

La diversité des macroalgues utilisées dans de nombreux domaines

Résumé La composition des macroalgues en molécules originales leur confère des propriétés particulières qui ne sont pas retrouvées dans les autres plantes terrestres et qui sont validées dans différents domaines d'application. Le marché des hydrocolloïdes est le plus développé : l'extraction des alginates, des carraghénanes et de l'agar sont des procédés maîtrisés, bien que l'intérêt croissant pour la bioraffinerie amène l'industrie vers des procédés plus complexes et diversifiés. L'utilisation des algues dans les matériaux est beaucoup plus récente et représente encore actuellement un marché en émergence : l'incorporation d'algues dans des matériaux existants ou les biopolymères algosourcés sont autant de façons de proposer de nouveaux matériaux, malgré certains points de vigilance supplémentaires, notamment environnementaux. La composition des algues est depuis longtemps exploitée : les polysaccharides, les protéines et peptides, les métabolites secondaires et autres molécules sont ainsi utilisés comme bioactifs dans les compléments alimentaires, certains médicaments et en cosmétique. Plus récemment, les domaines des biostimulants végétaux et la nutrition animale s'intéressent à ces molécules aux applications variées. Les enjeux de la filière algues demeurent nombreux : structuration de filière, harmonisation de la réglementation, accès à la ressource et meilleure valorisation mais restent des opportunités de croissance pour les macroalgues.

Mots-clés Hydrocolloïdes, matériaux algosourcés, biostimulants, nutraceutique, cosmétique.

Abstract The diversity of macroalgae used in many sectors

Original molecules found in seaweeds give them specific properties that are not found in other terrestrial plants, and which have been used in various fields of application. The hydrocolloid market is the most developed: the extraction of alginates, carrageenans and agar are well mastered processes, although the growing interest in biorefinery is leading the industry towards more complex and diversified processes. The use of algae in bio-based materials is much more recent and still represents an emerging market: the incorporation of algae into existing materials or algosourced biopolymers are ways of proposing new materials, although certain points of vigilance, particularly environmental, still need to be considered. The composition of algae has long been exploited: polysaccharides, proteins and peptides, secondary metabolites and other molecules are used as bioactives in food supplements, certain medicines, and cosmetics. More recently, the fields of plant biostimulants and animal nutrition have taken an interest in these molecules. There are still many challenges facing the algae industry: structuring the industry, harmonising regulations, access to resources and better value-added, but opportunities for macroalgae to grow are there.

Keywords Hydrocolloids, bio-based materials, biostimulants, nutraceuticals, cosmetic.

Les macroalgues sont utilisées depuis la Préhistoire, notamment pour leurs usages alimentaires et médicaux. Cependant, au cours des siècles, leur utilisation s'est diversifiée jusqu'à couvrir aujourd'hui des domaines aussi divers que l'alimentaire, la cosmétique, l'agriculture, les matériaux biosourcés, etc. Les usages historiques, souvent empiriques, évoluent aussi au fil des avancées scientifiques et techniques. Cet article présente dans un premier temps le marché des hydrocolloïdes où la chimie a permis de mieux comprendre le comportement des polysaccharides algaux (alginates, carraghénanes, agar) et, ainsi, mettre en place des procédés d'extraction efficaces bien qu'en permanence à réinventer. Nous ferons ensuite un tour du côté des matériaux biosourcés, domaine encore en développement où les start-ups foisonnent. Les premiers produits commerciaux sont commercialisés et de nouvelles applications se dessinent tout en ayant différents défis à relever. Puis, les bioactifs contenus dans les algues seront passés en revue avec leurs différentes applications, aussi bien en nutraceutique qu'en cosmétique, ou dans les biostimulants végétaux et en nutrition animale. Enfin, les différents enjeux et perspectives de l'industrie des macroalgues seront exposés.

Les hydrocolloïdes : une industrie historique qui continue de tirer le marché des macroalgues

Nous pouvons introduire quelques définitions afin de bien définir le domaine. Les hydrocolloïdes sont des molécules hydrosolubles, ou hydrodispersibles, de grande taille, qui modifient les propriétés rhéologiques de l'eau (*tableau 1*). Lorsque les hydrocolloïdes sont extraits des macroalgues, nous parlons de « phycocolloïdes ». Ils sont localisés dans les parois cellulaires des macroalgues, où ils jouent un rôle structural et fonctionnel (structure des parois, rétention d'eau, activité biologique, etc.). Leur teneur est importante, entre 30 et 70 % de la composition de la macroalgue en fonction des espèces.

Les phycocolloïdes émergent dès la première moitié du xx^e siècle. Ces polysaccharides, originaux dans leur composition en sucres et acides uroniques, et parfois leur fort taux de sulfatation, n'ont pas d'équivalent chez les plantes terrestres. Cette grande diversité structurale conduit à des propriétés variées. Trois grandes familles ont connu un essor industriel considérable : les alginates, les carraghénanes et l'agar. Ils représentent aujourd'hui un marché de plus d'un milliard d'euros [1].

Tableau I - Exemples d'hydrocolloïdes dans différents domaines du vivant et de la chimie.

Origine	Hydrocolloïde
Plantes	Amidons Pectines Guar
Macroalgues	Alginates Carraghénanes Agar
Animaux	Gélatine Protéines du lait
Chimie de synthèse	Dérivés d'amidon Dérivés de guar Dérivés de cellulose

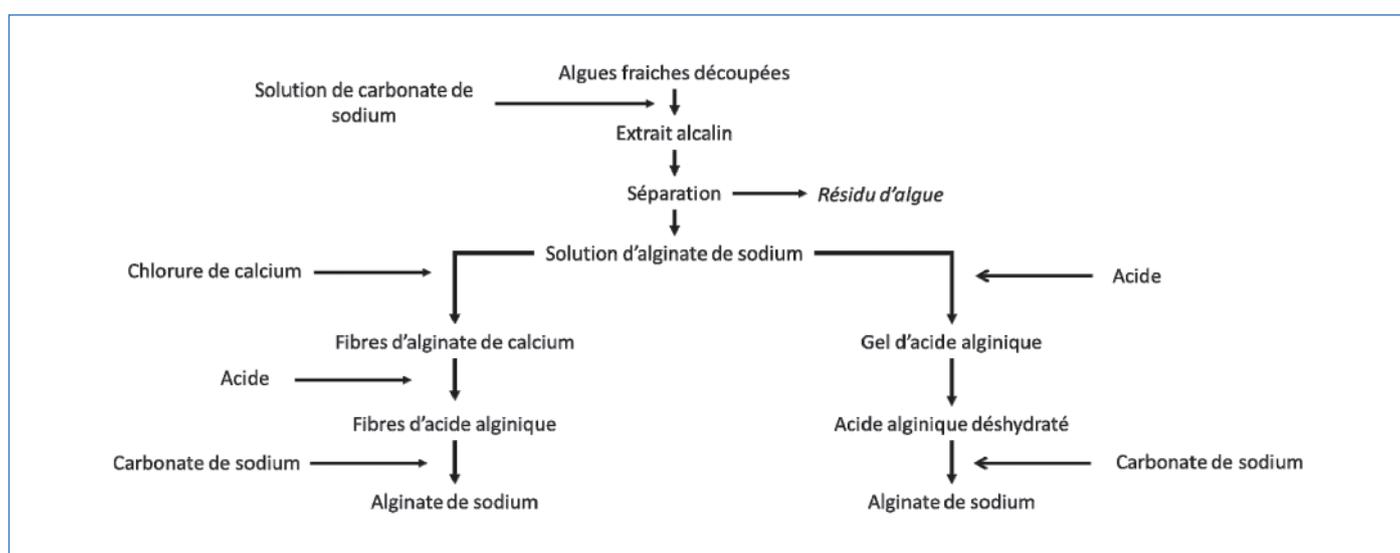


Figure 1 - Schéma de procédés d'extraction des alginates.

Classés comme additifs alimentaires, ils constituent 30 à 40 % du marché des hydrocolloïdes alimentaires, mais leurs applications sont multiples et on les retrouve aussi bien dans l'industrie cosmétique et pharmaceutique que dans l'impression textile, la papeterie ou les peintures.

Les alginates

Les alginates sont majoritairement extraits des macroalgues brunes, plus particulièrement des espèces *Laminaria digitata*, *Laminaria hyperborea*, *Ecklonia maxima* et *Macrocystis sp.* Dans une moindre mesure, parce que leurs teneurs en alginates sont moins importantes, les espèces *Ascophyllum nodosum* et *Fucus sp.* peuvent être utilisées.

Les premières expériences scientifiques sur l'extraction des alginates à partir de macroalgues brunes ont été réalisées par le chimiste anglais Edward C. Cortis à la fin du XIX^e siècle, mais la production industrielle d'alginates débute aux États-Unis dans les années 1930. Le procédé d'extraction repose sur des extractions successives à l'acide (figure 1).

Ces alginates extraits sont des grands polymères constitués d'acide guluronique et d'acide mannuronique regroupés en blocs : une succession d'acide guluronique constitue un bloc G, une succession d'acide mannuronique un bloc M,

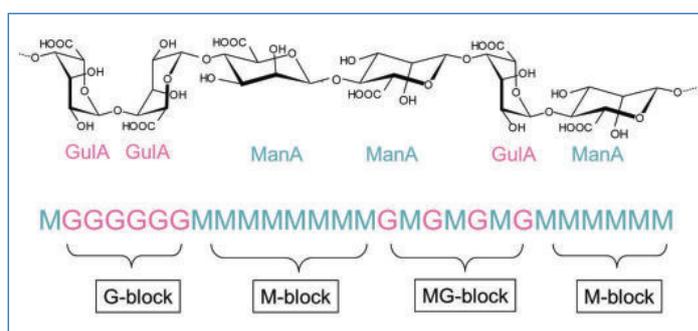


Figure 2 - Structure des alginates : organisation en « blocs » homogènes ou alternés d'acide mannuronique (noté ManA) et guluronique (GulA).

et une alternance d'acide guluronique et d'acide mannuronique un bloc MG (figure 2).

Les propriétés des alginates sont déterminées par, d'une part, la proportion de blocs M et de blocs G dans la molécule et, d'autre part, les contre-ions utilisés. Ainsi, les blocs M forment un agencement global de la molécule assez lâche et leur réactivité aux ions est bonne, sans être très forte, ce qui conduit à l'obtention d'une solution visqueuse plus qu'à la formation d'un gel. À l'inverse, les blocs G forme un agencement très

serré, appelé « structure en boîte à œufs » et leur réactivité aux ions est très forte, ce qui conduit à la formation d'un gel résistant. La structure des contre-ions qui participent à l'élaboration de la solution d'alginate est également importante : les alginates de cations monovalents (sodium, potassium) sont visqueux, mais la complexation forte des cations divalents (calcium notamment) par les blocs homogènes d'acide guluronique conduit à leur gélification. C'est donc la composition des alginates (rapport blocs M/blocs G) et les ions utilisés qui confèrent leurs propriétés épaississantes, stabilisantes ou gélifiantes largement utilisées dans l'agroalimentaire et le domaine médical. Leurs propriétés viscosantes et filmogènes sont aussi exploitées dans de nombreuses applications industrielles (peintures, papeterie...) ou le domaine des matériaux comme nous le verrons par la suite.

Les carraghénanes

Historiquement, les carraghénanes étaient extraits du *Chondrus crispus* ou « mousse irlandaise » et ont été utilisés comme gélifiant alimentaire dès le début du xv^e siècle (souvent par infusion de la macroalgue). Ils tiennent d'ailleurs leur nom d'une localité dont le nom est dérivé du mot irlandais *carraigín*, « petite pierre ». Ils ont été produits artisanalement en Nouvelle-Angleterre au xviii^e/xix^e siècle par les migrants irlandais, mais leur production industrielle se développe dans les années 1930, pour ensuite connaître une forte croissance après la Seconde Guerre mondiale. Actuellement, les carraghénanes sont majoritairement extraits d'un nombre limité d'espèces de macroalgues rouges dont *Gigartina sp./Sarcotalia sp.* (Amérique du Sud) et *Eucheuma sp./Kappaphycus sp.* (Indonésie, Philippines, Tanzanie...). *Chondrus crispus/Mastocarpus sp.* (France) ne sont quasiment plus exploitées pour ce type d'application.

