green alga *Avrainvillea nigricans*. *Journal of natural products*, 50(3), 368-374.
- COVIELLO T., MATRICARDI P., MARIANECCI C. et ALHAIQUE F. (2007). Polysaccharide hydrogels for modified release formulations. *Journal of Controlled Release*, 119(1), 5-24.
- COWAN M.M. (1999). Plant Products as antimicrobial agents. *Clinical Microbiology Reviews*, 12 (4), 564-582.
- CUBAS C., LOBO M.G. et GONZALEZ M. (2008). Optimization of the extraction of chlorophylls in green beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by N, N-dimethylformamide using response surface methodology. *Journal of Food Composition and Analysis*, 21(2), 125–133.
- CUMASHI A., USHAKOVA N.A., PREOBRAZHENSKAYA M.E., D'INCECCO A., PICCOLI A., TOTANI L., TINARI N., MOROZEVICH G.E., BERMAN A.E., BILAN M.L., USOV A., USTYUZHANINA N.E., GRACHEV A.A., SANDERSON C.J., KELLY M., RABINOVICH G.A., TACOBELLI S. et NIFANTIEV N.E. (2007). A comparative study of the anti-inflammatory, anticoagulant, antiangiogenic,

and antiadhesive activities of nine different fucoidans from brown seaweeds. *Glycobiology*, 17(5), 541-552.

D

- DAUME S., LONG B.M. et CROUCH P. (2003). Changes in amino acid content of an algal feed species (*Navicula* sp.) and their effect on growth and survival of *juvenile abalone* (*Haliotis rubra*). *Journal of applied phycology*, 15(2), 201-207.
- DAWCZYNSKI C., SCHUBERT R. et JAHREIS G. (2007). Aminoacids, fatty acids, and dietary fibre in edible seaweed products. *Food Chemistry*. 103(3), 891- 899.
- DE REVIERS B., BOSQUET G., BLONDEL L. et MARTIN C. (2002). *Biologie et phylogénie des algues*. Belin, Paris, France.1(2), 225p.
- DE SOUZA PERIERA H., LEAO-FERREIRA L.R., MOUSSATCHE N., TEIXEIRA V.L., CAVALCANTI D.N., DA COSTA L.J., R. DIAZ et FRUGULHETTII. C. (2005). Effects of diterpenes isolated from the Brazilian marine alga *Dictyota menstrualis* on HIV-1 reverse transcriptase, *Planta Medica*, 71(11), 1019–1024.
- DEMBITSKY V.M. et ROZENTSVET O.A. (1996). Distribution of polar lipids in some marine, brackish and freshwater green macrophytes. *Phytochemistry*, 41(2), 483-488.
- DIAS P.F., SIQUEIRA JR. J.M., MARASCHIN M., FERREIRA A.G., GAGLIARDI A.R. et RIBEIRODO-VALLE R.M. (2008). A polysaccharide isolated from the brown seaweed *Sargassum stenophyllum* exerts antivasculogenic effects evidenced by modified morphogenesis. *Microvascular Research*, 75(1), 34-44.
- DIDRAK M. (1999). Antimicrobial activities of the extracts of various plants (*Valex*, *Mimosa bark*, *Gallnut powders*, *Salvia* sp. and *Phlomis* sp.). *Turkish Journal of Biology*, 23, 241-248.
- DING W.K. et SHAH N.P. (2009). An improved method of microencapsulation of probiotic bacteria for their stability in acidic and bile conditions during storage. *Journal of Food Science*, 74(2), M53-M61.

- DONADIEU Y. et BASIRE J. (1985). Les algues : thérapeutiques naturelles. Maloine. 36-40p. 511p.
- DOWHAN W. et BOGDANOV M. (2002). Functional roles of lipids in membranes. 4th Ed, Biochemistry of Lipids, Lipoproteins and Membranes, Texas, États-Unis. p36.
- DUAN X.J., ZHANG W.W., LI X.M. et WANG B.G. (2006). Evaluation of antioxidant property of extract and fractions obtained from a red alga, *Polysiphonia urceolata*. Food Chemistry, 95(1), 37-43.
- DURAIARASAN S., MANI V., ABDUL R.S., THIRUVENGADAM S., AMMAVASAI SHANTHALIN S. et KUPPUSAMY T. (2014). A green synthesis of antimicrobial compounds from marine microalgae *Nannochloropsis oculata*. Journal of Coastal Life Medicine, 2(11), 859-863.
- DURIG J., BRUNN T., ZURBORN K.H., GUTENSOHN K., BRUHN H.D. et BERES L. (1997). Anticoagulant fucoidan fractions from *Fucus vesiculosus* induce platelet activation *in vitro*. Thrombosis Research, 85(6), 479-491.
- DUTHIE G.G., DUTHIE S.J. et KYLE J.A.M. (2000). Plant polyphenols in cancer and heart disease : implications as nutritional antioxidants. Nutrition Research Reviews, 13(1), 79-106.

E et F

- EASTMOND J.P., QUETTIER A.L., KROON T.M.J., CRADDOCK C., ADAMS N. et SLABAS R.A. (2010). Phosphatidic acid phosphohydrolase 1 and 2 regulate phospholipid synthesis at the endoplasmic reticulum in *Arabidopsis*. The Plant Cell, 22, 2796-2811.
- FALLER H. (2011). Les applications et la toxicité des algues marines. Doctorat en Pharmacie, Université de Limoges, France. 131p.
- FALSHAW R. et FURNEAUX R.H. (2005). Structural analysis of carrageenans from the red alga, *Callophyllis hombroniana* Mont. Kütz (Kallymeniaceae, Rhodophyta). Carbohydrate Research, 340(6), 1149-1158.
- FARIAS W.R.L., VALENTE A.P., PEREIRA M.S. et MOURAO P.A.S. (2000). Structure and anticoagulant activity of sulfated galactans - Isolation of a unique sulfated galactan from the red algae *Botryocladia occidentalis* and comparison of its

anticoagulant action with that of sulfated galactans from invertebrates. *Journal of Biological Chemistry*, 275(38), 29299-29307.

- FARID Y., ETAHIRI S. et ASSOBEI O. (2009). Activité antimicrobienne des algues marines de la lagune d'Oualidia (Maroc) : Criblage et optimisation de la période de la récolte. *Journal of Applied Biosciences*, 24, 1543-1552.
- FAULKNER D.J. (2001). Marine natural products. *Natural Product Reports*, 18(1), 1-49.
- FELDMAN S.C, REYNALDI S., STORTZ C.A., CERESO A.S. et DAMONTE E.B. (1999). Antiviral properties of fucoidan fractions from *Leathesia difformis*. *Phytomedicine*, 6(5), 335-340.
- FERRUZZI M.G. et BLAKESLEE J. (2007). Digestion, absorption, and cancer preventative activity of dietary chlorophyll derivatives. *Nutrition Research*, 27(1), 1-12.
- FILALI R. (2012). Estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique de CO₂. Doctorat en Automatique. Ecole Doctoral Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes. Orsay, France. 18p.
- FLEURENCE J. (1999). Seaweed proteins : biochemical, nutritional aspects and potential uses. *Trends in Food Science & Technology*, 10(1), 25-28.

