

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE DE LA PRODUCTION DE
MICROALGUES À PARTIR D'UN MÉLANGE D'EAUX USÉES DU PARC
INDUSTRIEL DE VICTORIAVILLE POUR OBTENIR DES BIOPRODUITS
UTILISABLES LOCALEMENT

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAITRISE EN SCIENCES DE L'ÉNERGIE ET DES MATÉRIAUX

PAR
JULIEN BLEY

MARS 2024

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAITRISE EN SCIENCES DE L'ÉNERGIE ET DES MATÉRIAUX (M.Sc.)

Direction de recherche :

Simon Barnabé, Ph. D. Université du Québec à Trois-Rivières
Directeur de recherche

Patrice Marchand, Ph. D. Sani-Marc
Codirecteur de recherche

Jury d'évaluation du Mémoire :

Simon Barnabé, Ph. D. Université du Québec à Trois-Rivières

Degbedji Tagnon Missihoun, Ph. D. Université du Québec à Trois-Rivières

Kokou Adjallé, Ph. D. INRS-Centre ETE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à ma conjointe, pour son soutien indéfectible tout au long de cette aventure académique. Sa patience, son encouragement et son amour ont été mes sources d'inspiration. À mes chers enfants, je vous suis reconnaissant pour votre compréhension, vos sourires motivants, et votre capacité à égayer même les jours les plus chargés.

Mes remerciements vont également à mon exceptionnel directeur de recherche, Simon Barnabé dont la guidance éclairée, l'expertise académique et le support indéfectible tout au long de ses années ont été cruciales pour la réussite de ce projet de maîtrise.

Un merci chaleureux à Mohammadali Mohammadmirzaei et Andrew Diamond pour les précieux conseils et commentaires lors de la rédaction de mon article scientifique. Je suis profondément reconnaissant pour leur contribution précieuse. Merci aussi à tous les étudiants de l'I2E3 du projet Vertech avec qui j'ai pu partager des idées et collaborer.

Enfin, un grand merci à la direction d'Innofibre, mon employeur, pour le support et les encouragements tout au long de cette maîtrise à temps partiel. Merci aussi à tous les employés d'Innofibre pour leur appui durant de mon projet de maîtrise.

RÉSUMÉ

Le projet de maîtrise se concentre sur une analyse technico-économique de l'implantation d'une culture de microalgues dans le parc industriel de Victoriaville, utilisant les eaux usées disponibles sur le site. Les données proviennent du projet VERTECH, incluant des informations de laboratoire et d'essais pilotes sur les performances du procédé RT-Algae adapté au mélange des eaux usées du site. L'objectif principal est d'étudier la faisabilité d'une bioraffinerie algale dans un contexte d'économie circulaire, une approche peu explorée dans les recherches antérieures.

Les hypothèses de travail reposent sur l'idée que la culture de microalgues peut être une solution viable pour le traitement des eaux usées, offrant des avantages tels que la capture de CO₂ et la production d'une biomasse pouvant être convertie en co-produits de valeur. La méthodologie adoptée consiste en une analyse technico-économique et de sensibilité, combinant des données de laboratoire, d'usine pilote et des conditions spécifiques du site industriel.

La ville de Victoriaville veut mettre en œuvre un projet d'économie circulaire dans son parc industriel principal, utilisant les microalgues pour traiter un mélange d'eaux usées agroalimentaires et industrielles. La biomasse de microalgues produite sera ensuite convertie en biosurfactants et en biobrut pour une utilisation locale dans le même parc industriel ou la même ville. Cette étude de cas met en évidence le potentiel économique de la culture de microalgues directement sur le site de production des eaux usées, associée à un processus efficace de déshydratation utilisant un Foudrinier de machine à papier.

L'analyse technico-économique révèle que le réservoir AlgaFuel™ pour la culture de microalgues représente une part significative des investissements, soit 79% du budget total en capital. De plus, l'énergie nécessaire pour chauffer le photobioréacteur, constituant 20% des coûts d'exploitation, est d'une importance substantielle. Ces résultats soulignent l'importance cruciale de la conception optimale des réacteurs dans le traitement des eaux usées par les microalgues, avec des implications directes sur les coûts de production de la biomasse. Par exemple, une augmentation de la productivité de la biomasse de microalgues de 0,150g/L.jour à 0,375 g/L.jour peut entraîner une réduction significative des coûts de production, passant de \$2648 à \$1023 par tonne de biomasse sèche.

Mots-clés : Économie circulaire, Microalgues, Eaux usées, Technico-Économique, Co-produits, Procédé de déshydrations, Foudrinier

ABSTRACT

The master's thesis project focuses on a techno-economic analysis of implementing a microalgae cultivation in the industrial park of Victoriaville, utilizing wastewater available on-site. The data is sourced from the VERTECH project, including laboratory and pilot trial information on the performance of the RT-Algae process adapted to the mixture of the site's wastewater. The primary objective is to explore the feasibility of an algal biorefinery in a circular economy context, an approach that has been relatively unexplored in previous research.

The working hypotheses are based on the concept that microalgae cultivation can be a viable solution for wastewater treatment, offering benefits such as CO₂ capture and the production of biomass convertible into valuable co-products. The adopted methodology involves a techno-economic and sensitivity analysis, combining laboratory and pilot-scale data with the specific conditions of the industrial site.

The city of Victoriaville aims to implement a circular economy project in its main industrial park, using microalgae to treat a mixture of agri-food and industrial wastewater. The microalgae biomass produced will then be converted into biosurfactants and biocrude for local use within the industrial park or the city. This case study highlights the economic potential of cultivating microalgae directly at the wastewater production site, coupled with an efficient dewatering process using a Fourdrinier former machine.

The techno-economic analysis reveals that the AlgaFuel™ tank for microalgae cultivation represents a significant portion of the investments, accounting for 79% of the total capital budget. Additionally, the energy required to heat the photobioreactor, constituting 20% of operating costs, is of substantial importance. These findings underline the critical importance of optimal reactor design in microalgae wastewater treatment, with direct implications on biomass production costs. For instance, increasing the microalgae biomass productivity rate from 0.150g/L.day to 0.375g/L.day can lead to a significant reduction in production costs, from \$2648 to \$1023 per ton of dry biomass.