Les carraghénanes contenus dans les macroalgues présentent une diversité chimique au sein de leur structure. Trois types de carraghénanes sont majoritairement recherchés (kappa, iota et lambda) et sont présents directement ou sous la forme de précurseurs. Il existe également d'autres formes

de moindre importance. La structure de base est constituée d'un disaccharide composé d'une unité β -D-galactose sulfatée liée en 1,3 et d'un motif α -D-galactose plus ou moins sulfaté lié en 1,4 (qui peut être remplacé par du 3,6-anhydro-D-galactose). La différence entre les trois formes kappa, iota et lambda tient dans la sulfatation, plus ou moins importante, et la présence de la structure anhydro (tableau II et figure 3).

Comme pour les alginates, les propriétés des carraghénanes dépendent de leur structure. Ainsi, le pouvoir gélifiant diminue avec le degré de sulfatation :

- Le λ (lambda)-carraghénane en solution dans l'eau augmente la viscosité, mais n'entraîne pas la formation de gel du fait de sa sulfatation élevée.

- Le ι (iota)-carraghénane engendre un gel élastique et transparent qui peut être détruit par agitation. Le réseau détruit peut se reformer plus ou moins après arrêt de l'agitation (thixotropie).

- Le κ (kappa)-carraghénane est celui qui forme le gel le plus dur. La dureté dépend du cation utilisé pour former le maillage : l'ion potassium donne le gel le plus dur, alors que le calcium donne un gel souple et ferme et l'ion sodium un gel fugace.

La préparation industrielle des carraghénanes utilise deux de leurs propriétés : solubilité dans l'eau chaude et insolubilité dans les solvants organiques polaires. Deux procédés d'extraction sont utilisés pour obtenir soit des carraghénanes raffinés (quasi purs), soit des carraghénanes semi-raffinés (contenant 15 % de cellulose). Les procédés sont adaptés en fonction des espèces de macroalgues utilisées, mais suivent globalement le schéma proposé (figure 4).

Ainsi, les carraghénanes raffinés sont extraits des macroalgues rouges par procédé alcalin ou procédé neutre, puis isolés par précipitation alcoolique ou pressage du gel (précipitation au chlorure de potassium). Le procédé par précipitation alcoolique permet d'extraire toutes les catégories de carraghénanes (kappa, iota et lambda), mais est plus coûteux que celui utilisant le pressage du gel. À l'inverse, le pressage du gel permet de récupérer uniquement les carraghénanes kappa. De leur côté, les carraghénanes semi-raffinés sont lavés et traités

Tableau II - Diversité de structure des carraghénanes.

Type de carraghénanes	Kappa (κ)	Iota (ι)	Lambda (λ)
Anhydrogalactose	Oui	Oui	Non
Nombre de sulfates	1 par dimère	2 par dimère	3 par dimère
Propriétés	Gels fermes et cassants, synérèse	Gels élastiques, thixotropes	Épaississants, non gélifiants

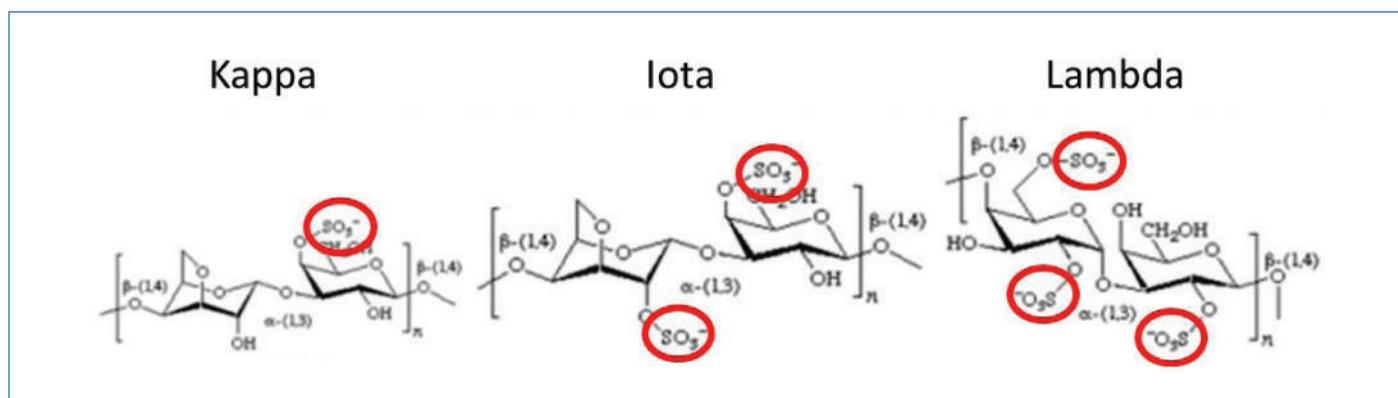


Figure 3 - Formule chimique des différents carraghénanes et leur degré de sulfatation.



Figure 4 - Schéma des procédés d'extraction des carraghénanes raffinés et semi-raffinés.

Tableau III - Différents exemples d'application des différentes formes de carraghénanes.

Composé	Effet	Application
κ -carraghénane	Gélifiant	Lait chocolaté Glaces et crèmes dessert Conserve de viande Nourriture pour animaux Gels désodorisants d'atmosphère Immobilisation d'enzymes Cultures <i>in vitro</i>
ι -carraghénane	Gélifiant	Desserts Sauces Glaces et crèmes glacées Cosmétiques
λ -carraghénane	Épaississant	Desserts Sauces Dentifrice Cosmétique

dans un bain alcalin. Ce procédé a un intérêt économique évident par rapport à la production des carraghénanes raffinés avec, toutefois, l'impact de la présence de cellulose (couleur, fraction insoluble, impossibilité à produire des gels transparents). Les carraghénanes semi-raffinés sont globalement plus utilisés dans le secteur du *petfood*. Lorsqu'ils sont de qualité alimentaire, ils sont utilisés dans les produits agroalimentaires : viandes (jambon), produits laitiers (fromage, lait chocolaté), etc. C'est également dans ces domaines que sont utilisés les carraghénanes raffinés par pressage de gel. Les carraghénanes raffinés par précipitation alcoolique sont, quant à eux, utilisés dans des produits à plus forte valeur ajoutée : dentifrice, produits pharmaceutiques ou compléments alimentaires (gélules, par exemple).

Le type de carraghénanes utilisés est ensuite déterminé par l'effet recherché dans le produit final. Nous avons réuni des exemples pour les trois types de carraghénanes (κ , ι et λ , *tableau III*). Beaucoup de produits commerciaux sont en fait des produits formulés (mélange d'espèces notamment) afin d'ajuster finement les performances techniques.

L'agar

L'agar (ou agar-agar) est un mot d'origine indonésienne-malaise signifiant « gelée ». Il s'agit d'un des gélifiants naturels les plus puissants, son action étant perceptible à partir de 0,1 %. Il a été découvert au Japon en 1658 par Minora Tarazaemon. Fanny et Walther Hesse ont ensuite démontré en 1881 son utilité en microbiologie en tant que milieu de culture. Sa structure peut être assez complexe et variable selon les espèces : elle est basée sur un disaccharide de base (agarobiose, *figure 5*) constitué de 2 résidus $-(1-3)\text{-}\beta\text{-D-galactose-(1-4)-}\alpha\text{-L-galactose-(1-3)-}$, la plupart des résidus $\alpha\text{-}(1-4)$ comportant un pont 3,6 anhydro. Différentes ramifications et substitutions (méthyl-, esters pyruviques) sont aussi possibles. Les carraghénanes se distinguent des agars par l'unité anhydro $\alpha\text{-D-galactose sulfatée}$ liée en 1,4 présente sous forme D, alors qu'elle est sous forme L dans l'agar.

Le procédé d'extraction de l'agar dépend de l'espèce de macroalgues utilisée. Celui obtenu à partir de *Gelidium* nécessitera un traitement acide, alors que celui issu de *Gracilaria* sera traité en solution alcaline (*figure 6*). Le traitement basique

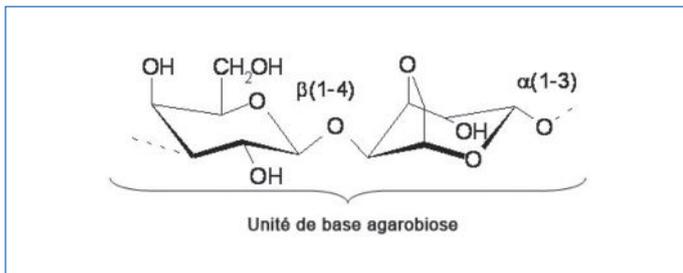


Figure 5 - Structure de l'agarobiose.

favorise la désulfatation et la formation de ponts anhydro, favorisant la gélification. Les gels d'agar obtenus sont des gels forts, thermoréversibles et cassants. Ces gels sont aujourd'hui largement utilisés en alimentaire (desserts, bonbons...) comme en biologie. Les formes les plus pures, extraites de *Gelidium sp.* (sauvage), sont utilisées pour l'agar pharmaceutique, alors que l'agar alimentaire est essentiellement produit à partir de gracilaires, qui sont souvent cultivées.

Un potentiel encore sous-exploité, des verrous à lever

Au-delà de ces grandes classes de polysaccharides commerciaux, de nombreux autres polysaccharides algaux de structures et fonctionnalités très variées sont présents dans les macroalgues. Comme nous venons de le montrer avec les alginates, carraghénanes et agar, certains d'entre eux sont déjà explorés, à la fois pour les activités fonctionnelles (rhéologie, gels, biomatériaux à usage médical [2]) et pour leurs propriétés biologiques exploitées en cosmétique, pharmacie, santé végétale, ou dans le domaine de la nutrition-santé humaine et animale. Néanmoins, beaucoup restent à découvrir et ils offrent encore un large champ d'exploration et de développements (tableau IV). Les fucoïdanes des macroalgues brunes et les ulvanes des macroalgues vertes, notamment, sont étudiés pour des applications prometteuses en pharmacie, nutrition-santé et cosmétique. Cependant, la variabilité de leur structure est plus importante que pour les alginates et carraghénanes, et l'obtention d'une molécule pure et sa reproductibilité restent des défis à relever. Certains produits sont

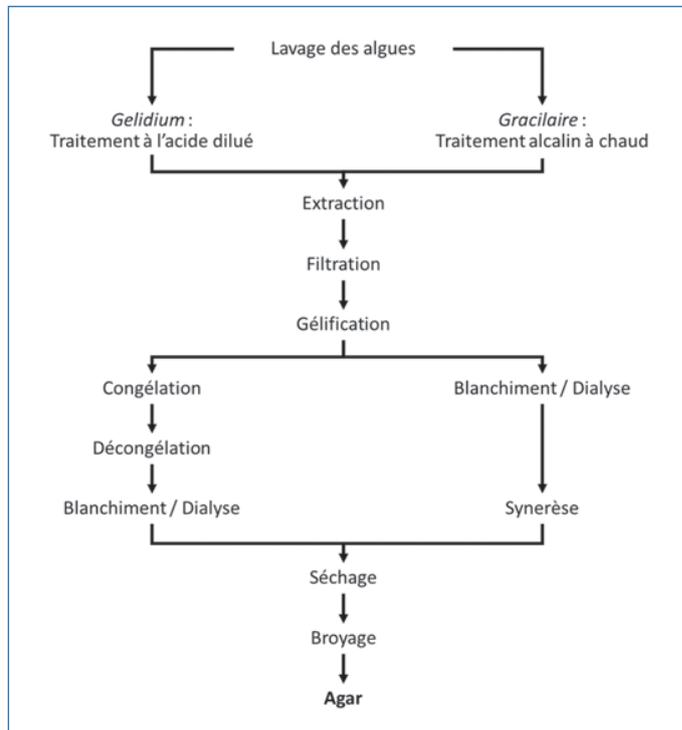


Figure 6 - Extraction de l'agar à partir des macroalgues *Gelidium* et *Gracilaria*.

cependant déjà exploités sur des marchés de spécialité, en cosmétique ou dans les compléments alimentaires par exemple (pour leurs activités biologiques plutôt que texturantes).

