

UNIVERSITE DE LIMOGES

FACULTE DE PHARMACIE

ANNEE 2011

THESE N°

LES APPLICATIONS ET LA TOXICITE DES ALGUES MARINES

THESE POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

présentée et soutenue publiquement

le 5 décembre 2011

par

Hortense FALLER

née le 03 décembre 1987, à Lannemezan (65)

EXAMINATEURS DE LA THESE

M. le Professeur Michel BOTINEAU Président
Mme Marion MILLOT, maître de conférences Juge
Melle Stéphanie CAHU, docteur en pharmacie Juge

UNIVERSITE DE LIMOGES

FACULTE DE PHARMACIE

ANNEE 2011

THESE N°

LES APPLICATIONS ET LA TOXICITE DES ALGUES MARINES

THESE POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

présentée et soutenue publiquement

le 5 décembre 2011

par

Hortense FALLER

née le 03 décembre 1987, à Lannemezan (65)

EXAMINATEURS DE LA THESE

M. le Professeur Michel BOTINEAU Président
Mme Marion MILLOT, maître de conférences Juge
Melle Stéphanie CAHU, docteur en pharmacie Juge

DOYEN DE LA FACULTE : Monsieur le Professeur Jean-Luc **DUROUX**

1^{er} VICE-DOYEN : Madame Catherine **FAGNERE**, Maître de Conférences

2^{ieme} VICE-DOYEN : Monsieur Serge **BATTU**, Maître de Conférences

PROFESSEURS :

BENEYTOUT Jean-Louis	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE
BOTINEAU Michel	BOTANIQUE ET CRYPTOLOGAMIE
BROSSARD Claude	PHARMACOTECHNIE
BUXERAUD Jacques	CHIMIE ORGANIQUE ET THERAPEUTIQUE
CARDOT Philippe	CHIMIE ANALYTIQUE ET BROMATOLOGIE
CHULIA Albert	PHARMACOGNOSIE
CHULIA Dominique	PHARMACHOTECHNIE
DELAGE Christiane	CHIMIE GENERALE ET MINERALE
DESMOULIERE Alexis	PHYSIOLOGIE
DREYFUSS Gilles	MICROBIOLOGIE-PARASITOLOGIE-IMMUNOLOGIE
DUROUX Jean-Luc	BIOPHYSIQUE, BIOMATHEMATIQUE ET INFORMATIQUE
LOUDART Nicole	PHARMACOLOGIE

**PROFESSEURS DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS DES DISCIPLINES
PHARMACEUTIQUES :**

LACHATRE Gérard	TOXICOLOGIE
MOESCH Christian	HYGIENE HYDROLOGIQUE ENVIRONNEMENT
ROGEZ Sylvie	MICROBIOLOGIE-PARASITOLOGIE-IMMUNOLOGIE

MAITRES DE CONFERENCES :

BASLY Jean-Philippe	CHIMIE ANALYTIQUE ET BROMATOLOGIE
BATTU Serge	CHIMIE ANALYTIQUE ET BROMATOLOGIE
BEAUBURN-GIRY Karine	PHARMACOTECHNIE
BILLET Fabrice	PHYSIOLOGIE

CALLISTE Claude	BIOPHYSIQUE, BIOMATHEMATIQUE ET INFORMATIQUE
CLEDAT Dominique	CHIMIE ANALYTIQUE ET BROMATOLOGIE
COMBY Francis	CHIMIE ORGANIQUE ET THERAPEUTIQUE
COURTIOUX Bertrand	PHARMACOLOGIE, PARASITOLOGIE
DELEBASSEE Sylvie	MICROBIOLOGIE-PARASITOLOGIE-IMMUNOLOGIE
DEMIOT Claire	PHARMACOLOGIE
FAGNERE Catherine	CHIMIE ORGANIQUE ET THERAPEUTIQUE
FROISSARD Didier	BOTANIQUE ET CRYPTOLOGAMIE
JAMBUT Anne-Catherine	CHIMIE ORGANIQUE ET THERAPEUTIQUE
LABROUSSE Pascal	BOTANIQUE ET CRYPTOLOGAMIE
LEGER David	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE
LIAGRE Bertrand	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE
LOTFI Hayat	TOXICOLOGIE
MARION-THORE Sandrine	CHIMIE ORGANIQUE ET THERAPEUTIQUE
MARRE-FOURNIER Françoise	BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE
MILLOT Marion	PHARMACOGNOSIE
MOREAU Jeanne	MICROBIOLOGIE-PARASITOLOGIE-IMMUNOLOGIE
POUGET Christelle	CHIMIE ORGANIQUE ET THERAPEUTIQUE
ROUSSEAU Annick	BIOPHYSIQUE, BIOMATHEMATIQUE ET INFORMATIQUE
SIMON Alain	CHIMIE GENERALE ET MINERALE
TROUILLAS Patrick	BIOPHYSIQUE, BIOMATHEMATIQUE ET INFORMATIQUE
VIANA Marylène	PHARMACOTECHNIE
VIGNOLES Philippe	BIOPHYSIQUE, BIOMATHEMATIQUE ET INFORMATIQUE

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES-PRATICIENS HOSPITALIERS DES DISCIPLINES PHARMACEUTIQUES :

DREYFUSS Marie-Françoise	CHIMIE ANALYTIQUE ET BROMATOLOGIE
---------------------------------	-----------------------------------

PROFESSEUR CERTIFIE :

MARBOUTY Jean-Michel	ANGLAIS
-----------------------------	---------

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur Michel BOTINEAU

Professeur de Botanique à la faculté de Pharmacie de Limoges

Je vous remercie d'avoir accepté de présider mon jury de thèse, ainsi que d'avoir encadré mon travail.

A Madame Marion MILLOT

Maître de conférences en Pharmacognosie à la faculté de Pharmacie de Limoges

Merci d'avoir accepté d'évaluer mon travail en tant que membre du jury et de m'avoir apporté des conseils lors de sa rédaction.

A Mademoiselle Stéphanie CAHU

Docteur en Pharmacie

Très touchée par la présence d'une toute nouvelle titulaire d'une pharmacie Bretonne. Je la remercie également pour tous ses conseils et les moments consacrés à me former. Je lui souhaite bon courage pour son installation.

A Mr le Professeur Buxeraud, sans qui je ne serais certainement pas venu étudier à Limoges.

A mon père, pharmacien passionné, pour ses conseils, son aide et ses photographies.

A mère, pour la relecture de ma thèse et pour sa présence à mes côtés dans les moments difficiles.

A mes deux sœurs, Kiterie et Marine pour leurs soutiens.

A Eric Burr, pour la relecture de ma thèse.

A Adeline, pour toute l'aide qu'elle m'a apportée pendant mon stage officinale de 6^{ième} année.

A Mme Teyssedre, pour son hospitalité à chacune de mes excursions à Limoges.

A Frédérique et Emilie, pour tout ce qu'elles m'ont apporté et les moments inoubliables passés ensemble. Merci également à Claire-Marie, Vanessa, Hélène, Sophie, Evodie, Anita, Marion, Aurélien, Leslie et Fanny, mes amis de facultés avec lesquels j'ai des souvenirs mémorables.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

INTRODUCTION

GENERALITE SUR LES ALGUES

1. NOTION FONDAMENTALE SUR LES ALGUES
 - 1.1 Qu'est ce qu'une algue ?
 - 1.2 Où se rencontrent-elles ?
 - 1.3 Structure des algues
 - 1.4 Conditions de vie des algues
2. THEORIE DE L'ENDOSYMBIOSE OU NATURE COMPOSITE DES ALGUES ET FORMATIONS DES GRANDES GROUPEES
 - 2.1 L'endosymbiose
 - 2.2 L'origine des végétaux
3. LA REPRODUCTION
 - 3.1 La reproduction des Cyanobactéries
 - 3.2 La reproduction des Algues Rouges
 - 3.3 La reproduction des Algues Vertes
 - 3.4 La reproduction des Algues Brunes
4. NOMENCLATURE ET CLASSIFICATION :

COMPOSITION DES ALGUES

1. L'EAU
2. LES SUCRES : LES PHYCOCOLLOÏDES
 - 2.1 L'acide alginique
 - 2.2 Agars
 - 2.3 Carraghénanes
 - 2.4 Les polysaccharides sulfatés
3. LES MINERAUX
4. LES PROTEINES
5. LES VITAMINES
6. LES LIPIDES
7. LES PIGMENTS

LES APPLICATIONS DES ALGUES ET LEURS DEVELOPPEMENTS FUTURS

1. LES ALGUES ALIMENTAIRES
 - 1.1 Leurs utilisations en Europe
 - 1.2 Leurs utilisations en Extrême-Orient
2. LES APPLICATIONS DE L'ACIDE ALGINIQUE (CODE E400)
 - 2.1 Les applications de l'alginate dans l'industrie textile
 - 2.2 Les applications des alginates dans l'industrie agroalimentaire
 - 2.3 Les applications des alginates dans le domaine médical (médecine-pharmacie)
 - 2.4 L'utilisation des alginates pour les électrodes de soudure
 - 2.5 L'utilisation dans l'industrie papetière
 - 2.6 Les emplois divers des alginates
3. LES APPLICATIONS DES AGARS (CODE E406)
 - 3.1 Utilisation dans l'industrie agroalimentaire
 - 3.2 Utilisation en bactériologie
 - 3.3 Utilisation en pharmacie
 - 3.4 Utilisation pour l'agriculture
 - 3.5 Autres applications des agars
4. LES APPLICATIONS DES CARRAGHENANES (CODE E407)
 - 4.1 Les utilisations dans l'industrie agroalimentaire
 - 4.2 Les utilisations en pharmacie et en cosmétologie
 - 4.3 Divers
5. COSMETOLOGIE
6. SANTE ET PHARMACEUTIQUE
 - 6.1 Les utilisations historiques et actuelles
 - 6.2 Perspectives futures et recherches
7. AGRICULTURE
 - 7.1 Les engrais
 - 7.2 Traitement phytosanitaire
8. LES FUTURES APPLICATIONS
 - 8.1 La batterie aux algues
 - 8.2 Le biocarburant

LA TOXICITE ALGALE

1. FACTEURS QUI FAVORISENT LES ALGUES TOXIQUES
2. POURQUOI LES ALGUES PRODUISENT DES TOXINES ?
3. LES EFFETS DES TOXINES SUR L'HOMME
 - 3.1 L'acide okadaïque

- 3.2 Les saxitoxines
- 3.3 L'acide domoïque
- 3.4 Les brévétoxines (NSP : Neurotoxic Shellfish Poisonning)
- 3.5 La ciguatoxine (CFP ou Ciguatera Fish Poisonning)
- 4. LES MOYENS DE LUTTE
- 5. LES RAISONS DE CES EFFLORESCENCES
- 6. LES « MAREES VERTES »
 - 6.1 Facteurs favorisant la pullulation des algues
 - 6.2 Le phénomène des « marées vertes »
 - 6.3 Revalorisation des algues vertes

CONCLUSION

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

TABLE DES MATIERES

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLE DES TABLEAUX

INTRODUCTION

Comment se promener sur les plages sans observer cette palette de couleur qu'offre la mer. L'océan possède de nombreux trésors dont les algues. Ces dernières sont à l'origine de la vie dans les océans, puis plus tard sur terre, en produisant de l'oxygène et par la suite la couche d'ozone.

Ces algues sont très diversifiées et ne constituent pas un ensemble homogène, malgré les ressemblances morphologiques, il existe « plus de différence génétiques entre une algue brune comme un *Fucus* et une algue verte du genre *Ulva*, qu'entre cette dernière et un chêne » [1].

Ces algues ont été utilisées pendant des siècles par les habitants des côtes ou par les asiatiques. 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.

Toutefois, elles peuvent dans certains cas, s'avérer toxiques ou envahissantes.

GENERALITE SUR LES ALGUES

1. NOTION FONDAMENTALE SUR LES ALGUES

1.1 Qu'est ce qu'une algue ?

Les algues sont très variées. Malgré les différentes couleurs, bleu, rouge, brun ou vert avec lesquelles, elles peuvent être perçues, elles possèdent toute de la chlorophylle (pigment vert). Les algues appartiennent au règne végétal mais elles ne constituent pas un ensemble homogène. « Elles se répartissent entre un certain nombre de voies évolutives indépendantes les unes des autres » [2]. Ainsi on distingue les organismes eucaryotes uni- ou pluricellulaires avec une « voie rouge » (algues rouges), une voie « brun-jaune » (algues brunes), une voie verte (algues vertes) et les organismes procaryotes, les bactéries bleues ou cyanobactéries (algues bleues).

Elles peuvent être libres ou fixées sur un support. Leurs tailles varient du micromètre à plusieurs dizaines de mètres pour certaines algues.

« Près de 30000 espèces d'algues ont été répertoriées jusqu'ici » [3].

Jusqu'à aujourd'hui, les macroalgues ont suscité beaucoup d'études mais les recherches s'orientent désormais aussi sur les microalgues qui sont des sources intéressantes notamment dans les avancées technologiques.

Les algues macroscopiques ne possèdent ni feuilles, ni tiges, ni racines. Pour ces organismes, on parle de thalle qui peut présenter des tailles très variables.

1.2 Où se rencontrent-elles ?

Les algues occupent une bonne partie du globe. Pour vivre, il leur faut de la lumière et de l'eau (voire des lieux humides). Si la plupart vivent dans les océans, où elles constituent près de 90% des végétaux, elles colonisent aussi les eaux douces, les milieux aériens et

elles peuvent collaborer avec d'autres organismes donnant naissance à des symbioses comme les lichens. Nous développerons surtout les algues marines.

La répartition des algues est fonction de la latitude et de la qualité des eaux.

1.3 Structure des algues

Comme pour les plantes, les algues possèdent des pigments chlorophylliens qui leur procurent l'énergie nécessaire à leur survie. Elles ont également besoin d'un peu d'eau, de lumière et de dioxyde de carbone afin d'effectuer la photosynthèse. [2–5]

1.3.1 Les macroalgues

Les macroalgues sont constituées à leur base par des crampons, leurs permettant de se fixer sur un support. Elles absorbent les nutriments par toute la surface du thalle en contact avec l'eau. Les crampons sont surmontés d'un pédoncule de longueur et de diamètre variable, le stipe. L'algue se termine par une fronde qui peut être découpée en filaments, cordons ou lanières.

1.3.2 Les microalgues

Elles peuvent être procaryotes comme les algues bleues (ce sont des bactéries).

Quant aux algues uni- et pluricellulaires (eucaryotes), elles regroupent tellement de variété d'organismes, qu'il n'existe pas de structure type.

La cellule unique des microalgues unicellulaires est capable d'assurer toutes les fonctions. Leur taille est d'une dizaine de microns et la plupart d'entre elles sont adaptées à la flottaison. De nombreuses espèces possèdent un ou plusieurs flagelles mobiles qui leur confèrent une véritable aptitude à la nage.

1.4 Conditions de vie des algues

1.4.1 La lumière

Les algues sont des végétaux photosynthétiques, la lumière est de ce fait indispensable à leur vie. Cette énergie lumineuse est alors convertie en énergie chimique. Ainsi ce facteur intervient de différentes manières : par son intensité lumineuse, par la nature des radiations présentes et par la durée des périodes d'éclairement et d'obscurité (photopériodes). Les variations sont responsables du déclenchement subtil des phénomènes reproducteurs ou de l'apparition d'espèces saisonnières, printanières ou estivales en influant sur la vitesse de développement des tissus. La lumière subit d'importantes modifications tant en qualité qu'en quantité. Ainsi les algues ne peuvent se développer (sauf exception) que jusqu'à une limite de 0.05% de lumière incidente. Selon les mers et la transparence de l'eau, elle peut être atteinte entre 50 et 200 m. Les différentes radiations qui composent la lumière sont absorbées par la couche d'eau traversée en fonction de leur longueur d'onde. C'est ainsi que les radiations rouges, dont les longueurs d'onde sont supérieures à 600 nm sont absorbées dès les premiers mètres sous l'eau.

Zonation :

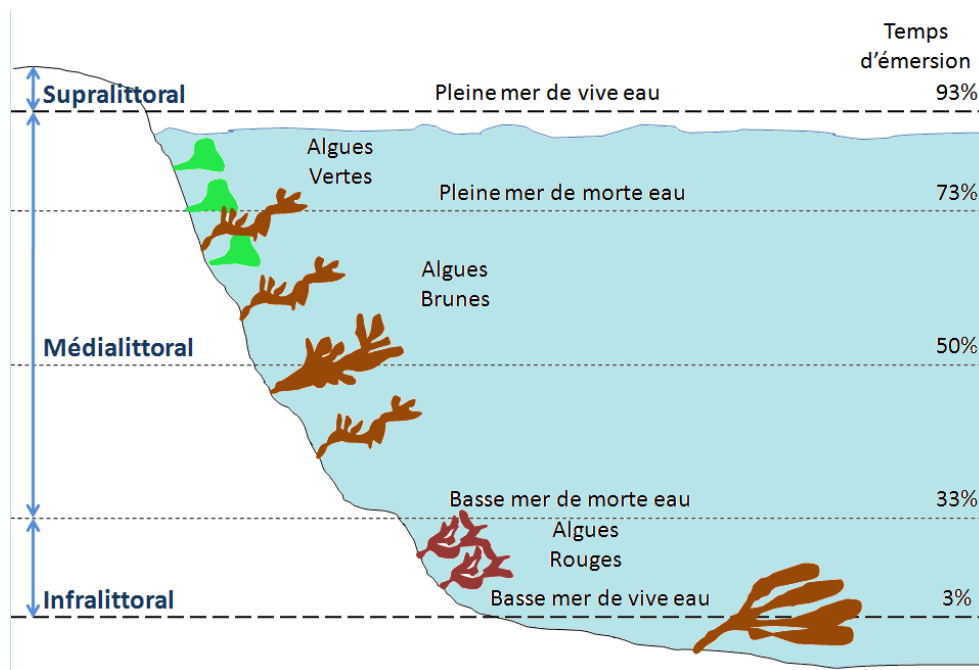


Illustration 1 : La zonation

Prenons l'exemple de la côte Atlantique Nord, qui se situe dans une région biogéographique tempérée chaude. La prolifération des algues sur les côtes bretonnes est favorisée par un vaste plateau continental rocheux, une eau riche en sels minéraux nutritifs, une stabilité de la salinité, par des températures allant de 8 à 18°C, ainsi que la forte amplitude des marées et un fort hydrodynamisme.

A marée basse, on observe un étagement traduisant la position des espèces d'algues en fonction de leur faculté de survivre à l'exposition. [5] Leur répartition dépend de nombreux facteurs tel que la lumière, la salinité, le type de sol (sablonneux ou rocheux) la force de la houle et l'alternance d'émersion et d'immersion. L'agitation vitale du milieu, permettant la diffusion des substances, est réalisée par l'hydrodynamisme lié aux vagues, à la marée et au courant. Le mode constitue le degré d'exposition du littoral à l'agitation de l'eau en un point. Ainsi, on distingue le mode battu qui fait opposition au mode abrité. Ils influencent la répartition des algues. Le premier, le mode battu correspond aux algues qui sont soumises aux mers agitées. Alors que le mode abrité correspond à un milieu protégé.

Par ailleurs, le littoral est découpé en étages, de la zone la plus émergée vers la zone la plus immergée on a :

- L'étage supralittoral : cet espace n'est pas souvent sous l'eau, il n'est recouvert que lors des grandes marées. C'est lui qui est le plus soumis aux rayons lumineux.
- L'étage médialittoral constitue la majeure partie de l'estran*. On le divise en trois parties :
 - o La PMME (Pleine Mer des Morts Eaux) : les algues ont du s'adapter à la dessiccation due aux longues périodes passées hors de l'eau.
 - o La mi-marée. La zone située entre la PMME et la mi-marée reste découverte pendant plus de la moitié d'un cycle de marée (3 heures). Les algues qui se développent doivent résister à des temps d'émersion qui seront plus long que la BMME.
 - o La BMME (Basse Mer des Morts Eaux). La zone située entre la mi-marée et la BMME est immergée plus de la moitié d'un cycle de marée.
- L'étage infralittoral est rarement découvert, seulement lors des basses mers des grandes marées.

En ce qui concerne le bas de l'estran (entre la BMME et la BMVE), il est découvert uniquement lors des grandes marées et ne supporte que de très courtes périodes émergées. [2–5]

1.4.2 Fixée ou libre

Une grande partie des algues pluricellulaires nécessitent d'être fixées sur un support, afin d'acquérir un bon développement et cycle de vie. Ce substrat ne leur apporte pas d'éléments nutritifs car elles sont dépourvues de système racinaire. Toute la surface de l'algue est capable de se nourrir à partir du milieu liquide dans lequel elle baigne. Ce n'est pas la nature chimique du support qui va influencer le développement, mais il (le support) peut intervenir dans l'installation ou la non installation de certaines espèces. Cependant, il joue un rôle par sa texture et son degré de cohésion. Pour avoir un développement optimal, les algues qui nécessitent un support doivent rester accrochées. Beaucoup d'algues choisissent indifféremment leur support mais certaines sont très exigeantes, tel est le cas des algues perforantes microscopiques qui n'acceptent que les roches calcaires. Même si elles sont arrachées par une tempête elles continuent leur vie. Cependant, il existe un grand risque qu'elles échouent et qu'elles se déshydratent, à l'exception de certaines algues comme la Sargasse qui possède des flotteurs.

Les algues microscopiques et macroscopiques peuvent se fixer sur n'importe quel support (roche, bois, cordage, plastique...). Les algues microscopiques forment un biofilm (fine pellicule gluante) qui correspond à un mélange d'algue, de sécrétion adhésive et d'une multitude de microorganismes.

Quant aux algues macroscopiques, elles fabriquent un organe fixateur constitué d'une multitude de filaments microscopiques, les rhizoïdes. C'est grâce à une sécrétion riche en polysaccharides qu'ils arrivent à se fixer par simple contact. Dès que l'algue est posée sur son support, elle fabrique un « véritable ciment ». L'organe fixateur est appelé crampon ou disque. Ce dernier grandit en même temps que l'algue croit.

Mais toutes les algues ne vivent pas fixées. Les algues constituant le phytoplancton sont les plus petites et les plus nombreuses, elles sont soumises au gré des courants.

2. THEORIE DE L'ENDOSYMBIOSE OU NATURE COMPOSITE DES ALGUES ET FORMATIONS DES GRANDES GROUPES

Les avancées technologiques en biologie, permettent de décrire les cellules eucaryotes comme des composants d'origines différentes, issus de divers procaryotes. Les algues sont des eucaryotes photosynthétiques avec un compartiment cellulaire, d'origine procaryotique, où s'effectue la photosynthèse (le plaste). Le plaste dériverait d'une cyanobactérie symbiotique, devenue un élément constitutif au cours de l'évolution. Chez certaines algues, une cellule eucaryotique contenant un plaste d'origine cyanobactérienne s'emboîte dans une deuxième cellule eucaryotique. Cette opération peut également se répéter avec une troisième cellule eucaryotique. Ces phénomènes expliquent le caractère polyphylétique des végétaux. La théorie de l'endosymbiose a permis une meilleure compréhension de ce phénomène.

Afin de développer cette hypothèse il est important de rappeler deux types d'arguments :

- Les études du génome ont permis de découvrir que le noyau n'était pas le seul à contenir de l'ADN. Ainsi il a été mis en évidence de l'ADN de type bactérien (ADN circulaire) associé aux plastes et aux mitochondries. Ils sont appelés respectivement ADN plastidiaux et ADN mitochondriaux. Leur synthèse protéique est inhibée par le chloramphénicol et leur division nécessite la présence de N-formylméthionine. Les plastes et les mitochondries sont des bactéries, vivant en symbiose avec la cellule, selon la conclusion des biologistes.
- Lors d'exploration des fosses abyssales du Pacifique et de l'Atlantique, les océanographes ont mis en évidence, le long de grandes failles océaniques, des sources d'eau thermale desquelles jaillissaient des colonies bactériennes. Ces dernières sont capables de supporter des températures supérieures à 350°C et produisent leur énergie vitale de la décomposition des sulfures en soufre. On suppose que cette prolifération date de 3,9 milliards d'années.

Ces bactéries ont été entraînées par des courants ascendants vers des zones où les rayons lumineux étaient dépourvus de radiations ultraviolettes biocides. Privées de leur source d'énergie, elles ont du s'adapter à leur nouvel environnement :

- Soit en devenant hétérotrophe et en dévorant leurs congénères. Pour cela, elles ont du se déplacer à l'aide, dans un premier temps, de mouvements amiboïdes, puis de flagelles propulseurs.
- Soit autotrophe. Elles ont développé des composés chimiques photosensibles telles que la chlorophylle, le carotène, la phycocyanine, la phycoérythrine, la fucoxanthine, ou la pérédinine. Ces pigments ont permis la formation d'une autre source d'énergie grâce à l'éclairement solaire : c'est la photosynthèse.
- Soit elles ont acquis les deux adaptations à la fois.

C'est l'endosymbiose qui a permis le développement des végétaux.

2.1 L'endosymbiose

2.1.1 L'endosymbiose primaire

Le phagotrophe (cellule eucaryote primitive) a absorbé une bactérie α -pourpre. Cette dernière a évolué en mitochondrie et permis la respiration de cette cellule eucaryote hétérotrophe. [6]



Illustration 2 : Endosymbiose primaire : formation d'une cellule eucaryote hétérotrophe

Puis cette cellule nouvellement formée a absorbé une cyanobactérie qui s'est transformée en chloroplaste. Les membranes internes du chloroplaste ont une origine bactérienne et la membrane externe a pour origine la membrane plasmique de la cellule.

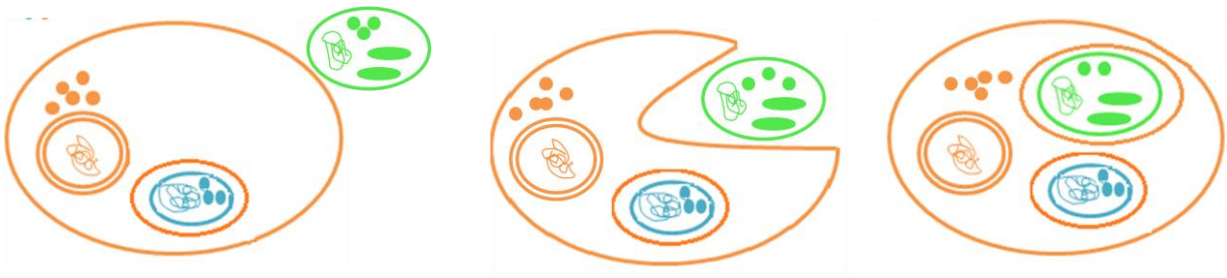


Illustration 3 : Endosymbiose primaire : formation d'une cellule eucaryote autotrophe

Le plaste et la mitochondrie résultent chacun d'un événement d'endosymbiose primaire.[5]

2.1.2 L'endosymbiose secondaire

Une cellule eucaryote hétérotrophe absorbe une cellule eucaryote autotrophe contenant un chloroplaste (limité par une enveloppe à deux membranes : endosymbiose primaire). La membrane plasmique de la cellule du symbionte et celle de la phagocytose constituent une deuxième enveloppe externe. Le plaste est entouré de quatre membranes car le noyau et le cytoplasme de la cellule du symbionte dégénèrent.

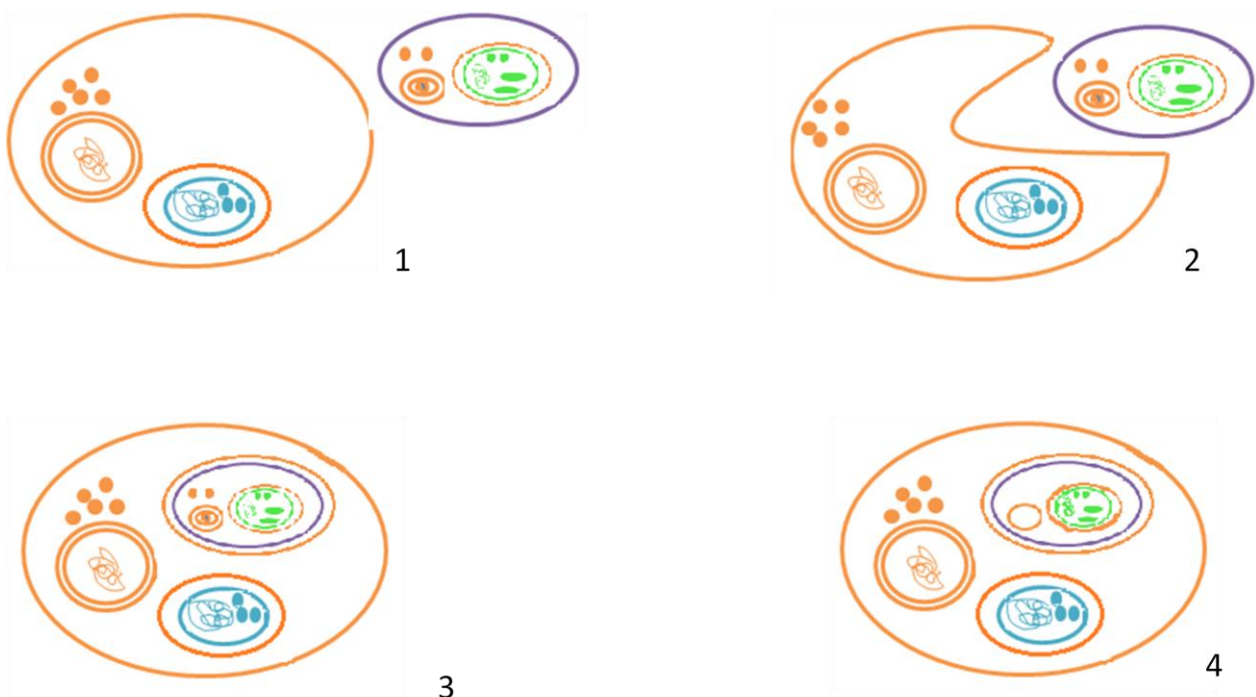


Illustration 4 : Schéma de l'endosymbiose secondaire

2.2 L'origine des végétaux

Les algues se seraient formées par des groupements entre différentes unités :

- des bactéries pourvues de pigments à dominance bleue (A)
- des bactéries à chlorophylle (B)
- des bactéries pourvues de pigments à dominance rouge (C)
- des bactéries sans pigment (D, E et F)
- des bactéries sans pigment avec flagelles apicaux (G)
- des bactéries sans pigment avec des flagelles latéraux (H).

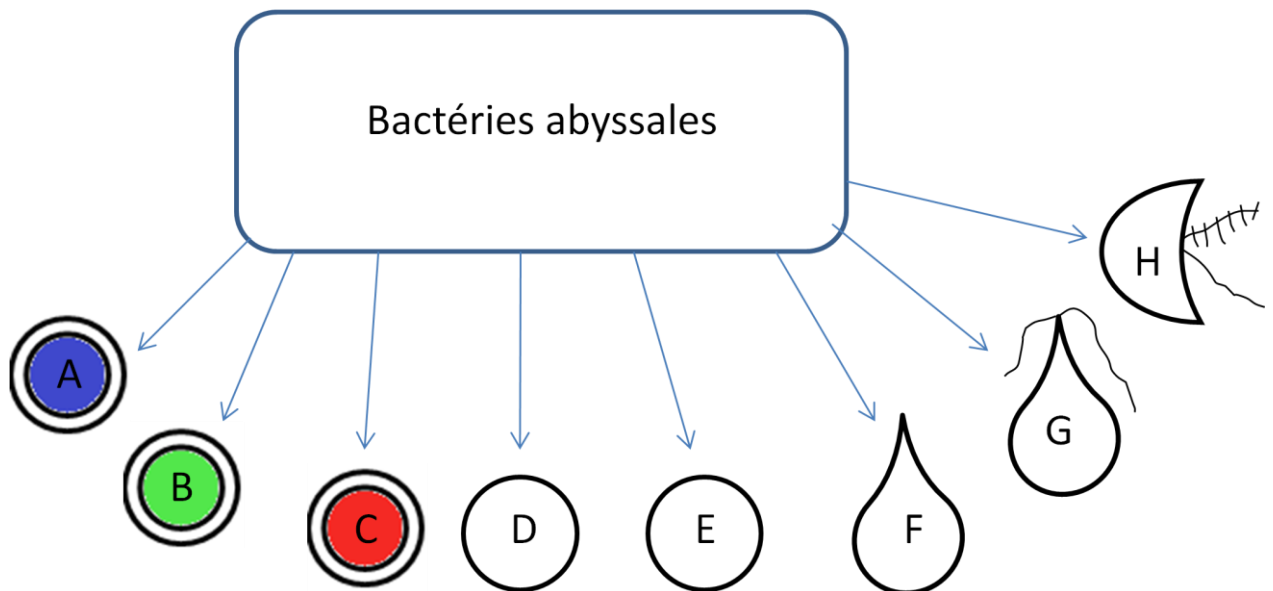


Illustration 5 : Schéma de quelques unités dites initiales, présentes dans le bouillon bactérien (inspiré du schéma de l'Ifremer [6])

2.2.1 L'origine des « Algues » Bleues

Une bactérie à chlorophylle (B) aurait absorbé ou se serait associée à une bactérie pourvue de pigment à dominance bleue (A). Il en résulte un nouvel organisme (AB), dont la structure est proche d'une bactérie, muni d'un complexe « pigment bleu + chlorophylle » qui le rend apte à capter dans la pénombre suffisamment d'énergie lumineuse pour vivre et se développer. La couleur d'un des pigments, la phycocyanine, domine la chlorophylle et donne cette teinte bleue. Ces végétaux bleus, nous sont parvenus sous forme de cellules isolées, de colonies englobées dans une gelée ou de filaments non ramifiés. Ces

algues ont un grand pouvoir d'adaptation qui leur permet d'occuper de nombreux biotopes dont la mer et les eaux douces ou saumâtres.

Il y a 3,7 milliards d'années, les Cyanobiontes (algues bleues) furent les premières à produire l'oxygène, dont une partie a donné l'ozone qui s'est accumulé dans la stratosphère réduisant peu à peu l'action biocide des rayons ultraviolets et permettant le développement d'autres groupes végétaux.

