SAN
Société Algérienne de Nutrition
Nutrition & Santé

Composés bioactifs

Les algues, une ressource aux applications multiples : Nutrition, Santé, Cosmétologie, Bioénergie, Environnement

The algae, a resource with multiple applications: Nutrition, Health, Cosmetics, Bioenergy, Environment

*Gérard TREMBLIN**

EA 2160-MMS, Mer Molécules Santé, IUML-FR 3473 CNRS, Université du Maine, 72085 Le Mans, France

Reçu le 27 avril 2016, Révisé le 31 mai 2016, Accepté le 1er juin 2016

*Auteur correspondant : tremblin@univ-lemans.fr

Résumé Les algues marines sont une source potentielle de composés ayant des applications dans des domaines aussi différents que l'agroalimentaire, la santé, la cosmétique, l'aquaculture, la nutraceutique, l'environnement et les énergies renouvelables. Les lipides et les pigments, représentent les deux principaux groupes de molécules d'intérêt aussi bien chez les grandes algues ou macroalgues que chez les microalgues qui composent le phytoplancton. Les macroalgues font depuis longtemps l'objet d'une exploitation industrielle comme source de gélifiant (agar, carraghénane, alginate) ou pour des utilisations alimentaires (nori, wakamé, kombu). Certaines espèces font l'objet de récolte et d'autres sont cultivées. Les microalgues, quant à elles, sont au cœur, depuis quelques années, de nombreux projets industriels comme la production de pigments, d'acides gras oméga-3 ou plus largement de lipides en vue d'un futur usage comme source de biocarburant. Elles font l'objet de culture en photobioéacteurs ou en bassins ouverts dans de nombreuses régions du globe. Parmi les microalgues, une diatomée riche en oméga-3, cultivée industriellement dans la région des Pays de la Loire et commercialisée comme complément alimentaire a servi de modèle dans nos travaux en vue d'optimiser sa valorisation. Les résultats obtenus au niveau des conditions optimales de son développement en culture et les avantages de son utilisation comme complément alimentaire dans la prévention des facteurs de risque cardiovasculaire chez des rats soumis à un régime hyperlipidique sont présentés. A la lumière de leurs multiples applications, l'importance respective des deux filières (macro et micro algues) sont

comparées et l'opportunité de leur développement est discutée.

Mots-clés : *Macroalgues, Microalgues, Pigments, Lipides, Oméga-3, Complément alimentaire*

Abstract Marine algae present a potential source of compounds with numerous applications in fields as different as, food processing, health, cosmetics, aquaculture, nutraceuticals, environment and renewable energy. Lipids and pigments are the main products of interest in large seaweeds or macroalgae and in microalgae composing the phytoplankton. Macroalgae have long been the subject of industrial use as gelling source (agar, carrageenan, alginate) or food uses (nori, wakame, kombu). Some species are harvested and others are grown. Microalgae, for their part are the focus, for recent years, of many industrial projects such as, pigment production, omega-3 fatty acids production or more generally lipids for a future use as a biofuel resource. They are cultured in photo-bioreactors or open tanks in many regions of the world. Among the microalgae, a diatom rich in omega-3, cultivated industrially in the region of "Pays de la Loire" and commercialized as a human food supplement, has been studied in order to optimize its valorisation. Results, obtained for optimal conditions of development in culture and the advantages of using it as a food supplement for preventing cardiovascular risk factors in rats subjected to a high fat diet, are presented.

Keywords: *Macroalgae, Microalgae, Pigments, Lipids, Omega-3, Food supplement*

Introduction

Sous le terme général « algue », on désigne un vaste assemblage d'organismes souvent phylogénétiquement éloignés dont la morphologie peut sembler relativement homogène au moins chez celles de grande taille, les macroalgues. Avec celles de très petite taille, les microalgues, les points communs se résument à des organismes généralement inféodés aux zones humides (eaux marines, eaux saumâtres ou eaux douces), mais pas uniquement car il en existe des aériennes, pratiquant la photosynthèse et possédant pour cela de la chlorophylle *a*. La classification des algues est très complexe car les critères classiques de classification utilisés chez les plantes terrestres (essentiellement basés sur l'organisation de l'appareil végétatif et de l'appareil reproducteur) ne peuvent être utilisés ici. Chez ces végétaux, l'appareil végétatif se réduit à un thalle (pas de tiges, de racines, de feuilles, ni de fleurs) et l'appareil reproducteur lorsqu'il est présent est souvent si discret que l'on ne peut l'observer qu'au microscope. La présence des pigments est l'un des critères les plus couramment utilisés pour les classer, on distingue ainsi les algues vertes ou Chlorophycées riches en chlorophylles *a et b,* les algues brunes ou Phéophycées, contenant entre autres les Chl *a et c* auxquelles s'ajoute de la fucoxanthine (pigment brun), les algues rouges ou Rhodophycées contenant de la Chl *a* et des pigments rouges et bleus appartenant aux phycobiliprotéines. Par ailleurs, sur un critère de taille, on distingue les macroalgues formant des thalles pluricellulaires et les microalgues, le plus souvent unicellulaires mais s'associant parfois pour former des colonies.

Les macroalgues

Elles sont faciles à observer sur les côtes rocheuses, mais la plus grande partie est immergée n'apparaissant que lors les marées basses, les plus grandes espèces (comme les laminaires) étant

continuellement immergées. Elles sont en général fixées aux rochers par un crampon mais certaines flottent librement comme les sargasses ou les laitues de mer. Elles forment une ceinture le long du littoral des mers du globe sur une distance moyenne de 300 m de large pour une profondeur maximale de 100 m environ car elles ont besoin de lumière pour se développer. Lorsqu'elles sont suffisamment abondantes, rendant possible leur exploitation, on parle de gisements qui se situent en général dans les zones froides où l'eau est fortement brassée avec une grande amplitude de marée.

