

- RAPPORT FINAL -

VALORISATION ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE LA BIOMASSE ALGALE DÉRIVANTE DANS L'ESTUAIRE ET LE GOLFE DU SAINT-LAURENT

PRÉSENTÉ AU



PAR



2020-31-20

AUTEURS DU RAPPORT

Simon Cartier, M.Sc. CRBM
Martin Poirier, M.Sc. OrganicOcean

AUTRES COLLABORATEURS AU CONTENU

Centre de recherche sur les biotechnologies marines - CRBM

Jennifer Morissette, B.Sc.
Guy Viel, Ph.D.
Geneviève Bois, B.Sc.
Pascal Fournier
Yvan Bérubé

OrganicOcean

Alexandre Leclerc, M.Sc.A., B.D.I.

Pêcheries Shipek

Guy Vigneault

Révision du rapport

Gabriel Leblanc, OGSL
Simon Bélanger, UQAR

Ce document est l'entière propriété des partenaires. Toute transcription et reproduction de ce document par quelque moyen que ce soit et pour quelque usage que ce soit est strictement interdit à moins d'une autorisation par les partenaires.

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Au cours des dernières années, l'intérêt pour les algues marines a pris de l'ampleur au Québec, particulièrement dans les régions maritimes. Bien que les zones côtières du Saint-Laurent soient principalement peuplées d'algues brunes, soient les fucales (fucus et ascophylle noueuse) et les laminariales (laminaire et alarie), l'intérêt est tout autant pour les algues brunes, rouges et vertes.

Présentement, les algues fixées à un substrat sont soit récoltées manuellement sur le littoral ou en plongée soit cultivées en mer sur des lignes submergées. Ces algues fraîches sont principalement destinées à l'alimentation humaine et animale, l'horticulture, l'agriculture et à la cosmétique.

Une autre source d'algues est également exploitée au Québec. Il s'agit d'algues échouées. Ces algues sont décrochées lors du retrait des glaces au printemps ou lors de tempêtes automnales et dérivent au gré des courants et des vents pour éventuellement finir échouées dans un état de décomposition variable sur la berge. La récupération rapide et efficace de ces algues lorsqu'elles sont dérivantes pourrait présenter une source de biomasse algale intéressante.

Le projet actuel avait pour objectif de valider si ces algues dites dérivantes possédaient un réel potentiel de valorisation. L'étude a porté sur la détection et l'évaluation des stocks d'algues fixes et dérivantes, l'évaluation de la composition et de la qualité de lots d'algues dérivantes, l'évaluation des coûts de récupération et de traitement ainsi que l'évaluation sommaire du potentiel commercial de leur valorisation.

Dans le cadre du projet, les échantillons d'algues ont été repérées visuellement en mer puis récupérées par bateau. Ces algues en provenance des régions du

Bas-Saint-Laurent et de la Côte-Nord, ont ensuite été nettoyées puis séchées à l'usine d'OrganicOcean. Par la suite, les différents lots ont été analysés afin de déterminer leur qualité microbiologique et chimique. Les lots d'algues récupérés se sont présentés sous la forme de deux types d'assemblage soit un majoritairement composé de laminaires et l'autre principalement composé de fucus.

Bien qu'une certaine variabilité ait été observée au niveau des décomptes microbiologiques, la majorité des lots ont présenté des décomptes microbiens faibles. La variabilité observée est un bon indicateur sur l'historique de dérive des algues récoltées. Au niveau de la qualité chimique, les algues dérivantes ont présenté une grande similitude au niveau de la teneur de différents composés mesurés dans des algues monospécifiques dont les protéines, les minéraux, les alginates et les sucres réducteurs. Concernant l'aspect technico-économique, une évaluation du coût sur une base en kilogramme d'algues sèches a été effectuée et ce pour chacune des étapes, de la récolte en mer jusqu'à son traitement à l'usine. Selon les hypothèses de travail posées dans le cadre du projet, le coût estimé est de à 1,63 \$ / kg d'algues dérivantes séchées. Ce coût peut varier en fonction de plusieurs facteurs dont la quantité d'algues récoltées en mer lors d'une sortie en bateau, la localisation des bancs d'algues par rapport à un port d'attache, le taux d'humidité des algues de l'assemblage.

La valorisation du contenu en polysaccharides algaux (alginates, laminaranes et fucoïdanes) est probablement l'avenue technico-commerciale la plus intéressante à envisager pour la valorisation des algues dérivantes. Ces composés sont chimiquement stables et possèdent une bonne résistance à la dégradation bactérienne. Les applications commerciales nécessitant des garanties de composition de composés sensibles ou bien des propriétés organoleptiques optimales pour la consommation humaine ne doivent pas être ciblées pour la valorisation des algues dérivantes. Des applications industrielles basées sur le contenu en polysaccharides, en minéraux ou sur la valeur fertilisante sont plutôt recommandées.

En conclusion, l'étude effectuée a pu démontrer le grand potentiel de valorisation que peuvent offrir les algues dérivantes pour plusieurs secteurs d'application avec un coût de transformation convenable. Le défi pour la mise en place d'une filière durable d'exploitation de cette ressource algale réside, entre autres, dans l'implantation d'outils permettant le repérage et la récolte de manière rapide et efficace afin de s'assurer d'une biomasse de qualité.

Dans une phase subséquente, des expertises en télédétection et en modélisation de courant de dérive, par exemple, seraient nécessaires pour aider au développement d'outil informatique permettant de repérer les bancs d'algues dérivantes en temps réel. Le développement d'outils pour évaluer la qualité *in situ* des algues et l'établissement d'un cahier de charge seraient aussi envisagés pour assurer une qualité adéquate d'algue de la mer jusqu'à l'usine.

Table des matières

I. INTRODUCTION	10
II. DÉTECTION ET ÉVALUATION DES STOCKS D'ALGUES MARINES	12
2.1. Techniques d'évaluation des stocks d'algues marines fixes	12
2.1.1. Relevé de terrain et modèle de distribution des espèces	12
2.1.2. Télédétection	13
2.1.3. Gestion des données.....	15
2.2. Évaluation des stocks d'algues marines dérivantes.....	16
2.2.1. Technique d'évaluation et de modélisation de dérive des algues.....	16
2.2.2. Algues dérivantes et opportunité d'approvisionnement.....	18
2.2.3. Repérage de champs d'algues dans le secteur Anticosti.....	19
III. ÉVALUATION DE LA COMPOSITION ET DE LA QUALITÉ DE LOTS D'ALGUES DÉRIVANTES	22
3.1. Activités d'évaluation des algues	22
3.2. Matériel et méthodes.....	22
3.2.1. Récupération et traitement des algues dérivantes.....	22
3.2.2. Évaluation visuelle	26
3.2.3. Analyses microbiologiques.....	26
3.2.4. Préparation analytique.....	27
3.2.5. Analyse compte-totaux.....	27
3.2.6. Analyse levures/moisissures.....	27
3.2.7. Analyses chimiques	27
3.2.8. Caractérisation minérale.....	28
3.2.9. Caractérisation organique.....	29
3.3. Résultats.....	30
3.3.1. Composition grossière des lots d'algues dérivantes.....	30
3.3.2. Identification des algues	30
3.3.3. Caractérisation microbiologique	33
3.3.4. Caractérisation chimique.....	33
3.3.5. Caractérisation minérale et métaux lourds	34
3.3.6. Caractérisation organique.....	39
3.3.7. Comparaison avec la composition d'algues monospécifique	43
IV. ÉVALUATION DES COÛTS DE RÉCUPÉRATION ET DE TRAITEMENT DES ALGUES DÉRIVANTES	46
V. ÉVALUATION SOMMAIRE DE LA QUALITÉ ET DU POTENTIEL COMMERCIAL DES ALGUES DÉRIVANTES	48
VI. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	51
VII. RÉFÉRENCES	53
HISTORIQUE DES CHANGEMENTS	57

Liste des tableaux

Tableau 1 : Localisation et description des principaux champs d'algues marines du secteur Anticosti.....	20
Tableau 2 : Liste détaillée des lots d'algues dérivantes prélevées	22
Tableau 3 : Liste des analyses chimiques effectuées sur les lots d'algues dérivantes.....	27
Tableau 4 : Noms vernaculaires des espèces d'algues récoltées	31
Tableau 5 : Liste détaillée des lots prélevés d'algues dérivantes.....	32
Tableau 6 : Décompte microbien sur les échantillons d'algues dérivantes	33
Tableau 7 : Résultats de l'analyse du contenu en cendres.....	34
Tableau 8 : Résultats de l'analyse des minéraux - Macro-éléments essentiels (ppm).....	35
Tableau 9 : Résultats de l'analyse des minéraux pour les oligo-éléments essentiels (ppm)	36
Tableau 10 : Résultats de l'analyse des minéraux - autres minéraux (ppm).....	37
Tableau 11 : Résultats de l'analyse du contenu en iode (ppm)	37
Tableau 12 : Résultats de l'analyse du contenu en chlorures (% p/p sous forme NaCl).....	38
Tableau 13 : Résultats de l'analyse des métaux lourds (ppm).....	38
Tableau 14 : Résultats de l'analyse relative du contenu en sucres réducteurs.	39
Tableau 15 : Résultats de l'analyse du contenu en polyphénols.....	40
Tableau 16 : Résultats de l'analyse des alginates	41
Tableau 17 : Résultats de l'analyse du contenu en azote total (protéines)	42
Tableau 18 : Résultats de l'analyse des fibres brutes	42
Tableau 19 : Comparatif de la composition biochimique d'algues de référence et des lots d'algues dérivantes.....	44

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des principaux champs d'algues marines du secteur Anticosti.....	21
Figure 2 : Banc de fucus dérivants dans le secteur de Rimouski.....	23
Figure 3 : Banc de laminaires dérivants dans le secteur Havre-Saint-Pierre.....	24
Figure 4 : Liste des étapes de traitement des algues dérivantes en usine.....	24
Figure 5 : Photographie de l'intérieur du séchoir à bande.....	26

I. INTRODUCTION

L'attrait pour la valorisation des algues marines du Québec maritime est grandissant. La biomasse algale peut être obtenue sur des sites d'algoculture, récoltées en mer par bateau ou par des plongeurs, récoltées manuellement par voie terrestre sur le littoral ou tout simplement ramassées dans la zone de marnage lorsqu'échouées. Les algues québécoises sont principalement valorisées dans les secteurs de l'alimentation humaine, l'alimentation animale, l'agriculture, l'horticulture et les cosmétiques.