Le sourcing et la qualité des phycocolloïdes ont toujours été une problématique, y compris pour ceux qui sont exploités depuis plusieurs décennies. Le profil en polysaccharides des macroalgues varie en fonction du cycle de développement de la macroalgue et de son environnement. Les industriels se retrouvent à gérer une matière première variable selon la saison, l'origine géographique des macroalgues et différents facteurs environnementaux. Cette variabilité est également à l'origine de la difficulté à exploiter d'autres polysaccharides comme les fucoïdanes et les ulvanes cités précédemment.

Tableau IV - Diversité des phycocolloïdes et leurs utilisations.

	Macroalgues rouges	Macroalgues brunes	Macroalgues vertes
Phycocolloïdes	Carraghénanes et carraghénoïdes Agar et agaroides Porphyranes Xylanes Mannanes Cellulose Hémicellulose Amidon	Alginates Fucanes, fucoïdanes Cellulose Hémicellulose Laminarane	Rhammanes Arabinogalactanes Ulvanes Cellulose Hémicellulose Amidon
Phycocolloïdes exploités et valorisés	Agar Carraghénane	Alginate	
Domaine d'application	Agroalimentaire, cosmétique, pharmacie	Agroalimentaire, cosmétique, pharmacie	Peu d'exploitations industrielles connues. Quelques actifs cosmétiques.

Un gros travail commence également à être entrepris autour de la révision des procédés, avec pour objectifs, d'une part de valoriser les co-produits des différentes filières existantes et, d'autre part, d'optimiser les procédés afin de pouvoir valoriser d'autres molécules d'intérêt contenues dans les macroalgues en dehors des polysaccharides exploités. Ces objectifs sont regroupés sous le concept de bioraffinerie. Les procédés actuels d'extraction des alginates, carraghénanes et agar peuvent en effet dégrader certaines molécules (procédés acides/alcalins) ou conduire à des co-produits difficilement exploitables (mélange avec des adjuvants de filtration par exemple). Ils compliquent ainsi l'exploitation d'autres molécules. L'objectif de la bioraffinerie est de repenser les filières afin de continuer à exploiter les phycocolloïdes, tout en valorisant d'autres molécules d'intérêt : soit en les extrayant en amont du procédé, soit en modifiant le procédé et/ou la gestion des co-produits.

Les matériaux algosourcés : un marché en pleine effervescence

Depuis quelques années, un intérêt croissant est porté aux macroalgues pour la production de biomatériaux : « bioplastiques », packaging, textile, etc. Dans ce domaine, les macroalgues sont en effet vues comme une alternative aux plastiques d'origine fossile, mais aussi aux matières premières agricoles. Le site internet Phyconomy⁽¹⁾ recense par exemple près de cinquante entreprises actives dans le domaine des bioplastiques/biomatériaux et une dizaine d'entreprises actives dans le domaine du textile. La moitié de ces entreprises sont basées en Europe, mais les deux tiers d'entre elles ont été créées depuis 2019. Six entreprises ont à elles seules levé près de 80 millions d'euros ces dernières années (Notpla, Eranova, OCEANIUM, one•five, Biotic et Kelpi). Si certains produits sont déjà établis, beaucoup sont souvent en phase de R & D ou d'industrialisation/développement de marché. Comme dans le domaine des matériaux biosourcés, de nombreuses approches existent, pour des produits partiellement ou totalement algosourcés, qu'ils soient biodégradables, compostables,

recyclables ou réutilisables. Les principales approches actuellement observées dans ce secteur sont présentées ci-après (figure 7).

Les « blends »

Une première approche, largement exploitée pour accroître la part de produits biosourcés dans des matériaux, est l'incorporation de poudres de macroalgues (brutes ou prétraitées afin d'en améliorer les propriétés) qui joue alors essentiellement un rôle de charge ou de renfort. Des co-produits de l'industrie des macroalgues (drèches d'extraction, co-produits celluloseux de l'extraction de l'agar ou des carraghénanes...) peuvent aussi être utilisés ainsi, même si les gisements de co-produits exploitables sont parfois limités.

Une macroalgue ne présente pas de propriétés thermoplastiques ou de point de fusion, mais peut être compatibilisée avec différentes matrices (matériaux thermoplastiques ou thermoformables, polymères variés). On retrouve ainsi différentes résines (souvent pétrosourcées, biodégradables ou non) incorporant des taux de macroalgues qui peuvent être relativement élevés (de 10 à 30 %, parfois plus), mais une incorporation excessive tend à dégrader les propriétés des matériaux plastiques. En France, la société bretonne Algopack a ainsi été l'une des pionnières du secteur. Initialement focalisée sur les macroalgues bretonnes, elle a plus récemment investi pour valoriser les sargasses, qui s'échouent massivement dans les Caraïbes. Un autre pilote industriel a été récemment mis en service par la société Eranova, à Port-Saint-Louis-du-Rhône, qui utilise des algues vertes – les ulves – pour la production de ses matériaux.

Une part de macroalgues ou de co-produits peut aussi être incorporée à d'autres matériaux, comme les papiers (plutôt papiers haut de gamme/artistiques comme les papiers AlgaCarta de la société Favini qui incorporent des macroalgues vertes) ou des cartons.

Des matériaux incorporant des teneurs en macroalgues encore plus importantes peuvent aussi être produits, mais il s'agit alors souvent plutôt de pièces moulées ou thermoformées. Un intérêt particulier est aujourd'hui porté à la vaisselle

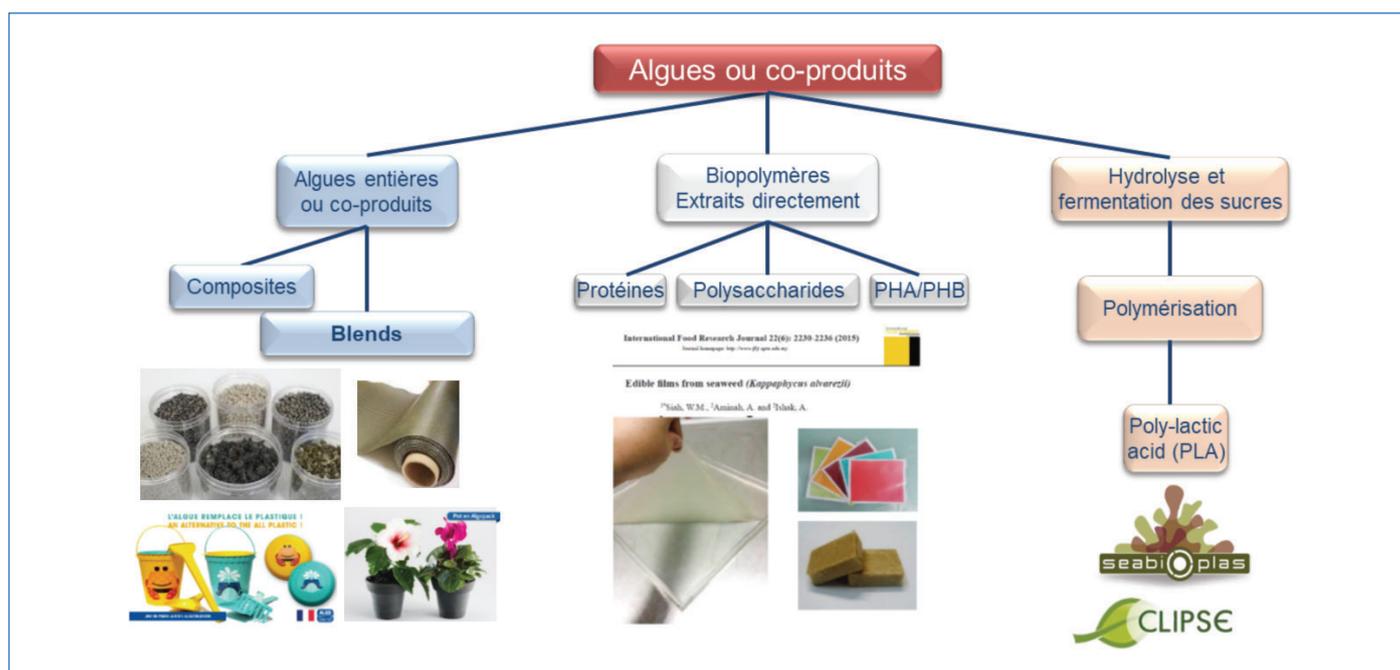


Figure 7 - Différentes approches de valorisation des macroalgues dans le domaine des matériaux.

jetable ou aux emballages de vente à emporter. L'entreprise coréenne Marine Innovation propose ainsi des emballages à base de fibres de bois et de co-produits cellulosiques de l'industrie des hydrocolloïdes.

Cette approche existe aussi dans le domaine du textile, avec par exemple des fibres de cellulose enrichies en poudre de macroalgues (le Seacell, développé par l'allemand SmartFiber AG) et produites depuis une vingtaine d'années par un procédé modifié de fabrication de Lyocell. Outre la part algosourcée de ces fibres, des revendications sur l'interaction entre la part de macroalgues et le métabolisme de la peau sont aussi portées par les fabricants et utilisateurs de ces fibres. Néanmoins, les taux d'incorporation envisageables avec ce type de technologie restent limités.

Enfin, on observe une part croissante de développement incorporant des macroalgues à des matériaux de construction (briques en terre crue, matériaux d'isolation...) apportant une part algosourcée, mais aussi des propriétés mécaniques ou directement liées à la composition de la macroalgue (e.g. une forte teneur minérale, rendant le matériau peu inflammable). Ces développements restent parfois assez artisanaux, comme

les briques Sargablock développées au Mexique en réponse aux échouements de sargasses, mais les recherches se poursuivent pour valoriser les propriétés des macroalgues dans ces matériaux de construction (encadré 1).

Utilisation de biopolymères algaux

Différents biopolymères algaux (protéines, polysaccharides pariétaux ou de réserve...) peuvent aussi être exploités pour la production de matériaux. C'est cependant essentiellement les polysaccharides qui sont utilisés aujourd'hui. Outre la cellulose et l'amidon, dont les équivalents terrestres sont déjà largement exploités, beaucoup d'industriels se concentrent aujourd'hui sur la valorisation des phycolloïdes commerciaux (alginates, carraghénanes, agar). Ceux-ci présentent en effet l'avantage d'être déjà disponibles commercialement et de reposer sur des espèces de macroalgues dont la récolte et la culture sont établies. Ils présentent par ailleurs un avantage réglementaire lorsqu'ils sont utilisés purs puisqu'ils sont classés comme additifs alimentaires (*quantum satis*) ce qui en facilite l'utilisation, voire peut permettre la production d'emballages comestibles. Enfin, ils sont facilement biodégradables.

Encadré 1

Valoriser les sargasses

Les échouements de sargasses (*Sargassum fluitans* et *Sargassum natans*) se multiplient depuis plusieurs années sur les côtes des Caraïbes, du Golfe du Mexique ou de l'Afrique de l'Ouest. Ces échouements massifs sont à l'origine de nuisances économiques et environnementales importantes. Mais ils représentent aussi un gisement abondant de biomasse potentiellement valorisable. Leur usage permettrait de créer de nouveaux produits et marchés ou, *a minima*, de contribuer au financement du ramassage.



