

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou (UMMTO).



Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Département Biochimie et de Microbiologie

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Science Biologique

Option : Biochimie Appliquée

Mémoire de fin d'Etudes

Thème

**Synthèse sur les activités biologiques
des polysaccharides des algues marines**

Réalisés par :

Melle. OUDIAI Milila

Melle. RADI Cylia

Devant le jury composé de :

Président : Mr. MOUALEK Idir _____ MCB à l'UMMTO

Promoteur: Mr. HOUALI Karim _____ Professeur à l'UMMTO

Co-promoteur : Mlle. OUSMER Lila _____ Doctorante à l'université de Bouira

Examineur : Mr. SEBBANE Hillal _____ MAA à l'UMMTO

2019/2020

Remerciements

Avant tout, on remercie, Dieu tout puissant de nous avoir donné la santé, le courage, la volonté et la patience pour la réalisation et l'élaboration de notre projet de fin de cycle.

Nous tenons à remercier profondément notre encadreur **Mr. HOUALI KARIM Professeur à l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou**, qui malgré ses nombreuses activités nous a toujours réservé un accueil chaleureux, en nous donnant l'avantage de bénéficier de son esprit élevé de sagesse et de compréhension, de ces conseils et son encouragement. Nous sommes honoré d'avoir été ces étudiantes, c'est un vrai modèle de générosité et de modestie, un grand homme de valeurs inestimables.

Nous remercions s'adressent également à notre co-encadreur **Mlle. OUSMER LILA, doctorante en microbiologie appliquée**, pour avoir encadrer et diriger ce travail avec une grande rigueur scientifique, sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements, ses corrections sérieuses et la confiance qui nous ont permet de mener à bien ce mémoire.

Nous tenons à remercier tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, de lire ce manuscrit et d'évaluer ce modeste travail : le président de jury **Mr. MOUALEK IDIR, Maître de Conférence Classe B à l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou**, l'examineur **Mr. SEBBANE HILLAL, Maître Assistant Classe A à l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou**.

Nous exprimons nos vifs remerciements à tous nos enseignants de la faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques et particulièrement nos enseignants de spécialité, Biochimie Appliquée.

Nous remercions vont également à tout le personnel du laboratoire de Biochimie et Microbiologie (LABAB) pour leur accueil et précieux conseils.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicace

J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail :

À ceux qui donnent sans recevoir, se brûlent pour que leur fille voie la lumière du savoir, à ceux qui ont été toujours la source d'inspiration et de courage, à ceux qui tous les mots du monde ne suffisent pas pour leur montrer mon amour ; à mes très chers parents, les prunelles de mes yeux.

À mes chers frères : AZIZ, MOHAMED, AMAR et SAID.

À ma chère sœur : SAMIA ainsi que son marié : SAMIR et ses enfants : ISLAM et YASMINE.

À ma chère sœur : SAFIA ainsi que son marié : HAKIM et ses filles : CERINE et IMANE.

À ma grande mère qui a tant sacrifiée pour mon bien être.

À mes tantes et mes oncles.

À mes cousins et mes cousines.

À tout mes amies que j'ai connus dans ma vie, à leur tête : MELISSA, SARAH et bien sûr ma binôme CYLIA.

À tous ceux qui me sont chers.



OU DIAI MILILA



Dédicace

J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail :

A ceux que j'ai tant aimé avec beaucoup d'affection et je suis très fière de les avoir et tout les mots du monde ne peuvent exprimer l'amour et le respect que je leur porte : mes très chers parents.

A mes demi frères et sœur et leurs enfants que j'aime beaucoup : Lina, Fateh, Wassim, Ibtissam et Nesrine.

A mes chers oncles et tantes et leurs enfants.

A Hocine, ma source d'espoir et de bonheur, que dieu te protège.

A mes chères amies : Sarah, Sihem, Soraya, thileli et biensur ma binome Milila.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

A toute la famille RADI et TERBOUCHE.

A toute la section Biochimie Appliquée M2 (2019/2020)

A tous ceux qui aime la Science.



RADI CYLIA

Liste des tableaux

Tableau I : Structures de quelques caroténoïdes.....	7
Tableau II : Principaux substituants rencontrés chez les algues.....	12
Tableau III : Les différents polysaccharides de réserve selon les grands groupes de macroalgues.....	13
Tableau IV : Motifs disaccharidique de répétition des carraghénanes	24
Tableau V : Comparaison de la composition en acides aminés des protéines de l'algue rouge <i>Porphyra tenera</i> avec celle de l'ovalbumine	28
Tableau VI : La composition minérale de certaines algues comestibles (mg / 100 de matière sèche.....	29
Tableau VII : Structures chimiques des polyphénols	30
Tableau VIII : Principaux additifs dérivés des algues utilisés par l'industrie alimentaire.....	31

Liste des figures

Figure 01 : La zonation des algues.....	2
Figure 02 : Quelques exemples de microalgues : <i>Haematococcus</i> , <i>Staurastrum</i> et <i>Spiruline</i> ..	3
Figure 03 : Quelques images de macroalgues.....	4
Figure 04 : Morphologie comparée entre une algue et une plante	4
Figure 05 : Reproduction d'une algue verte (<i>Ulva lactuca</i>)	5
Figure 06 : Formule chimique de la chlorophylle.....	6
Figure 07 : Structure moléculaire de phycoérythrine.....	8
Figure 08 : a : <i>Palmophyllum crassum</i> , b : <i>Codium tomentosum</i>	9
Figure 09 : a : <i>Cystoseira baccata</i> , b : <i>Desmarestia ligulata</i>	9
Figure 10 : a : <i>Asparagopsis armata</i> , b : <i>Peyssonnelia cf. squamaria</i>	10
Figure 11 : Différents types de liaisons rencontrées chez les polysaccharides.....	11
Figure 12 : Oses constitutifs des polysaccharides d'algues	12
Figure 13 : Structure chimique des laminarines.....	14
Figure 14 : Structure chimique de l'amidon floridéen	14
Figure 15 : Structure chimique de glucane	15
Figure 16 : Structure chimique de floridoside, L-isofloridoside et D-isofloridoside.....	15
Figure 17 : Structure schématique de la paroi cellulaire d'une macroalgue brune de l'ordre des Fucales (A), d'une macroalgue rouge de l'ordre des Gigartinales (B) et d'une macroalgue verte de l'ordre des Ulvales (C)	16
Figure 18 : Structure chimique des microfibrilles de cellulose.....	17
Figure 19 : Structure chimique des xylanes mixtes	18
Figure 20 : Structure chimique de mannanes	18
Figure 21 : Structure chimique de glucuronoxylorhamnanes sulfaté.....	19
Figure 22 : Structure des chaînes de fucose α -(1,2) des fucanes	20
Figure 23 : Structure chimique de l'acide alginique	21
Figure 24 : Les différentes structures possibles des alginates.....	21
Figure 25 : Motifs osidiques de base des agarocolloïdes (1) et les carraghénanes (2)	22
Figure 26 : Structure chimique d'agarobiose ou du néogarobiose.....	23
Figure 27 : Structure chimique des funoranes.....	23

Figure 28 : Structure chimique des unités osidiques des porphyranes.....	24
Figure 29 : Structure des carraghénanes de la famille des Kappa.....	25
Figure 30 : Structure des carraghénanes de la famille des Lambda	25
Figure 31 : Structure des carraghénanes de la famille des Béta.....	26
Figure 32 : Structure des carraghénanes de la famille des Oméga	26
Figure 33 : Structure chimique de Phlorotannins.....	30
Figure 35 : Le coalgan® compresses hémostatiques constituées de fibres d'alginate de calcium issu d'algues marines.....	33
Figure 36 : Mécanisme d'inhibition de l'attachement virale en présence des carraghénanes (a) et des fucanes (b)	34
Figure 37 : Effet d'un polysaccharide sulfaté d' <i>E. cava</i> sur les cellules U-937 (A : absence, B : présence de polysaccharide)	36
Figure 38 : La microphotographie démontrant l'influence de fucane sur la croissance des cellules HepG2 (A : en absence, B : en présence de fucane)	36
Figure 39 : Activation des cellules épithéliales intestinales par les polysaccharides	37

Liste des abréviations

APC : Les allophycocyanines

ECSP : polysaccharide sulfaté d'*Ecklonia cava*

FAO : Food and agriculture organisation

GAGs : Les glycosaminoglycanes

HSV : Virus de l'herpe simplex

PC : Les phycocyanines

PE : Les phycoérythrines

VIH : Virus de l'immunodéficience humaine

Table des matières

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	v
Liste des abréviations.....	vii

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction	1
I. Généralités sur les algues marines et leurs biodiversités	
I.1. Définition des algues marines	2
I.2. Habitat et écologie des algues.....	2
I.3. Les deux grands groupes d'algues	3
I.4. Reproduction des algues	5
I.5. Classification des macroalgues	5
I.5.1. Les différents pigments des algues marines.....	6
A. Les chlorophylles	6
B. Les caroténoïdes	7
C. Les phycobiliprotéines.....	8
I.5.2. Classification des algues marines selon la pigmentation	8
1. Les algues vertes (Chlorophycées)	8
2. Les algues brunes (Phéophycées)	9
3. Les algues rouges (Rhodophycées)	9
II. Les polysaccharides des algues marines	
II.1. Généralités sur les polysaccharides	11
II.1.1. Définition des polysaccharides	11

II.1.2. Classification des polysaccharides	13
A. Les homopolysaccharides.....	13
B. Les hétéropolysaccharides	13
II.2. Les différents types de polysaccharides des algues	13
II.2.1. Les polysaccharides de réserve.....	13
II.2.2. Les polysaccharides de faible poids moléculaire	15
II.2.3. Les polysaccharides de structure (pariétaux)	16
1. La paroi des algues	16
2. Les polysaccharides squelettiques, ou fibrillaires	17
3. Les polysaccharides matriciels des algues	18
A. Les polysaccharides des algues vertes.....	19
B. Les polysaccharides des algues brunes.....	20
C. Les polysaccharides des algues rouges.....	21

III. Application des algues marines

III.1. domaine de la nutrition.....	27
III.1.1. Alimentation humaine	27
1. Métabolites primaires	27
A. Les protéines et acides aminés	27
B. Les fibres	28
C. Les minéraux	28
D. Les lipides.....	29
2. Métabolites secondaires	29
A. Les polyphénols.....	29
B. Les vitamines	31
III.1.2. Alimentation animale	31
III.2. Applications agroalimentaire	31
III.3. Applications en agriculture	32

III.4. Applications pharmaceutique	32
III.5. Applications médicale	33
1. Activité antimicrobienne	33
2. Activité antivirale	33
3. Activité anticoagulante	34
4. Activité antioxydante	35
5. Activité antiproliférative et anticancéreuse	35
6. Activité Immunomodulatrice	36
III.6. Applications en cosmétique, des soins aux algues	37
III.7. Applications écologiques	38
III.8. Applications futurs	38
 Conclusion	40
Résumé	41
Références bibliographiques	

Introduction générale

Introduction générale

Les algues marines forment la principale végétation des mers et des océans. Elles sont représentées par un nombre considérable de familles du sous règne thallophyta (**SIRBU *et al.*, 2006**). Elles sont regroupées en trois divisions, à savoir : les Chlorophyta, les Phaeophyta et les Rhodophyta (**ADAIKALARAJ *et al.*, 2012**). Les algues marines occupent une place importante dans le milieu marin avec un nombre important d'espèces appartenant à tous les niveaux évolutifs (**OUMASKOUR *et al.*, 2013**), et elles sont largement distribuées dans les régions côtières de plusieurs continents (**MANIVANNAN *et al.*, 2011**).

Les algues représentent une ressource économique importante. D'après le rapport de **2014** de la **FAO (Food and Agriculture Organisation)**, 23,8 millions de tonnes d'algues sont commercialisées par an dans le monde, ce qui génère un marché économique de 6,4 milliards de dollars américain, 95 % de cette production mondiale provient de l'aquaculture.

Les algues marines sont utilisées dans le monde depuis les millénaires par les populations littorales. Aujourd'hui, on ne cesse de trouver de nouvelles espèces et de nouvelles propriétés à ces algues, qui possèdent des molécules très intéressantes notamment au niveau industriel (**FALLER, 2011**), et au niveau nutritionnel par la présence conjointe de trois grandes catégories de composants : minéraux, protéines et fibre (soluble et insoluble) (**MARFAING et YANNICK, 2007**).

Ces algues sont aussi une source importante des polysaccharides tels que l'alginate, l'agar-agar, les carraghénanes, le fucoïdane et le laminarine qui sont présents en proportion importante dans les algues. Ce sont exploités depuis de nombreuses années du fait de leur abondance, de leur caractère renouvelable, de leur non-toxicité et de leur biodégradabilité. Plusieurs de ces macromolécules disposent de propriétés texturantes, épaississantes, gélifiantes et émulsifiantes exceptionnelles, qui les rendent incontournables comme additifs alimentaires et auxiliaires technologiques (**CHOUANA, 2017**). Récemment, certains ont aussi démontré de nombreuses activités biologiques notamment des activités anticoagulante, anti-inflammatoire, antivirale (**NAGAOKA *et al.*, 2000 ; COLIN et FEREIDON, 2008**), antiproliférative (**ATHOKORALA *et al.*, 2009**) antioxydante (**FARID *et al.*, 2012**), immunomodulatrice (**BERRI *et al.*, 2016**) et antimicrobienne (**VISHWAKARMA et VAVILALA, 2019**).

A cet égard, nous nous sommes intéressés aux algues marines avec les objectifs suivants :

- Donner un aperçu général sur les algues marines à savoir : leur habitat, leur reproduction, leur classification ;
- Identification des différents polysaccharides d'algues marines (vertes, brunes et rouges) ;
- Donner les applications des algues marines dans différents domaines.

CHAPITRE I

Généralités sur les algues marines et leurs biodiversités

Introduction

Les algues sont présentes sur la terre depuis les origines de la vie (MARFAING, 2012), elles sont apparues sur terre environ 3 à 4 milliards d'années (MARFAING, 2017), elles jouent un rôle fondamental en captant le gaz carbonique (CO_2) pour son métabolisme et en produisant de l'oxygène (O_2) par la photosynthèse (MARFAING, 2012).

I.1. Définition des algues marines

Le terme botanique « algue », du latin « alga », apparu en 1951 permet de désigner un organisme photosynthétique, n'ayant pas de véritable tige, racine, feuille ou tissus conducteurs (MARFAING, 2012). Elles comprennent 20 000 à 30 000 espèces à travers le monde (GARON-LARDIERE, 2004).

On y trouve des bactéries (appelées algues bleues ou cyanobactéries) et des organismes plus évolués (des eucaryotes) uni- ou pluricellulaires qui vivent seuls ou en colonies. Ils peuvent être libres ou fixés sur un support. Leur taille varie de moins d'un micromètre comme les *Prochlorococcus* à plusieurs dizaines de mètres pour certaines algues nommées les *Macrocystis* (LECLERC et FLOC'H, 2010).

I.2. Habitat et écologie des algues

Selon LECLERC et FLOC'H (2010), les algues sont présentes pratiquement partout sur notre planète. Elles sont très peu exigeantes, il leur suffit de la lumière et de l'eau pour se développer. La plupart des algues vivent en effet dans les océans comme le montre la figure 1, mais on les retrouve aussi sur les continents où, elles colonisent les lacs, les rivières, les étangs, les mares...etc.

D'autres algues, se développent dans des milieux non aquatiques. Elles prospèrent sur la surface des sols, troncs d'arbres, murs, toitures, vitraux, rochers...etc.

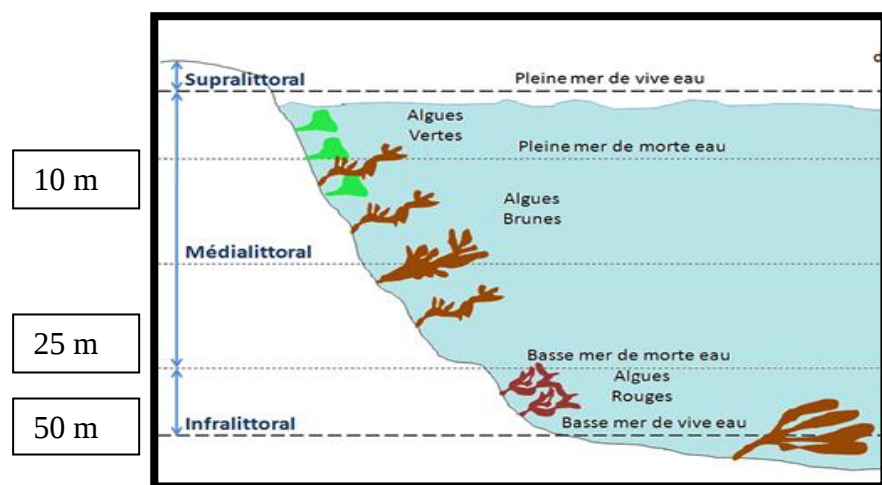


Figure 1 : La zonation des algues (FALLER, 2011).

I.3. Les deux grands groupes d'algues

Les algues se subdivisent en deux grands groupes à savoir : les microalgues et les macroalgues.

➤ Les microalgues

D'après **SIALVE et STEYER (2013)**, les microalgues sont définies comme des organismes unicellulaires ou pluricellulaires, soit des eucaryotes ou des procaryotes. Elles sont regroupées dans la sous-classe des cyanobactéries, cette famille contient 47 000 espèces. Ce sont des microorganismes aquatiques microscopiques (**ZEHLILA, 2017**), qui ont une taille de l'ordre de micromètre. Elles se présentent sous différentes formes : sphériques (le plus souvent) (*Haematococcus*), spirale (*Spiruline*) et même d'étoile (*Staurastrum*) (**BECERRA-CELIS, 2009**). Elles sont souvent connues sous la dénomination de « phytoplancton » (**BEN AMOR BEN AYED, 2015**). La figure 2 illustre quelques exemples de microalgues : *Haematococcus*, *Staurastrum* et *Spiruline*.

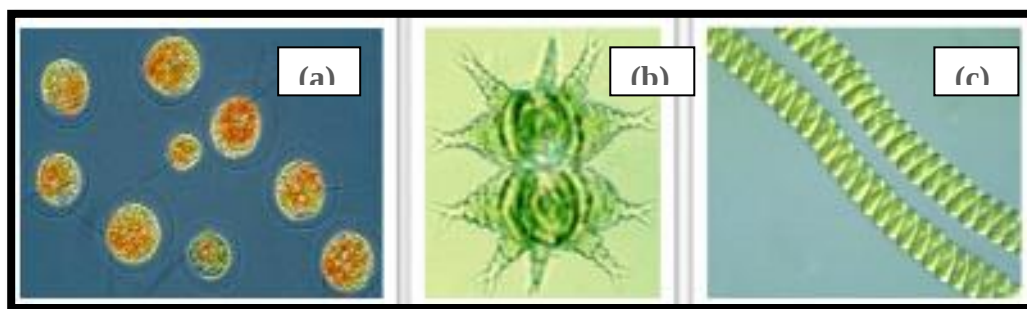


Figure 2 : Quelques exemples de microalgues : (a) : *Haematococcus*, (b) : *Staurastrum* et (c) : *Spiruline* (**BECERRA-CELIS, 2009**).