Considérant l'accroissement mondial de la demande en algues marines pour desservir différents segments de marché, il apparaît important de considérer d'une manière durable toutes les sources de biomasses algales disponibles au Québec pour répondre à ces opportunités. Les algues dérivantes constituent une source d'approvisionnement potentiellement très importante qui n'est pas exploitée à ce jour.

Les bancs d'algues dérivantes sont formés lors du retrait ou du mouvement des glaces au printemps ou lors des tempêtes automnales à proximité des sites où les populations algales sont importantes. En fonction des courants marins et des conditions météorologiques, ces algues, décrochés de leur substrat naturel, peuvent être entraînées sur les berges et ne plus être exploitables pour leur valeur potentielle à cause de leur décomposition naturelle.

L'exploitation de cette matière soulève plusieurs défis techniques et logistiques qui nécessitent des validations préliminaires de leur potentiel de valorisation en vue de préciser, s'il y a lieu, une approche structurée et durable de leur exploitation commerciale.

Cette étude a visé différents objectifs de validation préliminaire dans le but de répondre aux interrogations concernant leur potentiel de valorisation commerciale. Plus spécifiquement, l'étude a porté sur la détection et l'évaluation des stocks d'algues fixes et dérivantes, l'évaluation de la composition et de la qualité de lots d'algues dérivantes, l'évaluation des coûts de récupération et de traitement ainsi que l'évaluation sommaire du potentiel commercial de leur valorisation.

II. DÉTECTION ET ÉVALUATION DES STOCKS D'ALGUES MARINES

2.1. Techniques d'évaluation des stocks d'algues marines fixes

2.1.1. Relevé de terrain et modèle de distribution des espèces

La méthode traditionnelle et la plus ancienne d'évaluation de la biomasse algale est le relevé de terrain (Bennion et al, 2019). Cette méthode permet, entre autres, de prélever des échantillons et d'effectuer des mesures de densité de biomasse, de dénombrement et d'identification d'espèces directement sur les sites étudiés. Elle comporte toutefois des limitations importantes. En effet, l'accès au site d'étude peut être parfois difficilement accessible voire même complètement inaccessible étant donné la géomorphologie ou des conditions environnementales défavorables comme, par exemple, de forts courants marins (Zhi et al, 2014; Strong et Elliott, 2017).

Lorsque les observations de terrain sont limitées, il est possible de développer un modèle de distribution des espèces (Young et al., 2015). Cette approche permet d'extrapoler spatialement la biomasse algale sur l'ensemble d'une région donnée en se basant sur des observations restreintes. Elle s'applique particulièrement pour des environnements marins où un échantillonnage extensif est plus difficile. Le modèle combine les données d'occurrence des espèces d'algues et de données environnementales telles que la profondeur, le type de substrat, la clarté de l'eau et la température de surface de l'eau, afin de prédire la distribution de l'espèce ciblée. La fiabilité de cette méthode est liée à la qualité des données utilisées en intrant du modèle prédictif, ainsi que la fiabilité des relations empiriques sur lesquelles il se base. Donc, plus grande est

la variété et la précision des données intégrées au modèle, plus les prédictions seront fiables.

2.1.2. Télédétection

Dans le cas où les approches *in situ* mentionnées précédemment ne sont pas applicables pour monitorer les algues présentes dans des biomes difficiles d'accès, l'utilisation de techniques de télédétection devient incontournable. Ces techniques font appel à l'utilisation d'appareils permettant de faire des observations et de récolter des données à distance à l'aide de différents détecteurs et plateformes. Afin de monitorer les algues marines, cinq techniques de télédétection sont disponibles :

- Imagerie satellitaire : utilisation d'images obtenues par des satellites d'observation de la Terre (OT) à l'aide de capteurs optiques hyperspectraux ou multispectraux. Dans certaines conditions optimales (p. ex., eaux claires, mer calme, densité de végétation élevé sur une superficie significative), cette technique peut permettre l'identification de la végétation submergée. La capture d'image peut se faire sur une région géographique très large. Par exemple, une seule image d'un satellite comme Landsat ou Sentinel-2 offre une fauchée de 180 et 240 km respectivement. La qualité des images est dépendante des conditions météorologiques au moment de la mesure (clarté de l'atmosphère, turbidité de l'eau, vagues). De manière générale, les satellites d'OT actuels offrent des capacités multispectrales limité à une dizaine de bandes spectrales ou moins, ce qui limite l'indentification d'espèce ou leur état physiologique. Cependant, l'arrivée sur le marché d'imagerie hyper-spectrale satellitaire pourrait potentiellement permettre d'aller plus loin. À titre d'exemple, Cavanaugh et collaborateurs (2010) ont utilisé, entre autres, l'imagerie satellitaire pour évaluer la couverture de la canopée et la biomasse algale.

- Imagerie aérienne: utilisation d'images obtenues par des aéronefs (avions ou drones) dans des spectres élargis (hyperspectral ou multispectral). Cette approche permet la détection et la classification de la végétation submergée. La capture d'image peut se faire sur des zones géographiques à plus petite en comparaison avec l'imagerie satellitaire mais avec une résolution spatiale des pixels de l'image plus fine (de l'ordre du mètre voire du cm). L'utilisation de drones permet de réduire le coût de la prise d'images aériennes par rapport à l'utilisation d'avions. À titre d'exemple, cette technique a été utilisée pour effectuer la détection d'algues submergées dans une zone subtidale en Mer du Nord à l'aide de détecteur hyperspectral. Fait à noter, l'Université du Québec à Rimouski détient un drone avec un capteur multispectral. Cet équipement pourrait offrir une alternative intéressante au détecteur hyperspectral pour détecter les algues.
- Imagerie sous-marine: utilisation d'images obtenues à l'aide de véhicules submersibles autonomes, de plongeurs ou via des caméras remorquées par des bateaux. Ces approches permettent l'obtention d'images de haute résolution du substrat des habitats biogéniques et des biota associés mais sur une échelle spatiale de petite dimension en comparaison avec l'imagerie aérienne. À titre d'exemple, cette technique a été utilisée afin de tester un système de détection automatique d'algues monté sur un véhicule sous-marin autonome (Bewley et al., 2012).
- Téledétection par laser (LiDAR): utilisation de lumière sous forme de laser pulsé afin de mesurer des distances. Cette technologie permet principalement d'obtenir des données de bathymétrie dans ces zones difficilement accessibles en bateau (0-15 mètre typiquement). Si la forme de l'onde retour est enregistrée, il est possible de dériver des informations sur la colonne d'eau et la couverture végétale au fond de l'eau. Il est ainsi possible de détecter la présence/absence de végétation

submergée (classification) et potentiellement sa hauteur et sa densité. La prise de données peut se faire dans une échelle géographique large. À titre d'exemple, cette technique a été utilisée pour caractériser des habitats benthiques en eaux peu profondes incluant les communautés macroalgales (Zavalas et al., 2014).

- Sonar: utilisation du son provenant d'un échosondeur simple (monofaisceau) ou multifaisceau, monté à bord de bateaux ou d'autres embarcations marines, afin de mesurer la bathymétrie sous-marine. Cette approche permet l'obtention de données bathymétriques et la détections d'objet sous la surface de l'eau. Les données dérivées permettent aussi de produire une visualisation 3D du fond marin. En couplant les données de couches environnementales obtenues à l'aide du sonar à des données d'observation in situ, il est possible de classifier le substrat du fond marin sondé et de détecter la végétation submergée. À titre d'exemple, cette technique a été utilisée pour détecter des macroalgues benthiques dans une région du Golfe du Maine au États-Unis (McGonigle et al., 2011).

2.1.3. Gestion des données

L'évaluation des inventaires d'algues est généralement effectuée par des agences ou organismes gouvernementaux. Ces données servent, entre autres, à établir la distribution et l'abondance d'espèces algales en présence tant pour des aspects de connaissances écologiques du territoire que pour effectuer, si la géomorphologie du site le permet, une exploitation durable de cette ressource. À travers le monde, plusieurs agences effectuent régulièrement des relevés côtiers à l'aide de sonars multifaisceaux : UK Hydrography Office, Marine Institute of Ireland, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA).

Ces données peuvent servir à modéliser, cartographier et monitorer les inventaires d'algues.

Des données peuvent aussi provenir d'autres sources que gouvernementales. En effet, des initiatives scientifiques citoyennes génèrent aussi des données pouvant être utiles pour la gestion des inventaires. Plusieurs initiatives citoyennes sont présentement actives et génèrent différents types de données principalement pour des considérations écologiques et environnementales :

- Nature Watch (<http://naturewatch.org.nz>),
- The Big Seaweed Search (<http://www.nhm.ac.uk/take-part/citizen-science/bigseaweed-search.html>),
- FloatingForest (<https://www.zooniverse.org/projects/zooniverse/floating-forests>),
- Capturing Our Coast (www.capturingourcoast.co.uk/).

2.2. Évaluation des stocks d'algues marines dérivantes

2.2.1. Technique d'évaluation et de modélisation de dérive des algues

La détection des algues dérivantes est beaucoup plus complexe que la détection de bancs d'algues fixées à des substrats vu qu'elles se déplacent en fonction des courants marins de surface générés par les vents (Rothausler et al, 2015). Le repérage à l'aveugle de bancs d'algues dérivantes par bateau est une option. Cette technique de repérage s'avère toutefois très onéreuse et potentiellement infructueuse si elle n'est pas associée à une autre activité commerciale telle que la pêche.

L'imagerie satellitaire est actuellement utilisée pour monitorer la prolifération des gigantesques bancs de sargasse (algue brune) qui se développent dans l'Atlantique. Des capteurs optiques à moyenne résolutions (250-330 mètres) tels que Sentinel-3/OLCI et MODIS sont utilisés pour cette application (European Space Agency, 2019).