Des sargasses s'échouent sur la côte martiniquaise. © DR

Ceci semble d'autant plus faisable que d'autres espèces de sargasses sont exploitées à travers le monde. C'est particulièrement le cas en Asie dans les domaines de l'alimentaire, de l'agriculture ou de l'extraction de composés d'intérêt. Et d'autres applications, comme dans le domaine de l'énergie par exemple, sont aussi à l'étude. Mais ces développements doivent se faire dans le respect des cadres réglementaires et normatifs associés à ces différents domaines d'application. La présence de certains contaminants, notamment l'arsenic, est susceptible d'en restreindre les usages, par exemple en alimentation ou dans l'agriculture. À la demande de l'ADEME Martinique, nous nous sommes donc penchés sur ces aspects et leurs conséquences pour la valorisation industrielle des sargasses. Ces travaux, réalisés avec l'unité mixte de recherche BOREA, sont résumés dans une synthèse ADEME^(*). Dans ce contexte, la valorisation dans des matériaux (emballage, construction, etc.) peut sembler une piste intéressante pour valoriser une biomasse relativement bon marché, et stocker au moins temporairement le carbone associé. Il reste cependant important de bien comprendre le devenir de ces contaminants, et plus particulièrement de l'arsenic, lors des procédés de production des matériaux et de leur fin de vie.

^(*)<https://bibliothec.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/4081-sargasses-contamination-et-consequences-pour-la-valorisation.html>

Par ailleurs, afin de pallier un coût qui reste souvent non négligeable (de 8 à 20 € le kg pour des hydrocolloïdes purifiés), l'utilisation de macroalgues entières, de co-produits ou de colloïdes semi-raffinés est aussi largement investiguée. C'est probablement dans ce domaine que l'on observe aujourd'hui la plus grande activité, avec la multiplication de startup en Europe, aux États-Unis ou en Asie et Océanie (NotPla, B'Zeos, Biopac/Evoware, Loliware, etc.). Les propriétés texturantes et le comportement des colloïdes algaux évoqués précédemment sont à la base de la plupart des procédés mis en œuvre. La production des pièces repose le plus souvent sur la production intermédiaire de gels, dont les traitements ultérieurs dépendent du polysaccharide utilisé.

Production de films d'hydrocolloïdes

Des films peuvent être produits par casting de solutions d'agar ou de carraghénanes, appliquées en couche mince qui sont ensuite séchées (rarement en procédé continu/extrusion, notamment car la prise du gel n'est pas instantanée et peut dépendre de la température). L'utilisation de films de colloïdes « purs » pour des applications dans l'emballage est limitée, car ils sont peu flexibles et cassants. En outre, la présence des groupements hydroxyle et sulfate leur confère une grande hydrophilie et, par conséquent, des propriétés barrières à la vapeur d'eau réduites. Plusieurs stratégies [3] ont été examinées afin de pallier ces faiblesses, comme l'ajout d'autres polymères naturels. L'addition de plastifiants est généralement requise (en général des polyols : glycérol, sorbitol, PEG, etc.) pouvant néanmoins réduire la résistance à l'eau du matériau. Des produits commerciaux sont aujourd'hui disponibles, mais plutôt pour des applications de niche (emballages comestibles, notamment). Outre la question des propriétés barrières de ces matériaux se pose aussi la question de leur mise en forme. En effet, ils ne sont pas toujours thermoscellables, ce qui peut compliquer leur utilisation. L'ajout d'amidon et de protéines peut améliorer ce point, comme l'illustrent par exemple les brevets de la société Evoware (n° de publication WO2021019525) qui commercialise aujourd'hui des emballages biodégradables, compostables et hydrosolubles.

Au-delà des films « plats » qui peuvent être produits par casting (coulage/séchage), cette approche est aussi exploitable pour la production de pièces moulées ou extrudées, à condition de pouvoir sécher directement le gel, avec des contraintes industrielles en termes d'outillage et de cadence de production. Cette approche a notamment été exploitée pour la production de bouteilles (prototypes) ou de pailles comestibles (sociétés Loliware/B'Zeos). Similairement, des films d'alginate peuvent être obtenus par cette technique de casting [5]. L'utilisation de chlorure de calcium pour la réticulation du gel en améliore notamment les propriétés mécaniques, mais réduit leur élasticité. Des nanocristaux de cellulose, potentiellement obtenus à partir de co-produits d'extraction des carraghénanes/agar, peuvent aussi être utilisés pour renforcer ces films [6,7]. L'extrusion de films d'alginate, réticulés dans une solution de chlorure de calcium, est par exemple exploitée aujourd'hui pour la production d'emballages comestibles (bulles d'eau, films...) utilisés dans l'événementiel par la société Notpla, dans une variation à plus grande échelle du processus de sphérification développé dès 1942 par William J. S. Peschardt pour la production de cerises artificielles [8]. L'utilisation de ces films peut aussi fournir une alternative algosourcée et biodégradable aux revêtements des barquettes en carton utilisées pour la vente à emporter.

Production de fibres (d'alginate)

L'extrusion en filière de solutions d'alginate de sodium, dans un bain de chlorure de calcium coagulant a aussi été utilisée de longue date pour la production de fibres. Celles-ci ont longtemps été utilisées principalement dans l'industrie pharmaceutique, et plus particulièrement pour la production de pansements et de mèches (non-tissés) ; la société française Laboratoires Brothier en a fait une spécialité. Le principe repose sur la capacité des alginate à gélifier à pH physiologique, par échange ionique entre le calcium de l'alginate et le sodium présent dans l'exsudat des plaies et le sang. Leurs performances de gonflement et d'absorption de l'eau dépendent de la composition de l'alginate en blocs G et M, mais aussi des teneurs des fibres d'alginate en sodium et en calcium, qui peuvent être modulées par les conditions de production [9]. Cela permet notamment de maintenir des environnements humides (cicatrisations des plaies) ou, au contraire, de les drainer (brûlures). Ces techniques d'extrusion d'alginate, permettent également d'obtenir des fibres textiles qui suscitent actuellement un regain d'intérêt (stylistes, industriels). Des productions industrielles existent notamment en Chine (SFM, Dezhou Hengfeng), mais des start-ups se sont aussi positionnées récemment sur ce secteur (Keel Labs).

De nouveaux biomatériaux et bioproduits algosourcés par la chimie et les biotechnologies

Une dernière approche pour la production de matériaux est la synthèse totale à partir de matières premières algales. Si les polysaccharides des macroalgues sont souvent complexes et difficilement exploitables par les technologies actuellement accessibles (enzymes spécifiques peu ou pas disponibles commercialement, organismes couramment utilisés peu adaptés à la fermentation de sucres « originaux », etc.), certaines macroalgues sont tout de même riches en polysaccharides/polyols valorisables.

La **cellulose** et l'**amidon** sont présents dans de nombreuses macroalgues, notamment les macroalgues vertes qui sont génétiquement plus proches des plantes terrestres. Ces molécules, identiques à leurs homologues terrestres, peuvent s'intégrer aux procédés de fermentation développés pour des biomasses agricoles ou forestières. Il est donc envisageable de convertir ces polysaccharides, notamment pour la production de glucose, ensuite utilisable dans des procédés fermentaires. Cette alternative à des ressources agricoles (maïs, canne à sucre) a été explorée dans le cadre de plusieurs projets de recherche. On peut par exemple citer le projet européen SeaBioPlas consacré à la production de PLA (acide polylactique) à partir d'amidon d'ulves. Il est même parfois possible de moduler le taux de ces polysaccharides dans les macroalgues en fonction des conditions de culture (e.g. enrichissement en amidon dans les ulves par des étapes de stress en bassin). D'autres molécules sont aussi utilisables pour la production de glucose, comme la **laminarine** (un bêta-glucane présent chez certaines macroalgues brunes), ou peuvent être fermentées par les levures et micro-organismes communément utilisés, comme par exemple le mannitol.

Au-delà de la fermentation et du domaine des matériaux, de nombreuses autres applications sont envisageables. Des travaux ont par exemple été menés pour la production de tensioactifs originaux utilisant des composés algosourcés (poly/oligosaccharides, sucres simples et acides uroniques originaux) et les propriétés de polysaccharides fonctionnalisés peuvent être multiples. Cependant, si ces technologies ont fait

la preuve de leur faisabilité technique, il reste aujourd'hui des verrous à lever pour pouvoir envisager une valorisation industrielle à grande échelle : gestion des fortes teneurs en eau des macroalgues et/ou des coûts économiques et énergétiques du séchage, impacts sur les procédés des minéraux contenus dans la macroalgue, valorisation biotechnologique souvent limitée à certains monosaccharides, disponibilité limitée de la ressource par rapport aux matières premières agricoles ou leurs résidus cellulosiques...

Le bilan environnemental de ces produits algosourcés

Il est difficile de généraliser cette question à l'ensemble des produits algosourcés. Comme nous avons pu le voir, les approches sont multiples, avec des degrés de transformation et des usages très variables.

La question de la ressource en macroalgue doit être posée (récolte durable dans le milieu naturel, culture, valorisation d'échouages...) incluant des impacts environnementaux très variables.

Par ailleurs, comme souvent pour des technologies et usages émergents, le transfert d'échelle et la maturité des technologies doivent être examinés spécifiquement.

L'analyse de cycle de vie sur des procédés en développement ou en phase d'industrialisation est souvent complexe et difficile à comparer avec celle des procédés établis et optimisés de longue date.

Les inventaires sont parfois manquants aussi sur la phase de production/récolte des macroalgues.

Il s'avère ainsi plus simple de mettre en œuvre des approches type « blend », avec substitution directe de produit pétrosourcé, sans modifications significatives de process.

Enfin, la gestion de la fin de vie de ces nouveaux matériaux et produits (possibilité d'intégration aux filières de recyclage, compostage, etc.) est encore peu examinée.

Des composés nutritionnels et bioactifs utilisés dans de nombreux domaines

Dans leur environnement marin, les macroalgues sont constamment exposées à des stress biotiques et abiotiques (salinité, température, lumière/UV, carence en nutriments, concentration en oxygène, agents pathogènes, brouteurs...)

qui vont influencer leur physiologie et conduire à la synthèse de composés et métabolites uniques pour leur permettre de survivre dans leur milieu naturel. Les polysaccharides font parties des molécules les plus exploitées actuellement, notamment en agro-alimentaire qui est un marché établi depuis plusieurs dizaines d'années. Le domaine de la cosmétique n'est pas en reste avec un marché concurrentiel en recherche constante d'actifs à la fois innovants, efficaces, biosourcés et sûrs pour le consommateur. Cependant, la diversité des molécules ne s'arrête pas aux uniques polysaccharides : les protéines et peptides, les polyphénols et métabolites secondaires contenus dans les macroalgues sont une source importante de molécules d'intérêt. Au-delà de la nutrition et la cosmétique, le domaine de l'agriculture utilise ces molécules comme biostimulants ou réducteur de méthane entérique des ruminants.

Des molécules algales aux nombreuses vertus pour l'homme

Les polysaccharides

La bioactivité des polysaccharides est liée à leur structure physique et chimique qui est unique chez les macroalgues telle qu'elle est présentée dans l'article sur les hydrocolloïdes. Les taux de sulfatation souvent importants, que l'on associe habituellement plutôt au règne animal, contribuent notamment à ces effets en stimulant de nombreux mécanismes biologiques. Les agars, les alginates, les carraghénanes, les fucoïdanes, les ulvanes, les laminaranes et autres polysaccharides montrent des activités antioxydantes, antiangiogéniques, anticoagulantes, antitumorales, antivirales, antiallergiques, antiadhésives et anti-inflammatoires dans de nombreuses études scientifiques notamment à l'échelle *in vitro* (tableau V).

L'application de ces polysaccharides est donc variée, au niveau physique comme biologique. Ainsi les propriétés gélifiantes des alginates, extraits des macroalgues brunes, peuvent être utilisées dans les pansements gastriques dans le cas de reflux gastro-œsophagien. Associés à du bicarbonate de sodium et du carbonate de sodium, ils forment un gel visqueux qui surnage dans l'estomac et protège l'œsophage des remontées gastriques. Le Gaviscon est ainsi un antiacide basé sur ce principe.

Tableau V - Propriétés biologiques des polysaccharides algaux (adapté de Hentati *et al.*, 2020).

