

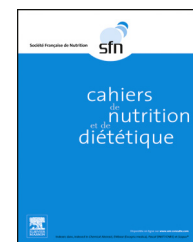


Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



ALIMENTS

Qualités nutritionnelles des algues, leur présent et futur sur la scène alimentaire

Nutritional value of seaweed, present and future in western food diet

Hélène Marfaing

CEVA, Presqu'île-de-Pen-Lan, 22610 Pleubian, France

Reçu le 3 avril 2017 ; accepté le 23 mai 2017

MOTS CLÉS

Algues ;
Microalgues ;
Qualité
nutritionnelle ;
Consommateurs ;
Légumes de la mer

Résumé Consommées depuis des siècles, les algues font partie du régime traditionnel de plusieurs pays. En particulier en Asie, les algues ont été employées en médecine traditionnelle et comme source de nourriture. Ainsi, dans les pays asiatiques forts consommateurs d'algues, le taux d'obésité est très bas, l'incidence des cancers et maladies cardiovasculaires est beaucoup plus faible que dans les pays occidentaux. La consommation des algues comme légumes n'est pas encore très populaire dans la gastronomie française mais il existe une demande croissante pour ces végétaux naturels et bons pour la santé. Cet engouement ne semble pas être un phénomène de mode mais plutôt une réelle tendance alimentaire s'inscrivant dans la durée. Ceci s'accompagne d'un développement de la culture d'algues : macro- et microalgues. Les algues alimentaires présentent donc de réelles opportunités de développement pour les industriels grâce à leur couleur, texture et contenu nutritionnel spécifique. Fibres, minéraux, vitamines et composés antioxydants sont bénéfiques dans notre régime occidental.

© 2017 Société française de nutrition. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

KEYWORDS

Seaweed;
Microalgal;
Nutritional quality;
Consumers;
Sea vegetables

Summary Historically, edible seaweeds were consumed by coastal communities across the world and seaweed is a part of daily diets in many countries. In particular, Asian cultures have traditionally employed seaweeds as a natural source of food and medicines. Thus, in Asian countries with high algal consumption, the obesity rate is very low, the incidence of cancers and cardiovascular diseases is much lower than in Western countries. Seaweed as vegetables is yet still not popular in French gastronomy but there is an increasing demand for these natural and healthy sea vegetables among consumers. This phenomenon seems not to be a temporary

Adresse e-mail : helene.marfaing@ceva.fr

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cnd.2017.05.003>

0007-9960/© 2017 Société française de nutrition. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

trend but rather real new consumption behaviour. This demand goes along with the development of seaweed culture. Edible seaweed presents a significant opportunity for food manufacturers in the development of healthier and more natural products, taking advantage of its culinary color, texture and its unique nutritional content. Fiber, minerals, vitamins and antioxidant compounds are beneficial in our western diet.

© 2017 Société française de nutrition. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Introduction

Les algues furent les premiers êtres vivants photosynthétiques apparus sur terre il y a environ 3 à 4 milliards d'années via les cyanobactéries. Ayant la particularité de synthétiser des matières organiques à partir de la lumière du soleil (photosynthèse), elles ont permis la formation de la couche d'ozone et la production d'oxygène. Ces phénomènes ont conduit à la formation d'algues rouges, brunes et vertes, puis à l'apparition de végétaux terrestres.

Les algues représentent une biodiversité importante. Les algues incluent des « macroalgues » benthiques, marines (« seaweeds » en anglais) ou d'eau douce et un ensemble d'organismes microscopiques très divers, marins ou d'eau douce, planctoniques ou benthiques, qualifiés de « microalgues ». Au total, le nombre d'espèces est estimé à 30 000 ou 40 000 sans compter les diatomées dont le nombre d'espèces atteindrait les 100 000, voire plusieurs millions.

La classification des grands groupes d'algues se fait surtout sur des critères biochimiques (chlorophylles en particulier) et sur la structure de l'appareil locomoteur des cellules libres (gamètes ou spores). Il est clair que les algues sont un ensemble artificiel largement polyphylétique (pas d'ancêtre commun) [1]. On classe habituellement les algues par leur couleur selon les pigments qu'elles contiennent : vertes, brunes et rouges. Une cinquantaine d'algues sont consommées dans le monde et les plus courantes dans le commerce sont la laitue de mer, la dulse, le haricot ou spaghetti de mer, la nori (utilisée pour les sushis), le wakame (et *Alaria*, le wakame atlantique) et le kombu royal sans oublier les microalgues : spiruline et chlorelle.

Production et filières

Les algues sont cultivées à travers le monde et plus de 25 pays contribuent à la production d'une vingtaine d'algues pour des usages différents. La production totale d'algues est estimée à plus de 28 millions de tonnes (équivalent frais) en 2014 [2]. Plus de 95 % est produite par aquaculture avec la Chine, premier pays producteur mondial (53 % du tonnage) et l'Indonésie le deuxième (27 %). Soulignons que la FAO groupe un ensemble d'algues (macroalgues et microalgues) et de plantes sous le terme « plantes aquatiques » qui a représenté 12,6 % du tonnage total en 2014. Les microalgues sont produites comme aliments ou ingrédients fonctionnels et représentent une production d'environ 15 000 tonnes annuelle (poids sec) [3] ce qui équivaut à 0,6 % du tonnage des macroalgues actuellement.

D'après les données de la FAO, on estime que 38 % du tonnage est consommé en tant qu'aliment alors que 55 % du

tonnage est destiné à l'industrie des hydrocolloïdes (agar, carraghénanes, alginates). Bien évidemment, la consommation des algues varie en fonction des pays avec le régime japonais intégrant 9,6 à 11,0 g algue sèche/jour [4].

L'Europe participe de façon minoritaire à cette production contribuant à 1 % environ de la production mondiale. La quasi-totalité de son tonnage est issue d'algues sauvages et provient majoritairement de la Norvège et de la France. Viennent ensuite l'Islande et l'Irlande qui sont des pays bons contributeurs pour la production des algues. En Europe, la part des algues pour l'industrie des texturants est majoritaire (alginate de sodium et carraghénanes) à plus de 80 %. Mais la France fait figure de locomotive pour l'algue alimentaire : tonnage récolté, mise en place d'une réglementation, produits alimentaires dans les réseaux de distribution spécialisés, projets collaboratifs. Ainsi les différents avis des autorités de surveillance des aliments en France ont permis depuis les années 1990 de constituer une liste de 25 espèces d'algues utilisables en alimentaire. Il est tout à fait possible de consommer des produits aux algues en s'approvisionnant auprès de réseaux de distribution spécialisés : magasins diététiques, magasins de produits biologiques et également magasins asiatiques pour les produits d'importation. Le tartare aux algues, star incontournable de la cuisine aux algues existe depuis plus de 20 ans maintenant. En 2016 est même sorti le tartare d'algues à la marque distributeur Auchan !

Les algues de culture sont en pleine progression en France. Il existe actuellement 5 algoculteurs en Bretagne dont le tonnage était estimé jusqu'à présent à 100 tonnes environ. De nouvelles concessions vont permettre d'augmenter de façon nette la part des algues de culture. La culture des algues en mer est une culture vertueuse et respectueuse de l'écosystème qui ne nécessite ni d'engrais ni pesticides.

L'algue alimentaire : un aliment traditionnel en Asie

La consommation des algues comme aliment est très ancienne. Au Chili, sur le site de Monte Verde datant de plus de 12 000 ans, des traces fossilisées d'algues confirment leur utilisation par les populations. Quatre genres d'algues marines sont identifiés : *Sargassum*, *Gracilaria*, *Porphyra* et *Durvillea* [5]. Des textes japonais, datant de plus de 6000 ans, précisent l'utilisation des algues comme remèdes. De même en Chine, où des textes datant du VI^e siècle avant notre ère font état de variétés d'algues au goût assez fin pour figurer au menu des rois. Ainsi, en 600 ans avant JC, Sze Tseu écrit « certaines algues sont un délice qui s'accorde avec le plus honoré des invités, et pour le roi lui-même » [6].