Dans le cas des algues dérivantes retrouvées dans le Québec maritime il semble évident que les bancs formés dans les eaux du Saint-Laurent auront des superficies beaucoup plus petites que celles des bancs de sargasses. Des techniques adaptées à l'échelle géographique ainsi qu'à l'échelle de la superficie des bancs doivent donc être privilégiées pour faciliter le repérage et ainsi permettre d'optimiser la logistique de récupération en mer. Un repérage par drone pourrait être envisagé pour effectuer du repérage de bancs d'algues dérivantes. En effet, dans le cadre d'un projet collaboratif expérimental entre Merinov, Pêcheries UAPAN et le Centre de géomatique du Québec, il a été démontré que l'utilisation d'une caméra multispectrale fixée à un drone permettait d'estimer le pourcentage de recouvrement des fucacées, des laminaires et de l'agar criblée sur des zones d'estran nord-côtier. Les signatures spectrales utilisées dans le cadre du projet pour être très utiles pour repérer des algues dérivantes.

Des expertises québécoises reliées à l'utilisation de la télédétection satellitaire en milieux côtiers et au développement de modèle de dérive océanique sont actuellement en développement et pourraient avantageusement être mises à profit pour l'optimisation de la logistique de récolte en mer des algues dérivantes. Le laboratoire d'optique Aquatique et de Télédétection basé à l'Université du Québec à Rimouski, dirigé par le chercheur Simon Bélanger, effectue actuellement des recherches dans le secteur d'Anticosti impliquant la détection des bancs d'algues dérivantes et l'utilisation de capteurs multispectraux installés sur des satellites Landsat-8 et Sentinel-2 pour détecter la biomasse dérivante à une résolution respectivement de 30 et 10 m. L'analyse des bases de données libre d'accès comme Landsat-8 (2013-) et Sentinel-2 (2015-) pourront aider à avoir une meilleure compréhension de la dynamique de l'évolution des algues dérivantes, du décrochage à leur déplacement en milieu marin. Afin de prévoir la formation de bancs d'algues dérivantes, la mise en commun de plusieurs données de télédétection (ex. identification de zones riche en végétation algale), de données océanographiques (ex. courant de surface) et de données climatiques (ex. vitesse et orientation du vent) pourrait

permettre l'élaboration d'un modèle prédictif permettant d'établir des zones de prédilection où les algues dérivantes pourraient se retrouver suivant des événements climatiques saisonniers comme le passage d'une tempête automnale, par exemple.

Si l'observation satellitaire en optique peut permettre d'identifier des algues dérivantes, il serait intéressant d'explorer le potentiel de l'imagerie radar à synthèse d'ouverture (SAR) comme celle offerte par Sentinel-1 et la constellation de RADARSAT (RCM). Les images SAR sont sensibles à la rugosité de surface et pourraient ainsi permettre de détecter des bancs d'algues dérivantes et ce même sous couvert nuageux.

2.2.2. Algues dérivantes et opportunité d'approvisionnement

Les populations québécoises d'algues marines sauvages sont réparties dans les eaux du Bas-Saint-Laurent, de la Gaspésie / Îles-de-la-Madeleine, de la Côte-Nord et du Nord du Québec. En termes d'espèces d'algues retracées, l'écosystème marin du Saint-Laurent est largement dominé par les algues brunes de la famille des fucacées (ascophylle et fucus) et des laminariacées (laminaires) (Chabot et Rossignol, 2003).

Lorsque les conditions météorologiques sont propices (amplitude de marée, vent, courants marins), plusieurs thalles d'algues sont arrachés et concentrés en bancs et entraînés vers différents sites d'échouage. Des tonnages importants d'algues échouées ont été répertoriés sur plusieurs sites de la péninsule Gaspésienne par Leblanc et Rondeau (2004). Les échouages observés lors des grandes marées automnales étaient majoritairement constitués de fucus et de laminaires. Des quantités de l'ordre de dizaines à des centaines de tonnes de mélanges d'algues humides par site d'échouage ont été estimées (Leblanc et Rondeau, 2004).

L'estimation de la disponibilité en algues dérivantes au Québec est très complexe puisqu'elle est entièrement tributaire des évènements météorologiques. Cette disponibilité peut donc varier grandement selon la saison, la région et l'année. Dans certaines conditions de vagues et marées, les algues peuvent s'échouer lors d'une première marée et repartir en mer dans une marée subséquente. L'utilisation d'outils de télédétection adéquats permettant d'obtenir une estimation fiable et réaliste sera un élément très important pour structurer une logistique durable de valorisation d'algues dérivantes.

La biomasse algale dérivante pourrait constituer une opportunité d'approvisionnement très intéressante dans la mesure où elle peut être récupérée en mer avec un niveau de fraîcheur et de qualité acceptable. Comme mentionné précédemment, la formation de bancs d'algues est le résultat de l'arrachage naturel de populations d'algues qui se trouvaient initialement, dans bien des cas, en immersion loin des côtes, pour les laminaires, ou réparties en faible densité sur plusieurs kilomètres de zone intertidale, pour le cas du fucus. Pour ces deux types d'algues, la récolte commerciale avec coupe manuelle ne serait probablement pas une activité viable économiquement et le fait d'avoir accès à des bancs dérivants d'algues « déjà coupées » constitue une opportunité plus qu'intéressante.

2.2.3. Repérage de champs d'algues dans le secteur Anticosti

Le secteur de l'Île d'Anticosti, avec ses fonds rocheux et ses eaux claires, est propice au développement d'importantes populations de laminaires. Ce secteur constitue le point de départ, à chaque année, de la formation d'importants bancs d'algues dérivantes observés dans le Golfe du Saint-Laurent (Simon Bélanger, Université du Québec à Rimouski; observations non publiées).

Des travaux de repérage par hélicoptère effectués en juin 2019 ont permis d'identifier et de cartographier les principaux secteurs de haute densité de laminaires et de fucus. Le repérage a été effectué par OrganicOcean, Pêcheries Shipek, la municipalité d'Anticosti et Innukoptère. Pêcheries Uapan et Kruger Énergie étaient aussi partenaires pour la réalisation de ces travaux. Le survol des eaux claires par temps ensoleillé à basse altitude a permis de repérer les sites d'intérêt de façon très efficace (Tableau 1). Les différents sites d'intérêt identifiés sont présentés sur la carte la carte de l'île d'Anticosti (Figure 1).

En couplant ces observations à des données de télédétection satellitaire et à des modèles de dérive, cela permettrait de mieux comprendre la dynamique de déplacement et d'accumulation de ces algues pour le Saint-Laurent.

Tableau 1 : Localisation et description des principaux champs d'algues marines du secteur Anticosti

Point	Localisation	Observations
1	Secteur Pointe-de-l'Ouest et Anse-aux-Fraises	Beaucoup de petits <i>Fucus</i> attachés sur le récif
2	Entre le Lac du Canard et la rivière Jupiter	Champ de <i>Laminaria digitata</i>
3	Entre la rivière Jupiter et la Pointe-Sud-Ouest	Populations denses de <i>Saccharina latissima</i> et <i>Laminaria digitata</i>
4	De la Pointe-Sud-Ouest jusqu'à la rivière du Brick	Populations denses et disparates de <i>Saccharina latissima</i> et <i>Laminaria digitata</i>
5	À l'Est de la rivière du Brick	Population de <i>Fucus</i>
6	À l'Ouest de l'épave du Mongibello	Population de <i>Fucus</i>
7	Dans le secteur du Phare de Pointe-Sud	Population de <i>Fucus</i>

8	À l'Est du Lac de la Croix	Champ de laminaires de <i>Laminaria digitata</i> et <i>Saccharina latissima</i> .
9	Secteurs Étang de l'épave, Baie Sandtop et Baie Innommée	Champs de <i>Saccharina latissima</i>
10	Secteur Cap-de-la-Table	Population de <i>Fucus</i>
11	Secteur Baie de la rivière Prinsta	Population de <i>Fucus</i>

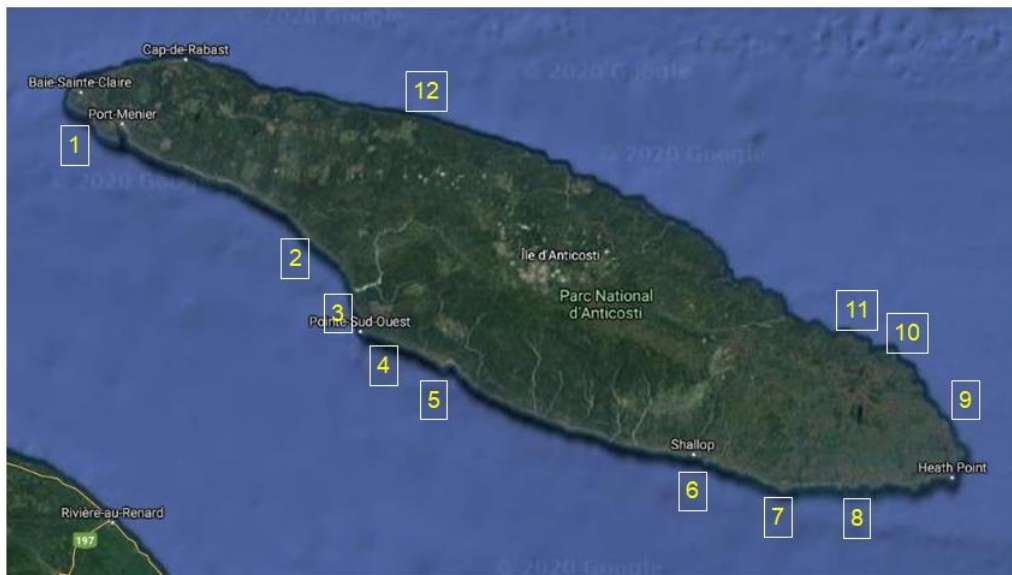


Figure 1 : Localisation des principaux champs d'algues marines du secteur Anticosti

III. ÉVALUATION DE LA COMPOSITION ET DE LA QUALITÉ DE LOTS D'ALGUES DÉRIVANTES

3.1. Activités d'évaluation des algues

Dans le cadre du projet, le mandat du CRBM était d'effectuer la caractérisation microbiologique et biochimique de lots d'algues dérivantes, récupérées par les Pêcheries Shipek et OrganicOcean, afin de déterminer si ce type de biomasse est valorisable et de préciser pour quels types d'applications elles pourraient être valorisées

3.2. Matériel et méthodes

3.2.1. Récupération et traitement des algues dérivantes

Les échantillons d'algues dérivantes ont été prélevés par les équipes d'OrganicOcean et les Pêcheries Shipek (voir Figures 1 et 2). Les algues proviennent de différents endroits du Québec maritime (Tableau 2), plus précisément du Bas-Saint-Laurent (Estuaire de Saint-Laurent) ainsi que de la Côte-Nord (Golfe du Saint-Laurent).