Type de polysaccharides	Propriétés biologiques
Macroalgues brunes	
Fucanes sulfatés	Modulateur de l'immunité, anti-inflammatoire, anti-coagulant, antithrombotique, immunostimulant, antiviral, antitumoral, antiproliférative, antiadhésive, antioxydant, anticoagulant.
Galactofucanes sulfatés	Antiviral, antithrombotique.
Fucoïdanes sulfatés	Antitumoral, antiviral.
Macroalgues rouges	
Carraghénanes sulfatés	Antiviral, anticancéreux.
λ-carraghénanes sulfatés	Antiviral, anticoagulant, antithrombotique.
κ-carraghénanes sulfatés	Anticoagulant, antithrombotique.
Macroalgues vertes	
Arabinogalactanes sulfatés	Anticoagulant, antithrombotique, antiviral.
Ulvanes sulfatés	Antioxydant, antiproliférative, hypocholestérolémique.
Rhamnanes sulfatés	Antiviral, anticoagulant.

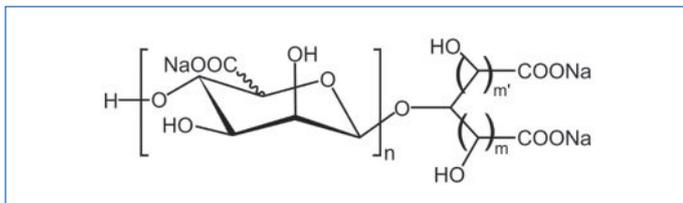


Figure 8 - Structure chimique de l'oligomannate de sodium.

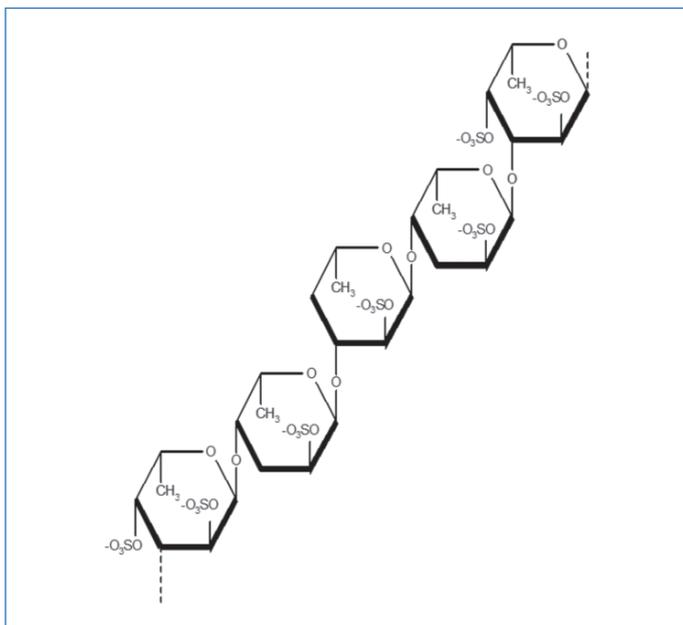


Figure 9 - Structure chimique du fucoïdane d'*Ascophyllum nodosum*, une macroalgue brune.

Toujours dans le domaine des médicaments, des oligosaccharides extraits des macroalgues ont des effets avérés dans le traitement de certaines maladies. Par exemple, l'oligo-mannurate ou oligomannate de sodium (GV-971, figure 8) issu d'alginate extraits de la macroalgue marine *Ecklonia Kurome* a été autorisé en Chine dans le traitement de formes légères à modérées de la maladie d'Alzheimer (après validation en essai clinique sur l'homme). Une étude de phase III internationale a malheureusement été suspendue récemment, car trop perturbée par la crise sanitaire liée au COVID.

Par ailleurs, les fucoïdanes (figure 9), autres polysaccharides extraits des macroalgues brunes, sont également d'intérêt pour la santé ou le bien-être humain. Les produits disponibles sur le marché de l'Union européenne, (contenant le polysaccharide purifié), sont plus restreints puisque cet ingrédient est considéré comme Novel Food (encadré 2). Ainsi, actuellement, seuls les extraits de fucoïdane des macroalgues *Fucus vesiculosus* et *Undaria pinnatifida* de la société australienne Marinova ont été autorisés dans les aliments et compléments alimentaires sur le marché européen. Cette société a examiné particulièrement leurs activités antivirales, anti-inflammatoires, immunomodulatrices. En outre, les propriétés de régulation de la glycémie et du stockage des lipides des fucoïdanes, en association avec les polyphénols, sont notamment utilisées en compléments alimentaires pour la gestion du poids (Nutralga produit par la société française Solabia group, vendu à l'export par exemple).

Parmi les composés d'intérêt cosmétique chez les macroalgues brunes, on trouve les FCSP (pour *fucose containing sulfated polysaccharides*), polysaccharides pariétaux qui incluent selon les espèces des polymères très riches en fucose et

Encadré 2

Statut des algues alimentaires en France

L'alimentarité d'une algue en Europe est liée au règlement (UE) 2015/2283 dit « Novel Food » (qui a abrogé le règlement (CE) n° 258/97), qui s'applique aux aliments et ingrédients qui n'ont pas été consommés de façon significative avant le 15 mai 1997.

En France, les historiques de consommation significative avant l'entrée en vigueur du règlement Novel Food (avant le 15 mai 1997), ainsi que plusieurs évaluations par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France, ont permis d'établir une liste d'algues utilisables pour la consommation humaine (CSHPF 01/1990, 02/1992, 10/1997 ; DGCCRF 04/2009). À ce jour, en France, 25 algues dont 3 microalgues ont donc été listées comme pouvant être utilisées comme aliments. Parmi les macroalgues, on dénombre 9 algues brunes, 11 algues rouges et 2 algues vertes.

Le catalogue Novel Food européen, actualisé récemment, liste quant à lui une trentaine d'espèces dont le statut non-Novel Food a été reconnu.

Pour les algues dont l'historique de consommation n'est pas disponible avant la date du 15 mai 1997, un dossier Novel Food doit être déposé auprès de l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA). Ce dossier doit contenir des données sur la composition, la nutrition, les propriétés toxicologiques et allergènes du nouvel aliment, ainsi que des informations sur les procédés de production respectifs, les utilisations proposées et les niveaux d'utilisation. Après analyse du dossier et demandes éventuelles de compléments d'information, le nouvel aliment peut être mis sur le marché dans les conditions décrites dans le dossier.

hautement sulfatés (fucanes), et des polysaccharides ramifiés plus complexes et plus hétérogènes (fucoïdanes) qui contiennent en proportions variables d'autres monosaccharides (galactose, xylose, mannose, glucose et acides uroniques [10]). Outre leur intérêt pour des applications santé, les FCSP peuvent contribuer à limiter l'apparition des signes de l'âge (via par exemple la modulation de l'activité des enzymes qui modifient et/ou dégradent la matrice extracellulaire), le photovieillessement (réduction des effets délétères des UV sur la physiologie des cellules de la peau), leurs propriétés anti-inflammatoires pouvant être mises à profit pour le développement d'actifs apaisants et anti-âge. En outre, plusieurs études ont montré que la synthèse de mélanine peut être régulée par les FCSP, ce qui en fait de bons candidats pour la mise au point d'actifs ciblant l'hyperpigmentation. Plusieurs actifs riches en fucoïdanes ou leurs oligomères, revendiquent des effets anti-âge, éclaircissant et/ou apaisant (par exemple Maritech, Reverse, Fucoreverse, Maritech, Bright, FucoWhite...).

Du côté des **alginate**s, leur utilisation en cosmétique concerne essentiellement leurs propriétés texturante (maîtrise de la viscosité des formulations, préparation de masques), filmogène (fonction barrière), hydratante et adoucissante. La dépolymérisation enzymatique contrôlée des alginate à l'aide d'une alginate lyase bactérienne permet d'obtenir des oligo-alginate de taille maîtrisée et bioactifs, utilisés par exemple comme actifs anti-âge ou contre l'acné (gamme d'ingrédients Phycosaccharide, Codif).

Les **galactanes** sulfatés des macroalgues rouges (agars et carraghénanes) sont également utilisés en cosmétique comme agents de texture. À l'instar d'autres polysaccharides algaux, leur dépolymérisation contrôlée peut conduire à la formation d'oligomères bioactifs (actif anti-âge Healthyskin, Lessonia, composé d'oligo-carraghénanes produits par hydrolyse enzymatique). Chez les macroalgues vertes,

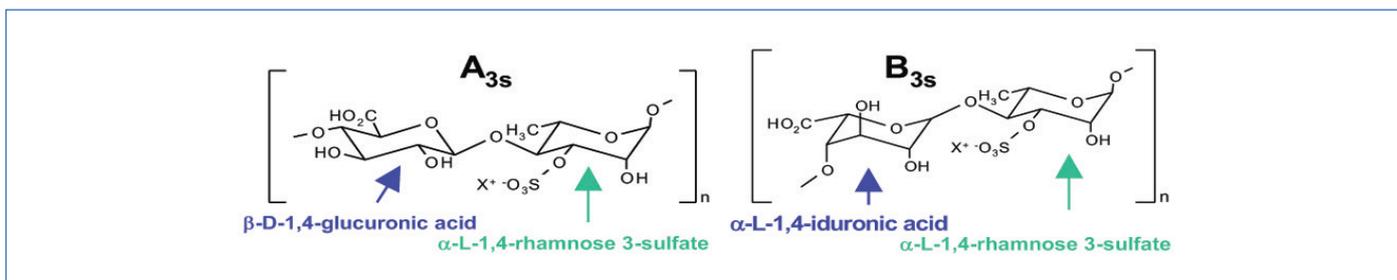


Figure 10 - Structure disaccharidique des ulvanes.

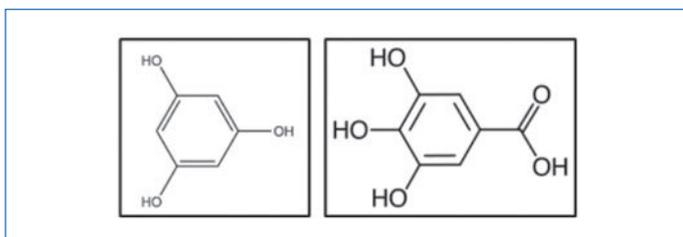


Figure 11 - Phloroglucinol (gauche) et acide gallique (droite).

les polysaccharides les plus étudiés sont les **ulvanes** (figure 10), des hétéropolymères sulfatés complexes, hydrosolubles, produits en particulier par les macroalgues du genre *Ulva*. Composés de rhamnose (16 à 45 %), de xylose (2 à 12 %), d'acides glucuronique et iduronique (6 à 20 %), de sulfates (16 à 23 %) et d'oses minoritaires (galactose, glucose, mannose...), ils sont organisés en motifs disaccharidiques répétés caractéristiques appelés ulvanobiuronates [11]. Doués de nombreuses propriétés biologiques, leur potentiel cosmétique est relativement peu documenté mais quelques entreprises comme Seprosys ou Greensea ont développé des actifs anti-âge objectifs revendiquant la présence du polysaccharide.

Les métabolites secondaires

Si on s'aventure du côté des métabolites secondaires, les macroalgues ont également un intérêt certain. Les polyphénols sont une famille très diversifiée de métabolites secondaires produits par les végétaux pour lutter contre les stress environnementaux, et très prisés par l'industrie cosmétique, notamment pour leur pouvoir antioxydant. Les macroalgues

brunes produisent des polyphénols qui leur sont spécifiques : les phlorotannins. Ce sont des dérivés oligomères et polymères du phloroglucinol (1,3,5-trihydroxybenzène) (figure 11) qui se distinguent des polyphénols rencontrés dans d'autres macroalgues dont les structures sont plus similaires à celles des végétaux terrestres (dérivés de l'acide gallique). Les phlorotannins solubles peuvent représenter jusqu'à 20 % du poids sec d'une macroalgue. Plus d'une centaine de structures de phlorotannins ont été identifiées à ce jour chez les macroalgues brunes, leur taille allant de 126 Da (phloroglucinol) à 650 kDa (figure 12). Les phlorotannins sont généralement classés en groupes selon leur structure et le type de liaison entre les unités phloroglucinol (fucols, eckols, phlorethols, isofuhalols, fuhalols et fucophlorethols). Les phlorotannins sont les polyphénols algaux parmi les plus étudiés. Ils présentent de nombreuses activités biologiques valorisables dans des applications cosmétiques pour lutter contre le vieillissement cutané, les stress oxydatifs ou encore l'hyperpigmentation (phloroglucinol, eckol et dieckol sont par exemple des inhibiteurs de la tyrosinase, enzyme impliquée dans la voie de synthèse de la mélanine). Ils ont par ailleurs des propriétés antimicrobiennes.