Le Japon est un des pays grands consommateurs d'algues. Ce pays, comportant plus de 6852 îles, s'est tout naturellement tourné vers la mer pour y puiser sa nourriture. Toutefois, la quantité actuelle d'algues consommée est difficile à quantifier car les algues sont utilisées à la fois pour aromatiser des nouilles, des soupes, des plats ou ajoutées comme part d'un mélange de légumes ainsi que comme aliment distinct sous forme de snacks, de salade et de condiments. Avec une consommation moyenne de 10 g d'algue sèche par jour, les algues contribuent à environ 80 % de la prise alimentaire d'iode chez les japonais. Notons qu'en équivalent frais, les japonais mangent de 7 à 9 kg d'algue fraîche/an/habitant soit une quantité proche à notre consommation de salade estimée à 7,3 kg/an/personne en France.

Parmi les algues les plus réputées au Japon, citons l'algue rouge nori. Celle-ci, une fois séchée et transformée en fines feuilles, est utilisée pour constituer l'enveloppe des sushis, makis ou onigiris. Elle se déguste également en feuilles assaisonnées (au sésame, au piment, à la sauce soja), à l'apéritif, ou sous forme de paillettes pour saupoudrer les plats de légumes et les salades. Ses arômes marins (proches de la peau de sardine grillée), de thé fumé et de champignons séchés, se libèrent en bouche, tandis que sa texture craquante devient fondante. Le nori japonais est généralement préparé soit nature, soit avec de la sauce soja, alors que le nori coréen est préparé avec de l'huile, du sel, des graines de sésame ou du piment. Il est souvent plus fin, ajouré, léger et croustillant.

La plupart des autres algues consommées le sont sous forme de soupes, de salades, de garnitures en mélange avec d'autres légumes ou sous forme de condiments vinaigrés. Ainsi le wakame, algue brune, est vendu principalement séché, à réhydrater dans des salades ou soupes, comme dans la soupe Miso. Il est apparu récemment en Occident dans les bars à sushi sous la forme d'une salade de wakame assaisonnée au sésame. Le kombu, algue brune laminaire, est l'ingrédient de base du dashi (bouillon de base japonais), mais s'utilise également en papillotes autour d'un poisson ou vinaigré en condiment. C'est dans le bouillon de kombu qu'un Japonais Ikunae Ikeda a décrit la saveur umami signifiant en Japonais « délicieux » ou « savoureux ». La molécule responsable de cette saveur est le glutamate de sodium, naturellement présent dans cette algue.

Les Français sont-ils prêts à consommer des algues ?

En Occident, même s'il existait une tradition de consommation des algues dans quelques régions côtières comme en Irlande, Islande, dans le Maine ou en Nouvelle Ecosse, les

algues n'étaient pas connues et non répertoriées dans notre patrimoine culinaire [7]. En Bretagne, seule l'utilisation indirecte de l'algue pour ses vertus gélifiantes semble traditionnelle avec la confection de flan par le « pioca » (*Chondrus crispus*) ramassé sur la plage. Cependant depuis quelques années les algues bénéficient d'un fort engouement auprès des consommateurs occidentaux en demande de nouveaux aliments santé et « naturels » associé à une tendance forte vers une alimentation riche en végétaux (développement important de produits végétariens). Les images négatives parfois associées aux algues semblent avoir disparu et il est maintenant couramment admis que les algues sont non seulement comestibles mais peuvent également être savoureuses et pleines d'atouts santé.

Il n'existe pas de données officielles sur la consommation française d'algues. Seules les études consommateurs permettent d'appréhender l'intérêt, le niveau de consommation et les produits aux algues les plus appréciés des Français. Dernièrement, deux études ont été réalisées permettant de renouveler des données anciennes, compilées il y a plus de plus de 10 ans [8].

Les résultats de ces 2 études consommateurs récentes démontrent tout d'abord une connaissance croissante des algues par les consommateurs : 86 % des personnes interrogées savent que les algues peuvent se manger [9]. Ces résultats traduisent une évolution dans la perception de l'algue. En 2002, nous soulignons que « les algues ont un problème majeur, elles ne sont pas considérées comme des produits alimentaires » [8].

Ceci s'accompagne d'une consommation croissante d'algues. Alors qu'en 2000, seulement 30 % de la population française avait consommé des algues ce chiffre a doublé en 2013 : 58 % de la population française a déjà consommé des algues [10]. Cette évolution est principalement liée à la diffusion des restaurants asiatiques : 58 % des personnes interrogées ont en effet fréquenté un restaurant asiatique et les produits aux algues consommés par ordre d'importance sont les sushis (93 %), les soupes (62 %) et salades (36 %).

Par ailleurs, les algues sont clairement perçues comme naturelles et saines. Les consommateurs informés reconnaissent leurs fortes teneurs en minéraux, fibres et vitamines et 55 % des personnes interrogées considèrent les algues comme bénéfiques pour la santé [9]. Cependant, 38 % ne se prononcent pas, probablement par manque d'informations.

Les Français sont donc prêts à consommer des algues : 50 % des consommateurs d'algues dans un restaurant en ont aussi acheté pour leur consommation au foyer [10]. Nori, wakame, haricot de mer, dulse, laitue de mer sont autant de noms communs d'algues qui deviennent familiers à nos oreilles (Fig. 1).



Figure 1. Principales macro- et microalgues alimentaires en France (spiruline, dulse, laitue de mer, wakame atlantique, haricot de mer, kombu royal, wakame, nori et chlorelle).

Pour acheter des algues ou produits aux algues actuellement, les deux principaux réseaux de distribution sont les chaînes de magasins biologiques d'une part et les magasins asiatiques d'autre part. Viennent ensuite quelques magasins diététiques et des épicerie fines qui peuvent proposer des algues brutes ou des produits élaborés. En Bretagne, on trouve des produits aux algues dans la plupart des boutiques de produits régionaux ainsi que dans les coopératives maritimes, et parfois dans les poissonneries.

L'étude menée par le pôle halieutique de l'Agrocampus Ouest a répertorié de manière exhaustive les produits aux algues d'inspiration française offerts en magasins sur le territoire [11]. Sur les 477 produits répertoriés, on note :

- la présence majoritaire des algues brutes : 30 % des produits (paillettes, algues fraîches salées, algues en conserves) ;
- des tartinales : 21 % des produits (tartares, rillettes de poissons) ;
- des condiments : 17 % des produits (sel, aromates, moultardes, courts-bouillons, etc.) ;
- des thés et tisanes : 9 % des produits ;
- les 23 % restants sont constitués de pâtes (5 %), salades (3 %), conserves de poissons (3 %), soupes (2 %) ; biscuits (2 %) et boissons (1 %) et produits sucrés (1 %).

Cette ouverture vers les algues se traduit par le succès d'animations grand public, de festivals, d'ateliers cuisine, de sorties terrain et découverte des algues, d'ouvrages de cuisine et de création d'associations de promotion des algues. Plus de 60 associations/independants/sociétés ont été recensés dans le grand Ouest réalisant des sorties sur l'estran ou des ateliers cuisine aux algues. En parallèle, des grands chefs s'y intéressent pour leurs textures, leurs couleurs, leurs saveurs, en particulier dans la réalisation de bouillons (Dashi). L'algue apparaît aussi comme ingrédient de choix pour la réalisation d'une alimentation végétarienne.

S'éloignant de la cuisine traditionnelle japonaise et intégrant les codes d'une alimentation plus occidentale, de nouveaux produits voient le jour tels que des burgers végétariens aux algues intégrant chlorelle, dulse et wakame (Dutch Weed Burger en Hollande), le nouveau sandwich Yuso aux États-Unis à base de riz et feuille de nori reprenant les codes l'Onigiri japonais, des salades d'algues (Tesco, Algues de Bretagne), des pâtes (I see pasta), des soupes (Atlantic Kitchen) et des boissons (Springwave, Charlies, Tonnerre de Brest...). Dans son dernier rapport de tendance 2017, la société américaine Campbell's Soup définit les végétaux marins comme une des 10 tendances pour 2017 qui inspirent les chefs (<https://www.campbellsoupcompany.com/2017-campbell-food-trends/>).