La majorité des cyanobactéries sécrète une gelée qui précipite les bicarbonates (composés solubles) en carbonate de calcium (calcaire insoluble). Cette propriété a certainement contribué à abaisser le pH de l'eau de mer originelle qui était fortement acide (car le déluge avait dissous de fortes quantités de gaz carboniques).

De plus les algues bleues ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique qui est le plus abondant dans la nature et de le transformer en azote minéral nécessaire pour les végétaux.

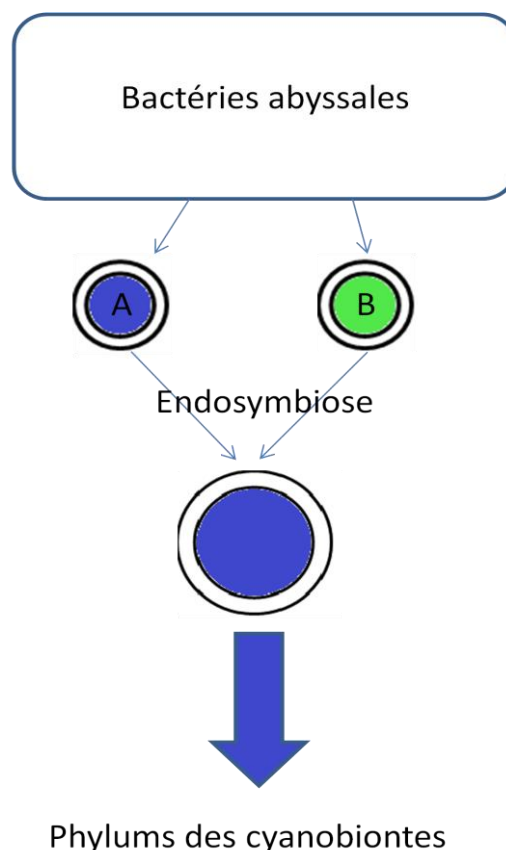


Illustration 6 : Schéma montrant l'origine des Végétaux Bleus (inspiré du schéma de l'Ifremer [6])

2.2.2 L'origine des Algues Rouges

Une bactérie sans plaste ni flagelle (E) aurait ingérée une bactérie (C) pourvue d'un plaste avec de la chlorophylle et des pigments rouges. Cette bactérie (C) se serait réduite à l'intérieur de (E) à sa membrane bactérienne enveloppant son ADN et son plaste qui aurait constitué l'ADN plastidial alors que le pigment rouge aurait imposé sa teinte. Ce complexe CE aurait formé la cellule pré-ancestrale (sans noyau). Un autre phénomène d'endosymbiose se serait produit entre la cellule pré-ancestrale et une cellule sans pigment (D), cette dernière devenant le noyau de CE. Ce complexe (CDE) aurait formé la cellule ancestrale des Rhodobiontes (ou Végétaux Rouges).

Vers 1,7 milliards d'années, la couche d'ozone s'est épaissie, réduisant ainsi l'impact des rayons ultraviolets. De ce fait, l'intensité lumineuse a été suffisante pour que l'association pigmentaire « chlorophylle-pigment rouge » capte l'énergie nécessaire à sa vie mais à un niveau bathymétrique plus élevé que celui des algues bleues. Le pigment rouge qui colore les cellules des Rhodobiontes est la phycoérythrine. De même que les Cyanobiontes, les Végétaux rouges ne se sont pas libérés du milieu aquatique.

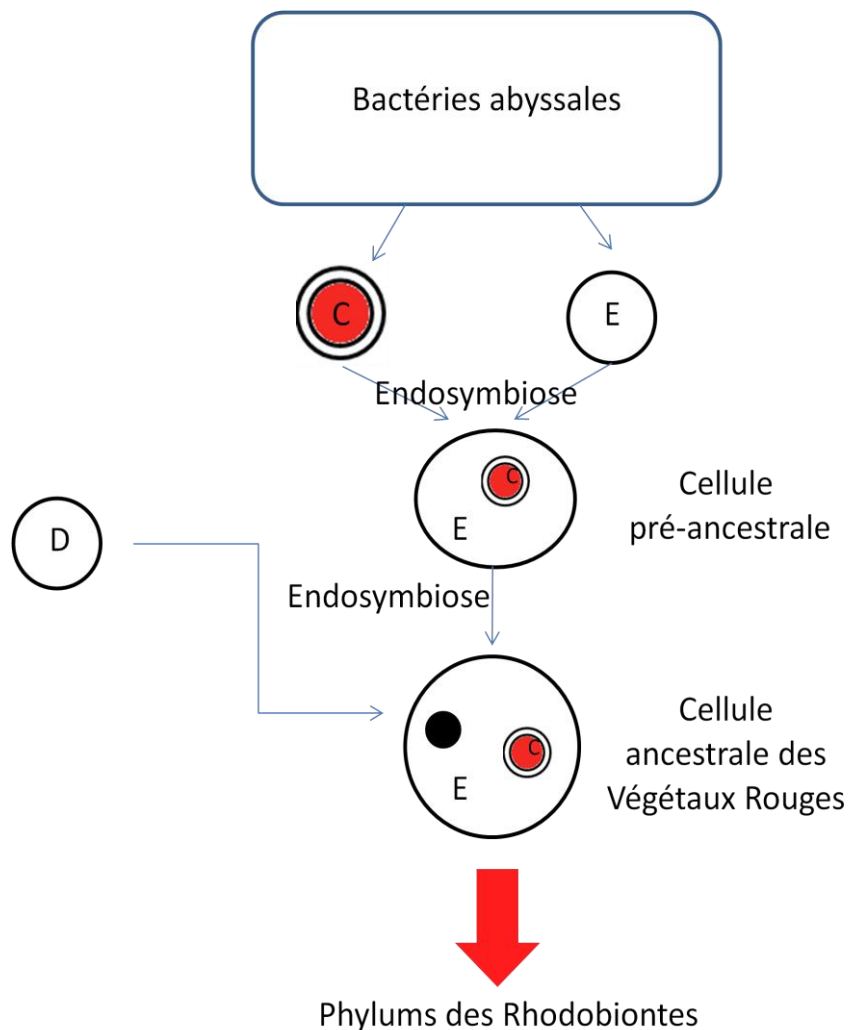


Illustration 7 : Schéma montrant l'origine des Végétaux Rouges (inspiré du schéma de l'Ifremer [6]).

2.2.3 L'origine des Algues Vertes

De même que pour les Rhodobiontes les Végétaux Verts seraient issus de deux endosymbioses.

Une bactérie incolore avec deux flagelles apicaux (G) aurait absorbé une bactérie chlorophyllienne (B) ne conservant que la membrane, son ADN et son plaste vert. Ainsi, s'est formé l'organisme BG sans noyau mais équipé du plaste des Végétaux Verts et de flagelles. Le noyau serait apparu lorsque l'organisme se serait associé à une bactérie (D). Le complexe (BDG) serait la cellule ancestrale des Chlorobiontes (ou Végétaux Verts). Cette cellule eucaryote est munie de deux flagelles et d'un seul pigment photosynthétique, la chlorophylle.

Cette évolution aurait eu lieu il y a 1,3 milliards d'années lorsque la couche d'ozone s'est suffisamment épaissie pour permettre à la seule chlorophylle d'assurer le captage de l'énergie nécessaire aux développements des Végétaux Verts (mais à un niveau bathymétrique supérieur à celui des Rhodobiontes).

Ce n'est que 600 millions d'années avant notre époque que les Végétaux Verts commencent à conquérir les continents avec quelques adaptations :

- En synthétisant des acides phénoliques, molécules assurant une protection solaire en neutralisant l'action de quelques rayons ultraviolets qui frappaient encore la Terre.
- En produisant une substance, la lignine, permettant une consolidation de la paroi cellulaire et déjouant l'effet de la pesanteur.
- En se recouvrant d'une cuticule pour éviter le dessèchement et d'un système circulatoire assurant une hydratation permanente du végétal.

C'est ainsi qu'une majeure partie de ces Végétaux Verts sont devenus des Végétaux Supérieurs.

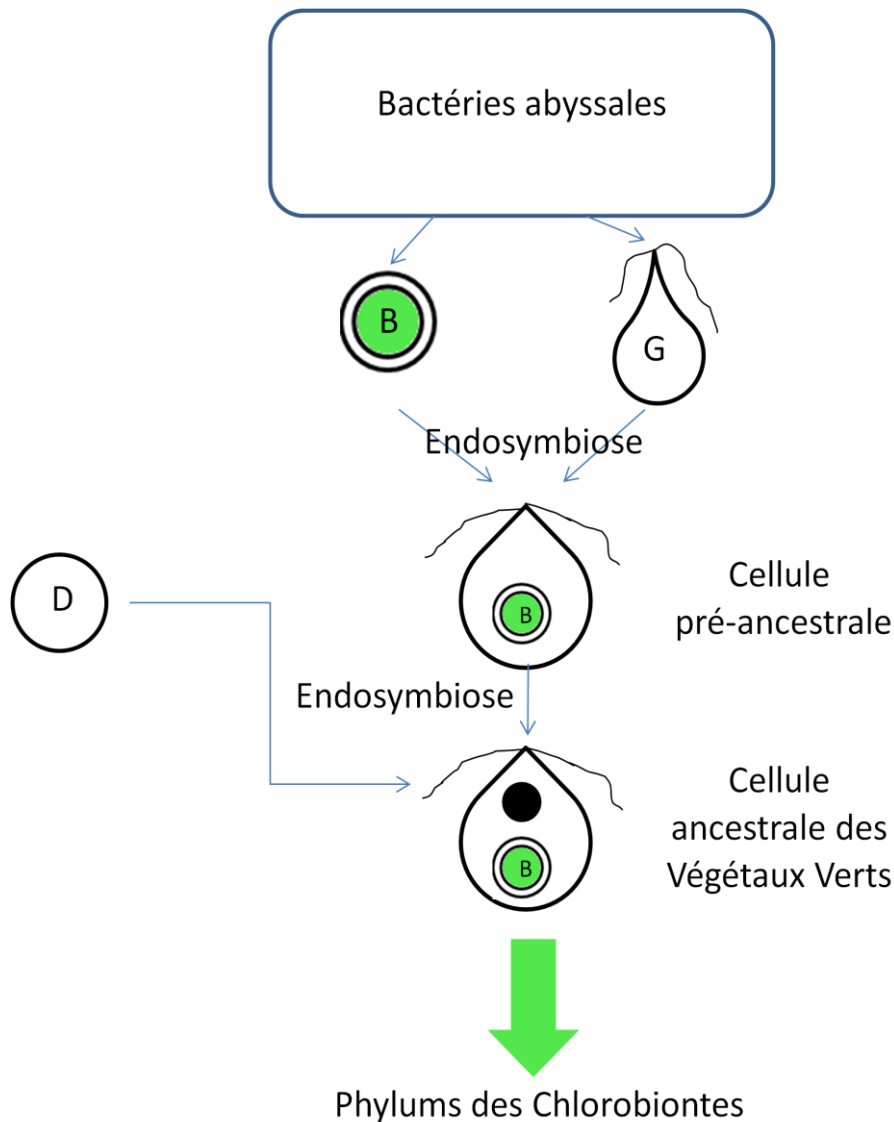


Illustration 8 : Schéma montrant l'origine des Végétaux Verts (inspiré du schéma de l'Ifremer [6])

2.2.4 L'origine des Algues Brunes

Ils ont subi trois endosymbioses successives. Une bactérie incolore pourvue de deux flagelles latéraux (H) aurait emprisonné le complexe (CE) (cellule pré-ancestrale des Végétaux Rouges) en conservant une partie de l'ADN, le plaste et la membrane bactérienne pour donner l'organisme (CEH) procaryote. Puis, la membrane de la bactérie (E) se serait atrophiée pour former une troisième membrane au plaste. Une nouvelle endosymbiose s'est produite avec une bactérie (D) permettant la formation du noyau de l'organisme CEH. Sous la forte influence des rayons solaires, le pigment rouge s'est modifié en pigment jaune, la fucoxanthine, donnant naissance à la cellule ancestrale (CDEH) des Chrysobiontes (Végétaux Bruns).

Ces algues sont apparues vers 1,1 milliard d'années avant notre ère, à un niveau bathymétrique supérieur à celui des Chlorobiontes. Elles n'ont pas su sortir du milieu aquatique.

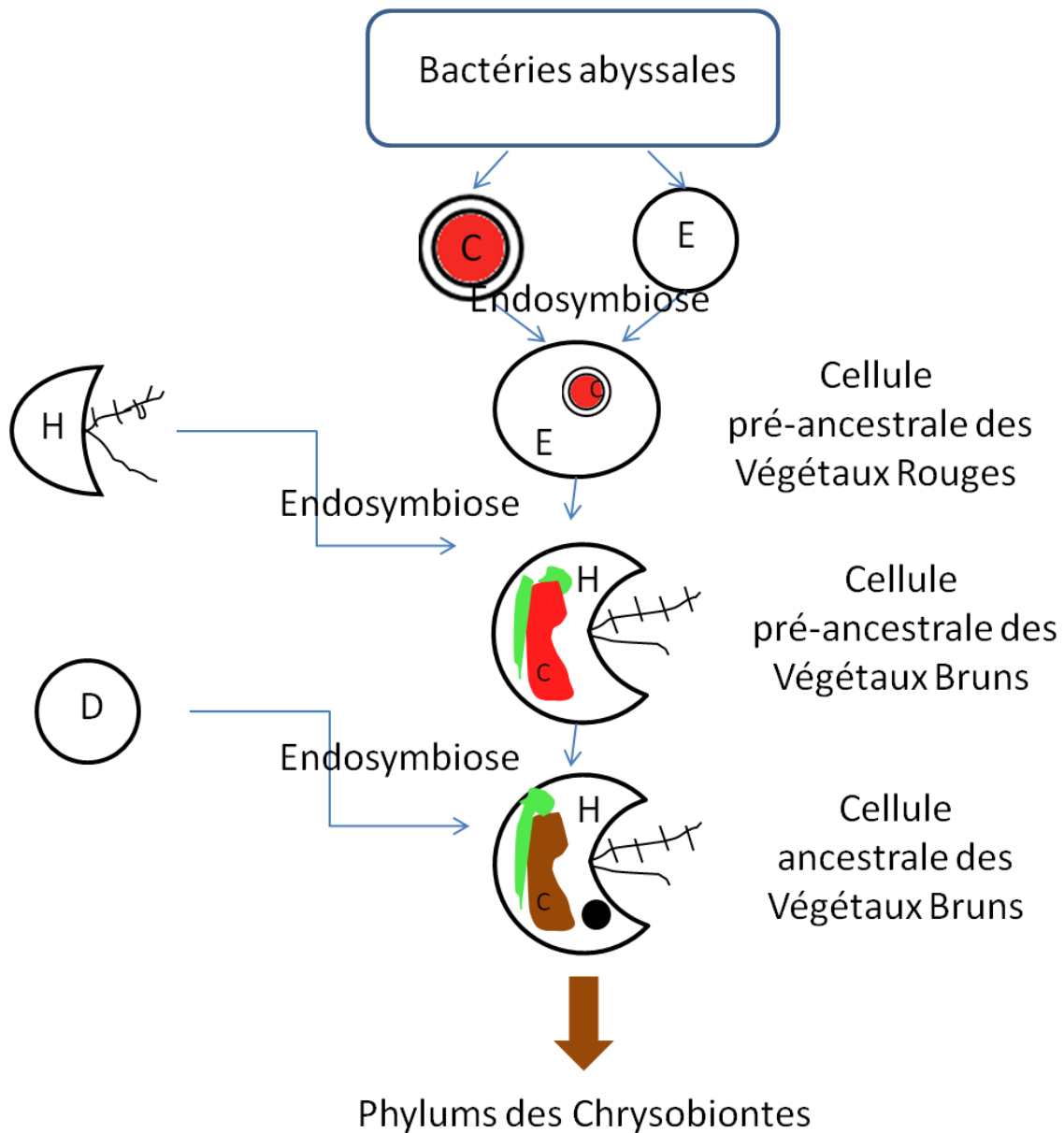


Illustration 9 : Schéma montrant l'origine des Végétaux Bruns (inspiré du schéma de l'Ifremer [6])

2.2.5 L'origine des Dinobiontes

Une bactérie (F) aurait réalisé une endosymbiose avec la cellule pré-ancestrale des Végétaux Bruns (CEH). Cette dernière se serait atrophiée à l'intérieur de (F) et aurait amené sa membrane bactérienne au contact du plaste, formant ainsi l'organisme (CEFH). Une bactérie (D) a été capturée, formant le noyau de la cellule ancestrale (CDEFH) des Dinobiontes (Végétaux Roux).

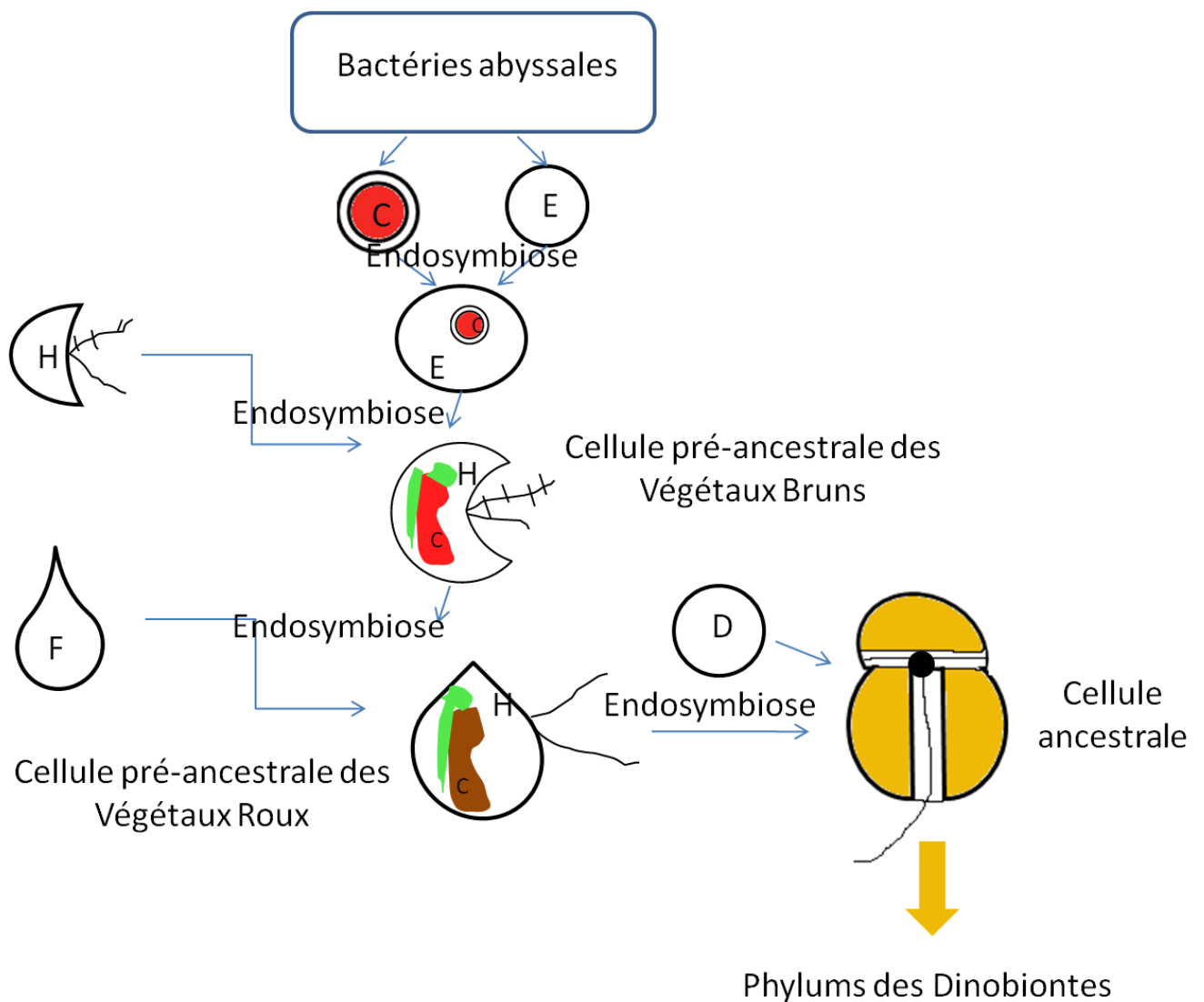


Illustration 10 : Schéma montrant l'origine des Végétaux Roux (inspiré du schéma de l'Ifremer [6])

3. LA REPRODUCTION

Selon le groupe considéré les algues se reproduisent différemment. [3,6,7]

3.1 La reproduction des Cyanobactéries

Elle s'effectue par division binaire (coupure au niveau des cellules) qui aboutit à deux cellules filles qui ressemblent beaucoup à la cellule mère. Cependant comme pour les bactéries, ces Cyanobactéries peuvent subir des phénomènes de transformations (passage d'un fragment d'ADN d'une cellule vers une autre) et de conjugaison (le transfert s'effectue par l'intermédiaire d'un tube étroit).

Ces algues sont également capables, lorsque les conditions environnementales changent, de produire des spores. Les endospores dont les divisions binaires ont lieu dans la cellule mère transformée en sporocyste* et les exospores dont les sporocystes s'ouvrent précocement et produisent des chapelets de spores. Ces spores peuvent être mobiles par glissement ou reptation. [8]

3.2 La reproduction des Algues Rouges

Afin d'effectuer un cycle complet, il faut aux algues rouges trois générations distinctes (espace vital entre deux éléments reproducteurs successifs) faisant appel à trois éléments fondamentaux :

La première, le **gamétophyte**, est un plant qui produit des gamètes mâles ou femelles dont la rencontre fortuite aboutit à un zygote.

Le **deutérophyte** ou **carposporophyte**, se situe sur les plants femelles où il y vit en parasite. Il est issu de nombreuses divisions du zygote qui libère les deuterozygotes.

De la germination du deutérozygote naît le **sporophyte (tétrasporophyte)** qui donnera des spores. Ces derniers en germant produiront des gamétophytes mâles ou femelles.

Les gamètes mâles lorsqu'ils sont libérés, sont soumis aux mouvements de l'eau. Quant aux gamètes femelles, ils restent enfouis dans les tissus du plant femelle mais ils sont munis d'un long col, le trichogyne qui facilite la fécondation. Au voisinage d'un trichogyne, les cellules mâles se fixent et déversent leur contenu, conduisant à la fusion du noyau mâle avec celui des cellules femelles (carpogone).

On distingue les pieds mâles et femelles par la présence sur ces derniers de taches verruqueuses lorsqu'ils ont été fécondés. C'est au niveau de ces taches que se trouve un individu microscopique qui vit en parasite pendant toute sa vie sur le pied femelle. Ces individus microscopiques libèrent à maturité des spores qui germent là où elles tombent, en donnant des individus de même morphologie que les pieds mâles ou femelles, mais diploïde (c'est le tétrasporophyte dont les organes reproducteurs sont les tétrasporocystes qui renferment quatre tétraspores). De plus, ils ont la particularité d'être neutres et de produire des spores qui en germant seront à l'origine des pieds mâles ou femelles. [9]

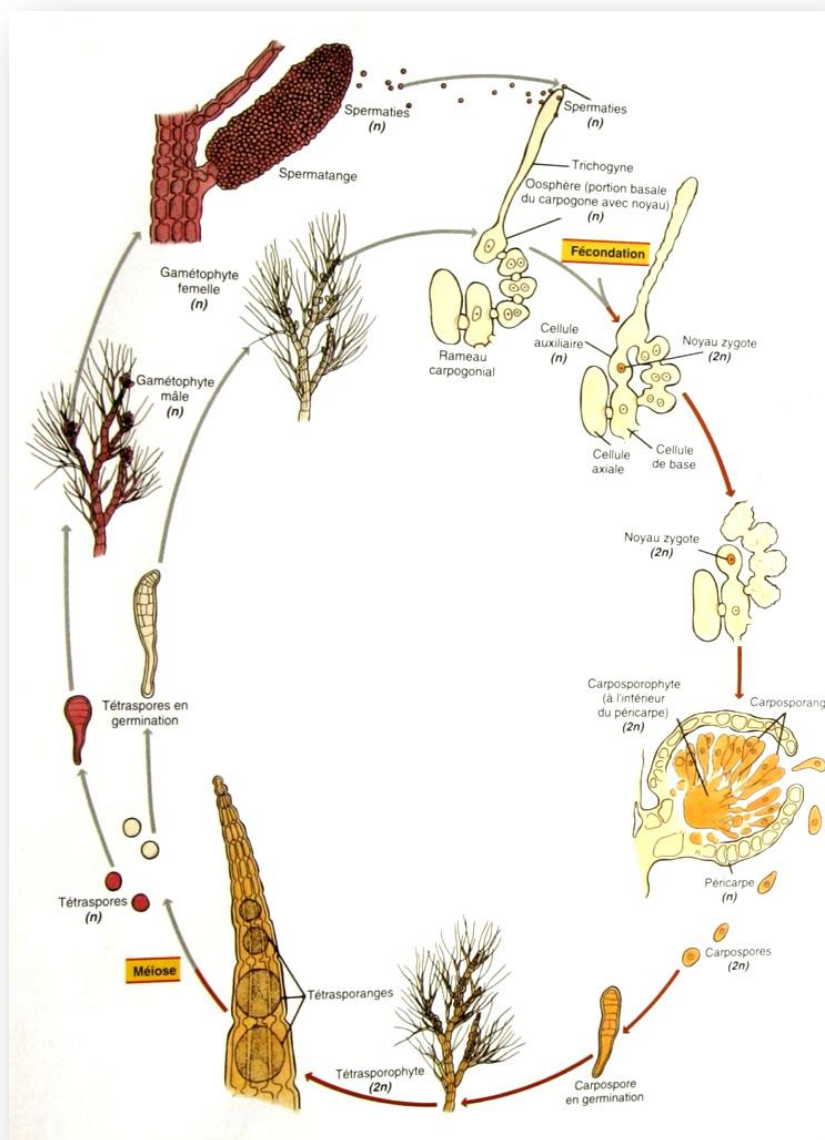


Illustration 11 : Cycle de reproduction d'une Rhodophyta (Polysiphonia) [5]

3.3 La reproduction des Algues Vertes

Le cycle de vie des algues vertes passe par deux générations distinctes où tous les individus produits sont morphologiquement identiques. L'une des générations est sexuée (gamétophyte) avec des pieds mâles et femelles, tandis que l'autre donne des spores (sporophyte) aboutissant à des pieds mâles ou femelles.

Il existe un liseré transparent sur le pourtour de la fronde, constitué de cellules laissées vides par le départ des cellules reproductrices.

Ainsi le gamétophyte produit des gamètes mâles et femelles à deux flagelles qui donnent un œuf nageur à 4 flagelles puis une jeune algue. Cette dernière libère des spores (sporophyte) à quatre flagelles qui aboutissent en pieds mâles et femelles.

Certaines algues vertes, comme les ulves ont une durée de vie limitée à quelques semaines. Toutefois, plusieurs générations peuvent se succéder au cours de l'année.

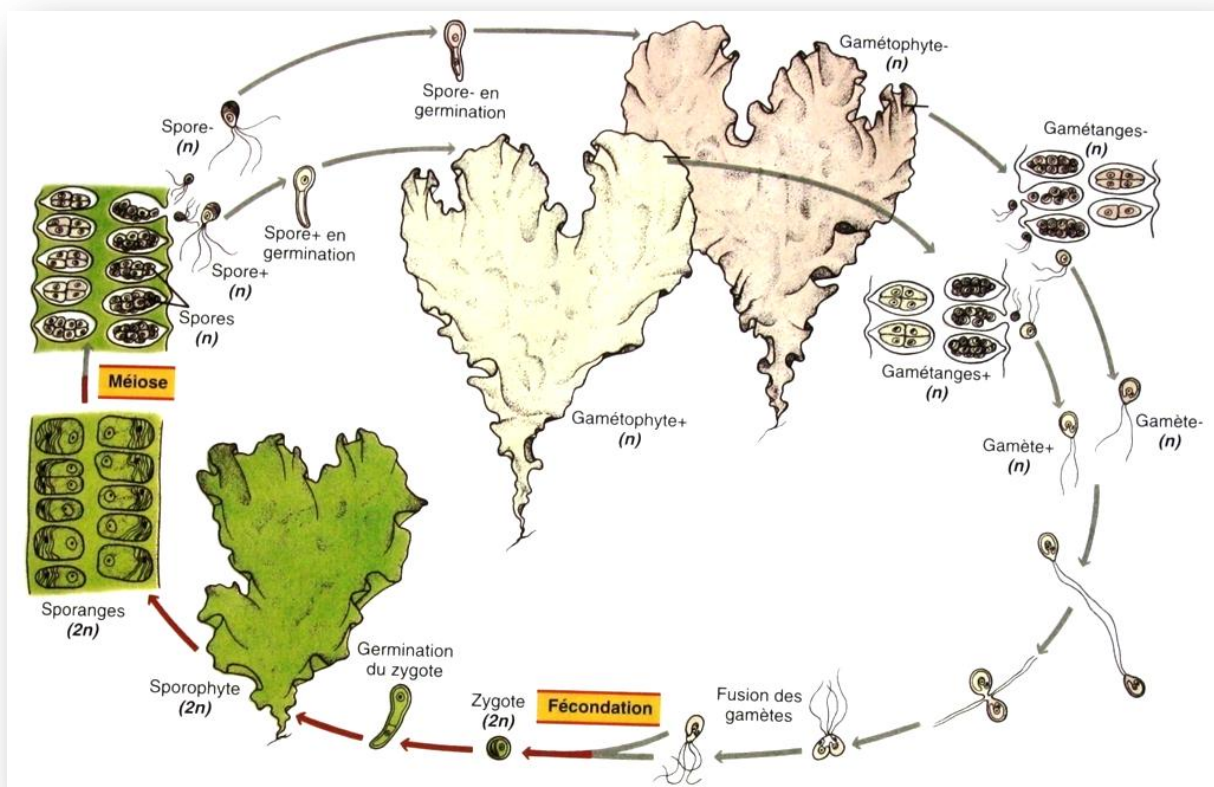


Illustration 12 : Cycle de reproduction d'une Chlorophyta (*Ulva*) [5]

3.4 La reproduction des Algues Brunes

Elle peut s'effectuer par voie sexuée ou asexuée à l'aide de sporo- ou gamétocytes.

Il existe deux types de cycles biologiques.

Ainsi dans la majorité des cas (les Laminariales par exemple), le cycle de vie passe par deux générations avec la succession d'une phase haploïde microscopique le gamétophyte producteur de gamètes flagellés et d'une phase diploïde macroscopique le sporophyte producteur de spores.

Les lames adultes ont à leur surface des sporanges uniloculaires. Une partie des zoospores produites par les sporanges se développe en gamétophyte mâle et l'autre moitié se développe en gamétophyte femelle. Selon une hypothèse, les gamétanges pluriloculaires issus des gamétophytes se sont modifiées au cours de l'évolution en anthéridies et en oogones unicellulaires. Chaque anthéridie libère un seul anthérozoïde et chaque oogone contient une seule oosphère. L'oosphère fécondée reste fixée au gamétophyte femelle et se développe en un nouveau sporophyte. Chez plusieurs espèces d'algues brunes, les gamètes mâles sont attirés par des substances libérées par les gamètes femelles.

