

République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Abdelhamid Ibn
Badis-Mostaganem
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie



جامعة عبد الحميد بن باديس
مستغانم
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MER ET DE L' AQUACULTURE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

Henni Fatima

Pour l' obtention du diplôme de

Master en Hydrobiologie marine et continentale

SPÉCIALITÉ : RESSOURCE HALIEUTIQUE

THÈME

***Synthèse bibliographique sur la valorisation des
algues rouges « méthodes de fabrication d'Agar-
agar »***

DEVANT LE JURY

Président :	Mme BELHAKEM. F	MCA	U. Mostaganem
Encadreur :	Mme BORSALI. S	MCA	U. Mostaganem
Examinatrice :	Mme TERBECH. M	MCB	U. Mostaganem

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

J'exprime mes remerciements à *Allah* Tout-Puissant, qui m'a permis d'atteindre ce que je suis maintenant et je présente mes sincères et vifs remerciements à mes parents.

Avant d'exposer les résultats de ce travail, je tiens à remercier mon encadreur madame *Borsali sofia* pour tous ses efforts fournis et sa disponibilité, toujours soutenue, conseillée et guidée.

Je remercie également madame *Belhakem. F* qui a accepté présider ce jury et madame *Terbech. M*, d'avoir accepté examiner ce travail.

Je n'oublie pas à remercier aussi tout le personnel du département de biologie de l'université d'**Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem**

Ainsi que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

Merci pour votre soutien.

Je dédie ce mémoire, À tous ceux et toutes celles qui m'ont accompagné et soutenu durant mon cursus.

Résumé

Les algues sont présentes dans les eaux côtières tout autour du globe. Elles peuvent être marines ou dulcicoles mais la majorité d'entre elles sont marines. Il est indispensable de signaler aussi que les espèces dulcicoles sont exclusivement des algues vertes. On distingue trois grandes catégories à savoir les Phéophycées (algues brunes), les Rhodophycées (algues rouges) et les Chlorophycées (algues vertes). Elles contiennent des polysaccharides au niveau de leur paroi : les agars et carraghénanes extraites des Rhodophycées, les alginates et fucanes des Phéophycées et les ulvanes des algues vertes, etc...

Les plus utilisés sont l'agar (E406), la carraghénane (E407) et les alginates (E400-405) reconnus comme des additifs alimentaires dans la catégorie des agents de texture. Ces polysaccharides ont des propriétés gélifiante, stabilisante et épaississante, d'où leur application dans différentes industries telles que l'agroalimentaire. Ils jouent un rôle très important dans la fabrication des desserts lactés, des confiseries gélifiées mais aussi comme agent d'enrobage des viandes et poissons, etc...

En pharmacie, les polysaccharides sont utilisés comme des excipients dans la conception de certains médicaments, voire même comme principe actif (dans les sirops qui soulagent les reflux-gastro-intestinaux).

De même, on les utilise dans le textile et d'autres industries. Mis à part l'application industrielle, les macro-algues sont utilisées dans l'alimentation humaine (surtout dans les pays asiatiques), du bétail mais aussi dans l'agriculture comme fertilisant. Ainsi au niveau mondial, la culture des algues est en forte croissance.

Mots clés : Algues rouges, phycocolloïdes, polysaccharide

Abstract

Algae are found in coastal waters all around the globe. They can be marine or freshwater, but the majority of them are marine. It is also important to note that freshwater species are exclusively green algae. There are three main categories: Pheophyceae (brown algae), Rhodophyceae (red algae) and chlorophyceae (green algae). The latter contain polysaccharides present at the level of the wall. The agars and carrageenans extracted from the Rhodophyceae, the alginates and fucans of the Pheophyceae and the ulvanes of the green algae etc... Most commonly used are agar (E406), carrageenan (E407) and alginates (E400-405), which are recognized as food additives in the texture agent category. These polysaccharides have gelling, stabilizing and thickening properties, hence their application in various industries such as agro-food. They play a very important role in the manufacture of dairy desserts, gelled confectionery but also as a coating agent for meat and fish... In pharmacies, polysaccharides are used as excipients in the design of certain drugs and sometimes even as an active ingredient (in syrups that relieve gastrointestinal reflux) They are also used in textiles and other industries. Apart from the industrial application, macro-algae are also used in human food (especially in Asian countries), livestock but also in agriculture as fertilizer. Thus, at the global level, algae cultivation is growing rapidly.

Key words: phycocolloids, polysaccharides Red algae.

ملخص

الطحالب موجودة في المياه الساحلية حول العالم. ويمكن ان تكون البحرية او المياه العذبة ولكن الغالبية

منهم البحري ومن الضروري ان نذكر ايضا انواع المياه العذبة هي حصرا الطحالب الخضراء. هناك ثلاث فئات رئيسية وهي
phaophyceae (الطحالب البني)، و رودوفيتا (الطحالب الحمراء) و chlorophyceae (الطحالب الخضراء)، هذه تحتوي
السكريات الموجودة في الجدار agars والكاراجينان المستخرجة من Rhodophyceae, و املاح الجينية fucan من
Phaeophyceae و ulvans الطحالب الخضراء الخ....

الاكثر استخداما هي اجار (E407), الكاراجينان (E407)، و املاح الجينية (E400-405) التعرف على المضافات الغذائية في
وكلاء فئة الملمس.

هذه السكريات لها التبلور, وتحقيق الاستقرار وسماكة و بالتالي تطبيقها في مختلف الصناعات مثل الصناعات الغذائية انها تلعب
دورا هاما جدا في صناعات الحلويات منتجات الالبان والحلويات هلام ولكن ايضا كعامل طلاء على اللحوم والاسماك الخ ...

الصيدلة وتستخدم السكريات كسواغ في تصميم بعض الادوية و احيانا كعنصر نشط (في العصائر التي تخفف الجزر المعدي
المعوي)

ايضا يتم استخدامها في صناعة النسيج وغيرها من الصناعات . وبصرف النظر عن التطبيق الصناعي الكلي الطحالب تستخدم
ايضا في الغذاء (وخاصة في البلدان الاسيوية), وتربية الماشية ولكن ايضا في الزراعة كسماد. وهكذا عالميا , ثقافة الطحالب تنمو
بسرعة.

كلمات البحث: الطحالب, Phycocolloids, السكريات.

Liste des abréviations

DIL Danisco Ingrédients Landerneau

FAO Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

MCI Marine colloïdes

SBI Système Bio Industrie

Liste des figures

Figure 01	Structures de la catéchine, de l'épicatéchine et d'une procyanidine dimérique.	13
Figure 02	Acide gallique, acide ellagique et structures des gallotannins et des ellagitannins.	14
Figure 03	Structure du phloroglucinol (i) et des phlorotannins [tetrafucol A (ii), tetraphlorethol B (iii), fucodiphlorethol A (iv), tetrafuhalol A (v), tetraisofuhalol (vi), phlorofucofuroeckol (vii)].	15
Figure 04	Ce cycle est dit trigénétique ; il est typique des algues rouges et ne se retrouve dans aucun autre groupe végétal.	26
Figure 05	Thales de <i>Gracilaria bursa-pastoris</i> .	28
Figure 06	<i>Gracilaria bursa-pastoris</i> (François Sichel, 26.08.2019 à La Conchée (Chausey)).	29
Figure 07	<i>Gracilaria dura</i> (<i>Gracilaria dura</i> (C.Agardh) J.Agardh (Image Ref. 30123) habit, Ría de Arousa, Galicia, Spain, 2015 - 01 Jan 0001).	30
Figure 08	<i>Gracilaria dura</i> (DORIS, 13/11/2020).	31
Figure 09	Le thalle de <i>Gracilaria gracilis</i> (Keurbooms Estuary (BOL)).	32
Figure 10	<i>Gracilaria gracilis</i> (Saldanha Bay).	33
Figure 11	<i>Grateloupia filicina</i> (Chyandour, Penzance, Cornwall. 19.02.11).	34
Figure 12	<i>Grateloupia filicina</i> (Wulfen C.Agardh 13/03/2018).	34
Figure 13	Evolution de la production mondiale d'algues Source : FAO statistics, 2014.	35
Figure 14	Structure moléculaire des agars. Les agars sont des polymères du galactose (glucide à 6 carbones) qui se présente sous la forme de galactose simple, de galactose-sulfate, de méthyl-galactose ou de 3-6 anhydrogalactose.	37
Figure 15	Mise en évidence de l'existence de plusieurs types d'agars.	38
Figure 16	Séchage sur fils des <i>Gracilaria gracilis</i> récoltés au Chili après culture.	41
Figure 17	Ramassage de nuit des thalles de <i>Gelidium sesquipedale</i> après les tempêtes d'hiver sur les côtes du pays Basque.	41
Figure 18	Origine des principaux agarophytes utilisés pour l'extraction des agars.	42
Figure 19	Mécanismes de la gélification des agars.	44
Figure 20	Structure de l'agarobiose (Chen et al.2004).	45
Figure 21	Structure de l'agarose (Kohajdová & Karovičová ; 2009).	45
Figure 22	Variation de la force du gel d'agars en fonction des ingrédients qui y sont incorporés avant la gélification (CAIRNS-SMITH (A)).	48
Figure 23	Les principales applications de l'agar (peréz, 2009).	52
Figure 24	l'agar-agar en poudre.	53
Figure 25	Schéma du processus de production industrielle d'agar agar.	62
Figure 26	Procédé d'extraction industrielle des carraghénanes.	63
Figure 27	Extraction industrielle de l'Agar.	65

Figure 28	Extraction des agars des Gélidiales (<i>Gelidium</i> , <i>Pterocladia</i> , <i>Gelidiella</i>).	68
Figure 29	Extraction artisanale des agars de <i>Gracilaria verrucosa</i> en Chine. (G.C. Jr.), 1987.	70
Figure 30	Extraction artisanale des agars de <i>Gracilaria verrucosa</i> en Chine.	70
Figure 31	Extraction artisanale des agars de <i>Gracilaria verrucosa</i> en Chine : séchage des gels d'agars.	71
Figure 32	Évolution chimique expliquant les effets de l'extraction alcaline appliquée généralement à <i>Gracilaria</i> et à d'autres agarophytes.	72
Figure 33	Croissance pondérale de <i>GRACILARIA VERRUCOSA</i> dans différentes conditions de température, d'éclairement et de photopériode.	83
Figure 34	Evolution schématique de la matière fraîche, de la matière sèche et de l'agar de <i>gracilaria verrucosa</i> dans différentes configurations de culture.	87
Figure35	Evolution de poids frais, de la matière sèche et de l'agar-agar de <i>GRACILARIA VERRUCOSA</i> sur un cycle annuel.	90

Liste des tableaux

Tableau 01 :	Production mondiale de macro-algues marines.	16
Tableau 02 :	macro-algues consommées en France.	17
Tableau 03 :	Classification de la division des Rhodophyta, d'après Van Den Hoek et <i>al.</i> 1996.	24
Tableau 04 :	informations nutritionnelles de l'agar agar (source : table Ciqual des aliments)	39
Tableau 05 :	Teneurs en agars de quelques agarophytes,	42
Tableau 06 :	Source et forme de l'agar (Bixler & Porse, 2010).	47
Tableau 07 :	Classification commerciale des agars selon leur force de gel (Perèz, 2009).	49
Tableau 08 :	Production et consommation des agars dans le monde en 1994.	51
Tableau 09 :	variation des rendements en agar extrait de parois isolées, en fonction des conditions de culture.	78
Tableau 10 :	Conditions expérimentales à l'étude de l'influence de l'énergie lumineuse et de la Photopériode.	81
Tableau 11 :	variations de la biomasse de la matière sèche des rendements en agar et la qualité biochimique de celui-ci en fonction de la température et de culture de <i>GRACILARIA VERRUCOSA</i> .	82
Tableau 12 :	Variations de la biomasse, de la matière sèche et des rendements en agar en fonction des conditions de culture.	83
Tableau 13 :	Variations des rendements en agar et de la qualité biochimique de celui-ci en fonction des conditions de culture de <i>Gracilaria verrucosa</i> .	85
Tableau 14 :	Variations en valeur absolue de la matière sèche et de l'agar en fonction des conditions de culture de <i>Gracilaria verrucosa</i> .	86

Résumé	
Listé des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

Sommaire

Introduction	01
--------------	----

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique sur les algues rouges

I. 1. Généralité sur les algues	03
2. Les macroalgues	03
3. Caractéristique générale sur les algues	04
3.1 La forme des algues	04
3.2 Écologie des algues	05
3.3 Reproduction des algues	06
3.4 Les cycles de développement des algues	07
3.5 Mode de nutrition des algues	08
4. Caractéristiques nutritionnelles des macroalgues	08
4.1. Composition chimique	08
4.1.1. La fraction minérale	09
4.1.2. Les polysaccharides	09
4.1.3. Les protéines	10
4.1.4. Les lipides	10
4.1.5. Les vitamines	11
4.1.6. Les caroténoïdes	12
4.1.7. Les polyphénols	12
4.1.7.1. Les tanins	12
A. Les tanins condensés	13
B. Les tannins hydrolysables	13
C. Les phlorotannins	14
5. Rôle économique des algues	15
5.1. Utilisations en alimentation	16
5.2. Utilisation en agriculture	17
5.3. Utilisations médicale, paramédicale et pharmaceutique	17

5.4.	Matières premières pour l'extraction de produits gélifiants	18
II.	Les Rhodophytes	19
1.	Généralité sur les algues rouges	19
2.	Caractères généraux	19
3.	Habitat et diversité morphologique	20
3.1	Habitat	20
3.2	Variation morphologique	21
4.	Cytologie	21
5.	Les génomes et les classes d'algue rouge	22
5.1	Les Cyanidiophyceae	22
5.2	Les Bangiophyceae	22
5.3	Les Florideophyceae	23
5.4	Les Porphyridiophyceae	23
6.	Reproduction et mode de croissance	25
6.1	Mode de croissance	25
6.2	Reproduction	25
7.	Présentation de quelques espèces de la famille des Gracilareaceae	27
7.1	<i>Gracilaria bursa-pastoris</i> (S.G. Gmelin) P.C. Silva, 1952	27
7.2	<i>Gracilaria dura</i> (C. Agardh) J. Agardh, 1842	29
7.3	<i>Gracilaria gracilis</i> (Stackhouse) M. Steentoft, L.M. Irvine & W.F. Farnham, 1995 (anciennement <i>Gracilaria verrucosa</i> (Hudson) Papenfuss, 1950	31
7.4	<i>Grateloupia filicina</i> ((J.V. Lamouroux) C. Agardh, 1822)	33
8.	Production mondiale de la production d'algues	35

Chapitre II : Synthèse bibliographique sur la valorisation de l'Agar-agar

1.	Généralité sur l'agar-agar	36
1.1.	Définition	36
1.2.	La composition chimique	36
1.3.	Informations nutritionnelles	39
1.4.	Emploi et préparation avec l'agar	39
A :	Préparation	40
B :	Les Rhodophycées Agarophytes	40
1.5.	Localisation cellulaire et composition chimique	43
1.6.	Le mécanisme de gélification	43

1.7.	Les types d'agars	45
1.7.1.	Les types « agarose »	45
1.7.2.	Les types « agarose chargé »	45
1.7.3.	Les types « galactanes »	46
1.8.	La description de l'agar	46
1.9.	Les propriétés des agars	47
1.10.	L'évolution du marché	49
1.11.	Les consommateurs	50
2.	Application de l'agar	52
A.	Industrie agro-alimentaire	53
B.	La confiserie	53
C.	Desserts laitiers	54
D.	Boisson	54
E.	Pâtisserie	54
F.	Application en bactériologie	55
G.	Applications en biotechnologie	55
H.	Applications en pharmacologie	56
I.	Application en l'agriculture	56
J.	En médecine	56
K.	En cosmétologie	57
L.	L'immunologie	58
M.	La biochimie	58
N.	Les autres utilisations	58
3.	Production et extraction de l'agar-agar	60
3.1.	Définition	60
3.2.	Production de l'agar agar à partir de l'algue rouge	60
3.3.	Extraction de l'agar-agar	63
3.3.1.	Prétraitements	63
3.3.2.	Extraction et filtration	64
3.3.3.	Concentration par méthode de congélation-décongélation	64
3.3.4.	Concentration par méthode de synérèse	65
3.4.	L'extraction classique	66
3.5.	L'extraction alcaline	72
3.6.	Dosages des sucres	72
3.7.	Dosage des phycoérythrine	73

3.8.	Dosage de l'azote	73
3.9.	Dosages des protéines	74
3.10.	Contrôle en microscopie électronique	75
3.11.	Exemple de l'extraction	75
3.11.1.	L'extraction de l'agar-agar de parois isolées en fonction des Conditions de culture, exemple de <i>GRACILARI VERRUCOSA</i>	75
3.11.2.	Influences de la température et de la lumière sur la production et la qualité de l'agar-agar de <i>GRACILARIA VERRUCOSA</i>	79
3.11.3.	Conclusion générale	88
3.12.	Les sociétés d'extraction	91
4.	Valorisation de l'agar-agar	91
4.1.	Valorisation des algues rouge	91
4.2.	Valorisation pour produire des biocarburants	92
	Conclusion générale	93
	Bibliographie	95

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'environnement marin est un écosystème rendu unique en raison de la diversité des organismes qu'il abrite. Parmi ses organismes, les algues font preuve d'une incroyable richesse. De nouvelles espèces sont identifiées perpétuellement et des projections estimaient que les 36 000 espèces répertoriées ne représentaient en fait que 17% des 200 000 espèces supposées existantes (Radmer, 1994).

Les algues marines sont utilisées dans le monde depuis des millénaires par les populations littorales pour leurs hautes valeurs nutritives. En effet, elles ont des potentialités nutritionnelles très riches. Ceci se justifie par: la présence d'une fraction minérale variée et abondante, qui constitue un apport important de macroéléments et oligoéléments, des protéines en quantités non négligeables, en général bien équilibrées en acides aminés, un contenu vitaminique varié où la plupart des vitamines sont représentées, une fraction lipidique faible mais, cependant, dans certaines espèces riche en acides gras polyinsaturés et un contenu en fibres ayant des structures variées et originales différentes des fibres des végétaux terrestres.

Les algues constituent aujourd'hui un enjeu majeur de développement économique. Les principales substances extraites sont les polysaccharides de la famille des agars, des carraghénanes et des alginates dont les propriétés physicochimiques, gélifiantes ou stabilisantes intéressent de nombreux secteurs industriels. Les domaines agroalimentaires, cosmétiques, pharmaceutiques ou textiles en ont valorisé près de 8 millions de tonnes en (2003).

Depuis plusieurs années un regard particulier est porté sur la recherche de nouvelles substances d'intérêts biotechnologiques. Ainsi, sur le marché pharmaceutique et cosmétique, 30% des substances actives ont été développées à partir de substances naturelles dont 10 % ont été isolées à partir d'organismes marins.

L'un des groupes les plus importants est celui des algues rouges dont la phase matricielle de la paroi de plusieurs espèces est constituée de polysaccharides (Craigie, 1990). Ces polysaccharides forment une famille très complexe dont les représentants les mieux connus sont les agars et les carraghénanes. Ils trouvent de nombreuses applications comme agents texturants, filmogènes ou émulsifiants dans de nombreux domaines de l'industrie agro- alimentaire (Abbott, 1996 ; Perez, 1997) ou pharmaceutique (Carlucci, 1997 ; Viana, 2002).

L'extraction des phycocolloïdes (alginates, agar-agar, carraghénanes) constitue un important créneau pour l'exploitation des algues marines à l'échelle mondiale. Parmi les algues agarophytes les plus recherchées commercialement, figurent *Gelidium*, *Pterocladia*, *Gracilaria* (Sousa-Pinto et al. 1999) et *Gracilariopsis* (Lyer et al, 2005). Ces espèces constituent les principaux macrophytes exploités pour la production d'agar et appartiennent à l'ordre des Gélidiales et des Gracilariales (Indergaard, 1983). Les algues appartenant au genre *Gelidium* constituent la principale matière première pour la préparation de la gélose ou agar- agar de la production mondiale après les gracilaires (Marinho-Soriano & Bourret, 2003). Tenant compte des caractéristiques de ces ressources marines, il serait judicieux de structurer leur exploitation et de développer leur aquaculture. Cependant, Il a été démontré que chez les espèces algales, la croissance et le développement sont saisonniers (Wang et al. 1984; El Bacha et al. 2004a) et tributaires, principalement des facteurs physico-chimiques tels que, la lumière, la température, le pH et l'enrichissement du milieu en sels nutritifs et en carbonates (Yakovleva et al. 2001; Givernaud et al. 2003 ; Quartino et al, 2005; Mouradi et al. 2006).

La présentation de ce travail est organisée en deux grand axes ou chapitres :

Le premier présente des généralités sur les algues marines, leurs caractéristiques (la forme, l'écologie, la reproduction et la nutrition des algues), puis on s'est plus approfondie sur les algues rouges (Rhodophytes) et leurs applications.

Le second axe à pour objet une synthèse bibliographique sur la valorisation de l'agar-agar, on s'est appliqué sur la présentation de l'agar, sa composition chimique, et les différentes méthodes de son extraction.

Enfin, notre étude s'est clôturée par une conclusion générale, nous tentons de mettre en avant les points importants apportés par ce travail, ainsi que de futures perspectives.

CHAPITRE I
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR
LES ALGUES ROUGES

I. 1. Généralité sur les algues :

Le terme algues est pratique à utiliser dans le langage courant, même s'il a perdu toute signification claire dans la nouvelle classification phylogénétique du vivant !

On pourrait définir les algues comme des organismes végétaux, capables de faire la photosynthèse grâce aux chlorophylles, mais qui n'ont pas acquis la reproduction évoluée des végétaux supérieurs (Embryophytes ou Archégoniates : mousses, fougères, conifères, Angiospermes). Cette définition reste vague et ne permet pas de montrer qu'en fait il y a plus de distances génétiques entre les divers groupes d'algues qu'entre les champignons supérieurs et les animaux pluricellulaires ! On ne peut même pas utiliser leurs milieux de vie dans cette définition. En effet, si la majeure partie vit dans les milieux aquatiques, il existe des algues aériennes et d'autres formant une symbiose avec des champignons pour donner les lichens.

Les algues se distinguent des autres végétaux par leur thalle et appareil végétatif uni- ou pluricellulaire, dépourvus de racines, de tiges et de feuilles. Or, les cellules des algues possèdent les mêmes éléments de structure que celles des plantes supérieures (Garon- Lardiere, 2004).

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

C'est ainsi, suivant la pigmentation, On distingue quatre grands groupes : les algues rouges (Rhodophytes), les algues brunes (Phéophytes), les algues vertes (Chlorophytes) et les algues bleues (Cyanobactéries).

On trouve les algues marines de la surface jusqu'à 268 m de profondeur ! Elles ont de nombreux rôles très importants d'un point de vue écologique, mais également pour l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et cosmétique. Certaines ont aussi une valeur culturelle ! Près de 450 espèces ont été recensées à ce jour en Nouvelle-Calédonie.

2. Les macroalgues

Exploitées traditionnellement, notamment dans le Finistère, et immense source de biodiversité, les macro-algues sont utilisées localement en Bretagne depuis le XIV^e siècle pour l'amendement agricole. Le plus grand gisement d'algues d'Europe se situe à Molène. Parmi les milliers d'espèces, seules quelques dizaines sont exploitées, mais la production est dominée par l'exploitation de deux laminaires (*Laminaria digitata*, la plus importante en volume, et

Laminaria hyperborea). Les navires goémoniers de la région débarquent leur production essentiellement à Lanildut, mais aussi à Plouguerneau et à Roscoff.

Ressource naturelle non inépuisable mais dont la grande diversité laisse entrevoir des possibilités de diversification, notamment en algoculture, secteur qui reste à développer, et qui peut être valorisé dans des bassins à terre.

La production en algoculture reste faible. Elle est estimée à 50 tonnes. (Source : Observatoire national de la mer et du littoral)

3. Caractéristique générale sur les algues

Les rhodophytes ou algues rouges forment un groupe très diversifié. Ces algues doivent leur couleur à la présence de plastes roses dans lesquels un pigment rouge, la phycoérythrine, est associé à plusieurs autres pigments dont les chlorophylles. La plupart de ces algues rouges sont pluricellulaires et marines, mais il existe quelques formes unicellulaires et quelques-unes vivent également en eau douce. Les algues rouges sont divisées en deux groupes: celui des Bangiophycées (qualifiées de primitives) et celui des Floridéophycées (plus complexes). Elles se distinguent généralement par leur cycle de reproduction particulièrement complexe (GaronLardiere, 2004).

On compte environ 3700 espèces de rhodophycophytes, presque tous marines. La plupart d'entre elles vivent fixées aux rochers, aux coquilles, assez souvent dans les endroits sombres, ou en profondeur. La présence de phycobiline permet l'enrichissement du milieu marin en oxygène.

3.1 La forme des algues :

La plupart des algues les plus simples sont unicellulaires flagellés ou amoeboïdes, mais des formes coloniales et non-mobiles se sont développées indépendamment dans plusieurs de ces groupes. Les niveaux d'organisation les plus courants, dont plusieurs peuvent intervenir dans le cycle de vie d'une espèce, sont les suivants :

- ✓ *Coccoïde* : des cellules individuelles non-mobiles avec des parois cellulaires.
- ✓ *Palmelloïde* : des cellules non-mobiles incluses dans le mucilage.
- ✓ *Colonial* : petit groupe ordinaire de cellules mobiles.
- ✓ *Capsoïde* : cellules non mobiles incluses dans un mucilage.
- ✓ *Filamenteux* : une kyrielle de cellules non-mobiles connectées ensemble, quelquefois ramifiées.

- ✓ *Membraneux* : des cellules formant un thalle avec une différenciation partielle des tissus.

Des niveaux plus élevés d'organisation ont même été atteints, menant à des organismes avec des différenciations complètes des tissus. Ce sont les algues brunes qui peuvent atteindre 70 m de long (varech) ; les algues rouges et les algues vertes.

Les formes les plus complexes se trouvent chez les algues vertes (voir Charales), dans une lignée qui a conduit aux plantes supérieures. Le point où ces dernières commencent et où les algues s'arrêtent est marqué habituellement par la présence d'organes reproductifs munis de couches de cellules protectrices, une caractéristique qu'on ne trouve pas dans les autres groupes d'algues.

3.2 Écologie des algues :

Les répartitions horizontale (biogéographie) et verticale (étagement) des espèces sont conditionnées par des facteurs historiques responsables de "l'introduction des espèces" et par des facteurs écologiques (température, éclaircissement, mouvement des eaux et marées, qualité du substrat, etc.) caractéristiques de chaque lieu.

Les algues constituent, avec les bactéries et le zooplancton, une part essentielle importante de l'écologie aquatique et de l'environnement marin notamment. Elles ont adopté des modes de vie très divers, certaines vivant même hors de l'eau. Grâce à des spores résistantes, nombre d'entre elles ont une capacité exceptionnelle de résistance. Le vent, les embruns et les oiseaux migrateurs contribuent à leur dispersion (Schlichting, 1960).

Les algues des côtes rocheuses (Algues autotrophes, Algues flottantes du plancton, Algues unicellulaires, en colonies lâches ou filamenteuses formant le phytoplancton, Algues flottantes de grande taille : les sargasses, algues brunes adaptées à la vie flottante, elles ont donné leur nom à la mer des Sargasses, ou bien algues brunes ou rouges qui forment des boules ou pelotes flottantes appelées aegagropiles, Algues thermophiles, Algues aériennes, Algues fixées), ce sont fixées par des crampons robustes aux rochers ou aux galets jusqu'à une profondeur de 50 à 75 m, mais elles se raréfient très rapidement avec la profondeur au-delà de 30 m, les radiations utiles à la photosynthèse étant absorbées par l'eau de mer. Elles se développent plus sur des côtes en pente douce qui forment des plates-formes littorales étendues. C'est parmi ces algues qu'on trouve les espèces géantes : les laminaires, les *Durvillea* de Nouvelle-Zélande longue de 10 m, ou les *Nereocystis* de la côte Ouest de l'Amérique du Nord dont les frondes peuvent atteindre 50 m de long.

Les macroalgues croissent surtout dans les eaux peu profondes et procurent des habitats différents. Les microalgues, qui composent le phytoplancton, sont à la base de la chaîne alimentaire marine. Le phytoplancton peut être présent en forte densité là où les nutriments sont abondants, par exemple dans les zones de remontée d'eau ou eutrophisées. Elles peuvent alors former des efflorescences, et changer la couleur de l'eau.

Les algues offrent des supports à l'épifaune fixée (ascidies, vers polychètes), abritent un macrofaune vagile (crabes, oursins) et une microfaune importante servant de nourriture à différents prédateurs (poissons, crustacés) (Raymond Seed & Raymond J. O'Connor).