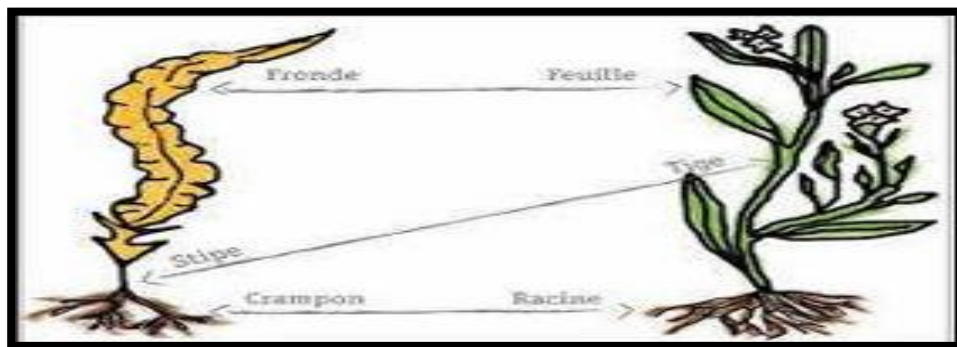
➤ Les macroalgues

Les macroalgues sont au nombre de 25 000 espèces dont seulement 50 sont exploitées à ce jour (**ZEHLILA, 2017**), elles sont généralement visibles à l'œil nu et sont souvent connues par « seaweeds ». Les macroalgues peuvent être subdivisées en trois groupes selon leurs pigmentations : verte, brune et rouge (**BEN AMOR BEN AYED, 2015**). La figure 3 représente quelques images de macroalgues.

*Codium fragile* (Codiaceae)*Desmarestia ligulata* (Desmarestiaceae)*Ellisolandia elongata* (Corallinaceae)*Dictyopteris polypodioides* (Dictyotaceae)**Figure 3 :** Quelques images de macroalgues (<http://www.mer-littoral.org>).

✚ Appareil végétatif des macroalgues

Les algues macroscopiques se distinguent par rapport aux autres végétaux par leur thalle (appareil végétatif) pluricellulaire, dépourvu de racines, de tige, de feuilles et de fleurs. En effet, l'algue possède des crampons qui lui permettent de se fixer au substrat. Elle n'a pas besoin de racines pour se vivre car elle absorbe les nutriments par toutes sa surface en contact avec l'eau. Les crampons sont surmontés d'un pédoncule appelé le stipe, qui se termine par une arborescence ou plusieurs ramifications appelées frondes. Cependant, les cellules des algues possèdent les mêmes éléments de structures que celles des plantes supérieures. Elles ont une paroi cellulaire partiellement cellulosique, des petits noyaux et des plastes pigmentés (GARON-LARDIERE, 2004 ; LECLERC et FLOC'H, 2010 ; ALEM, 2015 ; ZEHLILA, 2017). La figure 4 représente la morphologie comparée entre une algue et une plante.

**Figure 4 :** Morphologie comparée entre une algue et une plante (LECLERC et FLOC'H, 2010).

I.4. Reproduction des algues

Selon **LECLERC et FLOC'H (2010)**, le mode de reproduction dépend du groupe d'algues considéré.

Chez les algues procaryotes (les algues bleues ou cyanobactéries), la reproduction s'effectue par une multiplication asexuée qui consiste soit en la division d'une cellule isolée, soit en une fragmentation de thalle, aboutissant à la formation de plusieurs organismes identiques. Elle est souvent réalisée par la formation de cellules appelées spores.

Les algues eucaryotes réalisent en plus une reproduction sexuée ou cours de laquelle l'union de deux cellules reproductrices, ou gamètes, produisent un œuf, ou zygote. La reproduction des algues se déroule ainsi par alternance d'une phase de reproduction asexuée, et d'une phase de reproduction sexuée (**GARON-LARDIERE**). La figure 5 résume le mode de reproduction des algues.

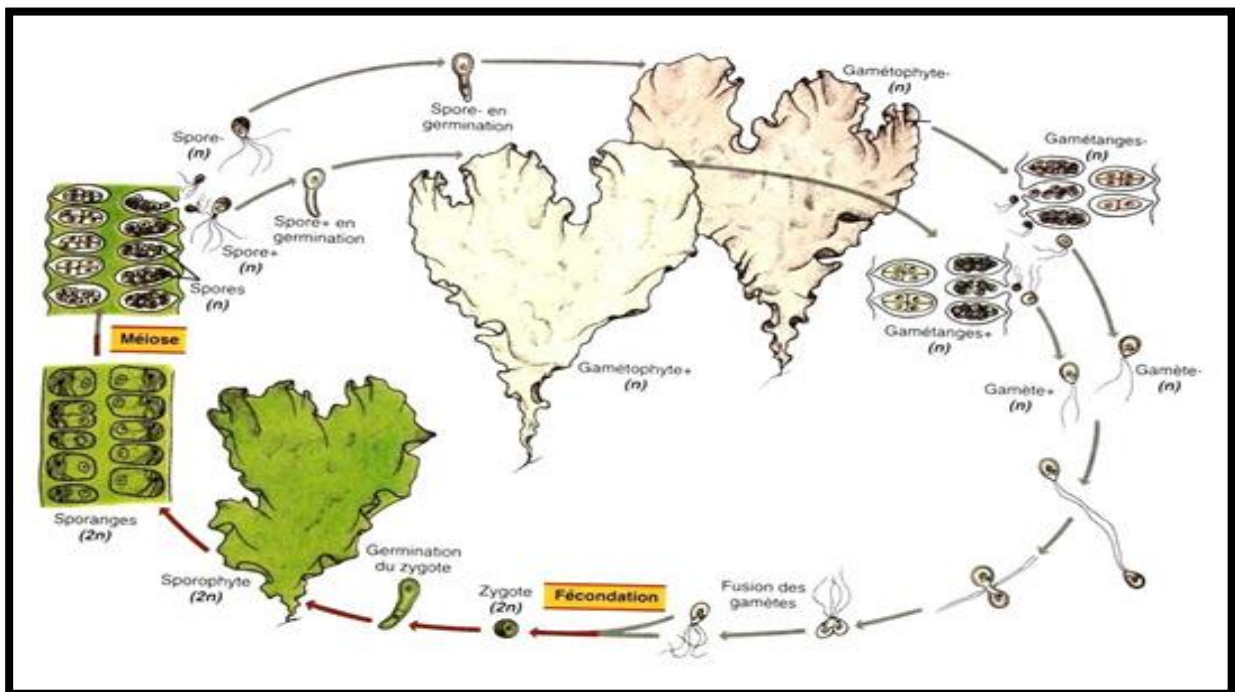


Figure 5 : Reproduction d'une algue verte (*Ulva lactuca*) (<http://www.universalis.fr/encyclopedie/rhodophycees-algues-rouges/>).

I.5. Classification des macroalgues

Les algues peuvent être classées en une dizaine d'embranchements selon des critères basés sur leurs compositions pigmentaires, leurs polysaccharides de réserves ou sur leur caractéristiques structurales (**RUIZ, 2005**).

Dans ce travail nous allons aborder uniquement la classification basée sur la composition pigmentaire.

I.5.1. Les différents pigments des algues marines

Les pigments ont constitué dès le début de 19^{ème} siècle, un critère important dans la classification des algues. Le rôle physiologique de ces molécules est de capter l'énergie lumineuse (RUIZ, 2005).

Tous les végétaux terrestres et aquatiques comportent de la chlorophylle qui est un pigment de couleur verte, leur permettant de faire la photosynthèse. Chez les algues (y compris les vertes) des pigments complémentaire s'associent aux chlorophylles. Le mélange de tous les pigments d'une algue lui confère ça couleur suivant le dosage de ces pigments. Ainsi, la couleur verte de la chlorophylle peut être masquée si les autres pigments sont suffisamment dominants, ce qui est le cas des algues brunes et rouges (LECLERC et FLOC'H, 2010).

Trois types de pigments suffisent pour donner aux algues toutes les couleurs : les chlorophylles, les caroténoïdes et les phycobiliprotéines (LECLERC et FLOC'H, 2010).

A. Les chlorophylles

Selon RASMUSSEN et MORRISSEY (2007), les chlorophylles **a** et **b** sont des pigments verts, liposolubles, présent dans toutes les algues, la chlorophylle **a** est essentiel dans les thylakoides.

La chlorophylle **b** se différencie de la chlorophylle **a** par la présence d'un groupe formyle à la place d'un groupe méthyle en position C 7. La chlorophylle **b** n'est présente que dans les complexes jouant le rôle d'antennes qui captent l'énergie lumineuse, contrairement à la chlorophylle **a** qui est aussi impliquée dans les centres réactionnels. La chlorophylle **b** absorbe la lumière à des longueurs d'onde différentes de celles de la chlorophylle **a**, permettant ainsi aux organismes qui la possèdent d'utiliser plus efficacement l'énergie lumineuse (PATRICK, 2000). La figure 6 illustre la formule chimique des chlorophylles **a** et **b**.

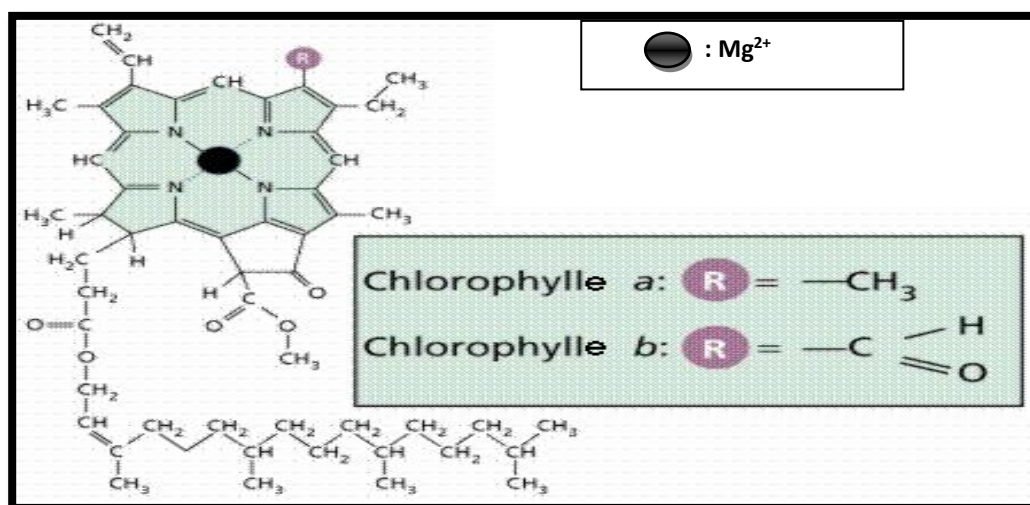


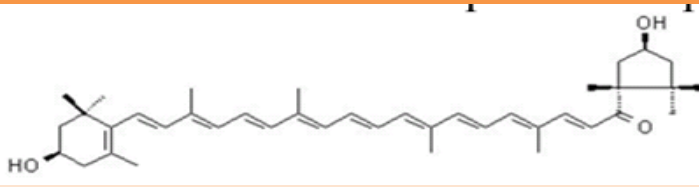
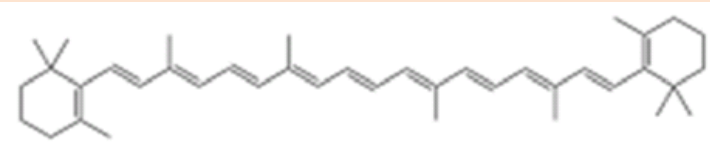
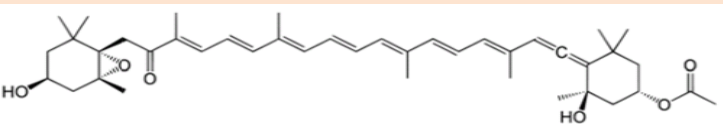
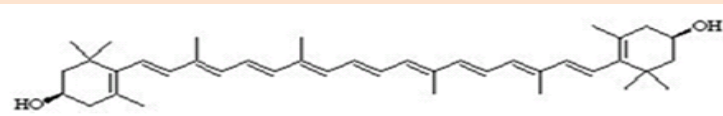
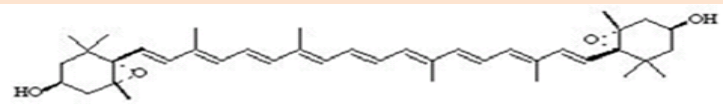
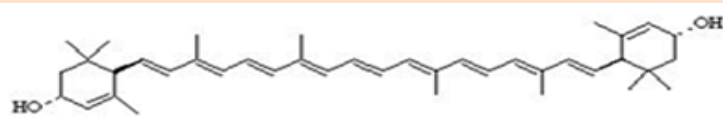
Figure 6 : Formule chimique de la chlorophylle (LECLERC et FLOC'H, 2010).

B. Les caroténoïdes

Selon **OUCIF (2018)**, les caroténoïdes sont des pigments liposolubles composés d'unités isoprènes. Ils représentent en moyenne 0.1 % du poids sec de l'algue, mais certaines espèces, dans des conditions environnementales particulières en produisent beaucoup plus.

Les algues brunes sont particulièrement riches en caroténoïdes et notamment en fucoxanthine, β -carotène et violaxanthine. Les principaux caroténoïdes des algues rouges sont le β -carotène, l' α -carotène et leurs dérivés dihydroxylés : zéaxanthine et lutéine. La composition en caroténoïdes des algues vertes reste voisine de celles des plantes supérieures qui sont le β -carotène, l' α -carotène et leurs dérivés dihydroxylés : siphoxanthine, violaxanthine, nexathine et lutéine (**MARFAING et YANNICK, 2007 ; TAKAICHI, 2011**). Le tableau I illustre les structures de quelques caroténoïdes.

Tableau I : Structures de quelques caroténoïdes (CHOUIKHI, 2013).

Quelques caroténoïdes	Structures
α -Carotène	
β -Carotène	
Fucoxanthine	
Zéaxanthine	
Violaxanthine	
Lutéine	

C. Phycobiliprotéines

Contrairement à la chlorophylle et aux caroténoïdes, les phycobiliprotéines sont hydrosolubles. Ils sont utilisés actuellement comme des colorants naturels dans les aliments tels que le chewing-gum et les produits laitiers, en plus de leurs applications cosmétiques (SEKAR et CHANDRAMOHAN, 2008).

Les phycobiliprotéines sont généralement divisées en trois classes : les phycoérythrine (PE) illustrées dans la figure 7, les phycocyanines (PC) et les allophycocyanines (APC) (BOGORAD, 1975 ; SUDHAKAR *et al.*, 2015).

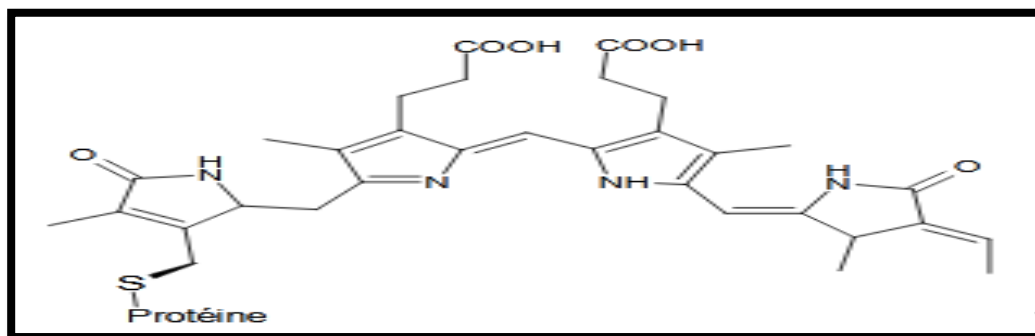


Figure 7 : Structure moléculaire de Phycoérythrine (JUN, 2015).

I.5.2. Classification des algues marines selon la pigmentation

Selon la FAO (2004), il est possible de répartir les algues marines en trois grands groupes, en fonction de leur pigmentation : les vertes, les brunes et les rouges, soient respectivement les Chlorophycées, les Phéophycées et les Rhodophycées comme les désigne les botanistes.

1. Les algues vertes (Chlorophycées)

D'après GARON-LARDIERE (2004), Les algues vertes ou ulvophytes sont de formes très variées, uni- ou pluricellulaires. Leurs plastes sont colorés en vert par les chlorophylles **a** et **b**, aux quelles sont associés des carotènes et des xanthophylles.

La plupart des algues vertes vivent en eau douce, ou en milieu marin. Il a été recensé plus de 6 500 espèces de macroalgues marines vertes (GERALDINE et CELINE, 2009). La figure 8 représente deux espèces d'algues marines vertes *Palmophyllum crassum* et *Codium tomentosum*.

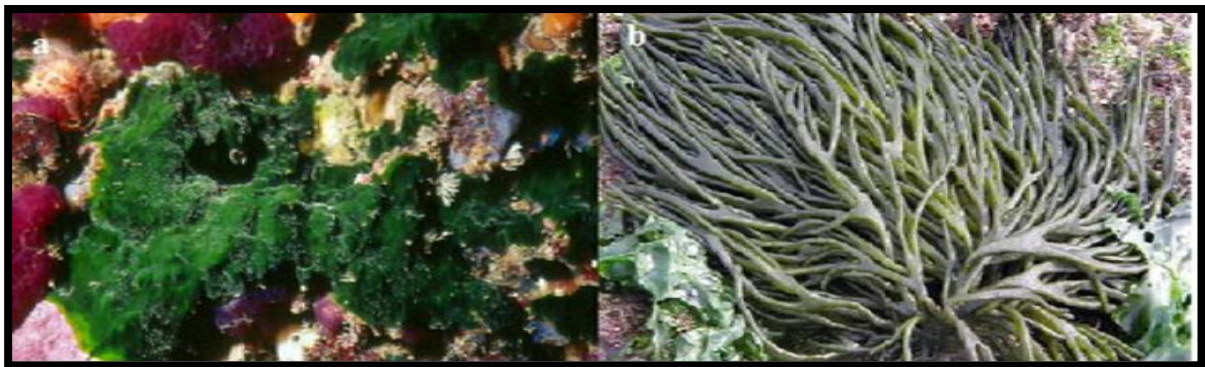


Figure 8 : a : *Palmophyllum crassum* ; b : *Codium tomentosum* (<http://www.mer-littoral.org>).

2. Les algues brunes (Phéophycées)

Elles sont nommées Phaeophyceae ou Phéophycées, ce sont des algues marines les plus abondantes. On les retrouve surtout au niveau des côtes rocheuses à faible profondeur (**GARON-LARDIERE, 2004**), ce sont des algues annuelles dont on dénombre 1 500 espèces (**GERALDINE et CELINE, 2009**). Selon **FAO (2004)**, Leur taille varie de 30 à 60 centimètres jusqu'à 20 mètres de longs.

La couleur brune de ces algues résulte de la dominance du pigment xanthophylle et de la fucoxanthine, qui masque les autres pigments (chlorophylles **a** et **c** ainsi que le β -carotène) (**LAKHDAR, 2018**). La figure 9 représente deux espèces d'algues marines brunes *Cystoseira baccata* et *Desmarestia ligulata*.