Utilisation paramédicale et agronomique

Dans le domaine paramédical, l'utilisation des macroalgues est en expansion. Elles sont surtout utilisées en médecine douce (tisanes, décoction) et en thalassothérapie (enveloppement d'algue, sels de bains, crèmes amincissantes, etc.). L'industrie pharmaceutique exploite de façon significative l'alginate de sodium (composant du Gaviscon utilisé dans le traitement du reflux gastro-œsophagien) intervient dans la fabrication des emplâtres et des pansements ou chez le dentiste dans le moulage des dents. Le mannitol comme édulcorant non digestible ne perturbant pas la glycémie ou comme stabilisant dans les dentifrices, les shampoings et les différentes crèmes de beauté.
Dans le domaine agricole, à proximité des côtes, les algues sont utilisées depuis l'antiquité de façon empirique pour amender les sols. À l'époque, les algues étaient répandues à même le sol, depuis des engrais biologiques à base d'algues brunes broyées ou concentrées sous forme d'extraits liquides sont commercialisés. Très récemment, des extraits de laminaires comme l'Iodus 40 [1] sont utilisés en prévention des maladies cryptogamiques comme éliciteur des défenses naturelles des plantes cultivées. Les farines d'algues sont aussi utilisées dans l'alimentation animale sans dépasser 10 %.

Utilisation directe des macroalgues comme aliments

D'un point de vue nutritionnel, les macroalgues présentent un certain nombre d'intérêts. Elles sont faiblement caloriques car les glucides qui les composent sont pour la plupart non assimilables et sous forme de fibres mucilagineuses qui facilitent le transit intestinal. Elles présentent une forte teneur en iode car elles concentrent dans leurs tissus l'iode contenu dans l'eau de mer; l'apport journalier de 150 mg d'iode conseillé par l'Organisation Mondial de la Santé (OMS) pour un adulte pourrait être couvert par quelques grammes d'algues. Elles sont pour la plupart riches en protéines et pauvres en lipides, mais avec un taux en acides gras essentiels souvent supérieur à celui des autres végétaux.
En occident, la consommation des macroalgues-légumes par l'homme n'est pas une pratique courante alors qu'elle est traditionnelle depuis des millénaires dans les pays asiatiques (Japon, Chine, Corée, Pays de l'Asie du Sud-Est, Indonésie etc.). Historiquement, il semble que les Wikings et les marins en général emportaient des algues dans leurs expéditions afin d'éviter le scorbut lors des longues traversées. De même, les Celtes consommaient essentiellement une algue rouge, *Palmaria palmata,* plus connue sous le nom de dulse. Par ailleurs de tout temps, en période de disette, les algues servaient de complément aux populations côtières soit directement pour se nourrir ou indirectement pour nourrir les animaux d'élevage. Ce n'est qu'à la fin du siècle dernier (début des années 1980) que la commercialisation des macroalgues-légumes a été partiellement autorisée en France. Seulement une vingtaine d'espèces sont actuellement autorisées à la consommation (Tableau I), alors qu'il y en a plus de 50 au Japon. Elles présentent un intérêt nutritionnel de par leur richesse en vitamines et en minéraux.
Dans les pays asiatiques trois aliments provenant des algues, désignés par les termes Kombu, Wakamé et Nori dominent le marché :
- Le kombu est produit à partir d'algues brunes appartenant au genre *Laminaria*, essentiellement *Laminaria japonica*. Après récolte les algues sont ébouillantées, séchées, puis traitées de deux façons : le kombu vert lorsque l'algue est colorée en vert à l'aide de vert de malachite, coupée en morceaux et consommée comme légume "vert", le kombu blanc lorsque l'algue est confite dans le vinaigre puis séchée et grattée. Une fois éliminée la partie externe de couleur noire (kombu noir), la

partie interne blanche ou kombu blanc est débitée en cube et consommée comme légume. Réduit en poudre le kombu est aussi utilisé comme condiment ou en infusion; on trouve aussi du saké, des pâtes, des bonbons au kombu, etc.
La production au Japon de kombu, toutes formes confondues, est estimée à plus de 4 millions de tonnes par an.

- Le wakamé est un aliment préparé principalement à partir d'une seule espèce d'algue *brune Undaria pinatifida*; espèce abondamment cultivée au Japon mais aussi dans d'autres régions du globe et en particulier en France sur la côte bretonne. L'algue récoltée, nettoyée puis salée et séchée, est consommée directement dans les soupes (c'est l'un des composants de la soupe

Tableau I. Listes des espèces de macroalgues autorisées dans l'alimentation humaine, intérêt et mode de consommation

Espèce	Nom commun	Classe, Couleur	Intérêt	Mode de consommation
Chondrus crispus	Pioca, Lichen de mer, Mousse d'Irlande, Carraghen,	Rhodophycées (rouge)	Gélifiant (carraghénane)	Extrait aux propriétés gélifiantes
Palmaria palmata	Dulse	Rhodophycées (rouge bordeaux)	Riche en magnésium	En salade crue ou cuite
Porphyra Umbilicalis *P. tenera* *P. yezoensis* *P. dioica* *P. purpurea* *P. laciniata* *P. leucostica*	Porphyre, Laitue pourpre, Nori	Rhodophycées (rouge violacé)	Riche en protéines et en vitamines	Sous forme de maki principalement
Himanthalia elongata	Haricot ou spaghetti de mer	Phéophycées (brun vert)	Riche en fibres et en minéraux	Cuite comme un légume
Undaria pinnatifida	Wakamé	Phéophycées (vert brun)	Détoxifiant grâce aux alginates	Crue en salade ou cuite dans les soupes
Laminaria saccharina, *L. digitata,* *L. japonica*	Laminaire sucrée, Kombu, Kombu royal	Phéophycées (brun)	Très riche en iode	Elément de base du dashi (soupe japonaise) Extrait aux propriétés gélifiantes
Ulva lactuca	Laitue de mer	Chlorophycées (vert vif)	Riche en vitamines C	En salade
Gracilaria verrucosa	Ogonori	Rhodophycées (rouge orangé)	Source de l'agar	Extrait aux propriétés gélifiantes
Fucus vesiculosus *F. serratus*	Varech vésiculeux	Phéophycées (brun)	Riche en fibres et en alginate	Légume mais surtout farine pour le bétail
Enteremorpha intestinalis	Ao-nori, Cheveux de mer, Nori vert	Chlorophycées (vert vif)	Riche en fer	Achée pour parfumer les salades ou les omelettes
Lithothamnium calcareum	Mäerl	Rhodophycées (blanche)	Complément alimentaire riche en carbonates et en minéraux	En gélules
Ascophyllum nodosum	Goémon noir	Phéophycées (brun foncé)	Riche en minéraux, iode et en alginate	Légume, mais surtout farine pour le bétail