La France n'est pas en reste en termes d'innovation et au dernier SIAL 2016 (Salon international de l'alimentation), on a pu goûter plusieurs innovations aux algues sans compter les nombreuses innovations que l'on peut découvrir dans les magasins biologiques :

- la spiruline marine diluée à l'eau de mer et le caviar de spiruline marine de Spiru'Breizh ;
- les caviars marins et l'huile aux algues de Groix et Nature ;
- l'idée poisson du jour de Guyader : saumon, riz vinaigré et tartare d'algues ;
- les tartares de Mémé d'Algues de Bretagne ;
- le pesto marin et le tarama végétalien de Marinoë.

Qualité nutritionnelle

Les grandes algues (macroalgues) sont très intéressantes du point de vue nutritionnel de par leurs compositions en macro et micronutriments. Cette richesse s'explique par le milieu dans lequel elles poussent : milieu marin riche en éléments minéraux, conditions environnementales stressantes entre marée haute et marée basse qui induisent des productions de fibres aux structures originales et la synthèse de composés de protection contre les rayonnements UV comme les composés antioxydants. Comme pour un légume terrestre, on retrouve principalement des fibres, minéraux, vitamines et composés antioxydants dans les macroalgues, avec des teneurs parfois exceptionnelles.

Les microalgues possèdent aussi des compositions intéressantes, qui vont dépendre des conditions environnementales et du milieu utilisé lorsqu'elles sont cultivées. Leurs teneurs en minéraux notamment seront conditionnées par ce milieu. L'une de leurs particularités est une teneur souvent plus importante en protéines et en lipides par rapport aux macroalgues. Elles sont aussi souvent exploitées pour leur richesse en pigments d'intérêt (bêta-carotène, astaxanthine ou phycocyanine).

Dernièrement le CEVA a coordonné un projet collaboratif nommé SENSALG qui a permis de réaliser des analyses sur des algues uniquement bretonnes fraîches et traitées selon différents procédés (blanchiment, stérilisation, surgélation, salage et séchage). Les principaux résultats de ce travail présentés ici permettent de préciser les apports nutritionnels des algues telles que consommées actuellement en France.

La composition moyenne d'algues fraîches est présentée dans le **Tableau 1** : macronutriments, minéraux, oligoéléments et vitamines dont la teneur est notable dans les algues.

Une faible teneur en lipides et leur richesse en fibres et en minéraux font de ces légumes de la mer des incontournables pour nos assiettes de demain.

Fibres

Les algues synthétisent une quantité importante de fibres (polysaccharides du point de vue chimique) leur permettant de garder l'eau à l'intérieur de leurs cellules et de rester intactes durant les phases de marée basse sans se dessécher. Ces polysaccharides avec des structures originales sont considérés comme des fibres alimentaires et participent, tout comme les fibres des légumes terrestres, à une alimentation saine. Consommer 50 g d'algues fraîches permet ainsi d'apporter de 4 à 5 g de fibres selon les algues.

Parmi les fibres insolubles on retrouve une fraction cellulosique ainsi que d'autres fibres ayant des structures encore mal connues. Les structures des fibres solubles des algues alimentaires vertes, rouges et brunes sont très diversifiées et majoritairement différentes de celles des végétaux supérieurs. Dans les algues brunes on trouve des alginates et des fucanes d'origine pariétale et des laminaranes qui constituent des glucides de réserve. Les algues rouges pourront contenir des galactanes plus ou moins sulfatés (agar et carraghénanes), des porphyranes ou des xylanes ainsi que des glucides de réserve comme l'amidon floridéen. Enfin, les algues vertes alimentaires sont constituées d'ulvanes et peuvent également contenir de l'amidon comme glucide de réserve [13–15].

À côté de ces polysaccharides pariétaux et de réserve existent aussi des polysaccharides, hétérosides et polyols

Tableau 1 Composition moyenne d'algues fraîches bretonnes (CEVA, 2016).

Pour 100 g algues fraîches	Kombu royal	Wakame	Wakame atlantique	Haricot de mer	Laitue de mer	Dulse
	<i>Saccharina latissima</i>	<i>Undaria pinnatifida</i>	<i>Alaria esculenta</i>	<i>Himanthalia elongata</i>	<i>Ulva sp.</i>	<i>Palmaria palmata</i>
Énergie (kcal)	35	18	26	23	22	24,5
Eau (g)	86,2	90,9	89,4	88,2	88,6	88,4
Protéines ($n \times 6,25$) (g)	1,8	1,7	2,0	1,3	1,6	2,1
Lipides (g)	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2
Glucides (par différence) (g)	3,8	0,5	1,0	1,7	1,1	1,3
Fibres (g)	5,4	3,6	5,6	4,6	4,2	4,5
Sel (g)	1,3	1,8	2,1	1,3	2,2	1,3
Potassium (mg)	962,1	813,4	699,4	1181,4	258,5	1315,9
Magnésium (mg)	113,1	112,5	164,9	110,4	340,3	59,6
Calcium (mg)	140,6	66,5	124,1	95,1	95,1	105,4
Iode (mg)	88,3	1,3	2,1	0,8	0,7	1,1
Fer (mg)	2,9	0,3	1,5	0,2	2,6	2,4
Bêta-carotène (mg)	0,8	0,5	1,6	0,1	0,7	0,5
Vitamine C (mg)	12,7	6,5	19,4	36,8	8,0	7,2
Vitamine B9 (μg)	33,4	40,1	76,3	16,3	22,3	68,6
Vitamine K1 (μg)	44,4	66,8	30,0	5,9	2,1	73,1
Polyphénols (mg)	145	152	408	723	44	70
Fucoxanthine (mg)	7,8	6,8	14,4	4,9	—	—

de bas poids moléculaire donc solubles. C'est un ensemble de composés assez hétérogène présentant de grandes variations de concentration. Nous citerons ici l'exemple chez les algues rouges du floridoside participant à la régulation osmotique [15]. Chez les algues brunes, c'est le mannitol, polyol qui est présent en quantité parfois importante ; jusqu' à 15 % du poids sec chez les laminaires [16].

Cette diversité de structure a pour conséquence des comportements fermentaires très différents. En étudiant leur comportement fermentaire in vitro avec de la flore fécale humaine, des chercheurs ont montré que les fibres solubles laminaranes et xylanes sont rapidement et complètement fermentées. D'autres fibres telles que les alginate nécessitent un temps d'adaptation, de 6 à 12 heures pour une dégradation partielle et une production faible de gaz et d'acides gras à chaîne courte [14].

Cependant, cette capacité de dégradation des polysaccharides semble être adaptative et liée au régime alimentaire. Ainsi des chercheurs de la station biologique de Roscoff ont découvert comment le microbiote intestinal des Japonais s'était équipé pour digérer l'algue nori en dégradant le polysaccharide de paroi appelé porphyrane. Cette activité enzymatique a été identifiée chez les bactéries marines et au sein des bactéries peuplant les intestins des japonais alors qu'elle semble absente du microbiote des nord-américains [17]. Les chercheurs de Roscoff expliquent que le contact étroit de cette population avec les bactéries marines, par l'intermédiaire de la nourriture a favorisé le transfert de l'enzyme d'un écosystème, l'océan, à un autre très différent, l'intestin humain. Ce transfert de gènes pourrait également expliquer la présence dans la bactérie intestinale *Bacteroides* de japonais d'un ensemble de gènes pouvant dégrader l'alginate des algues brunes [18] De même, il a été montré dans une petite cohorte d'espagnols, la présence dans leur microbiote intestinal de bactéries

capables de dégrader les polysaccharides constitutifs des algues rouges [19].

Les teneurs en fibres des microalgues sont assez faibles et souvent peu documentées. Certains polysaccharides d'intérêt ont néanmoins été identifiés comme le polysaccharide sulfaté de la spiruline, le spirulane, qui pourraient potentiellement présenter des propriétés intéressantes en santé.

Minéraux et vitamines

Les algues n'ont pas de racines, ce qui leur impose de puiser dans l'eau les nutriments dont elles ont besoin. Leur capacité à incorporer ces éléments reste inégalable par rapport aux végétaux terrestres. Cette fraction minérale offre une grande diversité de minéraux : sodium, potassium, calcium, magnésium, soufre, fer, iode, cuivre, zinc, sélénium. La part des chlorures représente généralement 50 % de la totalité des sels minéraux contenus dans les algues.