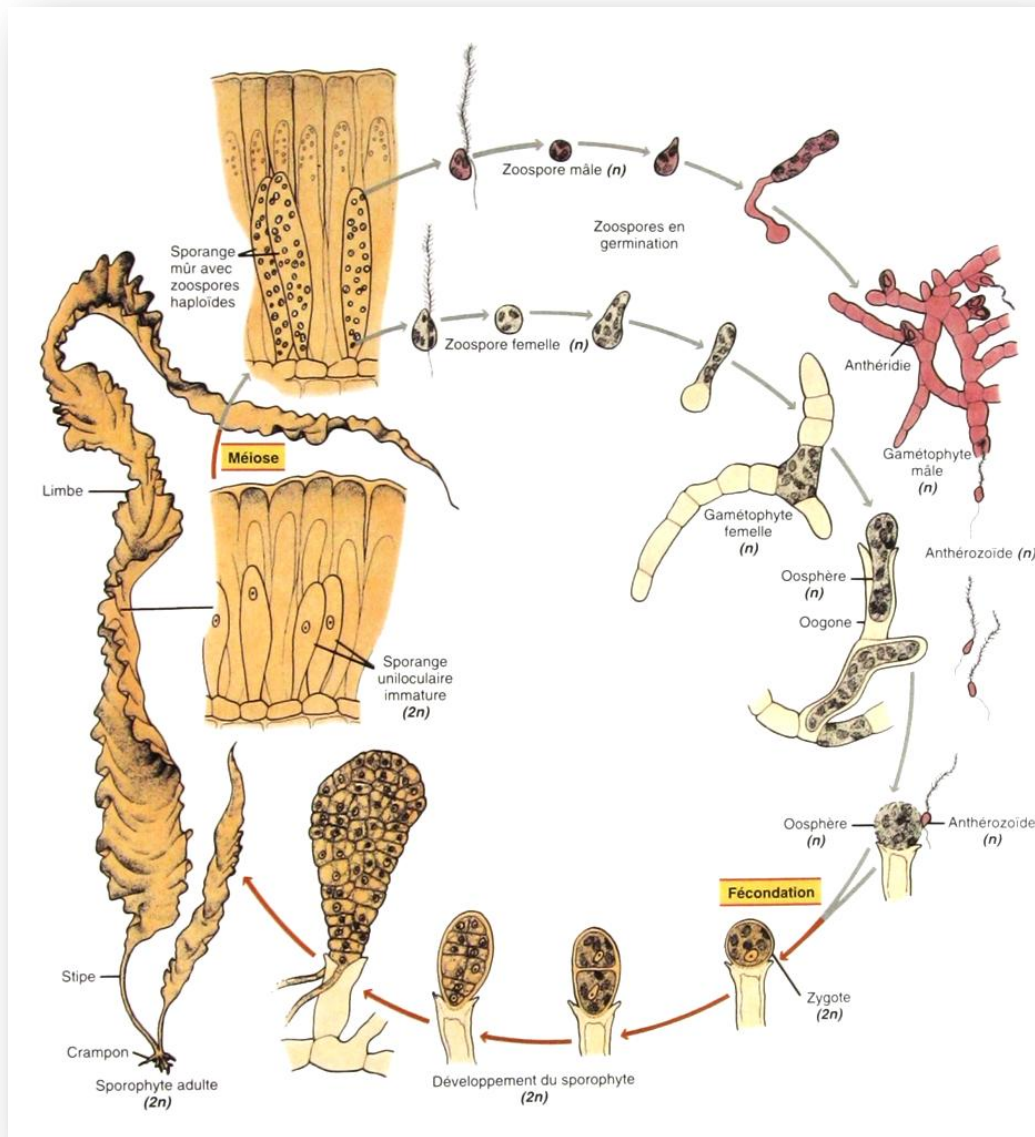


Illustration 13 : Cycle de reproduction des *Laminaria* [5]

D'autres algues brunes dont les *Fucus*, ont un cycle diplophasique. Les conceptacles, cavités spécialisées, sont les lieux de formation des gamétanges. On les trouve dans des réceptacles au niveau des extrémités des rameaux des individus diploïdes. Les réceptacles des pieds mâles sont recouverts d'une gelée orange (anthérozoïde) tandis que ceux des pieds femelles sont de couleur vert olive (oosphère). Lorsque la marée monte, toutes ces cellules sont libérées dans l'eau. Les oosphères émettent des phéromones pour attirer les anthérozoïdes qui les fécondent. Il en résulte un œuf qui tombe et se fixe sur n'importe quel support. En germant il donnera naissance à un nouveau *Fucus* mâle ou femelle. [2,5,9]

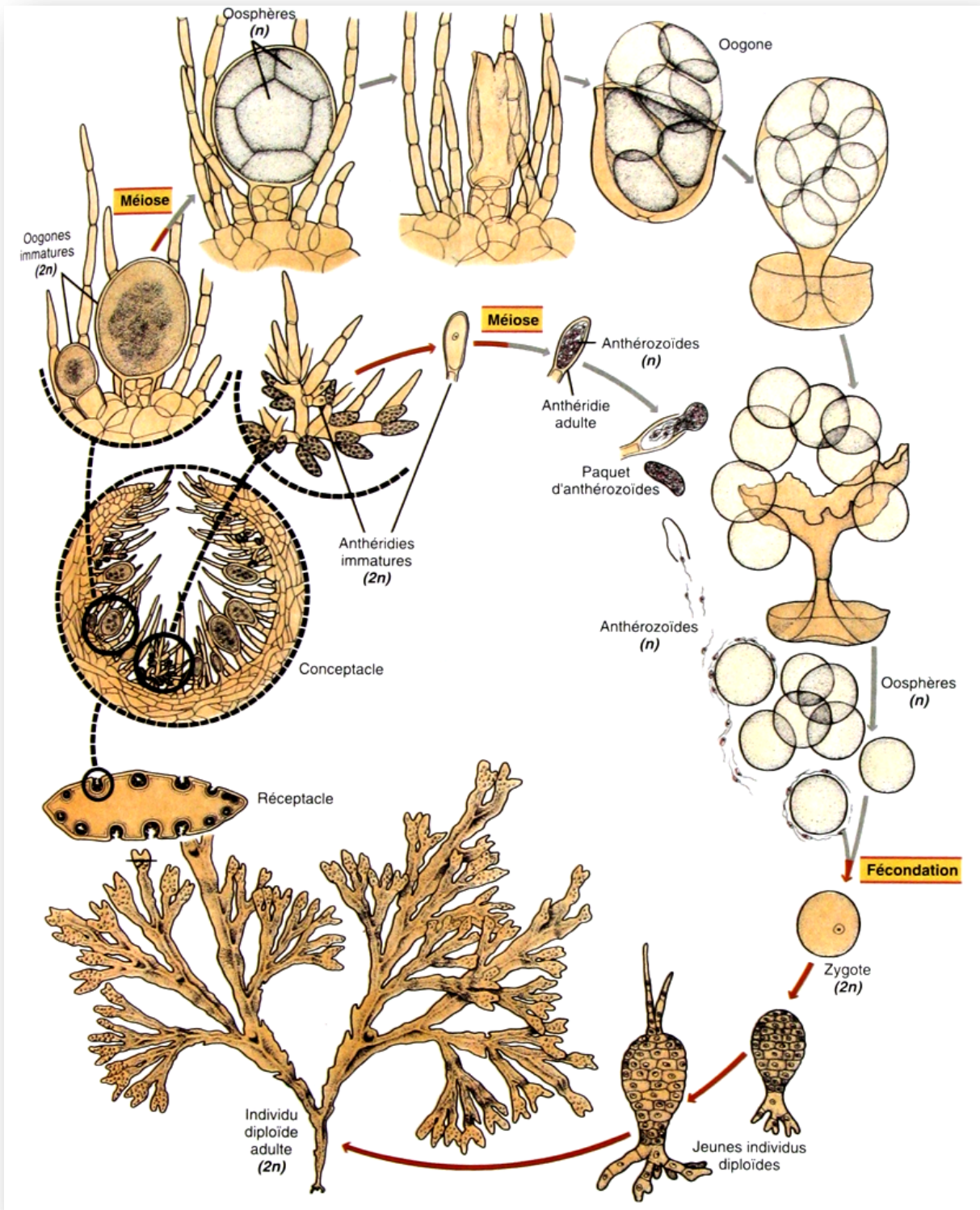


Illustration 14 : Cycle de reproduction de *Fucus* [5]

4. NOMENCLATURE ET CLASSIFICATION : [10]

Les algues ont une nomenclature fixée par un *code international de nomenclature botanique*. Le suffixe des groupes est fonction de leur rang :

Rang du taxon des algues	Suffixe
Division (embranchement ou phylum)	-phyta
Classe	-phyceae
Sous-classe	-phycidae
Familles	-aceae
Sous-famille	-oideae
Tribu	-eae
Sous-tribu	-inae

Tableau 1 : Suffixes utilisés pour désigner les groupes régis par le code de la nomenclature botanique, selon le rang des algues

Les règnes sont divisés en embranchements, les embranchements en ordres, les ordres en familles, les familles en genres, les genres en sections, séries et espèces. Les familles sont parfois encore subdivisées en sous familles, tribus et sous-tribus.

On trouve également des subdivisions de l'espèce : les espèces sont subdivisées en sous espèces, les sous-espèces en variétés et sous-variétés, les sous variétés en formes et sous formes.

Certaines algues font l'objet d'une double nomenclature, ainsi les cryophytes, les euglènes ou les dinophytes sont « revendiquées » par les zoologues et les botanistes, de même pour les cyanobactéries que l'on trouve dans la nomenclature bactérienne et botanique.

Il existe onze groupes à l'intérieur des algues : [3,5,10,11]

Le premier groupe est de nature procaryotique (les cyanobactéries) alors que les dix autres sont des eucaryotes. Les algues ont été classées en comparant leurs pigments, leurs formes de réserve cellulaire, leurs parois cellulaires, leurs flagelles et les organites intracellulaires.

Ces algues eucaryotes sont réparties en six ou sept grandes lignées évolutives.

- Les **Cyanobactéries** (algues bleues) sont des organismes procaryotes (dont le matériel génétique est contenu dans la zone cytoplasmique). Elles appartiennent au règne des Eubactériae.

Les algues eucaryotes :

- Les **algues rouges** sont pour la plupart pluricellulaires et vivent surtout dans les eaux marines.
- Les **algues vertes** peuvent être uni- ou pluricellulaire. Elles appartiennent à un vaste ensemble, les Chlorobiontae (organismes verts). Les algues vertes marines, une grande partie des algues d'eau douce et aériennes constituent l'infrarègne des Chlorophytae. L'infrarègne des Streptophytae, comprend les algues d'eau douce et aériennes.
- Les **Glaucophytae** sont de petits flagellés unicellulaires d'eau douce, dont les plastes sont colorés en bleu-vert par des pigments surnuméraires. Ils appartiennent au règne des Plantae ou Primpoplastobiotae caractérisé par des chloroplastes à deux membranes.
- Les **Euglénophyceae** sont de petites algues unicellulaires flagellées, incolore ou possédant des chloroplastes, vivant en eau douce essentiellement. Elles sont classées dans le phylum des Euglenozoa.
- Les **Cryptophytae** sont des algues unicellulaires flagellées d'eau douce ou marine, incolores ou aux plastes rouges ou bleus. Elles ont un appareil flagellaire particulier, un ensemble de plaques ceinturant la cellule d'une invagination antérieure.
- Les **Chlorarachniophyceae** sont des amiboflagellés pourvus de chloroplastes.
- Les **Haptophytae** possèdent des plastes colorés en brun-doré par les caroténoïdes et un organe particulier l'haptonème*.
- Les **algues brun-dorées (Ochromphytae)** dont les plus connues sont les **Algues brunes (Phaeophyceae)**. Ces dernières sont des algues pluricellulaires marines.
- Les **Diatomées** sont des algues unicellulaires avec une coque de silice que l'on trouve dans tous les milieux.
- Les **Dinophytae** constituent le plancton quelquefois luminescent grâce aux bactéries qu'elles contiennent.

Tableau 2 : Comparaison des caractéristiques des protistes

Embranchement	Pigments photosynthétiques	Réserves glucidiques	Composition de la paroi cellulaire	Flagelles	Habitat
Chlorophytes (algues vertes)	Chlorophylles a et b; caroténoïdes	Amidon	Glycoprotéines, polysaccharides autres que cellulose ou allulose; parfois plasmodesmes	aucun ou 2 (ou plus) apicaux ou subapicaux; égaux ou inégaux; lisse	essentiellement aquatique, eau de mer ou douce; relations symbiotiques terrestres
Rhodophytes (algues rouges)	Chlorophylle a; phycobilines; caroténoïdes	Amidon floridéen	Microfibrilles de cellulose enrobées dans une matrice (principalement galactane); souvent dépôts de carbonate de Ca ²⁺	Aucun	Marin, environ 100 espèces d'eau douce et beaucoup d'espèces tropicales
Euglénophytes	Absent chez la plupart ou chlorophylles a et b; caroténoïde	Paramylon	Pas de paroi cellulaire mais une pellicule flexible ou rigide de bandes protéiques sous la membrane plasmique	Généralement 2, un vers l'avant et un à l'arrière, souvent inégaux, s'allongent par l'apex	Principalement eau douce; parfois en mer
Cryptophytes	Aucun ou chlorophylles a et c; phycobillines; caroténoïdes	Amidon	Pas de paroi cellulaire mais une assise rigide de plaques protéiques à l'intérieur de la membrane plasmique	2 subapicaux plumeux et inégaux	Eaux salées et douces; eaux froides

Haptophytes	Chlorophylles a et c; caroténoïdes essentiellement fucoxanthine	Chrysolaminarine	Ecailles de cellulose; chez certains écailles de matière organique calcifiées	Aucun ou 2; égaux ou inégaux; la plupart ont des haptonèmes	Marin, rarement en eau douce
Algues brunes	Chlorophylles a et c, caroténoïdes, essentiellement fucoxanthine	Laminarine, mannitol (transporté)	Cellulose enrobée dans une matrice d'algine mucilagineuse; parfois des plasmodesmes	2; uniquement dans les cellules reproductrices; latéraux; plumeux à l'avant, lisse à l'arrière	Presque toutes marines; essentiellement tempérées et polaires; préfèrent les eaux océaniques froides
Diatomées (Bacillariophytes)	Aucun ou chlorophylles a et c; caroténoïdes, essentiellement fucoxanthine	Chrysolaminarine	Silice	Aucun ou 1; seulement chez les gamètes mâles centraux; apicals; plumeux	Mer et eau douce
Dinophytes	Aucun ou Chlorophylle a et c; caroténoïdes, principalement péricidine	Amidon	Couche de vésicules sous la membrane plasmique, avec ou sans plaques de cellulose	Aucun (sauf chez les gamètes) ou 2, différents; latéraux (1 transversal, 1 longitudinal)	Marin et eaux douces; rapports symbiotiques éventuels

Lexique :

- Haptonème : appendice filiforme particulier des Haptophytae, très court ou plus de dix fois plus long que le corps cellulaire ou encore réduit à quelques microtubules dans la cellule. Son ultrastructure est différente de celle d'un flagelle : en section transversale, on observe six ou sept microtubules disposés en croissant et entourés par une extension du réticulum endoplasmique. Le tout est recouvert par la membrane plasmique.
- Estran ou zone de balancement des marées : est la partie du littoral qui est alternativement couverte et découverte par la mer.
- Sporocyste : organe constitué par la paroi d'une cellule mère dont le contenu se divise pour donner les cellules assurant la multiplication ou la reproduction.

COMPOSITION DES ALGUES

1. L'EAU

Elles sont constituées à 90% d'eau, contenue essentiellement dans la vacuole de la cellule, ainsi que dans le cytoplasme et la paroi cellulaire. [3]

2. LES SUCRES : LES PHYCOCOLLOÏDES

La paroi est constituée de nombreux polysaccharides de haut poids moléculaire (sucres complexes) assurant une barrière très efficace qui empêche l'eau de fuir. Ainsi, les algues peuvent « supporter les allées et venues des marées ».

Les propriétés de ces polysaccharides sont utilisées comme gélifiant et épaississant dans l'industrie agroalimentaire et textile.

Selon les catégories d'algues, les sucres sont différents. Les polysaccharides les plus extraits sont les agars, les carraghénanes et les alginates de par leur utilisation croissante dans l'industrie alimentaire et cosmétique. Les alginates sont extraits des algues brunes, alors que les carraghénanes et les agars proviennent des algues rouges. Selon les espèces, ces sucres représentent entre 40 et 70% de la matière sèche.

Ces substances mucilagineuses extraites des algues sont appelées : les phycocolloïdes.

Les propriétés rhéologiques des substances aqueuses sont modifiées par l'addition de phycocolloïde. La principale utilisation de ces composés est basée sur leurs propriétés épaississantes qui augmentent la viscosité (la viscosité engendrée « par l'addition d'alginate de sodium maintient les différents éléments en un mélange homogène »), sur leurs propriétés gélifiantes qui forment des structures réticulées tridimensionnelles, ainsi que sur les propriétés émulsionnantes. L'intérêt de ces phycocolloïdes est d'apporter ces propriétés sans en modifier la saveur, la couleur ou la forme. [3,6,12,13]

2.1 L'acide alginique [6,13]

L'acide alginique est un polysaccharide matriciel des algues brunes qui est localisé autour des cellules de la zone médullaire.

Dans le monde, il est extrait de différentes espèces d'algues brunes. Ainsi en France, et dans les pays asiatiques, ils utilisent le genre *Laminaria*, sur la côte pacifique américaine : *Macrocystispyrifera*, *Ascophyllum nodosum* en Europe et *Ecklonia* en Afrique du Sud. « Seules, *Laminaria japonica* et *Macrocystis pyrifera* font l'objet de culture ».

Composition de l'acide alginique :

L'acide alginique est un polymère linéaire constitué d'un diholoside anionique [10] d'acide β -D-mannuronique et d'acide α -L-guluronique relié par une liaison osidique 1 β et 4.

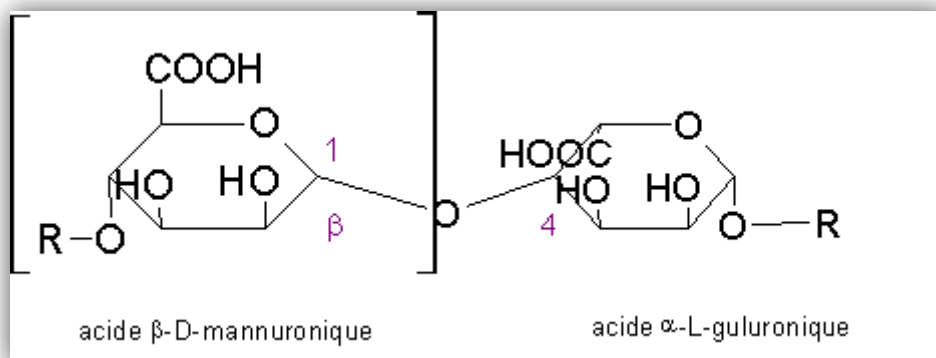
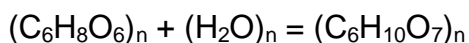


Illustration 15 : Structure de l'acide alginique

Dans ces chaînes d'alginate, on distingue les blocs polymannuronique (notés poly-M ; $(-M-)_n$ ou MM), les blocs polyguluronique (notés poly-G ; $(-G-)_n$ ou GG), et les blocs mixtes mannuronique/guluronique (notés poly-MG ; $(-M-G-)_n$ ou MG).

Chaque bloc est formé de 20 à 30 unités uroniques mais le degré de polymérisation global d'un acide alginique varie de 1000 à 10000. Plus le nombre de monomères est élevé, plus le degré de polymérisation et sa viscosité ou aptitude à former des gels est importante. La partie active des monomères est la fonction acide. A l'état naturel, l'acide alginique fixe une molécule d'eau par monomère.



Totalement deshydraté

état naturel

Les proportions relatives des unités constituant l'acide alginique ainsi que le rapport M/G (de 0,25 à 2,5), varient en fonction des espèces, de la saison, du site de récolte et de la partie utilisée.

Les unités poly-M se trouvent essentiellement dans les tissus jeunes aussi bien dans les parois cellulaires que dans les zones intercellulaires, alors que les unités poly-G semblent n'exister que dans les parois cellulaires. Le niveau d'acide guluronique (et par conséquent la rigidité du gel d'alginate) est régie par une enzyme la C5 épimérase. Cette enzyme serait à l'origine de la transformation des polymannuroniques (synthétisé en premier) en chaîne guluronique. Le départ d'une molécule d'eau permet la liaison des monomères entre eux par un « pont » oxygène.

Dans l'espace, l'acide alginique a une structure hélicoïdale lévogyre (sens inverse des aiguilles d'une montre) mais avec des séquences dites « fragiles » dans les zones mixtes (où il y a un mélange d'acide guluronique et mannuronique : M-G-M-M-G-M). Les unités poly-M (M-M-M) et poly-G (G-G-G) sont quant à elles plus rigides. Dans la spirale, les zones où dominent les acides mannuroniques sont importantes. Les séquences dites « fragiles » se brisent plus facilement (sous l'action d'agressions ou du temps) que les séquences dites « dures ». Ainsi, plus le nombre de séquences fragiles sera important, moins l'acide alginique sera stable. (Remarque : chaque monomère se place en configuration inverse du monomère précédent, c'est-à-dire que si le premier acide mannuronique est en configuration C1, le suivant se place en 1C).

Exemple : M - M - G - G

C1 1C C1 1C

L'acide alginique est insoluble dans l'eau mais il est très hydrophile, ce qui lui permet de stocker jusqu'à 140 fois son propre volume.

Les propriétés rhéologiques de cet acide peuvent être modifiées par l'addition de cations mono, bi ou trivalent. Avec les ions monovalents (Na^+ ; NH_4^+ ; K^+), les sels formés sont solubles. Ces sels d'alginate ne changent ni le goût, ni la couleur, ni l'odeur, ils ne modifient que la viscosité d'où leur intérêt en agro-alimentaire.

En présence de cations bivalents ou trivalents, notamment l'ion calcium (Ca^{2+}), les zones à acides guluroniques s'assemblent les unes au dessus des autres et forment une structure dite « egg-box » (les chaînes poly-M ne sont pas réticulées dans la structure de l'alginate de calcium, c'est la raison pour laquelle ces « boîtes à œufs » ne sont formées qu'à partir de poly-G). Cette structure forme des gels durs, « irréversibles » qui peuvent résister à des températures proches de 400°C . Plus le rapport M/G est faible (voisin de 0,5 : c'est-à-dire plus il y a d'acide guluronique), plus le gel est résistant. [6,13]

2.2 Agars

Les agars sont extraits de certaines Rhodobiontes de l'ordre des Gélidiales (genre *Gelidium*, *Pterocladia*, *Acanthopeltis*, *Gelidiella*), des Gigartinales (genre *Gracilia*, *Gracilariopsis*, *Ahnfelia*) ou des Cérariales.

Ces agars peuvent donner spontanément des gels en solution dans l'eau. Les gels obtenus se transforment en solution visqueuse lorsque la température est portée au dessus de 85°C (propriété de thermoréversibilité) et redonne le même gel en refroidissant et ceci autant de fois que souhaité.

Les agars ne sont pas dégradés par la température de stérilisation (100 , 120°C), c'est la raison pour laquelle ils sont très utilisés au niveau de l'industrie.

Composition des agars

L'agar est un polysaccharide matriciel présent en quantité importante dans le thalle (en moyenne 30 à 70% du poids sec) [13].

C'est un polymère sulfaté du D- et L-galactose et/ou du 3,6- α -anhydrogalactose. Il est constitué par la répétition régulière du motif diosidique [...₃(D-galactose) β ₁₋₄(L-galactose) α ₁...]_n.

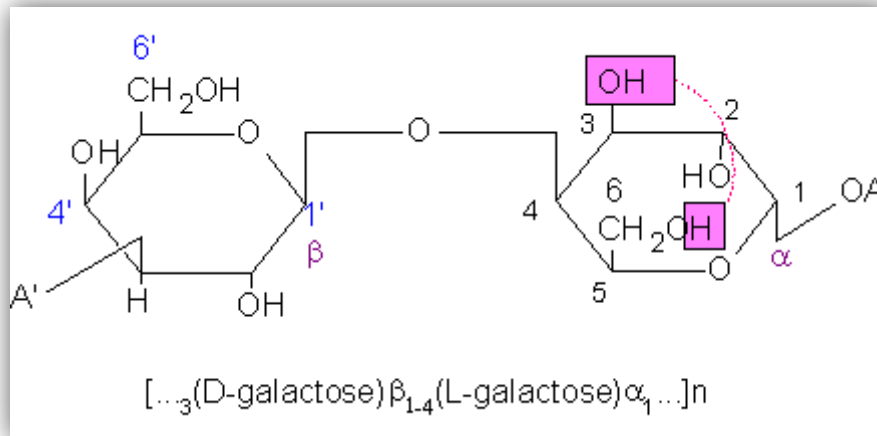


Illustration 16 : Structure de l'agar

Le L-galactose forme un pont 3,6 anhydrogalactose. La teneur en sulfate des agars est faible, elle varie en moyenne de 1 à 5% [13].

L'agar est un mélange de polymères de galactose sous deux configurations :

- Une configuration « galactose », qui est ou non associée à des ions sulfates hydrophiles (OSO_3^{2-}).
- Une configuration « anhydrogalactose » avec la présence d'un radical hydrophobe (CH_2O^-) entre le 3^{ième} et le 6^{ième} carbone.

Ces deux configurations sont réunies en une séquence par une liaison oxygène entre le carbone n°1 du premier monomère et la carbone n°4 du second.

Dans l'espace, l'agar forme une spirale lévogyre qui est constituée par une succession de cette séquence de deux monomères, reliée par un pont oxygène.

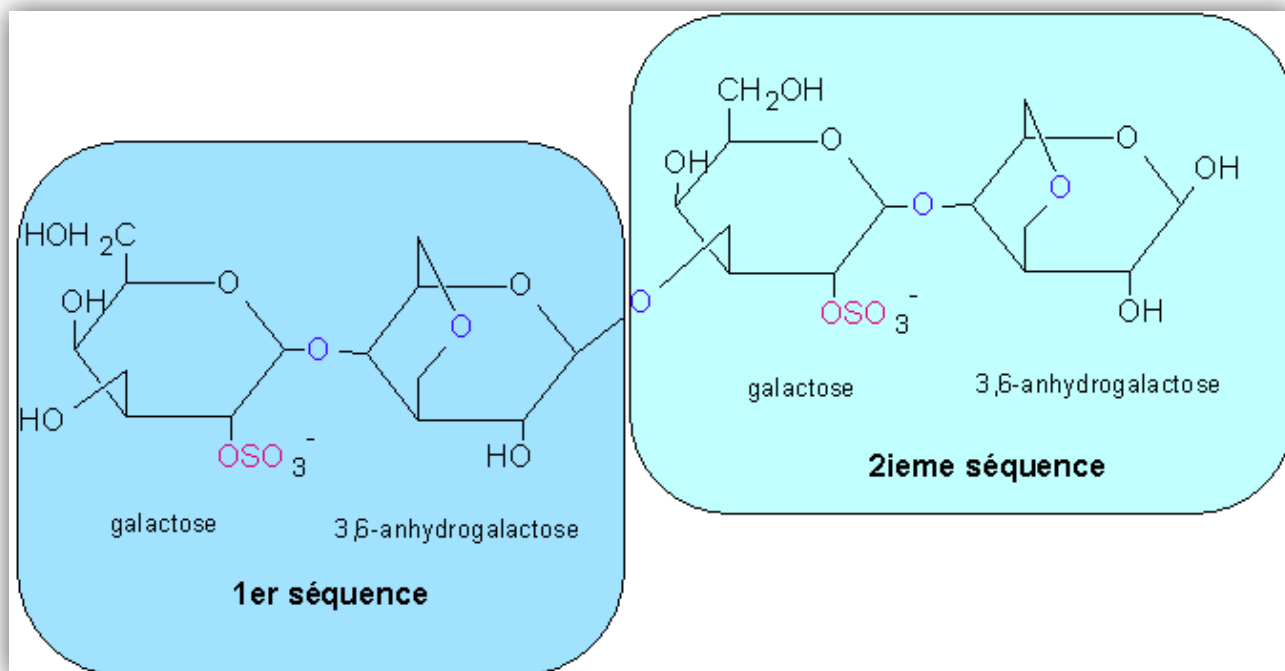


Illustration 17 : Structure moléculaire des agars

2.3 Carraghénanes

Les carraghénanes, de même que les agars, sont extraits de certaines Rhodobiontes, de l'ordre des Gigartinales (du genre *Chondrus*, *Gigartina*, *Kappaphycus*, *Hypnea*) et des Cryptomémiales.

Composition des carraghénanes :

Les carraghénanes ont une structure très proche des agars, leurs différences essentielles portent sur le taux de sulfate (radical OSO₃²⁻) qui est plus élevé chez les carraghénanes (environ 20 à 25%, alors que les agars en contiennent au maximum 5%).

Les carraghénanes sont constitués de D-galactose et forment le motif diosidique [...₃(D-galactose) β ₁₋₄(D-galactose) α ₁...]_n, appelé carrabiose.

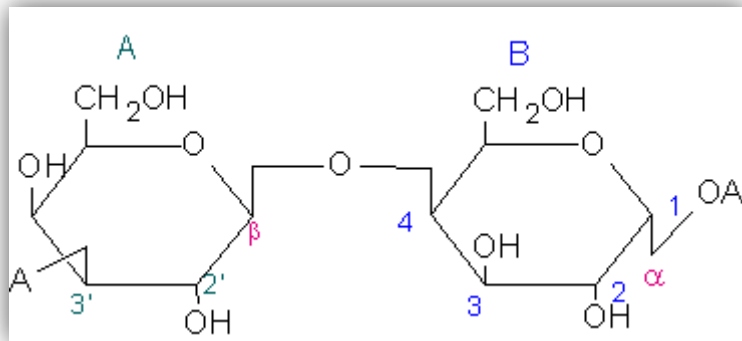


Illustration 18 : Motif disodique de base des carraghénanes

L'addition de chlorure de potassium (KCl) à un extrait de *Chondrus crispus* a permis la mise en évidence de deux types de carraghénanes :

- Les lambdas carraghénanes possèdent une fraction soluble dans le KCl. Ils ne donnent pas de gel et l'unité B n'est jamais sulfatée en C4.
- Les kappas carraghénanes sont insolubles à froid en présence de KCl mais solubles à chaud et donnent en refroidissant un gel doux agréable au palais. Ces κ -carraghénanes sont sulfatés en C4 sur l'unité B.

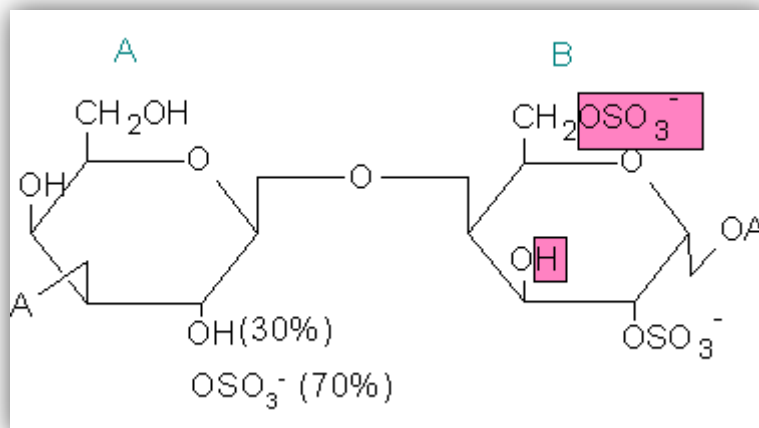


Illustration 19 : Structure du lambda (λ) carraghénane

Le lambda carraghénane, possède un radical OSO_3^{2-} , sur le carbone n°2 du galactose A et sur le carbone n° 2 et 6 du galactose B. « Il n'y a pas de pont hydrophobe et la configuration spatiale de la molécule s'inscrit selon une ligne brisée : ce polymère ne peut donc pas donner de gels ».

Le kappa et l'iota carraghénanes possèdent, sur le deuxième galactose constituant leur séquence, un radical CH_2O^- entre le troisième et le sixième carbone (= anhydrogalactose). Ils ont également tous les deux un radical OSO_3^- hydrophile sur le carbone n°4 du galactose A.

La différence porte sur le carbone n°2 de l'anhydrogalactose (galactose B) qui est sulfaté chez les iotas carraghénanes.

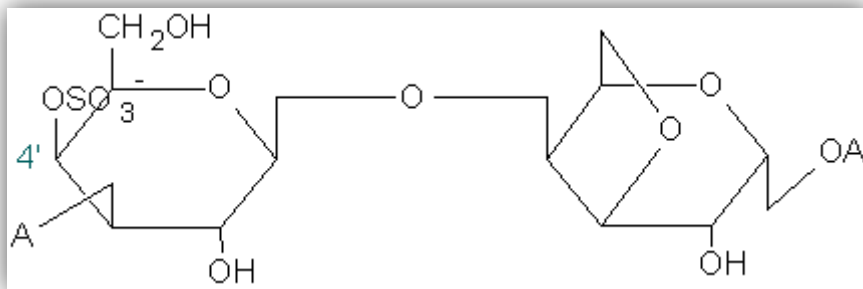


Illustration 20 : Structure du Kappa carraghénane (κ)

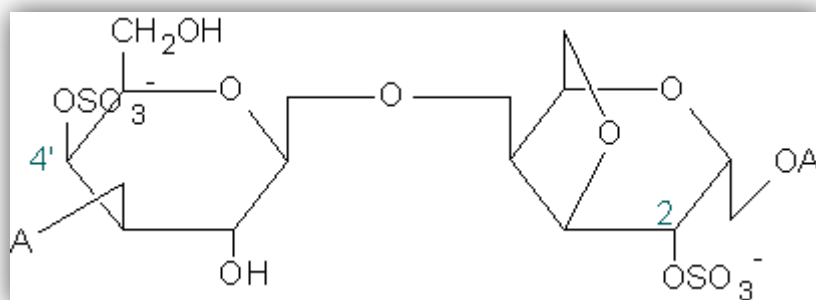


Illustration 21 : Structure du Iota carraghénane (ι)

Le kappa et l'iota carraghénane forment une spirale dans l'espace grâce au radical hydrophobe $\text{CH}_2\text{-O}^-$ sur l'anhydrogalactose. Ainsi lorsque les molécules s'associent par paires, les ponts hydrophobes sont face à face et tentent de chasser l'eau. Mais ce mouvement peut être contré par la présence des sulfates hydrophiles. Cela empêche la formation de gel car les molécules restent trop éloignées les unes des autres et les ponts hydrogènes ne se forment pas. Pour constituer le gel, il faut ajouter dans la solution du calcium ou du potassium. Ces ions forment « le pont manquant entre les deux molécules parallèles », ce qui fige l'ensemble en un gel. Le gel Kappa carraghénane sera plus rigide que celui de l'iota car ce dernier possède un radical OSO_3^{2-} hydrophile en plus. (Remarque : si on chélate les ions Ca^{2+} et K^+ , le gel se disloque).

Propriétés des carraghénanes :

- La solubilité : elle varie avec la température. Tous les carraghénanes sont solubles dans l'eau et le lait chaud (75°C), mais la viscosité de la solution limite cette solubilité. Sous la forme de sels de sodium, les carraghénanes kappa et iota sont solubles, alors qu'avec le potassium et le calcium, ils ne se dissolvent pas entièrement. Quant au carraghénane lambda, il est totalement soluble dans l'eau froide.
- La viscosité : les carraghénanes forment des solutions visqueuses dans l'eau dont les propriétés dépendront de la concentration, de la température, de la quantité du solide, du type de carraghénanes et de la masse molaire. La viscosité augmente proportionnellement à la concentration et à la masse molaire alors que les sels, eux réduisent (diminution des répulsions électrostatiques). De même, l'augmentation de la température diminue la viscosité.
- La gélification : les lambda carraghénanes dilués dans une solution aqueuse ne forment jamais de gel mais ils élèvent la viscosité. Les kappa et iota carraghénanes (insoluble dans l'eau froide) forment des gels dans l'eau en refroidissant une solution préalablement chauffée. Les gels formés sont thermoréversibles en présence d'ions calcium ou de protéines ; ils fondent quand on les chauffe et se reforment quand on les refroidit. Les kappa et iota carraghénanes gélifient avec des sels de potassium ou de calcium mais pas avec ceux de sodium. Dès l'extraction, on détermine la forme saline des carraghénanes. Ainsi pour le kappa carraghénane, l'ajout d'ions potassium augmente la force du gel et pour le iota se

sera les ions calcium. Le kappa carraghénane de potassium aboutit à un gel fort souvent accompagné d'une synérèse (exsudation d'eau) importante. Quant à l'iota carraghénanes, il donne un gel élastique et doux, sans synérèse.