Miso des japonais) ou en salade.
La production mondiale essentiellement japonaise et coréenne dépasse largement les 500 000 tonnes mais en France, elle reste confidentielle, mais se développe de plus en plus. Cette algue est très riche en calcium avec une teneur plus de dix fois supérieure au lait.
- Le nori est préparé à partir d'algues rouges à thalle plat appartenant au genre *Porphyra*. Après récolte, les algues sont séchées et forment alors une feuille de couleur brune de 2 à 3 g : les feuilles de nori sont diversement utilisées : soit consommées directement après chauffage, soit réduites en poudre et utilisées comme condiment ou encore elles servent d'emballage à d'autres aliments comme les makis de la cuisine japonaise. On fait aussi du vin de nori, des confitures de nori, etc.
La production annuelle est conséquente : plus de 10 milliards de feuilles de nori par an rien qu'au Japon. La production mondiale dépasse le million de tonnes.
D'autres espèces font l'objet d'une consommation par l'homme mais en quantité beaucoup moins importante. Citons les ulves, les enthéromorphes, les gracilaires, les caulerpes, etc., le plus souvent consommées en salade ou en soupe.
Si, dans de nombreux pays, l'utilisation des algues comme aliment est très réduite, elles présentent pourtant un intérêt certain dans la mesure où elles sont riches en sels minéraux, en iode et en vitamines, et pour certaines espèces en protéines. De plus les polysaccharides qu'elles contiennent ne sont pas digérés ni assimilés, ce qui en fait des aliments très diététiques.
Actuellement la consommation mondiale d'algues alimentaires approche les 10 millions de tonnes essentiellement issues de l'algoculture, seulement environ 1 million de tonnes d'algues sauvages sont récoltées. En France, la production d'algues (récolte et culture) ne dépasse pas quelques centaines de tonnes par an.

Utilisation indirecte des algues (extraits)

L'utilisation industrielle ancestrale des algues en Bretagne consistait à en extraire l'iode. Le travail des goémoniers consistait à récolter les laminaires puis à les brûler directement sur la côte, obtenant alors des blocs de cendres compacts appelé « pain de soude » dont on extrayait ensuite l'iode, mais aussi des sous-produits car dans 100 g de cendre de laminaires, il y a en moyenne 30 g de soude, 30 g de potassium et seulement 0,5 g d'iode. Cette activité traditionnelle a maintenant disparu, mais les algues sont toujours récoltées pour en extraire des gélifiants (alginates des algues brunes, agar et carraghénanes des algues rouges). Abondamment utilisés dans l'industrie agro-alimentaire ces phycocolloïdes sont codés de E401 à E407. Les caractéristiques (origine, nature chimique, extraction, gélification, utilisations, production) des 3 principaux phycocolloïdes ont été rapportées dans la littérature [2].

Aquaculture végétale ou phycoculture

La récolte en milieu naturel des macroalgues à des fins alimentaires en Asie ou industrielle en Europe (Bretagne, Norvège) ou en Amérique est une activité traditionnelle très ancienne. Manuelle pour le *Chondrus crispus,* automatisée lorsque les algues sont de grandes tailles et forment des champs importants comme les laminaires (essentiellement *Laminaria digitata*) en Nord Bretagne (activité des goémoniers utilisant un dispositif particulier : le scoubidou) ou des bateaux faucardeurs sur les côtes des USA permettant la récolte intensive des *Macrocystis*. Mais depuis quelques dizaines d'années, les quantités récoltées étant insuffisantes par rapport aux besoins de l'industrie des phycocolloïdes ou à la demande alimentaire des pays asiatiques, des techniques de culture ont été mises au point. Les plus importantes sont :
- **La culture des *Porphyra***. Cette espèce est essentielle dans l'alimentation japonaise pour fabriquer le nori Jusque dans les années 1950, les Japonais favorisaient l'installation naturelle de cette espèce en plantant des tiges de bambous ("hibis") dans les zones côtières où elle se développait. La découverte du cycle complet de reproduction de cette espèce et en particulier du stade *Conchocelis* a permis de développer des techniques de production de «semences» (conchospores) au laboratoire; sous forme de jeunes pousses fixées sur des filets flottants qui sont ensuite installés sur la côte ou immergés en pleine mer. Ces techniques, maintenant bien maîtrisées, permettent des cultures intensives et la possibilité de congeler les filets après leur ensemencement donc portant des

germinations de quelques centimètres, rendent la « semence » disponible à tout moment ce qui a encore permis d'améliorer et de faciliter la production des algues. Les thalles de 10 à 20 cm de diamètre sont récoltés après 30 à 50 jours de culture. La production annuelle de *Porphyra* est estimée à plus de 1,5 millions de tonnes.

- **La culture des *Laminaria***. La culture des grandes algues brunes est une activité initiée depuis longtemps par les Japonais qui s'est ensuite propagée dans d'autres régions du globe. Les techniques ancestrales consistaient en milieu naturel à favoriser la fixation des spores dans les zones côtières sableuses en y immergeant des rochers ou en fractionnant les rochers existant à l'aide d'explosifs. Ces méthodes très empiriques ont été ensuite remplacées par des techniques d'ensemencement contrôlé à l'image de ce qui avait été réalisé pour les algues rouges. Une technique dite de «free living » [3] permet ainsi d'obtenir là encore des « semences » (jeunes pousses) en laboratoire tout au long de l'année rendant possible ensuite des cultures en mer au large sur des filins fixés à des bouées flottantes. La grande algue récoltée ou cultivée est le sporophyte. La production annuelle d'algues brunes en perpétuelle augmentation est estimée à plus de 7 millions de tonnes avec environ 5 millions de tonnes pour *Laminaria japonica* et 2 millions de tonnes pour *Undaria pinnatifida*. La récolte en milieu naturel, maintenant réglementée pour préserver la ressource, stagne autour de 1 million de tonnes.