À noter que la valeur en sodium est généralement supérieure à celle des plantes terrestres. Cependant, pour certaines espèces d'algues, compte tenu d'une richesse importante en potassium, le ratio Na/K est très bas et donc favorable en alimentation humaine. Cette richesse minérale et ces ratios Na/K assez bas sont d'ailleurs mis à profit pour des applications de réduction du taux de sel dans des produits alimentaires ou dans des développements d'extraits algaux comme substituts de sel (Fairclough et Mahadevan 2010, non publié) [20,21].

En ce qui concerne les microalgues d'eau douce exploitées en alimentaire, ces teneurs en minéraux sont souvent plus faibles (quantités de minéraux disponibles dans les milieux de culture plus faibles que dans l'eau de mer...).

À noter que la plupart des macroalgues contiennent des teneurs assez élevées en sulfates, variant entre 1,3 et 5,9 % de la matière sèche [22]. Ces sulfates peuvent être libres ou liés aux polysaccharides. Les taux de sulfates qui sont

des composants caractéristiques des polysaccharides algaux sont reliés à la concentration en sels de l'eau de mer et aux aspects spécifiques de régulation ionique comme dans les fucanes des algues brunes et des galactanes des algues rouges. Ce type de polysaccharides sulfatés n'existe pas dans les plantes terrestres.

Afin de mieux appréhender ce que peuvent nous apporter les algues, les teneurs notables en minéraux et vitamine de 7 g d'algue sèche sont présentées dans le [Tableau 2](#) en relation avec les apports journaliers recommandés.

Notons qu'une portion journalière de 7 g sec d'algues est considérée comme une quantité moyenne et raisonnable d'algues prise comme référence dans des publications [23] ou plus dernièrement dans une analyse de risque belge sur la consommation des algues (Superior Health Council n° 9149, 2015).

Une richesse exceptionnelle : l'iode

L'originalité forte de ces légumes de la mer est la teneur en iode qui est exceptionnelle. Les implications nutritionnelles sont immédiates : pour un adulte, l'apport conseillé (150 µg/jour) peut être couvert par des quantités très faibles, de l'ordre de quelques grammes secs. Ainsi 7 g de dulce couvrent 67 % des AJR tandis que 7 g de kombu royal blanchi couvrent plus de 2400 % AJR. Il est donc important de varier ses apports d'algues et de réguler sa consommation pour ne pas entraîner de risque d'excès. L'iode dans la plupart des algues est majoritairement soluble dans l'eau et biodisponible [24].

L'excès d'iode est rarement d'origine alimentaire mais surtout d'ordre médicamenteux. La limite d'apport maximal tolérable a été fixée par le comité scientifique européen sur l'alimentaire (SCF) le 26 septembre 2002 à 600 µg/jour.

Dans les pays grands consommateurs d'algues, il est difficile d'évaluer la prise alimentaire d'iode liée aux algues car elle varie selon les espèces consommées et le mode de préparation et de cuisson. En combinant les informations des enregistrements alimentaires, les sondages, les analyses d'iode urinaire et la teneur en iode des algues, des auteurs estiment la prise alimentaire d'iode par les Japonais, liée principalement à la consommation d'algues à 1000 à 3000 µg/jour [25]. En Corée, où la consommation traditionnelle d'aliments iodés (algues et poissons) est très importante, l'apport iodé alimentaire moyen d'un adulte coréen est estimé à 479 µg/jour (variant de 61 à 4086 µg) : 66 % de l'iode est apporté par les algues, 11 % par les produits laitiers et 9 % par le poisson [26].

Un cas d'hyperthyroïdie a été rapporté aux Pays bas, chez une patiente de 50 ans ayant pris des compléments à base de laminaires, à raison de 6 comprimés/jour de 200 mg d'iode chacun, dans l'espoir de perdre du poids. Une hyperthyroïdie s'est développée chez cette patiente en l'espace de 2 mois et s'est résorbée spontanément après l'arrêt de la prise de comprimés. Des cas sont également rapportés d'Asie. Ainsi cette étude où la consommation de plus de 28 000 µg d'iode/jour via le kombu par des japonaises engendrait des cas d'hyperthyroïdisme induit par l'iode [27].

Raisonnement l'iode est un atout nutritionnel dans les algues, très important dans le monde en regard des risques liés à une déficience en iode. L'iode est indispensable pour l'organisme qui le concentre dans la thyroïde. La glande thyroïde élabore des hormones iodées actives sur toutes les oxydations cellulaires et intervient sur la thermogénèse.

Les conséquences sur la carence en iode sont les suivantes : goitre, arriération mentale dans la population infantile (influence sur le développement du fœtus), altérations de la reproduction.

Source de magnésium

Il est intéressant de noter que les macroalgues peuvent apporter du magnésium en quantité notable, en particulier le maerl (algue calcaire *Lithothamnium calcareum*), les algues vertes et brunes. Ainsi 7 g de maerl ou de laitue de mer déshydratée contribuent à 50 et 38 % des AJR en magnésium respectivement.

L'absorption du magnésium diffère selon les algues. Celles-ci du fait de leur richesse en fibres, peuvent lier les minéraux et la capacité d'échange des fibres a été rapportée pour impacter l'absorption minérale. Des études ont montré des faibles absorptions du magnésium chez des rats pour le nori (*Porphyra tenera*), le wakame et l'hijiki. Cependant le magnésium absorbable est élevé pour l'algue verte *Ulva* et le kombu (*Laminaria japonica*) [28].

Enfin, d'autres minéraux peuvent contribuer aux apports journaliers recommandés en petite quantité : chlorures, potassium, manganèse, fer et calcium.

Les algues présentent en particulier des teneurs en fer et en calcium particulièrement élevées pour des sources végétales. La biodisponibilité du fer dans l'algue rouge a été étudiée chez le rat [29]. Les auteurs concluent que la biodisponibilité est plus faible que le témoin (sulfate de fer) principalement dû aux composés phénoliques de l'algue. Cependant si l'on considère les aliments enrichis en fer sous des formes de pyrophosphate de fer ou de l'orthophosphate ferrique, l'apport de fer non héminique via l'algue nori est équivalent.

Soulignons que les algues sont ainsi de très bons apports en minéraux. Cependant certains messages sur Internet et relayés par la presse surestiment grandement ces apports. Ainsi nous pouvons entendre parfois que « les algues apportent dix fois plus de calcium que le lait » ou alors « la laitue de mer est 8 fois plus riche en vitamine C qu'une orange » ou encore « la laitue de mer contient douze fois plus de fer que les lentilles ou dix fois plus que les épinards » ! Il faut faire attention à ces messages réducteurs qui ne sont pas toujours valables scientifiquement. Sans nier leurs apports, nous pouvons dire raisonnablement que certaines algues peuvent être aussi riches en calcium que le lait, que la laitue de mer contient deux fois moins de vitamine C qu'une orange mais qu'elle contient presque autant de fer que les épinards (en comparant 100 g de poids frais de chaque aliment).

Richesse en protéines des microalgues

En ce qui concerne les microalgues d'eau douce exploitées en « alimenter leur richesse en protéines est importante et peut atteindre 70 % de la matière sèche pour la spiruline et 48 % en moyenne pour la chlorelle. Historiquement, la qualité nutritive de ces sources protéiques a été évaluée en se basant sur des méthodes d'évaluation de l'efficacité protéique (étude sur rats de 3–4 semaines). Les résultats montrent que l'efficacité des protéines des microalgues est très bonne (par comparaison avec la caséine) mais peut varier en fonction des procédés de séchage utilisés [30]. La paroi cellulaire de la spiruline ne représente pas une barrière protéolytique et peut être digérée par des monogastriques comme les humains sans traitements

Tableau 2 Contribution de 7 g d'algues séchées aux apports journaliers recommandés (source CEVA, 2016 et Ciqual, 2016).