Les algues du genre *Chondrus* et *Gigartina* produisent des kappa et des lambda carraghénanes à différentes étapes de leur vie. Les kappa interviendraient dans les gamètes haploïdes, alors que les lambda se situe dans les frondes tétrasporiques diploïdes. Cette découverte a permis de mieux maîtriser l'utilisation des algues afin d'obtenir l'élément (kappa ou lambda) désiré. [3,6,13–15]

2.4 Les polysaccharides sulfatés

Ce sont des polysaccharides situés dans la paroi des cellules. Parmi ces polysaccharides sulfatés, on retrouve les carraghénanes (extrait des Algues Rouges), mais il existe également les fucanes chez les Algues Brunnes et les ulvanes chez les Algues Vertes. Ces polysaccharides font l'objet de nombreuses études notamment dans le domaine médical. [1,13]

2.4.1 Les fucoïdanes ou fucanes

Ce sont des constituants de la paroi cellulaire de certaines Algues Brunnes. Il semblerait que ces polysaccharides sulfatés ne soient pas présents chez toutes les Phaeophyceae, mais on les trouve chez les Fucales et les Laminariales.

Ces fucoïdanes agissent sur la régulation de l'hydratation et celui du stress osmotique au sein des cellules algales.

Ils sont composés essentiellement d'une répétition d'unités de fucoses sulfatés mais également d'autres sucres neutres (galactose, mannose, xylose) et de l'acide uronique qui peut être acétylé. Leur teneur peut aller de 3 à 30% du poids sec de l'algue. Les fucanes sont répartis en trois familles, les homofucanes, les xylofuroglucuronanes, et les glycuronofucoglucanes qui sont différents par leurs compositions. Les homofucanes sont composés uniquement de d' α -L-fucose mais les polymères peuvent se présenter sous deux structures. Les fucoses sont reliés en α -1,2 et sulfaté en position 4 ou relié en α -1,3 et sulfaté en 4.

Les xylofucoglucuronanes sont constitués d'un squelette de glucuronane (poly-1,4- β -D-glucuronique) ramifié par des chaînes courtes comprenant du xylose et du L-fucose sulfaté en 4. Ce type de fucoïdane est nommé ascophyllane car on la trouve chez *Ascophyllum nodosum*.

Quant aux glucuronofucoglucanes, se sont des analogues des xylofucoglucuronanes mais avec des résidus « mannose » en plus. On les nomme sargasses car ils sont extraits de *Sargassum linifolium*.

Cependant, l'extraction des fucanes pour les espèces de l'ordre des Fucales et des Laminariales est délicate car ces polysaccharides coexistent avec les alginates. De plus, il existe un risque de coprécipitation des alginates et des fucoïdanes. Pour tenter d'y remédier, on extrait les fucanes à chaud en présence d'ion calcium qui précipitent les alginates et laissent les fucoïdanes en solution. Les dérivés phénoliques peuvent également les contaminer, c'est la raison pour laquelle on traite l'algue avec une solution formolée avant l'extraction afin de polymériser les phénols en polymères insolubles.

2.4.2 Les ulvanes

On les trouve dans la paroi des Algues Vertes qui appartiennent à la famille des Ulvales, essentiellement *Ulva spp.* et par extension *Enteromorpha spp.*. Ces ulvanes sont des polysaccharides anioniques sulfatés et carboxylés qui sont solubles dans l'eau. Ils sont extraits dans de l'eau dans laquelle on a ajouté un chélateur de cations. Ces ulvanes sont représentés de 8 à 29% du poids sec de l'algue. Ils 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 du D-galactose, du D-glucose et du D-xylose. L'acide L-iduronique se retrouve dans les glycosaminoglycane (GAGs) comme l'héparine, exprimée à la surface des cellules des mammifères.

Les ulvanes de part leurs structures chimiques particulières, leurs densités de charge et leurs poids moléculaires apportent des propriétés physico-chimiques et biologiques. En présence de cations bivalents ou de borate, les solutions aqueuses d'ulvanes peuvent former des gels thermoréversibles. Leurs caractéristiques particulières d'échange d'ions et de gélification, donnent de nouvelles fonctionnalités pour des applications dans lesquelles la chélation métallique est nécessaire et/ou dans la conception de matériaux tels que les composés de nanostructures.

Les ulvanes présentent également plusieurs propriétés biologiques potentiellement utiles pour des applications agricoles, alimentaires, phytopharmaceutiques ou cosmétiques. Elles sont aussi une source de précurseurs de sucres rares qui pouvant servir dans la synthèse de produits chimiques fins ou d'agent texturant pour la viscosité de formulations ou la conception de gels thermoréversibles (avec des textures contrôlées avec précision).

3. LES MINERAUX

Les minéraux de l'environnement extérieur sont retenus dans la paroi des algues, sans modifier l'équilibre osmotique car ils pénètrent « pas ou peu » dans la cellule. Les minéraux peuvent représenter jusqu'à 40% [16] de la matière sèche.

On parle de masse sèche car la notion de masse fraîche n'est pas significative du fait des variabilités des conditions de vie des algues (immersion, émergence...).

L'eau de mer possède beaucoup de minéraux, ainsi les algues capturent les minéraux rares et assimilables par l'organisme. Les algues constituent un véritable cocktail vitaminique dans lequel on trouve des macro-éléments tel que le sodium, le magnésium, le potassium, le calcium, le phosphore, le chlore, le soufre, ainsi qu'une grande variété de micro-éléments avec de l'iode, du zinc, du fer, de l'aluminium, du manganèse, du nickel, du sélénium, du cuivre, du molybdène, du fluor, du bore, du cobalt, de l'étain, de l'argent, du plomb, du bismuth, une forme toxique d'arsenic, de l'antimoine, du lithium, de l'or, du baryum, du strontium et du titane...

Il est donc fondamental, que les algues alimentaires se développent dans les milieux exempts de pollutions.

Les algues brunes, vertes et rouges ont des quantités équivalentes en matières minérales totales. Cependant les algues vertes en ont un taux un peu inférieur par rapport aux deux autres catégories d'algues.

	Pourcentage de matière minérale dans la masse sèche
Algues vertes	6 à 30 %
Algue rouges	12 à 36 %
Algues brunes	15 à 36 %

Tableau 3 [16]

Tous ces minéraux, n'ont pas le même intérêt notamment pour les propriétés nutritionnelles.

L'iode :

Les algues brunes, notamment les laminaires et les fucales, sont celles qui accumulent le plus d'iode (de 1500 à 8000 ppm pour les laminaires et de 500 à 1000 ppm sur sec pour les fucales). Les teneurs des algues rouges et vertes sont moindres (sauf exception).

Bien qu'en faible quantité, la teneur de cet oligoélément dans les algues reste supérieure aux autres sources d'iode (mollusques, crustacés...).

		Teneur en mg/kg sec
Algues brunes	<i>Laminaria digitata</i>	2020-7454
	<i>Laminaria saccharina</i>	2789-5277
	<i>Fucus vesiculosus</i>	240-728
	<i>Undaria pinnatifida</i>	118-347
	<i>Himantalia elongata</i>	90-168
Algues rouges	<i>Palmaria palmata</i>	40-541
	<i>Porphyra umbilicalis</i>	67-188
Algues vertes	<i>Ulva sp.</i>	10-131

Tableau 4 : La teneur en iode de quelques algues [16]

Cette iode se présente sous différentes formes, on le trouve sous forme minérale (iodure) ou sous forme organique lié à des hydrocarbures ou à des acides aminés (mono et di-iodo-thyrosine). Selon les phyllums [17] des algues, ses proportions varient. Ainsi, dans les algues brunes, c'est l'iode minéral qui domine avec plus de 80% de l'iode total, alors que chez les algues vertes les proportions sont inversées. Tandis que pour les algues rouges les teneurs sont intermédiaires (environ 40% d'iode minéral et 60% d'iode organique).

L'iode contenu dans les algues est disponible pour l'organisme d'où leur intérêt nutritionnel notamment pour le bon fonctionnement de la glande thyroïdienne. [3,16]

4. LES PROTEINES

Chez certaines algues vertes et rouges (*Palmaria palmata* et *Porphyra*), les protéines peuvent constituer jusqu'à 35% [3] du poids matière sèche.



Illustration 22 : *Palmaria palmata* sur un stipe



Illustration 23 : *Porphyra* sp.

Chez les algues brunes, la teneur est moindre (5 à 15% matière sèche [16]). Cette teneur est même supérieure à celle contenue chez certaines fabacées (tel que le soja).

L'algue la plus connue pour sa richesse en protéine est la spiruline (microalgue d'eau douce). On retrouve également la plupart des acides aminés essentiels. Seul bémol, ils ne sont pas forcément assimilables par l'organisme humain car les protéines de certaines algues brunes et rouges seraient liées aux polysaccharides pariétaux rendant difficile la séparation entre les molécules et la dégradation par les sucs digestifs. La digestion de ces protéines est améliorée après une macération enzymatique des matières par des cellulases, xylanases ou β -glucanases.

Chez les algues rouges et bleues, il existe des protéines constituant les principaux pigments de ces algues : les phycobiliprotéines. Ces pigments sont formés d'une biline (noyau tetrapyrrolique ouvert) auquel est liée une chaîne protéique. De part leur propriétés antioxydantes, certaines de ces phycobiliprotéines pourraient être intéressantes dans la prévention ou le traitement de maladies dégénératives. [3,16]

5. LES VITAMINES

Les algues sont également très riches en vitamines (A, B, B2, B3, B6, B12, C, D, E, K, PP) mais leur teneur est fonction des saisons.

La vitamine B12 est un constituant intéressant des algues dont la proportion n'est pas négligeable et aurait une bonne biodisponibilité. Elle serait particulièrement recommandée pour traiter les effets du vieillissement, pour les syndromes de fatigue chronique et les anémies. [18]

Chez les algues vertes et brunes, la quantité de vitamine C est importante, son taux varie entre 500 et 3000 mg/kg sec, alors que chez les algues rouges, il est de 100 à 800 mg/kg sec. La vitamine C est un piègeur de radicaux libres, elle permet d'activer l'absorption intestinale du fer, de renforcer le système immunitaire et de contrôler la formation du tissu conjonctif et de la matrice protidique du tissu osseux.

De plus, les algues brunes sont riches en vitamine E, notamment les fuciales (200 à 600 mg de tocophérols/kg de matière sèche). De par son pouvoir antioxydant, elle inhibe l'oxydation des lipoprotéines de basse densité. Elle freine la formation des prostaglandines et des thromboxanes dans la cascade de l'acide arachidonique. Les algues brunes contiennent de l'alpha, de la beta et du gamma tocophérol, alors que les algues vertes et rouges possèdent seulement de l'alpha tocophérol. Il a été montré que les gammas et les alphas tocophérol augmentaient la production d'oxyde nitrique et de l'activité synthétique de l'oxyde nitrique et ils jouent également un rôle important dans la prévention des maladies cardiovasculaires.

Les algues rouges possèdent également de la provitamine A dont les composants essentiels sont le β -carotène et l' α -carotène (teneur de 20 à 170 mg/kg sec). [3,16–18]

6. LES LIPIDES

La teneur lipidique est très faible seulement 1 à 3% de matière sèche. Sur la côte française, on trouve une algue *Ascophyllum nodosum* qui peut en contenir jusqu'à 5%.



Illustration 24 : Ascophyllum nodosum (on peut évaluer l'âge de cette algue en comptant le nombre de vésicules, car il s'en forme une chaque année)

Les micro- et macro-algues possèdent (à l'exception des chlorophycées) des complexes élongase-désaturases conduisant à la synthèse d'acides gras polyinsaturés à longue chaîne.

Les algues vertes ont une teneur beaucoup plus élevée en acide oléique (C18 : 1) et en acide alpha-linolénique (C18 : 3 ω 3) (acide gras indispensable non synthétisé par l'homme) que les végétaux supérieurs.

Les algues rouges ont un taux élevé d'acides gras polyinsaturés à 20 carbones. On trouve également de l'acide arachidonique (C20 : 4 ω 6) et des acides gras polyinsaturés à 18 carbones.

Quant aux algues brunes, elles ont une distribution en acide gras comparable à celle des algues rouges.

Chez certaines microalgues, la teneur en lipides (dont les acides gras essentiels) est supérieure à celle des macroalgues.

Les acides gras polyinsaturés jouent un rôle clé dans la cellule et dans le métabolisme tissulaire notamment dans la régulation des échanges membranaires, des électrons et dans le transport de l'oxygène, ainsi que dans les adaptations thermiques. Il existe un intérêt grandissant pour une famille d'acide gras polyinsaturés (les ω 3) appelés acide eicosapentaénoïque (EPA) (C20 : 5 ω 3). Cette EPA est un acide gras à 20 carbones avec

5 doubles liaisons en partant de la fonction carboxy terminal ou avec la position de la dernière double liaison sur le troisième carbone en partant du méthyl terminal.

La biosynthèse d'EPA s'effectue à la suite d'une série de réactions qui peut être divisée en deux stades distincts. La première est la synthèse « de novo » de l'acide oléique (C18 : 1 ω 9) à partir de l'acétate suivi par la conversion de l'acide linoléique (C18 : 2 ω -6) et de l'acide α -linoléique (C18 : 3 ω -3).

Les étapes qui suivent sont celles de désaturation et d'élongation à partir d'acides gras polyinsaturés ω -3. Dans la cellule, l'EPA est normalement estérifié (par l'activité de cyclooxygénase et de lipoxygénase) pour former un complexe de molécules lipidiques et avoir une fonction importante chez les animaux et les humains. Il joue le rôle de précurseur d'un groupe d'éicosanoïdes hormono-dépendants tel que les prostaglandines, les thromboxanes et les leucotriènes qui ont un rôle capital dans la régulation du développement et dans la physiologie.

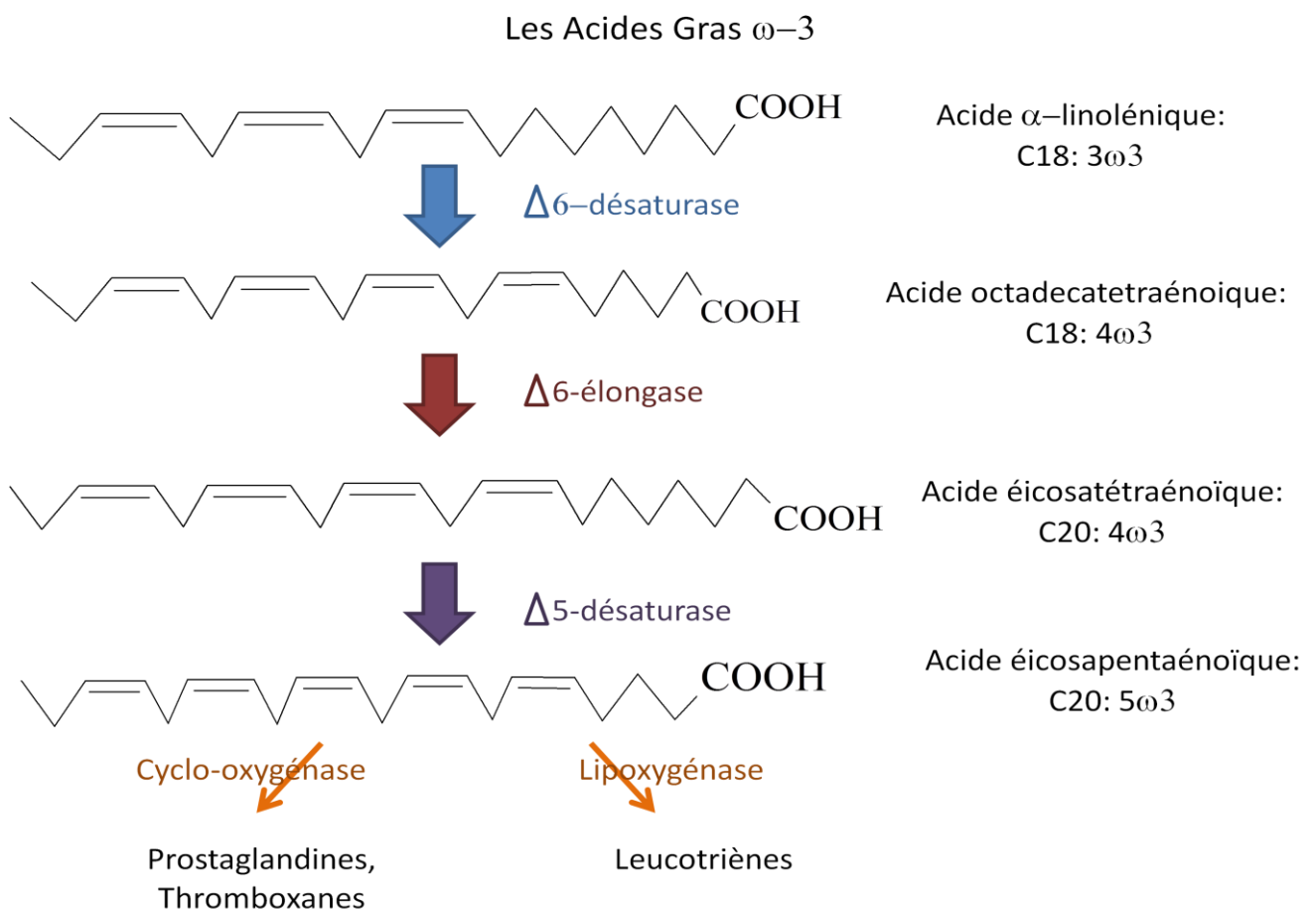


Illustration 25 : Schéma de la biosynthèse de l'acide éicosapentaénoïque

Cependant, seulement quelques espèces de microalgues ont un potentiel pour l'exploitation industrielle, principalement du au fait que la majorité des cultures des microalgues présente un faible taux spécifique de croissance et une faible densité des cellules quand elles grandissent sous les conditions conventionnelles photoautotrophique. Ainsi, il y a un réel besoin technologique pour le développement et l'exploitation d'une source alternative sûre d'acide gras ω -3 polyinsaturés pérenne et économique pour la santé et la nutrition humaine.

7. LES PIGMENTS

La couleur des algues est du aux pigments qu'elles contiennent ou ne contiennent pas. Ainsi on peut découvrir des algues vertes, rouges, roses, jaunes, brunes, oranges, noires, des grises voire même des blanches, des violettes et des bleues. Certaines algues parasitent d'autres espèces et nous apparaissent blanches. Mais la majorité des algues possède des pigments qui les colorent.

C'est ainsi que la chlorophylle (pigment à l'origine de la photosynthèse), nous apparait vert car les radiations vertes ne sont pas absorbés par la molécule. A l'inverse, la chlorophylle absorbe les radiations bleues et rouges. Il existe quatre types de chlorophylles qui diffèrent par de légères modifications structurales. Ainsi, la chlorophylle *a* est présente chez les végétaux terrestres et aquatiques. Sa présence est nécessaire au déroulement de la photosynthèse chez toutes les algues photosynthétiques. Chez les Chlorophytes et les Euglénophycées, elle est associée à de la chlorophylle *b*. Les algues brunes, les Diatomées, les Dinophytes, les Cryptophytes et les Haptophytes, renferment en plus de la chlorophylle *c* alors que les Cyanobactéries et les Rhodophycées contiennent de la chlorophylle *d*.

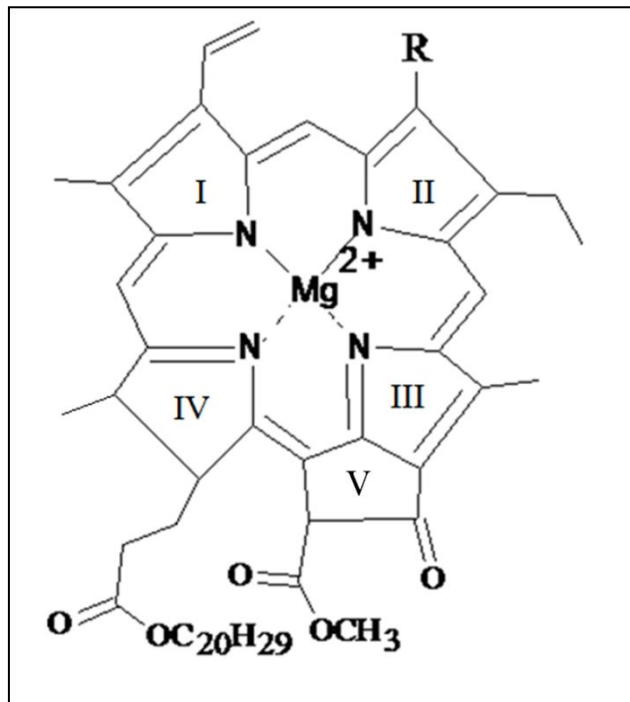


Illustration 26 : Structure de la chlorophylle avec R= CH₃ pour la chlorophylle a et R= CHO pour la chlorophylle b

On retrouve chez toutes les algues des caroténoïdes notamment du β -carotène, ainsi que des dérivés oxygénés, les xanthophylles. Ces derniers peuvent être spécifiques de certaines espèces, par exemple on trouve beaucoup de lutéine chez les algues vertes. Toutefois, ces caroténoïdes ne masquent pas la couleur verte car ils ont une proportion relative faible dans les plastes par rapport aux chlorophylles. Certaines algues vertes peuvent apparaître rouge-orangé en raison de la présence dans leur cellule de gouttelettes colorées par l'astaxanthine (xanthophylle). Chez les algues brunes on retrouve une grande quantité de fucoxanthine. Tous ces pigments sont liposolubles et insolubles dans l'eau.

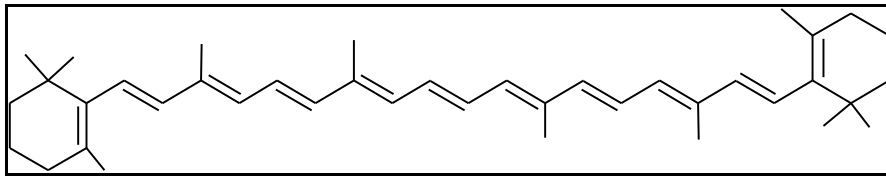


Illustration 27 : Structure chimique d'un β -Carotène

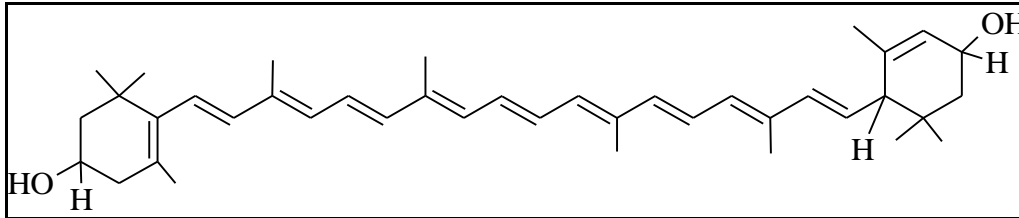


Illustration 28 : Structure chimique de la lutéine

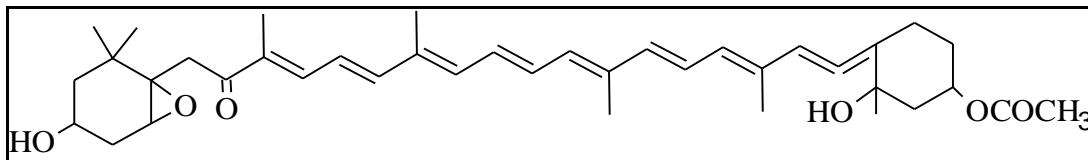


Illustration 29 : Structure chimique de la fucoxanthine

La présence de phycobiline est une caractéristique commune aux Rhodophyceae et aux Cyanobactéries. Les phycoérythrines en solution aqueuse sont de couleur rouge et possèdent une fluorescence de couleur orangée, alors que les phycocyanines sont bleues et ont une fluorescence en rouge sombre. Elles peuvent coexister dans les mêmes espèces mais la phycoérythrine domine chez les Algues rouges alors que la phycocyanine est majoritaire voire unique chez les Algues bleues.

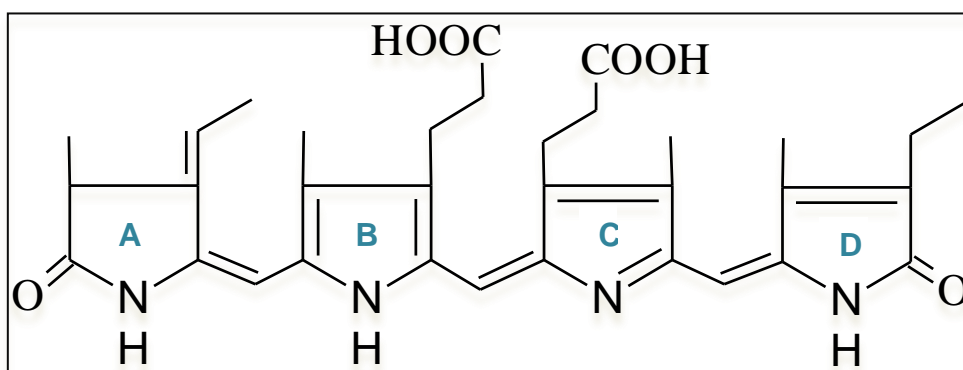


Illustration 30 : Structure chimique de la phycocyanine

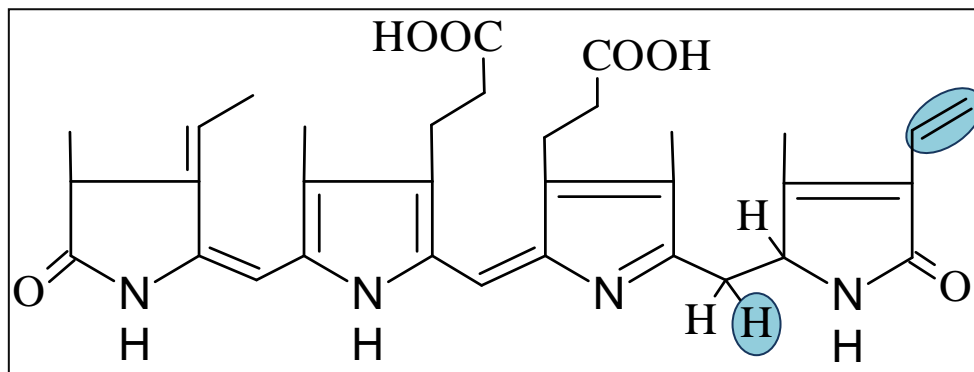


Illustration 31 : Structure chimique de la phycoérythrine

Les algues associent à leur chlorophylle au moins un pigment complémentaire (même les algues vertes). C'est le mélange et la quantité de pigment qui donne la couleur à l'algue.

Cependant, c'est la chlorophylle *a* qui joue un rôle central dans la photosynthèse en convertissant l'énergie lumineuse en énergie chimique. Mais les autres pigments interviennent également en captant l'énergie lumineuse des régions du spectre non utilisé par la chlorophylle *a*. L'ensemble des pigments participe à une chaîne de transfert d'énergie qui s'exprime sous la forme d'un photon qui passe d'un pigment à l'autre en perdant à chaque fois un peu d'activité. Sa longueur d'onde augmente à chaque saut et il rejoint la chlorophylle *a* avec la longueur d'onde adéquate. Ainsi « plus les radiations de la source de lumière sont énergétiques (longueur d'onde courte), plus il faudra de relais pour atteindre le centre réactionnel avec la bonne longueur d'onde » [3].

Par exemple, la chaîne de transfert d'énergie des algues vertes est caroténoïde, chlorophylle *b* puis chlorophylle *a*. Tandis que chez les Algues rouges c'est un enchaînement de phycoérythrine, phycocyanine, allophycocyanine pour finir par la chlorophylle *a*.

Les radiations rouges ne sont pas nécessaires à l'activation de la chlorophylle *a*. Ceci explique comment des algues peuvent se développer en profondeur alors que les radiations rouges sont les premières à être absorbées par l'eau.

Certains pigments comme la phycoérythrine et la phycocyanine possèdent de fortes propriétés antioxydantes. Mais si l'ensoleillement est trop intense, les pigments surnuméraires sont dégradés et la chlorophylle *a* s'en trouve démasqué. [3,13,19]

Groupes d'algues	Principaux pigments à l'origine de la différenciation des algues
Algues bleues	Chlorophylle <i>a</i> ; phycoérythrine; phycocyanine; allophycocyanine
Algues vertes	Chlorophylle <i>a</i> ; Chlorophylle <i>b</i> ; carotenoïdes
Algues brunes	Chlorophylle <i>a</i> ; Chlorophylle <i>c</i> ; carotenoïdes (essentiellement la fucoxanthine)
Algues rouges	Chlorophylle <i>a</i> ; phycoérythrine; phycocyanine; allocyanine
Diatomées	Chlorophylle <i>a</i> ; Chlorophylle <i>c</i> ; carotenoïdes (essentiellement la fucoxanthine, diatoxanthine, diadinoxanthine et d'autres)

Tableau 5 : Pigments caractéristiques des principaux groupes d'algues

LES APPLICATIONS DES ALGUES ET LEURS DEVELOPPEMENTS FUTURS

1. LES ALGUES ALIMENTAIRES

C'est la principale utilisation des algues dans le monde, cela représente 75% de l'exploitation totale des algues [1]. On trouve des représentants chez les algues brunes et rouges essentiellement mais aussi chez les algues vertes et bleues.

Les principaux producteurs sont les pays asiatiques (Chine, Corée et Japon) qui sont à l'origine des $\frac{3}{4}$ de la production mondiale, dont les 90% proviennent de la culture. Dans les pays du Sud Est Asiatique, l'algue fait partie de l'alimentation depuis des millénaires, elle y est même pour certaines algues (comme les feuilles de Nori) très prisé. Pour les pays Occidentaux, la consommation des algues est beaucoup plus récente. Elle est pourtant utilisée quotidiennement mais masquée dans les aliments ou préparations.

De part leurs propriétés nutritionnelles remarquables, elles sont entrées aujourd'hui dans le secteur des compléments alimentaires. [6,13,17,20]

1.1 Leurs utilisations en Europe

La plupart des algues sont comestibles, malgré cela, seulement vingt algues ont reçu le label alimentaire en France. Ces macroalgues sont : [1]

Nom scientifiques	Nom commun
Algues Brunes	
<i>Ascophyllum nodosum</i>	Goémon nori
<i>Fucus vesiculosus</i>	Goémon nori
<i>Himanthalia elongata</i>	Haricot de mer; Spaghetti de mer
<i>Laminaria digitata</i>	Kombu
<i>Laminaria japonica</i>	Kombu
<i>Laminaria saccharina</i>	Kombu Royal
<i>Undaria pinnatifida</i>	Wakamé
Algues rouges	
<i>Chondrus crispus</i>	Lichen; pioca; Irish moss
<i>Gracilaria verrucosa</i>	Ogo-nori
<i>Palmaria palmata</i>	Dulse
<i>Porphyra umbilicalis</i>	Nori
<i>Porphyra tenera</i>	Nori
<i>Porphyra yezoensis</i>	Nori
<i>Porphyra dioica</i>	Nori
<i>Porphyra purpurea</i>	Nori
<i>Porphyra laciniata</i>	Nori
<i>Porphyra leucostica</i>	Nori
Algues vertes	
<i>Ulva sp.</i>	Laitue de mer
<i>Enteromorpha sp.</i>	Aonori

Tableau 6 : Macroalgues autorisées à la vente en France

Auxquelles on ajoute la spiruline (Microalgue bleue). Mais il est assez facile aujourd'hui de se procurer des algues utilisées en Asie.

En Europe, les algues étaient consommées de façon modeste en Irlande du Nord, au Pays de Galles ou en Bretagne Sud de façon régulière, soit directement, soit pour leurs propriétés gélifiantes. L'une des raisons probables de ce désintéressement des algues serait du à leur consommation lors d'épisodes de grandes famines (elles étaient considérées comme l'aliment des périodes de « misères »). L'utilisation des algues est arrivée avec les populations asiatiques migrantes, mais ce n'est que vers les années 1980 qu'elles entrent en tant que légumes occasionnels dans la réglementation française.

Les algues autorisées en France doivent subir des contrôles concernant leur teneur en métaux lourds et en iode.

	Teneur maximale autorisée en mg par kg sec
Arsenic minéral	3
Cadnium	0,5
Etain	5
Iode	2000
Mercurure	0,1
Plomb	5

Tableau 7 : Teneurs maximales en iode et métaux lourds autorisées en France

Mais elles doivent également répondre à des critères microbiologiques définis.

Germes	Quantité ne pouvant être dépassé
Germes aérobies mésophiles	moins de 10^3 /g
Coliformes fécaux	moins 10/g
Anaérobies sulfite-réducteurs	moins 10^2 /g
<i>Clostridium perfringens</i>	moins 1/g
<i>Salmonella</i>	absence dans 25 g
<i>Staphylococcus aureus</i>	moins 10^2 /g

Tableau 8 : Exigence microbiologique pour les produits secs

Les « légumes de la mer » trouvent peu à peu leur place aux côtés des produits d'origine marine tel que les poissons et les crustacés. On les rencontre aussi dans de nombreux produits confectionnés à bases d'algues. Ces végétaux alimentaires sont disponibles sous différentes formes :

- Séchés en « feuilles » ou encore en poudre, paillettes ou granulés.
- Saumurés : cette technique consiste à passer ces algues dans l'eau bouillante à 110°C pendant quelques secondes. De cette façon 80% de l'eau est extirpée, mais l'algue conserve ses vitamines et ses pigments.
- Extraits liquides : ils sont vendus notamment au boulanger breton pour la confection de pain aux algues ou pour la réalisation de boissons.
- Inclues dans des plats, dans des produits traditionnels (charcuterie...) ou dans des infusions.
- Sous la forme de condiments ou d'aromates (sel, moutarde...).

Les algues fraîches sont composées de glucides, de nombreux oligoéléments, de sels minéraux, de vitamines (A, C et B12 (que l'on trouve uniquement dans le foie des animaux)), quelques protéines et peu de lipides. Il est important d'avoir une notion comparative de ces algues : ainsi « 10 g d'algues contiennent autant d'iode que 11 kg de cabillaud, autant de fer que 1 kg d'épinards, autant de vitamine E que 100 g de carottes, et autant de vitamine D que 9 kg d'abricots » [20].

1.2 Leurs utilisations en Extrême-Orient

Les algues marines étaient déjà récoltées pendant la préhistoire. Pour les Coréens et les Japonais, l'algue prend une place importante dans leur alimentation. Elle est consommée tel quelle en salade ou bien encore sous forme de feuille reconstituée.