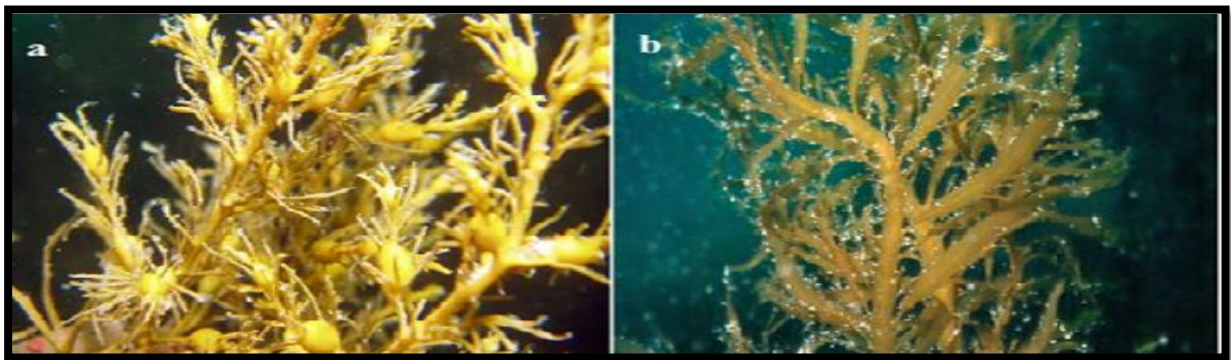


Figure 9 : a : *Cystoseira baccata* ; b : *Desmarestia ligulata* (<http://www.mer-littoral.org>).

3. Les algues rouges (Rhodophycées)

D'après **GERALDINE ET CELINE (2009)**, les Rhodophytes doivent leur couleur à la présence d'un pigment rouge qui est la phycoérythrine, associée à plusieurs autres pigments dont les chlorophylles. Ce sont des algues annuelles dont on dénombre 3 500 espèces. Selon **FAO (2004)**, leurs taille varie de quelques centimètres jusqu'à environ un mètre de long. La figure 10 représente deux espèces d'algues marines rouges *Asparagopsis armata* et *Peyssonnelia cf. squamaria*.

Les algues rouges sont divisées en deux groupes : celui de Bangiophycées (qualifiés de primitives) et celui de Floridéophycées (plus complexes), elles se distinguent généralement par leur cycle de reproduction particulièrement complexe (GARON-LARDIERE, 2004).

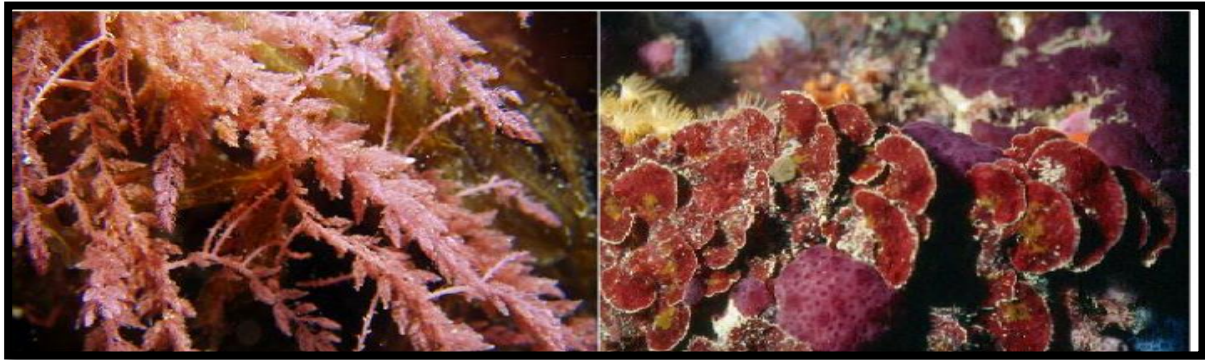


Figure 10 : a : *Asparagopsis armata* ; b : *Peyssonnelia cf. squamaria* (<http://www.mer-littoral.org>).

CHAPITRE II

Les polysaccharides des algues marines

II.1. Généralités sur les polysaccharides

II.1.1. Définition des polysaccharides

Les polysaccharides forment un groupe hétérogène de polymères de composition multiple et variée, et de longueurs différentes. Ils sont construits à partir de résidus monosaccharidiques liés entre eux par des liaisons dites glycosidiques. Les liaisons ainsi formées peuvent avoir la configuration α ou β . La figure 11 illustre ces différentes liaisons (ROBYT, 1998).

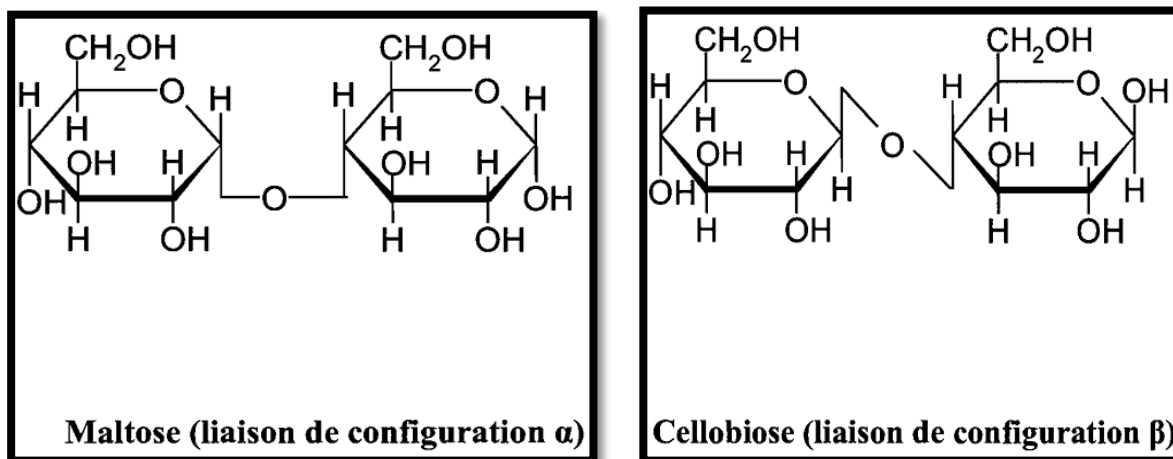


Figure 11 : Différents types de liaisons rencontrées chez les polysaccharides (ROBYT, 1998).

Parmi ces monosaccharides on trouve certains hexoses tels que le galactose (sous sa forme D ou L), le D-glucose, le D-mannose ou encore certains acides uroniques tels que l'acide mannuronique, l'acide glucuronique ou l'acide guluronique, aussi il faut souligner la présence de certains pentoses tels que le D-xylose et le L-arabinose.

Ces monosaccharides sont généralement présents au sein de la chaîne polysaccharidique sous forme de pyranose et adoptent la conformation de chaise qui leur est la plus favorable d'un point de vue énergétique (LAHAYE, 2001). La figure 12 représente les structures chimiques des oses présents dans les polysaccharides d'algues.

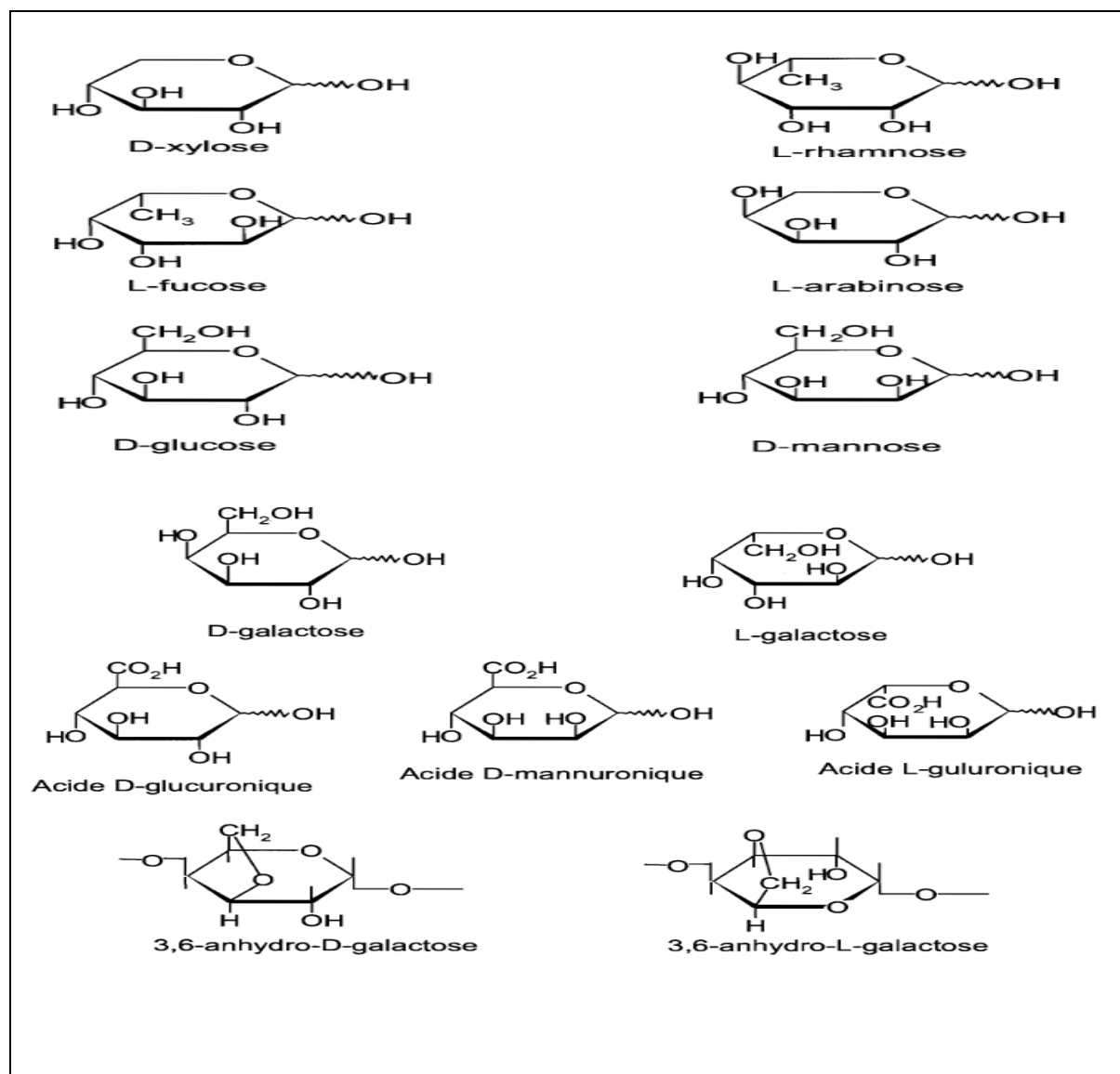


Figure 12 : Oses constitutifs des polysaccharides d'algues (GARON-LARDIERE, 2004).

Selon GARON-LARDIERE (2004), la chaîne polysaccharidique formée peut être linéaire ou ramifiée, les ramifications possibles étant d'autres unités monosaccharidiques, seules ou en chaînes, ou des composés non-osidiques appelés substituants liés de manière covalente à la chaîne principale. Ces substituants peuvent être d'origine organique ou inorganique qui sont résumés dans le tableau II.

Tableau II : Principaux substituants rencontrés chez les algues (PIERRE, 2010).

Origine de substituant	Nature de substituant	structure	Nature de liaison
Organique	O-Methyl	-OCH ₃	éther
	Pyruvyl	-O[C(CH ₃)CO ₂ H]	acétal
Inorganique	Sulfate hémierster	-OSO ₃ -	Ester

II.1.2. Classification des polysaccharides

Les polysaccharides peuvent être divisés en deux classes en fonction de la nature de leurs composants : les homopolysaccharides et les hétéropolysaccharides.

A. Les homopolysaccharides

Les homopolysaccharides sont composés de monosaccharides identiques (**PIERRE, 2010**), et peuvent être divisés en deux catégories en fonction du type d'enchaînement qui lient les résidus entre eux à savoir :

- Les homoliés où le polysaccharide aurait un seul type de monosaccharide liés par un type de liaison, le polysaccharide en question est donc linéaire et ne possède pas de ramification.
- Les hétéroliés où le polysaccharide aurait au moins deux types de liaisons glycosidiques, donnant ainsi lieu à de polysaccharide plus complexes, pouvant être ramifiés (**GRON-LARDIERE, 2004**).

B. Les hétéropolysaccharides

D'après **PIERRE (2010)**, la majorité des polysaccharides d'origine algale correspond à des hétéropolysaccharides. Ils sont constitués d'unités répétitives comportant au moins deux résidus différents, ces dernières peuvent être ramifiées.

Ces hétéropolysaccharides peuvent contenir divers substituants liés par des liaisons éther, ester, amide, sulfate ou acétylique. Ces groupements sont en grande partie responsables des propriétés physico-chimiques des polymères qui les portent.

II.2. Les différents types de polysaccharides des algues

Les polysaccharides algaux forment une vaste famille au sein de laquelle on distingue :

II.2.1. Les polysaccharides de réserves

Selon **GARON-LARDIERE (2004)**, ils s'agissent des polysaccharides qui sont stockés dans les vacuoles des algues. Le tableau III résume les différents polysaccharides de réserve selon les trois grands groupes de macroalgues.

Tableau III : Les différents polysaccharides de réserves selon les grands groupes de macroalgues (**GARON-LARDIERE, 2004**).

Algues	Polysaccharides	Structures de bases
Brunes	Laminarine	1,3- β -glucose
Rouges	L'amidon floridéen	1,4- α -glucose
Vertes	Glucane	1,4- β -glucose

➤ Les laminarines

Ce sont des polysaccharides de réserves de la famille des Chrysolaminarines, composés de D-glucose liés en β -1,3, plus ou moins ramifiés en β -1,6. Ils sont spécifiques de certains embranchements tels que les Chromophytes (algues brunes) (RUIZ, 2005). La figure 13 représente la structure chimique des laminarines.

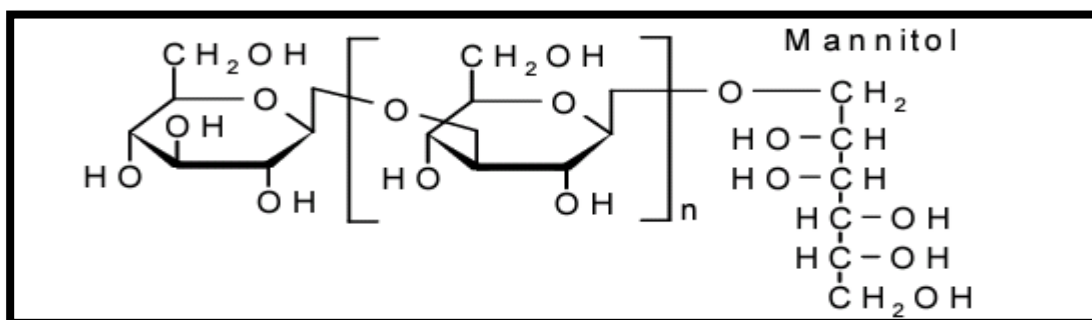


Figure 13 : Structure chimique des laminarines (RUIZ, 2005).

➤ L'amidon floridéen

Selon MCCRACKEN et CAIN (2006), les algues rouges synthétisent et stockent l'amidon sous forme de granules semi-cristallins, insolubles dans le cytosol. Il a été décrit pour la première fois en 1843 par le botaniste allemand Kützing et a été appelé amidon floridéen. Contrairement à l'amidon des plantes supérieures et des algues vertes, celui des algues rouges n'a généralement pas d'amylose.

L'amidon floridéen est composé d'unités de D-glucose liées entre elles par des liaisons α -1,4 et possède des branchements en α -1,6 (VIOLA *et al.*, 2001). Il est fortement apparenté aux amidons, mais avec des ramifications plus nombreuses et une polymérisation plus élevée (BURLOT, 2016). La figure 14 représente la Structure chimique de l'amidon floridéen.

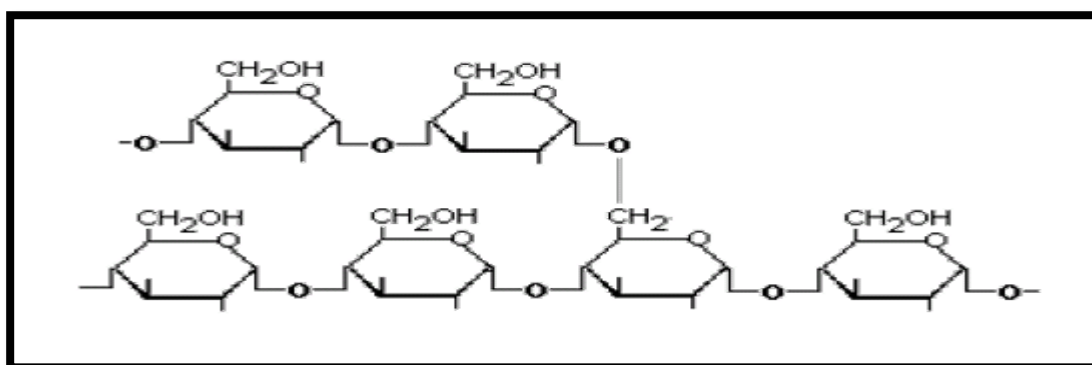


Figure 14 : Structure chimique de l'amidon floridéen (BURLOT, 2016).

➤ Les glucanes

Un β - glucane est un polysaccharide entièrement constitué de D-glucose liés par des liaisons β -1,4 illustrées dans la figure 15. Les β glucane forment un groupe diversifié de molécules (VOLMAN *et al.*, 2008 ; PERSIKCRA *et al.*, 2013).

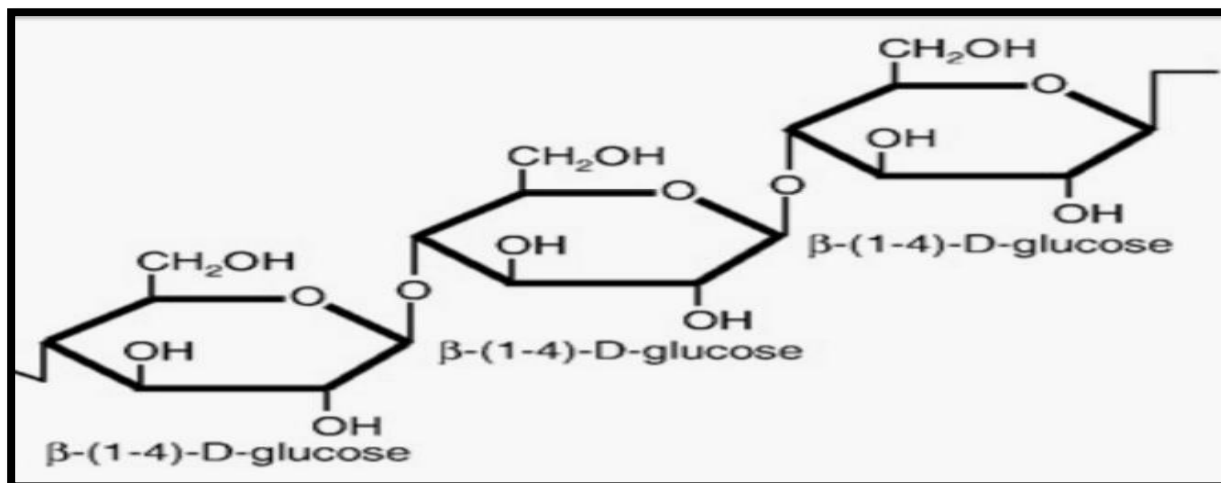


Figure 15 : Structure chimique de glucane (VOLMAN *et al.*, 2008).