Tableau 2 : Liste détaillée des lots d'algues dérivantes prélevées

Échantillon	Provenance	Date
1	L'Isle-Verte	2019-08-15
2	Rimouski	2019-08-16
3	Rivière-Trois-Pistoles	2019-09-09
4	Trois-Pistoles	2019-09-09
5	Cacouna	2019-09-10
6	Trois-Pistoles	2019-10-07
7	Grand-Métis	2019-10-18

8	Havre-Saint-Pierre / Anticosti	2019-09-15
9	Havre-Saint-Pierre / Anticosti	2019-10-07

L'équipe d'OrganicOcean a récupéré les algues dérivantes à l'aide d'une embarcation de type Zodiac (Figure 2). Les algues ont été chargées à bord manuellement et mises dans des sacs en filet. Elles ont ensuite été transportées directement à l'usine d'OrganicOcean (Trois-Pistoles) pour être traitées.

L'équipe de Pêcheries Shipek a récupéré les algues dérivantes avec un bateau de 50 pieds de longueur utilisé pour la pêche aux crabes, buccins et homards (Figure 3). Les algues ont été chargées à bord à l'aide d'un grappin et disposées dans des caisses de plastique pour le transport. Les algues ont ensuite été congelées et transférées dans un bac isotherme pour le transport vers l'usine d'OrganicOcean pour y être traitées.



Figure 2 : Banc de fucus dérivants dans le secteur de Rimouski



Figure 3 : Banc de laminaires dérivants dans le secteur Havre-Saint-Pierre

Tous les lots d'algues dérivantes ont été traitées en plusieurs étapes distinctes à l'usine d'OrganicOcean (Figure 4):

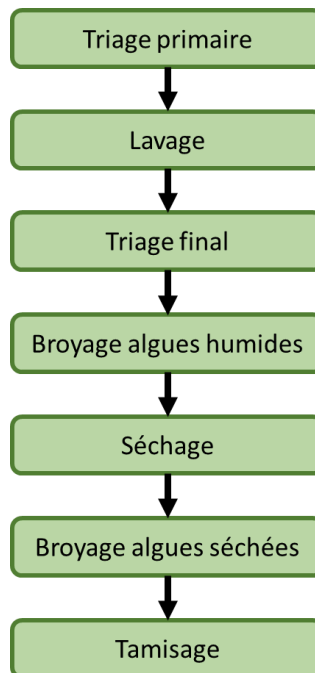


Figure 4 : Liste des étapes de traitement des algues dérivantes en usine

1. Triage primaire: Lors de cette étape, les opérateurs ont procédé au retrait manuel des débris les plus volumineux entremêlés dans les algues (bois, amas de paille et zostères).
2. Lavage: Les algues ont ensuite été lavées par immersion dans un bain de rinçage à convoyeur double permettant de séparer les différentes matières par flottaison.
3. Triage final: Sur un convoyeur d'inspection, les opérateurs ont procédé à l'identification visuelle et à l'estimation des proportions relatives des différentes espèces d'algues au sein du lot.
4. Broyage algues humides : Les algues ont ensuite été broyées afin d'uniformiser l'alimentation du séchoir.
5. Séchage: Les algues ont ensuite été séchées dans un séchoir à bande alimenté au propane (Figure 5).
6. Broyage algues séchées : Une fois séchées, les algues ont été broyées en plus petites particules dans un broyeur à marteaux.
7. Tamisage: Par la suite les algues ont été tamisées sur un tamis de 3,4 millimètres.



Figure 5 : Photographie de l'intérieur du séchoir à bande

3.2.2. Évaluation visuelle

Chacun des échantillons a été décrit pour l'aspect visuel et la couleur avant de procéder aux travaux d'analyses

3.2.3. Analyses microbiologiques

La qualité microbiologique de chaque échantillon de poudre d'algues dérivantes a été évaluée à l'aide du compte total aérobie ainsi que du compte en levures et moisissures de chacun des échantillons. Les méthodes utilisées sont basées sur la pharmacopée USP <61>.

3.2.4. Préparation analytique

Inspiré par la méthode USP <61>, 10g de poudre d'algue a été prélevé stérilement pour chaque échantillon puis mélangée à 90 mL d'un milieu nutritif *Tryptic soy broth* (TSB). Une série de dilution 1/10 à l'aide de milieu TSB a été utilisé afin d'obtenir d'effectuer les comptes.

3.2.5. Analyse compte-totaux

Pour l'analyse des compte-totaux, une quantité correspondant à 1mL de chaque dilution a été prélevée immédiatement après mélange avec le TSB et déposée dans un pétri stérile (en duplicata) et incubé dans 20mL d'un milieu nutritif *Tryptic soy agar*. Les pétris ont été incubés à une température de 32,5°C. La lecture finale des résultats a été effectuée après trois jours d'incubation.

3.2.6. Analyse levures/moisissures

Pour l'analyse des levures/moisissures, une quantité correspondant à 1mL de chaque dilution a été prélevée immédiatement après mélange avec le TSB et déposée dans un pétri stérile (en duplicata) et incubé dans 20mL d'un milieu nutritif *Sabouraud agar*. Les pétris ont été incubés pour une période de 5 à 7 jours à une température de 22,5°C. Une lecture préliminaire des résultats a été effectuée à titre indicatif au quatrième jour d'incubation. Certains des comptes après 4 jours d'incubation ont été considérés pour l'interprétation des résultats vu une croissance trop importante en moisissure, septième jour d'incubation empêchant une lecture adéquate du compte de colonies. La lecture finale des résultats a été effectuée au 7^e jour d'incubation.

3.2.7. Analyses chimiques

Une caractérisation chimique des algues a été effectuée en deux volets : le contenu minéral ainsi que le contenu organique La liste des analyses est présentée dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Liste des analyses chimiques effectuées sur les lots d'algues dérivantes

Contenu minéral	Contenu organique
Cendres	Sucres réducteurs
Minéraux et Oligo-éléments	Polyphénols totaux
Iode	Alginates
Chlorure	Protéines (azote total)
Métaux lourds	Fibres brutes

3.2.8. Caractérisation minérale

La teneur en minéraux a été déterminée par calcination de l'échantillon préalablement séché (à l'étuve 70°C, 16 heures) à 550°C durant six heures dans une fournaise à moufle. La teneur en minéraux et en oligo-éléments a été déterminée par ICP-MS après une digestion à l'acide nitrique par micro-ondes (CRBM-ICP-0013). Des solutions certifiées (VHG Labs) sont utilisées pour établir des courbes de calibration d'une étendue variant de < 10 ppt à 10 ppm dépendamment de l'élément analysé.

Les métaux lourds soit l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le mercure (Hg) et le plomb (Pb) ont été quantifiés par ICP-MS suivant une digestion acide au micro-ondes basée sur la méthode CRBM-ICP-0001. Cette méthode est développée pour mesurer ces métaux toxiques en traces selon des limites de quantification de 10 ppt et 50 ppt à l'aide également de solutions certifiées (VHG Labs).

Pour le contenu en iode, la quantification a été effectuée par ICP-MS également, mais suivant une digestion basique par micro-ondes (CRBM-ICP-0007). Une courbe d'étalonnage calibration est préparée à partir d'une solution certifiée à 1000 ppm en iodure (SCP science 250-220-730).

Quant à la teneur en chlorure, le dosage a été effectué selon un titrage par précipitation avec du nitrate d'argent (Alfa Aesar 35601). La détermination

inclut une étape de digestion de l'échantillon à l'acide nitrique selon la méthode AOAC 937.09.

3.2.9. Caractérisation organique

Le dosage des sucres réducteurs a été effectué selon le principe colorimétrique de Dubois et al. (1956) avec une extraction préalable à l'acide sulfurique. La coloration a été évaluée par spectrophotométrie UV (absorption maximale 485 nm) à l'aide d'une courbe d'étalonnage préparée avec du glucose. Cette méthode permet une comparaison relative du contenu en sucres réducteurs entre les différents échantillons.

La caractérisation des polyphénols totaux a été effectuée par une réaction colorimétrique dont la quantification est déterminée par spectrophotométrie UV (absorbance à 750 nm). Un standard d'acide gallique (Sigma Aldrich G7384) a été utilisé comme référence selon la méthode CRBM-GE-0039 (Dosage des polyphénols dans les algues).

Le dosage des alginates a été effectué par chromatographie liquide en phase inverse (HPLC) à détection UV, réglé à 210 nm à l'aide d'une colonne en phase inverse. L'analyse effectuée selon la méthode CRBM-LC-0089 a requis une extraction spécifique avec une solution acide.

La teneur en azote total est déterminée la méthode de Kjeldahl (méthode interne CRBM-GE-0033). Le pourcentage d'azote total obtenu permet le calcul du contenu en protéines selon un facteur multiplicatif de 5 dans le cas des algues

Quant aux fibres brutes, la quantification a été effectuée par gravimétrie suivant une digestion enzymatique avec de la pancréatine (Sigma Aldrich P1750).

3.3. Résultats

3.3.1. Composition grossière des lots d'algues dérivantes

Les lots récupérés ont été nettoyés des différents débris lors de l'étape du triage primaire. La composition de ces débris ainsi que leur proportion relative est variable, allant de 0 à 4 % sur une base massique humide. Les débris les plus abondants sont le bois et les zostères. Aucune présence de débris de plastique n'a été observée.