3.3 Reproduction des algues :

Les Algues peuvent se reproduire par : la reproduction asexuée (végétative) et la reproduction sexuée.

1- Reproduction asexuée :

- Par bipartition (divisions mitotiques) chez les espèces unicellulaires, l'organisme se fend longitudinalement. Quand un individu entre en division.
- Par fragmentation du thalle, Elle a lieu chez les algues pluricellulaires, il s'agit d'une fragmentation du thalle (thalle à $2n$ se divise en fragments et chaque fragment va régénérer un thalle complet).
- Par la sporulation, Elle se fait grâce à des cellules spécialisées, asexuées : les spores directes, formées à l'intérieur d'un sporocyste à la suite d'une ou de plusieurs mitoses survenues dans une cellule-mère. La germination de ces spores ($2n$) donne des individus identiques aux premiers (caractère propre aux Thallophytes).

2- Reproduction sexuée : Selon la taille, la structure et la mobilité des gamètes, on peut distinguer plusieurs types de gamie :

- Isogamie : les 2 gamètes sont mobiles grâce aux flagelles et sont identiques morphologiquement.

- Anisogamie : les 2 gamètes sont de tailles inégales, mais mobiles. Les gamètes mâles sont petits et les gamètes femelles sont volumineux. Ils sont donc morphologiquement différents.

- Oogamie : les gamètes mâles sont petits et mobiles et les gamètes femelles sont volumineux et immobiles.

Planogamie (au moins un des gamètes qui est mobile) : isogamie – anisogamie – oogamie.
Aplanogamie : Lorsque les 2 gamètes sont immobiles et que leur rencontre se fait passivement (grâce à des courants d'eau).

La planogamie et l'aplanogamie sont des formes bien adaptées au milieu aqueux.

3.4 Les cycles de développement des algues :

Chez les algues on distingue trois types de cycles de reproduction, Ces cycles peuvent être envisagés sur le plan morphologique ou sur le plan cytologique.

1/ Sur le plan morphologique:

- i. Cycle monogénétique: Le développement du zygote implique la formation d'un individu appelé gamétophyte, qui une fois arrivé à la maturité sexuelle sera capable de produire des gamètes. Ce cycle s'accomplit grâce à une seule génération (le gamétophyte). Dans ce cas on dit que le cycle est monogénétique.
- ii. Cycle digénétique: Le cycle est dit digénétique quand se succèdent alternativement, un gamétophyte issu d'une méiose et un sporophyte issu d'un œuf. Il y'a donc alternance de deux générations : un gamétophyte (n) et un sporophyte (2n). Si le gamétophyte est semblable morphologiquement au sporophyte on dit qu'il s'agit d'un cycle digénétique isomorphe. Si le gamétophyte est morphologiquement différent du sporophyte on parle de cycle digénétique hétéromorphe.
- iii. Cycle trigénétique: Ces cycles comportent trois générations, un gamétophyte, un sporophyte et un carposporophyte intercalé entre les deux. Le carposporophyte est toujours parasite du gamétophyte femelle, il produit des carpospores qui donnent naissance à une génération morphologiquement identique au gamétophyte, mais au lieu de produire des gamètes, il produira des tétraspores qui redonneront à la suite des spores qui une fois germés donneront les gamétophytes.

2/Sur le plan cytologique:

Dans un cycle la méiose peut avoir lieu à des moments différents par rapport à la gamie (la fécondation), il en résulte trois types de cycles:

1. Diplo-haplophasiques : méiose à lieu vers le milieu du cycle, elle est donc toujours plus ou moins éloignée de la gamie. Donc on va avoir une alternance entre une haplophase et une diplophase.

2. Haplophasiques : La méiose se situe juste après la gamie. Dans ce cas seul le zygote est diploïde. La plante n'est représentée dans ce cas que par le gamétophyte qui est haploïde.
3. Diplophasique : méiose se déroule immédiatement avant la gamie. La plante est diploïde et seules les cellules issues de la méiose sont haploïdes.

3.5 Mode de nutrition des algues :

Les algues sont des organismes photosynthétiques qui réalisent, en présence de lumière, la fabrication ou synthèse des substances organiques nécessaires à leur vie à partir de substances inorganiques prélevées dans le milieu comme l'eau, les sels minéraux et le dioxyde de carbone.

Ces synthèses consomment de l'énergie fournie par la lumière solaire qui est captée par des pigments chlorophylliens portés par des organites, les plastes ou chromatophores.

Les algues sont donc capables de se nourrir, contrairement aux animaux, à partir d'éléments inorganiques, on les dit autotrophes par photosynthèse.

Certaines pourtant sont capables d'utiliser des matières organiques du milieu (on les dit hétérotrophes).

4. Caractéristiques nutritionnelles des macroalgues

4.1. Composition chimique

Les algues ont des potentialités nutritionnelles très riches, ceci se justifie par: la présence d'une fraction minérale variée et abondante qui constitue un apport important de macroéléments et oligoéléments, par la présence de protéines en générale bien équilibrées en acides aminés et présentes en quantités non négligeables dans certaines espèces, par un contenu vitaminique varié où la plupart des vitamines sont représentées, par une fraction lipidique faible mais cependant, dans certaines espèces riche en acides gras polyinsaturés et enfin par leur contenu en fibres ayant des structures variées et originales différentes des fibres des végétaux terrestres.

La composition chimique des macroalgues marines varie suivant plusieurs facteurs : L'espèce, le stade de maturité, l'habitat naturel et les conditions environnementales (Kaimoussi et al, 2004; Ortiz et al. 2006).

4.1.1. La fraction minérale

Les algues puisent dans la mer une richesse incomparable d'éléments minéraux très variés. La teneur en minéraux varie entre 8 et 40% (MacArtain et *al.* 2007; Mabeau and Fleurence, 1993).

Cette fraction minérale offre d'abord une grande diversité: macroéléments comme le sodium, calcium, magnésium, potassium, chlore, soufre, phosphore, mais également oligoéléments tels que l'iode, le fer, le zinc, le cuivre, le sélénium, le molybdène, ainsi que bien d'autres oligoéléments comme le fluor, le manganèse, le bore, le nickel, le cobalt.

Selon certains auteurs, les trois phylla d'algues (brunes, vertes, rouges) sont à peu près équivalente en quantités de matières minérales totales, on peut noter cependant un petit avantage pour les algues brunes et rouges (Marfaig, 2004).

4.1.2. Les polysaccharides

Les algues constituent des sources importantes de polysaccharides de (33 à 61%) ayant des structures variées et originales, différentes des fibres des végétaux terrestres. Du point de vue nutritionnel, la majorité des polysaccharides algaux sont représentés par des polysaccharides non digestibles, excepté pour l'amidon chez les algues vertes et le floridoside chez les algues rouges (Marfaing, 2004).

Selon ce même auteur, parmi les polysaccharides insolubles (21 à 40% des polysaccharides totaux), on trouve une fraction cellulosique, présente en faible proportion chez les trois phylla ainsi que de l'amidon floridéen, notamment chez les algues rouges.

D'une manière générale, hormis la cellulose, les structures chimiques précises des polysaccharides insolubles restent très mal connues. Plus intéressante, la fraction des polysaccharides solubles représente de (51% à 56%) des polysaccharides totaux chez les algues vertes et rouges, de (67 à 87%) chez les algues brunes. La nature de ces polysaccharides solubles est variable en fonction de phylum considéré:

- Les polysaccharides solubles des algues rouges sont les agars, carraghénanes, xylanes
- Les polysaccharides solubles des algues brunes sont les laminaranes, alginates et fucanes
- Les polysaccharides solubles des algues vertes sont constitués par les ulvanes.

4.1.3. Les protéines

La teneur en protéines des algues marines varie fortement entre les espèces et dépend des saisons et des conditions environnementales (Dawczynski et al. 2007 ; De Oliveira et al. 2009)

Généralement, la fraction protéique des macroalgues brunes est faible (3 à 15% de la matière sèche) comparée à celle des macroalgues vertes et rouges (10-47% de la matière sèche) (Arasaki et Arasaki, 1983 in Fleurence, 1999).

La plupart des macroalgues brunes industriellement exploitées (*Laminaria digitata*, *Ascophylum nodosum*, *Fucus vesiculosus* et *Himanthalia elongata*) ont une teneur en protéines plus faible que 15 % (MS) excepté pour l'espèce *Undaria pinnatifida* (Wakamé) qui possède un niveau protéique variable de (11 à 24%) (MS) (Fleurence, 1999).

Chez certaines macroalgues telles que les espèces appartenant au genre *Ulva*, la teneur en protéines peut représenter de 10 à 26 % de la MS. L'espèce *Ulva pertusa*, qui est fréquemment consommée sous le nom de "aonori" au Japon, possède un niveau protéique élevé entre 20 et 26% (MS) (Fleurence, 1999). L'espèce *Ulva lactuca* présente une teneur en protéines qui varie de 7,7 à 22,2% de MS (Chermiti et al, 2003).

Les teneurs protéiques élevées sont enregistrées chez les macroalgues rouges telles que *Porphyra tenera* (47 % de MS) ou *Palmaria palmata* (35% de MS) (Fleurence, 1999). Ces algues connues sous les noms de nori et dulse respectivement, possèdent une fraction protéique comparable du point de vue quantitatif, à celles des légumineuses (ex, soja) (Fleurence, 1999).

La teneur en protéines des algues marines dépend aussi des périodes saisonnières. Une étude annuelle au niveau protéique de *Palmaria palmata* (Dulse) a montré que sa teneur en protéines peut varier de 9 à 25% de la MS. Les contenus protéiques élevés sont observés durant les périodes de fin d'hiver et de printemps et les faibles quantités sont observées durant les mois d'été (Fleurence, 1999).

4.1.4. Les lipides

La teneur lipidique est très faible et varie de 1 à 3% de la matière sèche. Du point de vue qualitatif, les lipides des algues diffèrent de ceux des végétaux terrestres. Ils présentent une proportion en acides gras essentiels supérieure et les acides gras insaturés sont prédominants (Darcy-vrillon, 1993).

Les algues vertes dont la composition en acides gras est la plus proche de celle des végétaux supérieurs ont par rapport à ceux-ci, une teneur beaucoup plus élevée en acide oléique (C18:1) et en acide alpha-linolénique (α 3-C18:3).

Les algues rouges contiennent des taux élevés d'acides gras polyinsaturés à 20 carbones. L'acide eicosapentaénoïque (EPA) en particulier constitue 50% des acides gras polyinsaturés chez *Porphyra sp.* et *Palmaria palmata* (Marfaig, 2004).

L'étude de la fraction lipidique de l'algue brune *Cystoseira sedoïdes* des cotes algériennes, a montré une multitude d'acides gras de C12 à C20, parmi lesquels se distinguent les acides gras saturés et insaturés (Benchabane, 1989).

4.1.5. Les vitamines

Les travaux concernant les teneurs en vitamines de différentes algues marines sont peu nombreux. Schiewer (1970) a mené une étude sur les proportions vitaminiques de plusieurs algues de la mer baltique, il a démontré des différences non significatives entre les trois groupes d'algues (brunes, vertes et rouges). Cependant, des variations en vitamines chez une même espèce sont très élevées pour trois raisons :

- L'état de développement annuel,
- L'influence du lieu de prélèvement,
- Variations annuelles saisonnières, maxima estival, minima hivernal.

Selon Marfaig (2004), la composition vitaminique des algues est très intéressante, malgré de grandes variations saisonnières.

Les principales vitamines sont:

-Vitamine B12: Les algues contiennent une proportion non négligeable en vitamine B12, contrairement aux plantes terrestres qui en sont complètement dépourvues. Les travaux les plus récents semblent indiquer que la vitamine B12 des algues est bien bio disponible.

-Vitamine C: La vitamine C est présente en quantités importantes dans certaines algues vertes et brunes, à des taux variant entre (500 et 3000mg/Kg sec) alors que les algues rouges ont des teneurs en vitamine C de l'ordre de (100 à 800 mg/Kg sec).

-Vitamine E: Les algues brunes sont plus riches en vitamine E que les algues vertes et rouges. Parmi les algues brunes, les teneurs les plus élevées sont observées chez les Fucales (*Ascophyllum* et *Fucus sp.*) qui contiennent entre (200 et 600 mg de tocopherols/Kg sec)

4.1.6. Les caroténoïdes

Les caroténoïdes sont de puissants antioxydants. Les algues brunes sont particulièrement riches en caroténoïdes et notamment en fucoxanthine, β -carotène et violaxanthine.

Les principaux caroténoïdes des algues rouges sont le β -carotène, α -carotène et leurs dérivés dihydroxylés : zeaxanthine et lutéine. La composition en caroténoïdes des algues vertes reste voisine de celle des plantes supérieures : Les principaux caroténoïdes présents sont le β carotène, la lutéine, la violaxanthine, l'antheraxanthine, la zeaxanthine, et la neoxanthine.

Un grand nombre d'études a démontré les propriétés antioxydantes des caroténoïdes algaux et le rôle qu'ils jouent dans la prévention de plusieurs pathologies liées au stress oxydatif (Okuzumi et *al.*, 1993 ; Yan et *al.* 1999 in Marfaing, 2004).

4.1.7. Les polyphénols

Certaines algues marines contiennent des polyphénols appelés aussi phlorotannins. Ces derniers constituent un groupe très hétérogène de molécules selon leur structure et leur degré de polymérisation, fournissant ainsi une grande variété d'activités biologiques potentielles. Les teneurs les plus élevées sont retrouvées dans les algues brunes et varient entre 5 et 15% du poids sec (Marfaing, 2004).

4.1.7.1. Les tanins

Les tanins sont des polyphénols naturels qui, à l'origine, sont connus pour leur capacité à précipiter les alcaloïdes et les protéines. Selon Bate-Smith (1973): « Les tanins sont des composés phénoliques hydrosolubles ayant un poids moléculaire compris entre (500 et 3000 Da) et qui ont à côté des réactions classiques des phénols, la propriété de précipiter les alcaloïdes, la gélatine, et d'autres protéines». Même si cette définition reste valable, elle a été complétée grâce aux méthodes récentes d'analyse qui ont permis d'éclaircir la structure de ces polyphénols. Ainsi, les tanins sont désormais définis comme des polyphénols de masse moléculaire allant jusqu'à 20000Da (Haslam, 1989; Hagerman, 2002). Les tanins peuvent, selon leurs caractéristiques structurales, être divisés en trois classes:

A. Les tanins condensés :

Nommés également proanthocyanidines, les tannins condensés sont des oligomères et des polymères de flavonoïdes. Les plus connus sont les procyanidines qui sont des chaînes de catéchine et/ou d'épicatéchine liées par des liaisons carbone-carbone en 4-6 ou 4-8 (Figure 1) (Haslam, 1975; Porter, 1989). En général, les tanins condensés ont des poids moléculaires plus élevés que ceux des tannins hydrolysables (Hagerman, 1992).

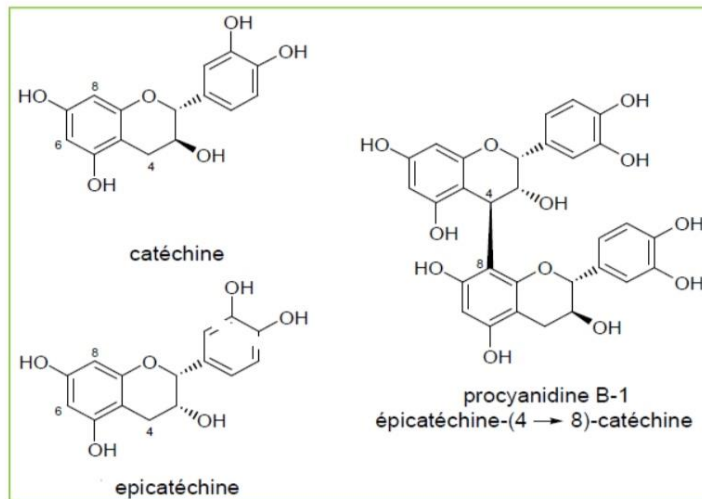


Figure 1. Structures de la catéchine, de l'épicatéchine et d'une procyanidine dimérique.

B. Les tannins hydrolysables :

Les tannins hydrolysables sont des oligo ou polyesters d'un sucre, en général le glucose, et de molécules d'acide-phénol (Jean-Blain, 1998; Bruneton, 1999; Mueller-Harvey, 2001). Ils sont classés selon la nature de l'acide-phénol: les tannins galliques possèdent un acide gallique, alors que les tannins éllagiques ont un acide hexahydroxyphénique (Hagerman, 2002). Le terme tannins hydrolysables indique leur sensibilité à l'hydrolyse acide. Ils sont notamment hydrolysés dans le tractus digestif des ruminants et leurs produits de dégradation sont absorbés. Ils peuvent être responsables d'intoxications, lors d'ingestion trop massive, et provoquent des lésions hépatiques et rénales, décrites chez les ovins (Zhu et *al.* 1992) ou les bovins (Plumlee et *al.*, 1998).

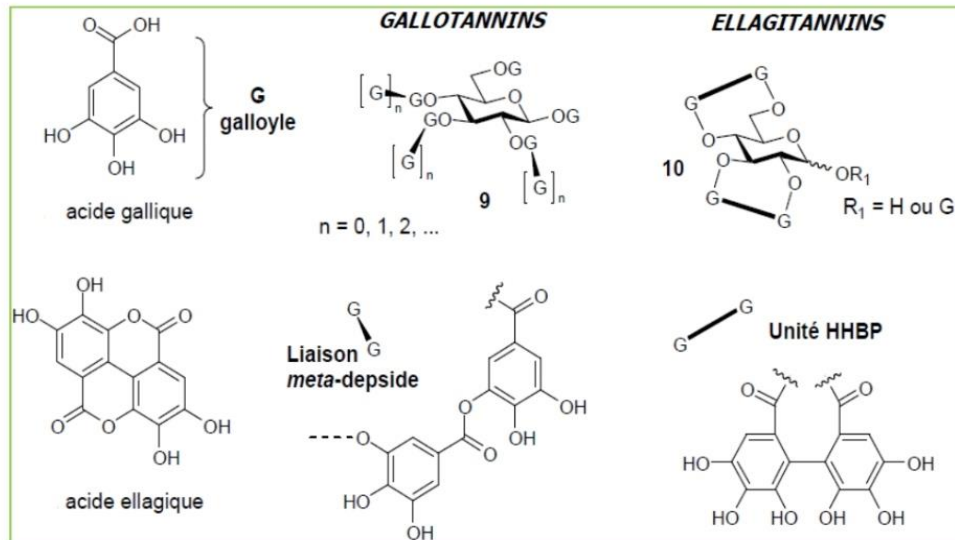


Figure 2: Acide gallique, acide ellagique et structures des gallotannins et des ellagitannins

C. Les phlorotannins :

Chez les algues brunes (Phaeophyceae), le seul groupe de tannins présent est représenté par les phlorotannins. Ce sont des composés chimiques aromatiques uniques dans le monde végétal. Du fait de leur rôle d'antioxydants naturels, ces composés suscitent beaucoup d'intérêts pour la prévention et le traitement du cancer, des maladies inflammatoires, cardiovasculaires et neurodégénératives. Il s'agit de polymères de phloroglucinol (1, 3,5-trihydroxybenzene) (Figure 3). Ils peuvent constituer jusqu'à 15% du poids sec des algues brunes (Ragan and Glombitza, 1986; Targett and Arnold, 1998). La relation entre les substances phénoliques et le phloroglucinol dans les algues brunes a été mentionné en premier par Crato (1893) et ont par la suite été confirmé par Ragan. (1976). Le poids moléculaire des phlorotannins varie entre 126 Da et 650 KDa, mais le plus souvent ils se rangent entre (10 et 100KDa) (Boettcher and Targett, 1993; Mc Clintock and Baker, 2001).

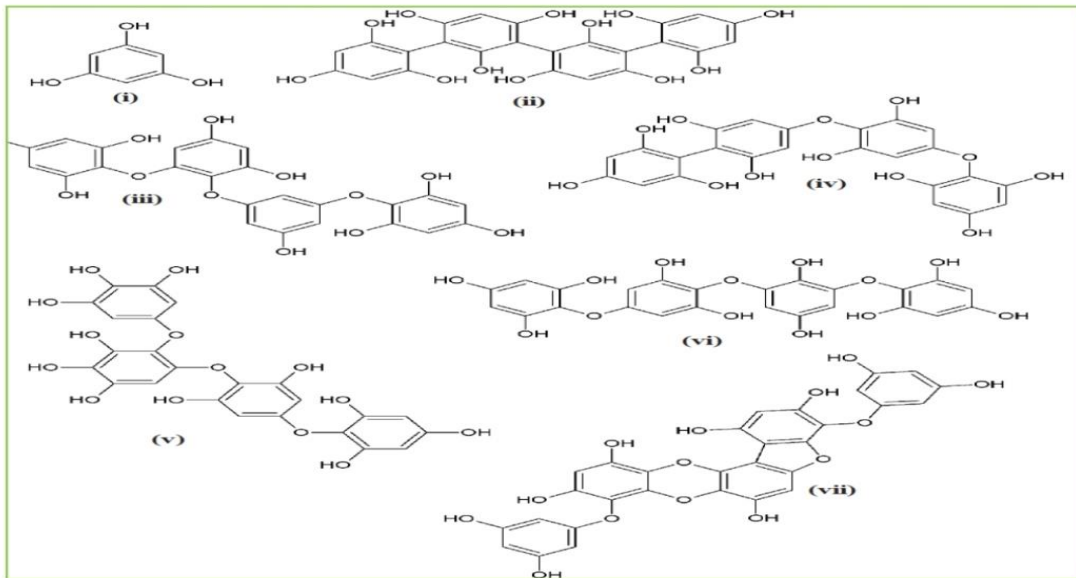


Figure 3 : Structure du phloroglucinol (i) et des phlorotannins [tetrafulcol A (ii), tetraphlorethol B (iii), fucodiphlorethol A (iv), tetrafulhalol A (v), tetraisofuhalol (vi), phlorofucofuroeckol (vii)] ((Ragan and Glombitza, 1986).

5. Rôle économique des algues :

La quantité de macro-algues transformée annuellement dans le monde est de plus de 15,8 millions de tonnes (poids frais) soit 23% de toute la production aquacole et représentait une valeur marchande de 7,4 Milliards de dollars US en 2008. Approximativement 220 espèces sont cultivées. Les producteurs principaux sont la Chine, l'Indonésie et les Philippines qui, à eux seuls, totalisent les quatre cinquièmes de la production. Cette production est majoritairement destinée à l'alimentation humaine directe (76,1 %), à l'extraction des métabolites (11,2 %), le reste est exploité dans différents secteurs : l'alimentation animale et l'agriculture. L'ampleur de la consommation directe est due aux pays asiatiques (CHOUIKHI.A., 2013).

Tableau 1 : Production mondiale de macro-algues marines (CHOUIKHI.A., 2013).

Régions	Pays	Quantité (tonnes/poids frais) en 2008
Asie de l'est et du sud-est	Chine	9922400 (62,8%)
	Indonésie	2 164 600 (13,7%)
	Philippine	1 674 800 (10,6%)
	République de Corée	932 200 (5,9%)
	Japon	458 200 (2,9%)
	RPD Corée	42 400 (2,8%)
Amérique	Chili	21 700 (0,14%)
Afrique	Tanzanie, Madagascar, Afrique du Sud	14 700 (0,093%)
Europe	Russie, France, Espagne	864

5.1. Utilisations en alimentation:

Les macro-algues peuvent être intégrées dans certains ingrédients alimentaires, comme les pâtes (Fakihi Kachkach et M. El Harchi., 2013). Quelques variétés sont plus produites en Bretagne dans l'alimentation humaine telles que : la laitue de mer (*Ulva lactuca*), le nori (*Phorphyra*), le haricot de mer (*Himanthalia elongata*), le kombu royal ou kombu breton (*Laminaria saccharina* ou *digitata*), wakamé (*Undaria pinatifida*) (OCEALG. 2017). En France, 21 espèces sont autorisées en alimentation humaine (tableau 3) (LE GUILLARD Cécile, Colloque PONAN novembre 2013). Très riche en nutriments essentiels, la majorité est cultivée à Brest notamment la *Laminaria digitata* et les haricots de mer mais on peut retrouver aussi la laitue de mer vers Marseille dans la mer méditerranéenne.

Tableau 2 : macro-algues consommées en France (LE GUILLARD Cécile, Colloque PONAN novembre 2013)

	Nom scientifique	Nom commun
Les algues brunes (8)	<i>Ascophyllum nodosum</i>	
	<i>Fucus vesiculosus et serratus</i>	
	<i>Himanthalia elongata</i>	Haricot de mer ou spaghetti
	<i>Undaria pinnatifida</i>	Wakamé
	<i>Laminaria (3)</i>	Kombu (kombu royal)
Les algues rouges (11)	<i>Alaria esculenta</i>	Atlantic wakamé
	<i>Palmaria palmata</i>	Dulse
	<i>Phorphyra (7)</i>	Nori
	<i>Chondrus crispus</i>	Pioca , lichen
	<i>Gracilaria verrucosa</i>	Ogonori
Les algues vertes (2)	<i>Lithothamnium calcaneum</i>	Maerl
	<i>Ulva</i>	Laitue de mer
	<i>Enteromorpha</i>	Aonori

5.2. Utilisation en agriculture

Les agriculteurs, surtout biologiques, connaissent le pouvoir fertilisant des algues et emploient des extraits liquides pour stimuler la croissance des plantes et les protéger des maladies (Conso Globe. Algues et alimentation, 21/05/17). Depuis longtemps les populations littorales fertilisent leurs terres à l'aide des macro-algues surtout avec les grandes algues brunes qui sont recueillies généralement au niveau des plages, puis lavées et découpées. Dans le Royaume-Uni, la pratique consistait à mélanger des macro-algues avec du sable, de laisser pourrir et puis de les enterrer (Brault D., Briand X., Golven P. 1982).

5.3. Utilisations médicale, paramédicale et pharmaceutique :

Les macro-algues représentent une source de substances polymériques actives, mise en évidence par de nombreux travaux de recherche. Les potentiels thérapeutiques de certaines de ces substances sont extrêmement prometteurs notamment comme agents antimicrobiens, agents antiviraux ou pour leurs activités envers certaines pathologies. On a ainsi mis en évidence un composé extrait d'une algue verte marine, le diméthylsulfoniopropionate, qui présente des potentialités anticancéreuses. Certains hétéropolysaccharides sulfatés matriciaux, comme les

fucoïdanes, sont également appropriés pour lutter contre les processus de formation et de croissance de tumeurs malignes (GUILLAUME. P, 2010).

Principe actifs

Les principes actifs sont particulièrement recherchés et différents selon les espèces, comme suit :

- *Himanthalia* : vitamines C ;
- *Fucus vesiculosus* : effet tenseur et bêta-glucanes ;
- *Fucus spiralis* : propriétés drainantes ;
- *Chondrus crispus* : polysaccharides, vitamines C et effet calmant ;
- *Ascophyllum nodosum* : polyphénols, antioxydants ;
- *Pelvetia* : acides aminés, vitamine E ;
- *Corallina* : magnésium, calcium, effet calmant ;
- *Laminaria digitata* : propriétés drainantes ;
- *Palmaria palmata* : effet calmant, vitamines C (MESNILDREY Lucile, JACOB Céline, FRANGOUEDES Katia, REUNAVOT Mélanie, LESUEUR Marie, 2012).

5.4. Matières premières pour l'extraction de produits gélifiants :

Phycocolloïdes Les polysaccharides extraits d'algues rouges, représentés par les agars et carraghénanes, sont des phycocolloïdes utilisés pour leur pouvoir gélifiant (Lahaye M., Robic A. 2007).

Les algues brunes, et en particulier les Laminaires, sont riches en alginates. Les alginates, les carraghénanes et l'agar sont des hydrocolloïdes ayant des propriétés gélifiantes, stabilisantes et épaississantes qui entrent dans la composition de très nombreux produits cosmétiques et alimentaires, et sont commercialisés en tant qu'additif codé d'E400-E407. Près d'1 million de tonnes d'algues fraîches par an sont utilisées dans le monde pour extraire ces 3 composés (UEB et Partenaires, le 22/05/17).

II. Les Rhodophytes :

1. Généralité sur les algues rouges :

Les algues rouges sont définies comme des algues marines eucaryotes, multicellulaires et classées dans la division *Rhodophyta*. On trouve déjà environ 6 500 à 10 000 espèces d'algues rouges, parmi lesquelles des algues connues et 160 espèces de formes d'eau douce (5% des formes d'eau douce). La couleur rouge des algues rouges est due au pigment phycobiliprotéines (phycobiline). Et ils contiennent aussi d'autres pigments tels que la phycoérythrine et la phycocyanine. Parfois, ils reflètent aussi la couleur bleue.