	AJR	Kombu royal blanchi		Wakame		Wakame atlantique		Haricot de mer		Laitue de mer	
		Teneur	% AJR/7 g	Teneur	% AJR/7 g	Teneur	% AJR/7 g	Teneur	% AJR/7 g	Teneur	% AJR/7 g
<i>Pour 7 g algues séchées</i>											
Potassium (mg)	2000	81,5	4,1	611,3	30,6 ^b	337,1	16,9 ^a	577,8	28,9 ^b	167,8	8,4
Magnésium (mg)	375	84,7	22,6 ^a	63,7	17,0 ^a	67,6	18,0 ^a	52,8	14,1	140,7	37,5 ^b
Calcium (mg)	800	110,6	13,8	57,5	7,2	76,0	9,5	52,3	6,5	64,6	8,1
Iode (mg)	0,15	3,7	2467 ^b	2,6	1733 ^b	2,7	1800 ^b	0,5	333 ^b	1,2	800 ^b
Fer (mg)	14	0,9	6,4	0,8	5,4	2,1	15,0 ^a	0,1	0,8	1,0	7,2
Manganèse (mg)	2	0,0	0	0,0	2,5	0,1	6	0,2	7,5	0,1	6,5
Provitamine A (µg)	800	70,4	8,8	1,1	0,1	11,7	1,5	37,3	4,7	11,7	1,5
Vitamine C (mg)	80	0,1	0,1	0,7	0,9	0,0	0	3,2	4	0,1	0,1
Vitamine B9	200	6,4	3,2	17,4	8,7	26,5	13,3	6,1	3,1	1,2	0,6
Vitamine B12 (µg)	2,5	0,2	8,0	0,2	6,3	0,1	3,9	0,1	2,8	0,3	12,0
Vitamine K1 (µg)	75	67,7	90,3 ^b	23,8	31,7 ^b	61,0	81,3 ^b	23,4	31,3 ^b	0,6	0,8
	AJR	Dulse		Nori		Maërl		Spiruline		Chlorelle	
<i>Pour 7 g algues séchées</i>											
Potassium (mg)	2000	419,5	21,0 ^a	121,3	6,1	6,4	0,3	95,2	4,8	69,5	3,5
Magnésium (mg)	375	14,8	3,9	34	9,1	186	49,6 ^b	39,2	10,5	25,1	6,7
Calcium (mg)	800	17,9	2,2	22,3	2,8	2131	266,4 ^b	34,1	4,3	25,7	3,2
Iode (mg)	0,15	0,1	67 ^b	0,4	267 ^b	0,5	333 ^b	0	0	0	0
Fer (mg)	14	1,5	10,5	2,6	18,6 ^a	10,1	72,1 ^b	5,6	40,0 ^b	14,2	101,4 ^b
Manganèse (mg)	2	0,6	29,8 ^a	0,3	15,0 ^a	1,2	60,0 ^b	0,3	15,0 ^a	0,2	10,0
Provitamine A (µg)	800	18,1	2,3	326	40,8 ^b	nd	nd	2058	257,3 ^b	3150	393,8 ^b
Vitamine C (mg)	80	0,1	0,1	4	5	nd	nd	0,8	1	5,3	6,6
Vitamine B9	200	15,8	7,9	1,5	0,8	nd	nd	4,2	2,1	107,2	53,6 ^b
Vitamine B12 (µg)	2,5	0,3	10,2	2,7	108 ^b	nd	nd	16,5	660 ^b	26,9	1076,0 ^b
Vitamine K1 (µg)	75	30,0	40,0 ^b	nd	nd	nd	nd	53,2	70,9 ^b	93,8	125,1 ^b

^a > 15 % AJR/7 g.

^b > 30 % AJR/7 g.

physicochimiques préalables de rupture de paroi cellulaire. En revanche, le procédé de stabilisation semble essentiel pour assurer une bonne efficacité protéique des microalgues. La lyophilisation entraîne des pertes plus faibles de protéines par rapport aux autres méthodes (atomisation, séchage infrarouge).

Le profil en acides aminés des microalgues est généralement favorable et atteint les profils nutritionnels de référence avec des déficiences mineures parmi les acides aminés soufrés tels que la méthionine et la cystéine, déficiences caractéristiques de la plupart des protéines végétales.

La teneur en protéines des macroalgues est beaucoup plus faible. L'algue rouge nori est la plus riche en protéines avec une teneur moyenne de 30 %/matière sèche (Ciquel, 2016). La digestibilité des protéines des macroalgues in vivo n'est pas bien documentée et les études de leur assimilation chez l'homme n'aboutissent pas à des résultats concluants. En revanche, la digestibilité relative in vitro des protéines après extraction et l'emploi d'enzymes protéolytiques (pepsine, pronase) dépasse 70 % pour le nori (*Porphyra*), le wakame (*Undaria*) et la laitue de mer (*Ulva*) [31] [32].

Attention cependant aux surestimations liées au mode de calcul des protéines Kjeldahl par le facteur de conversion 6,25. Ce facteur semble surestimé pour les algues à cause d'une forte présence d'acides aminés acides et d'azote non protéique. Une publication récente [33] introduit un facteur de conversion autour de 5 qui varie selon les espèces d'algues et même selon la saison.

La plupart des macroalgues contiennent toutes les acides aminés essentiels et sont une source importante d'acides aminés acides (acides aspartique et acide glutamique). Les taux de ces 2 acides varient entre 18 et 44 % des acides aminés chez *Fucus sp.*, *Sargassum sp.*, *Laminaria digitata* et *Ascophyllum nodosum*. Dans le kombu, l'acide glutamique et l'acide aspartique sont plus abondants sous forme libre que liée et ceci est mis à profit dans l'utilisation traditionnelle du kombu comme exhausteur de goût.

Lipides

La teneur lipidique des macroalgues est très faible : de 1 à 3 % de la matière sèche. Du point de vue qualitatif, les lipides algaux diffèrent de ceux des végétaux terrestres. En effet, contrairement aux végétaux terrestres, les macroalgues et microalgues disposent (à l'exception des chlorophycées) des complexes elongase-desaturase conduisant à la synthèse d'acides gras polyinsaturés à chaînes longues (20–22 carbones).

À l'inverse, la teneur en lipides des microalgues est beaucoup plus élevée et varie entre 1 et 40 % et peut atteindre 85 % du poids sec en fonction des conditions de culture [30]. Les acides gras polyinsaturés constitutifs des lipides des microalgues se retrouvent, via la chaîne alimentaire, dans le zooplancton, les crustacés, les mollusques, les poissons. La richesse des microalgues en acides gras essentiels est l'une des principales raisons de leur utilisation en nutrition aquacole. Les microalgues constituent la nourriture de base des mollusques : palourdes, huîtres et clams. De plus, les microalgues sont également utilisées en aquaculture de poisson où elles contribuent à la culture et l'enrichissement des rotifères (proies vivantes) qui constituent l'alimentation de base des crevettes, des larves de bar et des daurades.

Les caractéristiques des chlorophycées (ex : *Chlorella*) sont les doubles liaisons insaturées en position ω 3 alors

que pour les cyanobactéries (ex : spiruline, AFA) elles se positionnent préférentiellement en position ω 6. Les facteurs nutritionnels et environnementaux peuvent modifier à la fois les proportions relatives des acides gras et leur quantité totale. Ainsi certaines microalgues qui poussent en conditions restrictives en azote présentent des teneurs plus élevées en lipides [30].

La spiruline constitue une source intéressante d'acide gamma linoléique GLA (20 à 25 % de la fraction lipidique totale de la spiruline). Elle offre ainsi une alternative intéressante aux sources de GLA classiques connues que sont l'huile d'onagre, de pépins de cassis et de bourrache.

La Chlorelle, utilisée en médecine dans les pays d'Extrême Orient depuis des temps anciens, est toujours consommée traditionnellement en Orient. Elle contient entre 14 à 20 % d'acide linoléique ALA (C18 :3, $n-3$) par rapport aux acides gras totaux pour une fraction lipidique totale d'environ 12 % [34].

D'autres déficiences en nutriments, en particulier la déficience en silice pour les diatomées, peuvent augmenter la teneur en lipides. Ainsi, la microalgue *Odontella aurita*, récemment autorisée est une source importante d'acides gras insaturés à longue chaîne : 1,6 à 3,4 % d'acide gras EPA (C20 :5, $n-3$) sur le poids sec [35–37].