L'approche de récupération des algues en mer avant échouage aurait un impact très important sur le maintien de leur qualité par l'absence de débris dans les algues récoltés. Par exemple, le plastique peut se retrouver à des proportions variant de 24% à plus de 90% de la composition des algues marines échoués (Barnes et Milner, 2005).

3.3.2. Identification des algues

Dans le cadre du projet, six espèces d'algues ont été identifiées parmi les neuf échantillons d'algues dérivantes récupérées, soient trois fucales, deux laminariales et une palmariale (Tableau 4).

Tableau 4 : Noms vernaculaires des espèces d'algues récoltées

Type d'algues	Ordre	Nom latin	Nom vernaculaire
Algue brune	Fucale	<i>Ascophyllum nodosum</i>	Ascophylle noueuse ou goémon noir
		<i>Fucus vesiculosus</i>	Fucus vésiculeux
		<i>Fucus edentatus</i>	Fucus denté
	Laminariale	<i>Saccharina latissima</i>	Laminaire sucrée ou Kombu royal
		<i>Laminaria digitata</i>	Laminaire digitée ou Kombu ou laminaire flexible
Algue rouge	Palmariale	<i>Palmaria palmata</i>	Main-de-mer palmée

Chaque échantillon a présenté un assemblage distinct d'algue de différentes espèces (Tableau 5). Essentiellement, deux types d'assemblages ont été identifiés :

- Assemblage A : Dominance Laminariale (> 60% d'algues de type laminaire dans le mélange)
- Assemblage B : Dominance Fucale (> 60% d'algues de type fucale dans le mélange)

Tableau 5 : Liste détaillée des lots prélevés d'algues dérivantes

Échantillon	Proportion des différentes espèces d'algues	Aspect visuel	Type d'assemblage
1	<i>Saccharina latissima</i> (90 %), <i>Laminaria digitata</i> (9 %), <i>Palmaria palmata</i> (1 %)	Substrat déchiqueté en fines particules d'apparence brunâtre	A
2	<i>Fucus vesiculosus</i> (20 %), <i>Fucus edentatus</i> (80 %)	Substrat déchiqueté en fines particules d'apparence brunâtre	B
3	<i>Fucus vesiculosus</i> (60 %), <i>Fucus edentatus</i> (25 %), <i>Ascophyllum nodosum</i> (15 %)	Substrat déchiqueté en fines particules d'apparence verdâtre	B
4	<i>Fucus vesiculosus</i> (70 %), <i>Fucus edentatus</i> (10 %), <i>Saccharina latissima</i> (14 %), <i>Ascophyllum nodosum</i> (5 %), <i>Palmaria palmata</i> (1 %)	Substrat déchiqueté en fines particules d'apparence brunâtre	B
5	<i>Fucus vesiculosus</i> (30 %), <i>Fucus edentatus</i> (70 %)	Substrat déchiqueté en fines particules d'apparence verdâtre	B
6	<i>Fucus edentatus</i> (80 %), mix Laminaires (20 %)	Substrat déchiqueté en fines particules d'apparence oscillant entre le verdâtre et brunâtre	B
7	<i>Fucus vesiculosus</i> (35 %), <i>Fucus edentatus</i> (35 %), <i>Saccharina latissima</i> (30 %)	Substrat déchiqueté en fines particules d'apparence verdâtre	B
8	<i>Saccharina latissima</i> (90 %), <i>Laminaria digitata</i> (10 %)	Substrat déchiqueté en fines particules d'apparence oscillant entre le verdâtre et brunâtre	A
9	<i>Saccharina latissima</i> (90 %), <i>Laminaria digitata</i> (10 %)	Substrat déchiqueté en fines particules d'apparence verdâtre	A

3.3.3. Caractérisation microbiologique

Les échantillons de poudre d'algues dérivantes présentent une très grande variabilité au niveau de leur charge microbienne totale (Tableau 6). Les résultats des décomptes totaux aérobiques varient de 270 ufc/g à 460 000 ufc/g parmi les neuf échantillons analysés. Du côté de la charge en levures et moisissures, les décomptes varient de 40 ufc/g à 84 000 ufc/g au sein des neuf échantillons. Aucune tendance entre les types d'assemblages n'a été observée. Les valeurs de dénombrement bactérien total et de dénombrement de levures et moisissures sont relativement faibles pour la majorité des lots analysés, mais plus élevées dans les échantillons 2, 4 et 9.

Tableau 6 : Décompte microbien sur les échantillons d'algues dérivantes

<i>Échantillon</i>	<i>Type d'assemblage</i>	<i>Compte total aérobique (ufc/g)</i>	<i>Compte levures et moisissures (ufc/g)</i>
1	A	400	60
2	B	460 000	84 000
3	B	2000	2200
4	B	45 000	9000
5	B	270	40
6	B	4600	680
7	B	370	150
8	A	7000	400
9	A	8900	7400

3.3.4. Caractérisation chimique

Les résultats de la caractérisation chimique sont présentés dans les deux sections suivantes (3.3.4.1 et 3.3.4.2). Chaque tableau de résultats est accompagné d'observations générales sur les résultats obtenus.

3.3.5. Caractérisation minérale et métaux lourds

Les tableaux 7 à 13 présentent les résultats du dosage des cendres, des oligo-éléments et des minéraux. Quant aux résultats du dosage de l'iode et des chlorures, ils sont résumés dans les tableaux 11 et 12, respectivement. Les teneurs en métaux lourds sont présentées dans le tableau 13. Toutes les analyses ont été effectuées en duplicata et les tableaux présentent la moyenne des deux valeurs obtenues.

Tableau 7 : Résultats de l'analyse du contenu en cendres

<i>Échantillon</i>	<i>Type d'assemblage</i>	<i>Teneur en cendres (%p/p)</i>
1	A	33,88
2	B	22,63
3	B	22,29
4	B	26,67
5	B	23,25
6	B	27,41
7	B	25,31
8	A	27,69
9	A	23,04

La teneur en cendres varie de 22 à près de 34 % entre les neuf échantillons. Aucune tendance entre les types d'assemblage n'a été observée.

Tableau 8 : Résultats de l'analyse des minéraux - Macro-éléments essentiels (ppm)

<i>Échantillon</i> <i>Assemblage</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
	A	B	B	B	B	B	B	A	A
<i>Élément</i>									
<i>Na</i>	37884	28098	33136	26060	29208	23186	25755	31882	20679
<i>Mg</i>	8053	10139	8564	9079	8540	7514	7328	7069	5930
<i>P</i>	4121	1272	1304	1485	1596	1667	1795	2067	1814
<i>K</i>	82570	20843	29438	23805	29598	29041	32203	66629	55785
<i>Ca</i>	10698	16208	11545	14671	11951	13159	12052	15104	17495

Les résultats obtenus pour chaque macro-élément sont du même ordre de grandeur pour les neuf échantillons, à l'exception du potassium (K) pour lequel les résultats sont plus variables.

Les concentrations sont élevées pour le sodium (Na), le potassium (K) et le calcium (Ca) avec des teneurs variant de 20 679 à 37 884 ppm, de 20 843 à 82 570 ppm et de 10 698 à 17 495 ppm pour le Na, le K et le Ca respectivement. Aucune tendance entre les types d'assemblages n'a été observée pour le Na et le Ca. Toutefois, pour le K, les échantillons de l'assemblage A semblent montrer des teneurs plus élevées que pour les échantillons de l'assemblage B. Au niveau du magnésium (Mg), les teneurs varient de 5930 ppm à 10 139 ppm sans tendance entre les assemblages. Pour le phosphore (P), les teneurs varient de 1272 ppm à 4121 ppm. Au niveau des assemblages, les échantillons de l'assemblage A semblent présenter des teneurs en phosphore plus élevée versus les échantillons de l'assemblage B.

Tableau 9 : Résultats de l'analyse des minéraux pour les oligo-éléments essentiels
(ppm)

Échantillon Assemblage	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	A	B	B	B	B	B	B	A	A
<i>B</i>	158	290	161	282	132	175	100	114	95
<i>Cr</i>	2	3	1	3	2	4	2	7	3
<i>Mn</i>	29	212	138	86	74	81	62	17	6
<i>Fe</i>	997	972	466	1209	502	950	715	509	177
<i>Co</i>	0,5	2	1	1	1	1	1	0,5	0,2
<i>Ni</i>	1	8	5	10	5	10	5	6	3
<i>Cu</i>	3	13	3	6	6	3	3	3	2
<i>Zn</i>	29	24	19	25	29	26	19	29	36
<i>V</i>	5	3	1	3	1	3	2	2	2
<i>Se</i>	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3
<i>Mo</i>	0,3	0,9	0,5	0,9	0,4	0,5	0,2	0,3	0,2

L'oligo-élément essentiel le plus abondant est le fer (Fe). Les résultats varient entre 466 ppm et 1209 ppm. La teneur en bore (B) des échantillons se situe entre 95 et 290 ppm. La teneur en manganèse (Mn) varie de 6 à 212 ppm pour les neuf échantillons. La teneur en zinc (Zn) varie de 19 à 36 ppm pour les 9 échantillons. Le chrome (Cr), le nickel (Ni), le cuivre (Cu) et le vanadium (V) présentent des teneurs faibles (~1-10 ppm) pour tous les échantillons. Autrement, les éléments tels le cobalt (Co), le sélénium (Se) et le molybdène (Mo) sont très peu abondants (< 1ppm) pour les neuf échantillons. Globalement, au niveau des assemblage aucune tendance marquée n'a été observée mise à

part pour le manganèse et le cobalt où l'assemblage A semble présenter une teneur plus faible que pour l'assemblage B.