II.2.2. Les polysaccharides de faibles poids moléculaires

D'après BONDU *et al.* (2009), les glucides de faibles poids moléculaires sont les premiers composés produits par la photosynthèse qui forment également une réserve d'énergie, ils passent au travers de la membrane pour réguler la pression osmotique.

Chez les algues rouges, on trouve deux isomères : le floridoside (α -D-galactopyranosyl-(1-2)-glycérol) et l'isofloridoside (α -D-galactopyranosyl-(1-1)-glycérol). WICKBERG en 1958, à rapporté que l'isofloridoside est un mélange isomorphe de formes D et L. La figure 16 représente la structure chimique de floridoside, L-isofloridoside et D-isofloridoside.

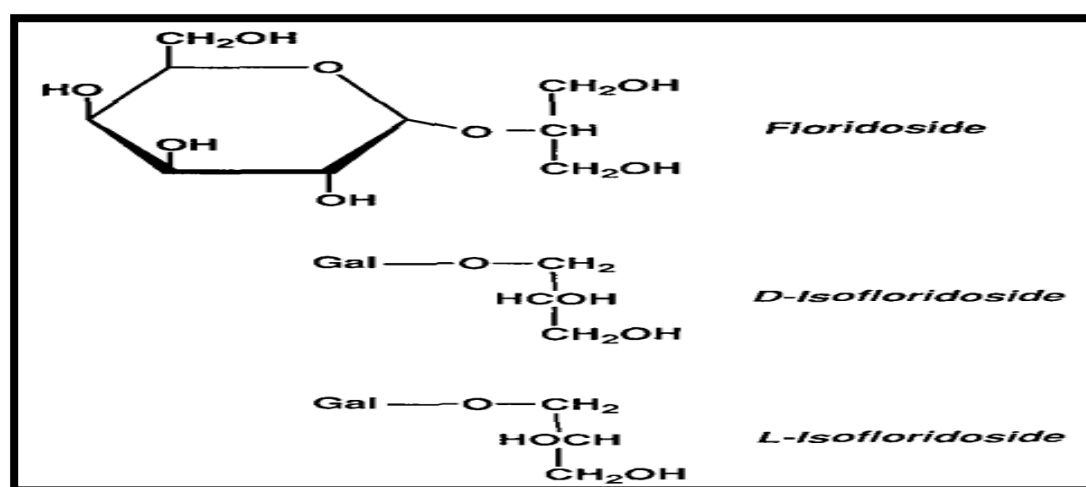


Figure 16 : Structure chimique de floridoside, L-isofloridoside et D-isofloridoside (KARSTEN *et al.*, 1993).

Chez les algues brunes, un type particulier de saccharide sous forme de polyols est présent chez plusieurs espèces : le D-mannitol qui représente jusqu'à 25 % du poids sec de l'algue.

Enfin, les algues vertes comportent des traces de monosaccharides tels que le fructose ou le saccharose (GARON LARDIERE, 2004).

II.2.3. Les polysaccharides de structures (pariétaux)

Ce sont ceux de la paroi, appelés aussi polysaccharides pariétaux.

1. La paroi des algues

La paroi cellulaire des algues possède une architecture semblable à celle des végétaux terrestres. Elle est constituée de deux phases : une phase cristalline, qui correspond à un squelette de microfibrilles, enveloppée d'une phase amorphe, appelée également matrice prédominante. (KLOAREG et QUATRANO, 1988). La figure 17 représente une structure schématique de la paroi cellulaire d'une macroalgue brune de l'ordre des Fucales (A), d'une macroalgue rouge de l'ordre des Gigartinales (B) et d'une macroalgue verte de l'ordre des Ulvales (C).

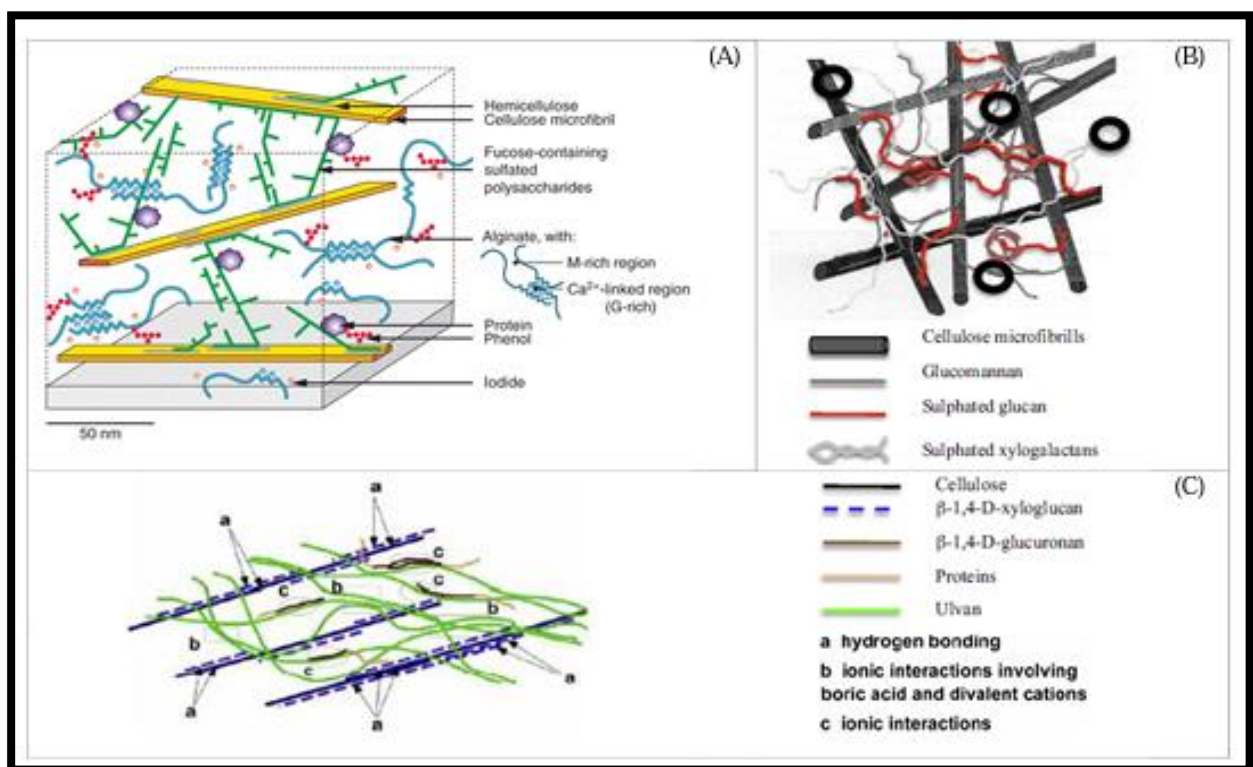


Figure 17 : Structure schématique de la paroi cellulaire d'une macroalgue brune de l'ordre des Fucales (A), d'une macroalgue rouge de l'ordre des Gigartinales (B) et d'une macroalgue verte de l'ordre des Ulvales (C) (RICHARD, 2016).

2. Les polysaccharides squelettiques, ou fibrillaires

D'après **KLOAREG et QUATRANO (1988)**, chez la plupart des algues marines pluricellulaires, les polymères squelettiques sont des polysaccharides neutres, linéaires dont le plus courant est la cellulose.

Des xylanes et des mannanes sont également rencontrés, en fonction des espèces et/ou des étapes du cycle de développement.

Ces polysaccharides sont dominants selon les espèces d'algues.

➤ La cellulose

Selon **GARON-LARDIERE (2004)**, la cellulose est un polymère constitué d'unités β -(1,4)-D-glucose, comportant généralement un enchaînement linéaire de 8 000 à 12 000 unités de D-glucose.

Les chaînes individuelles de cellulose sont associées en microfibrilles par le biais de liaisons hydrogène intra- et intermoléculaires. La microfibrille est l'élément structural de base et est composée de 30 à 200 chaînes de cellulose. Ces microfibrilles s'associent à leur tour pour générer : les fibrilles. La figure 18 montre la structure chimique des microfibrilles de cellulose.

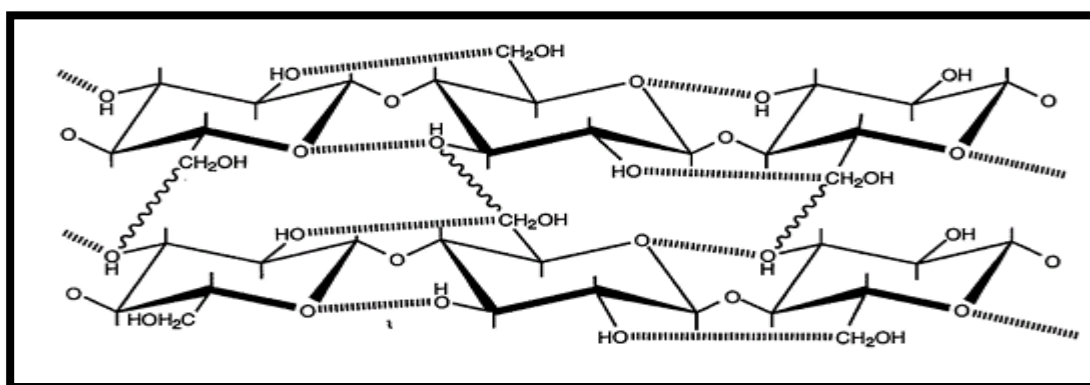


Figure 18 : Structure chimique des microfibrilles de cellulose (**GARON-LARDIERE, 2004**).

➤ Les xylanes

Les xylanes squelettiques des parois cellulaires sont des polymères d'unités β -(1,3)-D-xylose ou β -(1,4)-D-xylose comme ils sont montés dans la figure 19. Les premiers, ne sont présents que dans les algues dont la paroi cellulaire ne contient pas de cellulose. Cependant les seconds sont surtout présents chez les algues vertes ou certaines algues rouges (**PIERRE, 2010**).

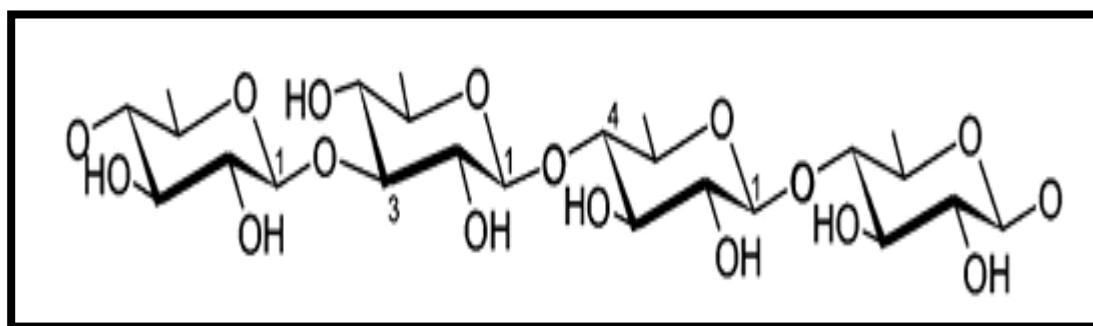


Figure 19 : Structure chimique des xylanes mixtes (USOV, 1992).

➤ Les mannanes

Les mannanes sont des polymères linéaires formés d'unités β -(1,4)-D-mannose, dont les chaînes s'associent entre elles de la même manière que les molécules de cellulose, pour former des microfibrilles, elles-mêmes associées en fibrilles (KLOAREG & QUATRANO, 1988). On retrouve ces polymères chez les algues rouges et notamment chez les Bangiophycées (GRETZ *et al.*, 1982). La figure 20 illustre la structure chimique des mannanes.

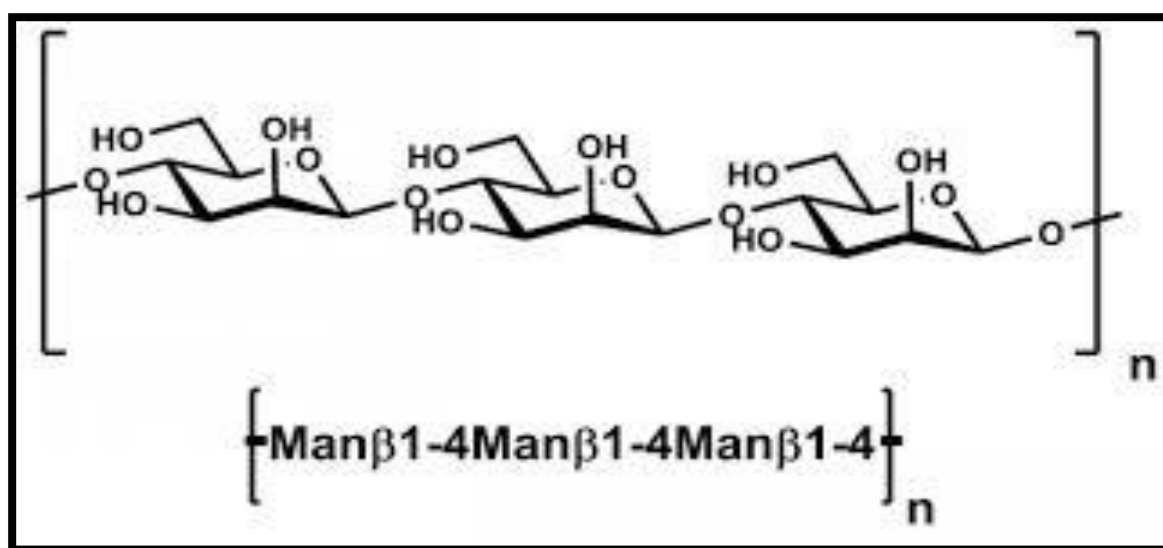


Figure 20 : Structure chimique des mannanes (<https://www.megazyme.com/mannan-1-4-beta-d-mannnan>).

3. Les polysaccharides matriciels

La phase matricielle contient des polysaccharides de structure plus hydrosolubles, noyés dans la matrice (ou zone amorphe), dans laquelle ont lieu les échanges cationiques. La nature des polysaccharides matriciels est spécifique à chaque type d'algue.

A. Les polysaccharides matriciels des algues vertes

➤ Les ulvanes

Les ulvanes selon (FALLER, 2011), désignent des polysaccharides sulfatés, soluble dans l'eau extrait des algues vertes principalement du genre *Ulva sp.* Ils représentent 18 à 29 % du poids sec des algues.

Ces polysaccharides sont constitués de nombreux sucres dont les principaux sont le L-rhamnose sulfaté en position 3, l'acide D-glucuronique et l'acide L-iduronique. On trouve également le D-galactose, le D-glucose et le D-xylose.

Les ulvanes ont un poids moléculaires de 189 à 8200 KDa (PEREZ *et al.*, 2016), ils ont été divisés en trois principaux groupes :

- Les xyloarabinogalactanes sulfatés

Comportant environ 17 % de sulfate et sont présents dans les algues de l'ordre des Cladophorales et des Codiales. Il n'y a pas vraiment d'unité répétitive, mais plutôt des portions comportant des blocs de (1,4)-L-arabinose, séparés par des unités D-galactose.

Toutes les unités D-xylose et une partie des unités D-galactose sont en position terminales (GARON-LARDIERE, 2004).

- Les glucuronoxylorhamnanes sulfatés

Ils comportant 22 % de groupements sulfates, et 16 à 22 % d'acide uronique selon les espèces (PIERRE, 2010). La figure 21 représente la structure chimique de glucuronoxylorhamnanes sulfatés.

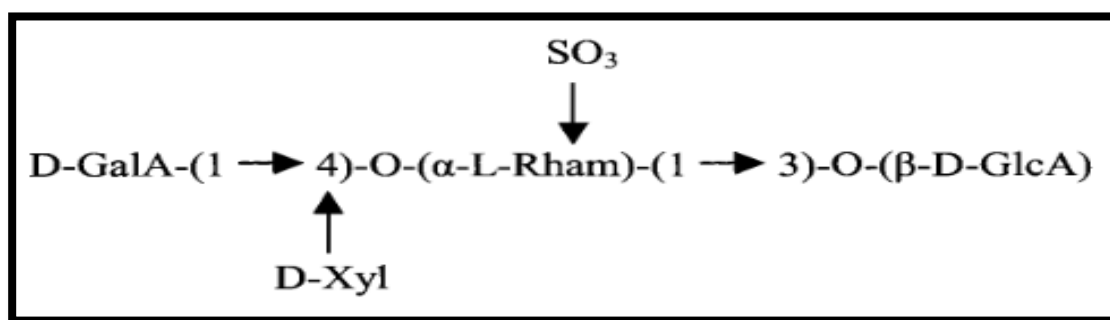


Figure 21 : Structure chimique de glucuronoxylorhamnanes sulfatés (GARON-LARDIERE, 2004 ; PIERRE, 2010).

- Les glucuronoxylorhamnanogalactanes sulfatés et les rhamnogalactogalacturonanes (Ulvales)

Ils sont peu différents des acides pectiques des végétaux supérieurs, mis à part la présence de sulfate (LAHAYE, 2001).

B. Les polysaccharides matriciels des algues brunes

D'après **GARON-LARDIERE (2004)**, trois principaux types de polysaccharides matriciels sont issus des algues brunes : les fucanes, les ascophyllanes et les alginates.

➤ Les fucanes

Ce sont des constituants de la paroi cellulaire de certaines algues brunes. Il semblerait que ces polysaccharides sulfatés ne soient pas présents chez toutes les Phaeophyceae, on les trouve chez les Fuciales et les Laminariales (**FALLER, 2011**).

Les fucanes, ou fucoïdanes, constituent une famille hétérogène de polymères à base d'unités de L-fucose liées en α - (1,2) et sulfatés en C4 comme cela est montré dans la figure 22. Leur composition varie des molécules riches en fucose vers des molécules les plus pauvres en cet ose. Ces dernières comportent de grandes proportions de galactose, de xylose ou encore d'acide uronique (**PERCIVAL, 1979 ; PEREZ et al., 2016**). Leur teneur peut varier de 3 à 30 % du poids sec de l'algue (**FALLER, 2011**).

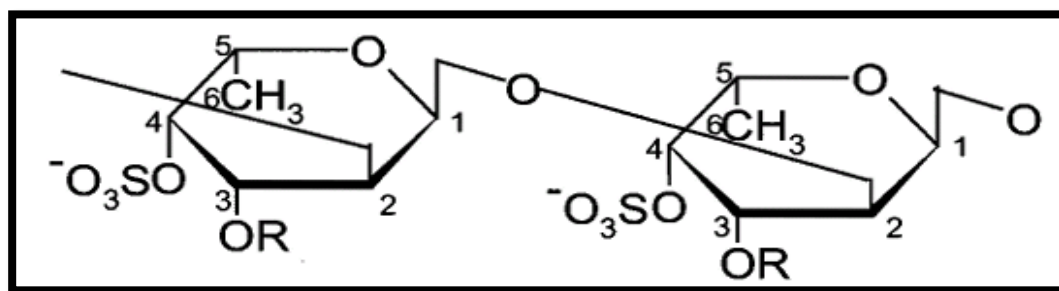


Figure 22 : Structure des chaînes de fucose α -(1,2) des fucanes (**GARON- LARDIERE, 2004**).