Mots-clés : Circular economy, microalgae, wastewater, techno-economic, co-products, dewatering process, Fourdrinier former

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT	V
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	X
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I :	3
1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Le bioraffinage.....	3
1.2 La bioraffinerie algale.....	4
1.2.1 La culture de microalgues.....	4
1.2.2 Les microalgues comme traitements des eaux usées	7
1.2.3 La récolte des microalgues	8
1.2.4 La conversion des microalgues.....	9
1.2.5 Bioraffineries algales actuelles	9
1.3 Le projet Vertech	11
1.4 L'analyse technico-économique	12
CHAPITRE II	13
2 HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS	13
2.1 Hypothèses.....	13
2.2 Objectifs.....	13
2.3 Originalité.....	13
CHAPITRE III	14
ARTICLE: TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF MICROALGAE BIOMASS PRODUCTION FROM A MIXTURE OF WASTEWATERS IN AN INDUSTRIAL PARK TO OBTAIN BIOPRODUCTS LOCALLY USABLE: A COLOCATION CASE STUDY	14
Abstract	15

Keywords:	15
Introduction	16
3.1 Methods	17
3.1.1 Process description: assumptions and conditions	17
3.2 Process	18
3.3 Economic evaluation methodology	22
3.4 Results and discussion	23
3.4.1 Capital cost	23
3.4.2 Operating cost	25
3.5 Microalgae production cost	25
Conclusion	27
Acknowledgments	27
CONCLUSION.....	28
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau 1 : Différents projets de bioraffinerie algales. Adaptée de [35].	10
Table 1: Main parameters of microalgae cultivation defining the case study.	21
Table 2 :Main parameters of Foudrinier former machine from pilot-scale data.	21
Table 3: List and cost (USD\$) of the major equipment's for the case study analysed.	23
Table 4: Fixed Capital estimated for the case study TEA (USD\$)	24
Table 5: Operating cost for the case study analyse.	25
Table 6 : Biomass production cost related to the microalgae biomass productivity based on a flow of wastewater of 2,000 m ³ /day	26

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure 1 : Applications des différents composés produits par les microalgues. Adaptée de [14].	5
Figure 2 : Illustration des différents modes trophiques de croissances des microalgues. Adaptée de [15].	6
Figure 3 : Schéma conceptuel du projet Vertech. Adapté de [1].	12
Figure 4 : Process diagram and system boundary for the TEA.....	17
Figure 5 : Process schematic for the TEA.....	19
Figure 6 : Schematic of dewatering Fourdrinier former used in this case study[58]	20

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
CRIEB	Chaire de recherche industrielle en environnement et biotechnologie
HTL	Liquéfaction hydrothermale
TEA	Analyse technico-économique
USD	Dollar américain
TFC	Total fixed cost

INTRODUCTION

L'urgence climatique est présente et nous devons agir pour en limiter les impacts pour nous et les générations futures. Les gaz à effet de serre (GES) émis par les activités humaines depuis l'ère industrielle augmentent de façon exponentielle. Les exemples sont frappants, ainsi la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est la plus élevée depuis 2 millions d'années. Depuis 100 ans, la hausse du niveau des mers est plus rapide que depuis 3000 ans et la température des océans s'est plus réchauffé que depuis 11 000 ans. Les perturbations des changements climatiques sont déjà clairement observables avec l'augmentation des événements météorologiques violents (sécheresse, inondations, incendies, cyclones, tempêtes, etc). Les écosystèmes sont aussi impactés par ces changements menaçant des milliers d'espèces végétales et animales. Selon le 6^e rapport du GIEC, il n'est pas encore trop tard pour limiter le réchauffement en dessous du seuil critique d'une augmentation de la température moyenne de la planète de 3,2°C par rapport à 1950 d'ici 2100. Ce seuil de +3,2°C correspond à un scénario catastrophe avec la disparition irréversible de la biodiversité sur de multiples régions du monde [1].

Les émissions de CO₂ sont la résultante de notre consommation intensive de ressources fossiles. Cette ressource facile à exploiter a permis à l'humanité durant notre ère de connaître une croissance technologique et économique sans précédent. Cette abondance d'énergie nous permet de nous chauffer, nous éclairer et nous déplacer. La décarbonation de nos sociétés est donc un enjeu majeur pour concilier nos développements et la limitation des changements climatiques.

Les changements climatiques sont une préoccupation majeure à l'échelle mondiale, ce qui a conduit de nombreux gouvernements à mettre en place des lois et des politiques visant à atténuer les effets du changement climatique. Par exemple, l'Accord de Paris, un accord international adopté lors de la COP21 en 2015, engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement climatique à moins de 2 degrés Celsius par rapport aux niveaux préindustriels. En outre, de nombreux pays ont élaboré des lois nationales sur le climat et des politiques pour atteindre des objectifs de réduction des émissions, promouvoir les énergies renouvelables et encourager

l'efficacité énergétique. Ces mesures gouvernementales jouent un rôle crucial dans la lutte contre le changement climatique, car elles orientent les actions des secteurs public et privé vers une économie plus durable et résiliente face au climat [2]. Le renforcement de ces lois et politiques est essentiel pour relever le défi climatique et minimiser ses conséquences néfastes.

Bien qu'une diminution des GES mondial ne soit pas encore visible, l'utilisation de ressources renouvelables décarbonés est en constante augmentation. En 2022, les capacités mondiales en énergie renouvelable ont obtenu une augmentation record de +9,2%, soit 295 GW [3]. Selon les estimations de cette même étude, il faudrait installer 1000 GW annuellement d'énergie renouvelables jusqu'à 2050 pour limiter l'augmentation de température à +1,5°C par rapport à l'ère préindustriel.

La solution pour la décarbonation ne pourra être unique mais sera un éventail de technologies tel que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'électrification des transports, l'hydrogène vert, les biocarburants et les bioproduits. Le choix devra se faire en fonction de critère économique et d'analyse de cycle de vie afin de sélectionner la meilleure solution en fonction de la disponibilité des ressources, des besoins, du climat, etc.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons particulièrement au bioraffinage algale pour la production de biocarburants et/ou de bioproduits et ceux par une analyse technicoéconomique d'un cas d'implantation d'une culture de microalgues dans un parc industriel. Dans un premier chapitre, nous présentons une revue de littérature sur les concepts du bioraffinage, la culture des microalgues, les procédés de récolte et de déshydratation des microalgues, la conversion des microalgues, les principes de l'analyse technicoéconomique, les particularités du parc industriel de Victoriaville (Québec, Canada) et le projet Vertech dans lequel s'inscrit ce projet de maîtrise. Le deuxième chapitre est réservé pour présenter les hypothèses et les objectifs de ce mémoire. Puis le troisième chapitre sera l'article scientifique de ce mémoire par article. L'article présente l'analyse technoéconomique de la culture de microalgue et du conditionnement de la biomasse produite. Cette analyse est basée sur étude d'un cas réel d'utilisation des eaux usées du parc industriel Fidèle-Édouard de Victoriaville.