Enfin dernièrement des extraits huileux issus de culture de microalgues ont été autorisés en alimentation humaine. Ainsi les microalgues *Schyzochytrium* et *Ulkenia* cultivées en fermenteur par hétérotrophie permettent d'obtenir des extraits huileux contenant 30 % de DHA. Une étude de biodisponibilité en 2008 a montré que des capsules d'extraits huileux riches en DHA apportent des quantités équivalentes de DHA dans le sang et les globules rouges [38]. Enfin, l'huile obtenue à partir *Schyzochytrium* contiendrait plus de squalène et de phytostérols et trois fois moins de cholestérol que les huiles de poisson [39]. Du point de vue économique, il faut cependant souligner que les prix mondiaux des huiles de poisson sont encore largement en dessous des prix des huiles d'algues, mais les contraintes sur la ressource et la gestion durable des pêcheries s'intensifient.

Métabolites secondaires

Les algues produisent une grande variété de métabolites secondaires caractérisés par un large spectre d'activités biologiques : phlorotannins (polyphénols), caroténoïdes, vitamines.

Les phlorotannins sont les composés phénoliques majoritaires présents dans les algues, et notamment les algues brunes. Du point de vue chimique et structural les phlorotannins sont des polymères et des oligomères du phloroglucinol. Les algues alimentaires les plus riches en phlorotannins (de l'ordre de 6 % de la matière sèche) sont *Ascophyllum nodosum* et *Fucus vesiculosus*, connues pour se développer dans la zone intertidale. Plusieurs activités biologiques sont rapportées pour les polyphénols : antioxydant, protection vis-à-vis des radiations, activités antiprolifératives, antibiotiques, régulation de la glycémie, inhibition des enzymes digestives [15]. Par exemple les polyphénols d'*Himanthalia elongata* ont montré d'excellentes propriétés antimicrobiennes et antioxydantes ce qui peut être une opportunité pour l'application des extraits d'algues comme conservateur naturel des aliments ou comme aliment fonctionnel [40].

Différents caroténoïdes comme l'alpha et le bêta-carotène, la lutéine, la zéaxanthine et la fucoxanthine ont

été identifiés dans les algues. La fucoxanthine est le principal caroténoïde présent dans les algues brunes : c'est un pigment appartenant au groupe des xanthophylles qui a démontré de puissantes activités antioxydantes [41]. Il existe également des études de plus en plus nombreuses sur ses propriétés minceur :

- inhibition de l'activité de la lipase dans la lumière gastro-intestinale et suppression de l'absorption des triglycérides [42] ;
- réduction de la masse grasse abdominale ;
- inhibition de la différenciation des adipocytes [43].

Les algues contiennent une proportion non négligeable de provitamine A, vitamine C, vitamine B9 et vitamine K1. La vitamine C est présente en quantité plus ou moins importante dans certaines algues vertes et brunes, à des taux variant entre 6 et 38 mg/100g frais (Tableau 1). L'algue brune *Himantalia elongata* est l'algue la plus riche en vitamine C. Cependant, étant donné la sensibilité thermique de cette vitamine, les teneurs peuvent être éminemment variables dans les algues transformées.

Les macroalgues contiennent des teneurs non négligeables en vitamine K de type végétal soit la vitamine K1 (phytoménadione). La vitamine K est l'activateur des facteurs de la coagulation. Les déficiences sont rares chez l'homme. Par ailleurs, chez les sujets prenant des facteurs anticoagulants, il est déconseillé de consommer des aliments riches en vitamine K comme les crucifères et les algues. À la différence des végétaux terrestres, les algues contiennent de la vitamine B12, en particulier l'algue rouge nori et les microalgues spiruline et chlorelle. Cependant, sa biodisponibilité chez l'homme n'est pas totalement élucidée.

En effet, plusieurs études ont montré que la plupart des types de B12 présentes dans les algues sont des analogues de la vitamine B12 (grande quantité de pseudovitamine B12) et de ce fait ne seraient pas biodisponibles pour les humains [44,45]. L'association américaine des diététiciens du Canada (en 2003) a statué dans son rapport sur le régime végétarien sur le fait que la spiruline ne pouvait pas être comptée comme une source fiable de vitamine B12 active [46]. Cependant, les études des algues nori et chlorelle semblent indiquer que la vitamine B12 de ces algues est bien sous forme active (identification des corrinoides actifs), serait bien assimilée chez le rat [47–49] et serait donc une source assimilable de vitamine 12. Cependant, les auteurs soulignent de très grandes variations de teneurs en vitamine B12 active dans la chlorelle ce qui peut ne pas présenter de garantie d'apport pour des végétariens stricts [50].

Enfin la composition des algues est variable et dépend de nombreux facteurs environnementaux (saison, localisation, maturité de l'algue) ainsi que de tous les procédés post-récolte. Nous pouvons exposer ici les principaux paramètres de procédé affectant la composition nutritionnelle des algues en émettant quelques hypothèses (projet SEN-SALG, CEVA unpublished).

Le procédé de séchage affecte logiquement les composés les plus thermosensibles et en particulier la vitamine C (conservée par lyophilisation). La teneur en bêta-carotène et en vitamine E est également plus faible dans les algues séchées par rapport aux algues fraîches : oxydation ou dégradation au séchage ? Mais de façon plus globale, sur les macronutriments, il n'y a pas de différence significative entre algues fraîches et algues séchées excepté pour la matière minérale dont le sel. On note des teneurs

légèrement plus faibles en matières minérales y compris en sel (NaCl) pour les algues séchées (meilleur égouttage de l'eau de mer ?).

Le procédé de blanchiment est un procédé classique utilisé dans l'industrie des légumes pour fixer les couleurs, assainir et préparer les légumes à la surgélation ou la stérilisation. Très globalement le blanchiment (90 °C/45 secondes dans l'eau de mer) a peu d'influence sur les teneurs en protéines et lipides. On note une légère concentration en fibres. Cependant, il provoque une perte de minéraux, de glucides assimilables et bien sûr de vitamine C. Le lessivage des minéraux entraîne une perte en iode souvent désirée (teneur excessive en iode dans le kombu royal) ainsi qu'une perte notable en potassium et un léger enrichissement en sodium. Ceci est à prendre en compte pour des formulations de plats préparés intégrant des algues.

Enfin le salage entraîne une perte importante de la matière sèche liée à ce procédé de déshydratation osmotique. La perte est variable en fonction du type d'algues. Comme pour le blanchiment la concentration en composés insolubles augmente légèrement (fibres, lipides, protéines) alors qu'elle diminue pour les glucides assimilables et les minéraux (lessivage potassium, iode et nitrates). La teneur en sodium reste relativement stable même si on semble observer une légère réduction de la teneur en sodium par dessalage dans l'eau douce.

Composés indésirables

Les macroalgues ne présentent pas de danger pour la santé car il n'y a pas de macroalgues alimentaires toxiques à notre connaissance. Nous ne citons pas ici le cas des algues vertes de prolifération laissées en tas sur les plages qui peuvent générer des problèmes de toxicité liés à l'émanation de gaz toxique due à la décomposition des algues.

Toutefois, la qualité de l'algue est le reflet de son environnement. Les espèces d'algues utilisables en alimentation humaine sont visées en France par la DGCCRF et des teneurs maximales en métaux lourds sont associées afin de garantir l'absence de toxicité de ces aliments. La qualité des eaux littorales françaises est bonne et permet de récolter des algues sans problème associé de métaux lourds. Arsenic minéral, étain, cadmium, plomb, mercure pour des algues alimentaires récoltées en France sont presque toujours en dessous des valeurs seuils. Spécifiquement, certaines algues vont être plus riches en arsenic ou en cadmium alors qu'elles sont récoltées sur les mêmes lieux que d'autres algues moins riches. Ainsi, le wakame atlantique et *Fucus* sont connus pour contenir plus de cadmium que les autres algues et les laminaires sont connues pour avoir des teneurs plus élevées en arsenic et pourraient excéder les recommandations de l'ANSES [51]. Dans ce cas, des traitements simples tels le blanchiment peuvent permettre de réduire la teneur en métaux lourds de ces algues [25,52].

Rappelons également la très grande teneur en iode des algues marines, en particulier de l'algue brune *Saccharina latissima* (Kombu royal). Cette algue brune peut cumuler des teneurs en iode excessives par rapport à la limite d'apport maximal tolérable journalier de 600 µg [53] et aux recommandations de l'ANSES indiquant un seuil de 2000 mg iode/kg algue sèche [51]. Pour y remédier, il est également conseillé de procéder à un blanchiment rapide à 90 °C, voire

même une macération de l'algue dans l'eau tiède : réduction de 50 à 80 % de la teneur initiale en iode [12].