Tableau 10 : Résultats de l'analyse des minéraux - autres minéraux (ppm)

Élément	Échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Assemblage	A	B	B	B	B	B	B	A	A
Li		1	0,9	0,6	1	0,9	1	1	1	0,5
Al		789	912	291	647	300	551	600	331	87
Ag		0,05	0,1	0,09	0,08	0,1	0,08	0,06	0,03	0,02
Sb		0,03	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,04	0,08	0,03
Ba		23	54	24	33	26	32	28	15	14
Tl		0,01	0,01	0,009	0,009	0,009	0,01	0,01	0,006	0,004

Les échantillons contiennent une quantité notable d'aluminium (Al) variant entre 87 ppm et 912 ppm pour les neuf échantillons. Les éléments tels le lithium (Li), l'argent (Ag), l'antimoine (Sb) et le thallium (Tl) sont présents en très faible quantité (≤ 1 ppm).

Tableau 11 : Résultats de l'analyse du contenu en iode (ppm)

Élément	Échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Assemblage	A	B	B	B	B	B	B	A	A
I		933	135	233	355	418	439	485	916	1077

Les échantillons de l'assemblage A contiennent une plus grande quantité d'iode (~1000 ppm) que pour les échantillons de l'assemblage B, ce qui est

typique pour un assemblage riche en laminaire (Ar Gall et al., 2004; Schiener et al., 2014). La différence est d'au moins le double avec les autres échantillons qui obtiennent des résultats entre 135 et 485 ppm.

Tableau 12 : Résultats de l'analyse du contenu en chlorures (% p/p sous forme NaCl)

Échantillon Assemblage Élément	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		A	B	B	B	B	B	B	A
Chlorures	1,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	1,6	0,9

Au niveau de la teneur en chlorures (Tableau 12), les neuf échantillons présentent des teneurs dans le même ordre de grandeur (0,5 à 1,6 % p/p). Les échantillons des assemblages A présentent toutefois des teneurs plus élevées (0,9 à 1,6% p/p) que pour les échantillons d'assemblage B (0,5% p/p).

Tableau 13 : Résultats de l'analyse des métaux lourds (ppm)

Échantillon Assemblage Élément	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		A	B	B	B	B	B	B	A
As	61	18	23	21	26	24	28	45	41
Hg	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
Pb	0,6	0,7	0,3	0,6	0,6	0,6	0,3	0,2	0,2
Cd	1	0,9	0,8	0,6	0,8	0,8	0,9	0,9	1

Les teneurs en cadmium, mercure, plomb sont très faibles dans tous les échantillons analysés (Tableau 13). Aucune tendance entre les assemblages n'a été observée pour le Hg, Pb et le Cd. Les niveaux d'arsenic total détectés dans

les différents lots d'algues sont typiques (Taylor et al, 2017). Les échantillons de l'assemblage A semblent présenter une teneur en arsenic plus élevée que pour les échantillons de l'assemblage B. La majeure partie de cet arsenic existe sous forme organique. Il est important de mentionner que les formes inorganiques d'arsenic As (III) et As (V) sont très toxiques alors que les formes organiques (arsénosucres, arsénobétaines et autres) sont généralement considérées comme non-toxiques et représentent majoritairement la forme d'arsenic retrouvée dans les algues (Le et al., 1994; Miguens-Rodriguez et al., 2002; Tukai et al. 2002; McSheehy et al., 2003; Feldmann et Krupp; 2011). Les différentes formes d'arsenic peuvent être déterminées et confirmées par des analyses de spéciation par HPLC-ICP-MS (Nearing et al., 2014).

3.3.6. Caractérisation organique

Les résultats de chacune des analyses pour les composés organique (sucres réducteurs, alginates, polyphénols, fibres brutes et protéines) sont présentés par les tableaux 14 à 18. Toutes les analyses ont été effectuées en duplicata sur chaque échantillon et les résultats présentent la moyenne des deux valeurs obtenues.

Tableau 14 : Résultats de l'analyse relative du contenu en sucres réducteurs

<i>Échantillon</i>	<i>Type d'assemblage</i>	<i>Teneur relative en sucres réducteurs (% p/p)</i>
1	A	19,0
2	B	22,6
3	B	19,1
4	B	22,1
5	B	22,2
6	B	21,8
7	B	17,5
8	A	18,9
9	A	20,8

Les résultats sont similaires entre les neuf échantillons (~20% p/p) et ne présentent pas de différence entre les assemblages. Les valeurs reflètent les teneurs comparatives en sucres réducteurs dans la composition de polysaccharides de base et ne permettent pas de déceler des niveaux de dégradation avancé du contenu en polysaccharides. Lorsque les algues sont dégradées par les bactéries, les composés contenus dans les parois cellulaires, dont les polysaccharides qui sont parmi les composés majoritaires, sont lessivés vers l'extérieur de l'algue (Koop, et al., 1982; Kloareg et Quatrano, 1988). Cette destruction de la paroi cellulaire est effectuée par l'action d'enzymes spécifiques qui permet aux bactéries hétérotrophes d'avoir accès à cette importante source de carbones que sont les polysaccharides algaux (Martin et al, 2014).

Tableau 15 : Résultats de l'analyse du contenu en polyphénols

<i>Échantillon</i>	<i>Type d'assemblage</i>	<i>Teneur en polyphénols (% p/p)</i>
1	A	0,1
2	B	0,6
3	B	2,9
4	B	0,3
5	B	1,5
6	B	1,2
7	B	2,1
8	A	0,5
9	A	0,7

La teneur en polyphénols varie de 0,1% à 2,9% (p/p). Globalement, les lots de l'assemblage A semblent présenter des teneurs plus faibles que les lots d'assemblage B.

Tableau 16 : Résultats de l'analyse des alginates

<i>Échantillon</i>	<i>Type d'assemblage</i>	<i>Teneur en alginates (% p/p)</i>
1	A	19,4
2	B	20,4
3	B	21,2
4	B	16,1
5	B	25,1
6	B	19,8
7	B	23,6
8	A	23,7
9	A	29,4

Au niveau de la teneur en alginates, elle varie de 16,1 à 29,4 % (p/p). De plus, aucune tendance n'est observable entre les deux assemblages. Tout comme pour les sucres réducteurs, les teneurs en alginates mesurées reflètent les teneurs comparatives signifiant qu'aucun signe évident de dégradation n'a été observé. En effet, les alginates sont aussi lessivés lors du processus de dégradation par les bactéries (Koop et al., 1982).

Tableau 17 : Résultats de l'analyse du contenu en azote total (protéines)

Échantillon	Type d'assemblage	Teneur en azote (%p/p)	Protéines (% p/p)
1	A	2,05	10,3
2	B	1,41	7,1
3	B	1,15	5,6
4	B	1,34	6,7
5	B	1,38	6,9
6	B	1,51	7,6
7	B	1,35	6,8
8	A	1,12	5,6
9	A	1,12	5,6

La concentration en protéines dosée pour les neuf échantillons varie entre 5,6 et 10,3%. Aucune tendance n'est observable entre les deux types d'assemblages.

Tableau 18 : Résultats de l'analyse des fibres brutes

Échantillon	Type d'assemblage	Fibres brutes % p/p
1	A	9,5
2	B	2,5
3	B	0,6
4	B	10,1
5	B	2,2
6	B	3,1
7	B	7,5

8	A	11,0
9	A	10,7

Une grande variation est observée au niveau de la teneur en fibres des neuf échantillons qui varient de 0,6% à 11,0% (p/p). Bien que les teneurs des deux assemblages soient dans le même ordre de grandeur, les lots d'assemblage B présentent plus de variabilité entre eux que pour les lots de l'assemblage A.

3.3.7. Comparaison avec la composition d'algues monospécifique

Les données analytiques obtenues ont été comparées avec des données de la littérature scientifique pour des lots d'algues fraîches composés uniquement d'une seule espèce (Tableau 19). Pour l'assemblage A - Laminariale, des données analytiques de *Saccharina latissima* ont été utilisées. Concernant l'assemblage B - Fucale, des données analytiques de *Fucus vesiculosus* ont été utilisées. La sélection des algues de référence a été effectuée en fonction de la composition des lots d'algues dérivantes récoltés dans le cadre du projet ainsi que de l'accessibilité à des données en lien avec les espèces identifiées.

Tableau 19 : Comparatif de la composition biochimique d'algues de référence et des lots d'algues dérivantes

Composé	Algue Laminariale¹²³⁴⁵⁶	Assemblage Laminariale (A)	Algue Fucale⁷⁸⁹¹⁰¹¹¹²¹³¹⁴	Assemblage Fucale (B)
<i>Protéines</i>	6-26 %	<>	6-17 %	<>
<i>Cendres</i>	8,7-41,2 %	<>	41-36 %	<>
<i>Na</i>	25 000-52 500 ppm	<>	460-54 690 ppm	<>
<i>Mg</i>	6000-7500 ppm	<>	4300-9940 ppm	<>
<i>P</i>	1440-4400 ppm	<>	840-1936 ppm	<>
<i>K</i>	15 000-82 100 ppm	<	2000-43 220 ppm	<>
<i>Ca</i>	7900- 109 300	<>	1200-21 500 ppm	<>
<i>Fe</i>	21-434 ppm	>	42-490 ppm	>
<i>I</i>	1590-4200 ppm	<	130-730 ppm	<>
<i>Sucres réducteurs</i>	8,2-76 % [#]	<>	2,3-66 % [#]	<>
<i>Fibres brutes</i>	30 %	<	4-59 %	<>
<i>Alginates</i>	0,6-24,6 %	<>	7-59 %	<>
<i>Polyphénols totaux</i>	0,07-0,24 %	>	2-6 %	<
<i>As*</i>	23,3-92,5 ppm	<>	14-327 ppm	<>
<i>Cd*</i>	0,07-2,64 ppm	<>	0,8-10 ppm	<>
<i>Hg*</i>	0,01-0,1 ppm	<>	0,01-11 ppm	<>
<i>Pb*</i>	0,07-4,5 ppm	<>	1,5-12 ppm	<

[#] : comprend des données de contenu en laminaranes qui contient des sucres réducteurs et des données de sucres totaux

* : Contaminants (métaux lourds)

< : teneur plus faible que les données de la littérature scientifique

> : teneur plus élevée que les données de la littérature scientifique

<> : teneur dans l'intervalle des données de la littérature scientifique

¹ Marinho et al, 2019

² Nielsen et al, 2016

³ Olsson et al, 2020

⁴ Pereira et al, 2011

⁵ Sharma et al, 2018

⁶ Schiener et al., 2015

⁷ Balina et al, 2016

⁸ Connan et al, 2004

⁹ Catarino et al, 2018

¹⁰ Lorenzo et al, 2017

¹¹ Maehre et al, 2014

¹² Olsson et al, 2020

¹³ Truus et al, 2001

¹⁴ Graiff et al., 2015

Globalement, les deux assemblages d'algues dérivantes récoltées présentent une composition biochimique très similaire aux données de la littérature pour des algues de référence. Quelques différences ont toutefois été observées au niveau de la teneur des minéraux et oligo-éléments (potassium, fer et iode), en sucres réducteurs, en fibres brutes et en polyphénols totaux.