G

- GANESAN P., KUMAR C.S. et BHASKAR N. (2008). Antioxidant properties of methanol extract and its solvent fractions obtained from selected Indian red seaweeds. *Bioresource Technology*, 99(8), 2717-2723.
- GARON-LARDIERE S. (2004). Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge *Asparagopsis armata* (Bonnemaisoniales). Doctorat en Biochimie, Université de Bretagne Occidentale, France. 226p.
- GIRARD J.P., MARION C., LIUTKUS M., BOUCARD M., RECHENCQ E., VIDAL J.P. et ROSSI J.C. (1988). Hypotensive constituents of marine algae ; 1. Pharmacological studies of laminine. *Planta Medica*, 54(3), 193-196.
- GLAZER A.N. (1994). Phycobiliproteins a family of valuable, widely used fluorophores. *Journal of Applied Phycology*, 6(2), 105-112.

- GODARD M., DECORDE K., VENTURA E., SOTERAS G., BACCOU J.C, CRISTOL J.P. et ROUANET J.M. (2009). Polysaccharides from the green alga *Ulva rigida* improve the antioxidant status and prevent fatty streak lesions in the high cholesterol fed hamster, an animal model of nutritionally-induced atherosclerosis. *Food Chemistry*, 115(1), 176-180.
- GRANERT C., RAUD J., WAAGE A. et LINDQUIST L. (1999). Effects of polysaccharide fucoidan on cerebrospinal fluid interleukin-1 and tumor necrosis factor alpha in pneumococcal meningitis in the rabbit. *Infection and Immunity*, 67(5), 2071-2074.
- GROSS H.I., GOEGER D.E., HILLS P., MOOBERRY S.L., BALLANTINE D.L., MURRAY T.F., VALERIOTE F.A. et GERWICK W.H. (2006). Lophocladines, bioactive alkaloids from the red alga *Lophocladia* sp. *Journal of Natural Products*, 69 (4), 640-644.
- GUILLAUME P. (2010). Caractérisation biochimique d'exopolymères d'origine algale du bassin de Marennes-Oléron et étude des propriétés physico-chimiques de surface de micro-organismes impliquées dans leur adhésion. Doctorat en Biochimie. Université de La Rochelle. France. 292p, p29-30.
- GUSKOV A., KERN J., GABDULKHAKOV A., BROSER M., ZOUNI A. et SAENGER W. (2009). Cyanobacterial photosystem II at 2.9 Å resolution and the role of quinones, lipids, channels and chloride. *Nature Structural & Molecular Biology*, 16, 334-342.

H

- HAMANN M.T. et SCHEUER P.J. (1993). Kahalalide F : A bioactive depsipeptide from the sacoglossan mollusk *Elysia rufescens* and the green alga *Bryopsis* sp. *Journal of the American Chemical Society*, 115(13), 5825-5826.
- HAMANN M.T., OTTO C.S., SCHEUER P.J. et DUNBAR D.C. (1996). Kahalalides : Bioactive peptides from a marine mollusk *Elysia rufescens* and its algal diet *Bryopsis* sp. *Journal of Organic Chemistry*, 61(19), 6594-6600.
- HAMES B.D., HOOPER N.M. et HOUGHTON J.D. (2000). L'essentiel en biochimie. BERTI, 379-380p, 421p.

- HANASHIMA S., MIZUSHINA Y., YAMAZAKI T., OHTA K., TAKAHASHI S., KOSHINO H., SAHARA H., SAKAGUCHI K. et SUGAWARA F. (2000). Structural determination of sulfoquinovosyldiacylglycerol by chiral syntheses. *Tetrahedron Letters*, 41(22), 4403-4407.
- HARPER M.K., BUGNI T.S., COPP B.R., JAMES R.D., LINDSAY B.S., RICHARDSON A.D., SCHNABEL P.C., TASDEMIR D., VAN WAGONER R.M., VERBITSKI S.M. et IRELAND C.M. (2001). Introduction to the chemical ecology of marine natural products. In : MCCLINTOCK J.B. et BAKER B.J.. *Marine Chemical Ecology*, 1st Ed, CRC Marine Science, 624p.
- HEMON E., MARFAING H., SASSI J.F., LERAT Y., BRAULT D. et DANIEL R. (2007). Isolation of fucanolytic marine bacteria as a source of fucan depolymerizing enzymes. Application to the industrial production of biologically-active oligo- fucans. *Cosming 2007*, 4th international symposium on cosmetic ingredients & biotechnology. Saint-malo, France.
- HERNANDEZ-CORONA A., NIEVES I., MECKES M., CHAMORRO G. et BARRON B.L. (2002). Antiviral activity of *Spirulina maxima* against herpes simplex virus type 2. *Antiviral Research*, 56(3), 279-285.
- HERNANDEZ-HERRERA R.M., SANTACRUZ-RUVALCABA F., RUIZ-LÓPEZ M.A., NORRIE J. et HERNÁNDEZ-CARMONA G. (2014). Effect of liquid seaweed extracts on growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of applied phycology*, 26(1), 619-628.
- HOFFMAN R. (1993). Carrageenans inhibit growth-factor binding *Biochemical Journal*, 289(2), 331-334
- HOFFMAN R., PAPER D.H., DONALDSON J., ALBAN S. et FRANZ G. (1995). Characterization of a laminarin sulphate which inhibits basic fibroblast growth factor binding and endothelial cell proliferation. *Journal of Cell Science*, 108(11), 3591-3598.
- HOLDT S.L. et KRAAN S. (2011). Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology*, 23(3), 543-597.
- HORTENSE F. (2011). Les applications et la toxicité des algues marines. Doctorat en Pharmacie. Université de Limoges, France, 131p.

- HOSHINO T., HAYASHI T., HAYASHI K., HAMADA J., LEE J.B. et SANKAWA U. (1998). An antivirally active sulfated polysaccharide from *Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 21(7), 730-734.

I

- ILLIJAS I. M., INDY J. R., YASUI H. et ITABASHI I. (2009). Lipid and fatty acid composition of a little known and rarely collected *Exophyllum wentii* Weber-van Bosse from Bali island, Indonesia. *Journal of Oleo Science*, 58(3), 103-110.
- ISHIHARA K., MURATA M., KANENIWA M., SAITO H., SHINOHARA K. et YAMAMOTO M. (1998). Inhibition of icosanoid production in MC/9 mouse mast cells by n-3 polyunsaturated fatty acids isolated from edible marine algae. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 62(7), 1412-1415.
- ISMAIL A. et HONG T.S. (2002). Antioxidant Activity of Selected Commercial Seaweeds. *Malaysian Journal of Nutrition*, 8 (2), 167-177.
- ITO K. et HORI K. (1989). Seaweed : Chemical composition and potential food uses. *Food Reviews International*, 5(1), 101-144.