CHAPITRE I :

1 REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Le bioraffinage

Le bioraffinage est un concept clé dans le domaine de la bioéconomie et de la durabilité. Il fait référence à un processus durable de conversion de biomasse, en une gamme diversifiée de bioproduits et de bioénergie [4], tout comme le raffinage du pétrole brut produit une variété de produits pétrochimiques et énergétiques. Le bioraffinage vise à maximiser l'utilisation de chaque composante (sucres, protéines, lipides, etc.) de la biomasse, qu'elle provienne de sources agricoles (dédiée ou résiduelle), forestières, industrielles (sous-produits ou résidus des procédés) ou algales [5]. L'approche du bioraffinage est axée sur la durabilité, elle permet de réduire la dépendance aux ressources non renouvelables, de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de promouvoir une économie circulaire [6].

Élément clé de la bioéconomie, le bioraffinage repose sur l'utilisation durable des ressources biologiques pour répondre aux besoins de la société. Les bioraffineries sont de plus en plus reconnues comme des acteurs clés de la bioéconomie, créant de nouvelles opportunités économiques dans les zones rurales et contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre [7].

Le bioraffinage n'est pas exempt de défis, parmi les principaux figurent la complexité des procédés, la nécessité de concevoir des bioraffineries flexibles et la gestion efficace des flux de matières premières [8]. Il est ainsi nécessaire de faire un bon inventaire des biomasses disponible, une analyse de cycle de vie et une analyse technico-économique avant tout projet de bioraffinerie.

1.2 La bioraffinerie algale

La bioraffinerie algale est un type de bioraffinerie qui vise à utiliser des microalgues comme matière première pour produire une gamme de produits de valeur, allant des biocarburants aux produits chimiques, en passant par les matériaux et les compléments alimentaires [9]. Les microalgues sont particulièrement attrayantes en raison de leur capacité à croître rapidement, de leur contenu en lipides et protéines de haute qualité, ainsi que de leur grande efficacité photosynthétique [10]. La bioraffinerie algale offre ainsi un potentiel significatif pour contribuer à la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles, à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la promotion d'une bioéconomie plus durable.

1.2.1 La culture de microalgues

La culture de microalgues est une biotechnologie dont les recherches sont relativement récentes et en plein essor. Cette biotechnologie peut produire des molécules d'intérêts pour divers secteurs de la production d'aliments à la production de produits chimiques [11]. La culture de microalgues remonte à plusieurs milliers d'années [12]. Dans les cultures asiatiques, des espèces de microalgues telles que la spiruline étaient utilisées à des fins alimentaires et médicinales [13]. Cependant, ce n'est que récemment que la culture de microalgues a pris de l'ampleur grâce aux développements technologiques et l'intérêt croissant pour l'utilisation des microalgues en tant que source de biocarburants, de protéines et d'autres produits. Durant leur croissance, les microalgues vont produire des composés d'intérêts tels des protéines, des lipides, des sucres, des pigments, des vitamines et minéraux. La Figure 1 présente les applications possibles de chacun de ces composés.

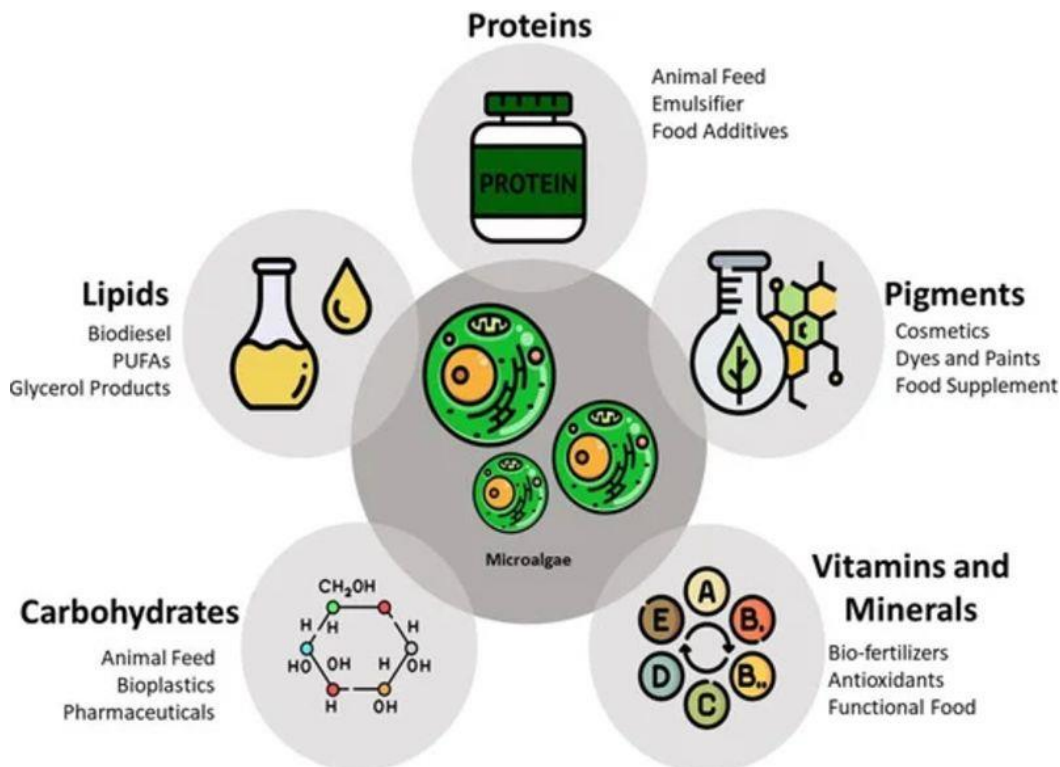


Figure 1 : Applications des différents composés produits par les microalgues. Adaptée de [14].

Les microalgues ont différents modes trophiques lors de la croissance dépendamment des souches et des conditions de culture. Ainsi, comme représenté dans la Figure 2, les microalgues peuvent utiliser la lumière et le CO₂ comme source d'énergie et de nutriment en mode autotrophique, la lumière et une ou des sources organiques de carbone comme source d'énergie et de nutriment en mode mixotrophique, une absence de lumière et une ou des sources organiques de carbone comme source d'énergie et de nutriment en mode hétérotrophique.

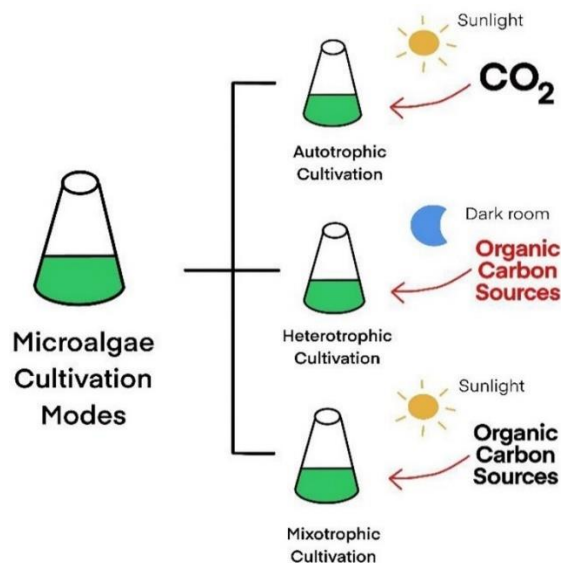


Figure 2 : Illustration des différents modes trophiques de croissances des microalgues. Adaptée de [15].