Effets bénéfiques pour la santé

Les bénéfices santé liés à la consommation des algues ont tout d'abord été identifiés à travers des études épidémiologiques qui ont montré la faible prévalence de certaines maladies comme les maladies coronariennes et certains cancers (sein, côlon et prostate) dans des régions fortement consommatrices d'algues [6,54–59].

Par ailleurs, une étude consacrée à l'historique des habitudes alimentaires des populations d'Okinawa dans les îles Ryukyu au Japon montre que ces populations ont la particularité d'avoir une espérance de vie exceptionnelle [60]. L'auteur résume les principes culturels de cette population par la formule « food is medicine ». Les végétaux (algues kombu – laminaires – et soja) occupent une grande place dans leur régime alimentaire, influencé à la fois par les pratiques chinoises et les traditions japonaises : le porc, le kombu et le tofu (protéines de soja) font partie des aliments « festifs », mais l'association algues–tofu fait partie du régime quotidien.

Les algues sont en effet d'excellentes sources de composés bioactifs. Outre les métabolites primaires requis pour leur croissance normale, les algues produisent beaucoup de métabolites secondaires en réponse à un nombre important de pressions environnementales. Ils incluent les variations saisonnières qui influent sur la salinité, température et lumière, l'exposition aux rayonnements UV et aux herbivores. Il est important de souligner la grande diversité dans la composition des algues et certains composés sont uniques à un genre ou une famille. Par exemple, le caroténoïde fucoxanthine est uniquement présent dans les algues brunes alors que le polysaccharide sulfaté ulvane est uniquement présent dans les algues vertes. Il existe également une variabilité naturelle d'une lame d'algue à l'autre pour une même espèce d'algue et également dans différentes parties d'une même lame.

Les algues marines ont été utilisées en usage médical dans la civilisation ancienne de Chine. L'isolement de composés actifs pharmaceutiques a été un sujet de recherche largement exploré par de nombreux chercheurs. Plusieurs substances ont été isolées et testées mais aucun composé n'a réussi notablement pour des applications médicales (en dehors de l'alginate utilisé comme pansement gastrique).

Durant les trente dernières années, le nombre de métabolites identifiés possédant des activités biologiques a augmenté significativement. D'après Smit en 2004 [61], dans sa revue sur les usages médicaux et pharmaceutiques des algues, les substances qui recevraient le plus d'attention actuellement dans le secteur médical seraient les polysaccharides sulfatés, notamment comme substances antivirales, les gels d'hydrocolloïdes pour la reconstruction osseuse et tissulaire ainsi que des métabolites spécifiques » comme anti-viraux/anti-cancéreux, (uranones et kahalalide F par exemple).

Conclusion

Grâce à leurs qualités organoleptiques et leurs atouts nutritionnels, les algues s'inscrivent de plus en plus dans notre alimentation. En plus des apports en fibres, en minéraux, en

composés antioxydants, les algues sont avant tout source de couleur, de goût, de texture et de variété dans l'assiette.

Les algues sont une source très intéressante de nombreux minéraux et micronutriments d'intérêt nutritionnel et contribueraient à une meilleure santé. Les algues contiennent aussi un grand nombre de composés bioactifs et certains composés apparaissent réellement prometteurs tels les polysaccharides sulfatés, et en particulier le fucoïdane, ainsi que les pigments, caroténoïdes et composés antioxydants présents chez les macroalgues comme les microalgues (fucoxanthine, astaxanthine, phycocyanine...). L'exploration du monde des microalgues qui commence seulement devrait elle aussi ouvrir de nouvelles opportunités.

Apprenons à consommer davantage ces algues dans des soupes, des salades, des sauces et même dans des *smoothies* pleins de vitalité.

Déclaration de liens d'intérêts

L'auteur déclare ne pas avoir de liens d'intérêts.

Références

- [1] De Reviens B. Biologie et phylogénie des algues. Tome 2. Ed Belin. Collection Belin Sup Sciences; 2003.
- [2] FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fisheries and Aquaculture statistics [données 2014]; 2016.
- [3] Ademe. Évaluation du gisement potentiel de ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à horizon 2030; 2014.
- [4] Wells ML, Potin P, Craigie JS, Raven JA, Merchant SS, Helliwell KE, et al. Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding. *J Appl Phycol* 2017;29(2):949–82.
- [5] Fitton JH. Marine algae and health: a review of the scientific and historical literature. *Glycosci Nutr* 2005;6(2).
- [6] Teas J, Vena S, Cone DL, Irhimeh M. The consumption of seaweed as a protective factor in the etiology of breast cancer: proof of principle. *J Appl Phycol* 2013;25(3):771–9.
- [7] Mouritsen OG, Dawczynski C, Duelund L, et al. On the human consumption of the red seaweed dulse (*Palmaria palmata* (L.) Weber & Mohr). *J Appl Phycol* 2013;25:1777–91.
- [8] Brault D, Marfaing H, Laurent P. Les algues alimentaires : freins et motivations. *Cah Nutr Diet* 2002;37(6):387–94.
- [9] Bresc-Litzler S. Manger des algues du littoral breton en France : mode alimentaire ou nouvelle consommation de produit de la mer. 2014. p. 325–39.
- [10] Le Bras Q, Lesueur M, Lucas S, Gouin S. Algues alimentaires description de la consommation et des marchés associés. 2014.
- [11] Le Bras Q, Ritter L, Faquel D, Lesueur M, Lucas S, Gouin S. Étude du marché français des algues alimentaires. Catalogue et analyse des produits existants. Programme IDEALG Phase 2, 37. Les publications du Pôle halieutique Agrocampus Ouest; 2015, 41 p.
- [12] Marfaing H, Viller N, Richardeau M. Impact des procédés de transformation des algues sur leurs qualités. *IAA* 2013:15–7.
- [13] Lahaye M. Marine-algae as sources of fibers—determination of soluble and insoluble dietary fiber contents in some sea vegetables. *J Sci Food Agric* 1991;54(4):587–94.
- [14] Lahaye M, Kaeffer B. Seaweed dietary fibres: structure, physico-chemical and biological properties relevant to intestinal physiology. *Sci Alim* 1997;17:563–84.
- [15] Holdt SL, Kraan S. Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. *J Appl Phycol* 2011;23(3):543–97.
- [16] Adams JMM, Toop TA, Donnison IS, Gallagher JA. Seasonal variation in *Laminaria digitata* and its impact on biochemical conversion routes to biofuels. *Bioresour Technol* 2011;102(21):9976–84.