Au niveau des contaminants (impuretés élémentaires), les lots d'algues dérivantes des deux assemblages présentent des teneurs dans le même ordre de grandeur que les algues de référence.

IV. ÉVALUATION DES COÛTS DE RÉCUPÉRATION ET DE TRAITEMENT DES ALGUES DÉRIVANTES

Une évaluation préliminaire des coûts variables de récupération en mer et de traitement d'algues dérivantes a été effectuée en utilisant différentes hypothèses de travail détaillées dans la liste suivante. Les coûts d'immobilisation, d'amortissement, de maintenance et les frais généraux n'ont pas été considérés.

1. Récupération des algues en mer

- Utilisation d'un bateau de pêche commerciale de 50 pieds de longueur équipé d'un treuil avec grappin.
- Bateau utilisé hors des périodes de pêches standards avec un équipage de 3 personnes.
- Déplacement aller-retour de 40 milles nautiques (74 km) maximum à partir d'un port d'attache.
- Sortie en mer d'une durée totale de 8 heures maximum.
- Récupération des algues avec un treuil équipé d'un grappin.
- Capacité estimée de chargement du bateau : 12 000 kg d'algues marines humides.
- Transfert des algues avec le treuil et le grappin dans un conteneur de 20 pieds au quai.

- Coûts projetés : 1200 \$ / jour
- Quantité d'algues humides récupérées : 12 000 kg
- Taux d'humidité initial des algues : 85 %
- Quantité équivalente d'algues séchées à 10 % humidité : 2000 kg
- Coût de récupération d'algues humides : 0,10 \$ / kg humide
- Coût de récupération en base sèche : 0,60 \$ / kg sec

2. Transport terrestre des algues en conteneur

- Conteneur *roll-off* de 20 pieds (1280 pieds cubes).
- Capacité de chargement : 12 000 kg d'algues humides.
- Distance à parcourir entre le quai et l'usine : 50 km maximum.

Coûts projetés : 150 \$ / conteneur

Quantité d'algues humides transportées: 12 000 kg

Quantité équivalente d'algues séchées à 10 % humidité : 2000 kg

Coût de transport d'algues humides : 0,013 \$ / kg humide

Coût de transport en base sèche : 0,08 \$ / kg sec

3. Traitement en usine

- Équipe de 3 personnes pour effectuer le triage, le lavage, l'inspection, le séchage et le conditionnement.
- Séchoir d'une capacité de 1000 à 2000 kg d'algues humides par heure.
- Lot de 12 000 kg d'algues humides.
- Consommation de propane : 0,2 L par kg d'eau à évaporer.
- Prix du propane à 0,45 \$ / L.
- Taux d'humidité initial des algues : 85 %.
- Quantité équivalente d'algues séchées à 10 % humidité : 2000 kg.

Coûts projetés : 1900 \$ / jour

Coût de traitement en base sèche : 0,95 \$ / kg sec

4. Coûts variables totaux

Les coûts variables totaux projetés pour la récupération en mer, le séchage et le conditionnement des algues dérivantes sont estimés à 1,63 \$ / kg sec selon les hypothèses de travail présentées. Ce scénario est réaliste, mais il est clair qu'une variation de la quantité d'algues récupérées par bateau ou bien de la teneur en humidité dans les algues récupérées par exemple aurait un impact significatif sur le coût global projeté.

V. ÉVALUATION SOMMAIRE DE LA QUALITÉ ET DU POTENTIEL COMMERCIAL DES ALGUES DÉRIVANTES

Les résultats analytiques obtenus démontrent que les différents lots d'algues dérivantes ont une composition biochimique globale similaire aux données d'algues de référence provenant d'espèce unique fraîche. Les teneurs obtenues en alginates, protéines, fibres brutes, cendres et polyphénols sont conformes aux valeurs retrouvées dans la littérature. La technique analytique utilisée peut avoir une incidence sur le résultat obtenu pour certains paramètres tels que les polyphénols et les alginates.

Les profils d'éléments métalliques et de métaux lourds sont également conformes aux valeurs de référence et démontrent bien le très faible taux de contaminants des différents lots d'algues provenant des eaux québécoises.

Les analyses de teneurs relatives de sucres réducteurs et en alginates n'ont pas permis de déceler des niveaux de dégradation avancé du contenu en polysaccharides suggérant que les lots analysés possédaient un niveau convenable de qualité pour certains types d'applications

Une plus grande variabilité a été observée au niveau des résultats d'analyses microbiologiques. Les valeurs de dénombrement total aérobie et de dénombrement de levures / moisissures sont relativement basses pour la majorité des lots, mais plus élevées pour 3 des 9 lots analysés. Il est clair que ces résultats sont directement associés à l'historique de dérive des bancs d'algues en mer et aux conditions météorologiques qui peuvent ou non favoriser un développement bactérien accru. Le délai entre la récupération en mer et le traitement en usine peut aussi facilement expliquer certaines de ces valeurs.

L'utilisation d'une température de séchage plus élevée (> 90 °C) pourrait permettre de diminuer grandement la charge microbienne dans la mesure où le marché visé ne requiert pas un contenu spécifique en vitamines, pigments et autres composés plus sensibles.

La valorisation du contenu en polysaccharides algaux (alginates, laminaranes et fucoïdanes) est probablement l'avenue technico-commerciale la plus intéressante à envisager pour la valorisation des algues dérivantes, considérant entre autres les teneurs mesurées en alginate. Ces composés sont chimiquement stables et possèdent une bonne résistance à la dégradation bactérienne.

Les applications commerciales nécessitant des garanties de composition de composés sensibles (vitamines, pigments, hormones de croissance) ou bien des propriétés organoleptiques optimales pour la consommation humaine ne doivent pas être ciblées pour la valorisation des algues dérivantes. Des applications industrielles basées sur le contenu en polysaccharides, en minéraux ou sur la valeur fertilisante sont plutôt recommandées. Les applications suivantes seraient des cibles commerciales potentielles : matière première pour l'extraction de polysaccharides algaux (alginates, laminaranes et fucoïdanes); ingrédient pour l'alimentation du bétail et des animaux de compagnie (source de minéraux et polysaccharides prébiotiques); ingrédient pour la fabrication d'engrais et amendements de sol (source de matière organique et d'éléments fertilisants). Le développement et la commercialisation de polysaccharides purifiés ou de nouveaux produits dérivés serait potentiellement envisageable dans différents segments de marché incluant des applications nutraceutiques, cosmétiques et industrielles.

Considérant la qualité globale de composition observée dans les différents lots d'algues dérivantes et les marchés potentiels pouvant être ciblés, il serait tout à fait envisageable de poursuivre la structuration d'une filière de valorisation en travaillant avec des coûts variables de récupération en mer et de

conditionnement inférieurs à 2,00 \$ / kg sec pour des assemblages riches en fucus ou en laminaires. À titre comparatif, le coût de fabrication de farine de fucus frais pur ou de laminaire frais pur récolté en plongée et destiné à des applications alimentaires excède facilement les 50 \$ / kg sec. La valeur commerciale en vrac de farines d'algues de qualité industrielle avec une composition majoritaire en fucus ou en laminaire peut être estimée comme étant supérieure à 5 \$ / kg sec. L'intégration d'étapes subséquentes de transformation secondaire et tertiaire de ces matières premières apporterait une valeur ajoutée et permettrait de décupler grandement le potentiel économique de cette biomasse.

VI. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La caractérisation des algues dérivantes récupérées dans diverses localisations de l'estuaire et du Golfe du Saint-Laurent a permis de démontrer que ces algues possèdent une qualité globale suffisamment élevée pour répondre aux exigences de différents marchés vu leur composition globale similaire et équivalente à celle des algues pures et fraîches.

L'évaluation des coûts variables de récupération en mer, de séchage et de conditionnement des algues dérivantes a permis de valider que la séquence d'opération envisagée pourrait être viable économiquement.

La qualité et le coût des algues dérivantes seront intimement associés aux enjeux de détection et de prévision des arrachages, à l'efficacité de la logistique de récupération en mer et à l'intégration d'une capacité industrielle de séchage à proximité. La mise en commun de différentes expertises (hydrographie, télédétection, modélisation de dérive océanique) et l'implication d'intervenants ayant des activités complémentaires (groupes de pêcheurs, industriels, centres de recherche, milieu académique) sera nécessaire à la structuration d'une filière de valorisation d'algues marines dérivantes.

Considérant que les validations préliminaires réalisées dans le cadre de ce projet sont très positives, il est donc recommandé d'entreprendre des démarches pour la planification d'une phase 2 au projet de mise en place d'une filière de valorisation des algues dérivantes dans le Québec maritime.

La phase 2 de développement comprendrait diverses activités permettant de structurer la mise en place de la filière :

- Le développement, l'amélioration et la validation des techniques d'observation satellitaire pour la cartographie des algues submergées et de des algues dérivantes adapté au système Saint-Laurent.