Les algues rouges vont des formes microscopiques unicellulaires aux grandes formes charnues multicellulaires. On les trouve dans toutes les régions du monde. Ils se développent normalement attachés à des surfaces dures. Les herbivores tels que les poissons, les crustacés, les vers et les gastéropodes sont des algues rouges en pâture. Les algues rouges ont le cycle de vie sexuelle plus complexe parmi toutes les algues. L'organe sexuel féminin est appelé « carpogonium » et possède une région non-nucléée qui sert d'œuf. Les algues rouges possèdent également une saillie appelée « tricogyne ». Les gamètes mâles non mobiles (spermaties) sont produits par l'organe sexuel masculin connu sous le nom de « spermatanges ». Certaines algues rouges sont des aliments importants tels que la laque, le dulce, etc...

“Irish mosh”, composé d'algues rouges, est utilisé comme substitut de gélatine dans les puddings, les dentifrices et les glaces. La substance semblable à la gélatine qui est préparée par les espèces d'algues rouges comme *Gracilaria* et *Gellidium*, est un composant important des milieux de culture bactériens et fongiques (Inc. 3 oct. 2016).

2. Caractères généraux :

Les Rhodophycées sont des algues eucaryotes à cellules souvent plurinucléées. Leurs plastes (rhodoplastes), rarement uniques dans les cellules et ordinairement dépourvus de pyrénnoïde, renferment de la chlorophylle *a* associée à des caroténoïdes. La couleur verte de la chlorophylle est masquée par des phycobiliprotéines : la r-phycoérythrine et la r-phycocyanine, la première étant la plus abondante et souvent la seule présente. L'ultrastructure des rhodoplastes est particulière : les thylacoïdes, isolés les uns des autres (cf. plastes), portent, sur leur face externe, des phycobilisomes renfermant les phycobiliprotéines.

Une autre caractéristique de la cellule des Rhodophycées est la présence constante (sauf chez beaucoup de Bangiophycidées) de synapses ; une synapse est une ouverture laissée dans la paroi lors de la formation de deux cellules et occupée par un « bouchon » de nature lipoprotéique en contact direct avec le cytoplasme des deux cellules. Le rôle de ces synapses dans

la migration des substances dissoutes ou dans la transmission d'informations morphogénétiques, bien que probable, n'est pas encore définitivement démontré.

La paroi cellulaire est constituée de cellulose associée à des polyholosides à base de galactose et en partie estérifiés par de l'acide sulfurique (agar-agar, carragahénine). Certaines Rhodophycées fixent du carbonate de calcium, associé à de moindres quantités de carbonate de magnésium, dans leur paroi cellulaire sous forme de calcite (Corallinacées). Chez d'autres, le carbonate de calcium, sous forme d'aragonite, se dépose dans le mucilage intercellulaire (*Liagora*, *Galaxaura*).

Les produits du métabolisme sont surtout constitués par des grains d'un amidon caractéristique, l'*amidon floridéen*, qui se distingue de celui des plantes supérieures et des Algues vertes par le mode de liaison des molécules de glucose et par sa localisation dans le cytoplasme et non dans les plastes.

3. Habitat et diversité morphologique :

3.1 Habitat :

Le mode de vie des algues peut être assez varié, la majorité sont partout : dans l'eau douce, dans l'eau salée et même sur la face nord des arbres et sur le sol, mais il leur faut impérativement deux choses : de la lumière pour leur photosynthèse (donc cela limite la profondeur en mer ou dans un lac) et de l'eau pour leur reproduction (la protection des gamètes et des zygotes viendra bien plus tard dans l'évolution).

La plupart des algues rouges sont communes avec la zone des laminaires située au-dessus, alors que la composante faunistique de cet habitat est constituée d'espèces que l'on trouve dans la zone des laminaires ou plus bas dans le circalittoral dominée par des animaux.

Les espèces foliacées communément présentes comprennent *Dilsea carnosa*, *Hypoglossum hypoglossoides*, *Schottera nicaeensis*, *Cryptopleura ramosa* et *Delesseria sanguinea*. La composition spécifique des algues rouges présentes varie considérablement. À certains endroits, il peut y avoir une seule espèce dominante (en particulier *Plocamium cartilagineum*). On peut également trouver de petites algues rouges filamenteuses, dont *Heterosiphonia plumosa* et *Brongniartella byssoïdes*.

Situation : Cet habitat est généralement situé en-dessous ou à la limite inférieure des laminaires, en-dessous d'une forêt de laminaires ou d'une zone de laminaires clairsemées (J.B.2004).

Variations temporelles : Beaucoup d'algues rouges présentes dans cet habitat possèdent des frondes annuelles qui tendent à mourir à l'automne et à se régénérer au printemps. Cela produit

une modification saisonnière de la densité du couvert d'algues, qui est substantiellement réduit pendant les mois d'hiver et qui atteint sa densité maximale d'avril à septembre.

3.2 Variation morphologique :

Les rhodophycées sont Presque toutes pluricellulaires. Morphologie très variée: les algues rouges peuvent se présenter sous différentes type –unicellulaire- filamenteux simples ou ramifiés. Thalle massif (en forme foliacée) – Cladome uni ou pluri axial. Certaines espèces montrent une convergence avec les Plantes (soudure de plusieurs filaments formant des thalles ressemblant à des feuilles).Thalles toujours moins massifs et à différenciation moins marquée que chez les algues brunes.

La paroi est de nature pectocellulosique en plus de la cellulose, elle contient d'autres polysaccharides notamment le xylomannane et le galactane. Dans les parois de certaines algues rouges on trouve des dépôts de carbonate de calcium qui joue un rôle important dans la construction des dépôts coralliens. Les rhodoplastes : contiennent des chlorophylles a et d, des carotènes, des xanthophylles et des phycobiliprotéines (Phycoérythrine R et Phycyanine R). La substance de réserve est l'amidon floridéen ou rhodamylon.

4. Cytologie :

Un point important est l'absence, chez toutes les Algues rouges, de cils ou de flagelles. Ce sont les seuls êtres vivants aquatiques à présenter cette particularité. Cela est particulièrement important pour la fécondation. C'est un point qui a autrefois fait faire des rapprochements entre les champignons et les algues rouges. Ce rapprochement n'est pas justifié dans la classification actuelle.

- a. Pigments photosynthétiques Les Rhodophytes contiennent de la chlorophylle a et des caroténoïdes, mais leur originalité consiste en la présence de phycobilisomes 7 comprenant les phycobiliprotéines : allophycocyanine (bleu), phycocyanine (bleu) et phycoérythrine qui donne la couleur rouge. Ces pigments apportent un complément à l'exploitation du spectre solaire, par rapport aux autres organismes photosynthétiques. Les thylakoïdes sont libres et ne forment pas de granum (ceci est lié à la présence des phycobilisomes à la surface des thylakoïdes), ils sont répartis concentriquement dans le chloroplaste mais occupent tout l'espace.
- b. Réserves La réserve glucidique des algues rouges est différente de l'amidon ; de masse molaire plus faible, elle semble plus proche du glycogène. On la nomme «amidon

floridéen». Cet amidon floridéen est stocké sous forme de vésicules dans le cytoplasme (et non dans le plaste comme chez les plantes et algues vertes).

- c. Paroi squelettique Leur paroi pectocellulosique est de composition complexe. Elle contient de la cellulose dans sa partie interne ; mais également d'autres polysaccharides source d'agar (utilisé pour les milieux de culture bactérienne) et de carraghénanes (stabilisants industriels, présents dans les dentifrices, l'alimentation, les peintures...) dans sa partie externe. On observe dans l'espèce *Palmaria palmata* des jonctions originales entre parois. Ces jonctions forment des sortes de «boutons pression» protéiques qui unissent des filaments entre eux. Cette cohésion mécanique permet de constituer un thalle aplati à partir d'une organisation essentiellement filamenteuse.

5. Les génomes et les classes d'algue rouge :

Il existe 5 génomes d'algue rouge séquencés dont 4 publiés en 2013 (Matsuzaki et *al.* April 8, 2004).

5.1 Les Cyanidiophyceae :

Les cyanidiophycées sont une classe d'algues rouges unicellulaires au sein de la subdivision Cyanidiophytina, et contiennent un seul plaste, une à trois mitochondries, un noyau, une vacuole et de l'amidon de Floride (Joseph Seckbach & David J. 31 January 2011). La plupart sont des extrêmophiles habitant les sources chaudes acides. Le principal pigment photosynthétique est la C-phycoyanine. La reproduction est asexuée par fission binaire ou formation d'endospores (Debashish. April 2006).

5.2 Les Bangiophyceae :

Dans certaines classifications, Les *Bangiophycées* sont fusionnés avec les *Florideophycées* pour former les *Rhodophycées*. Les *Bangiophycées*, telles que définies traditionnellement, sont paraphylétiques. Leur identification taxonomique a été difficile en raison d'un manque de caractéristiques morphologiques distinctes et de la plasticité morphologique présumée de l'espèce. Des outils moléculaires sont nécessaires pour élucider les relations au sein de cet assemblage.

La majorité des *bangiophyceae* sont des algues marines, sauf que les *rhodosorus* marines qui ont un mode de vie planctonique, quelques autres espèces vive dans les eaux douces

(exemple : *Chroothese*), des autres se développent en touffes abondantes dans les eaux courantes (exemple : genre de *Bangia*).

5.3 Les Florideophyceae :

Les algues *Floridéophycées* sont des végétaux aquatiques multicellulaires de la classe *Florideophyceae*, anciennement connue comme *Floridea* dans l'embranchement des *Rhodophytes*.

La morphologie de ce type d'algue est plus complexe se caractérisent par des cellules qui peuvent être distinguées l'une de l'autre par des différences ultrastructurales, en particulier par l'association de l'appareil de Golgi avec d'autres organites. Ainsi, les cellules de Golgi sont associées à la fois au réticulum endoplasmique et à la mitochondrie.

Florideophyceae est largement connue, car les espèces sont communes dans de nombreuses côtes littorales et leurs parois cellulaires fournissent des composés économiquement importants tels que l'agar et le carraghénane. Des espèces d'eau douce et marine sont bien connues comme les dulse. Parmi les ordres de la classe, Ceramiales est le groupe le plus abondant, tandis que Corallinales, qui ont du carbonate incrusté, sont importantes dans la formation des récifs coralliens avec la coralline.

5.4 Les *Porphyridiophyceae* :

Les algues unicellulaires *porphyridiophycées*, de la classe *Porphyridiophyceae*, sont des algues rouges de la division des *Rhodophytes*. Les complètent les *rhodellophycées* et *stylonématophycées* pour le groupe de la sous-division *Rhodophytina* avec des représentants unicellulaires.

Les espèces de *Porphyridiophyceae* sont distinguées les unes des autres par des différences Ultrastructurales, en particulier par l'association de l'appareil de Golgi avec d'autres organites. Ainsi, les cellules des *porphyridiophycées* contiennent un seul chloroplaste ramifié ou en étoile avec ou sans pyrénnoïde, l'appareil de Golgi est en association avec les mitochondries et le réticulum endoplasmique et contient des floridosides en glucides de faible poids moléculaire. La reproduction a lieu par division cellulaire.

Tableau 3 : Classification de la division des Rhodophyta, d’après Van Den Hoek et *al.* 1996

Classe des Bangiophycideae		Classe des Floridophycideae	
Ordre Porphyridiales		Ordre Batrachospermales	Corallinales
<i>Famille</i> Porphyridiaceae		<i>Famille</i> Batrachospermaceae	Corallineaceae
Goniotrichaceae		Palmariales	Gigartinales
Compsopogonales		Palmariaceae	Solieriaceae
Compsopogonaceae		Nemadiales	Gigartinaceae
Erythropepltidaceae		Acrochaetiaceae	Phylloporaceae
Boldiaceae		Nemaliaceae	Gracilareaceae
Bangiales		Helminthocladiaceae	Rhodymeniales
Bangiaceae		Chaetangiaceae	Champiaceae
		Gelidiales	Ceramiales
		Bonnemaisoniales	Ceramiaceae
		Bonnemaisoniaceae	Dasyaceae
		Cryptonemiales	Delesseriaceae
		Dumontiaceae	Rhodomelaceae
		Glosiphoniaceae	
		Cryptonemiaceae	
		Kallymeniaceae	
		Choreocolaceae	

6. Reproduction et mode de croissance :

6.1 Mode de croissance :

Chez les algues rouges filamenteuses, la croissance est initiée par une cellule apicale unique en forme de dôme qui forme un axe en se divisant en une succession de segments. A son tour, cet axe donne des verticilles de rameaux latéraux.

6.2 Reproduction :

Les Algues rouges peuvent avoir un cycle de vie soit digénétique, soit trigénétique. Dans un cycle trigénétique la division du zygote sur le gamétophyte forme une génération supplémentaire dans la diplophase : le carpoconidiophyte. Le carpoconidiophyte ($2n$) produit des conidies ($2n$) par mitose qui, suite à leur dispersion, germent pour former un sporophyte ($2n$). La germination des spores (n) produits par le sporophyte ($2n$) donne lieu à des gamétophytes (n) mâle et femelle complétant ainsi le cycle trigénétique.

Les dénominations de "carpospores" produits par un "carposporophyte" couramment utilisée ne sont pas convenables. Il s'agit bien là de conidies, cellules diploïdes et issues de mitoses donnant lieu à un sporophyte par germination, tandis que les spores sont des cellules haploïdes et issues d'une méiose donnant lieu à un gamétophyte par germination.

Pour qualifier les espèces ayant une seule génération dans la diplophase, le phycologue suédois Nils Eberhard Svedelius a introduit le terme d'haplobionte (un seul organisme). Pour

qualifier les espèces ayant deux générations dans la diplophase, Svedelius a introduit le terme de diplobionte (deux organismes).

L'existence de 2 générations diplophasiques (carpoconidiophyte et sporophyte) permet donc de préciser que le cycle trigénétique est diplobiontique (De Boeck Supérieur . 2012).

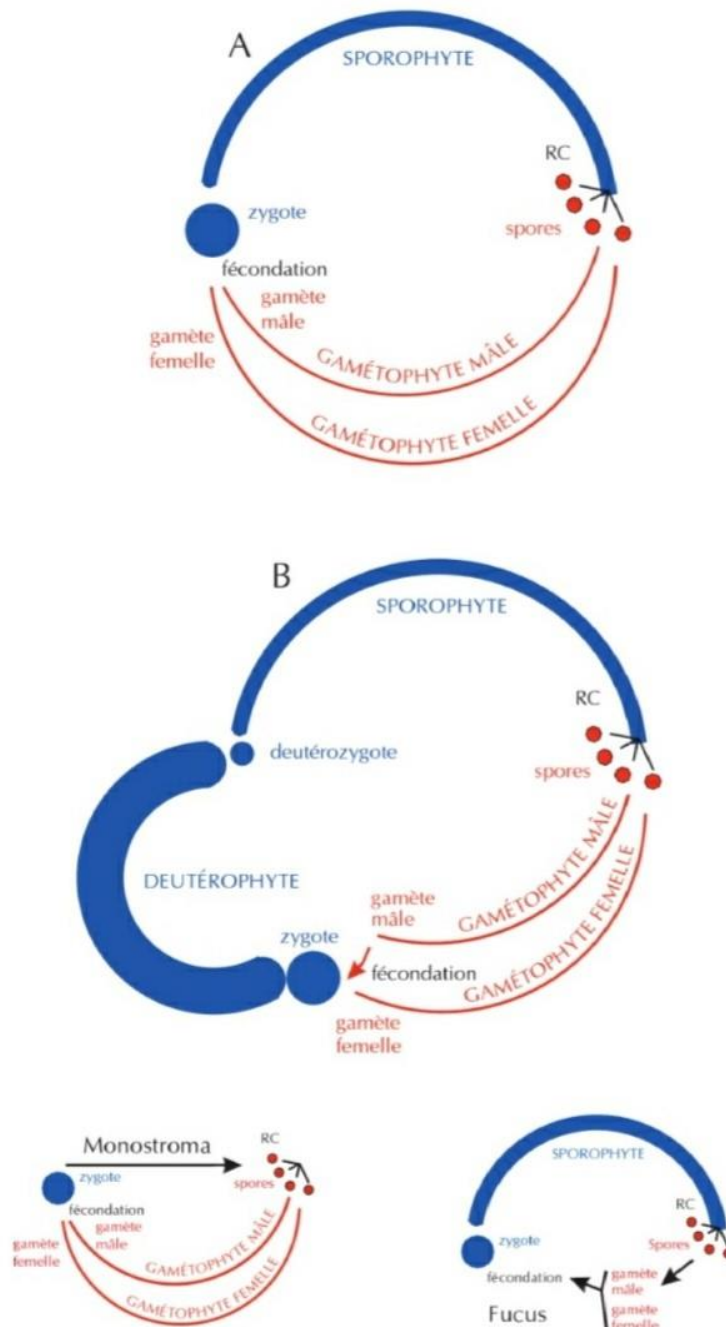


Figure 4 : Ce cycle est dit trigénétique ; il est typique des algues rouges et ne se retrouve dans aucun autre groupe végétal.

Les deux cycles typiques de reproduction sexuée chez les végétaux. Le cycle A est le cycle typique. Tous les cycles connus dérivent de celui-ci par simplification. Il n'est constitué que par 2 générations : la génération sporophytique et la génération gamétophytique. Seule exception : le cycle B qui caractérise les Rhodobiontes, est dit trigénétique.

7. Présentation de quelques espèces de la famille des *Gracilareaceae* :

Le genre *Gracilaria* est employé essentiellement pour la production d'agar-agar mais aussi dans l'alimentation humaine et dans des applications pharmaceutiques. La production mondiale des algues utilisées pour la production de l'agar est passée de 48000 tonnes (poids sec) en 1991 (*Gracilaria* 53 % et *Gelidium* 44 %) à 55650 tonnes en 2001 (*Gracilaria* 66 % et *Gelidium* 33 %). Quant à la production de l'agar, elle est passée de 6680 t en 1986 à 7650 t en 2001 (McHugh, 2003). Étant donné que *Gelidium* n'est pas cultivable et que les peuplements naturels de *Gelidium* et de *Gracilaria* sont en nette régression, seule la culture de *Gracilaria* pourrait satisfaire la demande croissante en ces ressources. La situation de déséquilibre entre l'offre et la demande a occasionné le développement de différentes techniques de culture dans le souci d'améliorer les rendements et a incité le recours à de nouvelles zones dans les pays où la culture est déjà pratiquée et l'introduction de cette activité dans d'autres pays ayant des potentialités pour son démarrage.

7.1 *Gracilaria bursa-pastoris* (S.G. Gmelin) P.C. Silva, 1952

➤ Position systématique :

Sur le plan systématique, *Gracilaria bursa-pastoris* occupe la position suivante (P.C. Silva, 1952)

Domaine :	Eukaryota
Règne :	plantae
Embranchement :	Rhodophyta
Sous-embranchement :	Eurhodophytina
Classe :	Florideophyceae
Sous-classe :	Rhodymeniophycidae
Ordre :	Gracilariales
Famille :	Gracilariaceae

Genre : *Gracilaria*

➤ **Morphologie :**

Le thalle est formé de filaments cylindriques de 0,5 à 3 mm de diamètre. Ces filaments sont parfois légèrement comprimés, ce qui est un élément d'identification. Densément et irrégulièrement ramifiés, ils forment des touffes ou des massifs broussailleux de plusieurs dizaines de centimètres de longueur. Comme pour beaucoup de gracilaires, cette espèce peut avoir des aspects différents : la forme peut être plus ou moins trapue et certains rameaux ne sont pas comprimés. Les filaments sont plus larges et les ramifications sont plus rapprochées que chez *Gracilaria gracilis*. De couleur brun-rouille, parfois rougeâtre, elle devient jaunâtre (jaune-vert) quand, proche de la surface, elle est soumise à une forte luminosité. Il n'est pas rare de trouver des pieds dont la base garde une couleur brun-rouille et dont les extrémités sont jaunes.



Figure 5 : Thales de *Gracilaria bursa-pastoris*

➤ **Biologie et caractéristiques**

La cellule qui donne naissance à la plante germe toujours sur un support solide (rocher, rail, cordage, débris divers). Les individus femelles fixés sont pourvus de verrues (cystoscopes), visibles à l'œil nu, qui ressemblent à de petits volcans et qui libèrent des spores disséminatrices (carpospores) à maturité. Une fois détachés de leur lieu de germination, les filaments peuvent s'accroître, se fragmenter et proliférer dans les fonds meubles des étangs. On les trouve alors sous forme de touffes isolées ou formant des tapis plus ou moins denses.

➤ **Milieu**

Cette espèce est présente toute l'année de la surface à 6 m de profondeur. Elle supporte des variations de salinité. Elle peut proliférer : l'invasion d'une lagune ou d'une partie de lagune par cette algue indique une eutrophisation lente et régulière. Elle peut recouvrir les herbiers et les détruire en les étioyant (en cachant la lumière).



Figure 6 : *Gracilaria bursa-pastoris* (François Sichel, 26.08.2019 à La Conchée (Chausey)).

7.2 *Gracilaria dura* (C. Agardh) J. Agardh, 1842

Classification taxonomique de l'espèce (C. Agardh J. Agardh, 1842):

Règne :	Plantae
Sous-Règne :	Biliphyta
Phylum :	Rhodophyta
Sous-Division :	Eurhodophytina
Classe :	Florideophyceae
Sous-Classe :	Rhodymeniophycidae
Ordre :	Gracilariales
Famille :	Gracilariaceae
Sous-Famille :	Gracilarioideae
Tribu :	Gracilarieae
Genre :	<i>Gracilaria</i>
Espèce :	<i>Gracilaria dura</i>

➤ Morphologie :

Le thalle est formé de filaments cylindriques et ramifiés de 0,5 à 2 mm de diamètre. Parfois, les extrémités supérieures présentent une courte ramification pseudo-dichotomique leur donnant un aspect bifide*. Ces filaments forment des touffes ou des massifs de plusieurs dizaines de centimètres de longueur. La couleur, souvent caractéristique, d'un brun rouge tendant vers l'orange, peut devenir jaunâtre sur les plantes exposées à une forte luminosité.



Figure 7 : *Gracilaria dura* (*Gracilaria dura* (C.Agardh) J.Agardh (Image Ref. 30123) habit, Ría de Arousa, Galicia, Spain, 2015 - 01 Jan 0001).

➤ **Biologie et caractéristiques :**

La cellule qui donne naissance à la plante germe toujours sur un support solide (rocher, rail, cordage, débris divers). Les individus femelles fixés sont pourvus de verrues (cystocarpes) visibles à l'œil nu qui ressemblent à de petits volcans et qui libèrent, à maturité, des spores disséminatrices (carospores). Une fois détachés de leur lieu de germination, les filaments peuvent s'accroître, se fragmenter et vivre sur les fonds meubles des étangs. On les trouve alors sous forme de touffes isolées ou au sein des autres végétaux. Ce sont des algues non fixées qui peuvent former des tapis.

➤ **Milieu**

Cette espèce est présente toute l'année, de la surface à 6 m de fond. Elle peut proliférer : l'envahissement d'une lagune ou d'une partie de lagune par cette algue indique une eutrophisation lente et régulière. Elle peut recouvrir les herbiers et les détruire en les étioyant (en cachant la lumière).



Figure 8 : *Gracilaria dura* (DORIS, 13/11/2020).

7.3 *Gracilaria gracilis* (Stackhouse) M. Steentoft, L.M. Irvine & W.F. Farnham, 1995 (anciennement *Gracilaria verrucosa* (Hudson) Papenfuss, 1950).

➤ **Classification :**

Règne :	Plantae
Sous-Règne :	Biliphyta
Phylum :	Rhodophyta
Sous-Division :	Eurhodophytina
Classe :	Florideophyceae
Sous-Classe :	Rhodymeniophycidae
Ordre :	Gracilariales
Famille :	Gracilariaceae
Sous-Famille :	Gracilarioideae
Tribu :	Gracilarieae
Genre :	<i>Gracilaria</i>
Espèce :	<i>Gracilaria gracilis</i>

➤ **Morphologie :**

Les filaments, cylindriques et ramifiés, de 0,5 à 2 mm de diamètre, forment des touffes ou des massifs pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres de longueur. De couleur rouille-marron, parfois rougeâtre, elle devient jaunâtre lorsqu'elle est soumise à une forte luminosité. Comme pour beaucoup d'espèces de gracilaires, elle peut avoir des aspects différents avec une forme trapue ou allongée et des filaments de diamètres différents sur le même thalle.



Figure 9 : Le thalle de *Gracilaria gracilis* (Keurbooms Estuary (BOL)).

➤ **Biologie et caractéristiques :**

La cellule qui donne naissance à la plante germe toujours sur un support solide (rocher, rail, cordage, coquille, débris divers). Les individus femelles fixés sont pourvus de verrues (cystocarpes), visibles à l'œil nu, qui ressemblent à de petits volcans et qui libèrent, à maturité, des spores disséminatrices (carospores). Une fois détachés de leur lieu de naissance, les filaments peuvent s'accroître, se fragmenter et proliférer sur les fonds meubles des étangs. Ce sont des algues non fixées, dérivantes et proliférantes qui peuvent former des tapis. Si l'apport trophique est conséquent, les tapis recouvrent des surfaces de plusieurs hectares sur quelques dizaines de centimètres d'épaisseur. La gracilaire est une agarophyte qui est ramassée et cultivée dans plusieurs pays pour extraire de l'agar agar.

➤ **Milieu :**

Cette espèce est présente toute l'année, de la surface à 6 m de fond. Elle supporte des variations de salinité. L'envahissement d'une lagune ou d'une partie de lagune par cette algue indique une eutrophisation lente et régulière. Elle peut recouvrir les herbiers et les détruire en les étioyant (en cachant la lumière).



Figure 10 : *Gracilaria gracilis* (Saldanha Bay).

7.4 *Grateloupia filicina* ((J.V. Lamouroux) C. Agardh, 1822).

➤ **Position systématique**

Règne :	Plantae
Sous-Règne :	Biliphyta
Phylum :	Rhodophyta
Sous-Division :	Eurhodophytina
Classe :	Florideophyceae
Sous-Classe :	Rhodymeniophycidae
Ordre :	Halymeniales
Famille :	Halymeniaceae
Genre :	<i>Grateloupia</i>
Espèce :	<i>Grateloupia filicina</i>

➤ **Morphologie :**

Le thalle de couleur rouge-brun est formé d'axes aplatis de 1 à 4 mm de large et d'une dizaine de centimètres de long en général, mais pouvant mesurer jusqu'à 25 cm. Sur ces axes, des rameaux latéraux sont fixés de part et d'autre sur un même plan. Ces derniers sont bien amincis à leur base et à leur extrémité et élargis au centre.



Figure 11 : *Grateloupia filicina* (Chyandour, Penzance, Cornwall. 19.02.11).

➤ **Biologie et caractéristiques :**

Le plus souvent, cette algue vit fixée sur des substrats durs, près de la surface. On la trouve aussi sur les fonds, fixée sur des objets ou d'autres algues. Généralement, le thalle est isolé. Comme toutes les macroalgues rouges, elle a un cycle de reproduction trigénétique : les pieds femelles, à maturité, portent des cystocarps inclus sous la surface du thalle, formant des taches visibles à l'œil nu.

➤ **Milieu :**

Cette espèce est trouvée dans les zones lagunaires sous influence marine. Il semble que des individus de cette espèce provenant de l'Atlantique aient été introduits dans les années 90 et se soient mêlés à la population locale.



Figure 12 : *Grateloupia filicina* (Wulfen C.Agardh 13/03/2018).

8. Production mondiale de la production d'algues

Au niveau mondial, la production d'algues connaît une croissance remarquable (Figure 13), passant de 2 millions de tonnes produites en 1970 à 20 millions en 2010. La production de la biomasse est majoritairement dominée par les apports de l'algoculture, en forte évolution depuis les années 1990, tandis que la récolte d'algues dans le milieu naturel a stagné au niveau mondial à 1 million de tonnes environ. 95% de la production s'est fait par aquaculture (LUCAS Sterenn, GOUIN Stéphane. (2014)).