La culture de microalgues peut être réalisée dans des environnements contrôlés, tels que des bioréacteurs. Dans ces systèmes, les microalgues sont cultivées en suspension dans des milieux liquides, souvent sous agitation pour favoriser la croissance. Les systèmes fermés et contrôlés offrent un environnement optimisé pour la culture des microalgues, y compris un contrôle précis de la température, du pH et de la concentration de dioxyde de carbone. Dans le cas d'un ajout de contrôle sur la lumière, le système se nomme généralement un photobioréacteur. Les systèmes fermés peuvent avoir plusieurs formes que ce soit des sacs, des tubes horizontaux, des colonnes aérées ou des réservoirs [16]. La culture peut aussi être réalisée dans des systèmes ouverts, tels que des étangs de culture ou des bassins en plein air, qui sont utilisés pour la culture à grande échelle, où les conditions météorologiques peuvent influencer la croissance des microalgues [17].

1.2.2 Les microalgues comme traitements des eaux usées

La culture des microalgues a été largement étudiée pour leur potentiel dans le traitement des eaux usées [18]. Leur utilisation dans ce domaine présente de nombreux avantages en termes de durabilité, de réduction des coûts et de potentiel pour la production de biomasse utile. Les microalgues présentent des capacités exceptionnelles d'élimination des nutriments, en particulier pour l'azote et le phosphore. Diverses études ont démontré la capacité des microalgues à assimiler les nutriments des eaux usées, agissant comme un biofiltre naturel. Des espèces de microalgues telles que *Chlorella* sp., *Spirulina* sp. et *Scenedesmus* sp. ont été largement étudiées pour leur efficacité dans l'absorption des nutriments [19-21]. L'intégration de systèmes à base de microalgues avec les stations d'épuration traditionnelles peut améliorer l'efficacité globale du traitement. Les microalgues peuvent croître dans les processus de traitement secondaires, réduisant la consommation d'énergie et offrant une alternative respectueuse de l'environnement pour l'élimination des nutriments. L'approche synergique a été démontrée dans des études à l'échelle pilote combinant une culture de microalgues avec les processus de traitement conventionnels [22, 23]. Le couplage des microalgues aux traitements des eaux permet d'augmenter la circularité des projets de bioraffinage algale, en produisant une biomasse riche en composés à valeur ajoutée dans un substrat résiduel d'origine industrielle, agricole ou municipale. Bien que l'intégration des microalgues dans les systèmes de traitement des eaux présente de nombreux avantages, des défis subsistent, tels que la récolte efficace des microalgues, la gestion des contaminants émergents, et la compétition entre les différentes espèces de microalgues [24].

1.2.3 La récolte des microalgues

La récolte des microalgues est une étape cruciale dans la production de biocarburants, de produits chimiques et de composés à haute valeur ajoutée. Les microalgues, en raison de leur petite taille et de leur flottabilité, présentent des défis spécifiques en matière de récolte. Les coûts importants associés à la récolte peuvent rendre des projets de microalgues non viables économiquement [25]. Afin d'optimiser cette étape nécessaire à tous les procédés de microalgues, plusieurs méthodes de récoltes sont utilisées et ont été étudiées.

La centrifugation est l'une des méthodes de récolte les plus couramment utilisées pour les microalgues en raison de sa rapidité et de son efficacité. Les forces centrifuges séparent les cellules de la suspension en fonction de leur densité. Cependant, cette méthode peut être énergivore et coûteuse en raison de l'énergie nécessaire pour maintenir les hautes forces centrifuges [26].

La filtration repose sur la taille des mailles du filtre pour séparer les microalgues de la suspension. Bien que cette méthode soit économique, elle est sujette au colmatage des filtres, réduisant ainsi son efficacité au fil du temps [27].

La flottation implique l'ajout de réactifs pour favoriser la formation d'agrégats cellulaires flottants, facilitant ainsi leur récupération en surface. Cette méthode peut être sélective, mais elle nécessite une optimisation des conditions opératoires [28].

La sédimentation exploite la différence de densité entre les microalgues et le milieu de culture pour permettre la séparation gravitaire. Bien que cette méthode soit simple, elle peut nécessiter des temps de sédimentation prolongés [29].

L'électroflottation utilise des électrodes pour générer des bulles de gaz, induisant ainsi la flottation des microalgues vers la surface. Cette méthode émergente peut être efficace, mais elle nécessite une gestion précise des paramètres électrochimiques [30].

Le choix de la technique de récolte des microalgues dépend de plusieurs facteurs tels que la densité cellulaire, la composition cellulaire, les coûts énergétiques et les contraintes opérationnelles. Les progrès continus dans le domaine de la récolte des microalgues contribueront à rendre cette technologie plus économiquement viable et durable.

1.2.4 La conversion des microalgues

Afin de convertir les microalgues en bioproduits et biocarburants, une étape de conversion de la biomasse est nécessaire après la récolte. La biomasse de microalgues peut être séchée et utilisée telle quelle notamment pour des utilisations alimentaires ou comme nourriture animale. Parmi les nombreuses technologies de conversion en biocarburants, la liquéfaction hydrothermale (HTL) émerge comme la méthode de conversion la plus efficace et la plus économique. La HTL permet de traiter la biomasse de microalgue en conditions subcritiques avec de l'eau, générant ainsi une biohuile de qualité et énergétique. Cette approche a l'avantage de maintenir l'humidité des microalgues, éliminant ainsi la nécessité d'un coûteux prétraitement de séchage [31]. Parallèlement, les procédés d'extraction des molécules à valeur ajoutée, tels que les pigments, les polysaccharides et les protéines, jouent un rôle crucial dans la valorisation totale de la biomasse microalgale. Des techniques telles que l'extraction par solvant, l'extraction assistée par micro-ondes et l'extraction par ultrasons sont utilisées pour extraire ces molécules, ouvrant ainsi la voie à une gamme étendue de produits de haute valeur [32-34].

1.2.5 Bioraffineries algales actuelles

Bien que la recherche sur les microalgues ont suscité un grand engouement dans le monde du bioraffinage, il y a encore peu de compagnie avec des productions commerciales en dehors des applications traditionnels. En 2020, JR Banu & al. [25] ont recensé différentes compagnies avec des projets de bioraffinerie algales.