- [17] Hehemann JH, Correc G, Barbeyron T, Helbert W, Czjzek M, Michel G. Transfer of carbohydrate-active enzymes from marine bacteria to Japanese gut microbiota. *Nature* 2010;464(7290):908–12.
- [18] Thomas F, Barbeyron T, Tonon T, Génicot S, Czjzek M, Michel G. Characterization of the first alginolytic operons in a marine bacterium: from their emergence in marine Flavobacteriia to their independent transfers to marine Proteobacteria and human gut Bacteroides. *Environ Microbiol* 2012;14(9):2379–94.
- [19] Hehemann JH, Kelly AG, Pudlo NA, Martens EC, Boraston AB. Bacteria of the human gut microbiome catabolize red seaweed glycans with carbohydrate-active enzyme updates from extrinsic microbes. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2012;109(48):19786–91.
- [20] Manabe M, Ishizaki S, Yoshioka T, Oginome N. Improving the palatability of salt-reduced food using dried bonito stock. *J Food Sci* 2009;74(7):S315–21.
- [21] López-López I, Cofrades S, Ruiz-Capillas C, Jiménez-Colmenero F. Design and nutritional properties of potential functional frankfurters based on lipid formulation, added seaweed and low salt content. *Meat Sci* 2009;83(2):255–62.
- [22] Ruperez P. Mineral content of edible marine seaweeds. *Food Chem* 2002;79(1):23–6.
- [23] MacArtain P, Gill CI, Brooks M, Campbell R, Rowland IR. Nutritional value of edible seaweeds. *Nutr Rev* 2007;65(12 Pt 1):535–43.
- [24] Aquaron R, Delange F, Marchal P, Lognoné V, Ninane L. Bioavailability of seaweed iodine in human beings. *Cell Mol Biol (Noisy-le-Grand)* 2002;48(5):563–9.
- [25] Zava TT, Zava DT. Assessment of Japanese iodine intake based on seaweed consumption in Japan: a literature-based analysis. *Thyroid Res* 2011;4:14.
- [26] Kim JY, Moon SJ, Kim KR, Sohn CY, Oh JJ. Dietary iodine intake and urinary iodine excretion in normal Korean adults. *Yonsei Med J* 1998;39(4):355–62.
- [27] Ishizuki Y, Yamauchi K, Miura Y. Transient thyrotoxicosis induced by Japanese kombu. *Nihon Naibunpi Gakkai Zasshi* 1989;65(2):91–8.
- [28] Nakamura E, Yokota H, Matsui T. The in vitro digestibility and absorption of magnesium in some edible seaweeds. *J Sci Food Agric* 2012;92(11):2305–9.
- [29] Shaw NS, Liu YH. Bioavailability of iron from purple laver (*Porphyra* spp.) estimated in a rat hemoglobin regeneration bioassay. *J Agric Food Chem* 2000;48(5):1734–7.
- [30] Becker W. Microalgae in human and animal nutrition. In: Amos Richmond. *Handbook of microalgal culture*. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd; 2008. p. 312–51.
- [31] Fujiwara Arasaki T, Mino N, Kuroda M. The protein value in human-nutrition of edible marine algae in Japan. *Hydrobiologia* 1984;116:513–6.
- [32] Indegaard M, Minsas J. Animal and human nutrition. In: Guiry MD, Blunden G, editors. *Seaweed resources in Europe. Uses and potential*. Wiley; 1991. p. 21–64.
- [33] Schiener P, Black KD, Stanley MS, Green DH. The seasonal variation in the chemical composition of the kelp species *Laminaria digitata*, *Laminaria hyperborea*, *Saccharina latissima* and *Alaria esculenta*. *J Appl Phycol* 2015;27(1):363–73.
- [34] Otles S, Pire R. Fatty acid composition of chlorella and spirulina microalgae species. *J AOAC Int* 2001;84(6):1708–14.
- [35] Braud JP. Simultaneous culture in pilot tanks of the macroalga *Chondrus crispus* and the microalga *Odontella aurita* producing EPA. *Marine Microorganisms for Industry*, 21. Ed Ifremer, Actes Colloq; 2008. p. 39–47.
- [36] Nongonierma R, Dubois N, Braud JP, Wielgosz-Collin G, Kornprobst JM, Barnathan G. Unsaponifiable matter of the cultured diatom *Odontella aurita*: phytol and sterols as major components. *Marine Biotechnol* 2003;36:37–40.
- [37] Pasquet V, Ulmann L, Mimouni V, Guihéneuf F, Jacqueline B. Fatty acids profile and temperature in the cultured marine diatom *Odontella aurita*. *J Appl Phycol* 2014;26(6):2265–71.
- [38] Arterburn LM, Oken HA, Bailey Hall E, Hamersley J, Kuratko CN, Hoffman JP. Algal-oil capsules and cooked salmon: nutritionally equivalent sources of docosahexaenoic acid. *J Am Diet Assoc* 108(7):1204–9.
- [39] Bocanegra A1, Bastida S, Benedí J, Ródenas S, Sánchez-Muniz FJ. Characteristics and nutritional and cardiovascular-health properties of seaweeds. *J Med Food* 2009;12(2):236–58.
- [40] Rajauria G, Jaiswal AK, Abu-Gannam N, Gupta S. Antimicrobial, antioxidant and free radical-scavenging capacity of brown seaweed *Himantalia elongata* from western coast of Ireland. *J Food Biochem* 2012;37(3):322–35.
- [41] Kumar CS, Ganesan P, Suresh PV, Bhaskar N. Seaweeds as a source of nutritionally beneficial compounds - a review. *J Food Sci Technol* 2008;45:1–13.
- [42] Matsumoto M, Hosokawa M, Matsukawa N, Hagio M, Shinoki A, Nishimukai M, et al. Suppressing effects of the marine carotenoids, fucoxanthin and fucoxanthinol on triglyceride absorption in lymph duct-cannulated rats. *Eur J Nutr* 2010;49(4):243–9.
- [43] Maeda H, Tsukui T, Sashima T, Hosokawa M, Miyashita K. Seaweed carotenoid, fucoxanthin, as a multi-functional nutrient. *Asia Pac J Clin Nutr* 2008;17(Suppl. 1):196–9.
- [44] Dagnelie PC, van Staveren WA, van den Berg H. Vitamin B-12 from algae appears not to be bioavailable. *Am J Clin Nutr* 1991;53(3):695–7.
- [45] Watanabe F. Vitamin B12 sources and bioavailability. *Exp Biol Med* 2007;232(10):1266–74.
- [46] Vesanto M, Winston C, Levin S. Position of the academy of nutrition and dietetics: vegetarian diets. *J Acad Nutr Diet* 2016;116(2):1970–80.
- [47] Van den Berg H, Brandsen L, Sinkeldam BJ. Vitamin B-12 content and bioavailability of spirulina and nori in rats. *The J Nutr Biochem* 1991;2(6):314–8.
- [48] Rauma AL, Törrönen R, Hänninen O, Mykkänen H. Vitamin B-12 status of long-term adherents of a strict uncooked vegan diet (“living food diet”) is compromised. *J Nutr* 1995;125(10):2511–5.
- [49] Watanabe F, Takenaka S, Kittaka-Katsura H, Ebara S, Miyamoto E. Characterization and bioavailability of vitamin B12-compounds from edible algae. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)* 2002;48(5):325–31.
- [50] Watanabe F, Yabuta Y, Bito T, Teng F. Vitamin B12-containing plant food sources for vegetarians. *Nutrients* 2014;6(5):1861–73.
- [51] AFSSA. Avis de l’Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à la teneur maximale en arsenic inorganique recommandée pour les algues laminaires et aux modalités de consommation de ces algues compte tenu de leur teneur élevée en iode; 2009.
- [52] Katayama M, Sugawa-Katayama Y, Murakami K. Pre-cooking of edible marine brown algae for reduction of arsenic contents. *J Food Nutr Sci* 2015;3(1–2):84–7.
- [53] EFSA, 2006. Tolerable upper intake levels for vitamins and minerals. Scientific committee on food, scientific panel on dietetic products, nutrition and allergies. European Food Safety Authority. http://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/efsa_rep/blobserver_assets/ndatolerableuil.pdf.
- [54] Teas J. The consumption of seaweed as a protective factor in the etiology of breast cancer. *Med Hypotheses* 1981;7:601–13.
- [55] Severson RK, Nomura AM, Grove JS, Stemmermann GN. A prospective study of demographics, diet, and prostate cancer among men of Japanese ancestry in Hawaii. *Cancer Res* 1989;49(7):1857–60.
- [56] Hoshiyama Y, Sekine T, Sasaba T. A case-control study of colorectal cancer and its relation to diet, cigarettes, and alcohol consumption in Saitama prefecture, Japan. *Tohoku J Exp Med* 1993;171(2):153–65.
- [57] Ozasa K, Watanabe Y, Ito Y, Suzuki K, Tamakoshi A, Seki N, et al. Dietary habits and risk of lung cancer death in a large-scale cohort study (JACC Study) in Japan by sex and smoking habit. *Jpn J Cancer Res* 2001;92(12):1259–69.
- [58] Yang YJ, Nam SJ, Kong G, Kim MK. A case-control study on seaweed consumption and the risk of breast cancer. *Br J Nutr* 2010;103(9):1345–53.

- [59] Michikawa T, Inoue M, Shimazu T, Sawada N, Iwasaki M, Sasazuki S, et al. Seaweed consumption and the risk of thyroid cancer in women: the Japan Public Health Center-based Prospective Study. *Eur J Cancer Prev* 2012;21(3):254–60.
- [60] Sho H. History and characteristics of Okinawan longevity food. *Asia Pac J Clin Nutr* 2001;10(2):159–64.
- [61] Smit AJ. Medicinal and pharmaceutical uses of seaweed natural products: a review. *J Appl Phycol* 2004;16:245–62.