- **La culture des *Eucheuma***. Face à la demande des industriels, la récolte de carraghénophytes est rapidement devenue insuffisante. Aussi, aux Philippines (initiée par un biologiste américain, Doty dans les années 60) puis dans d'autres pays (l'Indonésie, la Malaisie, les îles Salomon et les îles Fidji, le Vietnam et la Chine) s'est développée une culture intensive d'algues rouge source de carraghénanes. Une dizaine d'espèces appartenant aux deux genres *Eucheuma et Kappaphycus* sont principalement cultivées. Chez les algues rouges, la mise en culture est simplifiée par bouturage des thalles le long de filières flottantes ou fixées au substrat, immergées en permanence à faible profondeur afin de recevoir un niveau d'éclairement suffisant. Ces algues ne supportent pas l'émersion et nécessitent de travailler en immersion permanente. La croissance rapide permet jusqu'à 4 récoltes par an et la production voisine le million de tonnes par an dont une grande partie est exportée principalement en Europe pour produire des gélifiants.

- **La culture du *Chondrus crispus***. Dans les années 1980 des projets ont vu le jour afin de produire des carraghénophytes en Europe et en Amérique. L'espèce retenue a été le *Chondrus crispus* traditionnellement récolté sur certaines côtes françaises et canadiennes pour cet usage mais dont la récolte était très insuffisante par rapport aux besoins des industriels. Ainsi en France, des fermes de culture intensive de cette espèce ont été installées dans un premier temps dans le Cotentin (Normandie) en utilisant la technique du « raceway » en extérieur à proximité de la tourbière de Beaupte (Blainville) qui fournissait l'énergie. Les conditions climatiques étant peu favorables, les installations ont ensuite été transférées dans la baie de Bourgneuf (Pays de la Loire), région beaucoup plus ensoleillée. La société Innovalg cultive ainsi depuis 1998, par bouturage et de façon automatisée des souches de *Chondrus* bien caractérisées. Des installations similaires mais de plus grande ampleur existent au Canada.

- **Autres cultures de macroalgues**. Afin de produire de l'agar, la culture intensive du genre *Gracilaria* se développe depuis une dizaine d'années pour atteindre une production dépassant les 1,2 millions de tonnes. Plusieurs pays : la Chine, la Thaïlande, le Chili et Taiwan ont mis en place différents systèmes de culture en général couplé avec des élevages de poissons herbivores qui nettoient les bassins en broutant les algues vertes. En général, ils utilisent des marais communicants avec la mer, dans lesquels les boutures de *Gracilaria* sont fixées sur des cordages fixés ou flottants. D'autres espèces (genres *Ulva*, *Monostroma*, etc.) sont cultivées essentiellement pour l'alimentation, mais les quantités produites restent souvent faibles (quelques milliers de tonnes), destinées à une consommation locale. Aux Etats-Unis, les *Macrocystis*, algues brunes géantes (taille moyenne : 45 m) abondantes sur les côtes du Pacifique ont été intensément récoltées dans les années 1930 par les bateaux faucardeurs afin d'en extraire les alginates ou de les utiliser comme fertilisant. Depuis, elles font l'objet de tentatives de repeuplement avec plus ou moins de

succès.

Les microalgues

On désigne par microalgues des organismes unicellulaires, filamenteux ou coloniaux, de quelques micromètres à quelques centaines de micromètres, présentant un rapport surface/volume élevé favorisant leur flottabilité. Elles sont ubiquistes, pélagiques ou benthiques, abondantes dans les océans, les mers, les rivières, les lacs, mais aussi présentes plus discrètement sur les sol, les murs, l'écorce des arbres, etc.). Leur mode de reproduction est principalement asexué (division cellulaire rapide), ce qui facilite leur culture. Elles sont en général photoautotrophes, convertissant à la lumière le CO_2 en chaînes carbonées par photosynthèse, mais certaines sont mixotrophes voir hétérotrophes utilisant différents substrats organiques pour se développer. Elles ont besoin de nutriments comme les formes minérales de l'azote (NO_3^- et NH_4^+), des phosphates, divers sels minéraux, parfois spécifiques comme la silice chez les diatomées. Enfin elles peuvent être nuisibles lorsqu'elles prolifèrent abondamment induisant une anoxie ou en libérant des toxines. Du fait de leur biodiversité, les microalgues présentent un important potentiel exploitable par l'industrie. En effet, suivant les espèces, elles sont riches en lipides et en acides gras poly-insaturés (Tableau II), en protéines, en pigments (Tableau III) et en antioxydants, etc. Elles sont donc présentes dans des secteurs très diversifiés comme celui des aliments fonctionnels, des compléments alimentaires, de la cosmétique, de l'industrie pharmaceutique et plus traditionnellement de l'aquaculture, pour ne citer que les principaux.
Prochainement, elles devraient participer à la production d'énergie renouvelable sous forme de biocarburant grâce à leur capacité à produire et à stocker en condition des stress de grandes quantités de lipides, source de biodiésel.

Les lipides des microalgues

Nous nous sommes intéressés aux lipides des microalgues [11] bien que les travaux concernant la composition lipidique des microalgues (teneurs en lipides totaux, différentes classes lipidiques, acides gras constitutifs) soient nombreux.