Tableau 1 : Différents projets de bioraffinerie algales. Adaptée de [35].

Compagnies	Pays	Type de Bioréacteur	Échelle de production	Produits	Revenus
Sapphire Energy Inc	États-Unis	Bassin ouvert, système de croissance photosynthétique	1600 tonnes de biomasse par an	Huiles à haute valeur, aquaculture et alimentation animale	37,6 millions de dollars
Cellana Inc	États-Unis	PRB avec bassin ouvert	20 tonnes d'algues	Huiles Omega 3, biocarburants, alimentation animale, pigments	4,8 millions de dollars
TerraVia Inc	États-Unis	Fermenteurs sombres, algues hétérotrophes	100 000-300 000 tonnes métriques par an	Huile alimentaire comestible, biocarburant	12,1 millions de dollars
Algenol Biotech LLC	États-Unis	PRB	8000 gallons de carburant liquide par acre par an	Bioéthanol, essence, carburéacteur, biodiesel	3,1 millions de dollars
Synthetic Genomics Inc	États-Unis	PRB	1600 gallons par acre par an de lipides	Éthanol, biodiesel, carburéacteur	16,8 millions de dollars
Algatech	Israël	PRB	2-3 millions de tonnes par an	Astaxanthine, alimentation animale, fucoxanthine	7,7 millions de dollars
Solix Biofuels	États-Unis	PRB de croissance fermée	3000 gallons de biocarburant	Biodiesel, diesel vert, carburéacteur, Omega 3, β -carotène, astaxanthine, alimentation animale	4 millions de dollars
Seabiotic	Israël	Bassin ouvert	100 à 200 gallons de biocarburant	Biocarburant, bioéthanol	10 millions de dollars
Algae.Tec	Australie	PRB	10 000 tonnes par an	Biocarburant, alimentation animale, alimentation animale, alimentation aquacole	93 000 dollars

1.3 Le projet Vertech

La Ville de Victoriaville, pionnière du développement durable au Québec, est à la recherche de solutions pour réduire les coûts élevés liés à la gestion des eaux usées de son parc industriel. Elle vise également à promouvoir des synergies locales qui contribuent à l'économie circulaire et la réduction des GES, deux objectifs importants pour la ville et sa région. L'UQTR et la Ville de Victoriaville ont ainsi mis en place le projet VERTECH. Le projet VERTECH consiste à cultiver des microalgues dans les eaux usées du parc industriel Fidèle-Édouard de Victoriaville (effluents provenant de Lactalis Canda), Abbott Laboratoires – Group Canlac, Sani Marc et Gesterra) à travers le procédé « RT-Algae » développé par l'équipe de la Chaire de recherche industrielle en environnement et biotechnologie de l'UQTR. Ce procédé innovant permet la croissance des microalgues dans les eaux usées pour la production de biomasse algale et le prétraitement des eaux usées [26, 27]. Les méthodes de récolte et de déshydratation de la biomasse développées sont rapides et amènent la biomasse à la siccité nécessaire pour l'étape de conversion [28]. Ensuite, les huiles de la biomasse algale sont converties en surfactants biosourcés pouvant être utilisés dans les formulations de produits de nettoyage industriel et résidentiel de Sani Marc. Les autres coproduits de la biomasse sont convertis en carburant renouvelable pouvant être utilisé par les flottes de véhicules lourds de Gesterra (ramassage des matières résiduelles) et de la Ville de Victoriaville. La bioraffinerie algale serait implantée en cohabitation sur le site de l'usine de Parmalat. La Figure 3 présente un schéma conceptuel de la circularité du projet Vertech. En effet, l'utilisation d'intrants locaux et les produits utilisés localement font du projet Vertech un bon exemple de projet d'économie circulaire.

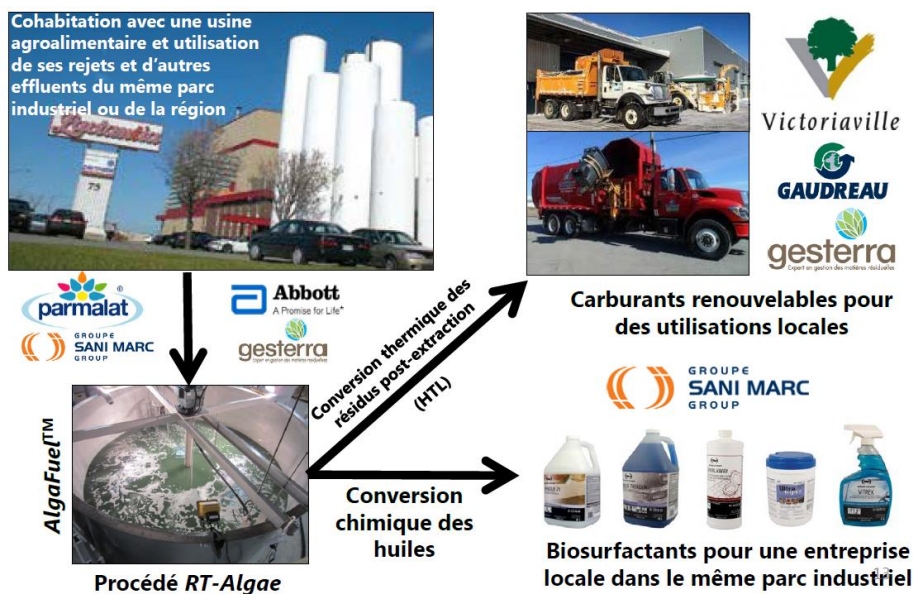


Figure 3 : Schéma conceptuel du projet Vertech. Adapté de [1].

1.4 L'analyse technico-économique

Le projet VERTECH est actif depuis 2014 et le cumul des données permet aux porteurs du projet de se lancer dans une analyse technico-économique pour une éventuelle vitrine technologique et une usine préindustrielle. L'analyse technico-économique est une méthode d'évaluation qui combine des éléments techniques et économiques pour évaluer la faisabilité et la rentabilité d'un projet, d'un investissement ou d'une initiative. Cette approche couramment utilisée dans le domaine de l'ingénierie, de la gestion de projet, de l'industrie et de la recherche, repose sur l'intégration des aspects techniques et économiques. Les aspects techniques impliquent l'étude des procédés de production, des bilans de masses et d'énergie, de la conception, du choix des technologies, des spécifications techniques, etc. Les aspects économiques impliquent l'analyse des coûts, des revenus, des bénéfices, des retours sur investissement et d'autres indicateurs financiers. Cette méthodologie joue un rôle essentiel dans la prise de décisions éclairées, en intégrant des perspectives techniques et économiques. Elle aide à identifier les projets viables, à optimiser les ressources et à minimiser les risques économiques associés à un investissement ou à un projet [36]. C'est dans cette perspective que le présent projet de maîtrise a été entamé.