J

- JAULNEAU V., LAFITTE C., JACQUET C., FOURNIER S., SALAMAGNE S., BRIAND X., ESQUERRE-TUGAYE MT. et DUMAS B. (2010). Ulvan, a sulphated polysaccharide from green algae, activates plant immunity through the jasmonic acid signaling pathway. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 1-11.
- JIAO G., YU G., ZHANG J. et EWART S.H. (2011). Chemical structures and bioactivities of sulphated polysaccharides from marine algae. *Marine Drugs*, 9(2), 196-223.
- JOUANNEAU D., GUIBET M., BOULENGUER P., MAZOYER J., SMIETANA M. et HELBERT W. (2010). New insights into the structure of hybrid [kappa]-/[mu]-carrageenan and its alkaline conversion. *Food Hydrocolloids*, 24, 452-461.
- JUBERT C. et BAILEY G. (2007). Isolation of chlorophylls a and b from spinach by counter-current chromatography. *Journal of Chromatography A*, 1140(1-2), 95-100.

K

- KAEFFER B., BÉNARD C., LAHAYE M., BLOTTIÈRE H.M. et CHERBUT C. (1999). Biological properties of Ulvan, a new source of green seaweed sulfated polysaccharides, on cultured normal and cancerous colonic epithelial cells. *Planta Medica*, 65(6), 527-531.
- KAIMOUSSI A., MOUZDAHIR A. et SAIH A. (2004). Variations saisonnières des teneurs en métaux (Cd, Cu, Fe, Mn et Zn) chez l'algue *Ulva lactuca* prélevée au niveau du littoral de la ville d'El Jadida (Maroc). *Comptes Rendus Biologies*, 327(4), 361-369.
- KANG K.A., BU H.D., PARK D.S., GO G.M., JEE Y., SHIN T. et HYUN J.W. (2005). Antioxidant Activity of Ethanol Extract of *Callophyllis japonica*. *Phytotherapy Research*, 19, 506-510.
- KARRAY R.H.M. et SAYADI S. (2015). Evaluation of ultrasonic, acid, thermo-alkaline and enzymatic pre-treatments on anaerobic digestion of *Ulva rigida* for biogas production. *Bioresource Technology*, 187, 205-213.
- KATIYAR S.K., AGARWAL R. et MUKHTAR H. (1993). Protective effects of green tea polyphenols administered by oral intubation against chemical carcinogen-induced forestomach and pulmonary neoplasia in A/J mice. *Cancer Letters*, 73(2-3), 167-172.
- KATIYAR SK., AGARWAL R. et MUKHTAR H. (1993). Protective effects of green tea polyphenols administered by oral intubation against chemical carcinogen induced forestomach and pulmonary neoplasia in A/J mice. *Cancer Letters*, 73(2-3), 167-172.
- KATSUURA S., IMAMURA T., BANDO N. et YAMANISHI R. (2009). Beta-Carotene and betacryptoxanthin but not lutein evoke redox and immune changes in RAW264 murine macrophage. *Molecular Nutrition & Food Research*, 53(11), 1396-1405.
- KHERRAF A. (2018). Caractérisation physicochimique et évaluation du potentiel antioxydant, anti-microbien et anti-inflammatoire de la microalgue *Nannochloropsis gaditana*. Doctorat en Immunochimie alimentaire et santé. Faculté des sciences de la nature et de la vie, Université Djillali Liabes. Sidi Bel Abbes, Algérie.
- KHOTIMCHENKO S. V. (2003). Distribution of glyceroglycolipids in marine algae and grasses. *Chemistry of Natural Compounds*, 38(3), 223-229.

- KINSELLA J.E. (1986). Dietary fish oils. Possible effects of n-3 polyunsaturated fatty acids in reduction of thrombosis and heart disease. *Nutrition Today*, 7-14.
- KNUTSEN S., MYSLABODSKI D., LARSEN B. et USOV A. (1994). A modified system of nomenclature for red algal galactans. *Botanica Marina*, 37(2), 163-169.
- KOIVIKKO R. (2008). Brown algal phlorotannins improving and applying chemical methods. *Annales Universitatis Turkuensis. Turun Yliopiston Julkaisuja*. Turku. P 2.
- KOMORI A., YATSUNAMI J., OKABE S., ABE S., HARA K., SUGANUMA M., KIM S.J., FUJIKI H. (1993). Anticarcinogenic activity of green tea polyphenols. *Japanese Journal of Clinical Oncology*, 23(3), 186-190.
- KORNPROBST J.M. et POTIER P. (2005). Substances naturelles d'origine marine : chimiodiversité, pharmacodiversité, biotechnologies. *Technique and Documentation*, Lavoisier. Paris, France. 634p.
- KRISHNIKA A., BHANUPRIYA P.B. et BEENA B. NAIR. (2011). Antibacterial activity of eight marine microalgae against a few gram negative bacterial pathogens. *Journal of Pharmacy Research*, 4(9), 3024-3026.
- KTARI L., ISMAIL-BEN ALI A., BEN REDJEM Y., LANGAR H. et EL BOUR M. (2010). Antifouling activity and chemical investigation of the brown alga *Dictyota fasciola* (Dictyotales) from Tunisian coast. *Cahiers de Biologie Marine*, 51, 109-115.
- KUMAR G. et SAHOOD. (2011). Effect of seaweed liquid extract on growth and yield of *Triticum aestivum* var. Pusa Gold. *Journal of applied phycology*, 23(2), 251-255.
- KURATKO C.N. et BECKER S.A. (1998). Dietary lipids alter fatty acid composition and PGE2 production in colonic lymphocytes. *Nutrition and Cancer*, 31(1), 56-61.
- KWON M.J. et Nam T.J. (2007). A polysaccharide of the marine alga *Capsosiphon fulvescens* induces apoptosis in AGS gastric cancer cells via an IGF-IR-mediated PI3K/Akt pathway. *Cell Biology International*, 31(8), 768-775.
- KWON H.J., BAE S.Y., KIM K.H., HAN C.H., CHO S.H., NAM S.W., CHOI Y.H. et KIM B.W. (2007). Induction of apoptosis in HeLa cells by ethanolic extract of *Corallina pilulifera*. *Food Chemistry*, 104(1), 196-201.