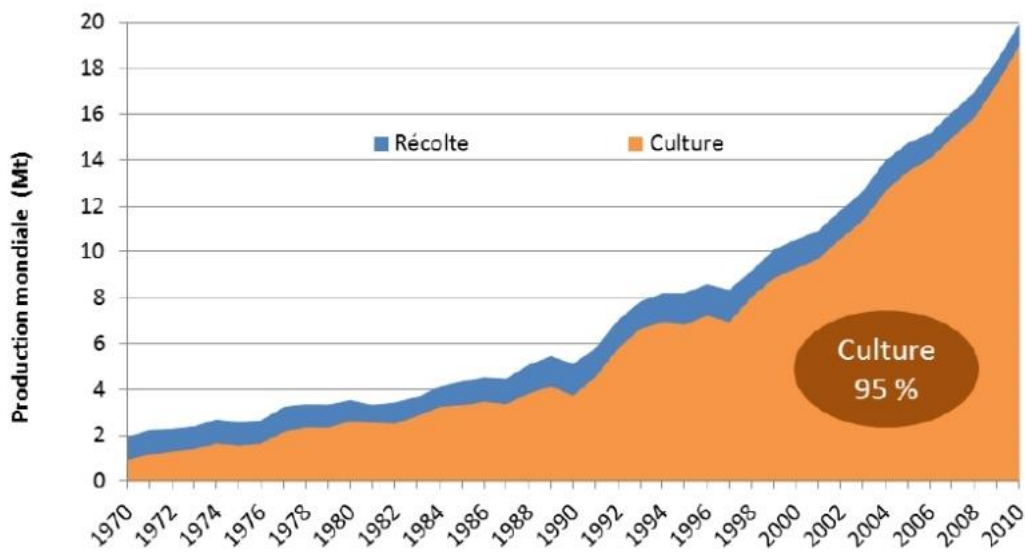


Figure 13 : Evolution de la production mondiale d'algues Source : FAO statistics, 2014

CHAPITRE II :
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA
VALORISATION DE L'AGAR-AGAR

1. Généralité sur l'agar-agar :

1.1. Définition :

L'agar-agar est une poudre au pouvoir gélifiant, extrait de certaines espèces d'algues rouges, de la famille des Gelidiacées et des Gracilariacées. C'est un polysaccharide, c'est-à-dire qu'il est composé de plusieurs types de sucres, ici l'agarose et l'agorapeptine. Pour pouvoir obtenir de la poudre d'agar-agar à partir des algues, les algues bouillies au préalable sont ensuite filtrées. Après refroidissement, déshydratation et séchage, ce filtrat est finalement réduit en poudre.

Sans goût ni couleur, l'agar-agar est très peu calorique en tant qu'additif alimentaire, l'agar est appelé E406.

L'agar-agar est un gélifiant naturel issu d'une algue rouge. Chauffé à 90°C puis refroidi à 40°C, il se gélifie et permet ainsi la préparation de mousses, sorbets, gelées, confitures et autres spécialités culinaires. Il est également utilisé en laboratoire en tant que base pour les cultures cellulaires et pour l'électrophorèse.

Utilisé au Japon depuis des centaines d'années, notamment pour la confection de yōkan (pâtisserie à base de gelée de haricots rouges sucrée), il est utilisé en France depuis quelques années.

L'agar agar présente deux avantages majeurs : il est très peu calorique (28 kcal aux 100g, soit environ 0,5 kcal pour 2g de poudre), et est une alternative végétale aux gélifiants d'origine animale proscrits dans les régimes végétariens et végétaliens.

1.2. La composition chimique (Fig. 14)

Selon une légende japonaise, ces produits auraient été découverts par le docteur Minoya Tarozaemon, qui les obtint à partir du rhodobionte *Gelidium amansii*. Un monument a été édifié à Shimizu-Mura pour commémorer cet « exploit ». Les agars sont employés depuis plus de 200 ans.

Avec le recul du temps, il est possible d'affirmer qu'ils ne présentent aucune toxicité si bien que tous les pays en ont autorisé l'utilisation.

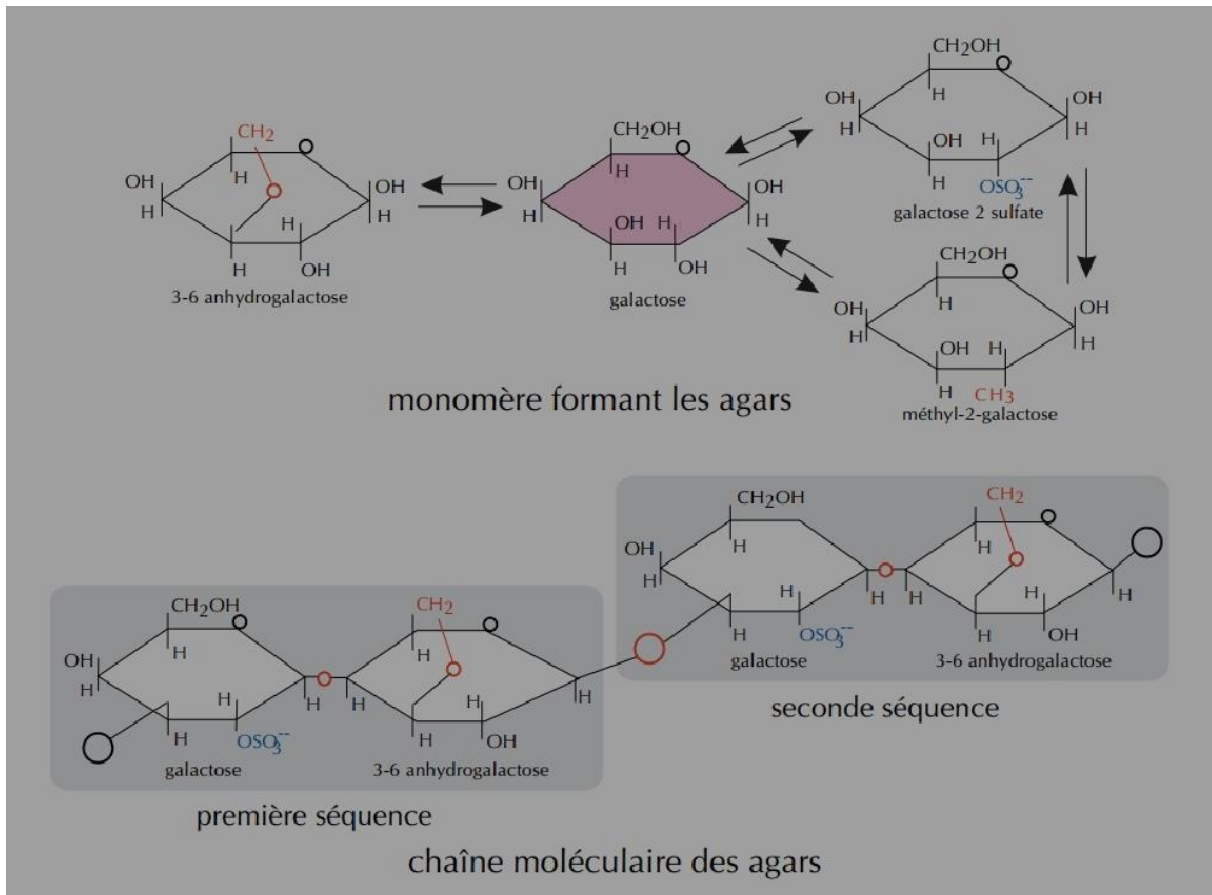


Figure 14 : Structure moléculaire des agars. Les agars sont des polymères du galactose (glucide à 6 carbones) qui se présente sous la forme de galactose simple, de galactose-sulfate, de méthyl-galactose ou de 3-6 anhydrogalactose.

Dans un premier temps, le nom d'« agars » fut réservé aux extraits provenant de *Gelidium amansii*, puis il fut étendu à tous ceux du genre *Gelidium* (*G. sesquipedale*, *G. latifolium*, *G. corneum*...), ensuite à tous ceux obtenus à partir des gélidiales (*Gelidium*, *Pterocladia*, *Gelidiella*), enfin à tous les extraits des végétaux rouges (ordres des Gigartinales et des Cérariales) formant spontanément des gels réversibles. En 1937, Araki établit que les agars, insolubles dans l'eau froide, solubles dans l'eau chaude au-dessus de 85 °C, sont des polymères du galactose, sucre à 6 carbones. Il croit en l'existence de deux phases : l'une qu'il appelle « agarose » capable de former des gels résistants, l'autre nommée « agaropectine » donnant des gels fragiles. En 1984, Yaphe et ses collaborateurs apportent un éclairage nouveau sur la nature de ces extraits. Ils montrent qu'en fait, ce qui est appelé agars est un mélange de polymères du galactose, sous deux configurations (fig. 15)

- la configuration « galactose » proprement dite, associée ou non à des ions hydrophiles OSO₃
- sans que la proportion de OSO₃ -- ne dépasse 5 % ;

- la configuration « anhydrogalactose » présentant entre les 3e et 6e carbone, un radical hydrophobe CH₂-O. Ces deux monomères sont réunis en une séquence par une liaison oxygène entre le premier carbone du premier monomère et le quatrième carbone du second. La répétition de cette séquence, liée à la suivante par un pont oxygène, forme une longue molécule s'étalant dans l'espace en une spirale lévogyre (elle tourne vers la gauche). C'est du radical hydrophobe (porté par l'anhydrogalactose) que découle l'aptitude à former un gel spontané et réversible (sauf cas exceptionnel). La charge électrique dépend du taux de OSO₃⁻.

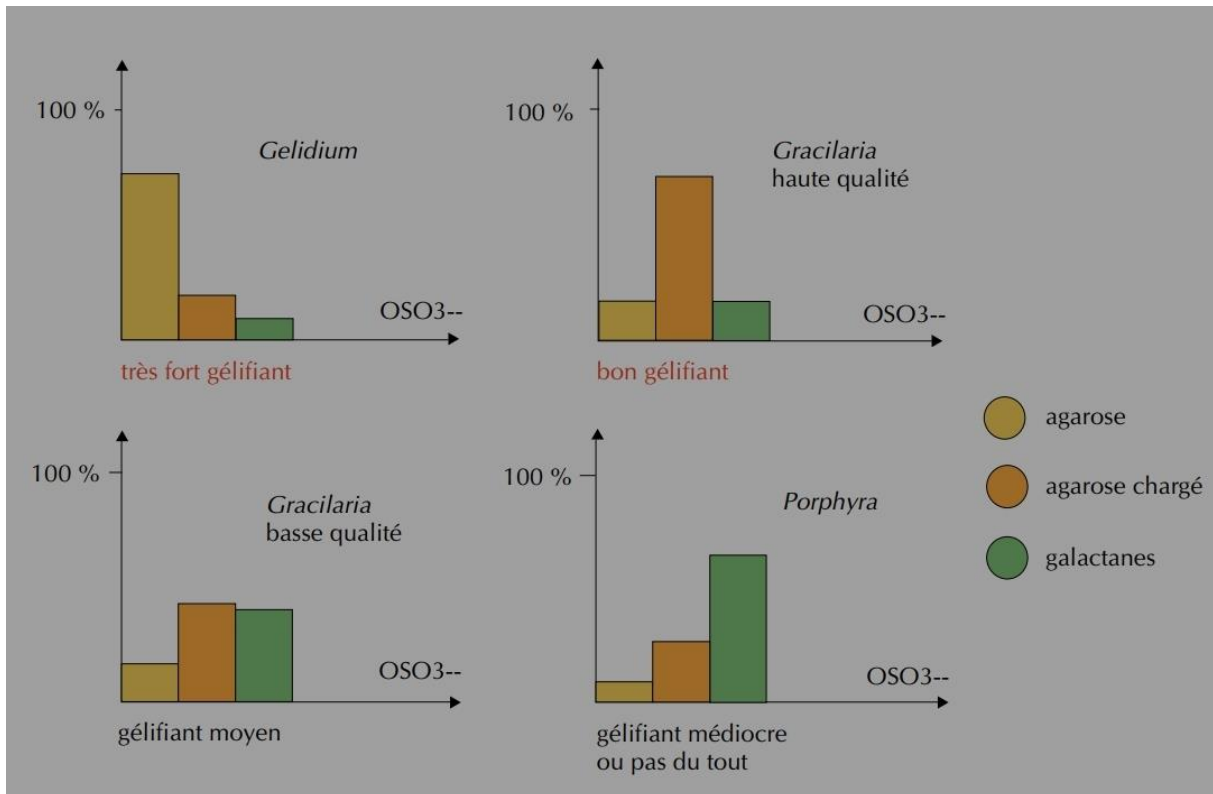


Figure 15 : Mise en évidence de l'existence de plusieurs types d'agars. La substance obtenue par extraction à partir des agarophytes est un mélange de ces types ; sa capacité à gélifier des solutions aqueuses dépend des proportions entre ces différents agars.

1.3. Informations nutritionnelles

Tableau 4 : informations nutritionnelles de l'agar agar (source : table Ciqual des aliments) :

Constituant	Teneur moyenne	Teneur pour 2g de poudre
Energie, Règlement UE N° 1169/2011 (kJ/100g)	121	2,42
Energie, Règlement UE N° 1169/2011 (kcal/100g)	28,4	0,568
Eau (g/100g)	91,3	1,826
Protéines (g/100g)	0,54	0,011
Glucides (g/100g)	6,25	0,125
Lipides (g/100g)	0,03	0
Sucres (g/100g)	0,28	0,006
Fibres alimentaires (g/100g)	0,5	0,01
AG saturés (g/100g)	0,006	0,00012
Calcium (mg/100g)	54	1,08
Fer (mg/100g)	1,86	0,037
Magnésium (mg/100g)	67	1,34
Potassium (mg/100g)	226	4,52
Vitamine B9 ou Folates totaux (µg/100g)	85	1,7

1.4 Emploi et préparation avec l'agar :

Parce que l'Agar ne fond pas à la même température qu'il gèle, on peut chauffer longtemps l'Agar et le maintenir solide à haute température dans une gelée (jusqu'à plus de 70°C) ou au contraire s'il a fondu (jusqu'à 95°C), on peut le maintenir liquide jusqu'à la température de 40°-50°C. On peut ainsi le conserver longtemps sous une forme non figée lorsqu'on prépare une écume (espuma) chaude, une chantilly sucrée ou salée. Ou encore de réchauffer une mousse stable pour une dégustation chaude. Grâce à l'Agar on peut déguster une mousse produite au dernier moment à partir d'une crème conservée chaude au bain marie, versée sur une assiette chaude, un toast, une soupe ou un café liégeois. L'Agar produit néanmoins un gel réversible à la chaleur : on peut toujours refaire fondre un gel et le rendre coulant. On peut donc préconiser

l'Agar en particulier dans le remplacement des gélatines (employer 2 à 3 fois moins d'Agar) ou des pectines (jusqu'à 10 fois moins) soit par exemple entre 2 et 10 g par litre (augmenter légèrement que si le produit est très acide et si l'Agar est en particulier mis en place dès le début de la préparation).

A : Préparation

L'Agar est une poudre blanche pratiquement inodore. La mélanger avec 3 à 5 fois son poids en sucre (glucose, maltose ou saccharose) afin de faciliter sa dispersion. Le produit s'hydrate mais ne se solubilise que quand la température dépasse 90°C. Il est préférable d'incorporer l'Agar à la fin de la préparation. On peut aussi préparer un concentré d'Agar (peu visqueux à chaud) ce qui garantit une bonne solubilisation puis l'incorporer dans la préparation en prenant soin de ne pas refroidir subitement l'Agar ou en remuant bien ce qui empêche une prise en bloc.

Il est aussi possible de broyer un gel d'Agar après sa prise en gel pour un onctueux résistant à la chaleur. Pour augmenter l'élasticité et la cohésion du gel, combiner l'Agar avec du Konjac ou de la Tara. Un fort indice brix (>60% sucre) peut aussi augmenter la force du gel d'Agar (résistance au doigt).

B : Les Rhodophycées Agarophytes :

Les agarophytes sont des algues, généralement des algues rouges, qui produit la gélose hydrocolloïde dans ses parois cellulaires. Cette gélose peut être récoltée dans le commerce pour une utilisation dans des expériences biologiques et la culture. Dans certains pays (en particulier dans le monde en développement), la récolte d'agarophytes, que ce soit sous forme de stocks naturels ou de culture, revêt une importance économique considérable. Les genres notables d'agarophytes commercialement exploités comprennent *Gracilaria* et *Gelidium*. (Williams, Peter W.; Phillips, Glyn O. (2000)).

Les deux principales catégories d'agarophytes appartiennent :

- A l'ordre des Gigartinales (105 000 t), notamment *Gracilaria verrucosa*, *Gracilaria multipartita*, *Gracilaria gracilis* (fig. 16).



Figure 16 : Séchage sur fils des *Gracilaria gracilis* récoltés au Chili après culture.

Les thalles peuvent être régulièrement secoués pour faire tomber le sable et les graviers.

- A l'ordre des Gelidiales (38 500 ton frais) en particulier les *Gelidium* (44 % du tonnage), comme *Gelidium sesquipedale* dans le sud de la France et sur les rivages ibériques, *Gelidium latifolium* au Maroc, *Gelidium amansii* au Japon, *Gelidium pacificum* aux États-Unis. Sont également liées à ce groupe les espèces des genres *Pterocladia* et *Gelidiella* (3 %) (fig. 17).



Figure 17 : Ramassage de nuit des thalles de *Gelidium sesquipedale* après les tempêtes d'hiver sur les côtes du pays Basque.

Ici, les récoltants ont attendu que les végétaux soient déposés sur le rivage par la marée. Simultanément, d'autres utilisent de petites embarcations traînant un filet pour capturer les épaves de *Gelidium* en mer.

La carte mondiale permet de localiser les aires de répartition de ces différentes espèces (168 500 t d'agarophytes en frais). Certaines constituent des peuplements abondants comme *Gelidium sesquipedale*, d'autres des peuplements très localisés.

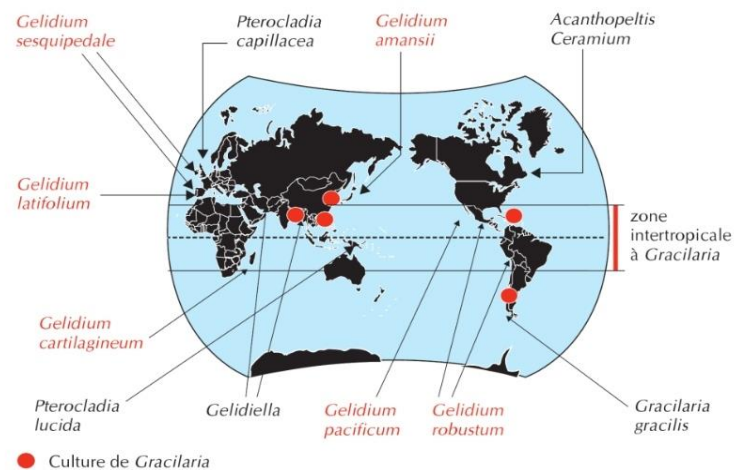


Figure 18 : Origine des principaux agarophytes utilisés pour l'extraction des agars.

Il n'existe pas de culture de *Gelidium*. Les cultures de *Gracilaria verrucosa* et de *G. gracilis* sont principalement situées dans la zone intertropicale.

Mais, les agarophytes de qualité (Gélidiales) sont relativement rares ; aussi, aucune source n'est dédaignée, même s'il s'agit de faibles quantités (5 ou 10).

Quelques espèces de l'ordre des Cériamiales comme *Ceramium*, *Gloiopeltis* ou encore de l'ordre des Bangiales comme *Porphyra* ne donnent des agars qu'en cas d'extraction alcaline.

Tableau 5 : Teneurs en agars de quelques agarophytes,

Espèce	Teneur en % de matière sèche
<i>Gelidium robustum</i>	21 à 38
<i>Gelidium amansi</i>	26 à 40
<i>Gelidium sesquipedale</i>	27 à 42
<i>Gelidium latifolium</i>	27 à 38

<i>Gracilaria verrucosa</i>	27 à 31
<i>Gracilaria gracilis</i>	38 à 42

On ne peut parler que de teneur moyenne car celle-ci dépend largement des variations climatiques, des variétés concernées et du mode d'extraction (TSENG (C.K.), 1980).

1.5. Localisation cellulaire et composition chimique

Les agars sont des constituants des parois cellulaires, localisés dans la matrice amorphe. On les trouve dans tous les tissus, à la fois dans les cellules corticales et dans les cellules médullaires des thalles. Les agars sont des galactanes, c'est-à-dire des polymères de galactose. Celui-ci se présente sous deux formes : le β -D-galactose, associé ou non à des ions sulfate, et le α -L-galactose existant le plus souvent sous la forme d'anhydrogalactose, portant un pont oxygène hydrophobe entre le 3e et le 6e carbone.

Les monomères sont liés entre eux par des liaisons osidiques β (1-4) et α (1-3) selon un motif de base [... 3 D-galactose β (1-4) L-galactose α 1...] reproduit n fois. Ils constituent de longues chaînes de galactane non ramifiées, de masse moléculaire > 1000 kDa, dont la configuration spatiale est une hélice. L'introduction de D-galactose sulfaté entraîne des irrégularités dans l'hélice. La proportion d'anhydrogalactose et de galactose sulfaté est variable selon les types d'agars, mais la teneur globale en anhydrogalactose est élevée et celle en galactose sulfaté est toujours inférieure à 5% (TSENG (C.K.), 1984).

1.6 Le mécanisme de gélification (fig. 19)

Considérons deux molécules A et B de ce gel en fusion avec leurs radicaux hydrophobes représentés chacun par un point rouge. Pour isoler ces radicaux du milieu liquide, les deux molécules se placent parallèlement l'une à l'autre, les radicaux hydrophobes tournés vers l'intérieur et cherchant à expulser l'eau (phénomène de synérèse) de l'espace situé entre les parallèles. Il s'en suit un rapprochement entre les molécules A et B à tel point que naissent entre elles des liaisons hydrogène. L'ensemble crée ainsi un réseau qui immobilise l'eau en un gel, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir ou d'ajouter une quelconque substance. Les radicaux hydrophiles OSO_3^- et leurs charges négatives ne sont pas assez nombreux (moins de 5 %) pour s'opposer à ce mouvement.

1.7. Les types d'agars :

Les études précisent qu'il existe trois grands types d'agars :

1.7.1. Les types « agarose » :

Ils sont caractérisés par la présence de nombreux radicaux hydrophobes et d'un nombre peu élevé de radicaux hydrophiles (OSO); presque neutres du point de vue électrique, ils donneront spontanément des gels de haute qualité.

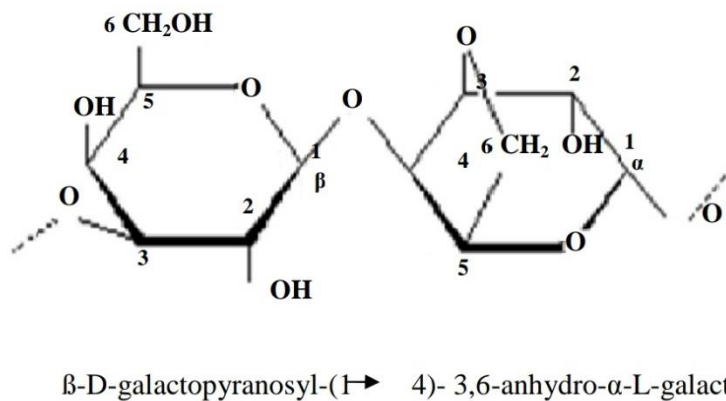


Figure 19 : Structure de l'agarobiose (Chen et al.2004).

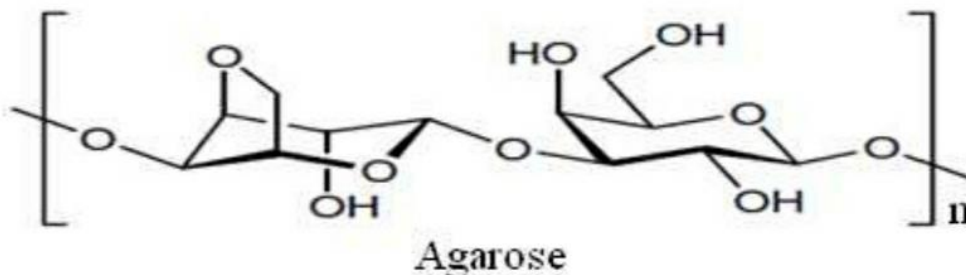


Figure 20 : Structure de l'agarose (Kohajdová & karovičová ; 2009).

1.7.2. Les types « agarose chargé » :

Ils possèdent moins de radicaux hydrophobes et plus de radicaux hydrophiles OSO: le rapprochement de A et B aura lieu, mais pas autant que dans le cas précédent, car les radicaux OSO3 tentent de s'opposer à ce rapprochement. Il s'établit des liaisons hydrogène entre les molécules, mais moins que pour les types agarose. Le gel obtenu sera souple, de qualité moyenne.

1.7.3. Les types « galactanes » :

Les substances de ce groupe possèdent beaucoup de OSO, (cependant moins de 5 %) et relativement peu de radicaux hydrophobes : un rapprochement de A et B pourra avoir lieu, suffisamment pour que seules quelques liaisons hydrogène s'établissent : il y aura alors formation d'un gel médiocre.

Les agars obtenus par extraction sont en fait un mélange de ces trois types ; leurs propriétés dépendent des proportions entre ces trois composants. Que l'agarose domine et le gel sera plutôt dur, de haute qualité ; c'est le cas des extraits de *Gelidium*, de *Pterocladia* et de *Gelidiella*.

Si la partie principale est composée d'« agarose chargé », le gel sera souple et fragile, comme celui obtenu à partir des *Gracilaria*.

Si la phase prépondérante appartient au type « galactane », le gel sera médiocre. Dans ce dernier cas et dans le cas de *Gracilaria*, il est généralement nécessaire de réaliser une extraction alcaline. Celle-ci a pour but d'augmenter la quantité de radicaux hydrophobes : c'est ainsi que l'on améliore les qualités du gel de *Gracilaria*. C'est également ainsi que des espèces comme *Porphyra*, *Bangia*, *Gloiopeltis*, *Ceramium*, qui ne donnent pas de gel par extraction classique, peuvent libérer après extraction alcaline une substance gélifiante.

La proportion relative de ces trois types moléculaires est variable: l'agarose représente 72% des agars des *Gelidium* et seulement 16% des agars des *Gracilaria*; les agaroses chargés et les galactanes représentent respectivement 20% et 8% des agars de *Gelidium* contre 42-72% et 16- 42 % des agars des *Gracilaria*.

1.8 La description de l'agar :

L'agar-agar se présente le plus souvent sous 3 formes : paillettes, de granules, ou encore en fines bandes. Elles sont toutes aussi efficaces les unes que les autres. La seule différence est la facilité de préparation.

Tableau 6 : Source et forme de l'agar (Bixler & Porse, 2010).

Localisation	Volume (t)	(%)
<i>Gelidium</i>		
Poudre	1,550	16
Carreaux	200	2
Bandelette	200	2
<i>Gracilaria</i>		
poudre	7,650	80
Total	9600	100

1.9 Les propriétés des agars

Les agars sont insolubles dans l'eau froide et soluble dans l'eau chaude à partir de 85°C. Ils forment alors une solution visqueuse qui donne spontanément un gel en refroidissant. Le gel obtenu est translucide, sans goût ni odeur. Il est thermoréversible, c'est-à-dire qu'il se transforme à nouveau en solution visqueuse par chauffage et redonne le même gel en refroidissant ; et cela un nombre de fois illimité. Dans ce gel, les zones de jonction sont des doubles hélices regroupées, de 7 à 11 selon les agars.

L'aptitude des agars à former un gel repose sur l'existence du pont oxygène hydrophobe de l'anhydrogalactose. Les molécules de la solution visqueuse sont réparties de façon aléatoire à cause de l'agitation moléculaire élevée (température > 85 °C). Pendant le refroidissement, les molécules en hélice se placent parallèlement face à face, de sorte que leurs radicaux hydrophobes se rapprochent et chassent l'eau (phénomène de synérèse). Lorsque les chaînes sont suffisamment proches, des liaisons hydrogène se créent entre les radicaux et forment des zones de jonctions intermoléculaires. Les groupements sulfate qui sont chargés négativement sont trop peu nombreux pour s'opposer à ce mouvement de rapprochement moléculaire. Suivant la proportion relative des radicaux hydrophobes et des groupements anioniques sulfate, le rapprochement des chaînes est plus ou moins important et les gels plus ou moins solides. Ainsi, pour l'agarose, dont la proportion en anhydrogalactose est élevée, les gels sont rigides et de grande qualité (cas des *agars* extraits de *Gelidium*). Pour l'agarose chargé, les gels sont souples et de qualité moyenne et pour les galactanes, pauvres en anhydrogalactose et relativement riches en galactose sulfaté, les gels sont de qualité médiocre (cas des agars de *Gracilaria* et *Porphyra*) (TSENG (C.K.), 1980).

Lorsque les galactanes sont en majorité, on procède à une extraction alcaline qui permet d'augmenter la proportion de radicaux hydrophobes et ainsi d'améliorer la qualité du gel. La qualité des agars dépend d'un certain nombre de facteurs : le degré de polymérisation (DP) propre à l'espèce utilisée, le moment et le lieu de la récolte, le mode de conservation. On peut estimer la force d'un gel grâce à certains appareils qui mesurent la force de rupture. On classe ainsi les gels selon leur qualité.