➤ Les ascophyllanes

PERCIVAL en 1979, a montré que la chaîne principale des ascophyllanes est constituée principalement d'acide D-glucuronique, d'acide mannuronique et d'acide guluronique, portant des ramifications de type xylose ou fucose.

➤ Les alginates

Ce sont les polymères les plus représentés dans la composition des algues brunes de la famille des Sargassaceae (**SANTI et al., 2008**). L'acide alginique est un polymère linéaire constitué de deux unités monosaccharidiques : l'acide β -D-mannuronique et l'acide α -L-guluronique, reliés par une liaison osidique β -(1,4) (**FALLER, 2011**). La figure 23 illustre la structure chimique de l'acide alginique.

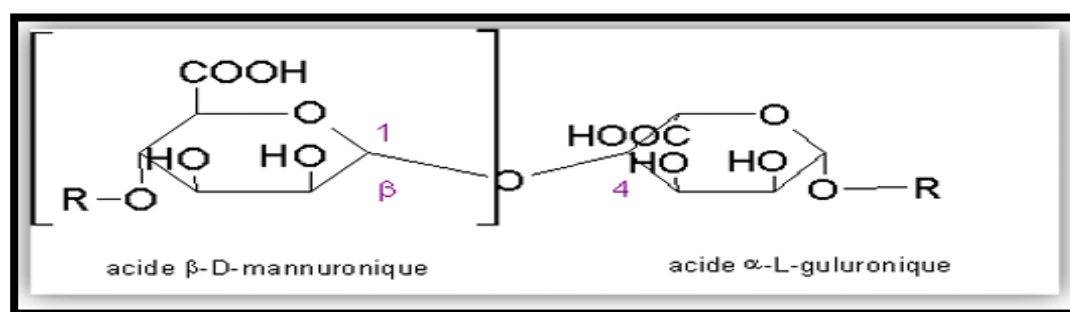


Figure 23 : Structure chimique de l'acide alginique (FALLER, 2011).

Dans ces chaînes d'alginate, on distingue les blocs polymannuroniques (notés poly-M ou MM), les blocs polyguluroniques (notés poly-G ou GG), et les blocs mixtes mannuronique / guluronique (notés poly-MG ou MG) qui sont présentés dans la figure 24 (FALLER, 2011).

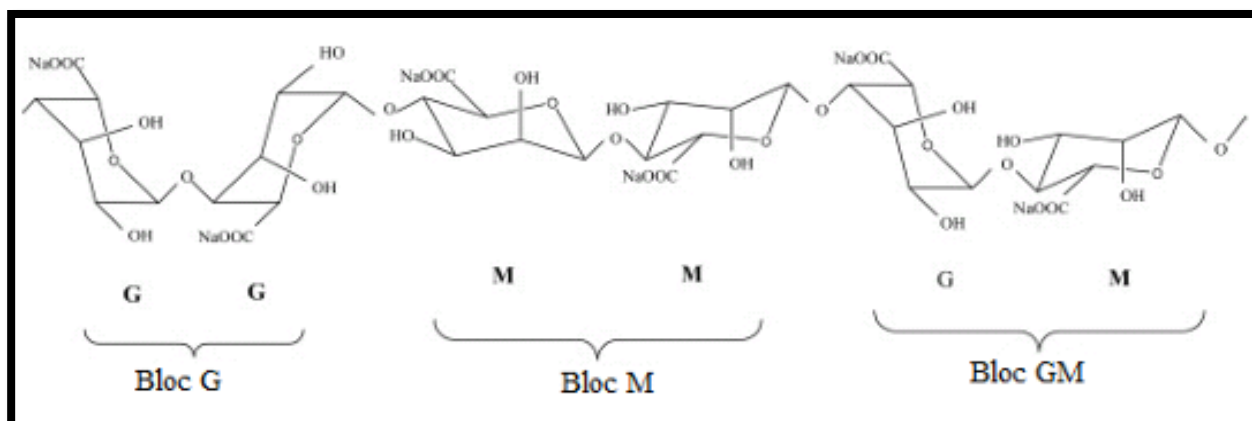


Figure 24 : Les différentes structures possibles des alginate (RICHARD, 2016).

C. Les polysaccharides matriciels des algues rouges

Selon ANDERSON et REES (1965), les agarocolloïdes et les carraghénanes sont les principaux polysaccharides matriciels des algues rouges. Tous deux sont construits sur la base d'un enchainement linéaire d'unités 3-β-D-galactopyranose et 4-α-galactopyranose. L'unité β-galactose appartient toujours à la série D, alors que l'unité α-galactose est de conformation D dans les carraghénanes, et sous la forme L dans les agarocolloïdes. La figure 25 représente les motifs osidiques de base des agarocolloïdes et des carraghénanes.

De plus, une part plus ou moins importante des résidus α-galactose peut exister sous la forme de 3,6-anhydrogalactose.

Enfin, un certain nombre de groupements hydroxyles de ces galactopyranoses peuvent être sulfaté, méthylé, pyruvaté ou encore substitué par un monosaccharide.

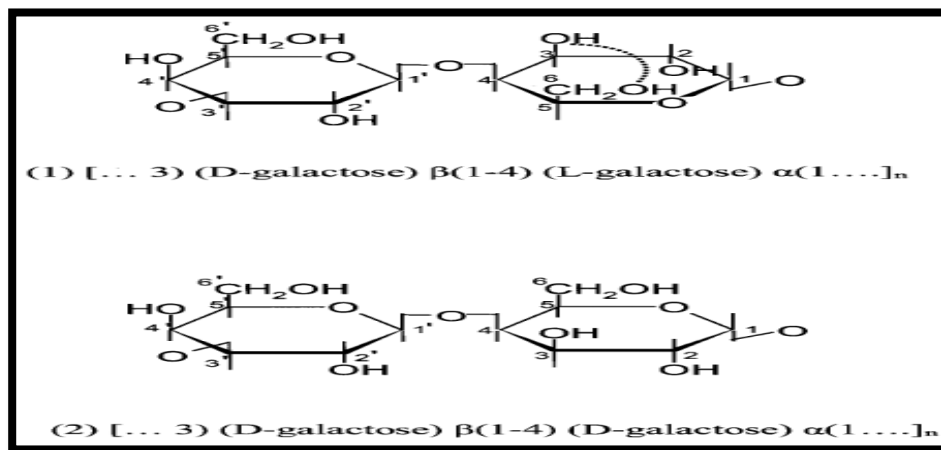


Figure 25 : Motifs osidiques de base des agarocolloïdes (1) et les carraghénanes (2) (GARON-LARDIERE, 2004).

➤ Les agarocolloïdes

Ils sont divisés en deux groupes : les agars, gélifiants, et les agaroides, peu ou non gélifiants (GARON-LARDIERE, 2004).

La principale différence entre ces deux groupes réside dans le fait que chez les agars, l'unité 4- α -galactopyranose est sous la forme dérivée 3,6-anhydrogalactose, et que le pourcentage de groupements sulfate y est plus faible (de l'ordre de 2 %) que dans les agaroides (20 % environ) (USOV, 1998).

• Les agars

L'agar est un polysaccharide matriciel présent en quantité importante dans le thalle (en moyenne 30 à 70 % du poids sec) (FALLER, 2011).

Leur structure est définie comme étant l'enchaînement d'un motif disaccharidique : l'agarobiose ou le néoagarobiose (ARAKI, 1966), constitué d'une unité de β -D-galactopyranose, liée en (1,3), alternant avec une unité α -L-3,6-anhydrogalactopyranose, liée en (1,4) (GARON-LARDIERE, 2004). La figure 26 montre la structure chimique d'agarobiose ou du néoagarobiose.

La teneur en sulfate des agars est faible, elle varie en moyenne de 1 à 5 % (FALLER, 2011).

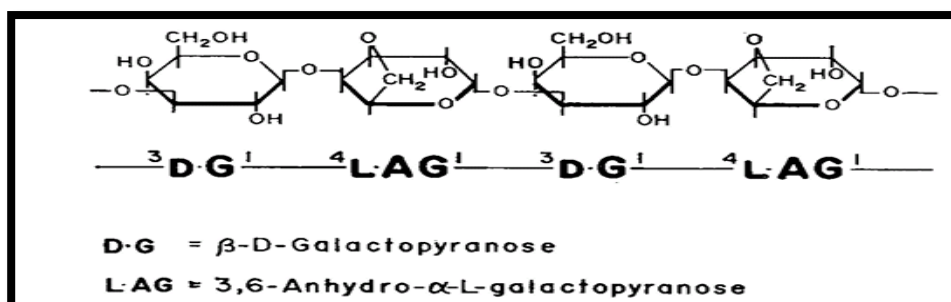


Figure 26 : Structure chimique d'agarobiose ou du néoagarobiose (ARAKI, 1966).

• Les agaroides

La structure chimique des agaroides est proche de celle d'agarobiose, mais ils comportent néanmoins beaucoup moins d'unités 3,6-anhydrogalactose, qui sont remplacés par des unités 4- α -L-galactopyranose, et le taux des groupements sulfate y est plus important (jusqu'à 20 %). Ces derniers sont généralement placés entre autre sur le carbone 6 des unités 4- α -L-galactopyranose.

Parmi ces agaroides, deux exemples peuvent être cités :

- ✓ Les funoranes, dont les proportions en D-galactose et L-3,6-anhydrogalactose sont identiques à celles des agars, mais dont les hydroxyles placés sur les carbones 6 du 3- β -D-galactopyranose et 2 du 4- α -L-galactopyranose sont substitués soit par un groupement sulfate, soit par un groupement méthyle. La figure 27 représente la structure chimique des funoranes.
- ✓ Les porphyranes, extraits par exemple de *Porphyra umbilicalis*, pour lesquels les unités 3- β -D-galactopyranose sont méthylés ou sulfatés en position 6, et dont une unité 4- α -L-3,6-anhydrogalactose sur deux est remplacée par une unité 4- α -L-galactopyranose-6-sulfate (USOV, 1992). La figure 28 illustre la structure chimique des porphyranes.

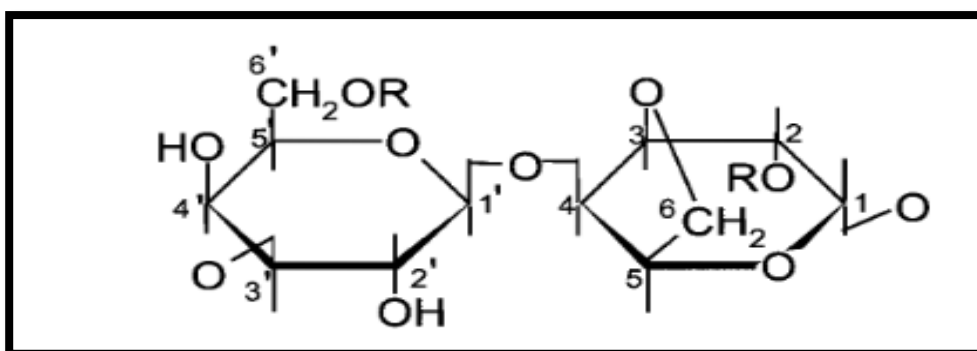


Figure 27 : Structure chimique des funoranes (GARON-LARDIERE, 2004).

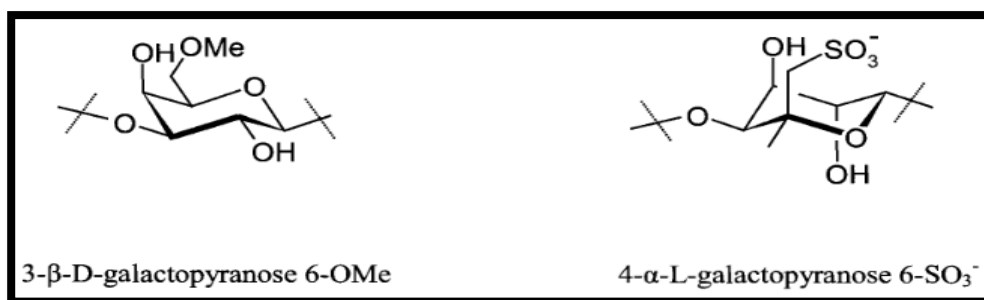


Figure 28 : Structure chimique des unités osidiques des porphyranes (GARON-LARDIERE, 2004).

➤ Les carraghénanes

Les carraghénanes sont composés alternativement d'unités (1,3) β -D-galactopyranose et d'unités (1,4) α -D-galactopyranose. Les (1,4) α -D-galactopyranose peuvent aussi exister sous la forme 3,6-anhydrogalactopyranose, ces unités sont illustrées dans le tableau IV (MARION, 2007).

Tableau IV : Motifs disaccharidique de répétition des carraghénanes (MARION, 2007).

structure chimique		
nom systématique	(1→3) β -D-galactopyranose (1→4) α -D-galactopyranose	(1→3) β -D-galactopyranose (1→4) α -D-anhydro-galactopyranose

Contrairement aux agars, les carraghénanes sont généralement très fortement sulfatés (de 20 à 38 %) (KLOAREG et QUATRANO, 1988), et ne comportent que des oses sous la configuration D. Les unités peuvent être substituées à différentes positions par des sulfates (S), des O-méthyles (M) ou des groupements d'acide pyruvique (P).

Les carraghénanes sont réparties en quatre familles. Cette répartition est basée sur la position des groupements sulfates sur l'unité (1,3) β -D-galactopyranose (REES, 1969).

• Famille des Kappa-carraghénanes

D'après REES (1969), l'unité liée en β -(1,3) est toujours sulfatée en C-4. Seule l'unité 4- α -D-galactopyranose varie. Elle est la moins riche en groupement sulfate, avec un seul groupe par diholoside. Cette famille comporte les Kappa (κ), iota (ι), mu (μ), et nu (ν)-carraghénanes, illustrés sur la figure 29.

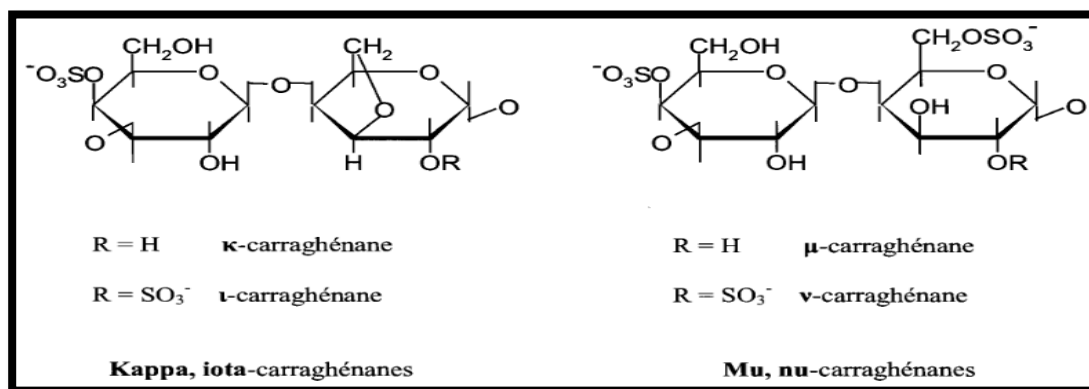


Figure 29 : Structure des carraghénanes de la famille des Kappa (GARON-LARDIERE, 2004).

- **Famille des Lambda-carraghénanes**

Selon FALLER (2011), les Lambda-carraghénanes sont plus riches en groupements sulfates où les résidus 3- β -D-galactopyranose sont toujours sulfatés en C-2 ; avec trois groupements sulfates par unité disaccharidique, ils ne comportent pas de 3,6-anhydrogalactose, mais un 4- α -D-galactopyranose-2,6-disulfate à la place. Cette famille contient les xi (ξ), thêta (θ) et pi (π)-carraghénanes, où seule unité de 4- α -D-galactopyranose varie (REES, 1969). La figure 30 résume toutes les structures de cette famille.

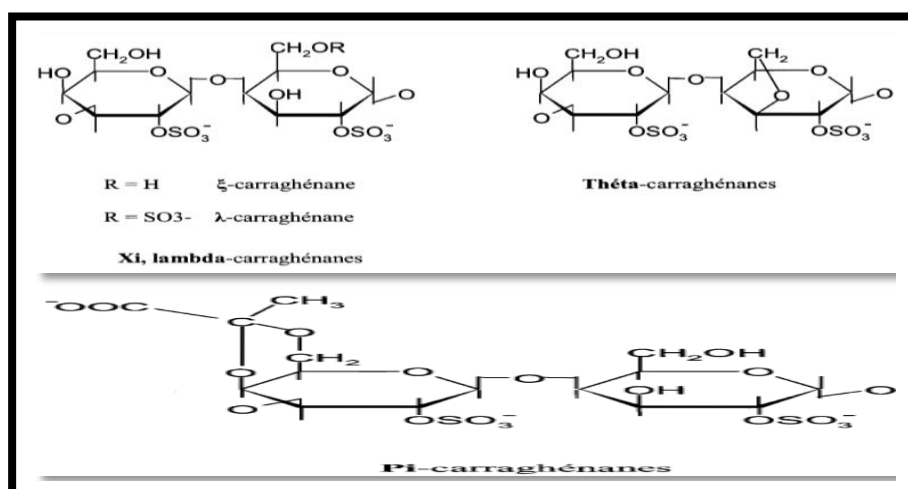


Figure 30 : Structure des carraghénanes de la famille des Lambda (GARON-LARDIERE, 2004).

- **Famille des Bêta-carraghénanes**

Selon GARON-LARDIERE (2004), les Bêta-carraghénanes sont composées des carraghénanes dans lesquels les résidus 3- β -D-galactopyranose ne sont pas sulfatés.

Cette famille regroupe le bêta (β), gamma (γ), alpha (α) et delta (δ)-carraghénanes dont l'unité 4- α -D-galactopyranose est différente d'un carraghénane à l'autre. Les structures de cette famille sont représentées sur la figure 31.

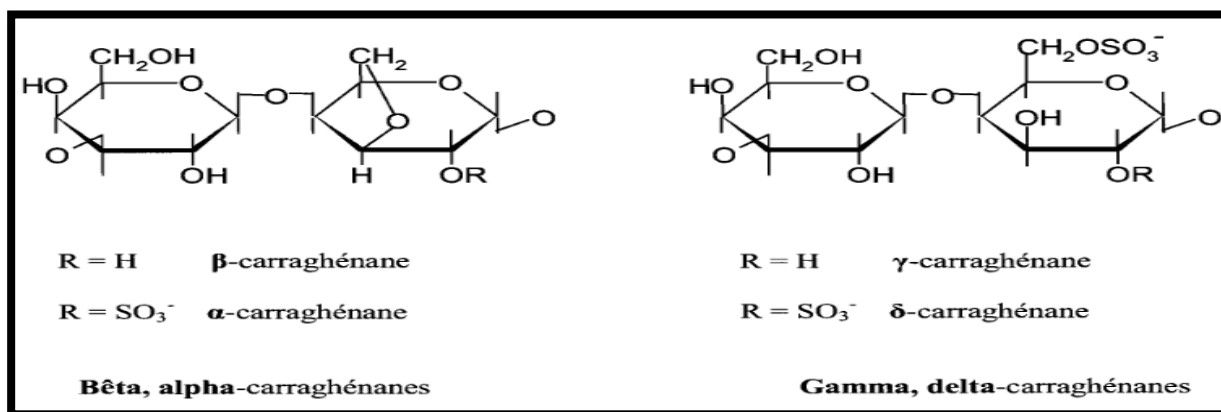


Figure 31 : Structure des carraghénanes de la famille des Bêta (GARON-LARDIERE, 2004).