L

- LAHAYE M. (1991). Marine algae as source of fibers : determination of soluble and insoluble dietary fibre content in some “sea-vegetables”. *Journal Sciences Food Agricol*, 54(4), 587-594.
- LAHAYE M. (1998). NMR spectroscopic characterization of oligosaccharides from two *Ulva rigida* ulvan samples (Ulvales, Chlorophyta) degraded by a lyase. *Carbohydrate Research*, 314(1-2), 1-12.
- LAHAYE M., BRUNEL M. et BONNIN E. (1997). Fine chemical structure analysis of oligosaccharides produced by an ulvanlyase degradation of the water-soluble cell-wall polysaccharides from *Ulva* sp. (Ulvales, Chlorophyta). *Carbohydrate Research*, 304(3- 4), 325-333.
- LAKHDAR F. (2018). Contribution à l'étude des potentialités antiprolifératives et antibactériennes des algues brunes et rouges de côté d'El-Jadida pour une valorisation médicale et environnementales. Doctorat en Biologie des Organismes, Université de Nantes, Nantes, France.
- LANDOLFI R., MOWER R.L. et STEINER M. (1984). Modification of platelet function and arachidonic acid metabolism by bioflavonoids. *Biochemical Pharmacology*, 33(9), 1525-1530.
- LAPLACE-TREYTURE C., PELTER M.C., LAMBERT E., ROUDRIGUEZ S., VERGON J.P. et CHAUVIN C. (2014). Guide pratique de détermination générique des algues macroscopiques d'eau douce et de quelques organismes hétérotrophes. Irstea Bordeaux, Cestas, 204 p, 13-14p.
- LECLERC V. (2010). Les secrets des algues. 1er Ed, Quae, Carnets de sciences. 172p,p13.
- LECLERC V. et FLOC'H J.Y. (2010). Les secrets des algues. 2^{ème} Ed, Quae, Carnets de sciences.168p.
- LEITAO D.P., POLIZELLO A.C., ITO I.Y. et SPADARO A.C. (2005). Antibacterial screening of anthocyanic and proanthocyanic fractions from cranberry juice. *Journal of Medicinal Food*, 8(1), 36-40.
- LI B., LU F., WEI X., et ZHAO R. (2008). Fucoidan : structure and bioactivity. *Molecules*, 13(8), 1671-1695.

- LI X.Y., KONG X.Y., SHI S.A., ZHENG X.L., GUO G., WEI Y.Q. et QIAN Z.Y. (2008). Preparation of alginate coated chitosan microparticles for vaccine delivery. *BMC Biotechnology*, 8(89).
- LU Y. OGA. (2009). Green Algae as a Platform to Express Therapeutic Proteins. *Discovery Medicine*, 8, 28-30.
- LUAN T.G., JIN J., CHAN S.M.N., WONG Y.S. et TAM N.F.Y. (2006). Biosorption and biodegradation of tributyltin (TBT) by alginate immobilized *Chlorella vulgaris* beads in several treatment cycles. *Process Biochemistry*, 41(7), 1560-1565.
- LUTGE U., KLUGE M. et BAUER G. (2002). *Botanique*, 3ème Ed, Technique et documentation, Lavoisier, 600p.

M

- MABEAU S. et FLEURENCE J. (1993). Seaweed in food products : Biochemical and nutritional aspects. *Trends in Food Science & Technology*,4(4), 103-107.
- MAKIMURA M., HIRASAWA M., KOBAYASHI K., INDO J., SAKANAKA S., TAGUCHI T. et OTAKE S. (1993). Inhibitory effect of tea catechins on collagenase activity. *Journal of Periodontology*, 64(7), 630-636.
- MANCONIA M., PENDA´S J., NURYS LEDO´ N., MOREIRA T., SINICO C., SASO L. et FADDA A.M. (2009). Phycocyanin liposomes for topical anti-inflammatory activity : *in vitro in vivo* studies. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 61(4), 423-430.
- MANCUSO S., AZZARELLO E., MUGNAI S. et BRIET X. (2006). Marine bioactive substances (IPA extract) improve foliar ion uptake and water stress tolerance in potted *Vitis vinifera* plants. *Advances in Horticultural Science*, 20(2), 156-161.
- MANIVANNAN K., KARTHIKAI DEVI G., ANANTHARAMAN P. et BALASUBRAMANIAN T. (2011). Antimicrobial potential of selected brown seaweeds from Vedalai coastal waters, Gulf of Mannar. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 1(2), 114-120.
- MAO W., ZANG X., LI Y. et ZHANG H. (2006). Sulfated polysaccharides from marine green algae *Ulva conglobata* and their anticoagulant activity. *Journal of Applied Phycology*. 18(1), 9-14.

- MAO W.J., FANG F., LI H.Y., QI X.H., SUN H.H., CHEN Y. et GUO S.D. (2008). Heparinoid-active two sulfated polysaccharides isolated from marine green algae *Monostroma nitidum*. *Carbohydrate Polymers*, 74(4), 834-839.
- MARFAING H. (2004). Les algues dans notre alimentation : Intérêt nutritionnel et utilisations. *Revue de nutrition pratique*. Dietecom Bretagne. Centre d'étude et de valorisation des algues (CEVA). 1-9.
- MAROUF A. et REYNAUD J. (2007). *La botanique de A à Z*. Dunod. Paris, France. 352p.
- MATSUBARA K., SUMI H. et HORI K. (1996). Platelet aggregation is inhibited by phycolectins. *Experientia*, 52(6), 540-543.
- MAURAY S., STERNBERG C., THEVENIAUX J., MILLET J., SINQUIN C., TAPONBRETAUDIÈRE J. et FISCHER A.M. (1995). Venous antithrombotic and anticoagulant activities of a fucoidan fraction. *Thrombosis and Haemostasis*, 74(5), 1280-1285.
- MCCLURE M. O., WHITBY D., PATIENCE C., GOODERHAM N. J., BRADSHAW A., CHEINGSONG-POPOV R., WEBER J.N., DAVIES D.S., COOK G.M.W., KEYNESS, R. J. et WEISS, R.A. (1991). Dextrin sulphate and fucoidan are potent inhibitors of HIV infection in vitro. *Antiviral Chemistry and Chemotherapy*, 2(3), 149-156.
- MENON L.G., KUTTAN R. et KUTTAN G. (1995). Inhibition of lung metastasis in mice induced by B16F10 melanoma cells by polyphenolic compounds. *Cancer Letters*, 95(1-2), 221-225.
- MICHEL G., BENARD C., LAHAYE M., FORMAGLIO D., KAEFFER B., QUEMENER B., BEROT S., YVIN J.C., BLOTTIERE H.M. et CHERBUT C. (1999). Les oligosides algaux comme aliments fonctionnels : étude *in vitro* de leurs effets cellulaires et fermentaires. *Sciences des Aliments*, 19(3-4), 311-332.
- MICHEL G., LAHAYE M., BONNET G., MABEAU S. et BARRY J.L. (1996). *In vitro* fermentation by human faecal bacteria of total and purified dietary fibres from brown seaweeds. *British Journal of Nutrition*, 75(2), 263-280.
- MIDDLETON et ELLIOTT J. (1996). Biological properties of plant flavonoids an overview. *International Journal of Pharmacologie*, 34(5), 344-348.

- MOHAMED S., HASHIM S.N. et RAHMAN H.A. (2012). Seaweeds : a sustainable functional food for complementary and alternative therapy. *Trends in Food Science & Technology*, 23(2), 83-96.
- MOREAU D., THOMAS-GUYON H., JACQUOT C., JUGE M., CULIOLI G., ORTALO-MAGNE A., PIOVETTI L. et ROUSSAKIS C. (2006a). An extract from the brown alga *Bifurcaria bifurcata* induces irreversible arrest of cell proliferation in a non-small-cell bronchopulmonary carcinoma line. *Journal of Applied Phycology*, 18(1), 87-93.
- MOREAU D., TOMASONI C., JACQUOT C., KAAS R., LE GUEDES R., CADORET J.P., MULLERFEUGA A., KONTIZA I., VAGIAS C., ROUSSIS V. et ROUSSAKIS C. (2006b). Cultivated microalgae and the carotenoid fucoxanthin from *Odontella aurita* as potent antiproliferative agents in bronchopulmonary and epithelial cell lines. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 22(1), 97-103.
- MOURAO P.A.S. et PEREIRA M.S. (1999). Searching for alternatives to heparin - Sulfated fucans from marine invertebrates. *Trends in Cardiovascular Medicine*, 9(8), 225-232.
- MULLER-FEUGA A., MOAL J.E. et KAAS R. (2003). The Microalgae of Aquaculture. In: STØTTRUP J.G. et MCEVOY L.A. (2003). *Live Feeds in Marine Aquaculture*, 1st Ed. Blackwell Science Ltd, Oxford, United Kingdom. 206-253.
- MUÑOZ R., TERESA ALVAREZ M., MUÑOZ A., TERRAZAS E., GUIEYSSE B. et MATTIASSON B. (2006). Sequential removal of heavy metals ions and organic pollutants using an algal-bacterial consortium. *Chemosphere*, 63(6), 903-911.