Mais leur consommation est essentiellement orientée sur 3 espèces d'algues :

- *Porphyra sp.* (Nori)
- *Laminaria japonica* (Kombu)
- *Undaria pinnatifida* (Wakamé)

Le thalle de l'algue *Porphyra sp.* récolté, nettoyé et séché donne ce que l'on appelle la « feuille » de *Porphyra*. Ces dernières peuvent être consommées tel quel ou utilisées comme « contenant » pour la confection des sushi. Cette algue possède des propriétés nutritives intéressantes notamment pour sa teneur en protéines qui peut atteindre plus de 40% du poids sec. Elles sont également riches en polysaccharides, provitamine A et en vitamine B12. Une autre spécificité avantageuse de *Porphyra sp.* est sa teneur en acide gras éicosapentaénoïque qui favorise l'élimination des graisses neutres et du cholestérol.



Illustration 32 : « Feuille » de *Porphyra sp.*

Le Kombu ou *Laminaria japonica* est vendu en entier sèche, il est servi comme légume d'accompagnement, il peut être salé, bouilli, on le retrouve également comme « pickles » ou pour faire du thé. Récemment, on l'a incorporé dans des bonbons, de la confiture, du saké ou encore des pâtes. Au niveau apport nutritif, il possède peu de protéines, la plupart des sucres qu'il contient ne sont pas assimilables. Il possède cependant tous les acides aminés. Son intérêt nutritionnel réside essentiellement dans sa teneur en vitamine B12.

Le Wakamé ou *Undaria pinnatifida* est consommé frais en salade dans 20% des cas. Les 80% restants représentent le Wakamé salé qui après rinçage est utilisé pour la confection de pâtes, de soupes, de purées, de bonbons... d'un point de vue nutritif, il possède un taux de protéine intéressant (au alentour des 18 %). Il possède tous les acides aminés indispensables. Cette algue est marquée également par sa richesse en vitamine A, D, E, B1, B2, B5, B12 et surtout en vitamine K1.

2. LES APPLICATIONS DE L'ACIDE ALGINIQUE (CODE E400)

De par son pouvoir épaississant, les sels d'acide alginique, obtenus par traitement alcalin, (sels de sodium (E401), sels de potassium (E402), sels d'ammonium (E403) et sels de calcium (E404)) sont largement employés dans diverses industries.

A la fin du XX^{ième} siècle, l'acide alginique était essentiellement utilisé pour l'industrie textile (50%) et l'agroalimentaire (30%) [6,13]. Les 20% restant, se répartissent avec l'industrie du papier (6%), les électrodes de soudures (5%), l'industrie pharmaceutique (5%), les biotechnologies (1%) et les autres utilisations (4%) dont les bâtiments. [3,6,13]

2.1 Les applications de l'alginate dans l'industrie textile

Les sels d'alginate présentent un grand intérêt dans l'industrie textile. Ces alginates jouent un rôle essentiel dans la fixation des couleurs dans un tissu. Par exemple, pour réaliser des motifs sur les textiles, il faut que la viscosité du colorant soit telle que la couleur épouse la forme du motif désiré et qu'elle ne déborde pas. Pour cela, le colorant doit avoir une viscosité équivalente à celle d'une pâte.

Pendant longtemps, c'est l'amidon qui a été utilisé comme épaississant mais il présente l'inconvénient de fixer une partie de la couleur.

C'est à partir des années 1963, que l'on utilise l'alginate de sodium pour épaissir le colorant sans établir de lien avec lui. L'alginate permet une meilleure pénétration de la couleur dans les fibres textiles mais n'empêche pas les rayons solaires d'atténuer progressivement les contrastes. Dans un but de parfaire cette coloration, il peut être utilisé de l'alginate de calcium. Ce sel est soluble dans l'ammoniaque. Lors de l'évaporation de ce dernier, l'alginate de calcium donne une fine pellicule brillante qui protège les couleurs et le tissu des rayons solaires. Il empêche la pénétration des taches au cœur des fibres. L'inconvénient de la fixation de la teinture par les alginates reste le prix plus élevé qu'avec les autres procédés.

2.2 Les applications des alginates dans l'industrie agroalimentaire

Ils sont devenus incontournables, leurs propriétés d'épaississant et de stabilisateur sont largement utilisées par les industries agroalimentaires. On les retrouve sous des codes allant de E 401 à 405.

Les alginates de sodium et de potassium sont largement employés pour épaissir les sauces, des assaisonnements (mayonnaise, moutarde, coulis...). Mais l'alginate-propylène-glycol (code E 405) sera préféré aux deux précédents lors des préparations acides, car il supporte des pH allant de 3,8 à 4,6 sans se dégrader.

L'alginate de calcium donne un gel dur. Cette propriété est utilisée pour « reconstituer » les aliments. Prenons un exemple, comme celui de la tarte aux pommes : l'usine reçoit les pommes de toutes variétés, formes et grosseurs. A peine arrivées les pommes sont lavées par aspersion d'eau, puis broyées sans retirer les queues, les graines et sans être pelées. Il est ensuite ajouté une proportion adaptée d'alginate de sodium et un sel de calcium avec un chélateur (l'alginate de sodium se transforme en un gel dur d'alginate de calcium en présence de chlorure de calcium). Ce chélateur (phosphate de sodium) fixe le calcium et ralentit la formation d'un complexe avec l'acide alginique. Le chélateur est détruit progressivement par acidification du milieu, permettant de libérer petit à petit le calcium et donc de réguler la vitesse de formation du gel d'alginate de calcium. L'opérateur ralentit la réaction pour avoir le temps de verser la préparation dans un moule ayant la forme d'une tranche de pomme. Lorsque la réaction totale (alginate + calcium) s'est produite, on obtient une tranche de pomme recomposée. De cette façon, toutes les tranches ont la même forme, la même taille et la même couleur, à l'origine de tarte parfaitement régulière. De là, tout peut être automatisé, car selon le diamètre du fond de tarte, il aura été prédéfini un nombre précis de tranches de pomme.

Ce principe est également utilisé pour les fruits au sirop et pour les olives aux anchois ou aux poivrons. De la même façon, il est réalisé une purée d'anchois ou de poivrons dans laquelle on ajoute l'alginate de sodium et le sel de calcium. Cette purée est ensuite versée dans l'olive.

Les industriels reconstituent également des pommes de terre poussant la supercherie jusqu'à pulvériser de l'amidon qui formera une belle teinte dorée à la sortie du four.

Le plus invraisemblable restent les viandes reconstituées. Par exemple, certains morceaux de bœuf sont difficilement masticables de part leur richesse en fibres

nerveuses. Pour y remédier et éviter les pertes, les morceaux sont découpés perpendiculairement aux fibres, en tranche fine (20 à 30 μm), puis ces tranches sont remises dans la position originelle avec entre elles un film d'alginate de calcium.

Certains algines, notamment ceux extraits de *Sargassum* et des stipes de *Laminaria hyperborea* possèdent un pouvoir gélifiant utilisé pour la formation de billes d'alginate. Pour leur fabrication, il est utilisé un appareil bi-compartmental dont l'un est rempli d'alginate de sodium et le deuxième d'une culture de levure, de bactérie ou d'autre organisme cellulaire. Après le mélange, la suspension passe goutte à goutte dans une maille calibrée. Les gouttes tombent dans une solution de chlorure de calcium, donnant des billes de gel de calcium dans lesquelles sont emprisonnés les organismes. Ceux-ci peuvent prélever des éléments nutritifs présents dans la solution environnante et y rejeter leurs déchets. Le grand intérêt de ces billes réside dans le fait que l'on peut les récupérer aisément. Ce procédé est utilisé pour la production du champagne ou encore celle des yaourts. Pour les yaourts, les billes emprisonnent les bactéries. Le lait passe dans une cuve qui contient ces billes, c'est alors que les bactéries qu'elles contiennent, transforment le lactose en acide lactique et le lait en un gel : le yaourt. Dès que le bon pH est atteint, la solution acide est transférée dans une troisième cuve à l'aide d'une pompe pourvue d'une crépine qui empêche les billes d'être aspirées.



Illustration 33 : Sargassum



Illustration 34 : Laminaria hyperborea

2.3 Les applications des alginates dans le domaine médical (médecine-pharmacie)

2.3.1 L'utilisation pour les empreintes dentaires

La prise de l'empreinte dentaire est réalisée à froid en utilisant une pâte d'alginate de sodium associée à du phosphate de calcium et à un acide faible (comme l'acide adipique). Lorsque le patient ferme ses mâchoires, la pâte molle épouse la forme de la denture. Le calcium remplace au fur et à mesure le sodium dans la molécule d'acide alginique et durcit la pâte. Les quantités sont prévues pour que la prise se fasse en moins de dix minutes.

2.3.2 Dans les couches culottes

L'acide alginique est souvent utilisé pour les couches culottes du fait de son pouvoir absorbant. Il est capable d'emmagasiner jusqu'à 140 fois son propre volume d'eau. Ce polymère est placé juste sous le voile doux qui protège la peau.

2.3.3 En pharmacie

2.3.3.1 Excipient de médicaments

Il est utilisé comme agent désintégrant et dispersant. L'acide alginique gonfle en présence d'eau assurant une dispersion rapide du médicament. On rencontre cette propriété avec de très faibles doses de cet excipient.

2.3.3.2 Les pansements et compresses

Les compresses stériles, telles que l'Algostéril® (dispositif de classe III) ont prouvé leur efficacité lors de multiples études. Ces compresses obtenues par tissage de fils fins d'alginate de calcium sont couramment utilisées dans de nombreux services notamment ceux de néphrologie/dialyse, diabétologie, chirurgie viscérale et moyen séjour. De nombreuses études versus compresses grasses de povidone iodée ou tulle vaselinés ont été réalisées pour diverses lésions. Le constat est unanime : par exemple dans le traitement local des plaies du pied du diabétique, il a été mis en évidence, l'apparition d'un

tissu de granulation plus abondant avec davantage de patients en succès thérapeutique. De plus, la douleur était moindre au renouvellement des compresses. Ces compresses ont une bonne tolérance et réduisent le temps de cicatrisation.

Il existe également des mèches d'alginate de calcium (extrait du tissu de soutien rigide de certaines espèces d'algues brunes : *Laminaria hyperborea e.a*) stériles (Coalgan®) ou des compresses (Coalgan-H®), dispositifs de classe IIb. Elles sont utilisées dans les saignements cutanés et muqueux, au niveau des points de ponction, ou encore dans le cas d'épistaxis ou d'extraction dentaire. 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 (sous-anticoagulants, antiagrégants plaquettaires).



Procédé de fabrication : le fil d'alginate de calcium est obtenu par extrusion d'une solution d'alginate de sodium de structure moléculaire bien définie à travers une filière immergée dans une solution calcique de coagulation. Le fil continu ainsi formé subit différents traitements (étirage-lavage-essorage-ensimage-séchage), afin de lui conférer ses caractéristiques physico-chimiques et ses propriétés textiles propres. Ce fil est ensuite découpé en mèches de fibre qui sont :

- Soit dossées, de manière à obtenir un ruban, ensuite découpé en mèches de longueur définie (Coalgan®).
- Soit nappées et aiguilletées, de façon à obtenir un tapis découpé en bandes définies (Coalgan-H®).

Chacun est ensuite placé dans un conditionnement primaire (sachet). La stérilisation est ensuite réalisée, sur les étuis contenant les mèches et compresses en sachet, par des rayonnements β .

Leurs propriétés : Coalgan® est riche en unité guluronique (avec un rapport M/G<1) et ces fibres sont saturées en ions calcium, ce qui procure des propriétés :

- Physico-chimiques : la richesse en acide guluronique des fibres leur confère une cinétique de gélification plus lente que celle des produits fabriqués à partir de l'alginate à dominante mannuronique. De plus, ces produits possèdent une forte résistance, ce qui leur permet de conserver une structure ferme et d'être retirés de la lésion tissulaire d'un seul tenant et sans délitement.
- Biologique : au contact des liquides biologiques, ces mèches échangent leurs ions calcium avec les ions sodium du sang et de l'exsudat. Cet échange ionique constitue le facteur déclenchant de l'activation des plaquettes, des macrophages, des fibroblastes, qui conduit à une stimulation des processus physiologiques d'hémostase et de cicatrisation. Au cours de cet échange, les fibres se gélifient et s'équilibrent osmotiquement avec l'environnement physiologique.

En plus de son pouvoir hémostatique, il possède :

- Un pouvoir d'absorption dû à l'hydrophilie du polymère (polysaccharide), la surface spécifique de la fibre et la structure tridimensionnelle du non tissé.
- Permet une optimisation du processus de réparation tissulaire en épousant parfaitement les reliefs de la lésion tissulaire.
- Une résorbabilité des fibres : les quelques fibres qui peuvent persister sur la plaie s'éliminent naturellement après le retrait des mèches ou des compresses.

On trouve également des pansements composés d'une lame de tissu imprégné d'alginate de sodium qui traverse un réservoir contenant du chlorure de calcium. Ainsi, il se forme, sur et dans le pansement, un gel d'alginate de calcium qui crée une interface entre la plaie et le tissu évitant que le pansement ne colle à la blessure.

2.3.3.3 Médicament contre reflux gastro-œsophagien (RGO)

Dans ce médicament c'est l'alginate de sodium lui-même qui est le principe actif. Il est associé dans la spécialité Gaviscon® au carbonate de sodium. Ce médicament sert de protecteur de la muqueuse œsophagienne. Le carbonate de sodium n'est pratiquement pas absorbé par le tube digestif et agit en neutralisant l'acidité gastrique. Ce médicament présente une indication spécifique, celle du traitement des RGO. Cette pathologie correspond à des brûlures au niveau de la jonction entre l'œsophage et l'estomac du fait du mauvais fonctionnement du sphincter (entre ces deux organes) qui doit empêcher les remontées acides.

Le Gaviscon® se transforme immédiatement dans l'estomac au contact du liquide acide en un gel mousseux léger (le carbonate se décompose en libérant le gaz carbonique), visqueux (dû au précipité d'alginate) et dont le pH est proche de la neutralité. Ce gaz en se mêlant à l'acide alginique permet son maintien à la surface du bol alimentaire. Le gel ainsi formé persiste durablement pendant 2 à 4 heures à la partie supérieure de l'estomac et s'évacue au fur et à mesure de la vidange gastrique, sans en modifier le transit. Les alginates sont totalement éliminés par voie digestive car ils ne sont pas résorbables. Toutefois, ce médicament peut diminuer l'absorption digestive des médicaments administrés simultanément. C'est pourquoi, il est conseillé de prendre les antiacides à 2 heures de distance des autres médicaments.

Le Gaviscon ® a trois propriétés physicochimiques :

- Sa légèreté lui permettant de flotter au dessus du contenu gastrique.
- Sa viscosité et sa cohérence qui forment une barrière physique qui diminue voire s'oppose au reflux. Si la régurgitation est trop importante, c'est le gel qui sera reflué en premier dans l'œsophage, formant un film entre la paroi de l'œsophage et le liquide gastrique.
- Son pH alcalin se substitue au pH acide du liquide de reflux. Le Gaviscon® augmente le pH de 2 unités au niveau du cardia, sans modifier le pH du reste de l'estomac. [23,24]

2.4 L'utilisation des alginates pour les électrodes de soudure

Cette électrode se compose d'un axe métallique central qui conduit l'électricité et d'un enrobage isolant de silicate d'alumine concentrant toute la force électrique sur la pointe. La difficulté est due à la texture fluide du silicate d'alumine qui a tendance à couler. On utilise l'alginate de sodium pour modifier la viscosité jusqu'à ce que le silicate adhère sur la tige métallique. Enfin, le fabricant ajoute souvent un film d'alginate de calcium pour éviter les craquelures. Le tout est porté à 400°C assurant le séchage du silicate d'alumine qui fait corps avec la tige métallique.

2.5 L'utilisation dans l'industrie papetière

Les alginates sont utilisés dans les finitions du papier, conférant, en surface, un film doux, continu et sans crochet. Ils sont notamment employés pour les papiers d'emballage. L'alginate d'ammonium est incorporé dans la pâte à papier pour jouer le rôle de retardateur au feu. Les extraits d'algues sont également employés dans les emballages biodégradables, voire dans les vêtements jetables.

2.6 Les emplois divers des alginates

2.6.1 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. Il faut ensuite compléter avec un acide, ainsi dès que le pH est proche de 2, 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 le jus de betterave destiné à la fabrication du sucre.

2.6.2 Atout contre le feu

L'alginate de béryllium donne des fibres ininflammables. Ces fibres sont tissées pour former la trame des habits des sapeurs pompiers.

Quant à l'alginate d'ammonium, il est mélangé à l'eau que les bombardiers d'eau projettent dans les incendies. L'alginate augmente la viscosité de l'eau, améliorant l'adhérence sur les végétaux et diminuant la progression des flammes.

2.6.3 Stabilisateur des bordures d'autoroutes

Une couche d'alginate de sodium est pulvérisée sur les bas-côtés et bordures d'autoroutes, suivie d'une solution de chlorure de calcium. Il se forme une couche d'alginate de calcium solide qui résiste au ravinement par l'écoulement des eaux de pluies. Les graines des plantes peuvent également être enrobées d'alginate pour assurer une protection supplémentaire.

2.6.4 Autres emplois divers

L'alginate de calcium est utilisé pour imprégner les imperméables, parapluies, les toiles de tentes...

L'acide alginique se fixe préférentiellement avec le strontium plutôt qu'avec le calcium. Cette propriété est utilisée dans les zones contaminées par le strontium comme c'est le cas autour de Tchernobyl. Ainsi à chaque repas, il est ajouté une pochette remplie d'alginate de calcium. Lors du transit intestinal, l'acide alginique se sépare du calcium et fixe le strontium qui sera éliminé de l'organisme car le colloïde n'est pas assimilé par l'organisme humain.

On utilise l'acide alginique pour l'affinage de l'argenterie. Une fine pellicule d'argent sur un objet métallique est obtenue par l'électrolyse d'une solution contenant de l'argent. L'objet correspondant ici à une cathode, sur laquelle l'argent vient se déposer jusqu'à la recouvrir. L'alginate de sodium (ou de potassium) lorsqu'il est présent dans l'électrolyte assure un dépôt beaucoup plus fin.

3. LES APPLICATIONS DES AGARS (CODE E406)

Les agars, code E406, sont des dérivés du métabolisme des algues rouges qui sont essentiellement employés dans l'agro-alimentaire. Ils sont également très utilisés dans le domaine de la microbiologie (5 à 7%), dans l'industrie pharmaceutique (3%) et dans l'agriculture (environ 2%).

Les agars sont essentiellement extraits des espèces du genre *Gelidium*, *Pterocladia*, *Gracilaria*, *Pterocladia* et *Gelidiella*.

Les agars de haute qualité proviennent des *Gelidium*. Après extraction on obtient une poudre fine de couleur jaune.

3.1 Utilisation dans l'industrie agroalimentaire

Ce sont des gélifiants ou des stabilisants qui permettent de contrôler la viscosité avec de faibles quantités (moins de 1%). De plus, ils ne modifient pas l'apport calorique des aliments car l'Homme n'en absorbe qu'une faible partie.

Ils sont rarement employés seuls, on a pour habitude de les associer à des substances telles que l'amidon, la gélatine, le sucre, la pectine, la gomme de caroube, la poudre de guar ou bien encore les carraghénanes ou les alginates afin d'obtenir différentes viscosités, gels ou textures.

Ces préparations sont largement utilisées dans les industries agro-alimentaires pour des aliments de la vie courante. On les rencontre comme gélifiants pour les spécialités à base de lait (crèmes desserts, crèmes glacées, yaourts, flans et fromages). Ils nécessitent moins de sucre pour gélifier que la pectine, d'où leur utilisation pour la confection des confitures ou des gelées. On les retrouve également dans les viandes en gelée pour la conservation. Ils jouent un rôle de stabilisant dans les sauces ou les boissons stérilisées. Associés à la gélatine, ils permettent une protection des plats en formant autour des aliments une enveloppe de faible teneur en eau, empêchant le développement des microorganismes. En boulangerie, leur addition empêche les craquelures sur le nappage et assure une meilleure adhérence et brillance.

3.2 Utilisation en bactériologie

C'est certainement une des utilisations les plus remarquables des agars. Ces agars sont extraits de *Gelidium* ou de *Gracilaria*. L'agar en bactériologie joue le rôle d'agent gélifiant intervenant dans l'élaboration des milieux de culture. Ils sont neutres, ne sont pas altérés par les bactéries et n'influent pas sur les substances de croissances.

Leur principal avantage réside dans leur absence de contaminants qui peuvent inhiber la croissance des micro-organismes, mais également dans leur transparence. Toutes ces qualités ont abouti à leur utilisation par les chercheurs pour l'élaboration des vaccins.

3.3 Utilisation en pharmacie

Les agars sont très utilisés comme excipients dans l'industrie pharmaceutique comme gélifiants, stabilisants et épaississants. Ils sont stables, inertes et forment des gels réversibles par leur solubilité dans l'eau. 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 des suppositoires, mais aussi comme lubrifiant en chirurgie, comme agents de suspension du sulfate de baryum en radiologie... Ils rentrent aussi dans la composition de coupe-faims.

Tous ces produits nécessitent que l'agar soit soumis à des contrôles plus poussés en laboratoire pour assurer leur innocuité.

3.4 Utilisation pour l'agriculture

Ils sont utilisés afin de conserver les semences en les enrobant d'un gel de faible teneur en matières minérales. L'agar est également conçu pour la préparation de substrats pour la culture, ainsi que pour le développement de plantes in vitro.

3.5 Autres applications des agars

La partie « agarose » des agars peut être isolée et purifiée afin d'obtenir une substance riche en radicaux hydrophobes et dont la teneur en OSO_3^{2-} est quasiment inexistante. Elle est employée pour les électrophorèses, en immunologie et en biochimie.

L'électrophorèse est rendue possible par la faible charge électrique du gel d'agarose. Ainsi on peut séparer des électrolytes, en fonction de leur charge et de leur masse moléculaire car selon ces 2 paramètres les vitesses de migrations seront différentes, ce qui permet leur séparation. En sélectionnant certaines zones du gel, on peut récupérer les molécules. Cette méthode est utilisée pour l'analyse des liquides biologiques, pour la récupération de certaines substances tel que les interleukines, les interférons ou bien encore pour la séparation de l'ADN.

En immunologie, on les utilise pour étudier le matériel génétique. Ils sont intéressants de par leur macroporosité qui permet la migration de grosses molécules telles que les anticorps, mais également par leur neutralité (ils n'interagissent pas avec les antigènes et les anticorps) et ils sont de couleur claires, ce qui facilite le repérage des précipités.

En biochimie se sont leurs capacités de former des capsules qui sont utilisées. Les principes actifs sont fixés à l'intérieur et peuvent être libérés à la demande. Cette technique a notamment montré son efficacité pour des patient victimes d'overdoses : on passe le sang du toxicomane conduit par la circulation extracorporelle à travers une colonne d'agarose dont la fonction est de retenir la drogue tout en laissant passer les autres composants.

4. LES APPLICATIONS DES CARRAGHENANES (CODE E407)

Les carraghénanes sont extraits de la paroi des Rhodobiontes de l'ordre des Gigartinales et des Cryptonémiales. Le nom de « carraghénane » vient d'une région sur la côte sud de l'Irlande, Carrahen. Dès le XIV^e siècle, l'algue *Chondrus crispus* (ou « Irish Moss ») possède déjà des applications en médecine, en agriculture et dans l'alimentaire. En effet, les marins avaient constaté qu'en blanchissant cette algue (en entier) et en la plaçant dans du lait, on obtenait un gel agréable au palais. Par la suite, cette algue est traitée pour en extraire les mucilages nommés « carragheen » en 1862 par Stanford. Ce n'est que récemment que le terme « carraghénane » est adapté d'après les recommandations du comité de nomenclature des polysaccharides. C'est en 1928, qu'un brevet expose le mode d'extraction, mais c'est vers les années 1960 que l'industrie des carraghénanes prend de l'ampleur.

Aujourd'hui, les carraghénanes sont connus sous le code d'E407 en industrie. Les utilisations n'ont cessé de s'accroître et ses principales applications sont dans l'industrie agroalimentaire, en cosmétologie et en pharmacie. [3,6,13–15]

4.1 Les utilisations dans l'industrie agroalimentaire

4.1.1 Produits lactés

Les carraghénanes forment des gels avec le lait après chauffage et refroidissement. Cette gélification s'explique par la création d'une liaison carraghénane-caséine (protéine majoritaire du lait) renforcée par la présence du calcium. On obtient donc un complexe carraghénane-calcium-caséine qui a lieu quelque soit le pH. Cette réaction nécessite la présence de calcium. Selon les variations de la teneur de ce dernier, la force varie. De ce fait, s'il n'y a plus d'ions calcium ou potassium, il n'y a plus de gel. La quantité de matière grasse influe également sur le comportement des carraghénanes dans le lait.

Les applications des carraghénanes dans l'industrie laitière sont très vastes : crèmes, glaces, gâteaux, flans...

Le iota carraghénane intervient essentiellement dans la confection des desserts, par la légèreté des gels qu'il produit. Ces gels sont comparables à ceux obtenus avec la gélatine à la différence près qu'ils ont un point de fusion plus élevé, permettant une conservation et une utilisation sous les climats tropicaux en l'absence de réfrigérateur. De plus, la perception en bouche est différente, la gélatine « fond en eau » alors que les carraghénanes gardent une consistance douce au palais.

Les gels de kappa carraghénanes sont plus durs, plus cassants. Afin de les améliorer, on peut y inclure de la farine de konjac ou de graine de guar. Cette synergie aboutit à un gel plus résistant dont la synérèse est réduite, donnant une structure plus élastique d'aspect brillant.

Les applications dans les différents types de laitages sont :

- Desserts lactés : ils correspondent au mélange des différents types de carraghénanes qui aboutissent à des textures variées de gel dans le lait allant de fermes et cassantes, aux douces et crémeuses.

- Desserts congelés : le carraghénane diminue la formation de cristaux dans la glace ainsi que la séparation de la phase liquide. Pour les mousses, il stabilise l'émulsion.
- Boissons lactées : il permet de suspendre le cacao et d'améliorer l'aspect des laits chocolatés. Dans les laits fortifiés, il stabilise les solides en suspension et dans les laits reconstitués, il stabilise les protéines et les graisses ajoutées.
- Fromages : il améliore la coupe et la fonte. La structure formée par la caséine donne un aspect crémeux.
- Produits acidifiés (yaourts et boissons acidifiées) : il stabilise et épaissit le produit et les pulpes de fruits.

4.1.2 Les gels à l'eau et les boissons

Ils sont employés pour la production de « bâtons » de glace, comme agent de couverture ou encore dans la préparation de boissons en poudre qu'il faut ensuite hydrater. Ces desserts sont stables à température ambiante et le réfrigérateur n'est pas nécessaire à la gélification.

Dans les jus de fruits, ils permettent de stabiliser la pulpe.

4.1.3 Produits carnés et les produits structurés

Les carraghénanes ont pour rôle de fixer l'eau par gélification du liquide contenu dans la viande (eau du muscle ou eau ajoutée), afin d'éviter la synérèse. Cette faculté est couramment employée pour la production des jambons et des charcuteries. Elle confère au produit final, une texture spécifique pour améliorer les aliments dont le taux de graisse est faible.

Habituellement, les carraghénanes sont dispersés dans une saumure puis inclus dans la viande par injection. La deuxième méthode consiste à ajouter directement le mélange sec lors de « cutterage » (technique de coupe pour les bouchers/charcutiers).

Les principales fonctions des carraghénanes dans les viandes sont de lier l'eau et d'améliorer la coupe.

Ils entrent également dans la composition des plats pour les enfants et dans celle des produits allégés, tels que les poissons, saucisses, soupes, potages...

On les trouve également dans les plats préparés où ils forment une enveloppe de carraghénane qui fond et pénètre dans les aliments lorsque le plat est mis au four. Cela améliore le goût et la tendreté.

4.1.4 Produits diététiques

Ils entrent dans la composition des aliments diététiques. Ces produits sont constitués à 80% de carraghénanes non assimilables par l'homme et les 20% restants sont des vitamines. Cependant leur utilisation prolongée expose à des carences, c'est la raison pour laquelle ces régimes doivent être associés à des repas équilibrés.

4.2 Les utilisations en pharmacie et en cosmétologie

4.2.1 Traitements des ulcères gastriques

Les carraghénanes se combinent aux protéines par la formation d'une liaison entre les ions OSO_3^{2-} du polymère et les groupes NH_3^+ de la protéine mais le pH doit être en dessous du pH isoélectrique de cette protéine. Si le pH est au-dessus du point isoélectrique, la protéine sera chargée négativement et repoussera les carraghénanes (qui sont eux même chargés négativement). Les variations de pH permettent la formation ou la rupture du complexe carraghénane-protéine.

C'est ce mécanisme qui explique le fonctionnement du traitement pour les ulcères gastriques. Ces derniers sont difficiles à cicatriser, à cause de l'absence de gaine mucilagineuse qui protège contre l'acidité gastrique (pH de 1 à 2) et des enzymes digestives dont la pepsine. De ce fait, la blessure ne cicatrise pas mais elle s'étend.

L'absorption de carraghénanes de sodium entraîne :

- la formation du complexe carraghénane-pepsine, ce qui neutralise les effets de l'enzyme.
- une diminution de l'acidité gastrique par le sodium
- le carraghénane de sodium crée un pansement sur la blessure.

4.2.2 Dentifrices

Il joue le rôle d'agent texturant en conférant au dentifrice une stabilité pendant le stockage. De plus, il évite la synérèse, notamment sous les climats chauds.

4.2.3 Gels désodorisants

La méthode consiste à gélifier une solution aqueuse de forte teneur en parfum à l'aide de kappa carraghénane de potassium. Ce gel, de par sa propriété de synérèse, libère progressivement l'eau qu'elle contient, vaporisant dans l'atmosphère le parfum.

4.2.4 Activités biologiques

Les carraghénanes sont habituellement utilisés comme agents pour induire des inflammations expérimentales et des douleurs inflammatoires. Ils ont aussi montré plusieurs propriétés pharmaceutiques potentielles incluant des activités antitumorales, immunomodulatrices, antihyperlipidémiantes et anticoagulantes.

Plusieurs études in vitro suggèrent que les carraghénanes pourraient également avoir une activité antivirale, en inhibant la réplication du virus de l'herpès et celui de l'hépatite A.

Plus récemment, il a été démontré que les carraghénanes étaient des inhibiteurs extrêmement puissants contre les infections génitales à papillomavirus. Les gels lubrifiants à base de carraghénanes ont obtenu une indication pour la protection contre la transmission sexuelle du papillomavirus. [14]

4.2.5 Produits de beauté

Les carraghénanes apportent une douceur et une finesse aux crèmes de beauté.

4.3 Divers

On les utilise également pour la fabrication de plats pour l'alimentation animale. On les associe aux déchets broyés et on les reconstitue sous forme de croquette.

5. COSMETOLOGIE

Aujourd'hui, il existe une large gamme de produits à base d'algue : on les trouve sous forme de savon, de shampoing, de pâte à raser, de rouge à lèvres, de teinture, de crème tonique, de produit de maquillage, de produit de bain pour leur action externe et en tisane par exemple pour leur action interne. Pendant longtemps l'action bénéfique des algues n'avait pas réellement été démontrée mais elle était déduite de la composition des algues. Les algues ont une excellente dermocompatibilité qui est mise à profit en thalassothérapie. [1,6,13,20]

Elles peuvent entrer dans la composition des cosmétiques de deux manières :

- Soit elles jouent le rôle d'agent texturant, on utilise leur phycocolloïde pour donner une structure au gel et atteindre la viscosité désirée. Ce sont essentiellement les carraghénanes qui sont employés pour apporter une finesse et une texture douce. Dans ce cas, les phycocolloïdes ne sont pas des principes actifs, ils interviennent uniquement comme excipient.
- Soit les algues sont incorporées dans les cosmétiques comme principe actif. Leur composition riche est utilisée comme nettoyant, tonifiant, gommant, antiride, desséchant ou antioxydant.

L'intérêt de l'algue est de fournir en un seul principe actif des oligo-éléments, des minéraux et des vitamines. Les oligo-éléments (en poudre ou extrait liquide) permettent de reminéraliser l'épiderme. Ainsi parmi les actifs cosmétiques issus des phycocolloïdes, les oligo-alginates, ont une action anti-pollution, anti-âge, anti-éruption cutanée et anti-acné. Les fucoïdanes, quant à eux, réduisent le vieillissement de la peau et favorisent la croissance capillaire.

En cosmétologie, on utilise aussi bien les macro- que les micro-algues qui sont une source d'actifs innovants avec un large éventail d'espèces et de molécules. Les macro-algues sont actuellement employées comme principe actif, texturant et en thalassothérapie. Tandis que les micro-algues servent d'actifs, de colorants, d'antioxydants ou encore de protection solaire.

Des études pour prouver leur efficacité sont de plus en plus réalisées. Un chimiste de l'entreprise SECMA (Société d'Engrais, Composés Minéraux et Amendements) a découvert dans l'algue *Pelvetia* (« ambre Océane ») des propriétés « antirouille » qui

ralentissent l'oxydation de l'épiderme (naturel et celui induit par les agressions diverses). De plus en plus de Grands Noms de la cosmétique s'intéressent aux composés issus des algues pour les incorporer dans leur produit pour les peaux sèches ou sensible, dans leurs protections solaires...