On peut citer les phlorotannins issus de l'espèce *Ecklonia cava*, seul extrait concentré disposant d'une autorisation Novel Food en Europe. Botamedi Inc, l'entreprise qui les commercialise, présente une centaine de produits à partir de phlorotannins d'*Ecklonia cava* : ingrédients, aliments fonctionnels, boissons, produits cosmétiques, produits d'hygiène personnelles. Le champ médical est également investigué avec des études cliniques sur l'homme en cours dans le traitement des complications diabétiques, la neurodégénération, l'oncologie et l'inflammation.

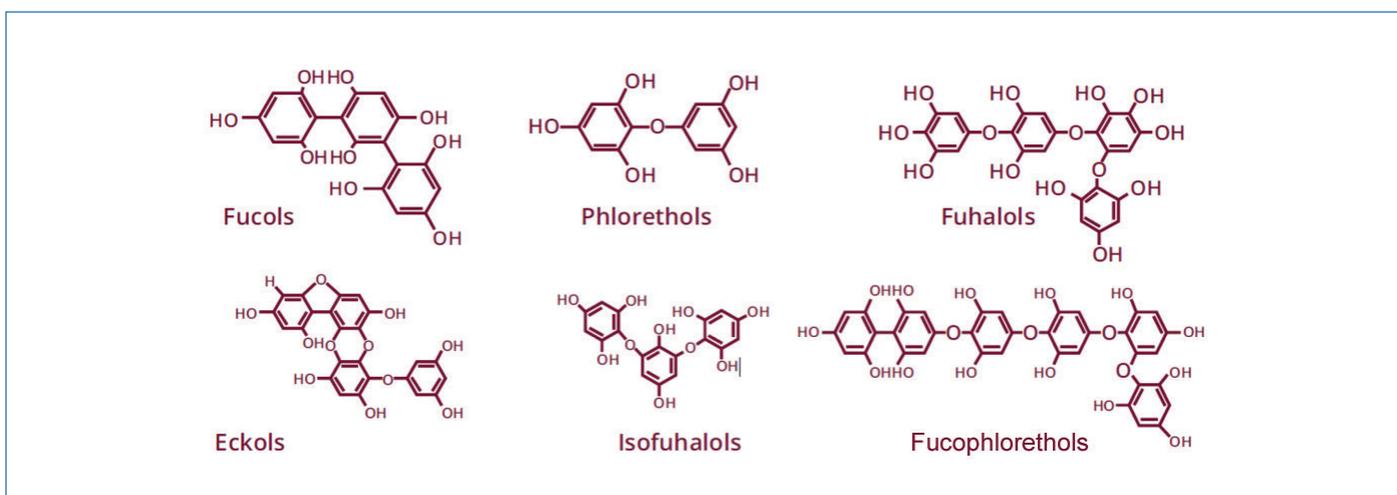


Figure 12 - Principaux groupes de phlorotannins.

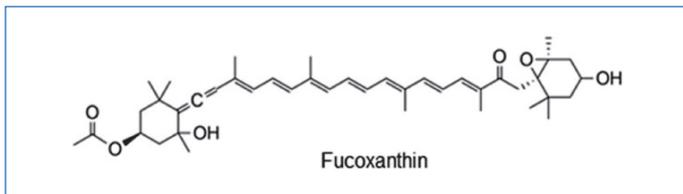


Figure 13 - Structure chimique de la fucoxanthine.

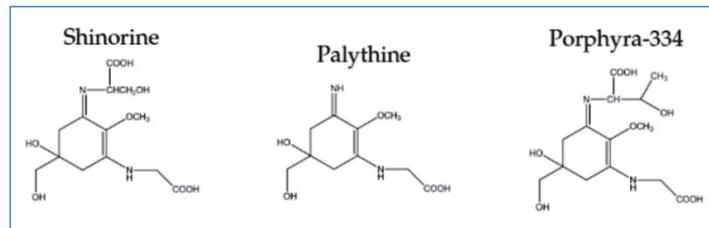


Figure 14 - Structures de quelques MMA.

Les macroalgues contiennent également une large gamme de **pigments** photosynthétiques. Chez les macroalgues rouges et les cyanobactéries, les phycobiliprotéines sont des pigments de couleur vive (rouge pour la phycoérythrine et bleu pour la phycocyanine) dont, par exemple, les activités antioxydantes permettent de réduire le stress oxydatif.

Chez les macroalgues brunes, la fucoxanthine (figure 13) est un xanthophylle brun-rouge caractéristique responsable de leur couleur. Ce pigment contient une liaison allénique inhabituelle supposée à l'origine de nombreuses propriétés biologiques (anti-cancéreux, anti-diabétique, anti-obésité, anti-inflammatoire, anti-angiogénique...) [12].

La fucoxanthine est principalement utilisée en compléments alimentaires (notamment en Asie et aux États-Unis) et en cosmétique pour ses propriétés antioxydantes dans les crèmes anti-âge. Ses applications en nutrition-santé humaine concernent souvent la prévention des maladies métaboliques (obésité, diabète). Le marché de la fucoxanthine s'est historiquement construit autour des macroalgues brunes, notamment comme co-produit de l'extraction d'alginate (0,5 % de la matière sèche pour l'espèce *Undaria pinnatifida*). Cependant, certaines microalgues, telles que les diatomées, *Odontella Aurita* et *Phaeodactylum triconutum*, sont de plus en plus exploitées pour leur haute teneur en ce pigment. En France la société Microphyt l'exploite pour des extraits ciblant la performance et la réduction du déclin cognitif (brevet FR3092968 B1) commercialisé sous la marque BrainPhyt, tandis que Solabia (via l'intégration du producteur de microalgues israélien Algatech) met en avant la réduction du syndrome métabolique et la santé hépatique.

Les protéines, peptides et dérivés

Les **acides aminés libres**, en plus de contribuer de façon importante au goût des macroalgues, sont également intéressants pour l'hydratation de la peau. Le NMF (pour *natural moisturizing factor*), ensemble de substances hygroscopiques assurant l'hydratation de la couche supérieure de l'épiderme, est composé en grande partie d'acides aminés libres. Pour les macroalgues rouges, on trouve également de la taurine, acide aminé soufré non essentiel valorisé dans quelques extraits cosmétiques algosourcés (EarlyBoost, Codif, Cytoplasma, Agrimer). Le dipeptide L-citrullyl-L-arginine est revendiqué dans un extrait commercial de *Chondrus crispus* (Arct'Alg, Exsymol) pour renforcer la fonction barrière de la peau.

Parmi les **dérivés d'acides aminés**, les **MAA** (pour *mycosporine-like amino acids*) sont des métabolites secondaires de faible poids moléculaire (généralement inférieur à 400 Da) produits notamment par les organismes vivant sous forte exposition aux rayonnements UV (cyanobactéries, algues, coraux...). Ils sont considérés comme les composés organiques naturels présentant la plus forte capacité d'absorption à 310-360 nm (UV-A et UV-B), dissipant l'énergie des UV sans formation d'espèces réactives de l'oxygène. Ampholytes, incolores, non chargés et solubles dans l'eau, les MAA partagent une même

structure chimique (cycle cyclohexénone ou cyclohexénimine avec substituant azoté), mais différent selon les substituants et/ou la présence d'acides aminés.

Pour les macroalgues, les teneurs les plus importantes ont été mesurées chez les macroalgues rouges, comme en particulier *Porphyra*, mais sont bien souvent inférieures à 1 % du poids sec des macroalgues. Une trentaine de structure de MAA ont été élucidées à ce jour, mais moins d'une dizaine ont été retrouvées chez les macroalgues rouges, dont le porphyra-334, la shinorine et la palythine (figure 14). Les MAA suscitent l'intérêt de l'industrie cosmétique pour le développement de produits de protection solaire. Des extraits de *Porphyra* revendiquant la présence de MAA sont actuellement commercialisés comme actifs cosmétiques ciblant le photovieillessement (Helioguard 365, Mibelle Biochemistry et Helinori, Gelyma). Dans le domaine de la nutrition, les protéines et peptides des macroalgues ont été jusqu'à présent peu investigués, notamment parce que la teneur en protéines dans les macroalgues est faible (entre 1 et 3 % de la matière humide chez les macroalgues). Cependant, ces dernières années, leur intérêt va grandissant avec des perspectives intéressantes du côté des bioactifs. Les effets les plus rapportés des peptides de macroalgues concernent l'inhibition d'enzymes impliquées dans l'augmentation de la pression artérielle (effet anti-hypertension). Cependant, des effets antibactérien, antioxydant, anti-inflammatoire et anticoagulant sont également rapportés. Le domaine de la nutrition-santé humaine reste encore largement à explorer pour ce type de molécule.

Les macroalgues en agriculture : entre usages historiques et nouvelles pistes de développement

Un marché des biostimulants en pleine expansion

Depuis l'Antiquité, les populations côtières ont exploité le goémon pour amender et améliorer la productivité de leurs cultures. Les macroalgues échouées étaient mises à sécher, voire compostées, pour assurer leur conservation, puis répandues sur les terres après les récoltes.

Après la Seconde Guerre mondiale, l'émergence des engrais chimiques a entraîné un fort déclin de cette pratique ancestrale, aujourd'hui quasiment disparue. Dans la même période, un jeune scientifique britannique va impulser une nouvelle forme d'utilisation des macroalgues en agriculture. Il met au point un procédé alcalin à chaud et sous pression pour liquéfier des macroalgues brunes en vue de les utiliser comme engrais. Le procédé est breveté (Milton RF, 1952) et le produit Maxicrop (toujours disponible) devient le premier extrait de macroalgue à être mis sur le marché de l'agriculture. D'autres technologies de production d'extraits de macroalgues à usage agricole ont ensuite vu le jour, notamment des procédés à froid et/ou sous pression visant à mieux préserver les molécules issues des macroalgues (cryobroyage, éclatement cellulaire par compression).

Le **marché des extraits algosourcés** s'est rapidement développé ces vingt dernières années, porté par la nécessité de réduire l'utilisation des intrants de synthèse et d'améliorer la durabilité des systèmes agricoles. Souvent commercialisés comme engrais organiques revendiquant des bénéfices divers et variés sur les cultures (fortifiant, stimulateur de croissance, anti-stress...), ils sont couramment appelés « biostimulants », bien que ce terme n'eût pas de définition officielle jusqu'à récemment. Le règlement UE 2019/1009 a depuis donné un cadre et une définition claire aux « biostimulants des plantes ». Il s'agit de substances (ou microorganismes) permettant d'améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments, la tolérance aux stress abiotiques (stress hydrique par exemple), les caractéristiques qualitatives ou la disponibilité des éléments nutritifs confinés dans le sol.