N

- NAEGELE E. et NAEGELE A. (1967). *Les algues*. Presses universitaire de France. Paris, 126p.
- NAKAMURA H., KOBAYASHI J. et HIRATA Y. (1982). Separation of mycosporine-like amino acids in marine organisms using reversed-phase high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, 250, 113-118.
- NAMGOONG S.Y., SON K.H., CHANG H.W., KANG S.S., et KIM H.P. (1994). Effects of naturally occurring flavonoids on mutagen-induced lymphocyte proliferation and mixed lymphocyte culture. *Life Science*, 54 (5), 313-320.

- NASERI A., HOLDT S.L. et JACOBSEN C. (2016). Bioactive compounds in industrial red seaweed used in carrageenan production. In 22nd International Seaweed Symposium. Copenhagen, Denmark. 1p.
- NOZIAH M.H. et CHING C.H.Y. (2000). Nutritional composition of edible seaweed. *Gracilaria changgi*. Food Chemistry, 68, 69-76.

O

- OLGUIN E.J. (2003). Phycoremediation : Key issues for cost-effective nutrient removal processes. *Biotechnology Advances*, 22(1-2), 81-91.
- OMATA M., MATSUI N., INOMATA N. et OHNO T. (1997). Protective effects of polysaccharide fucoidin on myocardial ischemia-reperfusion injury in rats. *Journal of Cardiovascular Pharmacology*, 50(6), 717-724.
- ORTIZ J., ROMERO N., ROBERT P., ARAYA J., LOPEZ-HERNANDEZ J., BOZZO C., NAVARRETE E., OSORIO A. et RIOS A. (2006). Dietary fiber, aminoacid, fatty acid and tocopherol contents of the edible seaweeds *Ulva lactuca* and *Durvillaea Antarctica*. *Food Chemistry*, 99, 98-104.
- OZENDA P. (1990). Les organismes végétaux : Végétaux inférieurs. 1ère Ed, Masson. Paris, France., 219p.
- OZENDA P. (2000). Les végétaux : organisation et diversité biologique. Dunod. Paris, France. 516p, 65-69p.
- OZENDAP. (2007). Les végétaux : organisation et diversité biologique. 2^{ème} Ed, Dunod. Paris, France. 528p, 296-327p.

P

- PARISH C.R., COOMBE D.R., JAKOBSEN K.B., BENNETT F.A. et UNDERWOOD P.A. (1987). Evidence that sulfated polysaccharides inhibit tumor metastasis by blocking tumor-cell-derived heparanases. *International Journal of Cancer*, 40(4), 511-518.
- PASQUET V. (2011). Recherche bioguidée de molécules anticancéreuses issues de microalgues marines. Doctorat en Biochimie. Université de La Rochelle, France. 226p.
- PEC M.K., AGUIRRE A., MOSER-THIER K., FERNANDEZ J.J., SOUTO M.L., DORTA J., DIAZGONZALEZ F. et VILLAR J. (2003). Induction of apoptosis in

- estrogen dependent and independent breast cancer cells by the marine terpenoid dehydrothysiferol. *Biochemical Pharmacology*, 65(9), 1451-1461.
- PENGZHAN Y. (2003). Antihyperlipidemic effects of different molecular weight sulfated polysaccharides from *Ulva pertusa* (Chlorophyta). *Pharmacol Reserch*, 48(6), 543-549.
- PERALES-VELA H.V., PEÑA-CASTRO J.M. et CAÑIZARES-VILLANUEVA R.O. (2006). Heavy metal detoxification in eukaryotic microalgae. *Chemosphere*, 64(1), 1-10.
- PEREZ R. (1997). Ces algues qui nous entourent: conception actuelle, rôle dans la biosphère, utilisations, culture. *Infremer*, 272.
- PERSON J. (2010). Livre turquoise : algues, filière du future. Adebitech. Romainville, France, 163p.
- PONCE N.M.A., PUJOL C.A., DAMONTE E.B., FLORES M.L. et STORTZ C.A. (2003). Fucoïdins from the brown seaweed *Adenocystis utricularis* : extraction methods, antiviral activity and structural studies. *Carbohydrate Research*, 338(8), 153-165.
- POPPLEWELL W.L. et NORTHCOT P.T. (2009). Colensolide A : a new nitrogenous bromophenol from the New Zealand marine red alga *Osmundaria colensoi*. *Tetrahedron Letters*, 50(49), 6814-6817.
- PRAJAPATI V. D., MAHERIYA P. M., JANI G. K. et SOLANKI H. K. (2014). Carrageenan : A natural seaweed polysaccharide and its applications. *Carbohydrate Polymers*, 105, 97-112.
- PRATT R., DANIELS T.C., EILER J.B., GUNNISON J.B., KUMLER W.D., ONETO J.F., STRAIT L. A., SPOEHR H.A., HARDIN G.J., MILNER H.W., SMITH J.H. et STRAIN H.H. (1944). Chlorellin, and antibacterial substance from *Chlorella*. *Science*, 99, 351-352.
- PULZ O. et GROSS W. (2004). Valuable products from biotechnology of microalgae. Mini review, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 65(6), 635-648.