Illustration 35 : Pelvetia canaliculata

Prenons l'exemple des algues brunes qui ont le plus de représentant [25]. 4 molécules de ces algues présentent un intérêt en cosmétologie :

- l'acide alginique
- les phlorotannins
- les fucoïdanes
- les fucoxanthines

Ces molécules possèdent diverses propriétés telles que :

- des activités antioxydantes
- anti-âge
- des actions protectrices contre le stress photo-oxydatif
- cytoprotectrices
- anti-inflammatoires
- antiallergiques
- blanchissantes
- inhibitrices d'activité de la tyrosinase
- réduction de la synthèse de mélanine et activité tyrosinase

- effet protecteur contre les dommages des UV sur la peau
- anti-rides

Des contrôles sont effectués pour s'assurer que ces produits ne soient pas irritants ou allergisants. Ils sont soumis à des procédures de mise sur le marché comme pour les médicaments. Aujourd'hui, il n'existe aucune réglementation spécifique des « algues » dans la cosmétique. Cependant, l'exploitation des macroalgues avec le respect des contraintes réglementaires ou des recommandations officielles classiques (allégation, certification, recommandation REACH, les nomenclatures pour les cosmétiques...) doit être honorée. Mais les grands groupes veulent faire évoluer cette réglementation en voulant créer au niveau européen des bonnes pratiques de fabrication et des engagements sur la réglementation des produits cosmétiques. La réglementation n'oblige pas à préciser l'espèce d'algue utilisée pour la production de l'extrait cosmétique. La nomenclature INCI, obligatoire en Europe, contraint les industriels à informer le consommateur sur la composition en ingrédient par ordre décroissant de leur concentration respective. [1-3,5]

6. SANTE ET PHARMACEUTIQUE

Les algues fournissent de nombreuses molécules ayant un potentiel, malheureusement leurs applications restent encore faibles. A ce jour, ce sont essentiellement les polysaccharides (alginate, carraghénane et agar) qui sont utilisés dans le domaine de la Santé. Beaucoup de molécules issues des macroalgues sont au stade de recherche. [1,3,6,13,20,26]

6.1 Les utilisations historiques et actuelles

6.1.1 Des microalgues

Ces microalgues constituent essentiellement des « aliments santé ». Il existe une grande variété d'algues qui possèdent des applications médicales ou nutritionnelles. L'intérêt des microalgues réside essentiellement dans leur richesse en pigments et en acides gras polyinsaturés (AGPI). [2,6,13,16,21,25]

- Les pigments :

Les microalgues en renferment un grand nombre dont la chlorophylle qui est le principal pigment photosynthétique mais aussi les phycobiliprotéines et les caroténoïdes.

Ce dernier fait déjà l'objet de nombreuses applications : le β -carotène de l'algue *Dunaliella* sert de précurseur de la vitamine A quant à la lutéine et la zéaxanthine, elles sont utilisées à des fins pharmaceutiques (elles joueraient un rôle protecteur de la rétine et retarderaient la survenue de la dégénérescence maculaire de la rétine) [27]. L'astaxanthine de *Haematococcus* se retrouve en tant que complément alimentaire dans l'alimentation humaine. Ce pigment est un colorant fort et surtout un antioxydant puissant lui permettant de cibler plusieurs problèmes de santé dont une protection contre les rayons UV et une activité anti-inflammatoire [28].

Quant aux phycobiliprotéines (phycocyanines et phycoérythrine), elles sont utilisées par exemple pour le diagnostic de contrôle en recherche et en médecine.

- Les acides gras polyinsaturés (AGPI) :

Ces acides gras polyinsaturés essentiels doivent être apportés par l'alimentation, la source la plus connue étant l'huile extraite des poissons. Mais ces derniers ne produisent pas ces AGPI mais ils les accumulent en se nourrissant en outre des algues. La production de ces AGPI à partir des algues présente de nombreux avantages tels que l'absence d'odeur de poisson, une réduction du risque de contamination chimique, ainsi qu'un meilleur potentiel de purification. Ces AGPI sont utilisés pour réduire les maladies cardio-vasculaires, l'obésité, le transport des électrons et de l'oxygène, le métabolisme des cellules ou encore la capacité d'adaptation thermique.

Les deux AGPI les plus importants sont la DHA et l'EPA. La DHA ou acide docosahexaénoïque est un acide gras Ω -3 que l'on trouve dans la matière grise du cerveau, dans la rétine ou bien encore dans le tissu cardiaque où il constitue le composant majeur. C'est la raison pour laquelle, la DHA a un rôle important dans la santé cardiovasculaire des adultes et dans le développement du cerveau et de la

rétine chez les nourrissons. Depuis quelques années, un certain nombre d'organisations de la santé et de la nutrition ont conseillé l'introduction de la DHA dans les préparations pour nourrissons.

Quant à l'EPA ou acide éicosapentaénoïque, il intervient en temps que précurseur de substances comme les prostaglandines, les thromboxanes et les leucotriènes qui sont indispensables à la régulation du développement et au contrôle physiologique.

- Autres molécules actives extraites des microalgues :

Elles constituent une source importante de vitamines telles que les vitamines A, B1, B2, B5 (acide pantothénique) B6, B9 (acide folique), B12, C, E, H (biotine). Quant aux polysaccharides sulfatés, ils peuvent servir comme « antiadhésifs » contre les infections bactériennes.

6.1.2 Des macroalgues

Les applications médicales des algues ne datent pas d'aujourd'hui. L'acide kaïnique issu de l'algue rouge *Digenea simplex* était utilisé comme anthelminthique au Japon, donnant naissance à un vermifuge contre les ascaris et les oxyures. Localement, en Méditerranée, on utilisait la « mousse de Corse » composé d'un mélange de petites algues rouges dans lequel *Alsidium helminthocorton* domine par son action vermifuge.

L'algue *Porphyra* (Nori) servait d'antiscorbutique grâce à sa richesse en vitamine C et l'algue *Laminaria* (Kombu) soignait les ulcères de l'estomac et le goitre (certainement dû à la présence d'alginate et d'iode).

Historiquement les stipes de Laminaires séchés et aseptisés étaient utilisés pour dilater certaines cavités telles que le col de l'utérus en vue d'un accouchement prématuré ou d'un curetage. Ce stipe a la propriété d'augmenter de volume quand on le trempe dans l'eau aboutissant à un agent dilatant puissant et régulier. De même, on les préparait et stérilisait dans des tubes, afin d'élargir les fistules et les plaies pour faciliter l'introduction d'instruments en vue d'opération.

En plus de certaines propriétés spécifiques des algues, certains éléments de la composition des algues ont apporté leurs bénéfices. Ainsi l'iode, dont la concentration

dans certaines algues peut être 100000 fois supérieure à celle de l'eau de mer environnante, est exploité. On l'utilise pour l'antisepsie des plaies ou dissout dans l'alcool à 90°C donnant la teinture d'iode (contenant le cinquième de son poids d'iode). Dans ce cas, elle servira à arrêter l'évolution d'un furoncle ou d'une engelure à son début, ou en badigeonnage contre les ulcérations de la bouche, du pharynx, du col de l'utérus ou encore pour les désinfections. Sans oublier sa prescription pour traiter le goitre ou les adénopathies.

Certaines algues ont des propriétés spécifiques :

- *Lithothamnium calcareum* : Lithothamne

Cette algue fixe le calcium et le magnésium sur ses parois cellulaires. Le Lithothamne est rose lorsque les cellules internes sont vivantes mais à leur mort, il devient blanc. Il se forme une couche de sédiment marin plus ou moins épais que l'on nomme Maërl. On l'utilise en rhumatologie pour neutraliser l'acidité de l'organisme (rhumatisme, arthrose) et combler les pertes minérales (décalcification, ostéoporose) en apportant du calcium disponible. Sa richesse en carbonate de calcium est mise à profit pour réduire les acidités gastriques. La source naturelle de magnésium régule les réactions neuro-musculaires d'où son utilisation dans des médicaments anti-stress.

- *Asparagopsis armata*

Elle élabore des composés organiques riches en silicium qui franchissent aisément l'épiderme et le derme. Elle possède des propriétés bactéricides d'où leur utilisation en cosmétologie, dans la confection de certaines crèmes.

- Les petites corallines (algues marines rouges à concrétion calcaire dont *Corallina*)

Ces algues sont constituées à 70% de calcium, raison pour laquelle on les utilise en application sur des os traumatisés (ce sont des éléments d'origine organique assimilables par l'organisme) et dans les chirurgies osseuses.

On trouve d'autres algues avec des actions particulières telles qu'*Undaria pinnatifida* qui est cardiotonique ou *Cladonia rupestris* qui a des propriétés antivirales.

Certaines ont des propriétés :

- Hypocholestérolémiantes tel que *Laminaria*, *Porphyra* ou *Chondrus*.
- Anticoagulante : *Laminaria*, *Pterocladia* et *Corallina*
- Hypoglycémiantes : *Cystoseira* et *Corallina*
- Hypotensive : *Laminaria* et *Chondrus*
- Muco-protectrice digestive : *Gelidium*, *Gracilaria*, *Pterocladia*, *Chondrus*, *Euchema* et *Hypnea*
- Laxative : *Laminaria*, *Fucus vesiculosus* et *Chondrus*.

Mais leurs applications pour lesquelles les indications sont reconnues en pratique médicale sont apportées essentiellement par trois algues :

- *Laminaria digitata*

Son activité reminéralisante et reconstituante permet une meilleure résistance à la fatigue d'où son emploi pour les asthénies et les convalescences. Elle possède jusqu'à 500 fois plus d'iode que l'eau de mer, oligo-élément reconnu pour sa capacité à augmenter la thermogénèse favorisant le processus d'amincissement. En plus, elle a des indications pour traiter l'artériosclérose, l'arthrose, la constipation, la déminéralisation, les hypothyroïdies, les retards de croissance ou encore les troubles de mémoire.

- *Fucus vesiculosus*

Cette algue également riche en iode agit sur la surcharge pondérale. La présence de mucilages solubles favorise le transit intestinal. Ses nombreux oligo-éléments (cuivre, zinc, brome, silice, chrome et sélénium) et vitamines permettent de fortifier et de stimuler l'organisme avec une meilleure résistance à la fatigue physique, intellectuelle et psychique. Elle possède également des indications pour l'artériosclérose, l'arthrose, la déminéralisation ou encore l'hypothyroïdie.

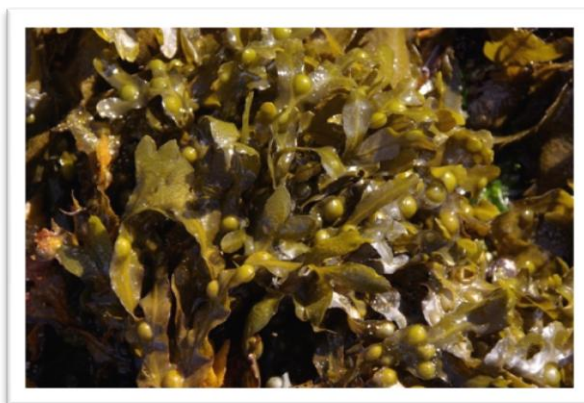


Illustration 36 : Fucus vesiculosus

- *Chondrus crispus*

Sa vertu repose sur la présence de fibres, les carraghénanes qui régulent le transit par leurs propriétés gélifiantes et leur pouvoir épaississant. Ses autres indications sont le traitement des bronchites chroniques, des gastrites, des hémoroïdes et de la surcharge pondérale.

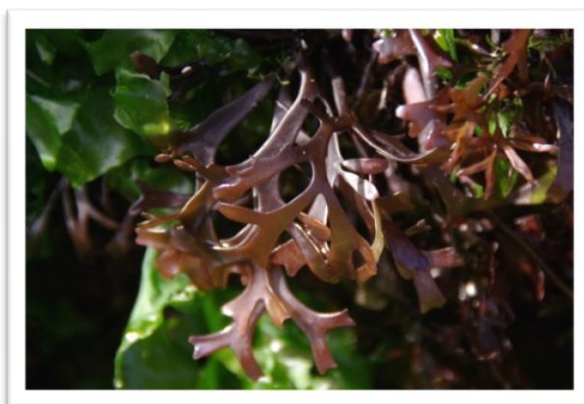


Illustration 37 : Chondrus crispus

- *Ascophyllum nodosum*

Sa richesse en vitamines et minéraux sont mises à profits pour traiter les déminéralisations.



Illustration 38 : Ascophyllum nodosum

Sans oublier les phycocolloïdes qui restent incontestablement la plus grande source d'applications des algues en médecine et pharmacie.

6.2 Perspectives futures et recherches

Il existe une multitude de molécules d'intérêt pharmaceutique issues des macro-algues avec d'importantes possibilités de développement dans divers domaines de la pharmacologie, mais elles font encore l'objet de recherches.

Aujourd'hui, les études s'orientent essentiellement sur les polysaccharides sulfatés comme les carraghénanes (Algues Rouges), les fucanes (Algues Brunes) ou encore les ulvanes (Algues Vertes). L'activité biologique de ces polysaccharides sulfatés dépend de la structure chimique, du poids moléculaire, et de la conformation de la chaîne. [1,13,31]

6.2.1 Propriétés antivirales

Beaucoup d'espèces d'algues marines possèdent une quantité importante de polysaccharides sulfatés qui ont montré une efficacité sur l'inhibition de la réplication de la membrane des virus, en incluant les membres de la famille des flavivirus, togavirus, arenavirus, rhabdovirus, orthopoxvirus et les herpesvirus.

L'activité antivirale de polysaccharides sulfatés est déterminée par le degré de sulfatation, le poids moléculaire, la composition en sucres, ainsi que la conformation et la dynamique stéréochimique. Mais les deux paramètres, les plus importants, sont le degré de sulfatation et la répartition des groupements sulfates sur le polysaccharide car ceux dont le taux de sulfatation est faible sont généralement inactifs contre le virus.

Le virus de l'immunodéficience humaine de type 1 est identifié comme étant la cause du syndrome de l'immunodéficience acquise (SIDA). Les premiers traitements ont été développés pour traiter le SIDA avec un taux d'échec supérieur à 50%. Cependant des recherches sont effectuées afin de trouver un médicament ayant une plus grande activité inhibitrice contre les différentes souches du SIDA, ce qui intéresse beaucoup les industries pharmaceutiques. A cet égard, les composés naturels bioactifs et leurs dérivés sont de grandes sources de développement pour de nouveaux traitements plus efficaces avec moins d'effets secondaires contre le VIH. Par conséquent, les polysaccharides sulfatés extraits des algues marines constituent une source alternative pour de nouvelles recherches thérapeutiques. Plusieurs chercheurs ont étudié les effets inhibiteurs des polysaccharides sulfatés sur des souches virales de l'herpes simplex de type 1 et 2.

Les fucoïdanes extraites des algues brunes montrent une activité antivirale contre les maladies infectieuses comme le SIDA, le virus de l'herpes simplex et le cytomégalo virus. De plus, les carraghénanes, les fucoïdanes et les rhamnogalactanes sulfatés inhibent la pénétration des virus enveloppés tels que l'herpes ou le SIDA, dans la cellule. Par ailleurs, la présence du groupement sulfate est nécessaire pour avoir une activité anti-VIH et sa puissance s'accroît avec le degré de sulfatation. Cela a conduit à l'hypothèse que les charges anioniques sur les groupements sulfates pourraient avoir une action efficace sur l'activité de la reverse transcriptase (enzyme du virus du SIDA).

Des chercheurs ont évalué l'activité antivirale des polysaccharides sulfatés issus d'*Undaria pinnatifida*, *Splachnidium rugosum*, *Gigartina atropurpurea* et *Plocamium cartilagineum* contre les virus de l'herpes de type 1 et 2. Ils ont découvert que les extraits avaient une action antivirale lorsqu'ils étaient utilisés pendant la première heure suivant l'infection et inefficace au-delà. Cependant, il a été signalé une action inhibitrice *in-vitro* et *in-vivo* des polysaccharides extraits d'algues rouges sur les infections à flavivirus, tel que la dengue ou la fièvre jaune. Les fucoïdanes de l'algue *Cladosiphon okamuranus* (Phaeophyceae) inhibent fortement les infections du virus de la dengue de type 2 et ils ont découvert que les particules virales étaient fortement attachées aux fucoïdanes, indiquant que ces derniers interagissaient directement avec les glycoprotéines de l'enveloppe du

virus. Ceci pourrait être développé comme un agent inhibiteur potentiel contre le virus de la dengue.

De plus, des études récentes ont démontré que ces polysaccharides pouvaient être utilisés dans des préparations vaginales antivirales sans perturber les fonctions essentielles des cellules épithéliales et de la flore vaginale. C'est un challenge continu pour déterminer quel sera le médicament le plus prometteur parmi la large gamme de polysaccharides sulfatés disponibles. Il existe de nombreux avantages par rapport aux autres médicaments antiviraux comme un coût de production relativement faible, un large spectre de propriétés antivirales, une faible cytotoxicité, une bonne observance et un nouveau mode d'action. Ceci suggère que les polysaccharides sulfatés soient des médicaments prometteurs dans un futur proche, mais d'autres études sont encore nécessaires notamment avec des essais cliniques.

6.2.2 Propriétés anticoagulantes

La coagulation sanguine se compose d'une voie extrinsèque et intrinsèque où le mécanisme implique différents facteurs. La cascade de la coagulation est mise en marche par l'activation des facteurs dans un ordre précis afin de stopper le flux sanguin sortant du vaisseau sanguin blessé. L'intégration d'anticoagulant endogène ou exogène peut inactiver ou restreindre les facteurs de la coagulation, conduisant à une prolongation ou un arrêt de la coagulation sanguine. Ces anticoagulants peuvent être utilisés dans un but thérapeutique.

Les héparines ont été identifiées et largement utilisées depuis plus de cinquante ans comme anticoagulant pour la prévention des troubles thromboemboliques veineux. Cependant beaucoup d'effets secondaires sont induits par ces héparines (thrombopénie, hémorragie...). De plus cette héparine n'est disponible qu'en très faible concentration dans l'intestin de porc ou dans le poumon de bœuf. C'est la raison pour laquelle, il est intéressant de trouver une source alternative d'anticoagulant.

Après les études sur les propriétés anticoagulantes des Algues brunes, il a été mis en évidence que les polysaccharides sulfatés extraits de cette algue pourraient être une source alternative pour la production d'un nouvel anticoagulant. L'activité anticoagulante de ces polysaccharides sulfatés fait l'objet de nombreuses études. Après avoir isolé et identifié ces différents polysaccharides, les chercheurs ont retenu ceux dont l'activité anticoagulante était la meilleure, c'est à dire les carraghénanes issues des Algues Rouges

et les fucoïdanes sulfatés extraits des Algues Brunes. Cependant, il existe moins de comptes rendus au sujet des propriétés anticoagulantes des polysaccharides issus des algues vertes qu'au sujet des Algues Brunes et Rouges. Pourtant il a été démontré que l'algue *Codium fragile* sous-espèce *atlanticum* (Chlorophyceae) possédait un polysaccharide, le xyloarabinogalactans, à la propriété anticoagulante [32]. D'autres algues telles que *Codium Cylindricum* ou *Monostroma nitidum* ont une activité anticoagulante avec pour cette dernière une activité six fois supérieure à celle de l'héparine. Mais ce sont les Algues Brunes qui ont la plus grande activité anticoagulante.

Leur activité anticoagulante a été déterminée lors de dosage de la prolongation du TCA (temps de céphaline activée), du temps de Quick et du temps de Thrombine (TT). La plupart des études ont rapporté que les polysaccharides sulfatés jouaient un rôle sur le TCA et le TT. Une augmentation du TCA suggère une inhibition des facteurs intrinsèques et celle du TT, une inhibition de l'activité de la thrombine ou de la polymérisation de la fibrine. Il a été mis en évidence une relation entre la structure des polysaccharides et leur activité anticoagulante. L'activité anticoagulante des galactanes sulfatés dépend de la nature des résidus sucrés, de la position du groupement sulfate sur la structure, ainsi que de la teneur en sulfate. En ce qui concerne les carraghénanes, plus le poids moléculaire et plus sa teneur en sulfate sont élevés, meilleures seront leurs propriétés anticoagulantes.

Aujourd'hui, seules les héparines non fractionnées et les héparines de bas poids moléculaire sont utilisées pour les traitements anticoagulants. Les polysaccharides sulfatés ont été décrits comme ayant une activité similaire à celle des héparines. Ces études suggèrent que les polysaccharides sulfatés ont un potentiel prometteur comme agent anticoagulant dans l'industrie pharmaceutique. [31,33]

6.2.3 Propriétés anticancéreuses

La formation des cellules cancéreuses dans le corps humain peut être induite directement par des radicaux libres et certains médicaments anticancéreux naturels ont acquis une popularité positive dans la prévention des cancers. Ainsi certains radicaux issus de polysaccharides sulfatés de certaines algues peuvent être utilisés indirectement pour réduire la formation d'un cancer dans le corps humain. Lors de cancer en évolution, les cellules normales subissent un processus d'initiation, d'avancement et de progression. La plupart des composés anticancéreux naturels sont capables de jouer un rôle sur la croissance des cellules cancéreuses avec peu d'effets secondaires.

De nombreuses études ont rapporté que les polysaccharides sulfatés ont une activité antiproliférative sur des lignées cancéreuses *in-vitro*, ainsi qu'une activité inhibitrice sur la croissance des tumeurs chez la souris. De plus, ils ont une activité antimétastatique en bloquant les interactions entre les cellules cancéreuses et la membrane basale. Ces polysaccharides inhibent la prolifération des cellules tumorales, ainsi que leur adhérence à divers substrats mais leur mécanisme d'action exact n'est pas encore complètement compris. L'administration orale de plusieurs algues peut diminuer de façon significative l'incidence de la cancérogénèse *in vivo*. Des études sur les porphyranes issus de *Porphyra yezoensis* (Rhodophyceae), ont montré qu'elles pouvaient induire la mort des cellules cancéreuses par apoptose de manière dose dépendante *in-vitro* sans affecter la croissance des cellules normales. Par ailleurs, les polysaccharides sulfatés purifiés de *Ecklonia cava* (Phaeophyceae) stimulent l'induction de l'apoptose *in-vitro* et ont un potentiel antiprolifératif sur les cellules leucémiques humaines de lymphomes à monocytes (U-937). Il a été mis en évidence que l'activité anticancéreuse des fucoïdanes était étroitement liée à sa teneur en sulfate et, à son poids moléculaire. Lorsque les fucoïdanes d'*Undaria pinnatifida* sont hydrolysés dans de l'eau bouillante avec de l'acide chlorhydrique pendant 5 minutes, l'activité anticancéreuse est augmentée de manière significative [34]. Par contre lorsqu'elles sont hydrolysées dans un four à micro-onde, il y a peu d'amélioration de l'activité anticancéreuse. L'étude suggère que l'activité anticancéreuse des fucoïdanes pourrait sensiblement être améliorée en abaissant la masse molaire de ces molécules par dépolymérisation. Cette dépolymérisation peut se faire par voie chimique (acide radical) ou biochimique (enzymes spécifiques).

Par ailleurs, les polysaccharides sulfatés issus des algues marines sont connus pour leurs propriétés anti-radicalaires et antioxydantes, ce qui contribue à leurs effets bénéfiques dans la carcinogénèse. On retient donc que ces dérivés d'algues marines ont des capacités puissantes qui pourraient être développées dans l'industrie pharmaceutique pour produire de nouvelles thérapeutiques anticancéreuses mais également dans l'industrie agro-alimentaire comme agents de prévention.

6.2.4 Propriétés immunomodulatrices

L'effet immunostimulant des polysaccharides sulfatés est principalement basé sur la modulation des macrophages. Les macrophages appartiennent au système immunitaire

inné, dont le rôle est de maintenir l'homéostasie en changeant de fonction selon les tissus. Ces macrophages sont une source prépondérante de facteurs pro-inflammatoires.

Les composés solubles dans l'eau extraits des algues marines comme les polysaccharides sulfatés ont une activité anti-inflammatoire prometteuse. Malheureusement, l'analyse scientifique de l'activité anti-inflammatoire de ces dérivés d'algues n'a pas été, jusqu'à maintenant, suffisamment poussée. Les polysaccharides extraits de deux algues rouges *Porphyra yezoensis* et *Gracilaria verrucosa* stimulent la phagocytose chez les souris *in-vitro* et *in-vivo*. Les carraghénanes sont connues pour être de puissants agents inflammatoires chez les rongeurs, ce sont les souris qui ont été les premières à produire le facteur de nécrose tumorale (TNF- α) en réponse aux lipopolysaccharides bactériens. Cependant certains types de carraghénanes peuvent induire une puissante activation des macrophages alors que certains carraghénanes et fucoïdanes inhibent les fonctions macrophagiques. Toutefois ces polysaccharides peuvent avoir des applications biomédicales en stimulant le système immunitaire ou en contrôlant l'activité macrophagique afin de réduire les effets négatifs associés.

Les polysaccharides extraits de l'Algue Verte *Ulva rigida* doublent l'expression des chimiokines et des interleukines. En outre les polysaccharides de cette algue permettent de stimuler la sécrétion de prostaglandine E2 par les macrophages et d'induire une augmentation de la cyclooxygénase-2. Cela pourrait conduire à une éventuelle application clinique afin de modifier certaines activités des macrophages dans des maladies où cette fonction est diminuée.

6.2.5 Et si le traitement antipaludique se trouvait dans les algues ?

De nombreuses recherches sont effectuées autour des algues afin de découvrir une future arme contre le paludisme.

Des chercheurs de l'Inserm affirment que les inhibiteurs de kinases humaines (classe de médicament employé en chimiothérapie contre certains cancers) seraient actifs contre le paludisme.

Quant aux chercheurs américains, ils ont étudié le mode d'action d'une algue tropicale, *Callophycus serratus* qui posséderait également des propriétés antipaludiques. Cette algue est composée de bromophycolides qui la protégeraient des attaques de *Lindera thalassiae* (champignon marin). [35]

Ce sont des chercheurs lillois (CNRS/Inserm/Institut Pasteur de Lille/Université Lille 1 et 2) qui essaient de mettre au point une vaccination nasale et orale contre le Plasmodium responsable de la maladie [36]. Ils ont réussi « à protéger des souris en leur faisant ingérer de l'amidon, issu d'une algue verte, modifiée génétiquement pour véhiculer des protéines vaccinales ». Les résultats obtenus sont très encourageants et permettraient d'envisager une vaccination simple et sécurisée des enfants dans des zones endémiques. La réussite de cette vaccination serait une découverte majeure, d'autant plus que les moustiques (vecteurs de la maladie) résistent aux traitements existants. L'objectif des chercheurs est de « tester l'efficacité de candidats vaccinaux parmi les protéines qui permettent au parasite de pénétrer dans les cellules des hôtes et de les infecter » ainsi que de développer la meilleure stratégie vaccinale pour les administrer. Ils ont développé une nouvelle stratégie vaccinale antipaludique par l'ingestion d'amidon génétiquement modifié. Pour cela, ils sont partis d'antigènes (candidats vaccinaux) qui ont montré leur efficacité lors de vaccination « classique ». Ces antigènes ont été ensuite fusionnés à une enzyme, la GBSS, provenant d'un grain d'amidon d'une algue verte *Clamdomonas reinhardtii*. Cette enzyme agit au cœur du grain d'amidon sans être dégradée par d'autres enzymes. Elle assure également la protection des antigènes qui lui ont été greffés. L'étude a consisté à placer des antigènes de Plasmodium murin et humain à l'intérieur des grains d'amidon. Ces derniers ont ensuite été ingérés par des souris à qui l'on a inoculé le parasite. Ils ont montré que les souris avaient été bien vaccinées et qu'elles étaient protégées significativement contre l'infection. L'amidon est un polysaccharide qui entre dans la composition de la majorité des organismes photosynthétiques. Ces grains d'amidon présentent de grands intérêts notamment grâce à leur facilité de production et de purification en grande quantité à partir des extraits végétaux. De plus, ils ont une structure stable qui peut se conserver pendant des mois sans précaution particulière. Ils sont bien assimilés par la digestion alimentaire et leur coût de production est très faible. Dans les pays où sévit le paludisme, les enfants sont dénutris et par conséquent plus fragiles vis-à-vis de toutes les infections. Ainsi, cette vaccination pourrait avoir un double intérêt, celui de nourrir la population, tout en la vaccinant. Pour cela d'autres études sont effectuées à partir d'une algue multicellulaire utilisée en Afrique comme complément alimentaire, mais aussi par l'emploi de maïs ou de pomme de terre. L'efficacité des différents antigènes de Plasmodium et la faisabilité de cette stratégie chez l'homme doivent maintenant être testées, tout en contrôlant l'absence d'effets secondaires. Ce vaccin apporterait un véritable progrès de par sa voie d'utilisation (voie orale, ce qui limite les risques de

contaminations par les seringues tel que le sida) mais également par sa conservation (les variations de température n'influeraient pas sur la stabilité).

6.2.6 Action sur les infections nosocomiales

C'est un véritable fléau qui peut être contracté par les patients lors d'hospitalisations. Ces infections sont fréquemment rencontrées à la suite de la pose d'une prothèse nécessitant la plupart du temps une nouvelle opération. Ces infections sont très insidieuses par leur résistance aux antibiotiques utilisés pour combattre les infections bactériennes. Cela est due à la formation par certaines bactéries d'un biofilm sur la prothèse. Les bactéries possèdent un mécanisme qui leur permet d'évaluer le nombre des autres bactéries qui les entourent, ceci grâce à la reconnaissance de certaines molécules que chaque bactérie libère autour d'elle. Dès que la population a atteint une certaine taille, de nouveaux gènes sont activés, induisant un changement de comportement pour la bactérie. « D'un comportement individuel, les bactéries passent à une organisation en biofilm ». Ce dernier est formé de bactéries agglutinées qui forment une population structurée, le rendant moins accessible au système immunitaire et aux antibiotiques. Ce biofilm ne se cantonne pas au niveau de la greffe, il s'étend aux tissus voisins. Deux chercheurs « ont trouvé le moyen de prévenir la mise en place de ces biofilms sur la prothèse », en perturbant le mécanisme de détection des bactéries. Pour cela, ils ont repris des études réalisées sur une algue rouge *Delisea pulchra* exempt de biofilm, grâce à la présence de certaines molécules de la famille des furanones (mais surtout des furanones bromés). Ces chercheurs ont établi une synthèse de certaines de ces furanones, permettant une utilisation industrielle de ces molécules dans le but de traiter les prothèses avant les opérations. Ces molécules interféreraient avec le mécanisme des Staphylocoques blancs, mais aussi de *Serratia liquefaciens* ou *Pseudomonas aeruginosa*. [37]

7. AGRICULTURE

7.1 Les engrais

Depuis longtemps et dans le monde entier, les agriculteurs des régions côtières utilisent les macro-algues comme engrais. Les « laisses de mer » étaient épandues dans les champs. Aujourd'hui, on trouve des broyats d'algues marines, vendus sous forme de poudre, de liquide ou de crème. Ils peuvent être disposés au pied de la plante cultivée ou pulvérisés sur les feuilles. Ce conditionnement permet d'être exporté dans des régions éloignées du littoral. La richesse en minéraux des algues permet d'améliorer la composition des sols appauvris et les colloïdes ont pour rôle de retenir l'eau des sols, de fixer le limon et de réduire l'érosion des terres cultivables. Les macro-algues brunes servent également dans la formulation de supports de culture (terreaux enrichis).

Après extraction des hydrates de carbone et des composés d'intérêts, il reste des nutriments riches en éléments nutritifs dans la biomasse qui est revalorisée en bio-fertilisant.

Peu d'études à grande échelle ont été réalisées sur l'action des algues en tant que producteurs de composés actifs pour l'agriculture. Mais quelques tests en laboratoire ont permis de démontrer que les extraits d'*Anacystis marina* sont efficaces contre le liseron ; ceux de *Laurencia obtusa* contre les araignées, les pucerons et les chenilles ; ceux d'*Odonthalia gloccosa* contre les mauvaises herbes et ceux de *Pachyton coriaceum* contre la cloque de l'oseille et les vers. [1,3,6]

7.2 Traitement phytosanitaire

Les macro-algues contiennent des composés (phytochromones telles que les cytokines, les auxines et les gibbérellines) qui favorisent la germination, la croissance des tiges ou des feuilles et la floraison.

Depuis quelques années, il existe sur le marché, des extraits liquides d'algues brunes appartenant aux laminaires ou aux fucales (essentiellement *Ascophyllum* et *Ecklonia*). Ces extraits sont fortement dilués car ces substances doivent agir à des doses infimes. Ces extraits après pulvérisation sur des champs expérimentaux, semblent apporter aux plantes de larges bénéfices par leur composition en oligoéléments, ainsi qu'en substances

hormonales de type cytokines et bétaine. Certains de ces composés agissent comme des agents de protection biologique contre les maladies des plantes en stimulant les défenses naturelles des plantes. Ces produits phytosanitaires « agressent » d'abord la plante pour la rendre plus forte afin qu'elle produise plus de fruits et qu'elle lutte contre certaines maladies ou insectes. Ces substances constituent un « vaccin » qui permet de diminuer la fréquence et l'importance de différents traitements sanitaires curatifs chimiques.

Les substances algales actives sont les fucoïdanes, les laminaranes ou encore des oligoalginates de type polyacide mannuronique.

Ces algues se présentent sous forme de farine activée avec des métaux tels que le cuivre. Elles jouent également un rôle d'adjuvant de formulation sous forme de tensioactifs verts.

Elles présentent un double intérêt ; les nutriments algaux sont relargués progressivement permettant la croissance des plantes et ils remplacent les engrais chimiques qui demandent une forte intensité énergétique pour leur production.

8. LES FUTURES APPLICATIONS

8.1 La batterie aux algues

Ce sont des chercheurs de l'Université d'Uppsala qui 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 celles au lithium qui sont les plus utilisées aujourd'hui.

Cette algue doit être cultivée sur une très grande surface (1 gramme de matière produite pour 80 m²) afin d'élaborer un type unique de cellulose. En recouvrant cette dernière de polypyrolle (polymère conducteur), 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 ». L'aboutissement de ces recherches pourrait donner une des premières batteries à base organique qui puisse rivaliser avec les batteries lithium-ion (non-organique). Elle serait essentiellement composée de papier et d'eau salée.

De plus, cette batterie possède des caractéristiques très intéressantes telles que sa capacité à se recharger rapidement et de nombreuses fois « sans perdre charge après charge, de sa capacité de stockage ».

Dans un premier temps ces batteries pourraient être utilisées dans les emballages ou dans les appareillages de diagnostic dans les pays en voie de développement (car elles ne nécessitent pas du matériel de pointe) pour ensuite envahir d'autres domaines. [38]

8.2 Le biocarburant

Le principe utilisé est celui de la photosynthèse : les algues en présence de lumière solaire, d'eau et de CO₂ donnent de l'oxygène et augmentent leur croissance.