- **Famille des Oméga-carraghénanes**

Au sein de cette famille, l'unité 3- β -D-galactopyranose est sulfatée en position 6 (MOLLION *et al.*, 1986). Cette famille comporte le psi (ψ)-carraghénane (MILLER, 2001). La figure 32 représente la structure des carraghénanes de la famille des Omégas.

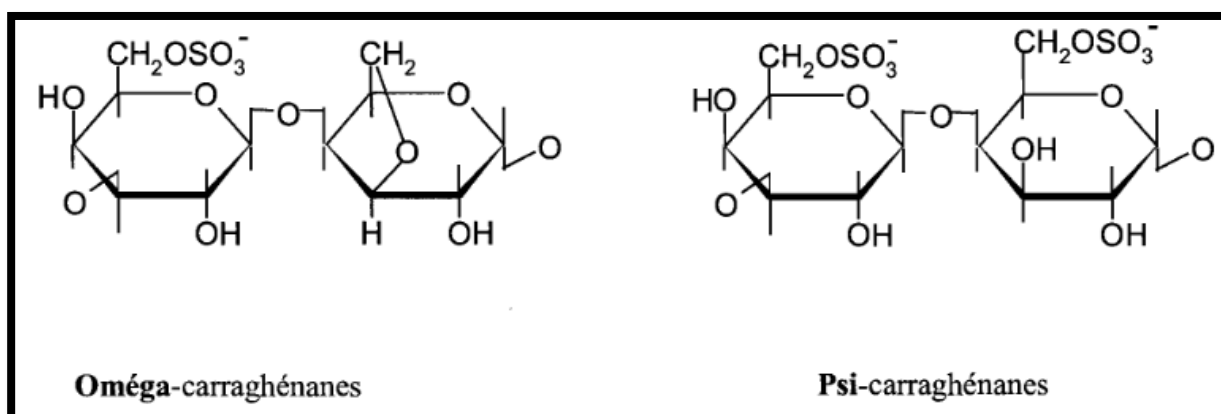


Figure 32 : Structure des carraghénanes de la famille des Omégas (GARON-LARDIERE, 2004).

CHAPITRE III

Applications des algues marines

III. Application des algues marines

Les domaines d'utilisation des macroalgues sont divers et variés.

III.1. Domaine de la nutrition

L'alimentation est la principale utilisation des algues dans le monde, elle représente 75 % de l'exploitation totale (FALLER, 2011).

Des études épidémiologiques menées en Asie avaient mis en évidence une incidence plus faible des cancers du sein, du colon et de la prostate liée à leur régulière consommation (HADE, 2002).

La valeur nutritionnelle des algues peut s'expliquer par la présence conjointe de trois grandes catégories de composantes (protéines, fibres et minéraux), mais également par la présence d'autres métabolites présentant des propriétés antioxydantes tels que les polyphénols, les vitamines ainsi que les acides gras polyinsaturés (MARFAING, 2007).

III.1.1. Alimentation humaine

1. Les métabolites primaires

A. Les protéines et les acides aminés

La teneur en protéines des algues marines varie fortement entre les espèces et dépend des saisons et des conditions environnementales (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

Généralement, la fraction protéique des macroalgues marines brunes est faible (3 à 15%) de la matière sèche, comparée à celles des macroalgues vertes et rouges (10 à 47%) (LAKHDAR, 2018). *Palmaria palmata* et *Porphyra tenera*, sont deux algues rouges les plus nutritives, avec un contenu protéiques de 35 % et 47 % de la matière sèche, respectivement. Ces teneurs sont comparables à celles trouvées dans les légumes riches en protéines comme le soja, dans lequel les protéines représentent 35 % de la matière sèche.

Les protéines de l'algue rouge *Porphyra tenera* présentent une composition en acides aminés proche de celle de l'ovalbumine (MABEAU et FLEURENCE, 1993). La composition en acides aminés des protéines de l'algue rouge *Porphyra tenera* avec celle de l'ovalbumine est indiquée dans le tableau V.

Tableau V : Comparaison de la composition en acides aminés des protéines de l'algue rouge *Porphyra tenera* avec celle de l'ovalbumine (MABEAU et FLEURENCE, 1993).

Composition (acide aminé g /100 g protéine)		
Acides aminés	<i>Porphyra tenera</i>	Ovalbumine
Tryptophane	1.3	1.0
Lysine	4.5	7.7
Histidine	1.4	4.1
NH3	5.1	5.3
Arginine	16.4	11.7
Acide aspartique	7.0	6.2
Thréonine	4.0	3.0
Sérine	2.9	6.8
Acide glutamique	7.2	9.9
Proline	6.4	2.8
Glycine	7.2	3.4
Alanine	7.4	6.7
Cystéine	0.3	1.4
Valine	6.4	5.4
Méthionine	1.7	3.1
Isoleucine	4.0	4.8
Leucine	8.7	7.2
Tyrosine	2.4	1.8
Phénylalanine	3.9	4.1
(totale)	(98.2)	(95.4)

B. Les fibres

Les algues constituent une source importante de fibres (33 à 61 % de la composition totale). Leurs structures sont variées, et elles sont différentes des fibres des végétaux terrestres. Parmi ces fibres : l'agar, les carraghénanes, les xylanes, l'alginate, les fucanes, les laminarines et les ulvanes (CHOUIKHI, 2013).

Ces fibres favorisent des effets physiologiques bénéfiques, en facilitant le transit intestinal et en augmentant la sensation de satiétés, contribuant ainsi à faire baisser le taux de cholestérol dans le sang, ainsi que la réduction des besoins en insuline...etc (MACARTAIN *et al.*, 2008).

C. Les minéraux

Les algues puisent dans la mer une richesse très importante et très variées en éléments minéraux. La teneur en minéraux varie entre 8 et 40 % de la matière sèche (MACARTAIN *et al.*, 2008).

La composition minérale est variable selon différents facteurs saisonniers, environnementales, géographiques et physiologiques (MABEAU et FLEURENCE, 1993).

Cette fraction minérale offre une grande diversité de macroéléments comme le sodium, calcium, magnésium, potassium, chlore, soufre et le phosphore mais également d'oligo-éléments tels que l'iode, le fer, le zinc, le cuivre, le sélénium, le molybdène, le fluore, le manganèse, le bore, le nickel et le cobalt (MACARTAIN *et al.*, 2008). La composition minérale de certaines algues est indiquée dans le tableau VI.

Tableau VI : La composition minérale de certaines algues comestibles (mg/ 100 de matière sèche) (MABEAU et FLEURENCE, 1993).

Minéraux	Les macroalgues		
	<i>Palmaria palmata</i>	<i>Laminaria sp.</i>	<i>Ulva sp.</i>
Sodium	1700-2500	900-6000	900-5900
Potassium	7000-9000	1300-10600	730-1030
Phosphore	360	150-800	90-270
Calcium	560-1200	500-3000	860-5600
Magnésium	170-500	500-2000	2000-5200
Iode	10-100	200-1000	2-25

D. Les lipides

La teneur lipidique des algues diffère de celle des végétaux terrestres, elle est très faible et varie de 1 à 3 % de la matière sèche. Les algues contiennent une proportion importante en acides gras essentiels tels que l'oméga-3 (acide α -linoléique) et l'oméga-6 (acide linoléique) (KHOTIMCHENKO, 2003 ; MENDIS et KIM, 2011 ; TABARSA *et al.*, 2012).

La proportion faible d'acide gras dans la composition des algues vertes les rend très intéressantes dans le cadre d'une alimentation hypocholestérolémiante (PILLARD, 2016).

2. Les métabolites secondaires

A. Les polyphénols

Les polyphénols des algues marines appelés phlorotannins constituent un groupe très hétérogène de molécules (MARFAING et YANNICK, 2007). La figure 33 illustre la structure chimique de phlorotannins.

Parmi eux on retrouve : les acides phénoliques (acide hydroxybenzoïque, acide hydroxycinnamique), les flavonoides (flavones, flavonols), les isoflavonoides (isoflavones), les stilbènes et les lignanes (MANACH *et al.*, 2004). Le tableau VII représente les structures chimiques des polyphénols.

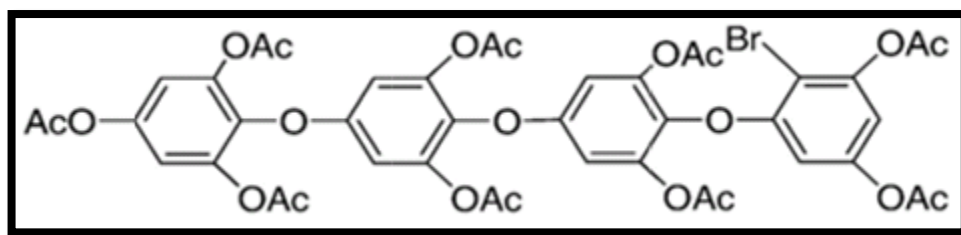


Figure 33 : Structure chimique de Phlorotannins (CHOUIKHI, 2013).

Tableau VII : Structures chimiques des polyphénols (MANACH *et al.*, 2004).

Polyphénols	Structure
Acide hydroxybenzoïque	
Acide hydroxycinnamique	
Flavones	Flavones
Flavonols	Flavonols
Isoflavones	
Stilbènes	
Lignanes	

B. Les vitamines

La composition vitaminique des algues est intéressante et peut varier selon l'espèce d'algue, la saison, le stade de croissances et les paramètres environnementaux. L'ensemble des vitamines représenté par les groupes : A, B1, B2, B6, B12, C, D et E.

Les teneurs en vitamine B12 sont assez importantes dans les algues contrairement aux plantes terrestres qui en sont totalement dépourvues (MARFAING et YANNICK, 2007 ; CHOUIKHI, 2013).

Les macroalgues contiennent également des teneurs non négligeables en vitamine K, qui est un activateur des facteurs de coagulation (MARFAING, 2017).

III.1.2. Alimentation animale

Les algues sont utilisées directement dans l'alimentation animale, sous forme de farines pour certaines espèces de poissons, élevées en captivité, ou sous forme de granulés rajoutés à l'alimentation pour le bétail.

On les trouve aussi fréquemment sous forme de complément alimentaire en vue de contrer une carence. Par exemple, dans les élevages de volaille, la supplémentation en calcium apportée par des granulés issus d'algues permet d'améliorer « naturellement » la qualité des œufs (PILLARD, 2016). Parmi les algues les plus utilisés, on peut citer *Macrocystis pyrifera* et *Ascophyllum nodosum* (YOUSSEF, 2016).

III.2. Application agroalimentaire

Les algues sont largement utilisées en industrie agro-alimentaire, les agars, les carraghénanes et les alginates sont des extraits d'algues qui entrent dans de nombreux aliments de l'industrie agro-alimentaire comme des additifs comme ils sont montrés dans le tableau VIII (ALEM, 2015).

Tableaux VIII : Principaux additifs dérivés des algues utilisés par l'industrie alimentaire (FALLER, 2011 ; MESNILDREY, 2012 ; CHOUIKHI, 2013).

Code	Nom d'additif	Fonction	Algues producteurs	Utilisation
E401-E405	Alginate	Stabilisant Epaississant	Algues brunes	-Glaces et crèmes glacées. -Produits pour pâtisseries -Boissons
E406	Agar –agar	Gélifiant Epaississant	Algues rouges	-Confitures -Produits laitiers acides -Glaçages en pâtisseries -Sauces et sauces salades
E407	Carraghénanes	Stabilisant Epaississant	Algues rouges	-Desserts laitiers -Laits chocolatés - Conserves de viande

III.3. Application en agriculture

En agriculture, les algues sont principalement utilisées comme engrais ou produits phytosanitaires.

➤ Les engrais

Les algues marines sont transformées en poudre, en liquides ou en crèmes. Elles peuvent être disposées au pied de la plante cultivée ou pulvérisées sur ses feuilles. L'ajout de l'algue permet d'augmenter la capacité de rétention de l'eau dans le sol, d'améliorer sa texture, de maintenir et d'enrichir le sol par des traces de métaux (Cu, Co, Zn, Mn, Fe, N), de fournir des éléments essentiels aux plantes, d'améliorer la germination et d'augmenter le rendement.

Le maërl est le nom commun d'un engrais dérivé d'algues rouges calcaires. Les algues corallines *Phymatolithon calcareum* et *Lithothamnion corallioides* sont les composants importants du maërl (ALEM, 2015 ; LAKHDAR, 2018).

➤ Produits phytosanitaires

Les macroalgues contiennent des composés tels que les cytokinines, les auxines et les gibbérellines, qui favorisent la germination, la croissance des tiges ou des feuilles et la floraison. Certains de ces composés agissent comme des agents de protection biologique contre les maladies des plantes en stimulant leurs défenses naturelles (FALLER, 2011).

III.4. Applications pharmaceutiques

➤ Excipients de médicaments

Les agars sont très utilisés comme excipients dans l'industrie pharmaceutique pour leurs propriétés gélifiantes, stabilisantes et épaississantes. Leurs propriétés stabilisantes sont intéressantes pour des solutions contenant de l'alcool ou du cholestérol. Quant à leurs propriétés gélifiantes, elles sont employées notamment dans la confection des pommades et entre dans la composition des pâtes à empreintes dentaires en dentisterie.

Par ailleurs, l'acide alginique est utilisé comme agent désintégrant et dispersant. Il gonfle en présence de l'eau assurant ainsi une dispersion rapide du médicament (ALEM, 2015).

➤ Les pansements et compresses

Les compresses stériles, telles que l'Algostéril® (dispositif de classe III), obtenues par tissage de fils fins d'alginate de calcium sont couramment utilisées dans de nombreux services notamment ceux de néphrologie, diabétologie, chirurgie viscérale et moyen séjour.

Il existe également des mèches d'alginate de calcium (extrait du tissu de soutien rigide de certaines espèces d'algues brunes: *Laminaria hyperborea* stériles (Coalgan®) ou des compresses (Coalgan-H®) comme cela le montre la figure 35, dispositifs de classe IIb. Elles sont utilisées dans les saignements cutanés et muqueux. Coalgan-H® s'utilise chez l'enfant, l'adulte, la femme enceinte ou encore les patients présentant des troubles de l'hémostase congénitaux ou acquis (ALEM, 2015).

Quant aux carraghénanes, ils sont utilisés comme des pansements gastriques dans le traitement des ulcères (**GARON-LARDIERE, 2004**).



Figure 35 : Le coalgan® compresses hémostatiques constituées de fibres d'alginate de calcium issu d'algues marines (**FALLER, 2011**).

III.5. Application médicales

L'utilisation de produits d'origine naturelle, constitue une alternative intéressante pour l'utilisation de matières entièrement synthétique.

Dans ce contexte, les études réalisées ont montré que les algues renferment une grande quantité de molécules d'intérêt médical. L'agar, les carraghénanes et encore les alginates, sont quelques-unes des molécules les plus utilisées dans des domaines médicaux très divers, comme les anticoagulants, les antioxydants, la conception de pansements absorbant...etc (**PILLARD, 2016**).

1. Activité antimicrobienne

Afin de découvrir de nouveaux antimicrobiens pour combattre les souches bactériennes pathogènes résistantes aux antibiotiques, les niches écologiques marines ont été décrites récemment comme « particulièrement prometteuses » (**MAYER et al., 2011**).

Les polysaccharides sulfatés extraits d'algue verte *Chlamydomonas reinhardtii* ont un potentiel antibactérien très important. Les concentrations élevées de ces polysaccharides montrent une bonne activité inhibitrice sur la formation des colonies bactériennes notamment des souches : *Bacillus subtilis*, *Streptococcus*, *Neisseria muqueuse* et *Escherichia coli* (**VISHWAKARMA et VAVILALA, 2019**).

2. Activité antivirale

Les algues marines sont également une source naturelle d'agents antiviraux (**PONCE et al., 2003**).

Des études menées par (**SHI et al., 2017**), ont montré que les carraghénanes en particulier les formes lambda, iota et kappa, ont des activités antivirales contre plusieurs virus grâce au mécanisme de blocage de l'attachement virale.

Ces études *in vitro* ont montrées que les lambda-carraghénanes ont une activité antivirale sur le virus de l'herpe simplex (HSV), et ce par de sa combinaison avec les glycoprotéines de l'enveloppe virale et en empêchant la liaison du virus au récepteur de la surface cellulaire, ce qui rend le virus incapable de terminer le processus d'infection. La figure 36 a illustre le mécanisme d'inhibition de l'attachement virale en présence des carraghénanes.

D'après (RIOUX, 2010), les fucanes d'algues brunes *Saccharina longicuris* possèdent des activités antivirales *in vitro* en inhibant l'infection des cellules hôtes par le VIH (virus de l'immunodéficience humaine). Le mécanisme d'action des fucanes contre le VIH se situe au niveau de l'inhibition de l'attachement du virus sur les cellules TCD4 en empêchant la liaison entre la glycoprotéine 120 et le récepteur CD4 des cellules hôtes. La figure 36 b représente le mécanisme d'inhibition de l'attachement du VIH sur les cellules CD4 en présence des fucanes.

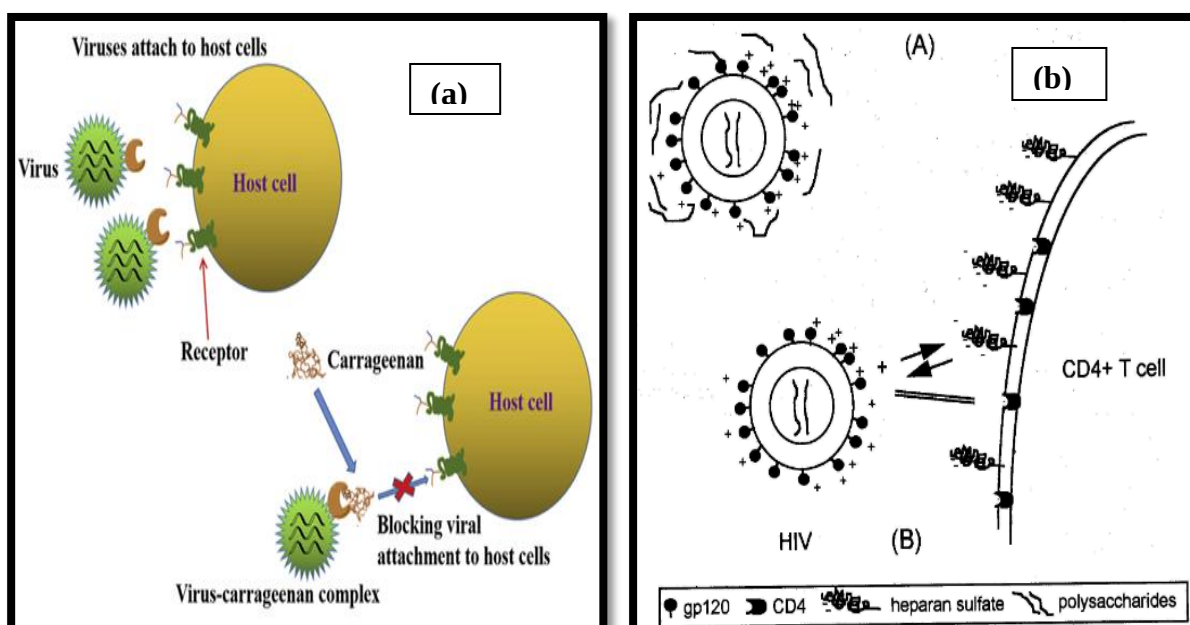


Figure 36 : Mécanisme d'inhibition de l'attachement virale en présence des carraghénanes (a) (SHI *et al.*, 2017) et des fucanes (b) (RIOUX, 2010).