Le **marché mondial des biostimulants** est estimé selon les sources entre 3 et 3,5 Mds USD en 2022 et sa progression devrait se poursuivre dans les prochaines années avec des prévisions de croissance annuelle au-delà des 10 %. Les extraits de macroalgues représenteraient en valeur environ 30 % du secteur (North Sea Farm Foundation 2018, EBIC 2023). Pour autant, très peu d'espèces de macroalgues sont actuellement utilisées pour la fabrication de biostimulants. Il s'agit essentiellement de macroalgues brunes récoltées en Europe dans des populations sauvages (*Ascophyllum nodosum* ou *Laminaria sp.*) ou d'espèces comme *Ecklonia sp.*, *Sargassum sp.* ou *Durvillaea sp.* dans d'autres parties du monde. **En Europe, les principaux acteurs** sont Agrimer, Algaia, Arramara (Acadian Seaplant), Bioatlantis, Bio3G (groupe Éléphant Vert), Goëmar (UPL Corporation), Olmix, Rovensa, Timac Agro (groupe Roullier) et Valagro. Bien que les bénéfices apportés aux plantes par les extraits de macroalgues fassent l'objet d'un nombre croissant de publications scientifiques, **les composés bioactifs et les mécanismes d'action mis en jeu demeurent encore mal connus**. La diversité des effets biologiques sur plantes (vigueur, développement végétatif, photosynthèse, précocité de la germination ou de la floraison, tolérance aux stress abiotiques...) associée à la variabilité chimique des extraits (chimiodiversité spécifique, saisonnière et géographique, conditions de production des extraits) ne facilitent pas leur compréhension. Pendant longtemps, le mode d'action de ces extraits de macroalgues a été recherché au moyen de bioessais. De nombreux travaux scientifiques ont montré que l'application d'extraits de macroalgues sur plantes entraînait des effets analogues à un apport exogène de phytohormones (auxines, cytokinines, gibbérellines...) et concluait à une bioactivité des préparations à base de macroalgues résultant en partie de la présence de ces régulateurs de croissance. On considère aujourd'hui que les extraits de macroalgues présentent des teneurs en phytohormones trop faibles pour directement induire des réponses *in planta*, mais pourraient agir de façon indirecte en modulant la synthèse endogène des phytohormones [13].

Actuellement, les composés glucidiques algaux sont considérés comme une piste crédible pour expliquer (au moins en partie) les propriétés biostimulantes des extraits algaux. De façon générale, les glucides sont des éléments-clés dans la coordination du métabolisme de la plante avec le développement, la réponse aux stress abiotiques mais également biotiques. Des travaux ont montré que les dérivés oligomériques des alginates (jusqu'au dimère) obtenus par hydrolyse chimique ou enzymatique (alginate lyase), ou encore par rayonnement gamma, sont capables d'induire des réponses

physiologiques chez la plante (stimulation de la croissance, de la synthèse de phytohormones, de gènes du métabolisme azoté, de la tolérance au manque d'eau, à la salinité...). Les polysaccharides sulfatés issus des macroalgues tels que les carraghénanes, les fucoïdanes et les ulvanes (paroi des macroalgues du genre *Ulva* notamment) sont également actifs sur les processus physiologiques des plantes, leurs oligomères présentant des activités souvent plus importantes que le polysaccharide natif. Enfin, le **laminarane** ou **laminarine** (β -(1,3)-D-glucane, degré de polymérisation moyen d'environ 25 unités glucose) est un polysaccharide de réserve produit par les macroalgues brunes et capable de conférer aux plantes une tolérance accrue aux stress abiotiques [14-16]. Au-delà de son activité biostimulante, la laminarine est surtout connue pour être l'actif d'une gamme de produits de biocontrôle développée par la société Goëmar au début des années 2000 et dont le mode d'action repose sur l'activation du système de défense de la plante. À ce jour, la laminarine est le seul composé d'origine algale à être homologué en Europe pour une application phytopharmaceutique. Globalement, de nombreuses investigations sont encore nécessaires pour définir la contribution réelle des polysaccharides algaux et de leurs dérivés aux propriétés biostimulantes des extraits algaux et les très probables synergies avec les autres molécules potentiellement présentes (phytohormones, peptides, acides aminés, composés phénoliques, acides gras, stérols, vitamines, pigments, ou encore microéléments).

L'alimentation animale : les macroalgues comme réponse aux problématiques environnementales ?

Historiquement en Europe, les macroalgues ont été utilisées en alimentation animale de façon épisodique, notamment dans les régions côtières, pendant les périodes de famine où elles remplaçaient le fourrage pour les animaux de rente. Les macroalgues sont couramment utilisées en aquaculture, et plus spécifiquement dans l'élevage d'animaux herbivores comme les oursins ou les ormeaux dont elles constituent la base alimentaire. En revanche, elles sont encore assez peu utilisées dans le régime des animaux terrestres (ruminants, porc, volaille, etc.). En effet, des régimes trop riches en macroalgues apportent une teneur trop importante en minéraux, et potentiellement des facteurs anti-nutritionnels (polyphénols...), ainsi qu'une valeur énergétique trop faible, impactant négativement la croissance, la reproduction, la durée de vie et la production des animaux. Actuellement, un seul exemple d'animaux nourris majoritairement avec des macroalgues existe : il s'agit des moutons de l'île écossaise de North Ronaldsay qui vivent sur l'estran tout au long de l'année, et ces conditions de vie particulières en font une viande d'exception.

Si la santé des animaux peut être impactée par une consommation trop importante (maladies rénales), l'utilisation de quantités modérées de macroalgues dans les régimes peut apporter des bénéfices aux animaux. Les farines de macroalgues brunes ont été largement utilisées dès les années 70 pour apporter des minéraux sous forme chélatée, notamment en alimentation bovine. L'usage de macroalgues ou de leurs extraits pour stimuler l'immunité, ou lors de périodes de stress (liées à certaines phases de l'élevage ou à des infections) est aussi de plus en plus explorée (porcelets sevrés, aquaculture...). On peut citer dans ce domaine les activités de sociétés européennes comme Ocean Harvest Technologies ou Olmix en France.

Plus globalement, les macroalgues sont de plus en plus étudiées dans le domaine de la santé animale pour réduire l'usage des antibiotiques ou améliorer le bien-être des animaux. La découverte ces dernières années d'un composé halogéné permettant de réduire le méthane entérique, c'est-à-dire le méthane produit par les ruminants, contribue également au regain d'intérêt pour les macroalgues. Ce composé est un bromoforme qui agit dans le rumen, le premier estomac du ruminant, où il se lie à la vitamine B12 et inhibe ainsi les réactions dépendantes de transfert de méthylcobalamine et donc l'activité enzymatique des bactéries méthanogènes en réduisant la quantité de méthane érécté par l'animal.

La découverte de cette activité a été faite en premier chez les espèces *Asparagopsis taxiformis* et *armata*, dont les teneurs en bromoforme font partie des plus élevées chez les macroalgues. Ces deux espèces sont des espèces tropicales et subtropicales, qui présentent une assez large distribution dans le monde, mais dont les gisements sont souvent limités. Par ailleurs, leurs méthodes de culture, à terre comme en mer, restent mal maîtrisées. C'est pourquoi de nombreuses start-ups (Futurefeed et Sea Forest en Australie, Blue Ocean Barns à Hawaï, Volta Greentech en Suède, SeaExpert aux Açores, etc.) ont vu le jour pour développer une filière intégrée (culture et transformation) pour ces produits à destination de l'alimentation animale permettant de réduire le méthane entérique. En parallèle, d'autres start-ups de la chimie comme Rumin8 étudient le développement de voies de synthèse chimique.

En conclusion, quelques remarques doivent être formulées à propos de l'utilisation de ces macroalgues pour réduire le méthane entérique des ruminants. Tout d'abord, la culture de ces espèces de macroalgues est en cours de développement avec des défis importants sur la maîtrise du procédé pour

assurer la croissance des macroalgues et la production de bromoforme en quantité suffisante pour obtenir l'effet chez les animaux. La transformation et le stockage du produit est également une étape cruciale en raison de la volatilité du bromoforme, de sa toxicité et de ce potentiel important de dégradation de la couche d'ozone. La question du volume de macroalgues nécessaire pour pouvoir introduire ce type de produit dans l'alimentation des ruminants et la capacité d'y répondre par la culture de ces espèces reste posée.

Enjeux et perspectives pour l'industrie des macroalgues

Les enjeux pour la poursuite du développement de l'industrie des macroalgues sont multiples et couvrent tous les domaines depuis l'environnement et les modes de production des macroalgues, jusqu'aux produits finis, en intégrant aussi bien des aspects technico-économiques, réglementaires ou politiques (figure 15).

Structurer la (les) filière(s)

On parle aujourd'hui de « filière Algues » mais celle-ci regroupe une grande diversité d'acteurs, que ce soit au niveau national ou international : récoltants (macroalgues de rive, pêche), producteurs (à terre, en mer...), dédiés ou non aux macroalgues, diversité des domaines d'activité des utilisateurs industriels et de leur taille, etc. Il est donc nécessaire de mieux structurer l'ensemble de ces acteurs. Plusieurs structures existent déjà dans ce sens, notamment des syndicats professionnels et associations impliquant au départ des secteurs d'activité de macroalgues comme microalgues avant de se diversifier sur les deux secteurs (European Algae Biomass Association EABA, Algae Biomass Organization ABO, etc.).

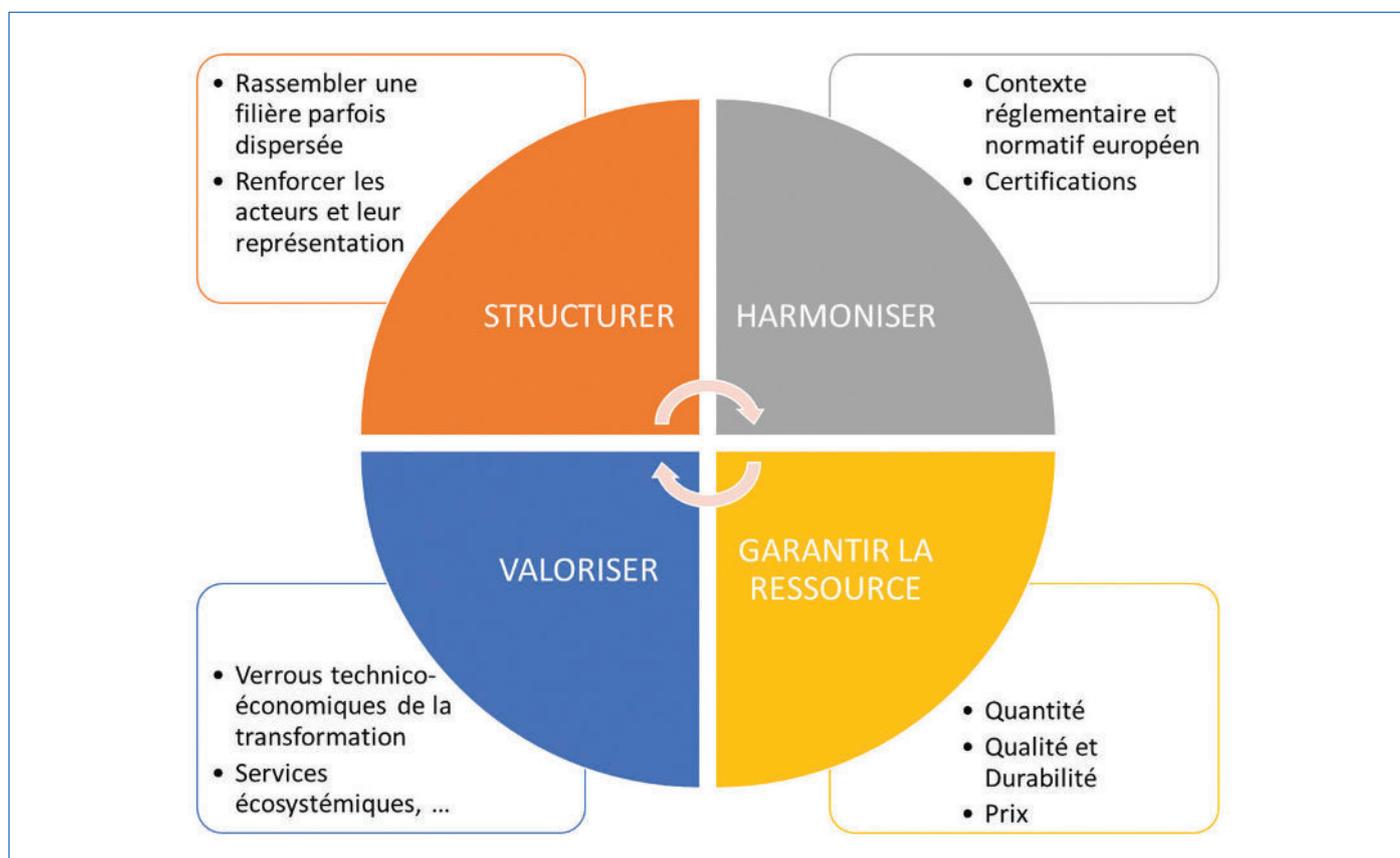


Figure 15 - Les grands enjeux de la « filière Algues ».