Tableau II. Teneurs en lipides totaux (% du poids sec) et en EPA et DHA (en % des lipides totaux) de quelques espèces de microalgues

Microalgues	Lipides (%)	EPA	DHA	Références
Bacillariophycées (Diatomées)				
Chaetoceros sp.	11-21	++	+	[4, 5]
Skeletonema costatum	13-24	+++	+	[6, 5]
Phaeodactylum tricornutum	20-30	++++	+	[7]
Thalassiosira pseudomona	21-31	+++	-	[8]
Nitzschia sp.	45-47	++++	-	[7]
Odontella aurita	8-10	+++	+	[9]
Prymnésiophycées				
Pavlova lutheri	21-28	++++	+++	[4]
Isochrysis sp.	20-33	-	+++	[4, 7]
Prasinophycées				
Tetraselmis sp.	9-23	+	-	[5, 7]
Chlorophycées				
Chlorella sp.	28-45	+	-	[10, 7]
Eustigmatophycées				
Nannochloropsis sp.	31-68	++++	-	[7]
Dinophycées				
Crythecodinium cohnii	20	-	++++	[7]
Rhodophycées				
Porphyridium cruentum	10-15	+++	-	[11]

< 1 % + 1 à 5 % ++ 5 à 10 % +++ 10 à 20 % ++++ > 20 %

Tableau III. Les principaux pigments des microalgues, propriétés et utilisations

Pigments	Propriétés	Utilisations
Astaxanthine (rose) **Canthaxanthine**	Colorantes Anti-inflammatoires Anti-oxydantes	Aquaculture Ex : coloration de la chair des saumons, des crevettes, des oeufs
Caroténoïdes **β-carotène (orange)** **Lutéine (rouge-orange)**	Colorantes Anti-oxydantes	Industrie alimentaire, pharmacologique, cosmétologique et diététique
Marennine (bleu)	Colorantes	Ostréiculture Ex : verdissement des huîtres de claires
Phycocyanine (bleu)	Colorantes, Marqueur fluorescent Anti-oxydantes Anti-inflammatoires	Complément alimentaire Diagnostique (marqueur) en recherche et en médecine
Phycoérythrine (rouge)	Colorantes Marqueur fluorescent Anti-oxydantes	Diagnostique (marqueur) en recherche et en médecine

Toutefois leur diversité et la plasticité de leur métabolisme expliquent la variabilité des résultats obtenus. Les facteurs abiotiques comme l'âge des cultures et les conditions environnementales (température, éclairement, nutriments, etc.) influencent beaucoup leur composition en lipides. Ainsi les teneurs en lipides totaux des microalgues peuvent varier entre 10 et 80 % de la masse de

matière sèche suivant l'espèce et les conditions de culture (Tableau II). Si les trois classes de lipides neutres (LN), glycolipides (GL) et phospholipides (PL) sont présentes, les lipides polaires (GL et PL), composants majeurs des membranes cellulaires, constituent 41 à 92 % des lipides totaux; alors que les LN de réserve ne représentent que 5 à 51 % des lipides totaux [10-14]. Au niveau nutritionnel, l'intérêt principal des microalgues est la présence d'acides gras polyinsaturés à longue chaîne (AGPI-LC) essentiellement les oméga-3 acides eicosapentaénoïque (EPA, 20:5 n-3) et docosahexaénoïque (DHA, 22:6 n-3) qu'elles apportent lorsqu'elles sont consommées sous forme de complément alimentaire. Dans ce contexte, en vue de préciser les conditions optimales de synthèse des acides gras oméga-3, nous avons étudié l'influence de l'éclairement visible et ultraviolet, de la source de carbone et de la température sur la composition lipidique chez deux Diatomées (*Skeletonema costatum* et *Odontella aurita*) et une Pavlovophycée (*Pavlova lutheri*) [15-18]. L'influence du niveau d'éclairement sur les voies de synthèse des AGPI-LC de *P. lutheri* a également été étudiée. [19,20]

Parmi les microalgues d'intérêt une diatomée marine cultivée depuis 1994 dans des bassins d'eau de mer (INNOVALG, Loire-Atlantique, FRANCE) a été agréée, en 2002, pour la consommation humaine, par l'AFSSA (Agence Française pour la Sécurité Sanitaire des Aliments). Elle est commercialisée sous forme lyophilisée comme complément alimentaire végétal riche en oméga-3, en silicium, en vitamines (B2, B6, C, E, PP), en provitamine A, en minéraux et en oligoéléments.

Une approche originale a consisté à étudier expérimentalement sur des modèles murins (rats mâles Wistar) les effets d'un lyophilisat de cette microalgue marine, *Odontella aurita*, apporté comme complément alimentaire chez des rats soumis à un régime hyper-lipidique. Les résultats obtenus [21] suggèrent un rôle préventif, voire protecteur d'*O. aurita*, en tant que complément alimentaire, contre les maladies cardiovasculaires par l'enrichissement du plasma et du foie en oméga-3, la diminution de la glycémie et des taux de triglycérides sérique et hépatique et la diminution du stress oxydant au niveau du foie. L'huile de poisson étant la source d'oméga-3 la plus fréquemment utilisée, une étude nutritionnelle comparative a été réalisée chez des rats soumis à un régime hyperlipidique supplémenté ou non avec du lyophilisat d'*O. aurita* ou de l'huile de poisson. Les résultats obtenus montrent que, si les deux compléments alimentaires diminuent de façon similaire l'insulinémie et la teneur en lipides du sérum, le lyophilisat de microalgues est plus efficace que l'huile de poisson en réduisant les teneurs en lipides hépatiques et le développement de la stéatose hépatique induite par le régime hyperlipidique [22]. Par contre, les deux traitements réduisent de façon identique l'agrégation plaquettaire et le stress oxydant. Ces expérimentations mettent en évidence que les microalgues riches en oméga-3 sont une alternative aux huiles de poisson dans l'apport d'AGPI pour l'alimentation humaine. Elles présentent de nombreux avantages comme l'absence d'odeur, de contaminants comme les métaux lourds souvent abondants chez les poissons, d'être une ressource renouvelable dans la mesure où l'on sait les cultiver alors que les ressources halieutiques ont tendance à s'épuiser. Enfin, le coût de production des omégas-3 issus de microalgues semble moins élevé que ceux obtenus à partir du poisson et de plus ils présentent les mêmes effets bénéfiques sur la santé [23].