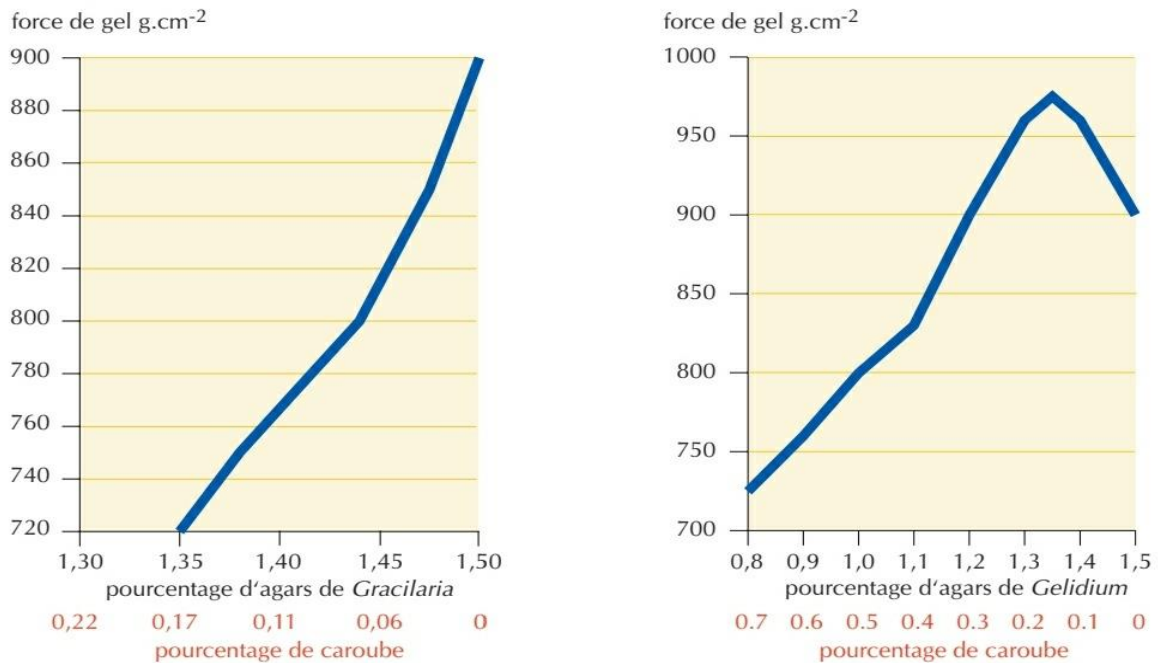


Figure 21 : Variation de la force du gel d'agars en fonction des ingrédients qui y sont incorporés avant la gélification (CAIRNS-SMITH (A)).

Tableau 7 : Classification commerciale des agars selon leur force de gel (Perèz, 2009).

Force de gel (g/cm ²)	Qualité	Espèce
1000 à 1200	EXTRAT	Gelidium sesquipedale Gelidium amansii
600 à 900	HAUTE	Gelidium latifolium gélidiales comme Gelidiella
400 à 600	Moyenne	Gracilaria gracilis Gmcilaria verrucosa
Moins de 350	Médiocre	Gmcilaria verrucosa Porphyra

1.10 L'évolution du marché (TSENG (C.K.), 1980).

Il y a depuis 1990 un changement radical dans la stratégie d'approvisionnement. Jusqu'à présent, les extraits étaient produits en quantité limitée (7 000 à 9 000 t par an) en raison du manque d'agarophytes. La demande étant forte et les produits de haute qualité trop rares, les agars étaient restés les plus chers des phycocolloïdes, donc les moins compétitifs. On leur préférait souvent les gels d'alginate ou de carraghénanes. Mais, la situation tend à s'inverser pour deux raisons :

1. L'extraction alcaline ou bien L'extraction classique : Utilisée surtout pour les gélidiales, elle comprend trois grandes étapes :
 - La première regroupe plusieurs rinçages des thalles, successivement dans l'eau douce, dans un milieu acide, puis un milieu faiblement alcalinisé et chauffé à 60 °C permettant l'élimination de nombreuses substances dont les pigments rouges.
 - La deuxième étape permet le découpage des molécules, très longues et insolubles, en tronçons plus petits, solubles dans l'eau chaude. Elle se fait par macération et brassage sous pression, pendant plusieurs heures, dans l'eau à température >120 °C. Cette étape essentielle doit être parfaitement contrôlée, grâce à des tests préliminaires, afin de

permettre un découpage correct des molécules tout en préservant leur propriété gélifiante.

- La troisième étape débute par une filtration permettant de séparer les *agars* de la phase liquide. Elle est réalisée par pressage au travers d'une toile. On récolte ainsi une phase liquide qui ne contient que 1 % d'agar. La filtration est alors complétée par diverses opérations visant à concentrer progressivement l'agar par élimination de l'eau. Celle-ci s'effectue par simple pressage ou par une succession d'étapes de congélation/décongélation. Le gel est ensuite broyé finement puis asséché pour former une poudre.

L'extraction alcaline est utilisée pour les agars de qualité médiocre. Les thalles sont placés dans une solution de soude (NaOH) à 7%, chauffée à 90°C pendant 3 heures. Ce traitement permet d'éliminer une partie des groupements sulfate du galactose et de les remplacer par des ponts oxygène hydrophobes, ce qui améliore le pouvoir gélifiant. Les étapes suivantes sont communes à celles de l'extraction classique.

2. La culture de *Gracilaria* par bouturage se développe dans beaucoup de régions intertropicales : Thaïlande, Viêtnam, Chine, Taïwan, Chili, Indonésie, Caraïbes, Sud-Est africain. Le prix de la biomasse devrait donc baisser, rendant les agars moins coûteux et, de ce fait, plus compétitifs sur le marché des colloïdes.

Il est aisé de produire *Gracilaria* par bouturage. En revanche, la culture des *Gélidiales* pose encore de sérieux problèmes. Les tentatives réalisées au Japon, sur fond naturel ou artificiel, n'ont donné aucun résultat.

Les nombreux essais effectués en Espagne ont été décevants : en culture *Gelidium sesquipedale* modifie son métabolisme. Au lieu de donner un axe épais, le plant produit par toutes ses extrémités des prolongements très fins ressemblant à des rhizines et contenant des agars du type galactane, sans grande valeur.

1.11 Les consommateurs :

S'il reste encore le plus important producteur d'agars (3 000 t par an), grâce à l'importation de 9 200 t (en sec) d'agarophytes, le Japon est aussi le plus gros consommateur (3 600 t en 1993). Les États-Unis en utilisent, en moyenne de 900 à 1 000 t (930 t en 1993) dont 80 % extraits des *Gracilaria* chiliens et philippins ; ils en importent environ 730t. L'Union européenne achète environ 2 800 t par an.

Tableau 8 : Production et consommation des agars dans le monde en 1994.

Pays	Production	Consommation
	tonnes sèches	tonnes sèches
japon	3000	3600
Corée	2300	500
Espagne	1500	400
chili	1500	190
Portugal	700	370
Maroc	300	170
Taiwan	300	
Argentine	300	225
Chine	200	550
USA	200	930
Mexique	200	90
France	100	130
Allemagne		800
Danemark		100
CEI(Russie)		570
Afrique		200
Océanie		270
Brésil		100
Grande-Bretagne		1000
Italie		150
Total	10600	10375

Il est à prévoir pour les années à venir une élévation sensible (7 à 8 %) de la production du Chili qui exportera moins d'agarophytes mais plus d'agar extraits sur place.

2. Application de l'agar

L'agar-agar se présente en barre, en flocons, en filaments ou en poudre claire un additif très utilisé dans l'industrie agroalimentaire (sous le nom E406, dans les glaces, les crèmes, les bonbons...) très puissant.

On le trouve désormais partout porté par la tendance végétale. Ces vertus varient de celle de la gélatine. Son dosage plus fin, nécessite une certaine maîtrise. 8 fois plus gélifiante que la gélatine à quantités égales, elle donne donc une texture beaucoup plus ferme et surtout cassante rendant son usage limité notamment en haute pâtisserie.

L'agar a de multiples applications, la plus ancienne est celle en industrie alimentaire où 88% de la consommation de l'agar est consacré à ce domaine, les 18% restants sont comptabilisés par les autres applications (Perèz, 2009).

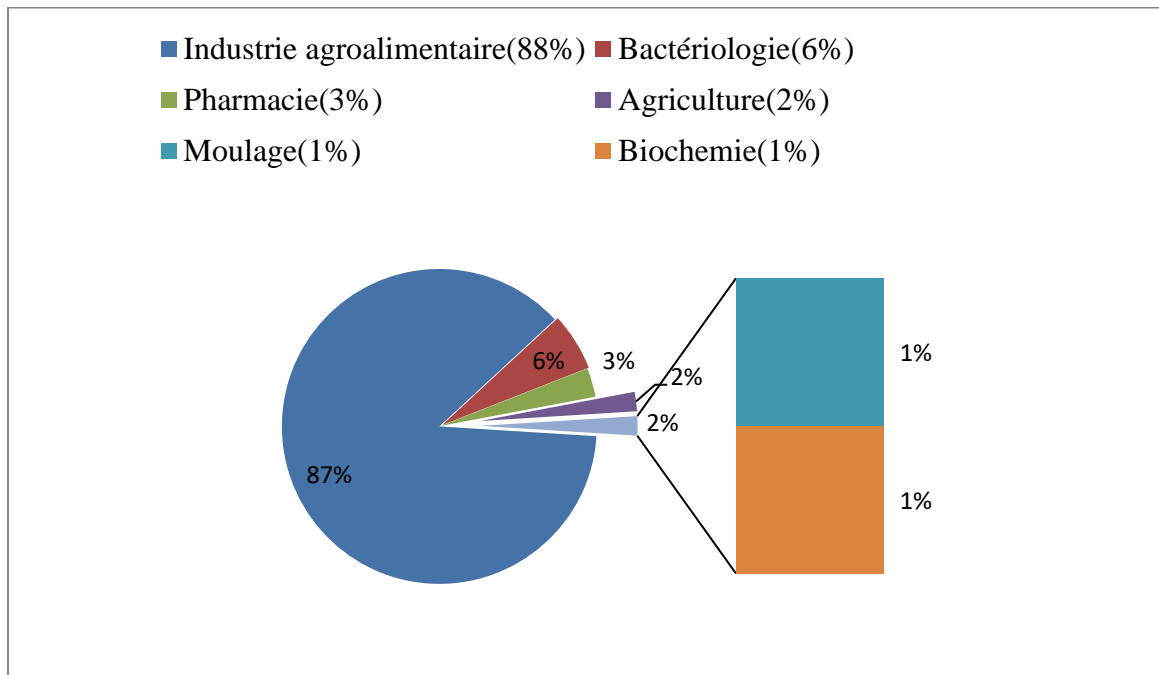


Figure 22 : Les principales applications de l'agar (perèz, 2009).

A. Industrie agro-alimentaire

En 2009, l'industrie agro-alimentaire a consommé 8700 t d'agar (Bixler & Porse, 2010). l'agar-agar permet de brûler des calories. Evidemment, incorporé à des desserts forts en glucides ou lipides, ses effets s'estompent mais c'est déjà de pris. Du côté de sa digestion, les nouvelles sont bonnes aussi : il n'est pas digéré dans l'estomac et l'intestin et il est peu fermentescible. Ses propriétés laxatives sont d'ailleurs prouvées pour lutter contre les troubles intestinaux (Perèz, 2009).

L'agar-agar est le gélifiant le plus ferme qui existe à ce jour. Outre les végétariens, les amateurs de bio y recourent souvent... car il existe désormais de l'agar-agar bio. D'ailleurs, le bio devient aussi un enjeu phare dans l'algoculture de façon générale. Manger des algues ne suffit plus, gage de qualité, les algues comestibles issues d'exploitations biologiques commencent à grignoter des points de croissance. Là aussi, les industriels de l'agroalimentaire ont fort à parier.

L'agar est résistant à l'hydrolyse à des pH normaux mais il peut être hydrolysé par l'acide à des hautes températures. Dans le cas le pH juste avant le refroidissement (Amersèn, 1997). Les applications alimentaires de l'agar sont :

B. La confiserie :

L'agar agar s'utilise dans les confitures, pour son pouvoir gélifiant si les fruits contiennent peu de pectine, ou encore pour diminuer la quantité de sucre (c'est d'ailleurs comme cela que les industriels fabriquent leur confiture allégée!). La confiture ainsi allégée en sucre se conservera moins longtemps (3 mois, et 3 semaines une fois le pot ouvert) mais sera beaucoup moins calorique ! Le principe est le même pour les pâtes de fruits.



Figure 23 : l'agar-agar en poudre.

En général l'agar évite la déshydratation des prestations comme les caramels et les gommes (Garon-Lardière, 2004).

C. Desserts laitiers

L'agar est utilisé pour stabiliser les sorbets et les glaces. Il améliore la texture des produits laitiers comme :

- Crème, crème fouettée "tapping";
- Mousses desserts en poudre à préparer, crèmes pâtisseries
- Fromages fondus et à tartiner. (Fabienne GOULARD, 23/05/17).

D. Boisson

L'agar est utilisé dans le collage des vins, des jus de fruits, et des vinaigres. Il est plus efficace que la gélatine puisqu'il retire moins de tannins (Stewart, 1963).

Vous pouvez vous préparer une boisson " coupe faim " 20 à 30 minutes environ avant une période que vous savez " dangereuse " au niveau des compulsions alimentaires. Il suffit donc de diluer 1 g d'agar-agar dans une boisson de +/-200-250 ml (thé, café, potage, ...), de la porter à ébullition pendant 2-3 minutes puis de la boire ensuite. Ce gélifiant naturel ne changera ni le goût, ni l'odeur, ni la texture de votre boisson coupe faim, pour autant que vous la consommiez bien chaude (au-dessus de 40°C car c'est sous cette température que la gélification commence !). Cette boisson va ainsi gélifier dans votre estomac et induire un effet de satiété, qui réduira vos fringales ou limitera votre appétit.

Il est conseillé de **ne pas** dépasser la dose de 2g d'agar-agar par jour (donc 2 boissons coupe faim/jour) car il s'agit d'une fibre soluble qui, au-delà de ces 2g par jour pourrait induire un effet laxatif (Céline de Sart19/07/2016).

E. Pâtisserie :

L'agar est utilisé comme stabilisateur dans les garnitures des tartes telles que les glaces, les nappages, les meringues, les mousses, les fourrages et les gelées (Nussinovitch, 1997).

La première chose à savoir est que **l'agar-agar ne supporte pas la congélation**, votre préparation rendra beaucoup d'eau à la décongélation. N'essayez donc pas de remplacer de la gélatine dans une mousse que vous devez faire prendre au congélateur.

L'agar-agar doit être cuit au moins 30 secondes dans une préparation bouillante pour que son pouvoir gélifiant soit activé.

A la question peut-on remplacer de la gélatine par de l'agar-agar ? La réponse est oui sauf dans un gâteau qui doit passer au congélateur, ce qui est un souci puisque la plupart des entremets sont figés au congélateur pour pouvoir ensuite être glacé (Maxime Huss, 14/06/2018).

F. Application en bactériologie

Le gélifiant le plus utilisé est l'agar-agar ou gélose : il s'agit d'un poly galactoside sulfaté présentant la propriété de former avec l'eau un gel solide à une température inférieure à environ 60 °C tout en étant liquéfiable par ébullition, auquel cas, il reste en surfusion (liquide) jusqu'aux environs de 45°C. D'autre part, très peu de micro-organismes sont capables d'hydrolyser l'agar. Il s'agit donc du procédé le plus utilisé pour fabriquer des milieux solides, l'addition de diverses autres molécules ne posant aucun problème particulier dans ce milieu aqueux. Les milieux solides destinés à être coulés en boîte de Pétri ou en tube ont une teneur en gélose assez élevée (15 g.L⁻¹) tandis que les géloses molles ou semi-solides sont peu gélosées (3 à 5 g.L⁻¹) et présentent une consistance intermédiaire (Chiraz, 23/05/2017).

Le mucilage extrait à chaud de ces algues donne après purification, déshydratation et broyage la poudre d'agar-agar utilisée essentiellement pour gélifier un grand nombre de produits alimentaires mais aussi les milieux de culture pour les micro-organismes ou les cultures in vitro.

G. Applications en biotechnologie :

La biotechnologie est un domaine clairement multidisciplinaire impliquant la biochimie, la biologie moléculaire, la génétique, l'immunologie, la microbiologie, la pharmacologie, la fermentation, l'agriculture, pour ne citer que quelques-uns et ceci grâce aux caractéristiques suivantes :

- ✓ L'agar est neutre du point de vue chimique et n'interfère pas avec les composants du milieu de culture des microorganismes et des tissus végétaux et animaux. Il n'affecte ni la migration des molécules ni la croissance des cellules.
- ✓ Il possède une macroporosité qui convient parfaitement à la migration des grosses molécules (Imerson, 2011).
- ✓ L'agar forme un gel relativement transparent, ce qui facilite le repérage des colonies et des réactions antigène/anticorps.

- ✓ Contrairement à la gélatine, l'agar a l'avantage de ne pas être hydrolysé par les bactéries et les champignons (Nussinovitch, 2010).

Il est également utilisé en chimie pour la création de jonctions électrolytiques (ou « ponts ioniques ») dans les piles d'étude de couple rédox. Ce support gélifié est baigné le plus souvent par une solution de chlorure de potassium (KCl), ces ions n'interférant qu'avec peu de couples rédox. Il peut aussi servir de milieu de croissance de cristaux nécessitant très peu de perturbation

H. Applications en pharmacologie

Les agars sont très utilisés comme excipients dans l'industrie pharmaceutique comme gélifiants, stabilisants et épaississants. 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-faim (B. CHAUVEL, Y-L. TURPIN). Aujourd'hui, l'agar est inclus dans le formulaire national américain pour être utilisé comme un ingrédient à libération lente pour l'absorption lente des agents pharmacologiques (Amersèn et al, 2000), il est aussi utilisé comme véhicule pour les antibiotiques hydrosolubles (Stewart, 1963).

I. Application en l'agriculture :

Les recherches sont en cours afin d'utiliser les agars comme bio-engrais permettant d'améliorer la croissance des plantes cultivées mais également de renforcer leur défense naturelle contre les agresseurs extérieurs (parasites, champignons, bactéries) (Brevet, 23/07/2017).

J. En médecine :

L'agar est un matériau possédant des caractéristiques acoustiques similaires à celles de l'eau. Il peut servir comme fantôme pour des évaluations ultrasonores principalement en échographie (Bouakkaz et al. 1994).

L'agar-agar étant une source hydrophile riche en fibres stimulant le transit intestinal, il peut réduire l'absorption de certains médicaments et compléments alimentaires si ces derniers sont pris simultanément :

- **Statines** : il a été montré chez l'humain que l'agar-agar diminue les taux sanguins de cholestérol, et peut donc accentuer les effets inhibiteurs des statines sur les niveaux de cholestérol.
- **Antinéoplasiques** : l'agar-agar peut bloquer les propriétés des antinéoplasiques (médicaments anticancéreux). En effet, les études chez l'animal ont montré que l'agar-agar stimule le développement des tumeurs.
- **Divers** : l'agar-agar peut favoriser les effets de médicaments ou suppléments indiqués dans le traitement de l'obésité. En effet, les études chez l'humain ont montré que l'agar-agar peut avoir des propriétés amaigrissantes.
- **Antioxydants et laxatifs** : l'agar-agar peut avoir des effets additifs sur des composés ayant des propriétés antioxydants ou laxatives.
- **Zinc** : l'agar-agar pourrait augmenter l'effet du zinc en augmentant son absorption.
- (IUGM Juin 2012)

K. En cosmétologie :

Les agars servent d'excipient dans les dentifrices, ou encore de gélifiant dans les crèmes (Garon-lardière, 2004).

Quelques arguments publicitaires concernant les propriétés cosmétiques...

Masques (soins du visage), pâtes dentifrices, sirops, lotions, pommades (traitement brûlures et blessures), compresses, pansements gastriques, empreintes dentaires, coupe-faim, absorbants pour les couches de bébés Substances anticoagulantes (fucoïdine, laminarine)

- **Visage**: rôle anti-âge Masque aux algues : freiner la perte de collagène et prévenir le vieillissement cutané Hydratation de la peau, revitalisation de l'épiderme, repose les traits
- **Silhouette**: effet amincissant Peau douce et ferme Propriétés drainantes et raffermissantes Ex.: algues brunes (protéines, iode) : dynamisent le métabolisme cellulaire et activent la combustion des graisses
- **Epiderme**: fonction hydratante Les algues contiennent des molécules qui leur permettent de lutter contre la dessiccation et les changements de température
- **Cheveux** : action régénératrice Renforcent la kératine des cheveux car très concentrées en calcium Redonnent vigueur et éclat aux chevelures fragiles terne et fatiguées (vitamines, oligo-éléments)
- **Forme**: pouvoir relaxant.

L. L'immunologie

Pour la détection et l'étude du matériel génétique, les gels d'agarose présentent trois atouts principaux : ils possèdent une macroporosité qui convient parfaitement à la migration des grosses molécules que sont les anticorps ; ils sont neutres du point de vue chimique et n'interfèrent ni avec l'antigène, ni avec l'anticorps ; ils sont clairs, ce qui facilite le repérage de la précipitante (précipité obtenu quand l'antigène rencontre l'anticorps).

M. La biochimie :

Des laboratoires spécialisés utilisent aussi des « capsules » ou des « perles » d'agarose pour y fixer des principes actifs sans pour autant empêcher ces derniers d'agir : Ils créent par exemple, des « filtres » à la demande, fabriqués pour retenir telle ou telle substance lors d'hémoperfusions. La technique, remarquable par son efficacité, a servi maintes fois à sauver des patients victimes d'overdose 25, Cette dernière application ne demande pas de grandes quantités d'agar ou d'agarose, mais son impact est de tout premier ordre. Elle ne cessera de se développer au fur et à mesure du développement du génie médical.

N. Les autres utilisations

Les agars sont aussi employés dans de nombreux domaines particuliers, par exemple pour lubrifier certaines pièces intervenant dans la fabrication du tungstène, du tantale, du graphite, de l'aluminium ou devant être en contact avec des milieux caustiques.

Mélangés à la gélatine ils permettent la fabrication de films ultra-sensibles. On envisage actuellement conserves et des conteneurs en carton destinés à transporter des liquides 26, de telle sorte que le soit contact avec le métal ou le carton. C'est là, une voie très prometteuse qui exigera un agar à moyenne force de gel, mais à un coût inférieur à celui des agars actuels. La culture de *Gracilaria*, en abaissant le prix de la matière première végétale, pourrait permettre d'y parvenir.

L'agar trouve une application dans les domaines où la haute précision de moulage est demandée. Il est utilisé pour préparer des moules dentaires, des moules de pièces archéologiques, des moules pour les sculptures ou pour préserver les empreintes dans le domaine de criminologie (Meer, 1980).

Parmi ses nombreux avantages de ce produit végétal, notons qu'il est :

- Antibactérien : il prolonge le temps de conservation des préparations culinaires ;
- Économique : très peu d'agar-agar permet d'obtenir la consistance souhaitée ;
- Un bon substitut du sucre dont on peut diminuer le dosage dans les flans, entremets, confitures, marmelades, mousses ;
- Acalorique : il ne contient aucune calorie ;
- Sans goût ni odeur ;
- Peu fermentescible ;
- Doté de propriétés laxatives qui permettent de relancer le transit intestinal.

3. Production et extraction de l'agar-agar

3.1.Définition :

Les agars conduisent à un gel translucide, sans goût, ni odeur. Ils peuvent donc être utilisés pour gélifier les produits alimentaires sans altérer la couleur et la saveur de ces derniers. Ils rehaussent le goût originel et fixent l'arôme, donnent de l'éclat. Ils ont une excellente

réversibilité : on peut les faire fondre et les faire gélifier de façon répétitive sans baisse de qualité. Ils supportent un traitement thermique au-dessus de 100 °C, ce qui permet de les employer dans des préparations à stériliser à chaud. Ils sont stables dans une large gamme de pH (< 5 - 8>). Une solution à 1,5 % gélifie entre 34 et 38 °C pour les agars de *Gelidium*, entre 40 et 53 °C pour ceux de *Gracilaria*. En outre, aucun réactif n'est nécessaire pour les conserver indéfiniment. La fusion a lieu à partir de 85 °C. La différence entre la température de gélification et celle de fusion constitue le phénomène d'hystérésis. Ce caractère est exceptionnel. Lors de la gélification, les liaisons hydrogène se forment et se renforcent de plus en plus de telle manière que, malgré l'élévation de la température, les associations de molécules par paire résistent fortement à la séparation. Il faut un mouvement brownien très puissant pour parvenir à les séparer (celui provoqué par une température supérieure à 85 °C).

L'agar-agar peut être extrait de différentes variétés d'algues rouges. Ces variétés sont essentiellement des genres *Gelidium* et *Pterocladia*. L'extraction se fait en plusieurs étapes : deux étapes permettent d'obtenir une "bouillie" qui filtrée, séchée et broyée donnera la poudre d'agar agar. Le mucilage extrait à chaud de ces algues donne après purification, déshydratation et broyage la poudre d'agar-agar

Comme nous l'avons dit précédemment, l'agar agar est obtenu à partir d'algues rouges appartenant à la famille Gracilariaceae (espèce *Gracilaria*), ou Gelidiaceae (espèce *Gelidium*).

3.2. Production de l'agar agar à partir de l'algue rouge :

L'agar-agar peut être extrait de différentes variétés d'algues rouges. Ces variétés sont essentiellement des genres *Gelidium* et *Pterocladia*. L'extraction se fait en plusieurs étapes : deux étapes permettent d'obtenir une "bouillie" qui filtrée, séchée et broyée donnera la poudre d'agar agar. Le mucilage extrait à chaud de ces algues donne après purification, déshydratation et broyage la poudre d'agar-agar.

Comme nous l'avons dit précédemment, l'agar agar est obtenu à partir d'algues rouges appartenant à la famille Gracilariaceae (espèce *Gracilaria*), ou Gelidiaceae (espèce *Gelidium*).

La production d'agar agar se réalise en plusieurs étapes, bien distinctes :

- Tout d'abord, il s'agit de récolter les algues source d'agar agar.

Voici les techniques de récolte industrielles de ces algues :

- la collecte des algues échouées sur le rivage
- la collecte des algues en les coupant ou en les extirpant de leur lit

- la culture

- Ensuite, il faut que l'échantillon d'algues dont sera extrait l'agar agar soit pur, et débarrassé de toutes impuretés.

Pour cela, les algues doivent être trempées dans de l'eau fraîche pendant au moins deux heures (avec agitation), pour éliminer les traces de terre et de sable qui sont ensuite décantés, filtrés, séchés et pesés séparément.

- **Rinçage :** Les algues doivent ensuite être séparées manuellement de toutes les autres matières, telles les sédiments, roches, coquillages, divers débris végétaux (comme des traces d'autres algues), mais aussi des traces de bois ou de plastique.... Puis elles sont lavées avec de l'eau. Ensuite, une fois nettoyées, et séchées à l'étuve à 65 °C, elles sont pesées.

On peut ainsi déterminer le pourcentage de l'échantillon d'algue, dit pur.

- Pour une extraction industrielle, l'algue est encore rincée trois fois : le premier rinçage se fait à l'eau douce, le deuxième en milieu acide, le troisième en milieu basique. Au cours de ces rinçages, de nombreuses substances sont éliminées dont le pigment rouge. Le végétal prend alors une coloration verte.
- **Dissolution :** Ensuite, une dissolution est réalisée. Puis la plante est mise à macérer à 127°C pendant 3h dans de l'eau douce. Le brassage final conduit alors à une bouillie verdâtre.
- **Filtration :** Le liquide est ensuite filtré à travers un tissu. Le filtrat est ensuite refroidi pour lui permettre de gélifier. Cette congélation est suivie d'un pressage.
- **Séchage et réduction en poudre :** le filtrat obtenu est refroidi ce qui lui permet de gélifier. Le gel est ensuite déshydraté par pressage ou congélation décongélation. Puis il est séché à l'air chaud ou au soleil avant d'être réduit en poudre. On peut trouver des formes non broyées : en fines bandes agglutinées membraneuses, en granules ou en paillettes.

Ce long processus permet ainsi de transformer ces algues rouges en poudre d'agar agar.