3. Activité anticoagulante

La coagulation est un phénomène physiologique, procédant en cascade et faisant intervenir plusieurs protéines plasmatiques notamment les facteurs de coagulation (IXa, XIa et XIIa) et des enzymes procoagulantes, comme la thrombine (GRAUFFEL *et al.*, 1989).

Lors d'une transfusion sanguine ou d'une opération, la coagulation du sang n'est pas un phénomène souhaitable. Des médicaments comme l'héparine et la warfine sont administrés aux patients pour limiter ce phénomène. Les fucanes ont été proposés comme alternative à l'héparine, car ils ont moins de risque de contenir des virus puisque celle-ci provient fréquemment du porc ou du bœuf (DURIG *et al.*, 1997).

Les fucanes d'algues brunes ont une activité anticoagulante due d'une part, à leur interaction avec les enzymes notamment : l'antithrombine III et/ ou les facteurs de coagulations, d'une autre part, son action directe sur la thrombine provoque l'arrêt de la coagulation (**GRAUFFEL *et al.*, 1989**).

Les propriétés anticoagulantes des carraghénanes (**CARLUCCI *et al.*, 1997 ; YAMADA *et al.*, 2000**) et les fucanes (**ABD EL BAKY *et al.*, 2009**) sont bien connues. Ils agissent de façon similaire à l'héparine, qui est à l'heure actuelle l'anticoagulant le plus utilisé dans le traitement de la thrombose (formation de caillots dans le sang) (**KAKKAR *et al.*, 1989**).

4. Activité antioxydante

Selon **LI et KIM (2011)**, les polysaccharides sulfatés issus des algues vertes, présentent un effet antioxydant aussi élevé que celui d'antioxydants d'origine synthétique. Selon certains auteurs, l'effet antioxydant des molécules serait dû à leur important degré de sulfatation, leur faible poids moléculaire, et à leur composition en acides glucuroniques et iduroniques.

En outre, certains auteurs montrent que sous la forme acétylée et benzoylée, l'activité antioxydante des ulvanes est encore plus importante (**QI *et al.*, 2006**). Ces molécules possèdent donc une bonne capacité à contrer le stress oxydatif, par inhibition des radicaux libres responsables de nombreuses pathologies, comme les cancers (**PILLARD, 2016**).

5. Activité antiproliférative et anticancéreuse

L'incapacité de guérir de nombreuses maladies, comme le cancer, a stimulé la nécessité de développer de nombreux médicaments à partir de sources naturelles. Actuellement, de nombreuses recherches pharmaceutiques et médicales font appel à l'environnement marin (**MHADHEBI *et al.*, 2012**).

Au cours de la dernière décennie, environ 2500 nouvelles molécules d'origine marine à activité antiproliférative ont été découvertes, cependant, les modes d'actions de leur activités restent à élucider (**ATHOKORALA *et al.*, 2009**).

ATHOKORALA *et al.*, en 2009, ont mis en évidence les effets anticancéreux, antiprolifératifs et antimétastatiques d'un polysaccharide (ECSP) extrait d'une algue brune *Ecklonia cava*. Ils ont traité les cellules cancéreuses leucémiques humaines (U-937) avec un colorant (Heachest 33342) pendant 24h en présence et en absence de l'ECSP et grâce à un microscope à fluorescence, ils ont constatés que l'ECSP provoque la mort de ces cellules.

Les cellules vivantes apparaissent avec des noyaux normaux avec une structure organisée comme le montre la figure 37 A, par contre les cellules apoptotiques peuvent être identifiées par la présence des fragmentations nucléaires comme le montre la figure 37 B.

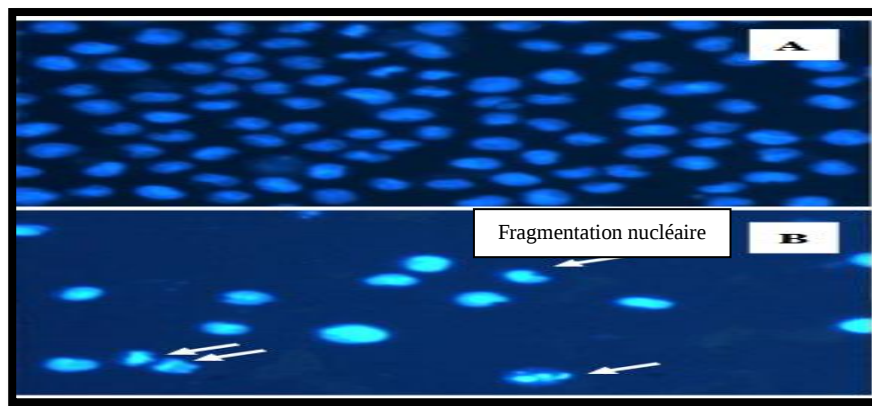


Figure 37 : Effet d'un polysaccharide sulfaté d'*E. cava* sur les cellules U-937 (A : absence, B : présence de polysaccharide) (ATHOKORALA *et al.*, 2009).

Une autre étude menée par **BILAN *et al.*, (2017)**, sur les fucanes d'une algue brune *Sargassum aquifolium*, montre que ces polysaccharides présentent un potentiel d'inhibition important sur les cellules humaines cancéreuses HepG2 (carcinome hépatocellulaire). Les résultats de l'étude montrent que les fucanes induisent une inhibition efficace de la tumeur par l'apoptose des cellules HepG2. La figure 38 représente la microphotographie démontrant l'influence de fucane sur la croissance des cellules HepG2.

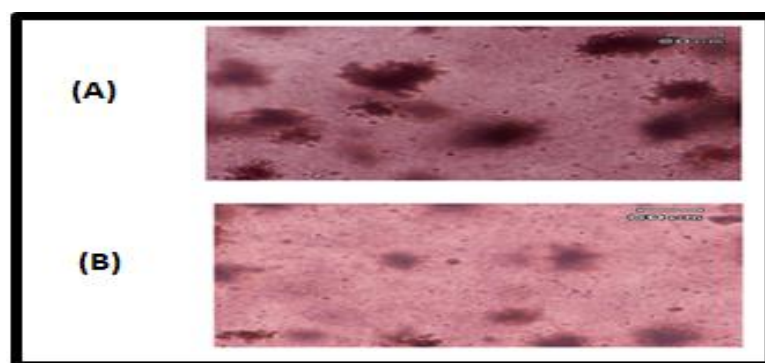


Figure 38 : La microphotographie démontrant l'influence de fucane sur la croissance des cellules HepG2 (A : en absence, B : en présence de fucane) (BILAN *et al.*, 2017).

6. Activité Immunomodulatrice

Cette activité a été mise en évidence sur les macrophages RAW 264.7 dont la stimulation avait été effectuée par l'ajout de polysaccharide sulfaté extrait d'une algue verte *Enteromorpha prolifera* (KIM *et al.*, 2011) et d'*Ulva rigida* (LEIRO *et al.*, 2007).

Les macrophages sont des cellules multifonctionnelles impliquées dans les réponses immunitaires innées et adaptatives. Ils participent à la réalisation des processus inflammatoires importants, dans l'élimination des agents pathogènes, ils peuvent aussi participer à la libération des cytokines anti-inflammatoires. Il est donc intéressant de pouvoir modifier le fonctionnement de ces macrophages par stimulation sélective ou suppression de leur activité cellulaire.

Les résultats de ces études *in vitro*, indiquent que les polysaccharides sulfatés d'*E. prolifera* et d'*Ulva rigida* stimulent la prolifération des macrophages en induisant la libération de molécules inflammatoires telles que l'oxyde nitrique (NO). Cette molécule et, avec d'autres composés chimiques, sont responsables de la mise en place de processus immunitaires, permettant à l'organisme de lutter efficacement contre les agents pathogènes.

Une étude française menée par **BERRI *et al.*, (2016)**, a démontré *in vitro*, la capacité des ulvanes à stimuler la réponse immunitaire de cellules épithéliales intestinales porcines, par une production de cytokine médiatrice de l'immunité cellulaire tel que : IL8, CCL20, IL1 α et le TNF α comme ils sont montrés dans la figure 39, responsables des processus anti-inflammatoires et de l'immunomodulation.

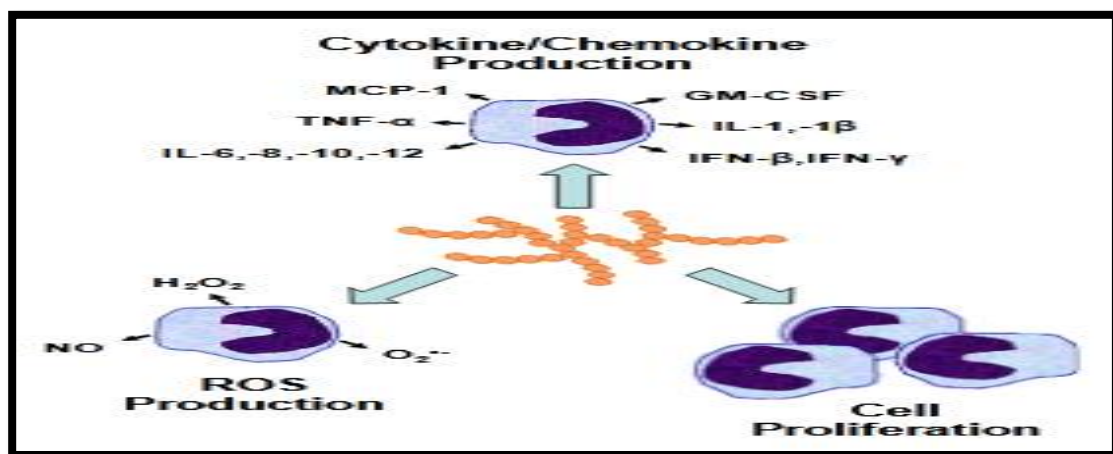


Figure 39 : Activation des cellules épithéliales intestinales par les polysaccharides (SCHEPETKIN et QUINN, 2006).

III.6. En cosmétique, les soins aux algues

Durant ces dernières décennies, la filière de cosmétique s'appuie beaucoup plus sur les substances d'origines naturelles que sur les produits chimiques artificiels. L'avantage c'est que ces produits n'ont pas d'effets secondaires et ne présentent pas de risque pour la santé humaine (**LAKHDAR, 2018**).

Aujourd'hui en cosmétiques, les algues sont partout, elles sont incorporées dans des produits de maquillages, savons, shampoings, mousses à raser, crèmes hydratantes...etc. Elles sont aussi très utilisées en thalassothérapie (**PILLARD, 2016**).

De récents travaux ont permis de purifier un extrait actif (HPS3^R) issu de l'algue méditerranéenne *Padina pavonica*, largement utilisé dans des crèmes anti-âges. Cet extrait permet de stimuler la synthèse des glycosaminoglycanes (GAGs), qui sont des molécules très hydrophiles qui constituent une partie du derme. Les GAGs sont responsables des propriétés mécaniques du derme. Avec l'âge, le contenu du derme en GAGs diminue, provoquant l'amincissement et le dessèchement de l'épiderme (**PIERRE, 2010**).

L'exemple d'extrait d'algue brune *Alaria esculenta* qui est un ingrédient antioxydant, piègeur de radicaux libres et anti-âge. Il présente plusieurs propriétés bénéfiques pour la peau démontrées par des tests in-vivo et in-vitro, stimule la synthèse d'acide hyaluronique, renforce la barrière hydrolipidique et hydrate la peau, stimule et protège le collagène et l'élastine de la dégradation (CHOUIKHI, 2013).

Les alginates et les fucanes extraits de macroalgues sont connus pour leurs effets contre l'acné et le vieillissement. Ils sont ainsi retrouvés dans la composition de nombreux produits de soin pour la peau (YOUSSEF, 2016).

Dans les produits de beauté, les carraghénanes apportent une douceur et une finesse aux crèmes de beauté (FALLER, 2011). Ils interviennent également, en tant qu'adouçissants dans les shampooings (GARON-LARDIERE, 2004).

III.7. Application écologiques

➤ Production d'oxygène

Les algues ont la capacité de libérer l'oxygène contenu dans la molécule d'eau, grâce au processus de la photosynthèse. L'oxygène ainsi libéré participe ensuite à la respiration des organismes aquatiques (ALEM, 2015).

➤ Traitement des eaux usées

L'alginate de sodium ou de potassium joue un rôle d'accélérateur de sédimentation. On ajoute de l'alginate de sodium aux eaux turbides stockées dans les bassins, l'alginate se décompose, libérant un nuage d'acide alginique (plus dense que l'eau) qui entraîne les particules en suspension vers le fond du bassin.

Ce même procédé est utilisé pour clarifier le vin, la bière ou encore fabrication du sucre (FALLER, 2011).

Certaines espèces d'algue, tel que *Chaetomorpha linum*, ont la capacité de détoxifier des eaux industrielles via la biosorption de métaux lourds (PIERRE, 2010).

II.8. Application futurs

➤ Les bioénergies :

L'épuisement des ressources pétrolières encourage la recherche d'alternatives énergétiques durables. Actuellement, le potentiel de production de biocarburant à partir de culture d'algues fait l'objet de nombreuses études (DEMIRBAS, 2010).

Quelques avantages potentiels des biocarburants à base d'algues (FALLER, 2011).

- ✓ Contrairement aux biocarburants produits à partir d'amidon ou d'huile végétale, ces algues peuvent être cultivées sur des surfaces avec une eau impropre à la production agricole ;

- ✓ La production de ce biocarburant s'effectue par photosynthèse, elle nécessite de la lumière, de l'eau, et du CO₂ et de compléments nutritifs (qui peuvent être apportés par les eaux de ruissellement ou des eaux usées) ;
- ✓ Au cours de leur croissance, les algues consomment du dioxyde de carbone. Cela contribue à réduire les émissions de gazes. De plus, elles produisent de l'oxygène.
- ✓ Les algues utilisées ont un rendement à l'hectare par rapport aux espèces oléagineuses terrestres ;
- ✓ Les algues se reproduisent plus rapidement.

➤ **La batterie aux algues**

Des chercheurs de l'Université d'Uppsala (Suède) ont découvert une algue verte, *Aegagrophila linnaei* qui produirait une substance facilement isolable et à moindre coût susceptible d'alimenter les batteries. Ce produit non toxique, donnerait des batteries aussi flexibles et minces que celle au lithium qui est utilisé actuellement. Ces chercheurs ont réussi à produire une batterie d'une extrême légèreté qui bouleverse toutes les normes connues aussi bien en matière de capacité de stockage que de temps de charge (**FALLER, 2011**).

Conclusion

Conclusion

L'océan recèle de nombreuses ressources dont les algues occupent une place prépondérante. Ces dernières sont à l'origine de la vie dans les océans tout comme sur terre et ce en contribuant à la production de l'oxygène.

Aujourd'hui ces algues occupent des biotopes très variés donnant naissance à une extraordinaire diversité.

Ces algues, très prisées dans les pays asiatiques, ne connaissent pas un tel engouement dans les pays occidentaux, pourtant elles possèdent des valeurs nutritives très intéressantes.

Ce travail se veut être une actualisation des connaissances sur les propriétés des algues qui est dues à la présence de molécules biologiquement actives. Notre intérêt a été porté sur les polysaccharides comme les alginates, les carraghénanes, l'agar, les fucanes, les laminarines et les ulvanes.

Ces polysaccharides sont des macromolécules bioactives largement utilisées dans plusieurs domaines en raison de leurs caractéristiques et leurs propriétés spécifiques. Leurs propriétés gélifiante, émulsifiante et stabilisante, ont contribué à leurs utilisations en alimentation, pharmaceutiques, cosmétiques. Certains polysaccharides ont diverses activités biologiques (antimicrobienne, antivirale, anticoagulante, antioxydante, antiproliférative et immunomodulatrice).

L'hétérogénéité des algues et leur richesse en molécules poussent les chercheurs à découvrir des substances préventives ou curatives de maladies. Les algues n'ont pas fini de nous livrer tous leurs secrets et pourrait constituer une véritable filière du futur.

Résumé

Depuis leur apparition sur Terre jusqu'à aujourd'hui, les algues n'ont cessé d'être une source de vie. En libérant de l'oxygène et en formant l'ozone, elles ont permis le développement des autres espèces. Ces algues sont ancrées dans la culture asiatique où elles sont très employées.

Aujourd'hui, elles sont de plus en plus utilisées pour leurs hautes valeurs nutritives.

En effet, elles ont des potentialités nutritionnelles très variées. Ceci se justifie par : la présence d'une fraction minérale variée et abondante, qui constitue un apport important de macroéléments et oligoéléments, des protéines en quantité non négligeables, un contenu vitaminique varié, une fraction lipidique faible et un contenu en polysaccharides ayant des structures variées.

Les algues constituent également un réservoir important de molécules naturelles potentiellement actives qui peuvent agir comme des alternatives aux molécules médicamenteuses et elles sont identifiées comme des composés multifonctionnels avec plusieurs activités pharmacologiques notamment : antimicrobienne, antivirale, anticoagulante, antioxydante, antiproliférative et immunomodulatrice.

Mots clés : algues marines, polysaccharides, activités biologiques, molécules médicamenteuses.

Abstract

From their appearance on Earth until today, algae have continued to be a source of life. By releasing oxygen and forming ozone, they allowed the development of other species. These algae are anchored in Asian culture where they are widely used.

Today they are increasingly used for their high nutritional value.

Indeed, they have very varied nutritional potential. This is justified by : the presence of a varied and abundant mineral fraction, which constitutes a significant contribution of macroelements and trace elements, proteins in significant quantities, varied vitamin content, a low lipid fraction and a content of polysaccharides having structures varied.

Algae also constitute an important reservoir of potentially active natural molecules which can act as alternatives to drug molecules and they are identified as multifunctional compounds with several pharmacological activities including: antimicrobial, antiviral, anticoagulant, antioxidant, antiproliferative and immunomodulatory.

Keywords : marine algae, polysaccharides, biological activities, drug molecules.

Les Références Bibliographiques

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ

ABD EL BAKY, H., EL BAZ, F. & EL-BAROTY, G. (2009). Potential biological properties of sulphated polysaccharides extracted from the macroalgae *Ulva lactuca* L. Acad J Cancer Res, 2, 1-11.

ADAIKALARAJ, G., PATRIC, R. D., JOHNSON, M., JANAKIRAMAN, N. & BABU, A. (2012). Antibacterial potential of selected red seaweeds from Manapad coastal areas, Thoothukudi, Tamil Nadu, India. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2 (2), 1077–1080.

ALEM, M. (2015). Les compléments alimentaires à base d'algues. Thèse de Doctorat. Université Mohamed V-Rabat.

ANDERSON, N.S. & REES, D.A. (1965). Porphyrin : A Polysaccharide with a Masked Repeating Structure. Journal of the Chemical Society, 5887-5880.

ARAKI, C. (1966). Some Recent Studies On the Polysaccharides of Agarophytes. Proceedings of the Fifth International Seaweed Symposium, Halifax, August 25-28, 1965, 3-17.