Q et R

- QUEVA R. (2011). Les algues, Marabout. Paris, France. 160p.
- QUILLIAM M.A. et WRIGHT J.L.C. (1989). Le mystère de l'intoxication amnésique par les crustacés. *Chimie analytique*, 61 (18), 1053A-1060A.
- RAMARAJ R., UNPAPROM Y., DUSSADEE N. (2016). Cultivation of Green Microalga, *Chlorella vulgaris* for Biogas Purification. *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*, 2(3), 117-122.
- RAMDANI M. et ELKHIATI N. (1998). Flore et Faune marines du Maroc. Biodiversité, Biologie, Ecologie, Biogéographie, Royaume du Maroc (Rabat), EXPO' 98 Marrocos, OKAD. Lisboa, Portugal. 68p.
- RAVEN P.H., EICHHORN S.E. et EVRARD C.M. (2007). *Biologie végétale*, 2ème Ed. De Boeck, 725p.
- RAVEN P.H., EVERT R.F. et EICHHORN S.E. (2003). *Biologie végétale*, 1re édition, De Boeck Supérieur, 968p.
- RAVEN P.H., JOHNSON G.B., MASON K., SINGER S.R. et LOSOS J.B. (2011). *Biologie*, 2ème Ed. De Boeck, 1406p.
- RECHTER S., KÖNIG T., AUEROCHS S., THULKE S., WALTER H., DÖRNENBURG H., WALTER C. et MARSCHALL M., (2006). Antiviral activity of *Arthrospira*-derived spirulan-like substances. *Antiviral Research*, 72(3), 197-206.
- REICHEL T. et BOROWITZKA M.A. (1984). Antimicrobial activity from marine algae: Result of a large screening programme. *Hydrobiologia*, 1(116-117), 158-168.
- RIOUX L.A. (2010). Caractérisation structurale et évaluation de l'activité biologique de polysaccharides extraits de *saccharina longicruris*. Doctorat en Sciences et Technologie des Aliments, Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Université Laval Québec. 4-41p, 246p.
- ROLAND J.C. et VIAN B. (1999). *Atlas de biologie végétal : organisation des plantes sans fleurs*. 5ème Ed, Dunod, Paris, France. 143p.
- ROMAY C., ARMESTO J., REMIREZ D., GONZALEZ R., LEDON N. et GARCIA I. (1998). Antioxidant and anti-inflammatory properties of C-phycocyanin from blue-green algae. *Inflammation Research*, 47(1), 36-41.

- RORRER G.L. et CHENEY D.P. (2004). Bioprocess engineering of cell and tissue cultures for marine seaweeds. *Aquacultural Engineering*, 32(1), 121-41.
- RUIZ G. (2005). Extraction détermination structurale et valorisation chimique des phycocolloïdes d'algues rouge. Doctorat en Chimie appliquée - Chimie des Substances, Université de Limoges, France. 229p.

S

- SAHA A., KUZUHARA T., ECHIGO N., SUGANUMA M. et FUJIKI H. (2010). New role of epicatechin in enhancing the induction of growth inhibition and apoptosis in human lung cancer cells by curcumin. *Cancer Prevention Research (Philadilphia, Pa.)*, 3(8), 953-962.
- SAITO K., NISHIJIMA M., OHNO N., YADOMAE T. et MIYAZAKI T. (1992). Structure and antitumor activity of the less-branched derivatives of an alkali-soluble glucan isolated from *Omphalia lapidescens*. (Studies on fungal polysaccharide. XXXVIII). *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 40(1), 261-263.
- SANCHEZ-MACHADO D.I., LOPEZ-CERVANTES J., LÓPEZ-HERNANDEZ J. et PASEIRO-LOSADA P. (2004). Fatty acids, total lipid, protein and ash contents of processed edible seaweeds. *Food Chemistry*, 85(3), 439-444.
- SANTOYO S., RODRI´GUEZ-MEIZOSO I., CIFUENTES A., JAIME L., GARCÍA-BLAIRSY REINA G., SEN´ORANS F.J. et IBA´ÑEZ E. (2009). Green processes based on the extraction with pressurized fluids to obtain potent antimicrobials from *Haematococcus pluvialis* microalgae. *Food Science and Technology*, 42(7), 1213-1218.
- SAZUKA M., MURAKAMI S., ISEMURA M., SATOH K. et NUKIWA T. (1995). Inhibitory effects of green tea infusion on *in vitro* invasion and *in vivo* metastasis of mouse lung carcinoma cells. *Cancer Letters*, 98(1), 27-31.
- SCHOEFS B. (2002). Chlorophyll and carotenoid analysis in food products. Properties of the pigments and methods of analysis. *Trends in Food Science & Technology*, 13(11), 361-371.

- SEKAR S. et CHETRAMOHAN M. (2008). Phycobiliproteins as a commodity : trends in applied research, patents and commercialization. *Journal of Applied Phycology*, 20(2), 113-136.
- SEN A.K.S.R., DAS A.K., BANERJI N., SIDDHANTA A.K., MODY K.H., RAMAVAT B.K., CHAUHAN V.D., VEDASIROMONI J.R. et GANGULY D.K. (1994). A new sulfated polysaccharide with potent blood anti-coagulant activity from the red seaweed *Grateloupia indica*. *International Journal of nBiological Macromolecules*, 16(5), 279-280.
- SENTHILKUMAR N., KURINJIMALAR C., THANGAM R., SURESH V., KAVITHA G., GUNASEKARAN P. et RENGASAMY R. (2013). Further studies and biological activities of macromolecular protein R-Phycoerythrin from *Portieria hornemannii*. *International journal of biological macromolecules*, 62, 107-116.
- SHALABY E.A. (2011). Algae as promising organisms for environment and health. *Plant Signal Behavior*, 6(9), 1338-1350.
- SHANAB S.M.M., MOSTAFA S.S.M., SHALABY E.A. et MAHMOUD G.I. (2012). Aqueous extracts of microalgae exhibit antioxidant and anticancer activities. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2(8), 608-615.
- SHANMUGAM M., MODY K.H., RAMAVAT B.K., MURTHY A.S.K. et SIDDHANTA A.K. (2002). Screening of *Codiacean* algae (Chlorophyta) of the Indian coasts for blood anticoagulant activity. *Indian Journal of Marine Science*, 31, 33-38.
- SHARMA H.S., FLEMING C., SELBY C., RAO, J.R. et MARTIN T. (2014). Plant biostimulants : a review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses. *Journal of applied phycology*, 26(1), 465-490.
- SHEU J.H., WANG G.H., SUNG P.J. et DUH C.Y. (1999). New cytotoxic oxygenated fucosterols from the brown alga *Turbinaria conoides*. *Journal of Natural Products*, 62(2), 224-227.
- SHI D., LI J., GUO S. et HAN L. (2008). Antithrombotic effect of bromophenol, the alga-derived thrombin inhibitor. *Journal of Biotechnology*, 136, 579.
- SHI D., LI J., GUO S., SU H. et FAN X. (2009). The antitumor effect of bromophenol derivatives *in vitro* and *Leathesia nana* extract *in vivo*. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27(9), 277-282.

- SHIMAOKA M., IKEDA M., IIDA T., TAENAKA N., YOSHIYA I. et HONDA T. (1996). Fucoidin, a potent inhibitor of leukocyte rolling, prevents neutrophil influx into phorbol-ester-induced inflammatory sites in rabbits lungs. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 153(1), 307-311.
- SILVA D.D., RAPIOR S., HYDE K.D. et BAHKALI A.H. (2012). Medicinal mushrooms in prevention and control of diabetes mellitus. *Fungal Divers*, 56(1), 1-29.
- SINGH S.P., KUMARI S., RASTOGI R.P., SINGH K.L. et SINHA R.P. (2008). Mycosporine-like amino acids (MAAs): chemical structure, biosynthesis and significance as UV-absorbing/screening compounds. *Indian Journal of Experimental Biology*, 46(1), 7-17.
- SINNIGER V., TAPONBRETAUDIÈRE J., MILLIEN C., MULLER D., JOZEFONVICZ J. et FISCHER A.M. (1993). Affinity-chromatography of sulfated polysaccharides separately fractionated on antithrombin-III and heparin Cofactor-II immobilized on concanavalin-a-sepharose. *Journal of Chromatography-Biomedical Applications*, 615(2), 215-223.
- SIVAKUMARAN S., MOLAN A.L., MEAGHER L.P. et KOLB B. (2004). Variation in antimicrobial action of pranthocyanidins from *Dorycrium rectum* against rumen bacteria. *Phytochemistry*, 65(17), 2485-2497.
- SMIT A.J. (2004). Medicinal and pharmaceutical uses of seaweed natural products. *Journal of Applied Phycology*, 16(4), 245-262.
- SPOLAORE P., JOANNIS-CASSAN C., DURAN E. et ISAMBERT A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87-96.