La production de biocarburant lipidique à l'aide de microalgues

Actuellement, les biocarburants lipidiques sont essentiellement produits à partir d'huiles extraites de plantes oléagineuses. Dans un avenir proche, les microalgues pourront être utilisées à cette fin. En effet, elles peuvent accumuler dans certaines conditions (stress) des acides gras jusqu'à 80 % de leur masse sèche permettant d'envisager des cultures avec des rendements à l'hectare 30 fois supérieurs aux espèces oléagineuses terrestres. Par ailleurs, elles permettent d'éviter les conflits avec l'approvisionnement alimentaire et la gestion de l'eau. Ces cultures peuvent être couplées à des rejets industriels de dioxyde de carbone et d'oxydes d'azote et réduire ainsi la pollution d'usines comme les centrales thermiques ou les cimenteries par exemple (un pilote est déjà fonctionnel aux USA). De plus, de nombreux sous-produits sont valorisables (biomasse pour l'alimentation animale, pigments, enzymes, antioxydants, etc.). Le procédé consiste à extraire,

de la biomasse produite, l'huile par pression ou à l'aide de solvants organiques; on obtient alors une huile brute directement utilisable dans certains moteurs diésel un peu rustiques ou encore par trans-estérification des acides gras de l'huile en présence de méthanol, on obtient des petites molécules de mono ester méthylique, biodiésel ou biokérosène. Très récemment de nombreuses sociétés se sont mises en place ou sont en projet dans le but de produire du biodiésel à partir de microalgues : aux USA (Solazyme, Sapphire Energy, ExxonMobil, Greenfuel technologies etc.,), en Europe, au Pays-Bas et en Espagne, AlgaeLink, en France métropolitaine Safeoil, Diesalg, Fermentalg ou à la Réunion Bioalgostral, etc. Le frein au développement de ce carburant renouvelable reste sa rentabilité par rapport aux sources fossiles de carburant.

Autres utilisations des microalgues

Les microalgues, ou plutôt leurs résidus, issus de l'industrie cosmétique ont été utilisés pour fabriquer un enrobé à l'aide de bio-bitume de microalgues. La composition chimique du bio-bitume est très différente de celle du bitume issu du pétrole, toutefois elle présente des points communs comme la couleur noire et les propriétés rhéologiques. Liquide au-dessus de 100 °C, le bio-bitume permet d'enrober les agrégats minéraux ; viscoélastique entre 20 °C et 60 °C, il assure la cohésion de la structure granulaire, supporte les charges et relaxe les contraintes mécaniques. Il reste à vérifier la tenue sur route et dans le temps de ce nouveau matériau. Autre avantage, il serait nettement moins toxique pour les travailleurs de la route. Elles sont aussi cultivées dans des bioréacteurs installés en façade pour réguler thermiquement les bâtiments. On en extrait des huiles pour des applications dans les tensioactifs, les peintures et les revêtements dits bio-sourcés. Le groupe américain Cereplast a mis en place une filiale (Algaeplast) dédiée aux bioplastiques à base de microalgues. L'objectif d'Algaeplast est maintenant de proposer des polymères issus à 100 % de microalgues. Récemment "AlgoSolis", une plateforme de recherche dédiée à l'exploitation industrielle des micro-algues a été créée à Saint-Nazaire. Elle propose aux acteurs de cette nouvelle industrie une infrastructure de recherche permettant l'exploitation contrôlée, intensifiée, durable et à grande échelle des micro-algues. Equipée de photobioréacteurs de grande taille et d'une biorafineries, les chercheurs et les entreprises pourront y élaborer et y optimiser en mi-grand des processus de production créant un trait d'union entre la recherche fondamentale et le monde industriel.

Culture des microalgues

Les microalgues comme leur nom l'indique sont difficilement visibles à l'œil nu hormis lorsqu'elles se développent abondamment en formant des «blooms» ou efflorescences en milieu naturel. Elles peuvent alors faire l'objet de récolte, c'est le cas de *Botryococcus braunii*, microalgue accumulant des hydrocarbures et utilisée par certaines peuplades africaines comme combustible. Suivant le même principe, une cyanobactérie, souvent rattachée aux microalgues, la spiruline (genre *Arthrospira*) est traditionnellement récoltée sur les rives du lac Tchad par les Kanembous depuis des millénaires pour sa richesse en protéines et sert à préparer une sauce, le « Dihé », complétant avantageusement leur alimentation en évitant les carences alimentaires. En Amérique du Sud, avant la conquête espagnole, les Aztèques consommaient des spirulines récoltées à la surface du lac Texcoco, séchées au soleil puis cuites pour former une sorte de galette, le "Tecuitlatl". Les principales microalgues actuellement utilisées par l'homme sont cultivées; cette culture, qui doit être réalisée en milieu confiné afin d'éviter les contaminations, présente des contraintes différentes de la culture des macroalgues. Si la production de « semence » ne nécessite pas la connaissance du cycle de reproduction des espèces dans la mesure où leur multiplication est essentiellement végétative par division des cellules, les techniques développées empruntent beaucoup de concepts à la microbiologie et à la biotechnologie (milieu de culture, numération, culture en batch ou en milieu renouvelé, conception de photobioréacteurs, etc.). Elle nécessite des compétences en culture plus importantes pour gérer les différents flux : apport de lumière, de CO_2, de nutriments, rejet d'oxygène, récolte, etc. Par contre les domaines d'applications sont très diversifiés. Elles sont ainsi utilisées :
En aquaculture dans l'alimentation des bivalves, on parle alors de microalgues fourrages.