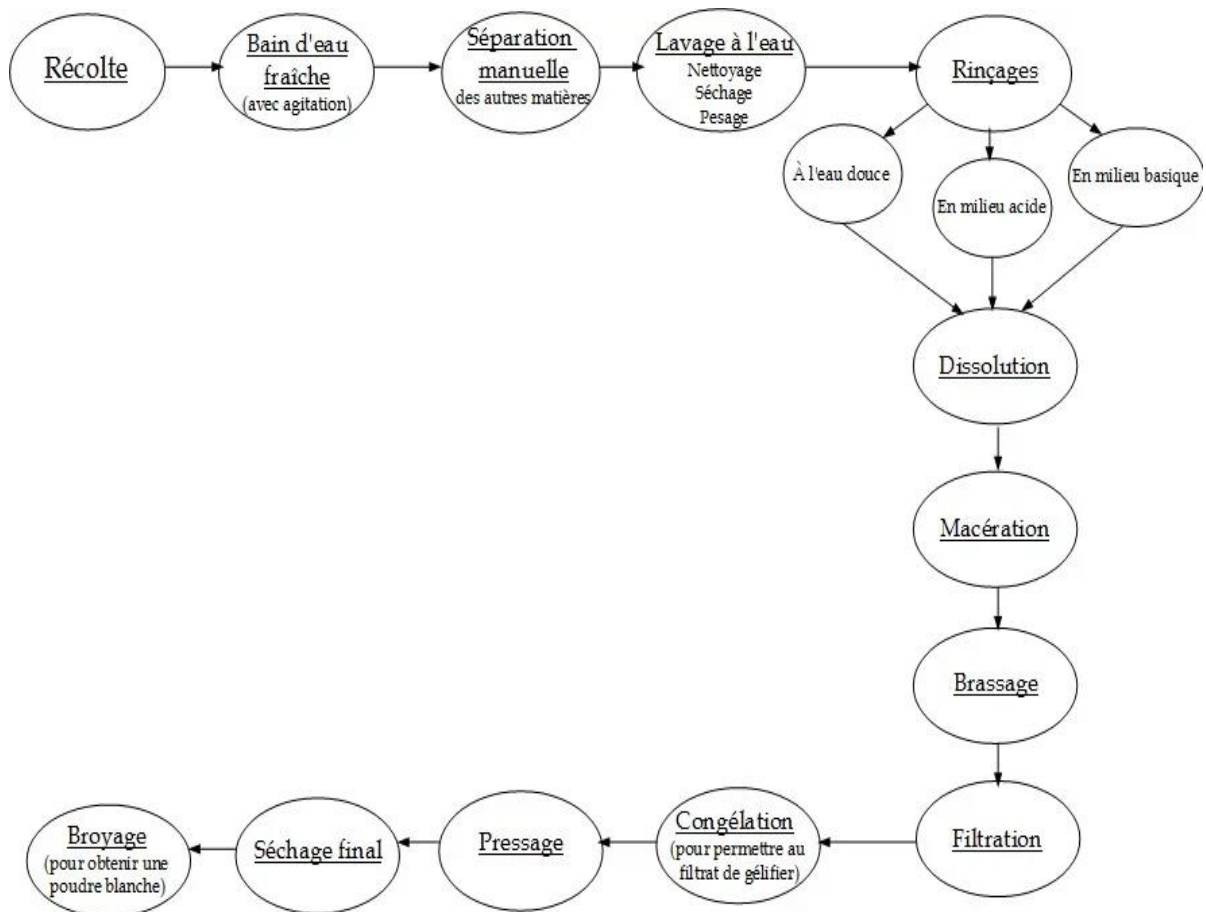


Figure 24 : Schéma du processus de production industrielle d'agar agar.

3.3. Extraction de l'agar-agar (TSENG (C.K.), 1980, TSENG (C.K.), 1984.)

Le processus général de production de l'agar peut être séparé en certaines étapes clés: prétraitement, Extraction, filtration, concentration et déshydratation (fig.22).

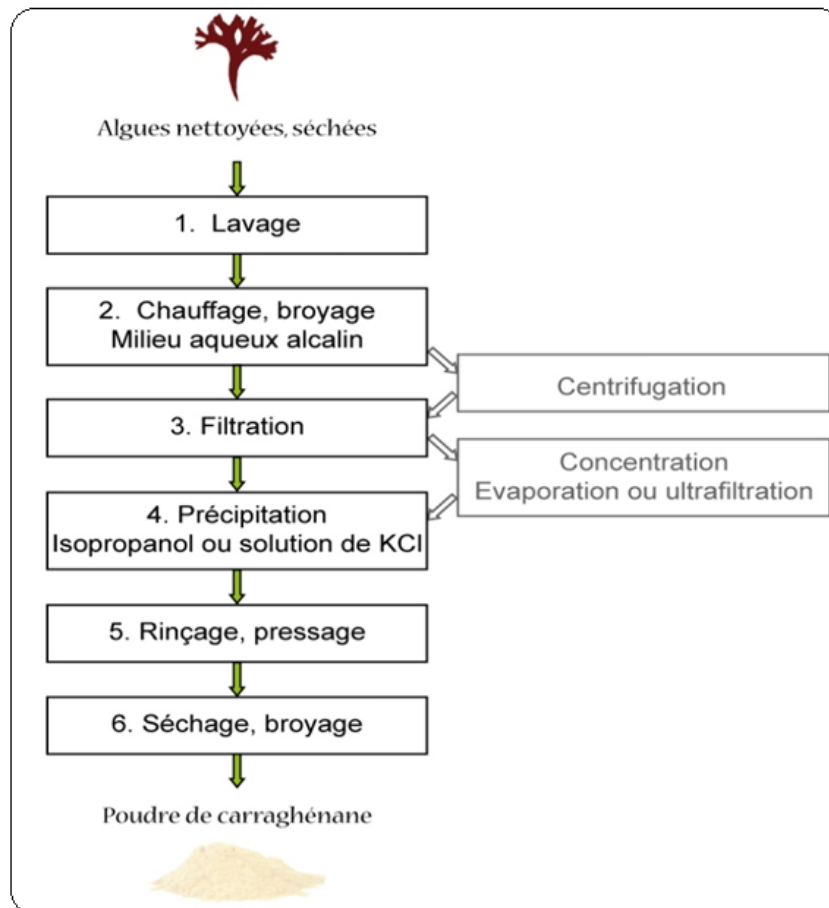


Figure 25 : Procédé d'extraction industrielle des carraghénanes.

3.3.1. Prétraitements

Afin d'obtenir l'extraction la plus pure possible, les algues sont d'abord lavées pour enlever le sable, les sels, les coquilles et autres matières étrangères. Il y a quelques différences dans le prétraitement selon le genre utilisé. Pour *Gelidium*, cette phase consiste en un traitement correcteur avec une solution alcaline douce (habituellement Carbonate de sodium) pour éliminer le pigment phycoérythrine et pour macérer et préparer les algues pour une meilleure extraction. Pour *Gracilaria*, le traitement alcalin avant l'extraction est effectué pour augmenter la force du gel. Les algues sont chauffées à 85-90 ° C dans une solution d'hydroxyde de sodium, à des concentrations allant de 0,5% à 7% de NaOH, pendant 1 à 2 heures. La concentration de l'alcali, ainsi que la température et le temps, doit être adapté à chaque espèce de *Gracilaria* pour obtenir la plus grande désulfation possible tout en évitant les pertes de rendement processus. Après élimination de l'alcali, les algues sont lavées avec de l'eau et, occasionnellement, avec un acide très faible pour neutraliser tout alcali résiduel (Hernandez-Garibay.2013).

3.3.2. Extraction et filtration

L'extraction de la gélose implique nécessairement la cuisson des algues en excès d'eau à l'ébullition. Afin de favoriser une bonne extraction, un acide pour ajuster le pH à 6,3-6,5 est généralement requis. L'extraction sous pression réduit le temps de traitement et augmente le rendement en gélose. Cependant, la méthode de pression et la cuisson acide sont efficaces pour l'extraction de gélose. Ces deux conditions sont potentiellement destructives pour la gélose extraite. Par conséquent, des conditions d'extraction optimales doivent être établies pour chaque type d'algues. L'agar dissout dans l'eau doit être filtré pour d'algues résiduelles et le filtrat chaud est refroidi pour former un gel. Cela dépend de la qualité d'agar recherchée, le gel peut être traité avec de l'eau de Javel (habituellement du sodium Hypochlorite) pour réduire toute couleur. Après un tel traitement, le gel doit être lavé pour éliminer l'agent de blanchiment, laissant un gel qui contient environ 1% d'agar. Les 99% restants sont de l'eau et doivent être éliminés du gel, soit par Congeler-dégel ou en le serrant à l'aide de la pression (VAUCHEL.P.2007).

3.3.3. Concentration par méthode de congélation-décongélation

La technique traditionnelle adaptée par Minoya Tarozaemon basée sur le gel et la décongélation est encore utilisée dans une faible mesure pour produire de la « gélose naturelle ». Cette technique est le lavage de *Gelidium amansii*, en utilisant des dispositifs similaires à ceux utilisés pour laver les feuilles de thé. Dans le passé, l'ajustement du pH pendant l'extraction a été réalisé avec du vinaigre ou du saké, mais l'acide sulfurique dilué est plus couramment utilisé employés. L'extrait liquide est filtré à chaud dans des sacs de coton, versé dans des plateaux en bois et on les laisse gélifier par refroidissement. Selon le volume de gel, il peut être coupé en barres carrées ou extrudé pour produire des bandes 25-40 cm bien avant que le processus naturel de congélation-décongélation ne soit utilisé pour déshydrater et concentrer le gel avant le séchage. L'extrait d'algues, qui contient normalement 1-1,2% d'agar pendant le processus, est concentré après décongélation et déformation (normalement par centrifugation) pour contenir de 10 à 12% d'agar - une augmentation de dix fois. L'eau éluée emporte des oligomères, des sels organiques et inorganiques et des protéines des algues, y compris les phycoérythrine responsables de la production rouge de la famille Rhodophycée (VAUCHEL.P.2007).

3.3.4. Concentration par méthode de synérèse

Une autre méthode pour réduire la teneur en eau dans le gel est basée sur la synérèse. Le gel de gélose est placé entre des tissus de filtre poreux et pressé dans une presse hydraulique pour enlever l'eau. Cette technique de synérèse s'est répandue rapidement dans le monde entier en raison de la réduction des coûts énergétiques qu'elle facilite. À titre d'exemple comparatif, la méthode de congélation nécessite la production de glace de c.100 tonnes pour produire une tonne de gélose, ce qui nécessite beaucoup plus d'énergie que la faible consommation d'énergie de la synérèse méthode. En outre, la pureté de la gélose augmente dans la méthode de synérèse car une plus grande quantité d'eau et d'impuretés solubles peut être éliminée.

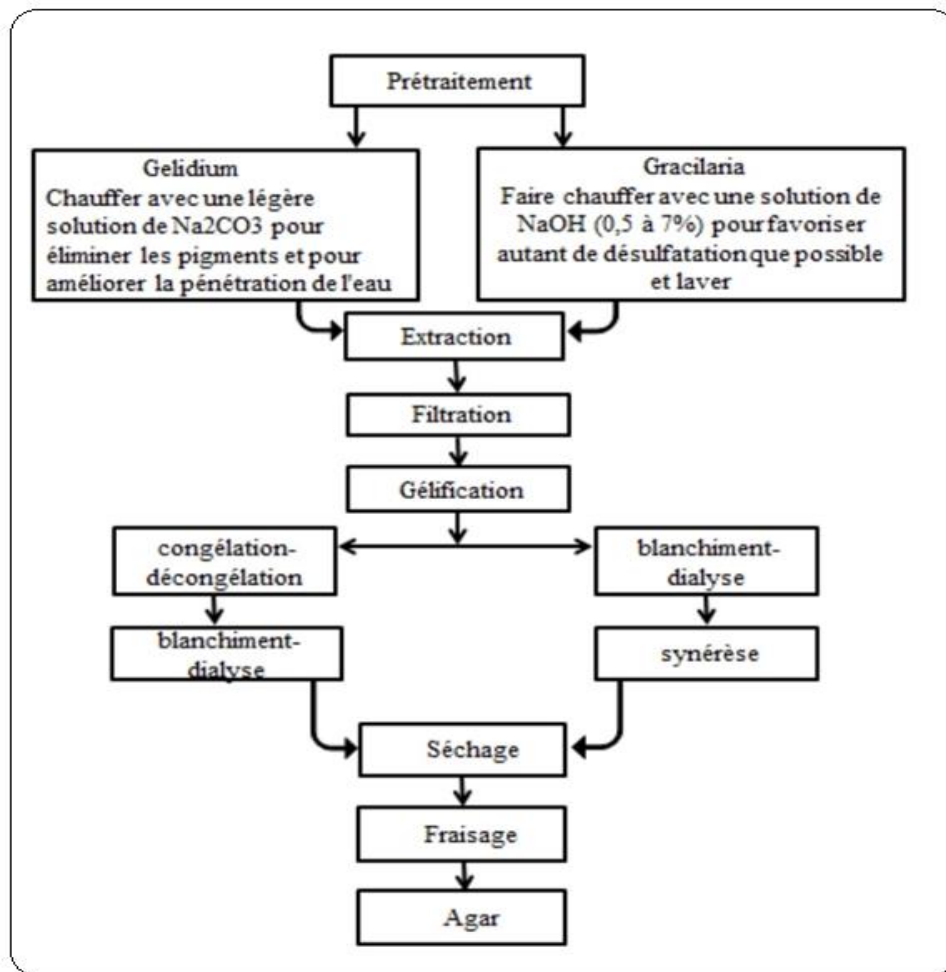


Figure 26 : Extraction industrielle de l'Agar.

Cela dit, plusieurs techniques ont été adoptées pour l'extraction d'agar qui est une étape clef de chaque expérience. La technique de *CRAIGIE et LEIGH (1978)* a été retenue moyennant quelques modifications. Elle a l'avantage d'être reconnue comme un "standard international". De plus, les résultats obtenus par cette technique d'extraction drastique peuvent être comparés

avec ceux de méthodes plus douces, comme celle mise au point au laboratoire par CHRISTIAEN (1978) (VERDUS *et al.* 1984).

L'extraction En premier lieu, l'industriel définit en laboratoire et dans une petite usine appelée le « dixième » (parce qu'elle représente une réduction au dixième de l'usine principale), sur un échantillon du lot à traiter, les paramètres à établir selon qu'il veut extraire le maximum d'agars ou obtenir la meilleure qualité possible, les deux objectifs n'étant pas forcément compatibles.

3.4. L'extraction classique (fig.27)

L'extraction dite classique s'applique surtout aux Gélidiales (*Gelidium*, *Pterocladia*, *Gelidiella*). Dans les tissus du végétal, les agars correspondent à des molécules trop longues (500 000 à 800 000 daltons) pour qu'il soit possible de les obtenir par simple dissolution dans l'eau. Il faut donc les découper en tronçons qui, eux, seront solubles (240 000 daltons).

La première étape consiste en trois rinçages, le premier en eau douce (phase 1), le deuxième en milieu acide (phase 2), le troisième (phase 3) en milieu chauffé (60 °C ; 30 mn) et faiblement alcalinisé par du carbonate de sodium. Au cours de ces rinçages de nombreuses substances sont éliminées dont le pigment rouge. Le végétal prend une coloration verte.

La deuxième étape (phase 4) est capitale. C'est elle qui permet le découpage et la dissolution en eau chaude des molécules d'agars. La plante est mise à macérer à 127 °C pendant 3 h, dans de l'eau douce, en respectant la proportion de 1 kg de tissu pour 3 l d'eau, sous une pression de 2 kg/cm² et un pH de 4 à 6. Il faut éviter que les molécules d'agars se scindent en fragments si courts qu'ils deviendraient solubles dans l'eau froide et ne donneraient plus de gels d'où la nécessité de tests préliminaires. Le brassage conduit ainsi à une bouillie verdâtre ; les agars, partiellement dépolymérisés, sont passés dans la phase liquide. On ajoute alors de la dicalithe, poudre blanche constituée de cupules de diatomées, qui facilite la filtration.

La filtration (phase 5) qui consiste à séparer le liquide des matières insolubles s'effectue à chaud dans un cylindre maintenu sous pression. Ce cylindre contient des sacs en toile inoxydable disposés parallèlement et reliés à un collecteur commun. Sous l'effet de la pression, le jus contenant les agars en solution traverse les mailles des sacs et est recueilli par le collecteur. L'opération se passe sans difficulté si le liquide ne contient pas plus de 1 % d'agars.

Il faut alors séparer 1 g d'agars de 99 cm³ d'eau. Plusieurs possibilités sont envisageables :

- Par évaporation : cela est à exclure car les coûts seraient très élevés ;

- Par précipitation dans l'alcool : le précipité est si diffus que la filtration est irréalisable sans coût prohibitif ;
- En utilisant le phénomène de synérèse exacerbée par la pression ou la congélation : c'est la solution adoptée généralement. Ce phénomène (fig. 18) caractérise le fait que les molécules d'agars tendent spontanément à se rapprocher de plus en plus, en rejetant l'eau qui les sépare.

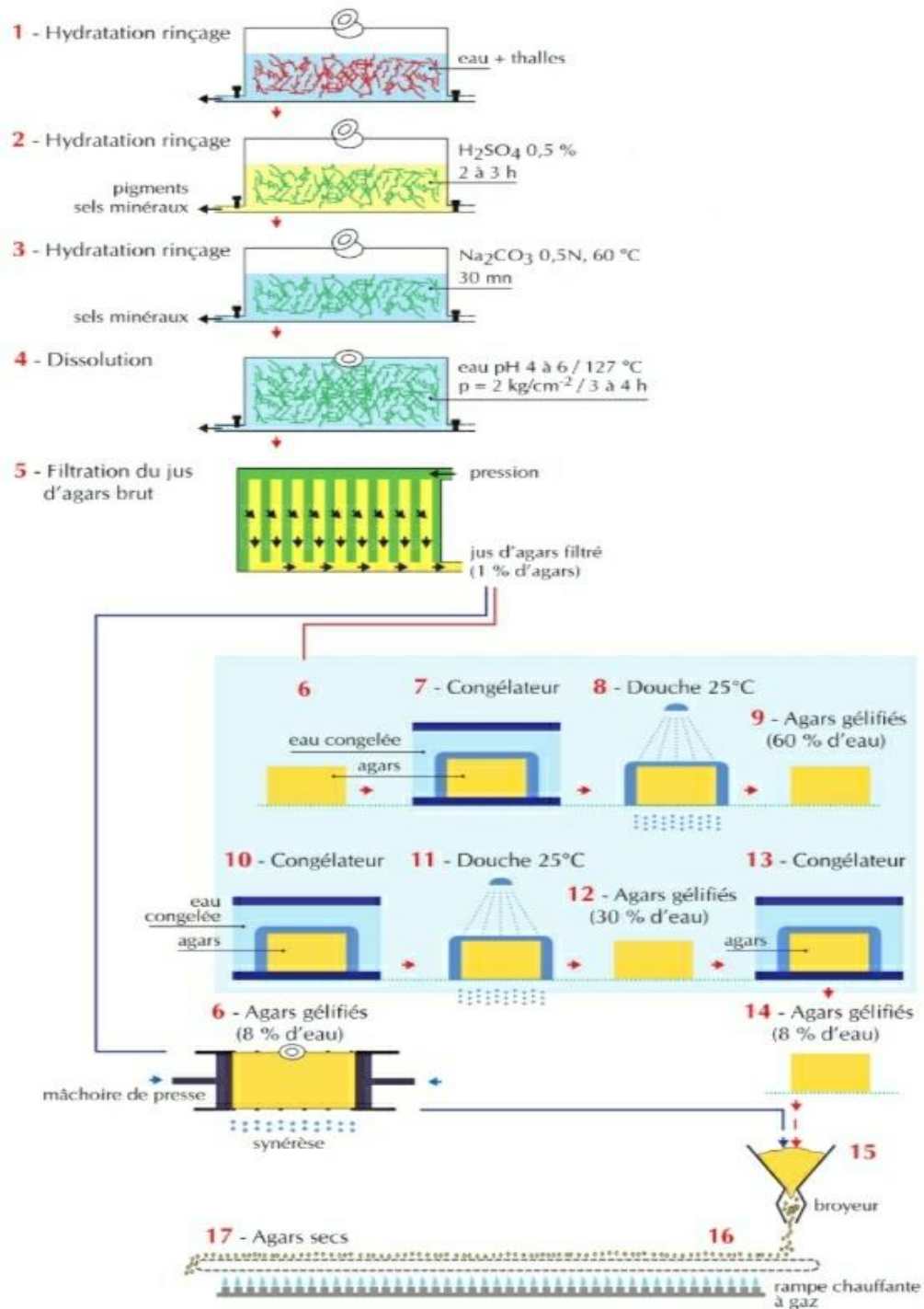


Figure 27 : Extraction des agars des Gélidiales (*Gelidium*, *Pterocladia*, *Gelidiella*). Dans les tissus du végétal, les agars correspondent à molécules trop longues pour qu'il soit possible de les obtenir par simple dissolution dans l'eau, Il faut donc les découper en tronçons qui, eux seront solubles.

La première solution (parcours fléché en bleu) consiste à utiliser le phénomène de synérèse amplifié par la pression.

Jusqu'en 1950, l'artisan versait la solution chaude d'agars dans un caisson en bois muni d'un couvercle. Après la prise en gel, il enlevait les côtés du caisson et augmentait chaque jour la charge sur le couvercle, ce qui accélérât la synérèse. L'opération durait 3 à 4 jours. Aujourd'hui, le liquide est mis à gélifier (phase 6) entre les puissantes mâchoires d'une presse à vis à mouvement horizontal ou vertical. L'exsudation de l'eau s'effectue en 2 à 3 h. Les plaques d'agars sont ensuite découpées en « spaghettis » et étendues au soleil ou dans un courant d'air chaud (rampe à gaz d'une soufflerie), jusqu'au séchage complet. Elles sont alors transformées en paillettes ou broyées.

La seconde solution fait appel à la congélation-décongélation. C'est l'accélération de la synérèse par le froid. Le jus d'agars obtenu après filtration (phase 5) se prend en gel lorsque la température s'abaisse en-dessous de 35-40 °C (phase 6). Le gel ainsi obtenu est soumis à une congélation à -10 °C (phase 7). Au cours de cette congélation, une partie de l'eau interne migre progressivement sur les bords du bloc où elle forme une couronne de glace. Celle-ci est éliminée (phase 8) par décongélation sous une douche d'eau à 25 °C ; la teneur en eau du gel est alors de 60 à 65 % (phases 9 et 10). Une deuxième congélation permet la formation d'une nouvelle couronne de glace (phase 11) qui sera éliminée par une nouvelle décongélation (phase 12), et ainsi de suite jusqu'à l'évacuation du maximum d'eau (phase 13 et 14). Le gel final contient en principe moins de 8 % d'eau. Les opérations doivent être progressives de manière à ce que l'eau expulsée entraîne le maximum d'impuretés.

Le gel est ensuite dilacéré par un broyeur (phase 15). Les grumeaux obtenus sont entraînés sur un tapis-roulant chauffé par une rampe à gaz (phase 16).

En Espagne, quelques usines utilisent un procédé plus sophistiqué pour mieux préserver les qualités des agars extraits de *Gelidium sesquipedale*. Le jus chaud contenant les agars dissous est versé dans un chenal circulaire dont les parois sont progressivement refroidies et où l'on entretient un courant constant de 20 cm/s. La température du jus baisse et des petites plaques d'agars se forment. À l'approche du 0 °C, l'eau contenue dans les agars vient cristalliser à la périphérie de chaque plaquette, la rendant moins dense et la faisant flotter à la surface du

chenal. Une sorte de peigne balayant la surface retient les fragments d'agars qui sont dirigés vers une voie latérale sur un tamis où ils finissent de s'égoutter. Plus la réfrigération sera douce, meilleur sera l'agar, car l'eau, en sortant lentement de la plaquette, entraîne les impuretés (fig.28, 29,30).



Figure 28 : Extraction artisanale des agars de *Gracilaria verrucosa* en Chine. Une vue des cuves permettant l'ex- traction sous pression. Sur celle de gauche, les sacs poreux qui assurent la séparation entre la solution d'agars et les matières insolubles ont été enlevés pour nettoyage.

Ils sont encore en place sur la cuve droite (G.C. Jr.), 1987.



Figure 29 : Extraction artisanale des agars de *Gracilaria verrucosa* en Chine.

La solution d'agars obtenue par filtration sous pression s'est transformée en un gel lorsque la température s'est abaissée en dessous de 40 °C ; le blox ainsi obtenu est découpé en « spaghettis » puis soumis à une congélation-décongélation et centrifugation au cours desquelles la teneur en eau va passer de 98 % à 8 % (GANZON-FORTES (E.T.), 1988).



Figure 30 : Extraction artisanale des agars de *Gracilaria verrucosa* en Chine : séchage des gels d'agars.

Lorsque leur teneur en eau a été ramenée à 8 % par la congélation-décongélation, les « spaghettis » d'agars sont étendus deux à trois jours au soleil. Au terme de cette phase, ils ne contiendront que 3 à 4 % d'eau (TSENG (W.Y.) 1984).

3.5. L'extraction alcaline

L'extraction alcaline consiste à placer le plant dans une solution d'hydroxyde de sodium à 7 % qui est portée à 90 °C pendant 2 à 3 heures. La présence d'hydroxyde de sodium permet la formation de radicaux hydrophobes accentuant le pouvoir de gélification.

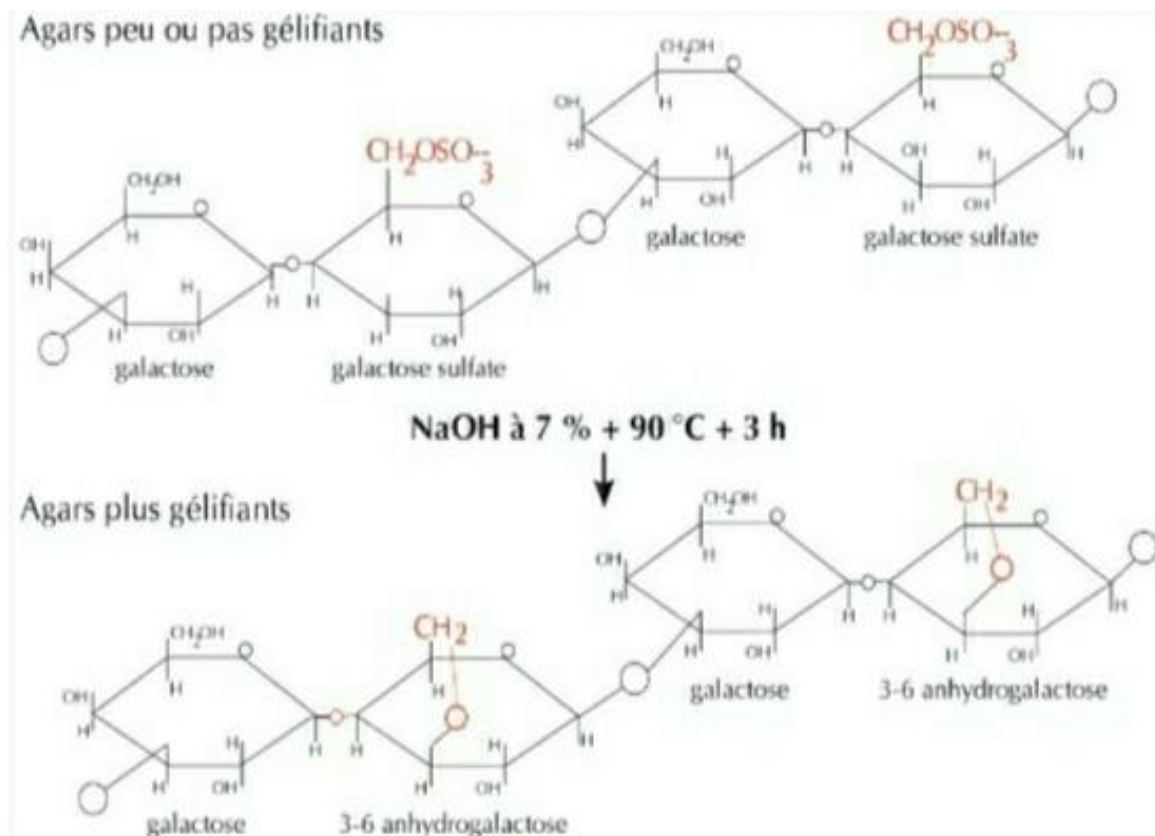


Figure 31 : Évolution chimique expliquant les effets de l'extraction alcaline appliquée généralement à *Gracilaria* et à d'autres agarophytes.

Les radicaux « sulfate » portés par le galactose « sulfaté » sont éliminés et remplacés par la formation de ponts hydrophobes CH₂-O (CAIRNS-SMITH (A.), 1990).

3.6. Dosages des sucres

Des dosages biochimiques des composés de l'agar sont réalisés pour appuyer les argumentations. Le 3,6-anhydrogalactose est dosé selon la méthode au résorcinol de YAPHE (1960). Les oses totaux sont dosés par la méthode calorimétrique à l'orcinol sulfurique de

TILLSMAN et PHILIPPI (1929) modifiée par RIMINGTON (1931). La quantité de galactose est estimée en soustrayant la quantité de 3,6-anhydrogalactose à la quantité d'oses totaux.