CHAPITRE II

2.1 Hypothèses

Dans ce projet de maîtrise, nous avons réalisé une analyse technico-économique portant sur une analyse d'un cas concret d'implantation d'une culture de microalgues dans le parc industriel de Victoriaville. Les données que nous utilisons sont donc basées sur les eaux usées disponibles, les conditions et les contraintes de ce site. L'analyse technico-économique utilise aussi les données de laboratoire et d'usine pilote des multiples travaux réalisés dans le cadre du projet VERTECH. Ces valeurs concernent notamment les performances du procédé RT-Algae adaptées dans le cadre du mélange des eaux usées du site [37]. La faisabilité de la culture de microalgue dans les conditions météorologiques du Québec et dans un contexte d'économie circulaire est un sujet qui n'a pas fait l'objet de recherches.

2.2 Objectifs

Les objectifs du projet de maîtrise sont les suivants :

- Étudier la faisabilité de l'implantation d'une bioraffinerie algale par une analyse technico-économique dans l'étude du cas du parc industriel de Victoriaville.
- Démontrer par une analyse technico-économique les spécificités du procédé RT-Algae développé dans le cadre du projet Vertech.

2.3 Originalité

L'originalité du projet réside dans l'étude techno-économique d'une nouvelle chaîne de procédés pour la production de microalgues à partir d'eaux usées d'un parc industriel et dans une perspective d'économie circulaire.

CHAPITRE III

ARTICLE: TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF MICROALGAE BIOMASS PRODUCTION FROM A MIXTURE OF WASTEWATERS IN AN INDUSTRIAL PARK TO OBTAIN BIOPRODUCTS LOCALLY USABLE: A COLOCATION CASE STUDY

Julien Bley^{ab}, Nathalie Bourdeau^b, Patrick Marchand^c, Andrew Diamond^a, Mohammad Ali Mohammad Mirzaie^a, Simon Barnabé^a.

^a Institute of Innovations on Ecomaterials, Ecoproducts and Ecoenergies, University of Quebec at Trois-Rivières, 3351 boulv. des Forges, Trois-Rivières, Quebec, Canada, G9A 5H7

^b Innofibre, Cégep de Trois-Rivières, 3351 boulv. des Forges, Trois-Rivières, Quebec, Canada, G9A 5H7

^c Sani Marc 42, rue de l'Artisan, Victoriaville, Quebec, Canada, G6P 7E3

Abstract

Advances in primary and secondary wastewater treatments help to remove a lot of pollutants, but sometime tertiary treatment is needed to achieve the lowest level of concentration for environment discharge. Utilizing microalgae for wastewater tertiary treatment has always been an option with the advantages of capturing CO₂ and obtaining a biomass that can be further converted into valuable co-products. In line with this, the City of Victoriaville in Quebec, Canada, is developing a circular economy project within its main industrial park, where microalgae are used to treat a blend of agri-food and industrial wastewaters. The microalgae biomass produced, and its constituents are subsequently being converted into biosurfactants or biocrude, readily available for local use within the same industrial park or city. This case study shows the economic potential of cultivating microalgae directly at the wastewater production site, coupled with an efficient dewatering process by using Fourdrinier Former.

Keywords:

Circular economy, microalgae, wastewater, techno-economic, co-products, dewatering process, Fourdrinier former

Introduction

In recent years, the search for sustainable feedstocks and biobased products, such as microalgae biomass, has become essential in various communities. Despite numerous challenges in reducing production costs and optimizing conditioning processes, microalgae stand out as a promising biomass sources capable of efficiently being produced with waste nutrients and energy, aligning with the circular economy approach. Back in 2014, the city of Victoriaville in Quebec, Canada, in collaboration with local businesses, started a significant project on integrating microalgae-based products within their industrial activities. This initiative focused on the utilization of nutrient-rich wastewater streams from three industrial plants as feedstock for the local production of lipid-rich algal biomass: a dairy factory, a lactulose production facility and a household & industrial cleaning product manufacturers. More precisely, the fatty acids would be extracted and converted into biosurfactants, which would, in turn, replace petrochemical-based compounds in the formulation of industrial cleaning products by the household and & industrial cleaning product manufacturers of the same park. Additionally, the project proposed the conversion of post-extraction residues via hydrothermal liquefaction into biocrude, also intended for local use following refinement in the city heavy vehicle fleet.

Microalgae-based wastewater treatment process has demonstrated numerous advantages over traditional methods, including the possibility to capture carbon dioxide, the efficient removal of nitrogen and phosphorous, and the production of biomass suitable for conversion into high-value co-products [38-42]. Extensive research has explored the potential of microalgae biomass and oils as alternatives to fossil fuels in recent decades [43]. Several studies have investigated the use of various wastewaters for the industrial cultivation of microalgae [44-50], which highlight the preference for utilizing wastewater as a cost-effective nutrient source over synthetic culture media for large-scale microalgae cultivation [51-53].

To evaluate the economic feasibility of large-scale microalgae production, generally for biofuel production, some technico-economic analyses (TEAs) have been conducted and published. These TEAs indicated that the production of biofuels from microalgae remains economically challenging [54]. The cost challenge primarily arises from the relatively low productivity of microalgae cultivation, leading to substantial dewatering costs [55]. Also, there is a consensus on

the necessity of obtaining higher value co-products from algal biomass to ensure the economic viability of the process [56].

A TEA was conducted on the Victoriaville case study with assumptions derived from pilot-scale data on microalgae production using waste nutrients. This TEA is distinguished by the following aspects: i) the use of a mix of dairy and industrial wastewaters from an industrial park; ii) the on-site cultivation of microalgae in colocation with a dairy plant in the same industrial park; and iii) the application of an efficient dewatering technology based on the Fourdrinier former machine normally used for papermaking. This paper summarizes this TEA.

3.1 Methods

3.1.1 Process description: assumptions and conditions

The system boundary includes microalgae cultivation, microalgae cell flocculation and dewatering using a Foudrinier former machine as shown in Figure 4.