Ce biocarburant est produit par des microalgues qui peuvent être cultivées de deux façons différentes. On distingue donc le procédé dit « intensif » où les microalgues croissent dans des photobioréacteurs fermés (production tubulaire ou à colonne verticale) où les paramètres physico-chimiques sont contrôlés. Le deuxième procédé dit « extensif » se déroule dans des bassins ouverts en extérieur de type « champ de course » (raceway) pour une profondeur de quelques dizaines de centimètres. C'est le système le plus utilisé aujourd'hui pour la production de biomasse. Des roues à aubes assurent le mouvement de l'eau et l'apport en CO₂ est assuré par un bullage. Mais son transfert dans la phase liquide est souvent mauvais du fait de la faible profondeur des bassins. De plus le caractère ouvert de cette méthode est un inconvénient car les algues sont soumises aux aléas climatiques ainsi qu'à certaines contaminations (parasites ou prédateurs). C'est la raison pour laquelle, ce sont des espèces extrêmophiles qui sont employées car elles poussent en milieu très alcalin (Spiruline) ou dans des milieux hypersalins (*Dunaliella salina*).

Le système fermé, quant à lui, fournit l'eau, les nutriments et le CO₂ de manière contrôlée. Ces photobioréacteurs, bien que plus chers à construire et d'entretien plus complexe, assurent un meilleur contrôle de la culture avec une production plus durable. Toutefois, ce système comporte également des inconvénients, tel qu'un risque d'accumulation de l'oxygène pouvant conduire à la formation de radicaux libres et de ce fait inhiber la photosynthèse. Il existe également un risque de surchauffe (effet de serre) et dans le cas d'une contamination, ces systèmes sont délicats à nettoyer.

Pendant leur développement, les algues accumulent des graisses et des huiles naturelles qui ont des structures moléculaires semblables au pétrole brut traditionnel. Ces

microalgues peuvent accumuler jusqu'à 80% de leur poids sec en acides gras. [39] La difficulté réside dans la sélection des souches de microalgues ayant une forte teneur en lipide et un temps de doublement rapide (de l'ordre de 24h).

Cette huile est ensuite extraite et récoltée à partir des microalgues. Puis, elle subit un traitement dans les raffineries, de la même manière que le pétrole brut, pour aboutir à une gamme complète de carburants en y incluant les essences, les gazoles, du kérosène et des fiouls marins. Ainsi cette huile pour être convertie en biocarburant peut subir :

- Une réaction de transestérification : elle consiste à faire réagir les triglycérides algaux avec du méthanol pour donner des esters méthyliques d'acides gras utilisables en biodiesel.
- L'hydrogénation catalytique où l'huile est mise en présence d'hydrogène et l'ensemble subit un hydrocraquage.

Quelques avantages potentiels de ces biocarburants à base d'algues :

- Contrairement aux biocarburants de 1^{ère} génération (produit à partir d'amidon ou d'huile végétale provenant de graine de blé, de colza ou de tournesol) et de 2^{ème} génération (provenant de tige de blé, de maïs, du bois...), ces algues peuvent être cultivées sur des surfaces avec une eau impropre à la production agricole.
- La production de cette huile s'effectue par photosynthèse, elle nécessite par conséquent de la lumière, de l'eau, et du CO₂ et de compléments nutritifs (qui peuvent être en partie apportés par les eaux de ruissellement ou les eaux usées).
- Au cours de leur croissance, les algues consomment du dioxyde de carbone. Cela contribue à réduire les émissions de gazs à effet de serre. De plus, elles produisent de l'oxygène.
- La similitude des structures moléculaires entre le biocarburant qui résulte de l'huile algale et celle du pétrole, laisse à penser qu'il existe une compatibilité avec les modes de transports actuels.
- Les algues utilisées ont un rendement à l'hectare supérieur d'un facteur 30 par rapport aux espèces oléagineuses terrestres.
- Les algues se reproduisent plus rapidement et l'évaluation des différentes souches d'algues potentiellement productrices de carburant est également facilitée par rapport aux autres récoltes agricoles. [1,39–41]

LA TOXICITE ALGALE

Un des premiers cas d'intoxication alimentaire rapportée, liée à la consommation de fruits de mer date de 1793. Une partie de l'équipage du capitaine anglais Georges Vancouver (lors de son exploration du Canada) périt après s'être nourrie de coquillages provenant de la baie surnommée depuis « Poison cove ». Ce n'est que plus tard que l'explorateur a constaté que les autochtones ne consommaient aucun crustacé, ni mollusque lorsque la mer devenait luminescente la nuit. Aujourd'hui, à certaines saisons, on peut voir en bord de mer dans la région de Vancouver en Colombie britannique des panneaux portant la mention « Red tide » (marée rouge). Un peu partout dans le monde, il existe des traditions locales qui déconseillent de manger des coquillages à certaines périodes de l'année.

Il est important de préciser que peu d'algues sont toxiques pour l'homme. Ce sont essentiellement les microalgues qui sont dangereuses. Parmi le phytoplancton, seul 2% peuvent produire des substances nocives. Pour comprendre ce phénomène, il faut tenir compte du fait que les algues interagissent en permanence avec leur environnement par le biais de message moléculaire. De ce fait toutes les algues sont potentiellement toxiques mais heureusement pas pour l'homme. Elles produisent naturellement des molécules capables de perturber le fonctionnement d'autres organismes. Ces défenses chimiques sont spécifiques selon les espèces et libérées en fonction des besoins. Les toxines peuvent rester à l'intérieur des cellules, on parle alors d'endotoxines ou être libérées dans l'eau, ce sont les exotoxines. Ces dernières sont directement actives sur les animaux et les végétaux. Quant aux endotoxines, il faut que les algues soient ingérées pour exprimer leur toxicité. Mais elles peuvent parvenir jusqu'à l'homme et constituer un risque pour la santé en s'accumulant dans les produits marins consommés. Toutefois, ces endotoxines peuvent être libérées dans l'eau, lorsque les algues se brisent, pouvant entraîner la mort de poissons. Ce phénomène se rencontre notamment avec un dinoflagellé *Karenia brevis*. Lorsque les cellules de cette algue se rompent, elles libèrent des neurotoxines qui atteignent les branchies des poissons et les tuent.

Les macroalgues semblent peu toxiques pour l'homme. Certaines algues sont impropres à la consommation par leur teneur en iode (ex : *Laminaria digitata*). Mais même les algues

vertes peuvent être utilisées en cuisine à condition qu'elles soient cueillies fraîches encore fixées et dans des lieux exempts de pollution. L'algue brune *Desmarestia* n'est pas toxique mais elle est riche en acide sulfurique d'où la mauvaise réputation qui lui est attribuée.

L'algue *Caulerpa taxifolia* est une nuisance pour la faune et la flore marine mais elle n'est pas dangereuse pour l'homme. Elle possède une toxine, la caulerpényne qui limite le risque de broutage et accélère la cicatrisation des blessures. Cette algue n'est constituée que d'une seule cellule géante avec plusieurs noyaux, ce qui en cas de déchirure aboutit à un déversement de leur contenu. Cette algue, originaire des régions tropicales a été rejetée de l'aquarium de Monaco et a envahi les fonds marins méditerranéens. Elle est surnommée « l'algue tueuse ». Cependant, il semblerait que sa population régresse et que la vie retrouve peu à peu ses droits.

Les algues sargasses sont aussi des algues envahissantes qui s'enroulent de façon inextricable autour des hélices de bateaux. Elles libèrent dans leur environnement une substance toxique pour les herbivores juste avant de former leurs organes reproducteurs. Ainsi, leur descendance est assurée.

Si les macroalgues ne sont pas toxiques, les microalgues, elles le sont. Les algues font partie du phytoplancton et elles s'accumulent dans la chaîne alimentaire en touchant aussi bien l'homme, que les mammifères marins, que les oiseaux de mer ou encore certains poissons. « Sur les 5000 espèces de phytoplancton marin, une centaine s'avère dangereuse ». Les principales sources de contamination pour l'homme sont les coquillages filtrants car ils sont peu affectés par les toxines et ils ne meurent pas avant d'être consommés (contrairement aux poissons). D'où la difficulté de savoir s'ils sont consommables ou pas. Les toxines se retrouvent dans les tissus des bivalves, notamment dans leur tractus digestif ou elles sont concentrées dans les organes tels que l'hépatopancréas. Cet organe permet d'isoler les substances suspectes. Dans certains cas, un seul coquillage peut s'avérer mortel.

Les algues toxiques pour l'homme sont essentiellement des dinoflagellés mais également certaines espèces de diatomées et de cyanobactéries. La majorité des algues toxiques sont dangereuses lors de la prolifération. Elles se développent rapidement par reproduction asexuée mais chez certaines espèces en situation de stress ou lorsque l'environnement ne leur est pas favorable, elles utilisent la reproduction sexuée. Les dinoflagellés peuvent également former des kystes qui sont entraînés par les courants et qui germent lorsque les conditions redeviennent adéquates.

1. FACTEURS QUI FAVORISENT LES ALGUES TOXIQUES

Le principal facteur est celui des conditions environnementales avec la température, l'éclairement, la présence de substances nutritives et le minimum de concurrence et de prédation. De plus, cela dépendra de la capacité des algues à occuper un milieu et par conséquent de leur vitesse de reproduction. Ces algues toxiques ne peuvent pas se développer n'importe où. On les rencontre notamment dans les zones où les eaux forment des couches de températures différentes, c'est-à-dire qu'une couche d'eau chaude en surface repose sur une couche d'eau plus froide et riche en substances nutritives. Ce phénomène a lieu souvent avec les températures estivales et lorsqu'il y a un écoulement d'eau douce. L'azote et le phosphore présents dans les couches supérieures sont rapidement consommés par les algues n'en laissant que dans les couches inférieures plus froides. Ainsi, seules les algues mobiles comme les dinoflagellés peuvent y accéder facilement. Grâce à leur flagelle, ces algues peuvent parcourir une dizaine de mètres par jour, elles font donc le voyage tous les jours. Pendant la journée, elles profitent de la lumière en surface, et la nuit, elles redescendent faire le plein de nutriments. Il semblerait que depuis une trentaine d'année ces algues toxiques se développent dans de nombreuses régions du monde. Cependant, ces données peuvent être faussées, car on y prête plus d'attention avec une surveillance accentuée et des méthodes de détection de plus en plus fines. Malgré tout, on note un accroissement de ces algues sur certains sites, comme certaines régions du Japon très urbanisées. Cette croissance algale est dopée avec les rejets d'azote et de phosphore dans les milieux aquatiques. De plus, le développement du commerce maritime favorise le voyage des algues, auquel il faut également ajouter le réchauffement climatique.

2. POURQUOI LES ALGUES PRODUISENT DES TOXINES ?

C'est leur moyen de défense afin de se protéger des herbivores marins et de lutter contre la concurrence au niveau nutritif et spatial. Les microorganismes peuvent être affectés par des toxines d'algues. Quelques composés ont des propriétés antibactériennes et antifongiques. Ces toxines peuvent atteindre plusieurs maillons de la chaîne alimentaire dont l'homme. Il semblerait que cette toxicité algale soit liée à une perturbation accidentelle de certains mécanismes physiologiques. Ces toxines se fixent sur des

récepteurs membranaires comme des analogues de structures. Ces molécules sont reconnues mais elles ne fonctionnent pas correctement et bloquent tous les systèmes dont la paralysie de canaux ioniques et la perturbation des échanges ; ceci conduit à une altération des mécanismes physiologiques vitaux. Les plus grands nombres de ces toxines interrompent la conduction électrique (elles découplent la communication entre les nerfs et les muscles).

Récemment, il a même été mis en évidence des toxines étonnantes produites par des algues vivant en symbiose avec des bactéries. Ces associations ont été étudiées permettant la mise en évidence des microorganismes à l'intérieur même des cellules ou vivant à la surface des algues. Les gènes bactériens semblent avoir été apportés sous forme de plasmide ou inclus dans l'ADN de l'algue.

Ces toxines algales compteraient parmi les plus puissantes du règne vivant. Les symptômes apparaissent souvent très rapidement après l'ingestion (de la minute à quelques heures). De plus, ces toxines ne sont pas perceptibles par l'homme car elles ne modifient ni l'odeur, ni le goût des poissons et des fruits de mer et surtout elles sont thermostables (pas détruites par la cuisson). Les poissons ne survivent pas aux toxines, à l'exception de la *ciguatera* tropicale (intoxications alimentaires due à l'ingestion de poisson) qui contamine les poissons coralliens et leurs prédateurs sans altérer leur santé.

Ces contaminations constituent un véritable problème pour les poissons d'élevages qui ne peuvent pas fuir en cas d'efflorescence d'algues toxiques.

3. LES EFFETS DES TOXINES SUR L'HOMME

Selon les toxines les effets seront différents mais elles induisent souvent des troubles gastro-intestinaux et/ou neurologiques. Lorsque ces molécules sont lipophiles, elles passent facilement par la membrane phospholipidique des cellules intestinales. Quant aux molécules hydrophiles elles passent dans le sang. Elles peuvent gagner le système nerveux central et agir. Généralement chaque espèce possède sa toxine spécifique et certaines algues possèdent plusieurs toxines pour se défendre. Parmi les toxines les plus connues, citons l'acide okadaïque, les saxitoxines et leurs dérivées, ainsi que les ichthyotoxines. [3,42,43]

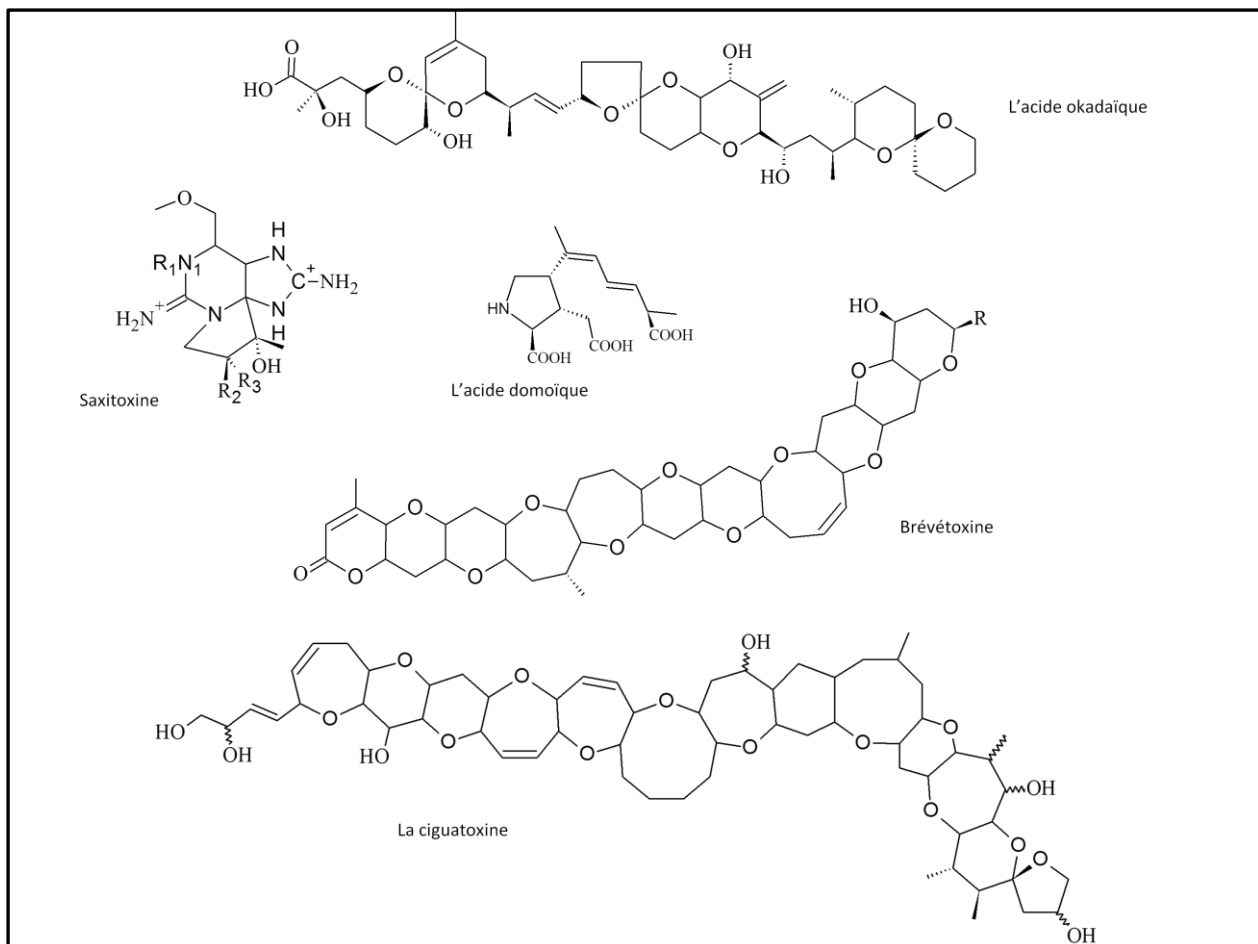


Illustration 39 : Structures chimiques des principales toxines rencontrées

3.1 L'acide okadaïque

La toxine est produite par des dinoflagellés du genre *Dinophysis spp.* (les plus fréquentes sur le littoral français métropolitain) ou *Prorocentrum spp.*. L'acide okadaïque a été identifié comme étant la toxine de base des phycotoxines diarrhéiques (DSP, ou Diarrheic Shellfish Poisoning). L'acide okadaïque inhibe des protéines phosphatases, enzymes qui déphosphorylent les protéines phosphorylées par les protéines kinases. Au niveau biologique, l'accumulation des protéines phosphorylées entraîne une activité promotrice tumorale, ainsi que la contraction des muscles lisses. Ce dernier semble être à l'origine des diarrhées et des douleurs abdominales.

Les symptômes de l'intoxication apparaissent au bout de 30 minutes à 12 heures après la consommation des coquillages contaminés (en moins de 4 heures dans 70% des cas). Les douleurs durent en moyennes 2 à 3 jours. Les toxines modifient la perméabilité des

vaisseaux du tube digestif et provoquent de sévères troubles gastro-intestinaux. Dès que les concentrations atteignent 200 à 500 microgrammes par poids corporel, elles ont un effet sur les organismes vivants. Lors d'intoxication « légère », on observe communément des nausées, des vomissements, des crampes abdominales et des diarrhées. Mais lors d'intoxication « sévère », le sujet peut être atteint de vertiges, d'états de confusion, d'hallucinations, de pertes de mémoire à court terme voire même des convulsions. Mais ces intoxications sont certainement sous déclarées en raison de leurs caractères bénins dans la majorité des cas. Aucune mortalité humaine n'a été déclarée pour le moment.

3.2 Les saxitoxines

Elles sont essentiellement produites par des dinoflagellés du genre *Alexandrium spp.*, *Gymnodinium spp.* et *Pyrodinium spp.* Il existe une vingtaines d'espèces de dinoflagellés impliquées dans la production de l'alkaloïde toxique. La saxitoxine est responsable d'intoxication paralysante par des fruits de mer. Ces toxines s'accumulent chez certains mollusques tels que les moules, les huîtres, les coquilles Saint-Jacques ou encore les palourdes de diverses régions du monde. Les premiers symptômes apparaissent entre 5 et 30 minutes après ingestion. Cela commence par une légère sensation de picotement ou un engourdissement autour des lèvres qui se propage ensuite au visage et aux extrémités. Dans les cas d'intoxication les plus extrêmes, on observe des paralysies musculaires et des difficultés respiratoires qui peuvent conduire à la mort 2 à 12 heures après la consommation de coquillages contaminés. La saxitoxine bloque les canaux sodium, empêchant la formation d'un potentiel d'action au niveau des cellules excitables. Actuellement, il n'existe pas d'antidote contre les saxitoxines, les médecins ne peuvent utiliser que des traitements palliatifs en support spécifique du système respiratoire.

3.3 L'acide domoïque

Elle est produite par des diatomées de type *Pseudonitzschia multiseries*, *P. pungens*, *P. pseudodelicatissima*, *P. australis*, ainsi que des algues rouges de type *Chondria*. Cette toxine est bio-concentrée par les fruits de mer mais également dans la chair du hareng. C'est une toxine amnésiante (ASP, ou Amnesic Shellfish Poisoning). L'acide domoïque est un acide aminé tricarboxylique dont la structure est proche de l'acide kaïnique. Or le

récepteur kaïnate est l'un des récepteurs glutamaergiques du système nerveux central (SNC). D'où les conséquences délétères diverses de ces toxines au niveau intracellulaire et dans différentes régions du SNC.

Les premiers symptômes sont d'ordres gastro-intestinaux puis entre 24 à 48 heures, on observe des symptômes neurologiques avec des maux de tête persistants, désorientation et confusion. C'est la mémoire antérograde qui est affectée par cette toxine, les autres types de mémoires restent intacts. Les cas les plus graves sont recensés chez les enfants et les personnes âgées, chez lesquelles l'acide domoïque peut entraîner une perte de mémoire, des dommages cérébraux pouvant même conduire à des convulsions, au coma et parfois, à la mort. Il n'existe pas de traitement spécifique pour soigner ces intoxications alimentaires d'origine marine. Cette acide domoïque est également responsable d'une grande mortalité d'oiseaux et de mammifères.

3.4 Les brévétotoxines (NSP : Neurotoxic Shellfish Poisoning)

On relie surtout ces brévétotoxines à des cas de mortalité massive de poissons. Mais on la trouve aussi dans les coquillages. C'est le dinoflagellé *Karenia brevis* ou *Gymnodinium breve* qui produit cette toxine qui sévit principalement en Floride, dans le Golfe du Mexique et un peu en Nouvelle-Zélande. Les efflorescences de cette algue sont détectables car elles provoquent des marées rouges. La particularité de ce dinoflagellé réside dans le fait que lors des efflorescences les cellules peuvent être transportées par les embruns et inhalées. Ce qui provoque des troubles respiratoires chez les baigneurs mais surtout chez les asthmatiques.

Ces brévétotoxines se fixent sur les canaux sodiques sensibles au potentiel de membrane. Ce qui conduit à une augmentation de la perméabilité au sodium qui, par une suite de réactions en cascade, aboutit à une perturbation de l'équilibre osmotique existant de part et d'autre de la membrane cellulaire. Lorsque ces toxines sont aéroportées, elles provoquent des irritations et des brûlures des voies respiratoires. Mais dans le cas d'une ingestion, elles déclenchent des diarrhées, des vomissements et des douleurs abdominales qui se résolvent rapidement. En plus, s'ajoute des douleurs musculaires, des vertiges, de l'angoisse, des paresthésies (picotement des extrémités) et de la transpiration.

3.5 La ciguatoxine (CFP ou Ciguatera Fish Poisoning)

Elle est à l'origine de la majorité des intoxications alimentaires liée à la consommation de produit de la mer. Elle touche entre 10000 et 50000 personnes par an. Cette toxine est une neurotoxine liposoluble, stable à la chaleur, elle n'est ni dégradée à l'acide, ni éliminée par séchage, salage ou fumage. Les espèces de microalgues qui produisent des ciguatoxines sont *Gambierdiscus toxicus*, *Prorocentrum spp.*, *Ostreopsis spp.*, *Coolia monotis*, *Thecadinium sp.* et *Amphidinium carterae*.

Ces ciguatoxines entraînent une intoxication alimentaire transmise par les poissons, la ciguatéra, qui sévit essentiellement dans les régions tropicales et subtropicales. L'origine de l'intoxication a été difficile à mettre en évidence. Ce sont des toxines produites par des dinoflagellés qui vivent sur les algues marines des récifs coralliens. Les poissons en mangeant les algues, ingèrent en même temps les dinoflagellés toxiques. Etant liposolubles, ces toxines s'accumulent dans les tissus adipeux des poissons (1^{er} maillon). Puis les prédateurs primaires ou secondaires de ces poissons se contaminent à leur tour, sans mourir. Le contrôle sanitaire est difficile à mettre en place car on ne différencie pas les poissons vecteurs, des poissons sains car la toxine est inodore, incolore et sans signature gustative particulière. De plus, la maladie engendrée est difficile à prévoir car elle est de nature sporadique et locale. Cette toxine est d'autant plus ennuyeuse que les poissons intoxiqués ne sont pas sédentaires. Les autorités sanitaires des pays où la ciguatera est endémique, conseillent à la population de limiter leur consommation en poissons carnivores et de ne pas manger la tête et les viscères des poissons récifaux. C'est la raison pour laquelle cette intoxication alimentaire d'origine marine est la plus importante en nombre de malade.

La ciguatera induit une dépolarisation de la membrane dans les tissus nerveux et musculaires en ouvrant les canaux sodiques voltages dépendants. Les ciguatoxines se fixent sur les mêmes récepteurs que les brévétotoxines, mais elles (les ciguatoxines) semblent avoir une plus grande affinité pour les canaux sodiques. Cette fixation conduit à une augmentation de la perméabilité et de l'excitabilité membranaire ainsi qu'à une altération de la libération du neurotransmetteur. Cette ciguatéra a tendance à se répandre dans le monde entier à cause de la dégradation des récifs coralliens aussi bien d'origine humaine (constructions, dragages...) que naturelle (raz de marée, cyclone...).

Cette ciguatera conduit à des symptômes gastro-intestinaux, neurologiques et cardiovasculaires. Cela débute par des diarrhées, des vomissements et des douleurs

abdominales. Puis apparaissent des troubles neurologiques comme des vertiges, des engourdissements, des tremblements de la bouche et des extrémités ainsi que des douleurs articulaires. Les symptômes aigus sont polymorphiques et se développent la plupart du temps entre 2 et 12 heures après ingestion du poisson contaminé. Cette maladie est rarement fatale (<1%) mais après une manifestation aiguë de la maladie, certains patients ressentent des symptômes qui peuvent durer des semaines, des mois, voire des années. La persistance des symptômes neurologiques pourrait être due à l'intervention du système auto-immun ou de l'action directe sur les neurones. Une hypothèse a été émise quant au fait que cette cigatoxine serait emmagasinée dans les tissus adipeux et libérée dans la circulation sanguine lors d'efforts physiques. De plus cette intoxication ne confère pas d'immunité à celui qui la contracte, au contraire, il semblerait que les individus soient plus sensibles au second épisode qu'au premier. Il n'existe pas d'antidote, mais le mannitol diminue la morbidité aiguë et semble efficace dans le traitement de la symptomatologie aiguë.

4. LES MOYENS DE LUTTE

Des systèmes de surveillance ont été mis en place dans les pays industrialisés afin de retirer à temps les produits contaminés. Les intoxications sont assez rares, exception faite de l'apparition de nouvelle toxine. En France, il existe un réseau de surveillance du phytoplancton et des phytotoxines (Réphy) qui surveille le littoral afin de repérer les proliférations d'algues toxiques et d'alerter les autorités lorsque la consommation de certains produits de la mer est dangereuse. Des mesures sont prises pour arrêter la commercialisation de ces produits infectés.

Malheureusement, les pays en voie de développements sont très exposés à ces intoxications. Ils n'ont pas les moyens pour mettre en place un réseau de surveillance qui est trop onéreux.

Malgré tout, la nature peut dans certain cas réguler elle-même ces problèmes. Dans certains cas, les efflorescences d'algues toxiques cessent aussi soudainement qu'elles sont apparues. Il semblerait qu'un parasite tueur (entre autre) pourrait limiter cette prolifération. On peut illustrer ce phénomène avec le dinoflagellé *Alexandrium minutum* qui a proliféré sur les côtes bretonnes à la fin des années quatre-vingt. Cette algue formait de

véritables marées rouges toxiques lors de leur efflorescence, contaminant les coquillages autour. Ce dinoflagellé a conduit à la fermeture régulière des exploitations aquacoles. Ce n'est que vers les années 2003 que la prolifération de cette algue a cessé, bien qu'elle soit toujours présente dans l'eau. Des recherches suggèrent l'existence d'un parasite marin qui chaque année au moment de l'efflorescence d'*Alexandrium*, se multiplie dans la cellule hôte. Ce parasite détruit la cellule et s'en échappe sous forme d'un long filament de 60 à 400 nouveaux parasites.

5. LES RAISONS DE CES EFFLORESCENCES

Les facteurs environnementaux jouent sur la prolifération des algues et des maladies qu'elles peuvent engendrer. Parmi ces facteurs, on trouve les changements climatiques globaux qui induisent une modification de la température des eaux marines, les concentrations en nutriments, la salinité, les rayonnements solaires et les concentrations en éléments chimiques.

Selon certains auteurs, l'Homme aurait également sa part de responsabilité dans les changements de l'écosystème marin :

- Par l'enrichissement en nutriment par les déversements des eaux souillées.
- Par le dragage des récifs dans le cadre d'aménagements côtiers
- Et par l'importation indue de nouvelles espèces d'algues transportées à l'état de kyste dans les ballastes des bateaux. C'est également de cette manière que de nouvelles espèces de macroalgues envahissent de façons inappropriées certains fonds océaniques et appauvrissent la biodiversité (70% des algues voyagent sur les coques des bateaux, 10% sont embarquées dans les eaux de ballast et 20% sont introduites lors des essais d'acclimatation de nouvelles espèces aquacoles (huitres, moules, pétoncles, coquille Saint-Jacques...). Ces algues ont de tout temps, vadrouillé dans le monde, mais l'activité humaine accélère cette dynamique.

Quant aux microalgues, notamment les dinoflagellés, leur croissance dépend de la température, de la salinité, de la turbidité, de la lumière et de l'oxygène. Les stress, les fluctuations en nutriments, les pertes de filtres naturels, la diminution des prédateurs, le réchauffement et les climats extrêmes, ainsi que l'introduction de nouvelles espèces dans

les zones naturellement exemptés, peuvent contribuer à l'augmentation, en terme de fréquence, magnitude et persistance des efflorescences d'algues.

« Les dernières décennies les épisodes toxiques ont augmenté en fréquence, intensité et extension géographique » [44]. Cependant, il faut tenir compte que l'évolution des efflorescences observées peut être le fait soit d'une réelle augmentation soit d'une meilleure détection de ces événements.

6. LES « MAREES VERTES »

6.1 Facteurs favorisant la pullulation des algues

Les algues se multiplient lorsque les conditions leurs sont favorables. La lumière (et donc la photosynthèse) est certainement le facteur le plus important pour le développement des algues. Il est nécessaire que la lumière soit suffisante afin que le rendement énergétique de la photosynthèse dépasse celui de la respiration, permettant ainsi la fabrication de matière (de nouvelles algues se forment et de nouveaux tissus s'élaborent). C'est au printemps que cette croissance est favorisée grâce à la durée d'éclairement et à l'intensité lumineuse. La température est un facteur qui favorise la reprise de l'activité végétative car les réactions du métabolisme cellulaire en général font intervenir des enzymes thermosensibles. Ces protéines jouent un rôle de catalyseur et accélèrent la vitesse de réaction. Généralement, la température doit être supérieure à 10°C (ce qui arrive au printemps) pour que les enzymes soient efficaces. Cependant, en mer, les écarts saisonniers de températures de l'eau ne sont pas aussi marqués que dans les milieux d'eau douce. Par conséquent, c'est essentiellement la lumière qui règle la phase de croissance des algues.

Mais pour se développer, il leurs faut aussi des substances nutritives. Or les milieux aquatiques sont tous enrichis pendant l'hiver avec les pluies et les eaux de ruissellement des terres environnantes, qui apportent des sels d'azote, de phosphore et de silice.

Les sels azotés proviennent de la dégradation de la matière organique par les microorganismes présents dans le sol et l'eau. Durant l'hiver, l'activité microbienne est ralentie, il y a par conséquent une faible production de sels azotés, mais la consommation est elle-même faible dans les milieux aquatiques lents. L'azote présent

dans l'eau n'est pas que naturel, il provient également des fertilisations agricoles, et du traitement incomplet des eaux usées. On constate donc que la majorité de l'azote présent dans les milieux aquatiques, provient de l'activité humaine (agricole, industrielle et urbaine).

Le phosphore, issu de la dégradation des roches, est peu abondant dans la nature. Lorsqu'il est libéré dans le milieu, il se fixe rapidement avec les principaux constituants du sol (composés du fer, de l'aluminium ou du calcium). Les végétaux absorbent rapidement le phosphore qui est nécessaire à leur croissance. Ceci explique la pauvreté du phosphore naturel dans les milieux aquatiques. Une fois dans l'eau, il est fixé par les sédiments qui le conduisent vers le fond, ne laissant que très peu de phosphore pour satisfaire les besoins nutritifs des algues. Cependant aujourd'hui, ce n'est plus le cas car il existe une grande quantité de phosphate dans la plupart des cours d'eaux, apportée par les effluents domestiques (déjections humaines, produits lessiviels...) et agricoles.

Quant à la silice, elle reste principalement d'origine naturelle.

6.2 Le phénomène des « marées vertes »

On parle de « marée verte » lorsqu'il y a une quantité excessive de macroalgues vertes sur le littoral. Depuis les années 1970, les médias français ont commencé à parler de la prolifération d'algue verte sur les côtes bretonnes. Depuis, on constate un accroissement du phénomène dû pour une grande partie aux activités agricoles intensives. Ces algues apparaissent chaque été aux mêmes endroits. Les collectivités ramassent des tonnes d'algues en décomposition afin d'éviter la fuite des touristes en raison de l'odeur nauséabonde. Il existe d'autres régions du monde où ces algues prolifèrent tel la lagune de Venise en Italie, le lac de Tunis en Tunisie ou encore certaines plages Suédoises. Selon les régions ce ne sont pas les mêmes algues qui pullulent. En Bretagne, c'est le genre *Ulva*, plus précisément *Ulva armoricana*, la « laitue de mer » qui engendre ces problèmes.

Ces « marées vertes » ont lieu au printemps et en été car elles trouvent dans leur milieu tout ce qui leur faut pour se développer et foisonner. Les jours rallongent et l'intensité du rayonnement est plus importante. De plus, la température de l'eau comprise entre 15 et 25°C est idéale pour le fonctionnement du métabolisme des algues. Ces dernières ont une fixation très fragile, elles se décrochent facilement de leur support. De plus, elles sont constituées d'une fronde très fine qui leur permet de flotter et d'être au plus près de la

lumière solaire. Dans ces conditions, les fragments de thalles en suspension dans l'eau peuvent redonner des nouvelles algues vertes. Ces algues peuvent se multiplier par fragmentation, c'est-à-dire qu'un simple fragment suffit à l'algue pour se reconstituer. Tout ceci permettant un développement rapide des algues vertes s'il y a suffisamment de nutriments. C'est la raison pour laquelle ce sont dans les zones naturellement confinées, (peu profondes) où les eaux sont enrichies par des apports continentaux, que les algues prolifèrent.