ARESTA, M., DIBENEDETTO, A. & BARBERIO, G. (2005). Utilization of macro-algae for enhanced CO₂ fixation and biofuels production: Development of a computing software for an LCA study. Fuel Processing Technology, 86 (14-15), 1679–1693.

ATKINS, E.D.T. & PARKER, K.D. (1969). The Helical structure of a β -D-1,3-xylan. Journal of Polymer Science Part C : Polymer Symposia, 28 (1), 69-81.

ATHUKORALA, Y., AHN, G. N., JEE, Y.-H., KIM, G.-Y., KIM, S.-H., HA, J.-H., KANG, J.S. & JEON, Y.-J. (2009). Antiproliferative activity of sulfated polysaccharide isolated from an enzymatic digest of *Ecklonia cava* on the U-937 cell line. Journal of Applied Phycology, 21 (3), 307-314.

BECERRA-CELIS, G. (2009). Proposition de stratégies de commande pour la culture de microalgue dans un photobioréacteur continu. Thèse de Doctorat. Ecole Centrale des Arts et Manufactures « Ecole Centrale Paris ».

BEN AMOR BEN AYED, H. (2015). Etude et optimisation de la bioaccumulation de magnésium dans les microalgues « *Chlorella vulgaris* ». Thèse de Doctorat. Université de Paris-Saclay et de l'Université de Sfax. Versailles, France.

BERRI, M., SLUGOCKI, C., OLIVIER, M., HELLOIN, E., JACQUES, I., SALMON, H., DEMAIS, H., LE GOFF, M. & 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), 2999–3008.

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

BILAN, M. I., USTYUZHANINA, N. E., SHASHKOV, A. S., THANH, T. T. T., BUI, M. L., TRAN, T. T. V., BUI, V.N. & USOV, A. I. (2017). Sulfated polysaccharides of the Vietnamese brown alga *Sargassum aquifolium* (Fucales, Sargassaceae). Carbohydrate Research, 449, 23–31.

BOGORAD, L. (1975). Phycobiliproteins and complementary chromatic adaptation. Annual Review of Plant Physiology, 26 (1), 369-401.

BONDU, S., CERANTOLA, S., KERVAREC, N. & DESLANDES, E. (2009). Impact of the Salt stress on the photosynthetic carbon flux and ¹³C-label distribution within floridoside and digeneaside in *Solieria chordalis*. Phytochemistry, 70 (2), 173-184.

BURLLOT, A.-S. (2016). Valorisation des métabolites d'algues proliférantes par voie enzymatique : applications dans les domaines de la nutrition et santé animale, végétale et humaine, de la cosmétique et de l'environnement. Thèse de Doctorat. Université de Bretagne-Sud.

CARLUCCI, M. J., PUJOL, C. A., CIANCIA, M., NOSEDA, M. D., MATULEWICZ, M. C., DAMONTE, E. B. & CEREZO, A. S. (1997). Antiherpetic and anticoagulant properties of carrageenans from the red seaweed *Gigartina skottsbergii* and their cyclized derivatives: correlation between structure and biological activity. International Journal of Biological Macromolecules, 20 (2), 97–105.

CHOUANA, T. (2017). Caractérisation structurale et activités biologiques des polysaccharides d'*Astragalus gombo bunge*. Thèse de Doctorat. Université de Kasdi Merbah d'Ouargla.

CHOUIKHI, A. (2013). Les applications potentielles des macroalgues marines et les activités pharmacologiques de leurs métabolites : Revue. USTHB-FBS-4th International Congress of the Populations & Animal Communities « Dynamics & Biodiversity of the Terrestrial & Aquatic Ecosystems » « CIPCA4 » TAGHIT (Bechar)-ALGERIA, 1-40.

COLIN BARROW & FEREIDOO SHAHIDI (2008). Marine nutraceuticals and functional foods. Taylor & Francis Group. New York.

DEMIRBAS, A. (2010). Use of algae as biofuel sources. Energy Conversion and Management, 51 (12), 2738–2749.

DURIG, J., BRUHN, T., ZURBORN, K.-H., GUTENSOHN, K., BRUHN, H.D. & BERESS, L. (1997). Anticoagulant fucoidan fractions from *Fucus vesiculosus* induce platelet activation in vitro. Thrombosis Research, 85 (6), 479-491.

EL GAMAL, A.A. (2010). Biological importance of marine algae. Saudi Pharmaceutical Journal, 18 (1), 1-25.

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ

FALLER, H. (2011). Les Applications et la Toxicité des Algues Marines. Thèse de Doctorat. Université de Limoges.

FAO (2004). Situation mondiale des pêches et de l'aquaculture, 111-148.

FAO (2014). Domaine de l'industrie des algues marines.

FARID, Y., CHENNAOUI, M., ASSOBEI, O. & ETAHIRI, S. (2012). Evaluation de l'effet du lieu de recolte des algues marines des cotes atlantiques marocaines sur l'activité antibactérienne et anti-inflamatoire. Rev. Microbiol. Ind. San. et Environn., 6 (1), 54-66.

GARON-LARDIERE, S. (2004). Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge *Asparagopsis armata* (Bonnemaisoniales). Thèse de Doctorat. Université de Bretagne Occidentale.

GERALDINE, D. & CELINE, L. (2009). Les algues, le trésor de la mer. Haute école de santé Genève, 1-7.

GRETZ, M.R., SOMMERFELD, M.R. & ARONSON, J.M. (1982). Cell wall composition of the generic phase of *Bangia atropurpurea* (rhodophyta). Botanica Marina, 25 (11), 529-535.

GRAUFFEL, V., KLOAREG, B., MABEAU, S., DURAND, P. & JOZEFONVICZ, J. (1989). New natural polysaccharides with potent antithrombic activity: fucans from brown algae. Biomaterials, 10 (6), 363–368.

HADE, A., (2002). Nos lacs – les connaître pour mieux les protéger. Éditions Fides, 360 p.

JUIN, C. (2015). Extraction, identification et caractérisation pharmacologique de pigments de *Porphyridium purpureum* sur cellules de mélanome humain. Thèse de Doctorat. Université de La Rochelle.

KAKKAR, V. V., STRINGER, M. D., HEDGES, A. R., PARKER, C. J., WELZEL, D., WARD, V. P., SANDERSON, R.M., COOPER, D. & KAKKAR, S. (1989). Fixed combinations of low-molecular weight or unfractionated heparin plus dihydroergotamine in the prevention of postoperative deep vein thrombosis. The American Journal of Surgery, 157 (4), 413–418.

KARSTEN, U., BARROW, K. D. & KING, R. J. (1993). Floridoside, L-isofloridoside, and d-isofloridoside in the red alga *Porphyra columbina* (seasonal and osmotic effects). Plant Physiology, 103 (2), 485-491.

KHOTIMCHENKO, S. V. (2003). The fatty acid composition of glycolipids of marine macrophytes. Russian Journal of Marine Biology, 29 (2), 126–128.

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ

KIM, J.-K., CHO, M. L., KARNJANAPRATUM, S., SHIN, I.-S. & YOU, S. G. (2011). In vitro and in vivo immunomodulatory activity of sulfated polysaccharides from *Enteromorpha prolifera*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 49 (5), 1051–1058.

KLOAREG, B. & QUATRANO, R.S. (1988). Structure of the cell walls of marine algae and ecophysiological functions of the matrix polysaccharides. *Oceanography and Marine Biology : Annual Review*, 26, 259-315.

LAHAYE, M. (2001). Developments on gelling algal galactans, their structure and physico-chemistry. *Journal of Applied Phycology*, 13 (2), 173-184.

LAKHDAR, F. (2018). Contribution à l'étude des potentialités antiproliférative et antibactérienne des algues brunes et rouges de la côte d'El Jadida pour une valorisation médicale et environnementale. Thèse de Doctorat. Université de Nantes.

LECLERC V. & FLOC'H J.Y. (2010). Les Secret des Algues. Editions Quae. Editions Quae. France.

LEIRO, J.M., CASTRO, R., ARRANZ, J.A. & LAMAS, J. (2007). Immunomodulating activities of acidic sulphated polysaccharides obtained from the seaweed *Ulva rigida* C. agardh. *International Immunopharmacology*, 7 (7), 879-888.

LI, Y.-X. & KIM, S.-K. (2011). Utilization of seaweed derived ingredients as potential antioxidants and functional ingredients in the food industry : an overview. *Food Science and Biotechnology*, 20 (6), 1461-1466.

MABEAU, S. & FLEURENCE, J. (1993). Seaweed in food products: biochemical and nutritional aspects. *Trends in Food Science & Technology*, 4 (4), 103–107.

MACARTAIN, P., GILL, C. I. R., BROOKS, M., CAMPBELL, R. & ROWLAND, I. R. (2008). Nutritional value of edible seaweeds. *Nutrition Reviews*, 65 (12), 535–543.

MANACH, C., SCALBERT, A., MORAND, C., REMESY, C. & JIMENEZ, L. (2004). Polyphenols: food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 79 (5), 727–747.

MANIVANNAN, K., KARTHIKAI DEVI, G., ANANTHARAMAN, P. & 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.

MARFAING, H. & LEART, Y. (2007). Les algues ont-elles une place en nutrition ? *Phytothérapie*, 5 (S1), 2-5.

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ

MARFAING, H. (2012). Les légumes de mer (algues) : des atouts nutritionnels à exploiter : les algues, un nouvel atout nutritionnel ? *Information Diététique*, (3), 13-23.

MARFAING, H. (2017). Qualités nutritionnelles des algues, leur présent et futur sur la scène alimentaire. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 52 (5), 257-268.

MARION, G. (2007). Analyse structurale des carraghénanes par hydrolyse enzymatique. *Biochimie, Biologie Moléculaire*. Université de Bretagne Occidentale.

MAYER, A. M. S., RODRÍGUEZ, A. D., BERLINCK, R. G. S. & FUSETANI, N. (2011). Marine pharmacology in 2007–8: Marine compounds with antibacterial, anticoagulant, antifungal, anti-inflammatory, antimalarial, antiprotozoal, antituberculosis, and antiviral activities; affecting the immune and nervous system, and other miscellaneous mechanisms of action. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 153 (2), 191–222.

MILLER, I. J. (2001). The structure of the carrageenan extracted from the tetrasporophytic form of *Seenogramme interrupta* as determined by ¹³C NMR spectroscopy. *Botanica Marina*, 44, 583-587.

MCCRACKEN, D. A. & CAIN, J. R. (2006). Amylose in floridean starch. *New Phytologist*, 88 (1), 67–71.

MENDIS, E. & KIM, S.-K. (2011). Present and future prospects of seaweeds in developing functional foods. *Advances in Food and Nutrition Research*, 1–15.

MESNILDREY, L., JACOB, C., FRANGOUEDES, K., REUNAVOT, M. & LESUEUR, M. (2012). La filière des macro-algues en France. Rapport d'étude. NETALGAE - Interreg IVb., 38 p.

MHADHEBI, L., DELLAI, A., CLARY-LAROCHE, A., BEN SAID, R., ROBERT, J. & BOURAOUI, A. (2012). Anti-inflammatory and antiproliferative activities of organic fractions from the mediterranean brown seaweed, *Cystoseira compressa*. *Drug. Dev. Res.* 73, 82-89.

MOLLION, J., MOREAU, S. & CHRISTIAEN, D. (1986). Isolation of the new type of carrageenan from *Rissoella verruculosa* (Bert) J. Ag. (Rhodophyta, Gigartinales). *Botanica Marina*, 29, 549-552.

NAGAOKA, M., SHIBATA, H., KIMURA-TAKAGI, I., HASHIMOTO, S., AIYAMA, R., UEYAMA, S. & YOKOKURA, T. (2000). Anti-ulcer effects and biological activities of polysaccharides from marine algae. *BioFactors*, 12, 267-274.

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ

OLIVEIRA, M.N. de, FREITAS, A.L.P., CARVALHO, A.F.U., SAMPAIO, T.M.T., FARIAS, D.F., ALVES TEIXEIRA, D.I., GOUVEIA, S.T., PEREIRA, J.G. & SENA, M.M. de C.C. de. (2009). Nutritive and non-Nutritive Attributes of Washed-up Seaweeds from the Coast of Ceará, Brazil. *Food Chemistry*, 115 (1), 254-259.

OUCIF, H. (2018). Valorisation des Algues de la Côte Ouest Algérienne : Potentiel Antioxydant et Hormonal. Thèse de Doctorat. Université d'Oran, Algérie.

OUMASKOUR, K., BOUJABER, N., ETAHIRI, S. & ASSOBBEI, O. (2013). Anti-inflammatory and Antimicrobial Activities of Twenty-Three Marine Red Algae from the Coast of Sidi Bouzid (El Jadida-Morocco). *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 5 (3), 145-149.

PATRICK, F. (2000). Catabolisme de la chlorophylle b structures, mécanismes et synthèses. Thèse de Doctorat. Université de Fribourg (Suisse).

PERCIVAL, E. (1979). The polysaccharides of green, red and brown seaweeds : their basic structure, biosynthesis and function. *British Phycological Journal*, 14 (2), 103-117.

PIERRE, G. (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. Thèse de Doctorat. Université de La Rochelle.

PILLARD, S. (2016). Mise au point sur les algues vertes risque environnementaux et valorisation. Thèse de Doctorat. Université de Picardie Jules Verne.

PONCE, N.M.A., PUJOL, C.A., DAMONTE, E.B., FLORES, M.L. & STORTZ, C.A. (2003). Fucoidans from the brown seaweed *Adenocystis utricularis* : extraction methods, antiviral activity and structural studies. *Carbohydrate Research*, 338 (2), 153-165.

QI, H., ZHONG, Q., ZHAO, T., HU, R., ZHANG, K., & LI, Z. (2006). In vitro antioxidant activity of acetylated and benzoylated derivatives of polysaccharide extracted from *Ulva pertusa* (Chlorophyta). *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 16 (9), 2441-2445.

RASMUSSEN, R. S. & MORRISSEY, M. T. (2007). Marine biotechnology for production of food ingredients. *Advances in Food and Nutrition Research*, 52 237–292.

REES, D. A. (1969). Structure, conformation, and mechanism in the formation of polysaccharide gels and networks. *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry*, 267–332.

RICHARD, A.A. (2016). Production piloté de polysaccharides sulfatés issus de macroalgues marines à visées anti-coagulante et cosmétique anti-âge. Thèse de Doctorat. Université de La Rochelle.

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ

RIOUX, L.-E. (2010). Caractérisation structurale et évaluation de l'activité biologique de polysaccharides extraits de *Saccharina longicuris*. Thèse de Doctorat. Université de Laval.

ROBYT, J. F. (1998). Polysaccharides structure and function. *Essentials of Carbohydrate Chemistry*, 157-227.

ROSS, A.G. (1953). Some typical analyses of red seaweeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 4 (7), 333-335.

RUIZ, G. (2005). Extraction, détermination structurale et valorisation chimique de phycocolloïdes d'algues rouges. Thèse de Doctorat. Université de Limoges.

SANTI, C., COPPETTA, D. & SANTORO, S. (2008). NMR analysis of non hydrolyzed samples of sodium alginate. 12th International Electronic Conference on Synthetic Organic Chemistry ECSOC-12, 1-10.

SCHEPETKIN, I. A. & QUINN, M. T. (2006). Botanical polysaccharides: macrophage immunomodulation and therapeutic potential. *International Immunopharmacology*, 6 (3), 317-333.

SEKAR, S. & CHANDRAMOHAN, M. (2008). Phycobiliproteins as a Commodity : trends in applied research, patents and commercialization. *Journal of Applied Phycology*, 20 (2), 113-136.

SHANMUGAM, M. & MODY, K.H. (2000). Heparinoid-active sulphated polysaccharides from marine algae as potential blood anticoagulant agents. *Current Science*, 79 (12), 1672-1683.

SHI, Q., WANG, A., LU, Z., QIN, C., HU, J. & YIN, J. (2017). Overview on the antiviral activities and mechanisms of marine polysaccharides from seaweeds. *Carbohydrate Research*, 453-454, 1-9.

SIALVE B. & STEYER J-P. (2013). Les microalgues, promesses et défis, *Innovations Agronomiques*, 26, 25-39.

SIKORA, P., TOSH, S. M., BRUMMER, Y. & OLSSON, O. (2013). Identification of high β -glucan oat lines and localization and chemical characterization of their seed kernel β -glucans. *Food Chemistry*, 137 (1-4), 83-91.

SIRBU, R., SAVA, C., GHERGIC, D. L. & MOUIMA, N. A. F.P. (2006). Caractérisation de certains principes actifs de *Ulva lactuca* et *Ulva rigida*-algues vertes du littoral roumain de la mer noire. *Scientific Study & Research*, 1, 193-198.

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ

SUDHAKAR, M.P., JAGATHEESAN, A., PERUMAL K. & ARUNKUMAR, K. (2015). Methods of phycobiliprotein extraction from *Gracilaria crassa* and its applications in food colourants. *Algal Research*, 8, 115–120.

TABARSA, M., REZAEI, M., RAMEZANPOUR, Z. & WAALAND, J. R. (2012). Chemical compositions of the marine algae *Gracilaria salicornia* (Rhodophyta) and *Ulva lactuca* (Chlorophyta) as a potential food source. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92 (12), 2500-2506.

TAKAICHI, S. (2011). Carotenoids in algae: distributions, biosyntheses and functions. *Marine Drugs*, 9 (6), 1101–1118.

USOV, A.I. (1992). Sulphated polysaccharides of the red seaweeds. *Food Hydrocolloids*, 6 (1), 9-23.

USOV, A.I. (1998). Structural analysis of red seaweed galactans of agar and carrageenan groups. *Food Hydrocolloids*, 12 (3), 301-308.

VISHWAKARMA, J. & VAVILALA, S.L. (2019). Evaluating the antibacterial and antibiofilm potential of sulphated polysaccharides extracted from green algae *Chlamydomonas reinhardtii*. *Journal of Applied Microbiology*, 127, 1004-1017.

VIOLA, R., NYVALL, P. & PEDERSEN, M. (2001). The unique features of starch metabolism in red algae. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 268 (1474), 1417-1422.

VOLMAN, J. J., RAMAKERS, J. D. & PLAT, J. (2008). Dietary modulation of immune function by β -glucans. *Physiology & Behavior*, 94 (2), 276–284.

WICKBERG, B. (1958). Synthesis of I-Glyceritol D-Galactopyranosides. *Acta Chemica Scandinavica*, 12 (6), 1187-1201.

YAMADA, T., OGAMO, A., SAITO, T., UCHIYAMA, H. & 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.

YOUSOUF, L. (2016). Fonctionnalisation de biopolymères extraits de macroalgues pour encapsuler des principes actifs hydrophobes. Thèse de Doctorat. Université de La Réunion.

ZEHLILA, A. (2017). Caractérisation structurale et fonctionnelle des métabolites de l'algue verte *Ulva rigida* au moyen d'une approche protéomique. Thèse de Doctorat. Université de Tunis El Manar.

Les sites internet :

- 1)- (<http://www.mer-littoral.org>).
- 2)- (<http://www.universalis.fr/encyclopedie/rhodophycees-algues-rouges/>).
- 3)- (<https://www.megazyme.com/mannan-1-4-beta-d-mannnan>).