Pour le traitement des eaux usées dans les stations d'épuration par lagunage en apportant dans certains bassins le dioxygène issu de leur photosynthèse.
Dans la production de substituts protéiques pour l'alimentation animale et humaine.
- En vue de l'extraction de biomolécules intéressantes ou de leur excrétion dans le milieu comme des pigments, des acides gras oméga-3, des enzymes (SOD), des vitamines, etc.
- En vue de la production d'énergie directement (biohydrogène et biodiésel) ou indirectement par fermentation anaérobie de la biomasse.
- En chimie verte comme ressource renouvelable en remplacement du pétrole fossile pour produire des bio-polymères, des plastiques biodégradables, des lipides, des tensio-actifs et des polysaccharides.
- En ce qui concerne l'environnement, elles participent à la lutte contre l'effet de serre par leur capacité à fixer le dioxyde de carbone en conditions naturelles mais aussi artificiellement lorsque les dispositifs de culture sont couplés au rejet gazeux de l'industrie (centrales thermiques ou cimenteries).
En milieu naturel la productivité de la plupart des microalgues est trop faible pour permettre une valorisation de cette biomasse aussi a-t-il été nécessaire de développer des procédés de culture en conditions artificielles favorisant leur développement. Plusieurs systèmes sont actuellement développés :
- Les systèmes ouverts naturels (lagunes) ou artificiels (bassins de faibles profondeurs afin de permettre aux rayons lumineux de pénétrer jusqu'au fond) ; une agitation mécanique du milieu de culture (par exemple, à l'aide de roues à aube) est indispensable afin d'éviter les phénomènes d'auto-ombrage et la sédimentation des cellules. Les inconvénients majeurs de ces systèmes ouverts sont la difficulté de maintenir, hormis pour certaines espèces, une culture mono-spécifique avec des risques de contamination importants, un contrôle difficile des paramètres de croissance et de leur régulation, une dépendance vis-à-vis des conditions climatiques et une récolte de la biomasse produite souvent difficile. Quelques espèces dont les exigences sont très précises peuvent se développer en système ouvert dans un milieu sélectif excluant toute contamination. C'est le cas depuis de nombreuses années pour *Dunaliella salina* qui se développe bien dans un milieu à forte salinité, pour les chlorelles qui se développent préférentiellement dans un milieu riche en nutriment et pour les cyanobactéries du genre *Arthrospira* (spirulines) qui se développe en culture pure en milieu très alcalin et riche en bicarbonate.
- Les systèmes clos dont les plus sophistiqués sont de véritables photo-bioréacteurs industriels couvrant de grandes surfaces, copie des dispositifs expérimentés en laboratoire. Leur aspect est très variable mais le plus souvent basés sur des tubes transparents en polyéthylène exposés à la lumière solaire horizontalement ou verticalement; dans ces tubes, les microalgues en suspension dans le milieu de culture sont propulsées par une pompe et vont circuler en permanence. Ce procédé permet une récolte en continu (nutriments constamment ajoutés dans le milieu), en semi continu (récolte à intervalles régulier de la biomasse avec remplacement par du milieu frais) ou en batch (récolte de la totalité) d'une culture monospécifique qui peut-être maintenue axénique. Dans ces conditions, on peut facilement contrôler les paramètres de croissance et ce qui permet de cultiver des espèces non dominantes en milieu naturel. La récolte peut facilement être automatisée, toutefois les installations restent coûteuses à la fois à mettre en place et à faire fonctionner et ne se justifie que pour produire des microalgues riches en biomolécules à haute valeur ajoutée.
- La production hétérotrophique, donc en absence de lumière en fermenteur, est une technique récemment appliquée aux microalgues et qui permet de cultiver certaines espèces dites mixotrophiques. Cette technique culturale où le sucre doit être apporté dans le milieu semble très productive et tend à se développer. Ainsi un dinoflagellé, *Crypthecodinium cohnii*, est cultivé au USA en hétérotrophie pour la production de DHA. La culture est réalisée en fermenteurs classiques. La biomasse, récoltée par centrifugation, est séchée puis broyée et l'huile (riche en DHA) est extraite à l'aide d'un solvant. Une société française "Fermentalg" développe actuellement un système similaire près de Bordeaux. Quelle que soit la technique de culture et de récolte utilisée on obtient de la pâte d'algue dont il faudra extraire les

différents composants d'intérêt. Si dans certains cas l'algue est commercialisée après lyophilisation comme les *Odontella* ou les Spirulines afin d'être consommée sous forme de gélules, la plus part du temps des procédés d'extraction sont utilisés pour récupérer les molécules d'intérêt (pigments, lipides) en broyant et en pressant les cellules ou en utilisant des solvants organiques.

Conclusions

Bien que la biodiversité soit importante chez les algues, ces organismes ont en commun un caractère essentiel : la capacité à fabriquer leur matière organique par photosynthèse.
Les macroalgues et les microalgues se distinguent par de nombreuses caractéristiques menant à des filières de production et de valorisations très différentes. Ces principales différences portent à la fois sur les modes de culture : essentiellement en milieu marin naturel pour les macroalgues, et en bassins ou en photobioréacteurs dans un milieu artificiel pour les microalgues; sur les techniques de récoltes : ramassage facile, pour les macroalgues et séparation-concentration proche des biotechnologies techniquement plus difficiles à mettre en œuvre pour les microalgues. Plus de 25 millions de tonnes de macroalgues sont produites ou récoltées au niveau mondial alors que la production mondiale de microalgues reste anecdotique estimée à un peu plus de 10 000 tonnes de matière sèche par an. Si la destination principale des macroalgues est l'agroalimentaire soit directement comme aliments soit sous forme d'extraits, les microalgues sont la source de nombreuses molécules qui intéressent vivement l'industrie pharmaceutique et cosmétologique [24]. A l'encontre de la filière macroalgues largement développée et qui a une longue antériorité, la filière microalgues beaucoup plus récente (année 1970), compte tenu de ses nombreuses applications, devrait dans un avenir proche se développer intensément aussi bien en Europe que dans les pays émergeants qui présentent l'avantage de disposer à la fois de conditions climatiques favorables et de territoires disponibles

Remerciements

Je remercie vivement Mme le professeur Annick Morant-Manceau pour ses remarques judicieuses et ses corrections.

Conflit d'intérêts

Aucun.