Par ailleurs, de nouvelles initiatives émergent (Safe Seaweed Coalition, Seaweed for Europe), portées par des ONG ou des collectifs d'entreprise. Les États-Unis ou l'Union européenne sont également moteurs dans cette dynamique (EU Algae Initiative, EU4Algae Forum, etc.). La France n'est pas en reste. Le secrétariat d'État chargé de la Mer et de la Biodiversité a lancé, le 26 février 2024, à l'occasion du Salon de l'agriculture, une feuille de route Algues, et un plan de filière en cours de construction.

Harmoniser les standards et la réglementation

Il faut aussi noter l'absence fréquente de standards et de règlements internationaux, pour un secteur manquant encore de visibilité. Il n'y a, par exemple, pas de gouvernance européenne harmonisée sur la production (différences de politiques, d'espèces autorisées à la culture, de procédures d'obtention des licences/concessions). Les macroalgues ne sont par ailleurs pas toujours considérées dans les textes européens (seuils de contaminants, catalogue Novel Food non exhaustif même s'il a récemment été actualisé...). Néanmoins, la réglementation évolue progressivement (e.g. réglementation en alimentation animale). Des besoins de normalisation sont aussi identifiés et sont actuellement traités au niveau européen (CEN/TC 454 - Algae and algae products). Par ailleurs, des labels spécifiques aux algues se mettent aussi en place comme le label ASC/MSC, déclinaison des labels pour la pêche durable, et de nouveaux labels sont en émergence.

Garantir l'accès à la ressource

En parallèle, il est nécessaire de garantir un accès à la ressource en qualité, quantité, à un coût adapté et ceci fait appel à plusieurs actions prioritaires :

- une gestion durable des stocks sauvages, en évitant leur surexploitation, dans un contexte de dérèglement climatique ;
- la domestication de nouvelles espèces locales et la constitution de banques de souches ;
- des progrès techniques et une réduction des coûts de production (notamment hors zones géographiques à bas coût de main d'œuvre), ainsi que le développement de cultures dans le respect de l'environnement et des autres usages de la mer.

Le dérèglement climatique et son effet sur les macroalgues font l'objet d'une attention particulière depuis une dizaine d'années. Tout d'abord, ceci impacte logiquement les gisements et les écosystèmes [17,18] via le réchauffement des eaux, mais aussi l'évolution des populations (poissons herbivores, oursins, etc.), même si la pollution des eaux peut aussi y contribuer de la même manière. Le dérèglement climatique a aussi été associé à certaines pathologies des macroalgues comme la maladie «Ice Ice» qui impacte les cultures d'*Eucheuma* et *Kappaphycus*, principales espèces cultivées pour la production de carraghénanes. Si ce syndrome a été observé depuis les années 70, il est de plus en plus présent aujourd'hui et influe tant sur les rendements de culture que sur la qualité des carraghénanes produits. Le réchauffement des eaux, la baisse de leur salinité et la perturbation de l'holobionte des macroalgues (symbiose entre la macroalgue et les flores microbiennes à sa surface) seraient les principaux paramètres de ces modifications [19].

Valoriser au mieux les macroalgues

La valorisation des macroalgues dépend bien sûr de la matière première, mais également des verrous technico-économiques à lever pour atteindre certains marchés. La valorisation reste trop souvent mono-produit, et il faut poursuivre le développement de bioraffineries et la mutualisation d'outils afin d'atteindre une taille critique suffisante. Dans la même lignée, l'industrie des macroalgues manque encore trop souvent d'outils et de technologies spécifiques. Ainsi, on peut noter par exemple l'absence d'enzymes commerciales adaptées aux polysaccharides des macroalgues. De même, un travail reste nécessaire afin d'améliorer les procédés de conservation et de stabilisation post-récolte pour travailler sur macroalgues fraîches, évitant de cette façon un séchage énergivore tout en préservant leur qualité. Sur un autre registre, il semble nécessaire de valoriser les services écosystémiques des macroalgues, comme la consommation de nutriments en excès dans les zones côtières, la fourniture d'habitat et nourriture pour d'autres espèces ou la résilience/résistance au changement climatique [20] afin de faire sortir le plein potentiel de cette ressource.

Les macroalgues attirent aussi aujourd'hui une grande attention médiatique en raison de leur grande capacité à capter le carbone, et potentiellement à l'immobiliser via un transfert en eaux profondes/naturel ou provoqué ou au travers de certains usages (matériaux de construction, etc.). D'autres utilisations variées mais importantes après fractionnement et fonctionnalisation pourraient aussi fournir des produits proches de la neutralité carbone en alternative aux produits d'origine fossile. Néanmoins, des études complémentaires sont souvent nécessaires afin de conforter certaines de ces applications et propriétés mises en avant [21, 22], avant de pouvoir les valoriser économiquement (crédits carbone, azote ou phosphore ou monétisation des services écosystémiques). Les attentes et la demande sont donc fortes pour une intégration pleine et entière des macroalgues dans la future bioéconomie bleue. Outre les caractéristiques chimiques et techniques des macroalgues souvent uniques, les incitations/injonctions environnementales et réglementaires, qu'elles proviennent des états ou des consommateurs, y contribuent pleinement et continueront de le faire de manière croissante.

⁽¹⁾<https://phyconomy.net/industry-guide/applications>

[1] H. Porse, B. Rudolph, The seaweed hydrocolloid industry: 2016 updates, requirements, and outlook, *J. Appl. Phycol.*, **2017**, 29, p. 2187-200.

[2] M. Beaumont, R. Tran, G. Vera, D. Niedrist, A. Rousset, R. Pierre, V.P. Shastri, A. Forget, Hydrogel-forming algae polysaccharides: from seaweed to biomedical applications, *Biomacromol.*, **2021**, 22(3), p. 1027-52.

[3] B.B. Sedayu, M.J. Cran, S.W. Bigge, A review of property enhancement techniques for carrageenan-based films and coatings, *Carbohydr. Polym.*, **2019**, 216, p. 287-302.

[4] Biodegradable and edible bioplastic from renewable plant based polymer for packaging and the manufacturing method thereof - WO202101952.

<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2021019525>

[5] M.J. Costa, A.M. Marques, L.M. Pastrana, J.A. Teixeira, S.M. Sillankorva, M.A. Cerqueira, Physicochemical properties of alginate-based films: Effect of ionic crosslinking and mannuronic and guluronic acid ratio, *Food Hydrocolloids*, **2018**, 81, p. 442-448.

[6] H.A. Khalil *et al.*, Biodegradable polymer films from seaweed polysaccharides: A review on cellulose as a reinforcement material, *Exp. Polymer L.*, **2017**, 11, p. 244-265.

[7] M. Yadav, Y.-K. Liu, F.-C. Chiu, fabrication of cellulose nanocrystal/silver/alginate bionanocomposite films with enhanced mechanical and barrier properties for food packaging application, *Nanomater.*, **2019**, 9, 1523.

[8] www.lens.org/images/patent/US/2403547/A/US_2403547_A.pdf

- [9] Y. Qin, The characterization of alginate wound dressing with different fiber and textile structures, *J. Appl. Pol. Sc.*, **2006**, *100*, p. 2516-20.
- [10] E. Deniaud-Bouët *et al.*, A review about brown algal cell walls and fucose-containing sulfated polysaccharides: Cell wall context, biomedical properties and key research challenges, *Carb. Pol.*, **2017**, *175*, p. 395-408.
- [11] B. Quemener *et al.*, Sugar determination in ulvans by a chemical-enzymatic method coupled to high performance anion exchange chromatography, *J. Appl. Phycology*, **1997**, *9*(2).
- [12] A. Pajot *et al.*, Fucoxanthin from algae to human, an extraordinary bioresource: Insights and advances in up and downstream processes, *Marine drugs*, **2022**, *20*(4), p. 222.
- [13] O.S.D. Wally *et al.*, Regulation of phytohormone biosynthesis and accumulation in arabidopsis following treatment with commercial extract from the marine macroalga *Ascophyllum nodosum*, *J. Plant. Gr. Regul.*, **2013**, *32*, p. 324-339.
- [14] M. Baltazar *et al.*, Recent advances in the molecular effects of biostimulants in plants: An overview, *Biomol.*, **2021**, *11*.
- [15] O. Goñi, P. Quille, S. O'Connell, Seaweed Carbohydrates, in: *The chemical biology of plant biostimulants*, **2020**, John Wiley & Sons Ltd., p. 57-95.
- [16] N. Sujeeth *et al.*, Current insights into the molecular mode of action of seaweed-based biostimulants and the sustainability of seaweeds as raw material resources, *Int. J. Mol. Sc.*, **2022**, *23*.
- [17] C.D. Harley *et al.*, Effects of climate change on global seaweed communities, *J. Phycol.*, **2012**, *48*(5), p. 1064-78.
- [18] B. Martinez *et al.*, Distribution models predict large contractions of habitat-forming seaweeds in response to ocean warming, *Div. & Dist.*, **2018**, *24*(10), p. 1350-66.
- [19] G.M. Ward *et al.*, Ice-Ice disease: An environmentally and microbiologically driven syndrome in tropical seaweed aquaculture, *Rev. Aquac.*, **2021**, p. 1-26.
- [20] L. Hasselström, W. Visch, F. Gröndahl, G.M. Nylund, H. Pavia, The impact of seaweed cultivation on ecosystem services - a case study from the west coast of Sweden, *Mar. Pollut. Bull.*, **2018**, *133*, p. 53-64.
- [21] D. Krause-Jensen, P. Lavery, O. Serrano, N. Marba, P. Masque, C.M. Duarte, Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the blue carbon room, *Biol. Lett.*, **2018**, *14*, 20180236.
- [22] M. Troell, P. J. G. Henriksson, A.H. Buschmann, T. Chopin, S. Quahe, Farming the ocean – Seaweeds as a quick fix for the climate?, *Fish. Sc. Aquacult.*, **2022** p. 1-11.

Florence DUFRENEIX, cheffe de projet nutrition humaine et animale, **Aurélié ROUSSET**, cheffe de projet agriculture et cosmétique, et **Ronan PIERRE***, responsable du pôle Innovation et produit, Centre d'étude et de valorisation des algues CEVA, Pleubian.

*ronan.pierre@ceva.fr

May 19th – 23rd 2025

FCCat 4
2025

Ronce-les-Bains (France)

Invited speakers:

Nicolas Bion (CNRS-IC2MP, Univ. Poitiers, France)
 Mercedes Boroná (ITO, UP Valencia-CSIC, Spain)
 Clément Camp (CNRS-CP2M, Univ. Lyon, France)
 Claire Courson (ICPEES, Univ. Strasbourg, France)
 Kilian Kobl (Ypso Facto, France)
 Leonarda Francesca Liotta (ISMN-CNR, Univ. Palermo, Italy)
 Vitaly Ordonsky (CNRS-UCCS, Univ. Lille, France)
 Hilde Poelman (LCT, Ghent Univ., Belgium)
 Andreas Rudi (IIP, KIT, Germany)
 Agnieszka Ruppert (Łódź University of Technology, Poland)

The **topics** cover the **challenges** faced by catalysis in a context of energy transition and sustainability of chemical processes:

- ✓ Fundamental & applied catalysis
- ✓ Refining & petrochemical processes
- ✓ Alternative energy solutions
- ✓ Renewable & fine chemicals
- ✓ Environment & sustainable development
- ✓ Recycling

Preferential fees:
before March 7th 2025

Academic 750 €* / 800 €	Including Meals & Accommodation
Industrial 850 €* / 900 €	
Student 570 €* / 620 €	

*EuChemS or SCF Member

Organizing committee:

C. Abreu Teles, P. Bazin, F. Can, J. Canivet, M. Capron, E. Devers, P. Gaudin, E. Genty, E. Girard, E. Marceau, K. Parkhomenko, H. Petitjean, J. Schnee

French Conference on Catalysis 2025

<https://fccat2025.sciencesconf.org/>