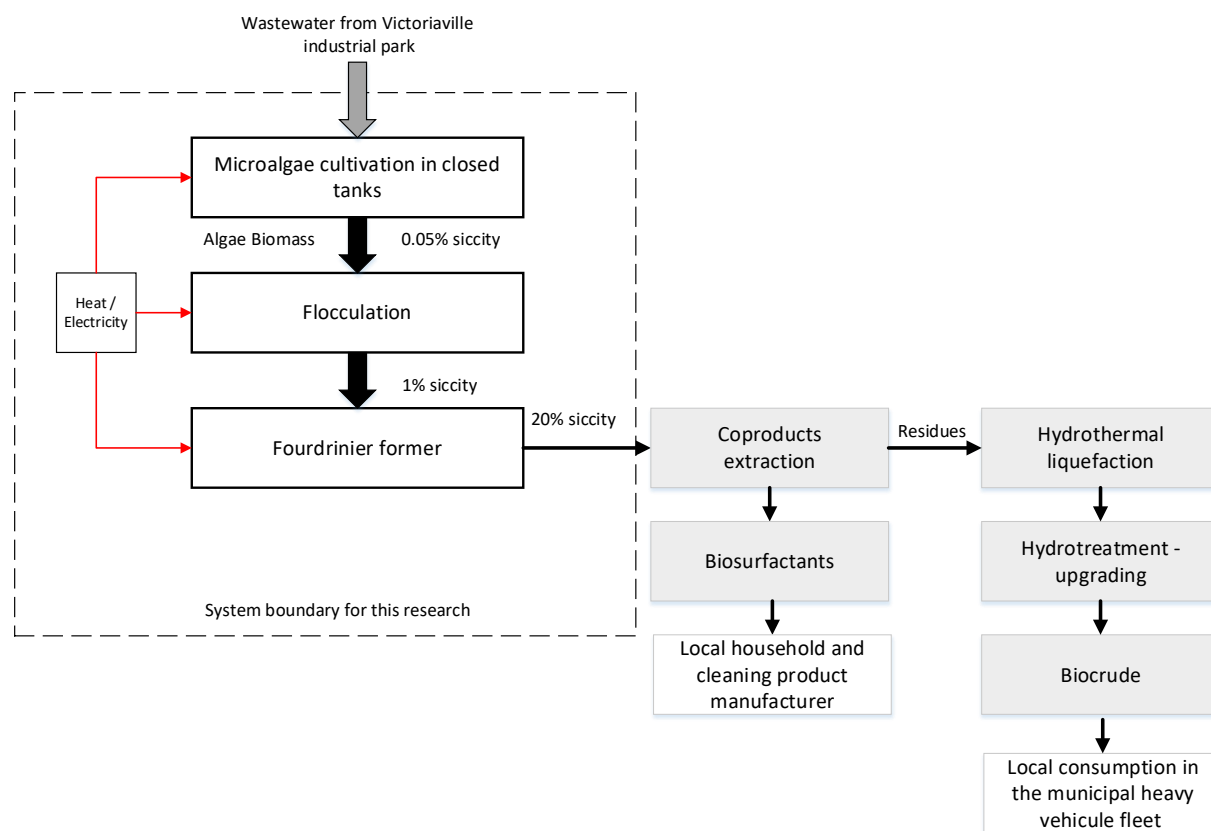


Figure 4 : Process diagram and system boundaries for the TEA.

The dewatered microalgae biomass is sent to short chain C12 and C14 fatty acids extraction process for biosurfactant production (chemical conversion into amine oxides for households and cleaning product formulation) when the post-extraction residues are sent to a hydrothermal liquefaction process (HTL) to obtain a biocrude (while the aqueous phase is theoretically recycled in the algae production system). Due to the lack of pilot scale data and literature on the extraction and HTL processes, we decided to focus on the upstream steps for this preliminary TEA study.

A microalgae consortium was grown in mixtures of wastewater from the industrial park of Victoriaville City (QC, Canada). The consortium used in this study case was a native microalgae-bacteria consortium isolated from a dairy wastewater treatment station in the industrial park of Victoriaville City (QC, Canada) [57]. This consortium is mainly composed of *Chlorella* spp, and its lipid content could reach up to 28% by controlling the pH to 7.0 with acetic acid (CH_3COOH , 5% v/v) [57]. The culture medium contains a mixture of four collected wastewaters (45% pharmaceutical – lactulose producer plant, 41% dairy plant, 10% households and cleaning product manufacturers and 4% leachate of a municipal solid waste landfill site, v/v), supplemented with minerals to mimic Bold's basal medium (BBM) (K_2HPO_4 , 10 mL/L; MgSO_4 , 10 mL/L; KH_2PO_4 , 10 mL/L; major stock solution, 10 mL/L; trace metal stock solution, 1 mL/L; Boron stock solution 1 mL/L; EDTA stock solution, 1 mL/L and acidified iron stock solution, 1 mL/L) [50, 57]. Cultivation is conducted in AlgaFuel™ open tank[58], which was designed, patented and manufactured by the company AlgaLabs in Montreal (QC, Canada), a subsidiary of the company AirScience Inc. For the TEA, based on AlgaLab advise, the working volume was set to its maximum at high scale, which is 440 m³. This system allows growing microalgae under heterotrophic-dominant mixotrophic conditions with optimal agitation to maintain a homogenous microalgae cell suspension. The open tank temperature is kept at 20°C, even during the winter. The colocation approach with a dairy plant allows the use of waste heat to keep the open tanks at this temperature. The light management is limited to fluorescent light with a constant photon flux of 20 $\mu\text{mol photon/m}^2\cdot\text{s}$. Although the cultivation step is in a batch sequence, it is followed by a buffer storage system and a continuous dewatering system. This results in a continuous mode wastewater process.

Figure 5 shows the main steps of the process, which are the cultivation and dewatering steps.