Références

1. Renard-Merlier D., Randoux B., Nowak E., Farcy F., Durand R., Reignault P. Iodus 40, salicylic acid, heptanoyl salicylic acid and trehalose exhibit different efficacies and defensetargets during a wheat/powdery. *Phytochemistry* 2007; 68 (8):1156-64.
2. Marouf A., Tremblin G. Abrégé de biochimie appliquée. Grenoble: EDP-Sciences; 2015, p.1-540.
3. Perez R., Kaas R., Barbaroux O. Culture expérimentale de l'algue *Undaria pinnatifida* sur les côtes de France. *Science et Pêche* 1984;343:3-16.
4. Reitan KI., Rainuzzo JR., Olsen Y. Effect of nutrient limitation on fatty acid and lipid content of marine microalgae. *J Phycol* 1994; 30:972-9.
5. Renaud SM., Thinh LV., Lambrinidis G., Parry DL. Effect of temperature on growth, chemical composition and fatty acid composition of tropical Australian microalgae grown in batch cultures. *Aquaculture* 2002*;* 211:195-214.
6. Shifrin NS., Chisholm SW. Phytoplankton lipids: interspecific differences and effects of nitrate, silicate and light-dark cycles. *J Phycol* 1981;17:374-84.
7. Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv* 2007;25:294-306.
8. Brown MR., Jeffrey SW., Volkman JK., Dunstan GA. Nutritional properties of microalgae for mariculture. Aquaculture Fish Nutrition and Feeding Proceedings of the Sixth International Symposium on Feeding and Nutrition in Fish 1997;151:315-31.
9. Braud JP. Simultaneous culture in pilot tanks of the macroalga *Chondrus crispus (*Gigartina-

ceae) and the microalga *Odontella aurita* (Eupodiscaceae) producing EPA.In: *Marine microorganisms for industry.* Le Gal Y., Muller-Feuga A. (Eds), Actes de colloques - Ifremer; 1997, p. 39-47

10. Piorreck M., Baasch KH., Pohl P. Biomass production, total protein, chlorophylls, lipids and fatty acids of freshwater green and blue-green algae under different nitrogen regimes. *Phytochemistry* 1984;23:207-16.
11. Alonso DL., Belarbi EH., Rodriguez-Ruiz J., Segura CI., Gimenez A. Acyllipids of three microalgae. *Phytochemistry* 1998;47:1473-81.
12. Guihéneuf F. Régulation par des facteurs environnementaux de la synthèse des acides gras à longue chaîne de différentes espèces de microalgues marines. Thèse de doctorat, Université du Maine (France) 2008;202 p. http://www.theses.fr/2008LEMA1011
13. Berge J.P., Gouygou J.P., Duback J.P., Durand P. Reassessment of lipid composition of the diatom, Skeletonema costatum. *Phytochemistry* 1995;39:1017-21.
14. Tatsuzawa H., Takizawa E. Changes in lipid and fatty acid composition of *Pavlova lutheri*. *Phytochemistry* 1995;40:397-400.
15. Eichenberger W., Gribi C. Lipids of *Pavlova lutheri*: Cellular site and metabolic role of DGCC. *Phytochemistry* 1997;45:1561-7.
16. Guihéneuf F., Mimouni M., Ulmann L., Tremblin G. Environmental factors affecting growth and omega 3 fatty acid composition in *Skeletonema costatum*. The influences of irradiance and carbon source. *Diat Res* 2008; 23:93-103.
17. Guihéneuf F., Fouqueray M., Mimouni V., Ulmann L., Jacquette B., Tremblin G. Effect of UV stress on the fatty acid and lipid class composition in two marine microalgae *Pavlova lutheri* (Pavlovophyceae) and *Odontella aurita* (Bacillariophyceae). *J Appl Phycol* 2010; 22:629–38.
18. Guihéneuf F., Mimouni M., Ulmann L., Tremblin G. Light-dependent utilization of two radiolabelled carbon sources, sodium bicarbonate and sodium acetate. Relation ships with the long chain polyunsaturated fatty acid synthesis in the microalga *Pavlova lutheri* (*Pavlovophyceae*). *Eur J Phycol* 2011;46(2): 143-52.
19. Pasquet V., Jacquette B., Morant- Manceau A., Tremblin G. Fatty acids profile and temperature in the cultured marine diatom *Odontella aurita. J Appl Phycol* 2014;26:2265–71.
20. Guihéneuf F., Mimouni M., Ulmann L., Tremblin G. Use of radiolabeled substrates to determine the desaturase and elongase activities involved in eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid biosynthesis in the marine microalga *Pavlova lutheri*. *Phytochemistry* 2013;90:43-9.
21. Guihéneuf F., Mimouni V., Tremblin G., Ulmann L. Light Intensity Regulates LC-PUFA Incorporation into Lipids of *Pavlova lutheri* and the Final Desaturase and Elongase Activities Involved in Their Biosynthesis. *J Agri Food Chem* 2015;*63*(4):1261-7.
22. Haimeur A., Ulmann L., Mimouni V., Guéno F., Pineau-Vincent F., Meskini N., Tremblin G. The role of *Odontella aurita*, a marine diatom rich in EPA, as a dietary supplement in dyslipidemia, platelet function and oxidative stress in high-fat fed rats. *Lipids Health Dis* 2012;11:-147.doi: 10.1186/1476-511X-11-147.
22. Haimeur A. Etude comparative de l'effet des microalgues marines et des huiles d'argan et de poisson sur le métabolisme lipidique et la fonction plaquettaire chez le rat et chez des patients dyslipidémiques : recherche de l'effet antiagrégant et exploration du mécanisme d'action dans le but de prévenir les maladies cardiovasculaires. Thèse de doctorat, Université du Maine (France) et de Mohammedia (Maroc), 2014; 229 p. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01295306/document
23. Mimouni V., Ulmann L., Haimeur A., Guéno F., Meskini N., Tremblin G. Marine microalgae used as food supplements and their implication in preventing cardiovascular diseases. OCL 2015 22(4):1-7. DOI: 10.1051/ocl/2015015
24. Mimouni V., Ulmann L., Pasquet V., Mathieu M., Picot L., Bougaran G. et al. The potential of microalgae for the production of bioactive molecules of pharmaceutical interest. *Curr Pharmac Biotechnol* 2012;13:2733-50. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01248050