- Utilisation de la télédétection satellitaire et d'un modèle de dérive océanique pour le repérage des bancs d'algues dérivantes et l'optimisation de la logistique de récupération. L'intégration de ces informations pourrait faire l'objet du développement d'une application informatique associé à la démonstration d'un avantage économique.
- Évaluation de différentes méthodes de captation et de transbordement d'algues dérivantes (chalut, grappin, scoubidou, etc.).
- Mise en place d'un cahier de charge qui permettrait d'harmoniser les pratiques de récolte, d'entreposage et de conditionnement pour assurer une qualité optimale des algues de la récolte en mer jusqu'au traitement en usine.
- Caractérisation exhaustive des polysaccharides et ajout des analyses de fucoïdanes, laminaranes et mannitol, vu la valeur ajoutée connue de ces différentes composantes.
- Caractérisation microbiologique exhaustive incluant la détection de pathogènes et les coliformes fécaux.
- Réalisation d'analyses de spéciation des différentes formes d'arsenic.
- Identification et validation de différentes stratégies de contrôle de la charge microbienne à la suite de la récupération des algues en mer.
- Validation des coûts de récupération et traitement de lots industriels d'algues dérivantes.
- Mise en place d'un outil permettant d'effectuer une évaluation rapide et fiable de la qualité des algues in situ avant de les récupérer.
- Évaluation technico-économique de différents procédés d'extraction de polysaccharides algaux.

VII. RÉFÉRENCES

- Ar Gall, E., Küpper, F.C. et Kloareg, B., 2004. A survey of iodine content in *Laminaria digitata*. *Botanica Marina* 47: 30-37.
- Balina, K, Romagnoli, F. et Blumberga, D., 2016. Chemical Composition and Potential Use of *Fucus vesiculosus* from Gulf of Riga. *Energy Procedia*, 95: 43-49.
- Barnes, D.K.A. et Milner, P., 2005. Drifting plastic and its consequences for sessile organism dispersal in the Atlantic Ocean. *Marine Biology*, 146: 815-825
- Bennion, M., Fisher, J., Yesson, C. et Brodie, J., 2019. Remote Sensing of Kelp (Laminariales, Ochrophyta): Monitoring Tools and Implications for Wild Harvesting. *Reviews In Fisheries Science & Aquaculture*, 27: 127-141.
- Bewley, M., Douillard, B., Nourani-Vatani, N., Friedman, A., Pizarro, O., et Williams, S., 2012. Automated species detection: an experimental approach to kelp detection from seafloor AUV images. In: *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation*, Victoria University of Wellington, New Zealand.
- Catarino, M.D., Silva, A.M.S. et Cardoso, S.M., 2018. Phycochemical Constituents and Biological Activities of *Fucus* spp. *Marine Drugs*, 16: 1-34.
- Cavanaugh, K.C., Siegel, D.A., Kinlan, B.P. et Reed, D.C., 2010. Scaling giant kelp field measurements to regional scales using satellite observations. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 403: 13-27.
- Centre de Géomatique du Québec (CGQ), 2014. Télédétection aérienne d'algues littorales. N° de projet : CGQ_0398.
- Chabot, R. et Rossignol, A., 2003. Algues et faune du littoral du Saint-Laurent maritime : Guide d'identification. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Rimouski; Pêches et Océans Canada (Institut Maurice-Lamontagne), Mont-Joli. 113 pages.
- Connan, S., Goulard, F., Stiger, V., Deslandes, E. et Gall, E.A., 2004. Interspecific and temporal variation in phlorotannin levels in an assemblage of brown algae. *Bot. Mar.*, 47: 410-416.

- DuBois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A. et Smith, F., 1956. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 28: 350–356.
- European Space Agency, 2019. Monitoring sargassum drift with Sentinel-3 and MODIS. <https://eo4society.esa.int/2019/04/16/mitigating-sargassum-rafts-impact-with-sentinel-3/> Consultée le 2020NO30.
- Feldmann, J. et Krupp, E.M., 2011. Critical review or scientific opinion paper: Arsenosugars—a class of benign arsenic species or justification for developing partly speciated arsenic fractionation in foodstuffs? *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 399: 1735-1741.
- Graiff, A., Bartsch, I., Ruth, W., Wahl, M. et Karsten, U., 2015. Season Exerts Differential Effects of Ocean Acidification and Warming on Growth and Carbon Metabolism of the Seaweed *Fucus vesiculosus* in the Western Baltic Sea. *Front. Mar. Sci.*, 2: 1-18.
- Koop, K., Newell, R.C. et Lucas, M.I., 1982. Biodegradation and Carbon Flow Based on Kelp (*Ecklonia maxima*) Debris in a Sandy Beach Microcosm, *Marine Ecology Progress Series*, 7: 315-326.
- Le, S.X.C., Cullen, W.R. et Reimer, K.J., 1994. Speciation of arsenic compounds in some marine organisms. *Environ. Sci. Technol.* 28: 1598-1604.
- Leblanc, M.-J. et Rondeau, M.-H., 2005. Projet d'évaluation du potentiel de la ressource en algues échouées en Gaspésie pour des fins d'élevage de spécialité : phase II. Rapport final. Centre collégial de transfert de technologie des pêches, Centre spécialisé des pêches (Grande-Rivière, Québec), 43 pages.
- Lorenzo, J.M., Agregán, R., Munekata, P.E.S., Franco, D., Carballo, J., Sahin, S., Lacomba, R. et Barba, F.J., 2017. Proximate Composition and Nutritional Value of Three Macroalgae: *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus* and *Bifurcaria bifurcata*. *Marine Drugs*, 15: 1-11.
- Mæhre, H.K., Malde, M.K., Eilertsen, K.-E. et Elvevoll, E.O., 2014. Characterization of protein, lipid and mineral contents in common Norwegian seaweeds and evaluation of their potential as food and feed. *J. Sci. Food Agric.*, 94: 3281-3290.
- Marinho, G.S., Sørensen, A.-D.M., Safafar, H., Pedersen, A.H. et Holdt, S.L., 2019. Antioxidant content and activity of the seaweed *Saccharina latissima*: a seasonal perspective. *Journal of Applied Phycology*, 31: 1343-1354.
- McGonigle, C., Grabowski, J.H., Brown, C.J., Weber, T.C. et Quinn, R., 2011. Detection of deep water benthic macroalgae using image-based

- classification techniques on multibeam backscatter at Cashes Ledge, Gulf of Maine, USA. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 91: 87-101.
- McSheehy, S., Szpunar, J., Morabito, R., Quevauviller, P., 2003. The speciation of arsenic in biological tissues and the certification of reference materials for quality control. *Trac. Trend. Anal. Chem.* 22, 191–209.
- Martin M., Portetelle D., Michel G., Vandenberg M., 2014. Microorganisms living on macroalgae: diversity, interactions, and biotechnological applications. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 98: 2917-2935.
- Miguens-Rodriguez, M., Pickford, R., Thomas-Oates, J.E. et Pergantis, S.A., 2002. Arsenosugar identification in seaweed extracts using high-performance liquid chromatography/electrospray ion trap mass spectrometry. *Rapid Commun. Mass Sp.* 16: 323-331.
- Nearing, M.M., Koch, I et Reimer, K.J., 2014. Complementary arsenic speciation methods: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 99: 150-162.
- Nielsen, M.M., Manns, D., D'Este, M., Krause-Jensen, D., Rasmussen, M.B., Larsen, M.M., Alvarado-Morales, M., Angelidaki, I. et Bruhn, A., 2016. Variation in biochemical composition of *Saccharina latissima* and *Laminaria digitata* along an estuarine salinity gradient in inner Danish waters. *Algal Research* 13: 235-245.
- Pereira, L., 2011. Chapter 2: A Review of The Nutrient Composition of Selected Edible Seaweeds. Dans: Pomin, V.H., Ed., *Seaweed: Ecology, Nutrient Composition and Medicinal Uses*, Nova Science Publishers, Inc., Coimbra, 15-47.
- Olsson, J., Toth, G.B. et Albers, E., 2020. Biochemical composition of red, green and brown seaweeds on the Swedish west coast. *Journal of Applied Phycology*, 32: 3305-3317.
- Rothäusler, E., Corell, H. et Jormalainen, V., 2015. Abundance and dispersal trajectories of floating *Fucus vesiculosus* in the northern Baltic Sea. *Limnology and Oceanography* 60, 2173-2184.
- Sharma, S., Neves, L., Funderud, J., Mydland, L.T., Øverland, M. et Horn, S.J., 2018. Seasonal and depth variations in the chemical composition of cultivated *Saccharina latissima*. *Algal Research* 32: 107-112.
- Schiener P., Black, K.D., Stanley, M.S. et Green, D.H., 2014. The seasonal variation in the chemical composition of the kelp species *Laminaria digitata*, *Laminaria hyperborea*, *Saccharina latissima* and *Alaria esculenta*. *J. Appl. Phycol.*, 27: 363-373.

- Strong, J.A. et Elliott, M., 2017. The value of remote sensing techniques in supporting effective extrapolation across multiple marine spatial scales. *Mar. Pollut. Bull.*, 116: 405-419.
- Taylor, V.F. Goodale, B., Raab, A., Schwerdtle, T., Reimer, K., Conklin, S., Karagas, M.R., Francesconi, K.A., 2017. Human Exposure to Organic Arsenic Species from Seafood. *Science of the Total Environment*. 580: 266-282.
- Truus, K., Vaher, M. et Taure, I., 2001. Algal Biomass from *Fucus vesiculosus* (Phaeophyta): Investigation of the Mineral and Alginate Components. *Proc. Estonian Acad. Sci. Chem.*, 50: 95-103.
- Tukai, R., Maher, W.A., McNaught, I.J. et Ellwood, M.J., 2002. Measurement of arsenic species in marine macroalgae by microwave-assisted extraction and high performance liquid chromatography inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 457: 173-185.
- Young, M., Ierodiaconou, D. et Womersley, T., 2015. Forests of the sea: predictive habitat modelling to assess the abundance of canopy forming kelp forests on temperate reefs. *Remote Sens. Environ.*, 170: 178-187.
- Zavalas, R., Ierodiaconou, D., Ryan, D., Rattray, A. et Monk, J., 2014. Habitat classification of temperate marine macroalgal communities using bathymetric LiDAR. *Remote Sens.*, 6: 2154-2175.
- Zhi, H., Siwabessy, J. Nichol, S.L. et Brooke, B.P., 2014. Predictive mapping of seabed substrata using high-resolution multibeam sonar data: a case study from a shelf with complex geomorphology. *Mar. Geol.*, 357: 37-52.

RÉVISION	DATE	MODIFICATIONS
0	2020-DE-31	Première émission