T

- TEIXEIRA M.M. et HELLEWELL P.G. (1997). The effect of the selectin binding polysaccharide fucoidin on eosinophil recruitment. *British Journal of Pharmacology*, 120(6), 1059-1066.
- TREMOLIERES A. et SIEGENTHALER P.A. (1998). Role of acyl lipids in the function of photosynthetic membranes in higher plants, p145-173. In: SIEGENTHALER P.A. et MURATA N. *Lipids in Photosynthesis: Structure, Function and Genetics*. 1st Ed, Springer. Kluwer, Dordrecht. 334p.

- TRIGUI M., GASMIL., ZOUARI I. et TOUNSI S. (2013). Seasonal variation in phenolic composition, antibacterial and antioxidant activities of *Ulva rigida* (Chlorophyta) and assessment of antiacetylcholinesterase potential. *Journal of Applied Phycology*, 25(1), 319-328.
- TUOMANEN E.I., SAUKKONEN K., SANDE S., CIOFFE C. et WRIGHT S.D. (1989). Reduction of inflammation, tissue-damage, and mortality in bacterial meningitis in rabbits treated with monoclonal antibodies against adhesion-promoting receptors of leukocytes. *Journal of Experimental Medicine*, 170(3), 959-968.

U, V et W

- ULANOWSKA K., TRACZYK A., KONOPA G. et WEGRZYM G. (2006). Differential antibacterial activity of genistein arising from global inhibition of DND, RNA and protein synthesis in some bacterial strains. *Archives of Microbiology*, 184 (5), 271-278.
- VENKATESWARAN P.S., MILLMAN I. et BLUMBERG B.S. (1989). Interaction of fucoidan from *Pelvetia fastigiata* with surface-antigens of hepatitis-B and Woodchuck hepatitis viruses. *Planta Medica*, 3, 265-270.
- WANG H.M., PAN J.L., CHEN C.Y., CHIU C.C., YANG M.H., CHANG H.W. et CHANG J.S. (2010). Identification of anti-lung cancer extract from *Chlorella vulgaris* C-C by antioxidant property using supercritical carbon dioxide extraction. *Process Biochemistry*, 45(12), 1865-1872.
- WECHSLER J., HUTT V., KLÖR H. et DITSCHUNEIT H. (1980). Lipids and lipoproteins in hyperlipidemia type IIa during treatment with different lipid lowering drugs. *Artery*, 8(6), 519-529.
- WEI W., SHI-XIN W. et HUA-SHI G. (2012). The Antiviral Activities and Mechanisms of Marine Polysaccharides: An Overview. *Marine Drugs*. 10(12), 2795–2816.
- WIEMER D.F., IDLER D.D. et FENICAL W. (1991). Vidalols A and B, new anti-inflammatory bromophenols from the Caribbean marine red alga *Vidalia obtusiloba*. *Experientia*, 47(8), 851-853.

- WONG K.H. et CHEUNG P.C.K. (2000). Nutritional evaluation of some subtropical red and green seaweeds Part I proximate composition, amino acid profiles and some physico-chemical properties. *Food Chemistry*, 71(4), 475-482.

Y

- YAMADA T., OGAMO A., SAITO T., UCHIYAMA H. et NAKAGAWA Y. (2000). Preparation of O-acylated low-molecular-weight carrageenans with potent anti- HIV activity and low anticoagulant effect. *Carbohydrate Polymers*, 41(2), 115-120.
- YAN X., CHEN D., XU J. et ZHOU C. (2011). Profiles of photosynthetic glycerolipids in three strains of *Skeletonema* determined by UPLC-Q-TOF-MS. *Journal of Applied Phycology*, 23(2), 271-282.
- YAN X., CHUDA Y., SUZUKI M. *et al.* (1999). Fucoxanthin as the major antioxidant in *Hijikia fusiformis*, A common edible seaweed. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 63(3), 605-607.
- YAN X., NAGATA T. et FAN X. (1998). Antioxidative activities in some common seaweeds. *Plant Foods for Human Nutrition*, 52, 253-262.
- YANG C.S., YANG G.Y., LANDAU J.M., KIM S. et LIAO J. (1998). Tea and tea polyphénols inhibit cell hyperproliferation, lung tumorigenesis, and tumor progression. *Experimental Lung Research*, 24(4), 629-639.
- YANG E.J., MOON J.Y., KIM M.J., KIM D.S., LEE W.J., LEE N.O. et HYUN C.G. (2010). Anti-inflammatory Effect of *Petalonia binghamiae* in LPS Induced Macrophages is Mediated by Suppression of iNOS and COX-2. *International Journal of Agriculture & Biology*, 12(5), 754-758.
- YILDIZ G., TAS S., VATANA O. et DERE S. (2012). Determination of the Anti-Oxidative Capacity and Bioactive Compounds in Green Seaweed *Ulvarigida C.* Agardh. *International Journal of Food Properties*, 15(6), 1182-1189.
- YOON S.J., PYUN Y.R., HWANG J.K. et MOURÃO P.A.S. (2007). A sulfated fucan from the brown alga *Laminaria cichorioides* has mainly heparin cofactor II-dependent anticoagulant activity. *Carbohydrate Research*, 342(15), 2326-2330.
- YOU S.G., YANG C. et LEE B.Y. (2010). Molecular characteristics of partially hydrolyzed Fucoïdanes from sporophyll of *Undaria pinnatifida* and their *in vitro* anticancer activity. *Food Chemistry*, 119(2), 554-559.

- YUAN Y.V. et WALSH N.A. (2006). Antioxidant and antiproliferative activities of extracts from a variety of edible seaweeds. *Food and Chemical Toxicology*, 44(7), 1144-1150.
- YUAN Z.P., CHEN L.J., FAN L.Y., TANG M.H., YANG G.L., YANG H.S., DU X.B., WANG G.Q., YAO W.X., ZHAO Q.M., YE B., WANG R., DIAO P., ZHANG W., WU H.B., ZHAO X. et WEI Y.Q. (2006). Liposomal quercetin efficiently suppresses growth of solid tumors in murine models. *Clinical Cancer Research*, 12(10), 3193-3199.