Ce sont les *Chlorophyta* (Algues Vertes) qui arrivent le mieux à se développer dans les eaux riches en nutriments. Dès le mois d'avril, la prolifération s'accélère aboutissant à une biomasse maximale au début de l'été. Lors des grandes marées, les algues sont déposées en haut des plages et ne sont pas reprises par la marée suivante, elles s'entassent donc en couche épaisse. En surface les algues sèchent rapidement au soleil, alors que celles du dessous pourrissent donnant naissance à une odeur d'œuf pourri et un jus noirâtre à l'origine de désagrément. Les communes effectuent donc un ramassage mécanique onéreux qui ne permet pas de retrouver des plages propres. Ce ramassage est préoccupant car il détruit l'écosystème de la plage. Une grande quantité de sable est emportée et le « laisse de mer » détruit. Ce dernier contient des « épaves » apportées par la mer sur la plage. Il est constitué de 70% à 80% d'algues, de coquillage, de débris de bois, de restes d'animaux... Les « laisses de mer », lorsqu'elles ne sont pas polluées, ont un rôle important. Dès qu'elles sont dégradées et minéralisées, elles constituent l'une des sources de nutriment des plantes terrestres du haut de l'estran et des algues marines. Ces végétaux contribuent à fixer les plages, les sables et les sédiments dans les baies, les estuaires ainsi que le pied des premières dunes. De plus, la laisse de mer est la base de la chaîne alimentaire de l'écosystème de la plage. Elle contient des bactéries qui transforment la matière organique et constitue un espace de protection et de nutrition pour de nombreuses espèces, telles que les puces de mer ou les crabes.

Jusqu'en 2002, les algues étaient déposées en décharges, mais les jus risquaient de contaminer les nappes phréatiques. Une très petite quantité d'algues est recyclée et utilisée comme engrais et amendements sur les terres agricoles.

En été 2009, la population s'affole après la mort par asphyxie d'un cheval dans les algues vertes en putréfaction sur une plage des Côte d'Armor. Les analyses ont montré que l'un des gaz dégagés par les algues en décomposition, l'hydrogène sulfuré H₂S, a dépassé la dose mortelle, conduisant à un risque pour l'homme en cas d'inhalation. Cet H₂S peut entraîner la mort en provoquant un œdème pulmonaire.

En juillet 2011, le débat est relancé avec la mort suspecte de 36 sangliers dans l'estuaire de Gouessant dans les Côtes d'Armor.

Le 1^{er} août 2011, les premiers résultats d'analyses sont « extrêmement contrastés ». Les premiers rapports ont montré que les sangliers présentaient des traces d'intoxications par inhalation d'hydrogène sulfuré mais que les taux relevés dans leurs appareils respiratoires étaient très variables. Mais des doutes persistent par l'absence d'intoxication par ce gaz mortel chez l'un des sangliers et par un taux faible chez une laie. Les analyses ont également révélé la présence de chloralose (produit toxique, interdit à la vente depuis 1997 pour la plupart des usages dans l'Union Européenne) qui est utilisé comme pesticide afin de tuer ou d'éloigner les oiseaux tel que les corbeaux, les pies et les corneilles. Cependant, bien que découvert dans l'estomac, de l'un des sangliers, la quantité de ce poison ne semblait pas suffisante pour le tuer.

En septembre 2011, l'Ineris sollicité par le ministère de l'Ecologie, de Développement durable, des Transports et du Logement, rend son rapport. L'étude suggère qu'il est « hautement probable » que le décès des animaux soit lié au gaz dégagé par les algues vertes en décomposition. Les mesures effectuées pendant la campagne d'analyse ont été limitées dans le temps et l'espace, ce qui ne permet pas une généralisation. L'Ineris a montré que lorsque la vase ou les algues étaient foulées, il y a un dégagement important de composés soufrés. L'Ineris conclue que les concentrations retrouvées à la source « pourraient conduire à un accident mortel dans un scénario extrême de chute et de perçage de la croûte de surface ». Cependant, elle met en évidence la faible probabilité de l'intoxication humaine en raison du caractère olfactif de l'H₂S. Les analyses de l'air ambiant ont montré des taux d'H₂S supérieurs aux valeurs habituelles sans pour autant sembler préoccupantes pour les populations avoisinantes.

Un deuxième rapport, celui de l'agence de sécurité sanitaire de l'environnement (Anses) corrobore les conclusions de l'Ineris. Selon l'Anses, « l'hypothèse d'une intoxication par le sulfure d'hydrogène est la plus probable sans pouvoir affirmer qu'il s'agit du seul facteur contributif de la mortalité massive ». Mais ils émettent l'hypothèse que l'intoxication des animaux est probablement due à l'émission de gaz des larges vasières dans l'estuaire de Gouessant, par rupture des croûtes formées par les algues en putréfaction sur la plage. Mais l'Anses préconise des « travaux complémentaires » pour rechercher d'éventuelles cyanobactéries sur les organes des animaux morts.

Et pourtant malgré tout ce tapage médiatique, la prolifération des algues vertes en 2011 serait la plus faible depuis 2002. Les faibles précipitations du printemps limitant les apports en nitrate d'origine agricole.

Bien que ces « marées vertes » préoccupent les populations côtières depuis une trentaine d'année, il est important de tenir compte de certaines données :

- Un professeur bordelais Camille Sauvageur évoque une étude de 1911 à Belfast (Irlande du Nord) où l'on décrivait déjà les marées vertes. Il est décrit des amoncellements d'algues vertes qui entrent en décomposition, libérant une odeur pestilentielle et de l'hydrogène sulfuré. A l'époque, l'origine de cette pullulation serait plutôt les égouts des villes.
- On associe souvent la prolifération d'algue verte à l'activité agricole. Cependant, on constate des marées vertes importantes dans la baie de Lannion où pourtant l'agriculture présente sur les bassins versants de la baie, est peu intensive (peu d'élevage hors sol et présence de prairie longue durée). Tandis que les baies qui reçoivent le plus d'azote du fait de l'activité agricole, ne sont pas ou sont moins touchées par ces phénomènes (exemple : baie de la Vilaine).

De plus des chercheurs de l'INRA estiment que les travaux devraient se porter d'avantage sur le phosphore.

6.3 Revalorisation des algues vertes

Les algues vertes sont l'une des matières premières utilisées par une société de Bréhan, Olmix. Le produit phare de cette entreprise est l'Amadéite® qui est composé d'algue et d'argile. Ce matériau intéresse des secteurs très divers, tels que l'automobile, la plasturgie, la céramique, la cosmétique, ainsi que l'industrie du béton et le recyclage de certains polymères.

Les algues vertes sont utilisées majoritairement pour l'épandage et un peu en compost.

Des projets tels que leur utilisation dans les matériaux et notamment dans le papier-carton pourrait voir le jour. Les papeteries peuvent déshydrater rapidement les éléments. Ce procédé papier a été mis en pratique pour la fabrication de godets destinés à l'horticulture.

Il est important de noter que c'est un phénomène naturel qui revient chaque année au printemps pour disparaître vers la mi-août mais qui est amplifié par nos modes de consommations, nos pratiques agricoles et les médias.

Cependant l'extrême variabilité des échouages ne permet pas de pouvoir compter sur une exploitation pérenne de ces ressources. [45–49]

CONCLUSION

Les avancées sur les nouvelles technologies ont permis de découvrir un arsenal encore plus important sur les propriétés algales. La découverte de « fumeurs noirs » desquels s'échappent des nuages de bactéries jaunes, produisant leur énergie de la chimiosynthèse du soufre laisse à penser que la vie est apparue ici. Les courants marins ont ensuite entraîné ces bactéries vers des zones légèrement éclairées et ces organismes ont permis la formation d'une association « chlorophylle-pigment bleu » à l'origine de la formation de l'oxygène. Cet oxygène est devenu de plus en plus important, permettant la construction de la couche d'ozone. Cette dernière en formant un écran contre les rayons ultraviolets a permis le développement de nouvelles formes de vie.

Aujourd'hui ces algues occupent des habitats très diversifiés sur la surface du globe et surtout elles constituent 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 et certaines de leurs molécules sont consommées quotidiennement par les occidentaux à leur insu. Les alginates, carraghénanes et agar-agar, de part leurs propriétés gélifiantes, constituent des matières premières très intéressantes dans de nombreux domaines (alimentaires, textiles, pharmaceutiques, cosmétologie...). De plus, d'innombrables études sont effectuées aussi bien sur les macro- que sur les micro-algues. L'hétérogénéité des algues et leurs richesses en molécules poussent les chercheurs à découvrir des substances préventives ou curatives de maladies.

Ces algues peuvent également produire des substances toxiques pour se protéger de leurs prédateurs. Malheureusement ces toxines peuvent dans certains cas, être ingérées par l'homme et provoquer des perturbations de l'organisme pouvant même conduire jusqu'à la mort.

Ces algues peuvent également s'avérer envahissantes, mais c'est l'homme qui favorise l'initiation de cette prolifération.

Elles n'ont pas fini de nous livrer tous leurs secrets et pourraient constituer une véritable filière du futur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PERSON J. *Algues, filière du futur Livre Turquoise* [En ligne]. Romainville : Adabiotech, [s.d.]. Disponible sur : < http://adebiotech.org/images/stories/docs/LIVRE_TURQUOISE-V.screen.pdf >
- [2] CABIOC'H J., FLOC'H J.-Y., LE TOQUIN A., BOUDOURESQUE C.-F., MEINESZ A., VERLAQUE M. *Guide des algues des mers d'Europe : Manche/Atlantique*. [s.l.] : [s.n.], 1992.
- [3] LECLERC V., FLOC'H J.-Y. *Les secrets des algues*. [s.l.] : [s.n.], 2010. (Carnets de sciences, ISSN 2110-2228).
- [4] ALAYSE J.-P., LE NOZER'H Y., OCÉANOPOLIS (BREST F. *Les algues*. [s.l.] : [s.n.], 1997.
- [5] RAVEN P. H., EVERT R. F., EICHHORN S. E., EVRARDT C. *Biologie végétale*. [s.l.] : [s.n.], 2007.
- [6] PÉREZ R., BARBAROUX O. *Ces algues qui nous entourent : conception actuelle, rôle dans la biosphère, utilisations, culture*. [s.l.] : [s.n.], 1997.
- [7] REVIERS B. DE, BOSQUET G., BLONDEL L., MARTIN C. (19. -. *Biologie et phylogénie des algues. Tome 2*. [s.l.] : [s.n.], 2003. (Belin sup. Sciences. Histoire, ISSN 1760-3846).
- [8] BOURRELLY P. « Encyclopædia Universalis : CYANOBACTÉRIES ou CYANOPHYCÉES ou ALGUES BLEUES ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.universalis-edu.com.ezproxy.unilim.fr/encyclopedie/cyanobacteries-cyanophycees-algues-bleues/#> > (consulté le 11 août 2011)
- [9] FELDMANN J. « Encyclopædia Universalis : PHÉOPHYCÉES ou ALGUES BRUNES ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.universalis-edu.com.ezproxy.unilim.fr/encyclopedie/pheophycees-algues-brunes/#> > (consulté le 12 août 2011)
- [10] REVIERS B. DE, BOSQUET G., BLONDEL L., MARTIN C. (19. -. *Biologie et phylogénie des algues. Tome 1*. [s.l.] : [s.n.], 2002. (Belin Sup Sciences).
- [11] LEE R. E. *Phycology*. [s.l.] : [s.n.], 2008.
- [12] CARDOZO K. H. M., GUARATINI T., BARROS M. P., FALCÃO V. R., TONON A. P., LOPES N. P., CAMPOS S., TORRES M. A., SOUZA A. O., COLEPICOLA P., PINTO E. « Metabolites from algae with economical impact ». *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* [En ligne]. juillet,. Vol. 146, n°1-2, p. 60-78. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/16/j.cbpc.2006.05.007> > (consulté le 17 juillet 2011)
- [13] KORNPORST J.-M., POTIER P. (1934-2006 ; CHIMISTE). *Substances naturelles d'origine marine : chimiodiversité, pharmacodiversité, biotechnologies*. [s.l.] :

[s.n.], 2005.

[14] CAMPO V. L., KAWANO D. F., SILVA JR. D. B. DA, CARVALHO I.
« Carrageenans: Biological properties, chemical modifications and structural analysis - A review ». *Carbohydrate Polymers* [En ligne]. 10 juin 2009,. Vol. 77, n°2, p. 167-180.
Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.01.020> > (consulté le 14 août 2011)

[15] *Carraghénanes : agents gélifiants, épaississants et stabilisant sti700-f5080.pdf (Objet application/pdf)* [En ligne]. Disponible sur : < <http://www.techniques-ingenieur.fr/ezproxy.unilim.fr/res/pdf/encyclopedia/ti700-f5080.pdf> > (consulté le 18 août 2011)

[16] « Propriétés nutritionnelles des algues alimentaires / Intérêts Nutritionnels / Algues Alimentaires / SCIENCES & TECHNIQUES / S'INFORMER / Home - Centre d'Etude et de Valorisation des Algues (CEVA) - Algae Technical Research Centre ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.].
Disponible sur : < <http://www.ceva.fr/fre/S-INFORMER/SCIENCES-TECHNIQUES/Algues-Alimentaires/Interets-Nutritionnels/Proprietes-nutritionnelles-des-algues-alimentaires> > (consulté le 20 juillet 2011)

[17] *pdf_lettre-scientifique-ifn-86.pdf* [En ligne]. Disponible sur :
< http://www.ifn.asso.fr/publications/lettres/pdf_lettre-scientifique-ifn-86.pdf > (consulté le 21 juillet 2011)

[18] BURTIN PATRICIA. « Nutritional value of seaweeds ». In : *Electronic journal of environmental, agricultural and food chemistry* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2003. Disponible sur : < http://ejeafche.uvigo.es/component/option,com_docman/task,doc_view/gid,208/ > (consulté le 6 août 2011)

[19] FELDMANN J. « Encyclopædia Universalis : ALGUES ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.].
Disponible sur : < <http://www.universalis-edu.com/ezproxy.unilim.fr/encyclopedie/algues/#> > (consulté le 12 août 2011)

[20] BOURDONNEC A., HAMON D., JOUAN Y., L'HOSTIS M., LE MATRET J.-L., LE PERCHEC C. *Le goémon ses richesses à l'origine... et au service du monde vivant*. Jack.22700 Louannec : [s.n.], [s.d.].128 p.

[21] « FAO FAO Pêches et aquaculture Laminaria japonica ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.].
Disponible sur : < http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Laminaria_japonica/fr > (consulté le 12 octobre 2011)

[22] « Algues brunes et rouges / Les végétaux aquatiques / Statistiques mondiales / aquaculture / Ifremer - aquaculture ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur :
< http://aquaculture.ifremer.fr/statistiques_mondiales/les_vegetaux_aquatiques/algues_brunes_et_rouges > (consulté le 15 octobre 2011)

[23] « eVIDAL ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur :
< <http://use.evidal.net/ezproxy.unilim.fr/recherche/all> > (consulté le 4 septembre 2011)

[24] CLERE N. « Remontées acides et reflux gastro-oesophagien, éviter l'aigreur! ». *Actualités Pharmaceutiques* [En ligne]. mars 2010,. Vol. 49, n°494, p. 36-38. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0515-3700\(10\)70646-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0515-3700(10)70646-7) > (consulté le 14 août 2011)

- [25] WIJESINGHE W. A. J. P., JEON Y.-J. « Biological activities and potential cosmeceutical applications of bioactive components from brown seaweeds: a review ». *Phytochem Rev* [En ligne]. juin 2011,. Vol. 10, n°3, p. 431-443. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1007/s11101-011-9214-4> > (consulté le 3 septembre 2011)
- [26] NAEGELÉ E., NAEGELÉ A. *Les Algues, par Élisabeth Naegelé,... et Antoine Naegelé,... 2e édition refondue*. Paris : Presses universitaires de France, 1967. 128 p.
- [27] BOREL P., DRAI J., FAURE H., FAYOL V., GALABERT C., LAROMIGUIÈRE M., LE MOËL. « Données récentes sur l'absorption et le catabolisme des caroténoïdes ». 2005,. Vol. 63, n°2, p. 165-77.
- [28] GUERIN M., HUNTLEY M., OLAIZOLA M. « ScienceDirect - Trends in Biotechnology : Haematococcus astaxanthin: applications for human health and nutrition ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.unilim.fr/science/article/pii/S0167779903000787> > (consulté le 11 septembre 2011)
- [29] « Algalithe® (Lithothamnium calcareum) - Algues - Algues - Alimentation & Nutraceutique ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.setalg.com/alimentation-et-nutraceutique/algues/algues/algalitheR-lithothamnium-calcareum.html> > (consulté le 15 octobre 2011)
- [30] « Asparagopsis armata | aleor ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://aleor.eu/filiere-algue/algues/asparagopsis-armata/> > (consulté le 15 octobre 2011)
- [31] WIJESEKARA I., PANGESTUTI R., KIM S.-K. « Biological activities and potential health benefits of sulfated polysaccharides derived from marine algae ». *Carbohydrate Polymers* [En ligne]. 11 février 2011,. Vol. 84, n°1, p. 14-21. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.062> > (consulté le 14 août 2011)
- [32] ROGERS D. J., JURD K. M., BLUNDEN G., PAOLETTI S., ZANETTI F. « Anticoagulant activity of a proteoglycan in extracts of *Codium fragile* ssp. *atlanticum* ». *Journal of Applied Phycology* [En ligne]. décembre 1990,. Vol. 2, p. 357-361. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1007/BF02180926> > (consulté le 8 septembre 2011)
- [33] VAUBOURDOLLE M., PORQUET D. *Biochimie, hématologie*. [s.l.] : [s.n.], 2007. (Collection Le Moniteur internat, ISSN 1248-489X ; 2).
- [34] YANG C., CHUNG D., SHIN I.-S., LEE H., KIM J., LEE Y., YOU S. « Effects of molecular weight and hydrolysis conditions on anticancer activity of fucoidans from sporophyll of *Undaria pinnatifida* ». *International Journal of Biological Macromolecules* [En ligne]. 1 décembre 2008,. Vol. 43, n°5, p. 433-437. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2008.08.006> > (consulté le 8 septembre 2011)
- [35] STOUT E. P., PRUDHOMME J., ROCH K. L., FAIRCHILD C. R., FRANZBLAU S. G., AALBERSBERG W., HAY M. E., KUBANEK J. « Unusual antimalarial meroditerpenes from tropical red macroalgae ». *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters* [En ligne]. 1 octobre 2010,. Vol. 20, n°19, p. 5662-5665. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.bmcl.2010.08.031> > (consulté le 29 août 2011)

- [36] « Paludisme : un espoir de vaccin par ingestion d'amidon « modifié » génétiquement - Actualités - Science.gouv.fr ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.science.gouv.fr/fr/actualites/bdd/res/3847/paludisme-un-espoir-de-vaccin-par-ingestion-d-amidon-modifie-genetiquement/?zoom=moins> > (consulté le 29 août 2011)
- [37] « Delisea Pulchra : une algue utile contre les infections nosocomiales - Actualités - Science.gouv.fr ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.science.gouv.fr/fr/actualites/bdd/res/3563/delisea-pulchra-une-algue-utile-contre-les-infections-nosocomiales/> > (consulté le 29 août 2011)
- [38] « La batterie aux algues vertes peut révolutionner l'industrie du stockage d'énergie - Techniques de l'Ingénieur ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < http://www.techniques-ingenieur.fr/ezproxy.unilim.fr/actualite/environnement-securite-energie-thematique_191/la-batterie-aux-algues-vertes-peut-revolutionner-l-industrie-du-stockage-d-energie-article_6295/ > (consulté le 10 septembre 2011)
- [39] CADORET B., BERNARD O. « La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < http://www-sop.inria.fr/comore/shamash/Cadoret_Bernard_BiodieselMicroalgues_2008.pdf > (consulté le 12 septembre 2011)
- [40] « Le programme ExxonMobil de recherche et de développement sur les biocarburants à base d'algues FR_Biofuel_Algae_brochure.pdf (Objet application/pdf) ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < http://www.esso.fr/Europe-French/PA/Files/FR_Biofuel_Algae_brochure.pdf > (consulté le 12 septembre 2011)
- [41] SYLVAIN F. « Les biocarburants de troisième génération - Techniques de l'Ingénieur ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < http://www.techniques-ingenieur.fr/ezproxy.unilim.fr/actualite/environnement-securite-energie-thematique_191/les-biocarburants-de-troisieme-generation-article_6323/ > (consulté le 12 septembre 2011)
- [42] IFREMER. « Guide d'information Complexe des toxines lipophiles : diarrhéiques (DSP) et associées ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < http://envlit.ifremer.fr/content/download/27373/222270/version/1/file/guide_dsp_2006.pdf > (consulté le 26 septembre 2011)
- [43] CHATEAU-DEGAT M.-L. « Les toxines marines : problèmes de santé en émergence ». *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne]. 1 mai 2003, n°Volume 4 Numéro 1,. Disponible sur : < <http://vertigo.revues.org/4698> > (consulté le 23 septembre 2011)
- [44] MARCAILLOUT-LE BAUT C. « Les toxines des micro-algues marines ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://archimer.ifremer.fr/doc/2006/publication-2323.pdf> > (consulté le 26 septembre 2011)
- [45] « Sangliers morts. Des premiers résultats d'analyses « extrêmement contrastés » - Côtes-d'Armor - Le Télégramme ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://letelegramme.com/ig/generales/regions/cotesarmor/sangliers-morts-des-premiers-resultats-d-analyses-extremement-contrastes-01-08-2011-1387707.php> > (consulté le 1 octobre 2011)

[46] « Caractérisation des concentrations enhydrogène sulfuré et autrescomposés soufrés sur la plage de la baie de Morieux (22) et à l'embouchure du Gouessant ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.ineris.fr/centredoc/drc-11-123950-09063a-intervention-morieux-2011-metrologie-ers.pdf> > (consulté le 30 septembre 2011)

[47] « Le Télégramme - Finistère - Mort des sangliers. Un deuxième rapport pointe les algues vertes ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://letelegramme.info/ig/generales/regions/finistere/mort-des-sangliers-un-deuxieme-rapport-pointe-les-algues-vertes-08-09-2011-1422330.php> > (consulté le 30 septembre 2011)

[48] « Sangliers morts. L'Ineris confirme de forts taux de gaz dans l'air - Côtes-d'Armor - Le Télégramme ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.letelegramme.com/ig/generales/regions/cotesarmor/sangliers-morts-l-ineris-confirme-de-forts-taux-de-gaz-dans-l-air-07-09-2011-1420882.php> > (consulté le 1 octobre 2011)

[49] « Bretagne. Algues vertes : la plus faible prolifération depuis 2002 - Bretagne - Le Télégramme ». [s.l.] : [s.n.], [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.letelegramme.com/ig/generales/regions/bretagne/bretagne-algues-vertes-la-plus-faible-proliferation-depuis-2002-22-09-2011-1439491.php> > (consulté le 30 septembre 2011)

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	5
SOMMAIRE	6
INTRODUCTION	9
GENERALITE SUR LES ALGUES	10
1. NOTION FONDAMENTALE SUR LES ALGUES.....	10
1.1 Qu'est ce qu'une algue ?	10
1.2 Où se rencontrent-elles ?.....	10
1.3 Structure des algues	11
1.3.1 Les macroalgues.....	11
1.3.2 Les microalgues.....	11
1.4 Conditions de vie des algues	12
1.4.1 La lumière	12
1.4.2 Fixée ou libre	14
2. THEORIE DE L'ENDOSYMBIOSE OU NATURE COMPOSITE DES ALGUES ET FORMATIONS DES GRANDES GROUPES.....	15
2.1 L'endosymbiose	16
2.1.1 L'endosymbiose primaire	16
2.1.2 L'endosymbiose secondaire.....	17
2.2 L'origine des végétaux	18
2.2.1 L'origine des « Algues » Bleues.....	18
2.2.2 L'origine des Algues Rouges	20
2.2.3 L'origine des Algues Vertes	21
2.2.4 L'origine des Algues Brunnes	23
2.2.5 L'origine des Dinobiontes.....	25
3. LA REPRODUCTION.....	26
3.1 La reproduction des Cyanobactéries	26
3.2 La reproduction des Algues Rouges	26
3.3 La reproduction des Algues Vertes	28
3.4 La reproduction des Algues Brunnes	29
4. NOMENCLATURE ET CLASSIFICATION :	32

COMPOSITION DES ALGUES	37
1. L'EAU.....	37
2. LES SUCRES : LES PHYCOCOLLOÏDES	37
2.1 L'acide alginique	38
2.2 Agars	40
2.3 Carraghénanes	42
2.4 Les polysaccharides sulfatés	46
2.4.1 Les fucoïdanes ou fucanes	46
2.4.2 Les ulvanes.....	47
3. LES MINERAUX	48
4. LES PROTEINES	50
5. LES VITAMINES	51
6. LES LIPIDES.....	52
7. LES PIGMENTS.....	54
LES APPLICATIONS DES ALGUES ET LEURS DEVELOPPEMENTS FUTURS	59
1. LES ALGUES ALIMENTAIRES.....	59
1.1 Leurs utilisations en Europe.....	59
1.2 Leurs utilisations en Extrême-Orient.....	62
2. LES APPLICATIONS DE L'ACIDE ALGINIQUE (CODE E400).....	64
2.1 Les applications de l'alginate dans l'industrie textile	64
2.2 Les applications des alginates dans l'industrie agroalimentaire	65
2.3 Les applications des alginates dans le domaine médical (médecine-pharmacie)	67
2.3.1 L'utilisation pour les empreintes dentaires	67
2.3.2 Dans les couches culottes	67
2.3.3 En pharmacie.....	67
2.3.3.1 Excipient de médicaments	67
2.3.3.2 Les pansements et compresses.....	67
2.3.3.3 Médicament contre reflux gastro-œsophagien (RGO)	70
2.4 L'utilisation des alginates pour les électrodes de soudure	71
2.5 L'utilisation dans l'industrie papetière	71
2.6 Les emplois divers des alginates	71
2.6.1 Traitement des eaux usées.....	71
2.6.2 Atout contre le feu.....	71
2.6.3 Stabilisateur des bordures d'autoroutes.....	72
2.6.4 Autres emplois divers.....	72

3.	LES APPLICATIONS DES AGARS (CODE E406)	73
3.1	Utilisation dans l'industrie agroalimentaire	73
3.2	Utilisation en bactériologie	74
3.3	Utilisation en pharmacie	74
3.4	Utilisation pour l'agriculture	74
3.5	Autres applications des agars	74
4.	LES APPLICATIONS DES CARRAGHENANES (CODE E407)	75
4.1	Les utilisations dans l'industrie agroalimentaire	76
4.1.1	Produits lactés	76
4.1.2	Les gels à l'eau et les boissons	77
4.1.3	Produits carnés et les produits structurés	77
4.1.4	Produits diététiques	78
4.2	Les utilisations en pharmacie et en cosmétologie	78
4.2.1	Traitements des ulcères gastriques	78
4.2.2	Dentifrices	79
4.2.3	Gels désodorisants	79
4.2.4	Activités biologiques	79
4.2.5	Produits de beauté	79
4.3	Divers	79
5.	COSMETOLOGIE	80
6.	SANTE ET PHARMACEUTIQUE	82
6.1	Les utilisations historiques et actuelles	82
6.1.1	Des microalgues	82
6.1.2	Des macroalgues	84
6.2	Perspectives futures et recherches	88
6.2.1	Propriétés antivirales	88
6.2.2	Propriétés anticoagulantes	90
6.2.3	Propriétés anticancéreuses	91
6.2.4	Propriétés immunomodulatrices	92
6.2.5	Et si le traitement antipaludique se trouvait dans les algues ?	93
6.2.6	Action sur les infections nosocomiales	95
7.	AGRICULTURE	96
7.1	Les engrais	96
7.2	Traitement phytosanitaire	96
8.	LES FUTURES APPLICATIONS	97
8.1	La batterie aux algues	97
8.2	Le biocarburant	98

LA TOXICITE ALGALE	100
1. FACTEURS QUI FAVORISENT LES ALGUES TOXIQUES.....	102
2. POURQUOI LES ALGUES PRODUISENT DES TOXINES ?	102
3. LES EFFETS DES TOXINES SUR L'HOMME.....	103
3.1 L'acide okadaïque.....	104
3.2 Les saxitoxines	105
3.3 L'acide domoïque.....	105
3.4 Les brévéttoxines (NSP : Neurotoxic Shellfish Poisonning)	106
3.5 La ciguatoxine (CFP ou Ciguatera Fish Poisonning)	107
4. LES MOYENS DE LUTTE	108
5. LES RAISONS DE CES EFFLORESCENCES.....	109
6. LES « MAREES VERTES »	110
6.1 Facteurs favorisant la pullulation des algues	110
6.2 Le phénomène des « marées vertes ».....	111
6.3 Revalorisation des algues vertes	114
CONCLUSION	116
BIBLIOGRAPHIE	117
TABLE DES MATIERES	122
TABLE DES ILLUSTRATIONS	126
TABLE DES TABLEAUX	128

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1 : La zonation	12
Illustration 2 : Endosymbiose primaire : formation d'une cellule eucaryote hétérotrophe	16
Illustration 3 : Endosymbiose primaire : formation d'une cellule eucaryote autotrophe	17
Illustration 4 : Schéma de l'endosymbiose secondaire	17
Illustration 5 : Schéma de quelques unités dites initiales, présentes dans le bouillon bactérien (inspiré du schéma de l'Ifremer [6]).....	18
Illustration 6 : Schéma montrant l'origine des Végétaux Bleus (inspiré du schéma de l'Ifremer [6])	19
Illustration 7 : Schéma montrant l'origine des Végétaux Rouges (inspiré du schéma de l'Ifremer [6]).	21
Illustration 8 : Schéma montrant l'origine des Végétaux Verts (inspiré du schéma de l'Ifremer [6])	23
Illustration 9 : Schéma montrant l'origine des Végétaux Bruns (inspiré du schéma de l'Ifremer [6])	24
Illustration 10 : Schéma montrant l'origine des Végétaux Roux (inspiré du schéma de l'Ifremer [6])	25
Illustration 11 : Cycle de reproduction d'une Rhodophyta (Polysiphonia) [5].....	27
Illustration 12 : Cycle de reproduction d'une Chlorophyta (Ulva) [5]	28
Illustration 13 : Cycle de reproduction des Laminaria [5]	30
Illustration 14 : Cycle de reproduction de Fucus [5].....	31
Illustration 15 : Structure de l'acide alginique.....	38
Illustration 16 : Structure de l'agar	41
Illustration 17 : Structure moléculaire des agars	42
Illustration 18 : Motif diosidique de base des carraghénanes	43
Illustration 19 : Structure du lambda (λ) carraghénane	43
Illustration 20 : Structure du Kappa carraghénane (κ)	44
Illustration 21 : Structure du Iota carraghénane (ι).....	44
Illustration 22 : <i>Palmaria palmata</i> sur un stipe	
Illustration 23 : <i>Porphyra</i> sp.	50

Illustration 24 : Ascophyllum nodosum (on peut évaluer l'âge de cette algue en comptant le nombre de vésicules, car il s'en forme une chaque année).....	52
Illustration 25 : Schéma de la biosynthèse de l'acide éicosapentaénoïque	53
Illustration 26 : Structure de la chlorophylle avec R= CH ₃ pour la chlorophylle a et R= CHO pour la chlorophylle b.....	55
Illustration 27 : Structure chimique d'un β-Carotène	56
Illustration 28 : Structure chimique de la lutéine	56
Illustration 29 : Structure chimique de la fucoxanthine.....	56
Illustration 30 : Structure chimique de la phycoérythrine	56
Illustration 31 : Structure chimique de la phycoérythrine.....	57
Illustration 32 : « Feuille » de Porphyra sp.....	62
Illustration 33 : Sargassum	
Illustration 34 : Laminaria hyperborea.....	66
Illustration 35 : Pelvetia canaliculata	81
Illustration 36 : Fucus vesiculosus	87
Illustration 37 : Chondrus crispus.....	87
Illustration 38 : Ascophyllum nodosum.....	88
Illustration 39 : Structures chimiques des principales toxines rencontrées	104

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Suffixes utilisés pour désigner les groupes régis par le code de la nomenclature botanique, selon le rang des algues.....	32
Tableau 2 : Comparaison des caractéristiques des protistes.....	34
Tableau 3 [15].....	48
Tableau 4 : La teneur en iode de quelques algues [15].....	49
Tableau 5 : Pigments caractéristiques des principaux groupes d'algues.....	58
Tableau 6 : Macroalgues autorisées à la vente en France	60
Tableau 7 : Teneurs maximales en iode et métaux lourds autorisées en France .	61
Tableau 8 : Exigence microbiologique pour les produits secs	61

SERMENT DE GALIEN

Je jure en présence de mes Maîtres de la Faculté et de mes condisciples :

- d'honorer ceux qui m'ont instruit dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement ;
- d'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de l'honneur, de la probité et du désintéressement ;
- de ne jamais oublier ma responsabilité, mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine, de respecter le secret professionnel.

En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser les actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères, si j'y manque.

Nom-Prénom : FALLER Hortense

Titre de la thèse : Les applications et la toxicité des algues marines

Résumé de la thèse :

De leur apparition sur la 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 leur qualité nutritive et leur richesse en polysaccharide qui aboutissent à de nombreuses applications. L'extraordinaire diversité de ces algues conduit à de nombreuses recherches pour des découvertes prometteuses en médecine, en bioénergie...

Cependant, ces algues peuvent dans certains cas s'avérer toxiques (essentiellement les microalgues) ou envahissantes (les macroalgues).

Mots clés: algues, alginates, agars, carraghénanes, toxines, cyanobactéries,
marées vertes

Title: Applications and toxicity of marine algae

Summary:

Since their apparition on Earth, algae have always been an important source of life. By liberating oxygen and ozone, they have enabled other species development. Algae are well-established in Asian culture, where they are traditionally exploited. Nowadays, they are more and more used for their nutritional value and their high polysaccharide content, opening a wide range of applications. The extraordinary diversity of algae has led to research in multiple domains e.g. in medicine and in bioenergy. However, some species of algae can turn to be toxic (mostly microalgae) or invasive (macroalgae).