3.7. Dosage des phycoérythrine

Les phycoérythrine sont extraites sur du matériel frais congelé à l'azote liquide puis conservé à - 80°C :

- 250 mg sont broyés dans un mortier à 4°C avec du sable de Fontainebleau ;
- 6 ml d'eau sont additionnés ;
- le mélange est centrifugé à 10 000 g pendant 10 mn ;
- 1 ml de surnageant est prélevé et sa densité optique est mesurée à 565 nm.

La concentration est obtenue par la formule :

$$C = \frac{D.O \times 1000}{8,1 \times P.F. \text{ ml} \times \%MS}$$

Coefficient d'extinction spécifique = 81 %.cm-1

C en mg de phycoérythrine/gramme de matière sèche

M.S. = matière sèche

P.F. = poids de matière fraîche

Un défilement de spectre effectué sur un échantillon montre que les pics d'absorbance maximum (fig. 4) sont identiques à ceux relevés dans la littérature (BISIACCHI 1975).

3.8. Dosage de l'azote

Les teneurs en azote du thalle sont dosées par une ultramicro-méthode au I Nessler (STRAUCH 1965). Cette méthode calorimétrique est dérivée de celle de Kjeldahl.

Le protocole est le suivant :

- Mettre 5 mg de poudre d'algue dans un tube en pyrex de 25 ml.
- Ajouter 0.2 ml de réactif de minéralisation. Le réactif de minéralisation est composé de 2 g de sélénium, de 250 ml d'acide sulfurique concentré et de 250 ml d'une solution saturée de sulfate de potassium.
- Minéraliser 1 heure à 320°C.
- Ajuster le volume à 10 ml avec de l'eau désionisée.
- Prélever 3 ml de solution. Ajuster le volume à 4 ml avec de l'eau déminéralisée.

- Ajouter 0.4 ml de réactif de Nessler en agitant vivement.

La méthode originelle préconise 2 ml de réactif de Nessler. Ce volume a entraîné, dans des manipulations préliminaires, une précipitation instantanée. Cette dernière disparaît pour des valeurs inférieures à 0.5 ml. A la suite d'essais, la valeur de 0.4 ml a été retenue.

L'intensité maximale de coloration est obtenue au bout de 10 mn. La couleur est stable pendant 3/4 d'heures environ à la température ambiante. La mesure de l'intensité de coloration est examinée à 500 nm. Les D.O. obtenues sont reportées sur une courbe étalon de sulfate d'ammonium qui est réalisée pour chaque série de dosage.

Cette technique de dosage d'azote, rapide à mettre en œuvre, est reproductible dans le temps, mais surestime les quantités d'azote d'un facteur 1,2 en comparaison des résultats obtenus avec un ANALYSEUR CARLO ERBA MOD 1106.

3.9. Dosages des protéines

Les protéines sont extraites comme suit :

- mettre 100 mg de matériel sec dans 20 ml d'acétone à 80 % ;
- agiter pendant 18 mn et centrifuger à 10 000 g pendant 10 mn ;
- reprendre le culot par 10 ml de T.C.A. à 10 % ;
- précipiter une nuit en chambre froide (4°C) puis centrifuger à 10 000 g pendant 10 mn ;
- reprendre le culot par 10 ml d'éthanol à 80 % saturé en acétate de sodium, puis centrifuger à 10 000 g ;
- reprendre le culot par 10 ml d'alcool absolu, laisser reposer 10 mn puis centrifuger à 10 000 g ;
- sécher le culot- ;
- dissoudre dans 5 ml NaOH IN, mettre au bain-marie à 80°C pendant i 30 mn, puis laisser refroidir ;
- centrifuger à 10 000 g 10 mn et récupérer le surnageant qui contient les protéines ;
- rincer deux fois le culot avec de l'eau distillée et ajuster le volume à 50 ml : la concentration de soude est alors de 0,1 N ;
- les protéines sont alors dosées par coloration au "bleu de comassie G250" (BRADFORD 1976). La D.O. est lue à 595 nm.

3.10. Contrôle en microscopie électronique

Les échantillons prélevés sont fixés par une solution de glutaraldéhyde à 3 % dans le tampon cacodylate de sodium 0,2 M à pH 6,7 (1 volume) additionné d'eau de mer (2 volumes), pendant deux heures à 4°C. Ils sont ensuite postfixés par l'acide osmique à 1 % dans l'eau de mer à 4°C. Ils sont déshydratés par l'acétone et inclus dans la résine à faible viscosité selon SPURR (1969). Les coupes fines sont contrastées par l'acétate d'uranyle et le citrate de plomb. Elles sont examinées sur un microscope électronique JEOL "JEM 100 CX".

3.11. Exemple de l'extraction

3.11.1. L'extraction de l'agar-agar de parois isolées en fonction des conditions de culture, exemple de *GRACILARIA VERRUCOSA* (Thierry STADLER, L'université des sciences et techniques de Lille, 18 décembre 1984).

Le pourcentage d'agar dans les thalles varie au cours des saisons. Ces variations se caractériseraient essentiellement par des modifications pariétales avec notamment une augmentation de colloïdes durant les périodes hivernales. Cette hypothèse qui conditionne la suite de nos travaux demandait à être vérifiée.

Cette accumulation d'agar devrait se traduire dans les faits par une augmentation du poids de matière sèche des parois et/ou une augmentation des teneurs en colloïdes, qu'elles contiennent. L'isolement des parois est donc le moyen le plus approprié pour s'affranchir d'évolution propre au cytoplasme (amidon notamment). La comparaison des rendements en agar de parois de thalles cultivés dans des conditions simulant l'hiver ou le printemps devrait apporter une réponse.

Nous avons donc mis au point un protocole expérimental d'isolement de parois, inspiré de celui utilisé pour les Fucales (KLOAREG 1984).

➤ **Matériels et méthodes**

Des thalles de *Gracilaria verrucosa* sont cultivés pendant un mois dans des conditions qui simulent le "printemps" ou "l'hiver". Ces thalles serviront de matériel d'étude pour l'isolement des parois :

Les grands principes d'isolement de parois de Fucales sont respectés. Les algues sont broyées grossièrement au POLYTRON. Le contenu cellulaire est dispersé par sonication dans le milieu, après plasmolyse dans un tampon trois fois molaire. La presse de French qui provoque une alternance de compression et de décompression fragmente les amas pluricellulaires restant. A chaque étape, les parois sont lavées plusieurs fois avec de l'eau distillée, puis centrifugées. Le surnageant est éliminé. Un contrôle en microscopie optique est effectué à intervalles réguliers pour juger de l'efficacité du traitement. Après lyophilisation, les parois se présentent sous la forme d'une poudre blanchâtre.

Dans une manipulation préliminaire, nous avons tenté d'appliquer cette technique d'isolement de parois mise au point pour les Fucales (KLOAREG 1984) sur le *Gracilaria verrucosa*. Le broyage au "polytron" a donné de médiocres résultats.

La Gracilaire possède en effet une cuticule résistante et élastique difficile à rompre. Un broyage dans un mortier sur du matériel congelé à l'azote liquide n'a pas apporté d'amélioration. A la fin du traitement, les cellules étaient encore associées en amas de 5 ou 6. De plus, les algues restaient pigmentées par les phycoérythrines.

Le protocole originel a donc été modifié, essentiellement dans les premières étapes. Le matériel d'étude est lyophilisé puis broyé dans un broyeur à bille (RETSCH). Sous cette forme, il présente deux avantages par rapport au matériel frais. D'une part les isolements sont effectués directement sur de la matière sèche, et d'autre part la poudre obtenue est très fine et très homogène. Les phycoérythrines qui sont des protéines solubles sont extraites par un tampon tris HCL pH 6,7, de préférence à une eau distillée additionnée de formol préconisée dans la méthode originelle. De plus, le chlorure de calcium qui sert à protéger la structure des alginates n'est plus utilisé, et le sorbitol remplace le glucose pour la plasmolyse. Ce dernier, risque en effet, d'interférer, dans des analyses, avec les sucres libérés par l'algue dans le surnageant.

Compte tenu de ces remarques, le protocole suivant a été utilisé :

- nettoyer les algues aux ultrasons et lyophiliser pendant 24 h à 50°C ;
- broyer le lyophilisat pendant 10 mn au broyeur à billes ;
- resolubiliser un gramme de poudre pendant 3 heures à 4°C dans un pot à centrifuger contenant 60 ml d'eau distillée ;
- centrifuger à 750 t/mn pendant 15 mn. Eliminer le surnageant ;
- reprendre le culot par 60 ml de tampon Tris-HCl pH 6,7 pendant 30 mn (4°C) pour extraire les protéines solubles (phycoérythrines, enzymes) ;
- centrifuger à 750 t/mn pendant 15 mn. Récupérer le culot ;

- répéter l'opération trois fois ;
- ajouter 30 ml d'eau distillée et passer aux ultrasons 2 fois 1 mn, registre 4-"high" ;
- compléter à 60 ml, homogénéiser et centrifuger à 750 t/mn ;
- plasmolyser le culot pendant 12 heures dans 25 ml de sorbitol 3 M ;
- décanté, éliminer le surnageant ;
- rincer 4 fois avec 40 ml d'eau distillée et centrifuger à 500 t/mn pendant 10 mn ;
- éliminer le surnageant (amidon entre autre) ;
- ajouter 30 ml d'eau. Passer 4 fois aux ultrasons pendant 1 mn (registre 4" high") ;
- centrifuger à 750 t/mn pendant 10 mn ;
- plasmolyser le culot dans 25 ml de sorbitol 3 M pendant 2 heures ;
- centrifuger à 1000 t/mn pendant 10 mn ;
- laver le culot avec 40 ml d'eau et centrifuger à 350 t/mn pendant 10 mn ;
- ajouter 30 ml d'eau distillée. Passer aux ultrasons 2 fois 1 mn ;
- centrifuger à 500 t/mn pendant 10 mn et laver 4 fois le culot avec 60 ml d'eau distillée
- effectuer 4 passages à la presse de French, pression 2500 psig, régime médium ;
- centrifuger à 500 t/mn pendant 10 mn. Eliminer le surnageant ;
- ajouter 30 ml d'eau distillée. Passé 2 fois aux ultrasons pendant 1 mn ;
- reprendre le culot pendant 12 heures par une solution de triton X-100 à 0,1 % ;
- centrifuger et rincer 4 fois avec 60 ml d'eau distillée ;
- passer 2 fois aux ultrasons pendant 1 mn (registre 4 high) ;
- centrifuger à 500 t/mn pendant 10 mn ;
- reprendre le culot par 60 ml d'acétone. Centrifuger à 500 t/mn pendant 10 mn ;
- laver 4 fois avec 60 ml d'eau distillée. Centrifuger à 500 t/mn pendant 10 mn ;
- lyophiliser 24 heures à 5°C.

➤ Résultats et discussion

Les poids de matière sèche de parois isolées diffèrent peu suivant les conditions de culture (5,02 grammes à 18°C et 17 x ergs.cm⁻¹.s⁻¹ pour 100 g frais, et 4,7 grammes à 5°C et 5 x 10⁻¹ ergs.cm⁻¹.s⁻¹) (TAB. 5). Les erreurs inhérentes aux nombreuses manipulations et transferts qu'exigent cette technique ne permettent pas de dégager de différence significative.

Par contre, l'analyse des rendements en agar apporte de précieux renseignements. Les teneurs sont de 69 % pour des parois isolées à partir de thalles cultivés à 5°C et 5 x 10⁻¹ ergs.cm⁻¹.s⁻¹ contre

51 % pour des parois obtenues à partir de thalles cultivés à 18°C et 17 x erg~.cm~.s-1 (TAB. 5). La composition chimique de la paroi varie donc entre l'été et l'hiver : lorsque les conditions de culture sont défavorables à la croissance, il y a plus d'agarose proportionnellement à la matière sèche des parois.

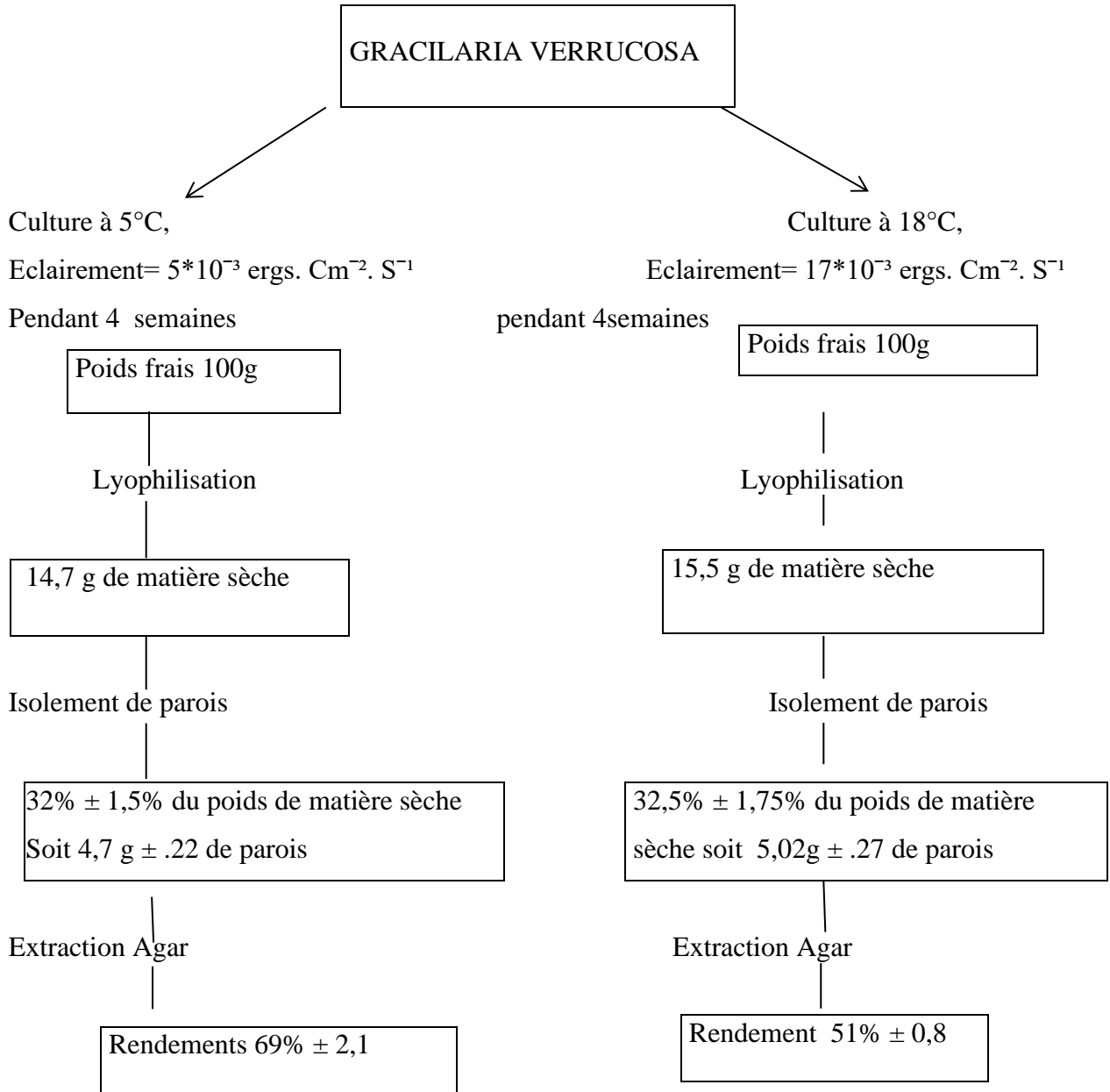


Tableau 9 : variation des rendements en agar extrait de parois isolées, en fonction des conditions de culture.

Quelques réserves doivent cependant être émises. En effet, les quantités totales d'agar, obtenues à partir des parois et rapportées à 100 g de poids frais, sont inférieures aux valeurs obtenues par une extraction directe de l'Agar sur la matière sèche, Cette différence peut être attribuée à la perte d'une partie des sucres solubles qui sont éliminés dans le surnageant. Cette perte peut être accentuée par les traitements successifs aux ultrasons.

Les résultats d'extraction présentent cependant des écarts suffisamment importants (environ 18 %) pour rester significatifs et renforcer notre hypothèse de travail.

La présence d'amidon dans les thalles doit être également soulignée car elle pourrait avoir une importance dans les expériences à venir. Des préparations en microscopie optique de surnageant, prélevés au cours des différentes étapes d'isolement de parois, révèlent de nombreux grains d'amidon colorés en bleu par le lugol. Ce phénomène est beaucoup plus marqué dans les thalles cultivés à 18°C et 17×10^{-3} ergs. $\text{Cm}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$ que dans le cas des algues cultivées à 5°C et 5×10^{-3} ergs. $\text{Cm}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$. Cet amidon pourrait donc jouer un rôle important dans les variations de matière sèche relevées au cours de l'année et expliquer que des teneurs plus importantes de matière sèche soient notées en été qu'en hiver en culture "in vitro" (15.45 % contre 14.7 % dans notre expérience).

Les variations de la composition chimique de la paroi en fonction des conditions de culture étant désormais un fait acquis, on peut envisager le rôle des facteurs du milieu (azote) et des facteurs physiques (température et lumière) sur les synthèses de colloïdes.

3.11.2. Influences de la température et de la lumière sur la production et la qualité de l'agar-agar de *GRACILARIA VERRUCOSA* (Thierry STADLER, L'université des sciences et techniques de Lille, 18 décembre 1984).

Des essais de mise en culture de *Gracilaria verrucosa*, espèce commune sur les côtes de la Manche orientale, (BODARD et CHRISTIAEN 1978, BODARD et al. 1981) ont été effectués simultanément à l'étude des conditions d'extraction de son agar (CHRISTIAEN et BODARD 1978). Des analyses, réalisées sur des échantillons prélevés tout au long de l'année, ont montré que les teneurs en colloïdes varient en fonction des saisons (CHRISTIAEN 1981, WHYTE et al. 1981). L'expérience précédente a précisé ce que signifient ces variations au niveau pariétal : les parois des Gracilaires sont plus riches en agar en hiver qu'en été. Les paramètres, température et lumière qui caractérisent ces dernières, seraient donc impliquées dans la biosynthèse de colloïdes. De fait, WANG et YANG (1980) trouvent une corrélation entre la température, l'ensoleillement et la production d'agar.

Le rôle de la température est étudié dans une première expérience, dans des conditions d'éclairement et de photopériode favorables à la croissance du végétal. Ces deux derniers paramètres feront l'objet d'une seconde expérimentation, compte tenu des résultats acquis dans la précédente.

➤ **Matériel et méthodes :**

Les échantillons récoltés en septembre sont lavés et conditionnés en 36 lots de 10 grammes. La moitié d'entre eux est placée dans des aquariums de 10 litres d'eau de mer dont la température est maintenue constante à 5°C. L'autre moitié est cultivée selon le même principe, à 18°C. Quelles que soient les conditions de température, les algues sont éclairées 12 heures par jour. L'énergie mesurée au niveau des thalles est de 17×10^{-3} ergs. $\text{Cm}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$.

L'expérience est menée pendant deux mois, de manière à tenir compte de l'acclimatation des végétaux dans leurs nouvelles conditions de culture et à permettre l'activation et le fonctionnement des phénomènes biologiques de croissance et de production.

Passée cette période, les thalles sont récoltés, essorés et pesés de manière à obtenir le poids de matière fraîche qui, comparé au poids d'ensemencement, permet de calculer l'augmentation relative de la biomasse. Une part est prélevée et lyophilisée pendant 24 h pour déterminer le poids de matière sèche. L'agar contenu dans les échantillons est extrait. Le poids de poudre sèche, comparé à celui de l'algue, sert à calculer le rendement de l'extraction.

Compte-tenu des résultats obtenus à basse température (5°C), les conditions suivantes (TAB. 6) ont été utilisées dans une deuxième expérimentation pour étudier l'influence de l'énergie lumineuse et de la photopériode.

Les teneurs en sucres totaux et en 3,6-anhydrogalactose sont déterminées.

➤ **Résultats**

Les résultats présentés dans le tableau 7 montrent que les rendements en agar sont plus élevés (35.7 % en moyenne) quand l'algue est cultivée à 5°C que lorsqu'elle est placée à 18°C (14.6 %). Dans les mêmes conditions, la biomasse diminue de 13.4 %, d'une part, et augmente de 41 %, d'autre part.

Du point de vue biochimique, il semble que le galactose se transforme en 3,6-anhydrogalactose. Autrement dit, selon la définition de YAPHE et DUCKWORTH (1971), les proportions relatives en galactanes sulfates et agaroses neutres varient en fonction de la condition physiologique à laquelle l'algue est soumise, ici la température.

Pour des algues cultivées sous différentes conditions de lumière et de photo période, les accroissements de biomasse les plus forts sont obtenus après de longues périodes d'éclairement et des intensités lumineuses de 17×10^{-3} ergs. $\text{Cm}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$ (fig. 32).

Par ailleurs, de faibles énergies (6×10^{-3} ergs. $\text{Cm}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$; 5/08N, 5/16N) masquent l'influence de la photopériode sur la croissance (TAB. 10). La lumière peut donc être considérée comme un facteur limitant. Le pourcentage de matière sèche varie peu dans toutes les expérimentations (de 18,0 % à 21,5 %) (TAB. 10), et les rendements en agar évoluent de façon opposée, par rapport à la croissance de l'algue : 27 % d'agar pour un gain en poids frais de 27.5 % contre 31.9 % pour une perte en poids frais de 17 %. De plus, dans une situation favorable à la croissance, l'élévation de température se traduit par une baisse des rendements en agar.

Tableau 10 : Conditions expérimentales à l'étude de l'influence de l'énergie lumineuse et de la photopériode

Photopériode	Energie lumineuse $E=17 \times 10^{-3}$ ergs. $\text{Cm}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$
8 h de lumière par 24 h	5/08 E
16 h de lumière par 24 h	5/16 E

Témoins : 18°C, 12 h de lumière/24 h, 17×10^{-3} ergs. $\text{Cm}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$ (18/12 E) 20°C, 12 h de jour/24 h (20/12 S) : Température maintenue à 5°C.

Tableau 11 : variations de la biomasse de la matière sèche des rendements en agar et la qualité biochimique de celui-ci en fonction de la température et de culture de *GRACILARIA VERRUCOSA*

Température de culture	Variation du poids de matière fraîche	Variation du poids de matière sèche	Rendements en agar	Sucre totaux	3,6-anhydro-galactose	Ose totaux
	%	Mg.g ⁻¹ (2)	%	Mg.g ⁻¹ (2)	Mg.g ⁻¹ (2)	3,6-anhydro-galactose/ 3,6-anhydrogalactogalactose
18°C	+41,0	290 ± 18	14,6 ± 2,9	919 ± 29	272 ± 5	2,40
5°C	-13,4	227 ± 31	35,7 ± 5,9	694 ± 39	396 ± 10	0,75

(1) Exprimé en Mg.g⁻¹de matière fraîche.

(2) Exprimé en Mg.g⁻¹d'agar sec.

Figure 32 : Croissance pondérale de *GRACILARIA VERRUCOSA* dans différentes conditions de température, d'éclairément et de photopériode.

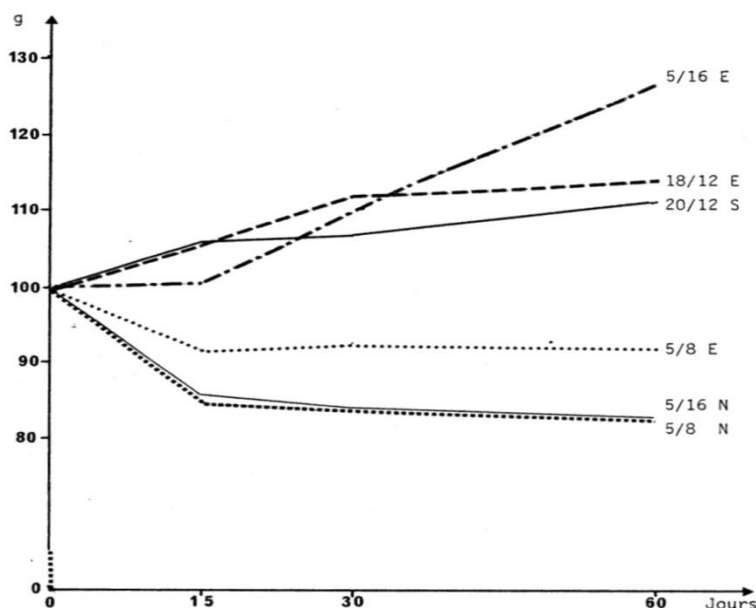


Tableau 12 : Variations de la biomasse, de la matière sèche et des rendements en agar en fonction des conditions de culture.

Conditions de culture	Variation du poids de matière fraîche	Poids de matière sèche	Rendement en agar
	%	Mg.g ⁻¹ (1)	%
5/16 E	+27,5	191,3 ± 8,5	27,0 ± 1,17
18/12 E	+14,2	201,3 ± 13,5	25,6 ± 1,52
20/12 S	+11,0	215,0 ± 12,6	23,6 ± 1,38
5/08 E	-7,8	207,0 ± 3,7	27,4 ± 1,10
5/16 N	-17,0	180,0 ± 4,7	31,9 ± 0,98
5/08 N	-17,5	180,6 ± 6,9	31,4 ± 1,94

E = 17×10^{-3} ergs. Cm⁻². S⁻¹

N = 6×10^{-3} ergs. Cm⁻². S⁻¹

(1) = exprimé en Mg.g⁻¹ de matière fraîche

S = lumière solaire

Les résultats mentionnés dans le tableau 5 font état d'un faible rapport (oses totaux - 3,6-anhydrogalactose) / 3,6-anhydrogalactose, témoignant d'une meilleure qualité du gel lorsque les rendements en agar sont plus élevés.

➤ **Discussion**

Les mesures de matière sèche et d'agar, corrigées en valeurs absolues, sont représentées sur la figure 28 pour la première expérience et regroupées dans le tableau 12 pour la seconde.

Les faibles températures (5°C) provoquent une baisse du poids frais. De plus, les quantités d'agar obtenues sont plus importantes à 5°C qu'à 18°C. Ainsi, les conditions thermiques induisent soit la croissance du végétal, soit l'augmentation des teneurs en colloïdes dans les parois. Cette relation entre croissance et production avait déjà été remarquée par DELOACH et al. (1946), HUMM (1951) et CHRISTIAEN (1981). Par ailleurs, WHYTE et al. (1981) n'avaient pas noté d'influence de la température sur les rendements d'extraction, étant donné la faible amplitude thermique relevée sur toute la durée de leur expérimentation.

En valeur relative, le poids de matière sèche apparaît constant (280 mg. G-1), or il évolue en valeur absolue, selon le régime de température (2.4 g à 5°C contre 4.1 g à 18°C pour 100 g d'algues fraîchesensemencées) (fig. 29). L'algue synthétise donc de la matière sèche qui entre pour partie dans la composition des parois nouvellement formées. Mais compte-tenu de l'accroissement très élevé (+ 71 % de matière sèche par rapport aux algues cultivées à 5°C), elle accumule aussi vraisemblablement des assimilats photosynthétiques.

Par contre, le poids total d'agar des thalles cultivés à 18°C est inférieur à celui des cultures à 5°C (0.60 g contre 0.86 g). Aussi deux hypothèses peuvent être formulées :

- il y a accumulation d'agar dans les parois en période hivernale et dégradation partielle en phase de croissance ;
- selon KLOAREG (1984), les modifications structurales de la molécule d'agar peuvent changer la mobilisation ou l'accessibilité du mucilage lors de l'extraction.

Tableau 13 : Variations des rendements en agar et de la qualité biochimique de celui-ci en fonction des conditions de culture de *Gracilaria verrucosa*

Rendement en agar	Sucre totaux	3.6-anhydro Galactose	oses totaux
--------------------------	---------------------	------------------------------	--------------------

Condition de culture	%	Mg.g ⁻¹ (1)	Mg.g ⁻¹ (2)	3.6-anhydro-galactose/ 3.6-anhydrogalactose
5/16 E	27,0 ± 1,17	860	313	1,75
18/12 E	25,6 ± 1,52	789	337	1,34
20/12 S	23,6 ± 1,38	930	346	1,69
5/08 E	27,4 ± 1,10	833	319	1,60
5/16 N	31,9 ± 0,98	842	343	1,46
5/08 N	31,4 ± 1,94	807	334	1,41

E = 17 x 10⁻³ ergs. Cm⁻². S⁻¹

N = 6 x 10⁻³ ergs. Cm⁻². S⁻¹

(1) = exprimé en Mg.g⁻¹ de matière fraîche

(2) = exprimé Mg.g⁻¹ en d'agar sec

S = lumière solaire

Sans répondre définitivement à ces questions, les différences de rendement en agar, extrait de parois isolées, plaident en faveur d'une accumulation de colloïde. Par ailleurs, la quantité de galactose est identique dans les 2 cas en accord avec de précédentes observations (CHRISTIAEN 1981). Le facteur variant est le taux de 1 3,6-anhydrogalactose qui double entre 18°C et 50°C. La teneur en 3,6-anhydrogalactose I et la qualité de gel évoluent parallèlement selon WHYTE et al. (1981). Une proportion élevée en 3,6-anhydrogalactose, qui favorise l'association des chaînes polysaccharidiques (REES 1974), devrait rendre le mucilage moins accessible à l'extraction et plus sensible aux pertes. Or, c'est le phénomène inverse qui est observé.