Z

- ZHANG CY., WU W.H., WANG J. et LAN M.B. (2012). Antioxidant Properties of Polysaccharide from the Brown Seaweed *Sargassum graminifolium* (Turn.), and Its Effects on Calcium Oxalate Crystallization. *Marine Drugs*, 10(1), 119-130.
- ZHANG X. et ERVIN E.H. (2004). Cytokinin-containing seaweed and humic acid extracts associated with creeping bentgrass leaf cytokinins and drought resistance. *Crop science*, 44(5), 1737-1745.
- ZHANG X. et ERVIN E.H. (2008). Impact of seaweed extract-based cytokinins and zeatin riboside on creeping bentgrass heat tolerance. *Crop Science*, 48(1), 364-370.
- ZUBIA M., FABRE M.S., KERJEAN V., LANN K.L., STIGER-POUVREAU V., FAUCHON M. et DESLANDES E. (2009). Antioxidant and antitumoural activities of some Phaeophyta from Brittany coasts. *Food Chemistry*, 116(3), 693-701.

Web-graphie :

- ANONYME 01.
<https://www.aquaportail.com/genre-ulva-526.html>. Consulté le 04/01/2021.
- ANONYME 02.
<https://radar.avrotros.nl/nieuws/item/zeewier-kan-dierlijke-eiwitten- vervangen>.
Consulté le 20/11/2020.
- ANONYME03.
http://algaebase.org/search/species/detail/?tc=accept&species_id=Bb233145a1f4da84_2&-session=abv4:3E4C071113e0903A06Ur236A15E5. Consulté le 29/11/2020.
- ANONYME04
[.https://utex.org/products/utex-lb_1644?variant=30992105799770](https://utex.org/products/utex-lb_1644?variant=30992105799770). Consulté le 04/01/2021.
- DAPHNE L. (2011). Des biocarburants à partir de microalgues. Actualité Matériaux, Biotechnology & chimie. <https://www.techniquesingenieur.fr/actualite/articles/des-biocarburants-a-partir-de-microalgues-comment-ca-marche-6391/>. Consulté le 01/07/2020.
- DE REVIERS B. (2016). Algues, Encyclopaedia Universalis. <http://www.universalis.fr/encyclopedie/algues>. Consulté le 12/05/2020.
- DEMOULAIN G. et LEYMERGIE C. (2009). Les algues, le trésor de la mer. Filière Nutrition et diététique, Haute école de santé Genève. <https://www.yumpu.com/fr/document/read/14503814/les-algues-le-tresor-de-la-mer>. Consulté le 24/05/2020.
- FOGDENM. et FOGDEN P. (2014). Existe-il des animaux à poils verts ou bleus?.<https://www.science-et-vie.com/archives/existe-il-des-animaux-a-poils-verts-ou-bleus-13206>. Consulté le 30/07/2020.
- FURELAUD G. et PAVIE B. (2012). Le virus du sida. <file:///C:/Users/AZUL/Desktop/Le%20virus%20du%20sida%20%20%20Planet-Vie.htm>. Consulté le 30/07/2020.
- GUIRY M.D. et GUIRY G.M. (1996). Algae Base. <https://www.algaebase.org/about/>. Consulté le 04/09/2020.

- MAUGUIT Q. (2012). Une algue déguste la cellulose de ses congénères pour survivre!. <file:///C:/Users/AZUL/Desktop/Une%20algue%20d%C3%A9guste%20la%20cellulose%20de%20ses%20cong%C3%A9n%C3%A8res%20pour%20survivre%20!>. Consulté le 25/09/2020.

Résumé

Avec l'avancée de la science et de la technologie, les algues sont utilisées dans de nombreux domaines industriels en raison de leur forte abondance et leurs diverses propriétés. Elles sont utilisées dans l'alimentation humaine et animale, l'agriculture (fertilisants), la pharmacologie (enrobage des médicaments), la cosmétologie (savon, crème, etc.), en biotechnologie et dans les domaines de l'énergie et de l'environnement.

Ce travail est axé sur les activités biologiques des algues sur lesquelles de nombreuses études ont mis l'accent. En effet, le potentiel pharmacologique et thérapeutique de certaines substances bioactives présentes dans de nombreuses algues est extrêmement prometteur, notamment en tant qu'agents antiviraux ; c'est le cas des polysaccharides sulfatés (fucoidanes, etc.), capables de lutter contre le VIH et d'autres agents pathogènes.

La plupart des extraits d'algues sont riches en polymères. Certains polymères algaux (flavonoïdes, tanins, etc.) présentent une activité antibactérienne envers certaines bactéries pathogènes, d'autres (carraghénanes et fucanes) ont une activité anticoagulante significative.

Certains composés (caroténoïdes, bromophénols, acides gras polyinsaturés, etc.), issus de macroalgues ou de microalgues, sont connus pour leurs effets anti-inflammatoires et leur capacité à réguler la réponse immunitaire.

Les algues ont attiré beaucoup d'attention en raison de leur potentiel anticancéreux et antioxydant. Les polyphénols, les polysaccharides sulfatés et certains pigments phycobiliprotéiques (phycocyanine) contribuent à protéger des biomolécules (ADN, lipides et protéines) contre les ROS formés dans des conditions de stress.

Des propriétés gastroprotectives des ulvanes (présents uniquement chez les algues vertes) et des alginates (algues brunes) et d'autres activités préventives anti-obésité, anti-athérosclérose, anti-hypercholestérolémie et anti-hyperglycémiantes ont été également prouvés.

Les molécules algales sont encore largement inexploitées, c'est précisément sur ce point que de nombreux travaux de recherche continuent d'être menés.

Mots clés : algues, cyanobactérie, molécules bioactives, pigments phycobiliprotéiques, polyphénols, ulvanes.

Abstract

With the advancement of science and technology, algae are used in many industrial fields because of their high abundance and diverse properties. They are used in human and animal food, agriculture (fertilizers), pharmacology (coating of drugs), cosmetology (soap, cream, etc.), biotechnology, and in the fields of energy and the environment.

This work focuses on the biological activities of algae that many studies have focused on. Indeed, the pharmacological and therapeutic potential of certain bioactive substances present in many algae is extremely promising, especially as antiviral agents; this is the case of sulfated polysaccharides (fucoidans, etc.), able to fight against HIV and other pathogens.

Most algae extracts are rich in polymers. Some algal polymers (flavonoids, tannins, etc.) have antibacterial activity against certain pathogenic bacteria, others (carrageenans and fucans) have significant anticoagulant activity.

Some compounds (carotenoids, bromophenols, polyunsaturated fatty acids, etc.), derived from macroalgae or microalgae, are known for their anti-inflammatory effects and their ability to regulate the immune response.

The algae attracted much attention because of their anti-cancer and antioxidant potential. The polyphenols, polysaccharides sulfated and certain pigments phycobiliproteic (phycocyanine) contribute to protecting the biomolecules (DNA, lipids, and proteins) against the ROS formed under stress conditions.

Gastroprotective properties of ulvans (present only in green algae) and alginates (brown algae) and other anti-obesity, anti-atherosclerosis, anti-hypercholesterolemia, and anti-hyperglycemic preventive activities have also been proven.

Algal molecules still largely unexploited, it is precisely on this point that many research tasks continue to be undertaken.

Keywords : algae, bioactive molecules, cyanobacteria, phycobiliproteic pigments, polyphenols, ulvans.