Enfin, aucun élément physiologique n'argumente, à ce jour, dans le sens de la seconde hypothèse.

Dans la deuxième expérience, les éclaircissements importants (17 x ergs.cm⁻¹.s⁻¹) en activant la photosynthèse favorisent la croissance de l'algue et l'augmentation de la matière sèche (5/16E, 20/12S, 18/12E). Dans ce cas, une température basse associée à une intensité lumineuse élevée et à une période d'éclaircissement longue n'est pas facteur limitant. Parallèlement, les rendements en agar sont faibles (23.6 % à 27 %), alors que la quantité de colloïdes augmente en valeur

absolue. La synthèse de matière sèche est donc accompagnée par une synthèse d'agar (tableau 12).

Tableau 14 : Variations en valeur absolue de la matière sèche et de l'agar en fonction des conditions de culture de *Gracilaria verrucosa*

Conditions de culture	Variation du poids de matière fraîche	Poids de matière sèche	Poids d'agar
	%	En grammes (1)	En grammes (2)
5/16 E	+27,5	24,4	6,58
18/12 E	+14,2	23,0	5,89
20/12 S	+11,0	23,9	5,41
5/08 E	-7,8	18,5	5,07
5/16 N	-17,0	14,9	4,76
5/08 N	-17,5	14,9	4,64

(1) **Poids de matière sèche** : $(100 \text{ g de départ} + 100 \text{ g} \times \% \text{ de croissance}) \times \% \text{ de matière sèche}$.

(2) **Poids d'agar** = poids de matière sèche en valeur absolue \times % d'agar.

Dans des conditions d'éclairement limitant (5/08N, 5/16N), la photopériode n'influence plus la production de matière sèche ou de colloïde, mais elle modifie sa qualité biochimique [rapport (oses totaux - 3,6-anhydrogalactose)/3,6-anhydrogalactose] (TAB. 11). Dans ce cas, la production d'agar et de matière sèche est faible, mais le pourcentage d'agar par rapport au poids de matière sèche augmente. Une partie de la matière sèche se transformerait donc en colloïdes.

L'ensemble de ces interprétations peut être résumé dans la figure 33 : en conditions printanières (température élevée, longue période de jour, soleil), la quantité d'eau dans le thalle augmente proportionnellement à la quantité de matière sèche et, dans une moindre mesure la part du colloïde croît ;

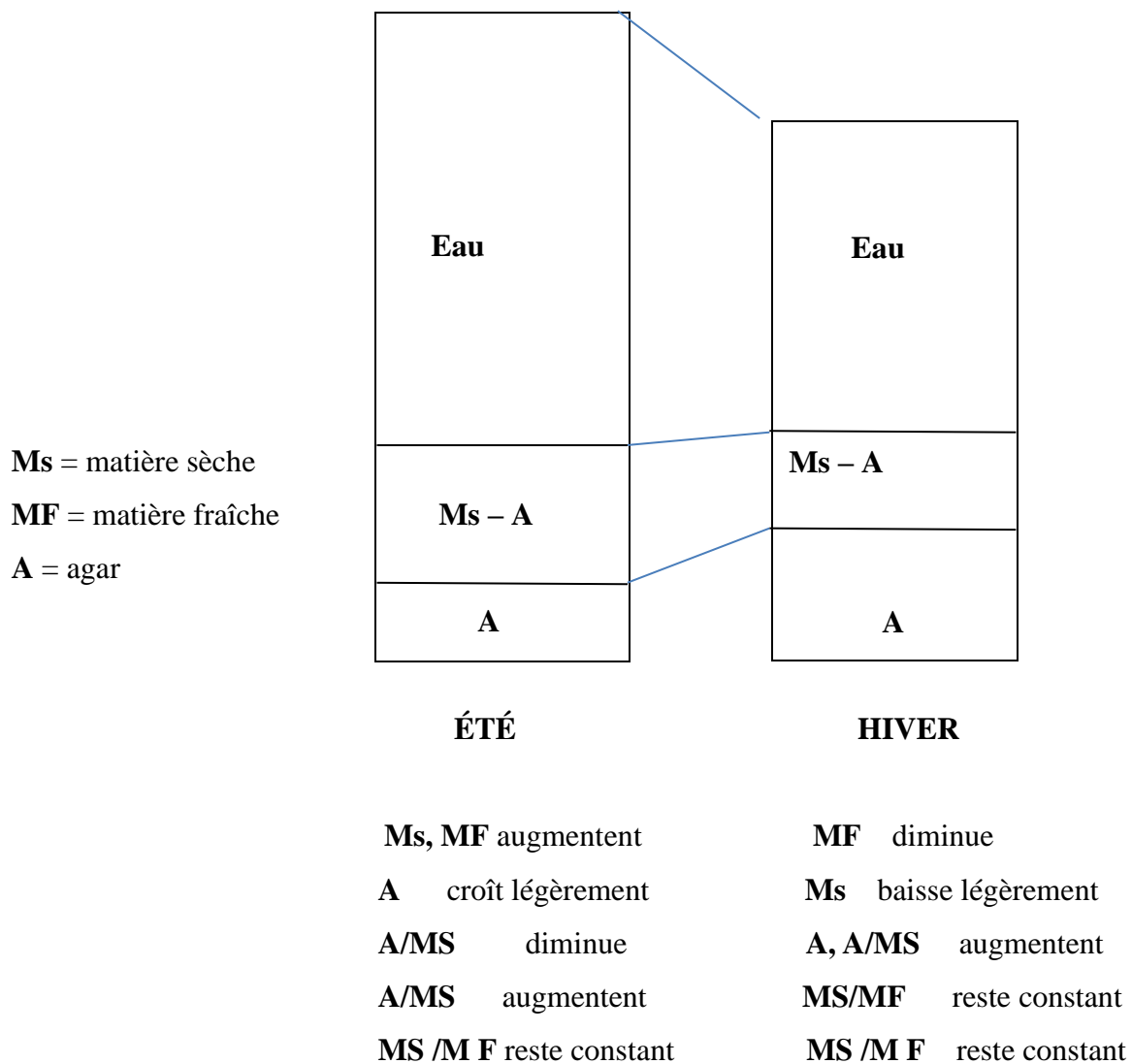


Figure 33 : Evolution schématique de la matière fraîche, de la matière sèche et de l'agar de *gracilaria verrucosa* dans différentes configurations de culture.

En conditions hivernales (basses températures, courte période de jour, faible éclaircissement), la quantité d'agar progresse par rapport à la matière sèche qui reste globalement inchangée.

D'un point de vue physiologique, ces résultats semblent en accord avec les hypothèses de départ. En saison froide, l'algue a donc tendance à accumuler dans ses parois, au détriment d'autres composés, un colloïde aux qualités chimiques conférant au gel des propriétés physiques compatibles avec une résistance de type mécanique (en effet, à l'observation macroscopique, les thalles cultivés à 5°C apparaissent plus fermes et rigides que ceux cultivés à 18°C).

Même si le déterminisme biologique qui préside à ces transformations est encore inconnu, des phénomènes semblables s'observent chez des espèces qui ont à résister mécaniquement à la

houle, telles que les Laminaires qui ont un rapport acide gluconique/acide mannuronique qui croît avec l'âge des tissus.

➤ Conclusion

Un éclaircissement de 17×10^{-3} ergs. Cm^{-2} . S^{-1} et une température de 18°C favorisent la croissance de la Gracilaire. Ce gain de poids frais se traduit par une importante accumulation de matière sèche et dans une moindre mesure par une synthèse de colloïdes.

Lorsque les conditions d'éclaircissement (17×10^{-3} ergs. Cm^{-2} . S^{-1}) et de photopériode (16 h de lumière) qui autorisent une photosynthèse importante sont réunies, la température n'est plus facteur limitant pour la croissance ou la synthèse d'agar.

Par contre, la biomasse chute pour de basses températures associées à une faible intensité lumineuse. Dans ce cas, la durée de la photopériode n'a plus d'influence. La photosynthèse est ralentie, comme en témoignent les faibles quantités de matière sèche.

L'augmentation des quantités d'agar traduit une accumulation de colloïdes dans les parois. Cette accumulation peut être comprise comme le résultat d'une synthèse de novo d'agar, ou comme une synthèse à partir de la matière sèche déjà accumulée.

Ce point sera vérifié dans une expérience ultérieure.

3.11.3. Conclusion générale :

Les données de la littérature laissaient croire à un antagonisme entre la croissance pondérale et la production de colloïdes. En fait, et conformément aux hypothèses de départ, ce phénomène peut être interprété comme une différence de vitesses de synthèse.

Ce décalage des courbes est maintenant bien expliqué :

- d'une part, l'accroissement de la biomasse est sensible aux conditions du milieu : température, éclaircissement et nutrition azotée. L'augmentation du poids de matière fraîche résulte d'une entrée d'eau et d'une synthèse de matière sèche qui est probablement représentée en majeure partie par de l'amidon floridien.

- d'autre part, cette phase préliminaire de constitution de réserves amylofères est suivie d'un accroissement des quantités d'agar. La synthèse du colloïde est plus importante que la synthèse de matière sèche après la phase de prolifération du thalle, lorsque les conditions de température, de lumière et d'éclaircissement sont défavorables à la croissance. Il apparaît alors clairement qu'une redistribution de la matière sèche se produit en direction des colloïdes pariétaux. Ce phénomène

est généralement masqué par l'expression des résultats en valeurs relatives. Le raisonnement en valeurs absolues a permis de lever certaines incertitudes.

Tout se passe donc comme si les constituants de la paroi évoluaient en fonction des conditions de développement de la cellule : la croissance ou la différenciation. Ainsi, la composition chimique des polysides matriciels de la paroi se modifierait au cours du temps de manière à permettre, sous une forme encore à définir, l'élongation cellulaire. Puis, la secondarisation qui suit, avec les réserves émises plus haut, permettrait le retour à un état d'équilibre physiologique compatible avec la pérennisation de la plante.

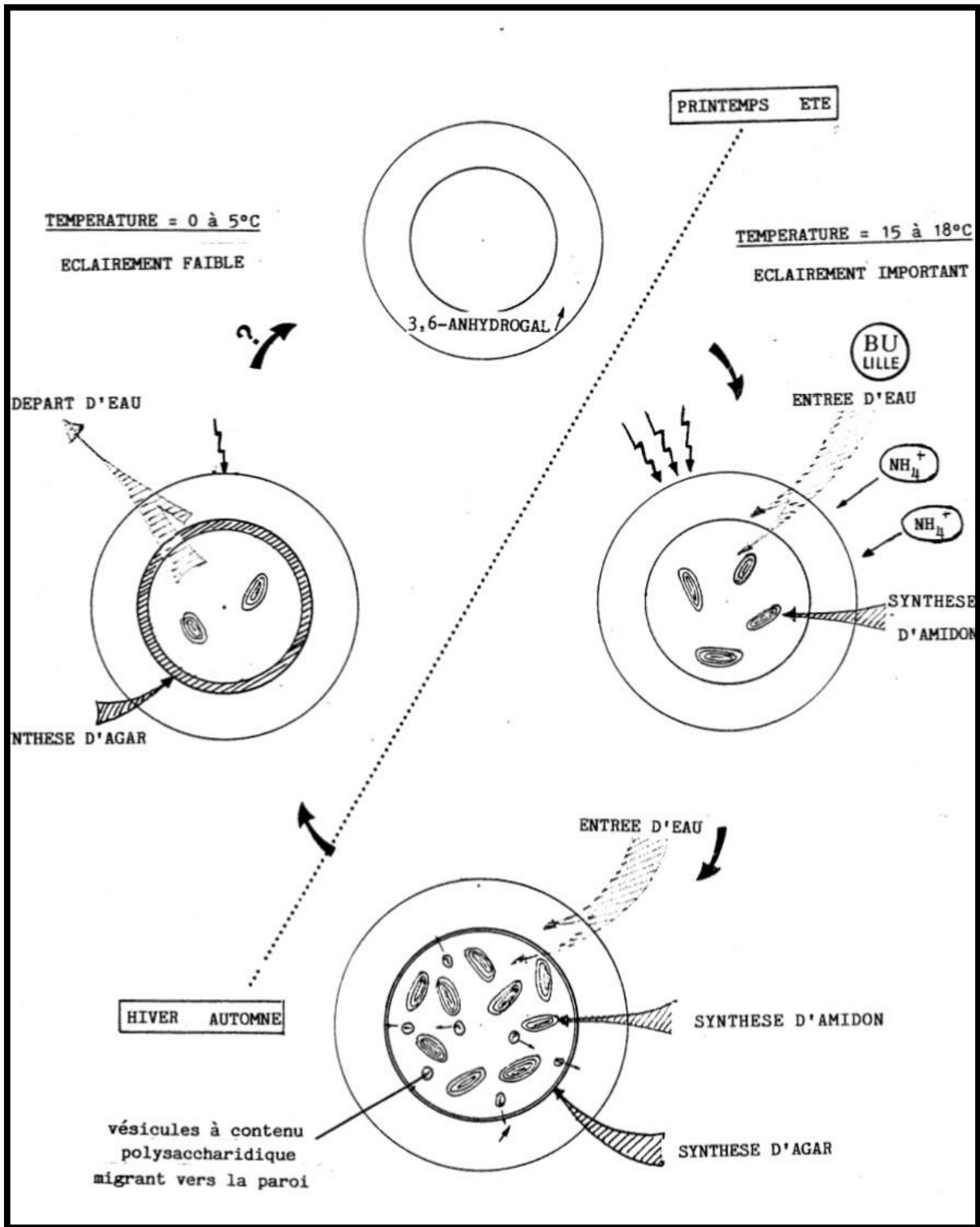
L'évolution des fractions polysaccharidiques de l'agar de *Gracilaria verrucosa* au cours des saisons, mise en évidence par CHRISTIAEN et al. (1984), renforce cette théorie. Par ailleurs, l'observation de clichés de microscopie électronique révèle une migration de vésicules à contenu polysaccharidique, du cytoplasme vers la paroi (VERDUS comm. pers.).

Il reste à décrire, à travers la composition chimique de ces composés, les propriétés physico-chimiques susceptibles d'intervenir dans les mécanismes d'étirement, de coulissement ou de renforcement des structures pariétales.

Cette étude apporte les premiers éléments de réponse. La biosynthèse d'agar, caractérisée par une augmentation du rapport (oses totaux - 3.6-anhydrogalactose / 13.6-anhydrogalactose), semble liée au métabolisme de l'amidon au niveau des précurseurs qui se déversent dans la paroi. Ces derniers se transforment en molécules plus riches en 3.6-anhydrogalactose quand les conditions du milieu deviennent défavorables à la croissance. Ces substitutions, qui ont une incidence sur les structures secondaire et tertiaire du colloïde, dans le sens de l'amélioration de la force du gel, sont en accord avec les propriétés mécaniques observées sur les thalles. Inversement, si l'existence de polymères plus sulfatés ou plus riches en composés uronosyls se vérifiait, la diminution de la rigidité des parois qui en résulterait serait compatible avec le grandissement cellulaire.

Cette vision physiologique permet de comprendre et d'interpréter le décalage entre les rendements élevés en agar et la croissance. Ce phénomène est fonction de la période de prélèvement et des conditions de culture. Les paramètres (température, éclairage, apport azoté ...) de ces dernières sont autant de facteurs qui influencent la synthèse de la matière sèche et de l'agar (fig. 34). Leur action est illustrée par la figure 34 qui regroupe sous forme d'un cycle annuel, les résultats des synthèses d'agar et de matière sèche observées dans les différentes conditions expérimentales de notre travail.

Figure 34 : Evolution de poids frais, de la matière sèche et de l'agar-agar de *GRACILARIA VERRUCOSA* sur un cycle annuel.



3.12. Les sociétés d'extraction

Toutes ces récoltes sur les peuplements sauvages et les champs cultivés alimentent, en fait, trois grandes sociétés d'extraction :

- Marine colloïdes (MCI ou FMC) dans l'état du Maine (États-Unis) ;
 - Système Bio Industrie (SBI) en France (cédé récemment au groupe allemand WBS, filiale de VIAG) ;
 - Danisco Ingrédients Landerneau (DIL) possédant des usines au Danemark et aux Philippines.
- Ces dernières années, des usines d'extraction se sont créées à proximité des lieux de production des carraghénophytes (Philippines, Indonésie). Des essais de culture sont tentés sur les côtes est de l'Afrique. Pour lutter contre cette tendance, qui les écarte du marché, les Occidentaux s'efforcent de maîtriser la culture en bassin de *Chondrus crispus*, mais les coûts de production sont nettement plus élevés que ceux en vigueur dans le Sud-Est asiatique.

4. Valorisation de l'agar-agar

4.1. Valorisation des algues rouge :

Dans les océans, la fixation du carbone par le phytoplancton joue un rôle clé dans le cycle géochimique du carbone. La biodiversité des organismes photosynthétiques est considérable à partir des micros algues du plancton. Celles-ci, présentes sur la Terre depuis plus de quatre millions d'années, jouent un rôle important dans la chaîne alimentaire au sein des mers. Certaines micros algues sont eucaryotes, c'est-à-dire qu'elles possèdent des cellules à un seul noyau. D'autres, les cyanobactéries, sont dites procaryotes avec la caractéristique de ne pas posséder de noyau cellulaire. Dans les océans, la fixation du carbone par le phytoplancton joue un rôle clé dans le cycle géochimique du carbone. La biodiversité des organismes photosynthétiques est considérable à partir des micros algues du plancton. Celles-ci, présentes sur la Terre depuis plus de quatre millions d'années, jouent un rôle important dans la chaîne alimentaire au sein des mers. Certaines micros algues sont eucaryotes, c'est-à-dire qu'elles possèdent des cellules à un seul noyau. D'autres, les cyanobactéries, sont dites procaryotes avec la caractéristique de ne pas posséder de noyau cellulaire (Jack Legrand, 2016).

Les molécules de chlorophylle, contenues dans les chloroplastes de la cellule végétale des microalgues, produisent par photosynthèse, avec le dioxyde de carbone de l'air et de la lumière, du dioxygène et de la biomasse : pour de 1 kg de micro algues et 1,6 kg de CO₂ consommés, on obtient 0,6 kg de biomasse (matière organique, ici d'origine végétale, source potentielle d'énergie) (Jacques Amouroux *et al*, 2012).

Les micros algues sont constituées de trois familles de grandes macromolécules : des protéines, des polysaccharides (sucres) et des lipides (graisses). Pour augmenter le pourcentage de lipides, on cultive des micros algues. En particulier, lorsqu'elles sont soumises à des conditions de « stress » en les privant d'éléments nutritifs (azote par exemple), elles accumulent de l'amidon (chaînes de polysaccharides) mais surtout des lipides jusqu'à plus de 60 % de leur masse (Fred Beisson *et al*, 2013).

4.2. Valorisation pour produire des biocarburants

Des prototypes industriels sont réalisés. Pour cela on introduit le dioxyde de carbone dans un réacteur (2500 litres) tubulaire en zigzag ou hélicoïdal (550 m) dans une bouillie aqueuse de micro algues (25 kg), en présence d'une source de lumière (Claude Gudin, 2012). Il existe aussi des réacteurs sous forme de bassins, appelés raceway en anglais par analogie aux champs de course (Jean-Claude Bernier, juillet-août 2013).

On obtient du dihydrogène (appelé bio-hydrogène), des alcanes (appelé bio kérosène), de l'amidon (qui conduira au bioéthanol) et des lipides (qui conduiront au biodiesel). Ce procédé industriel nécessite un contrôle précis de la quantité de CO₂, de l'intensité lumineuse, de la température, du pH...(Les Savanturiers, février 2016).

Pour extraire les huiles ainsi produites il faut des bassins de floculation, des unités de séchage sous pression, des opérations de centrifugation et des unités d'extraction par sonication (utilisation d'ultrasons) ou par dioxyde de carbone supercritique. Cela explique que le procédé ne soit pas encore opérationnel industriellement et fasse l'objet de nombreux développements (Jean-Claude Bernier, juillet-août 2013).

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale :

Sur la base de notre étude bibliographique, nous avons pu nous rendre compte du comment se fait les étapes de la fabrication (production, extraction) de l'agar-agar à partir d'une algue rouge, et des potentialités d'applications des algues marines rouges. Ces dernières disposent de leur place autant dans une alimentation courante que dans des régimes particuliers comme source complémentaire ou d'apport spécifique. Elles constituent une ressource potentielle et prometteuse à fournir encore plus de nouvelles substances biologiquement actives aux applications biomédicales etc...

Différents types de polysaccharides sont extraits des algues marines. Ils sont exploités généralement dans les pays développés dans la production des gélifiants, des stabilisants ainsi que les épaississants.

Ces polysaccharides sont autorisés par la Communauté Economique Européenne (CEE) comme des additifs alimentaires. Les agents de textures tels que l'agar, la carraghénane et les alginates sont très utilisés dans l'agroalimentaire dans la conception des produits laitiers, dans la clarification des boissons alcoolisées et dans beaucoup d'autres produits alimentaires.

Ils sont employés également dans d'autres secteurs industriels mais aussi dans la conception des autoroutes. Ils sont reconnus aussi comme un atout contre les incendies, dans le traitement des eaux usées etc...

En agriculture, les algues sont principalement utilisées comme engrais ou comme ingrédient dans la fabrication d'aliment pour le bétail. En effet, les algues favorisent la croissance des plantes, la résistance aux maladies et produisent des substances protectrices contre les agressions par les gastéropodes. Pour l'alimentation animale, les fuciales sont utilisées comme additifs alimentaires pour leurs qualités digestives. Elles sont transformées en farines mélangées à la nourriture.

L'exploitation des algues agarophytes devra prendre en compte les données sur la physiologie de la différenciation pariétale qui viennent d'être mises en évidence. Le forçage des cultures n'est pas le meilleur garant d'un bon rendement en agar. Il s'agit plutôt de trouver un moyen terme qui intègre, dans des cultures séquentielles, les conditions favorables à la photosynthèse et à la constitution de réserves d'amidon, et les conditions qui permettent un transfert de cette matière sèche vers les parois. La définition du milieu et des paramètres physiques de culture conditionnera les quantités et la qualité du produit fini.

Les macroalgues constituent aujourd'hui un enjeu majeur de développement économique. Les macroalgues sont présentes dans les eaux côtières tout autour du globe. On observe cependant des spécificités entre les différentes régions en termes de diversité spécifique, de techniques de production et d'utilisation.

BIBLIOGRAPHIE

- AKARI.C., 1966 - Some recent studies on the polysaccharides of agarophytes, Proceedings of the international seaweed symposium 5, 3-17.
- Brault D., Briand X., Golven P. (1982) - Les marées vertes. In : Colloque Valorisation des végétaux aquatiques, Bombannes, 16-19 novembre 1982,
- CAIRNS-SMITH (A.), 1990 - L'énigme de la vie. Ed. Odile Jacob. Paris,
- CHADEFAUD (M.), 1972 - La position systématique des Cyanophycées par rapport aux autres algues. Proc. Symp. Taxonomy Biol. of blue-green algae,
- CHADEFAUD (M.), 1974 - Possibilité d'une origine non symbiotique de la cellule des Eucaryotes. C. R. hebd. Séances Acad. Sci., Paris Fr., 278, 3079-3081. CHENG (L.) et LEWIN (R.A.), 1984 Prochloron on Synaptula. Bull. Mar. Sci., USA, 35 (1),
- CHISHOM (S.W.), OLSON (R.J.), ZETTLER (E.R.), GOERICKE (R.), WATERBURY (J.B.) et WELSCHMEYER (N.A.), 1988 - A novel free-living prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone. Nature, U.K.,
- CHOUIKHI.A., (2013) - Les applications potentielles de macro-algues marines et les activités pharmacologiques de leurs métabolites, pharmacologie, Institute of Marine Sciences & Technology/ Dokuz Eylul University Inter-Islamic Science & Technology Network on Oceanography, IzmirTURKEY,
- Conso Globe. Algues et alimentation [en ligne]. Disponible sur : https://www.encyclocolo.com/Algues_et_alimentation. Consulté le 21/05/17
- (en) Raymond Seed & Raymond J. O'Connor, « Community Organization in Marine Algal Epifaunas », *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 12, 1981.
- Lahaye M., Robic A. (2007) - Structure and functional properties of ulvan, a polysaccharide from green seaweeds. *Biomacromolecules*, 8.
- Les rédacteurs en chef de l'Encyclopædia Britannica. «Algues rouges.» Encyclopædia Britannica, Encyclopædia Britannica, inc., 3 oct. 2016.
- LE BRAS Quentin, RITTER Léa, FASQUEL Dimitri, LESUEUR Marie, LUCAS Sterenn, GOUIN Stéphane. (2014) - Etude nationale de la consommation d'algues alimentaires : Contexte et méthodologie. Programme IDEALG Phase 1. Les publications du Pôle halieutique AGROCAMPUS OUEST n°30,
- LE GUILLARD Cécile., Colloque PONAN novembre 2013 - VALORISATION PROTEIQUE DES MACROALGUES, Laboratoire STBM, Ifremer Laboratoire MMS EA 2160, Université de Nantes.
- Lahaye M., Robic A. (2007) - Structure and functional properties of ulvan, a polysaccharide from green seaweeds. *Biomacromolecules*, 8,

- Les rédacteurs en chef de l'Encyclopædia Britannica. «Algues rouges.» Encyclopædia Britannica, Encyclopædia Britannica, inc., 3 oct. 2016.
- MESNILDREY Lucile, JACOB Céline, FRANGOUEDES Katia, REUNAVOT Mélanie, LESUEUR Marie, (2012) - La filière des macro-algues en France. Rapport d'étude. NETALGAE – Interreg IVb. Les publications du Pôle halieutique AGROCAMPUS OUEST n°9.
- National Bookstore Inc, Metro Manilla Philippines, 330. TSENG (C.K.), 1980. Marine phyoculture in China. Proc. 10 th Int Seaweed Symp., 123-152. TSENG (C.K.), 1984.
- N. ElMtili, F.Z. Fakihi Kachkach et M. El Harchi., (2013) - Les algues marines: nouvelle potentialité économique pour le Maroc. Quelle stratégie biotechnologique? Laboratoire de Biologie et Santé, Faculté des Sciences, Université Abdelmalek Essaadi, Tétouan,
- OCEALG. Les algues alimentaires en Bretagne [en ligne].disponible sur : <https://www.ocealg.com/>. Consulté 21/05/17
- Schlichting, H.E.J. (1960) *the role of waterfowl in the dispersal of algae*. Transactions of the American Microscopical Society,
- TRONO (G.C. Jr.), 1987 - Studies on the pond culture of Caulerpa. Phil. J. Sc. Monogr.,
- TRONO (G.C. Jr.), 1988. Pond culture of Gracilaria. Asean SF Manual 3, 13-20.
- TRONO (G.C. Jr.) ET AZANZA-CORRALES (R.), 1980 - The seasonal variation in the biomass and reproductive states of Gracilaria in Manila bay. Proc. 10 th Int. Seaweed. Symp.
- TRONO (G.C. Jr.), GANZON-FORTES (E.T.), 1988. Philippine seaweeds. National Bookstore Inc, Metro Manilla Philippines, 330. TSENG (C.K.), 1980. Marine phyoculture in China. Proc. 10 th Int Seaweed Symp.,
- TSENG (C.K.), 1984 - Modern seaweeds of China. Beijing, Science Press,
- TSENG (C.K.), WU (C.Y.), 1962 - Mariculture in Laminaria japonica. Sc. Press. Pékin. 82 p. TSENG (W.Y.) 1984 - Eucheuma of Taiwan: emphasizing its mariculture potential. Hydrobiologia,
- TSUJI (K.), IWAO (T.), NAKAGAWA (Y.) et SEKI (T.), 1983 - Effects of dietary taurine on bile acid.
- UEB et Partenaires .UEB – Idealg : Projet Investissement d'Avenir [en ligne]. Disponible sur : <http://www.idealg.ueb.eu/macroAlgues/utilisation/> consulté le 22/05/17

- Williams, Peter W.; Phillips, Glyn O. 2000- *Manuel des hydrocolloïdes* . Cambridge: Woodhead. ISBN 1-85573-501-6.
- Additif4-1. les agents épaississants et gélifiant de nature glucidique .disponible sur : www.utc.fr/~cochet/BT10JPB/additifs4-1.pdf. Consulté le 22/05/17.