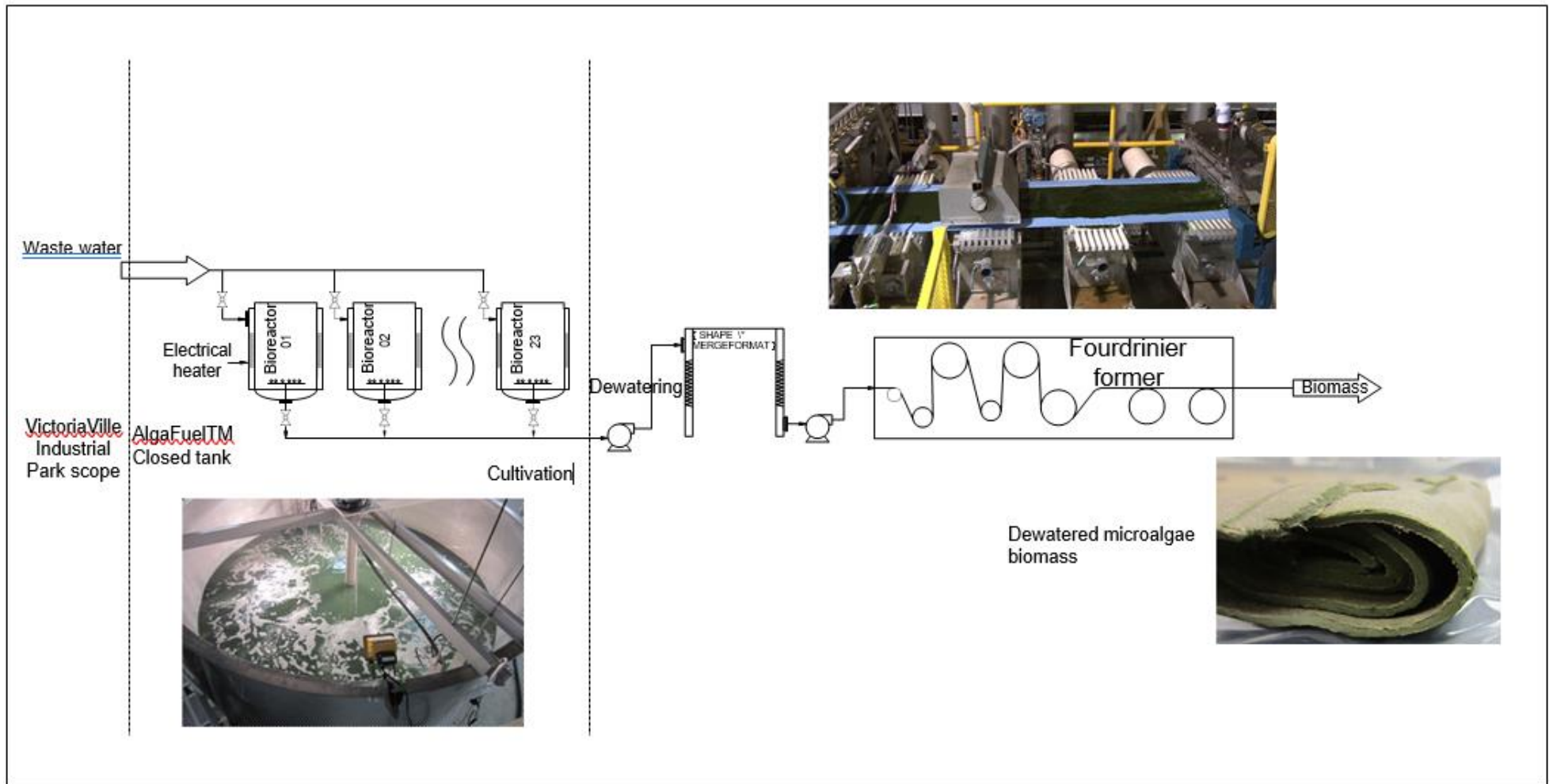


Figure 5 : Process schematic for the TEA

After each 5 days of cultivation, microalgae cells are flocculated with cationic polyacrylamide flocculant, from 0,2% (w/w) to 1 % (w/w) [59] and then send to a storage tank before being routed to Fourdrinier former machine for dewatering. A fine layer of cellulosic fiber (1%, w/v) is applied on the former mat before microalgae to prevent clogging problems. Figure 6 illustrates the obtention of microalgae sheets (cellulose fiber and microalgae) at 20% (w/v) after the Fourdrinier former.

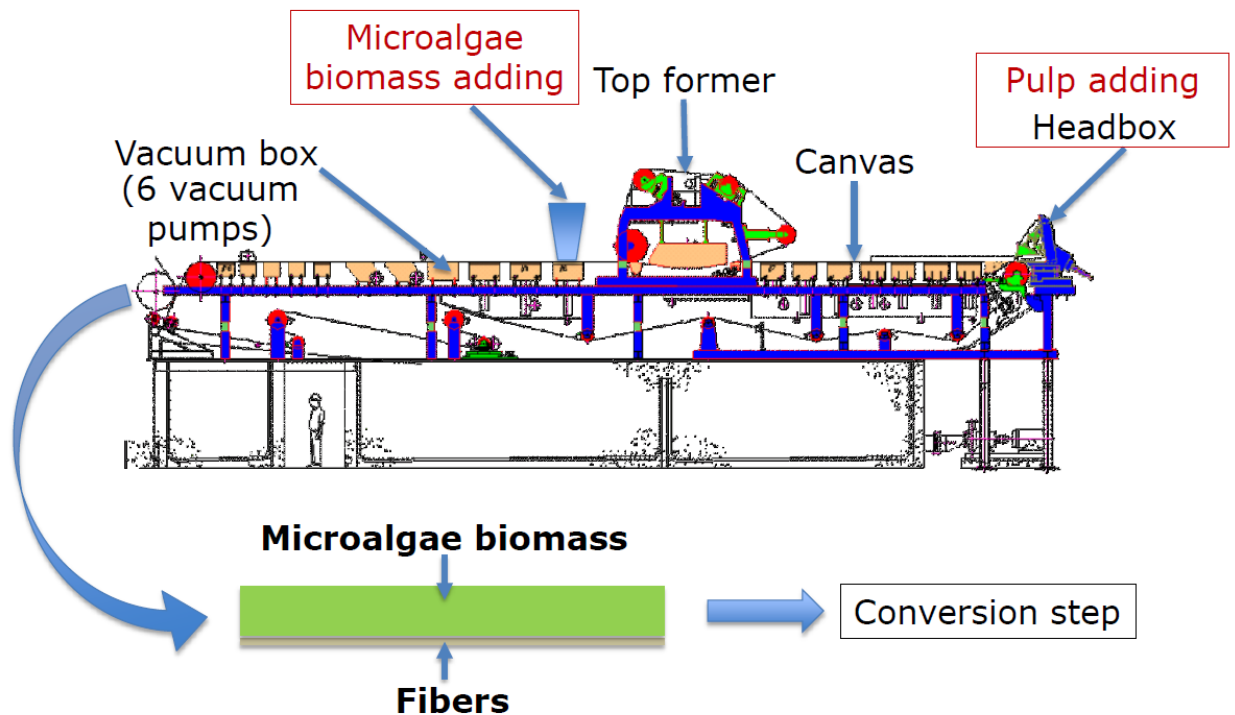


Figure 6 : Schematic of dewatering Fourdrinier former used in this case study[60]

Material and energy balances of the cultivation, harvesting (flocculation) and dewatering steps were conducted using Microsoft Excel®, while other process inputs (e.g., equipment capacity and utility rates) were modelled based on information from manufacturers, sellers and plant design specifications [61]. The mass balance considers a wastewater flow of 2,000 m³/d), flocculant for decantation (at 1% flocculant/ dry biomass), cellulose fiber (i.e., recycled cardboard) for the dewatering process (5% dry cellulose/ dry biomass). The microalgae biomass productivity, flocculant concentration and cellulose concentration are values based on our previous works and pilot-scale data[37, 59, 62]. The main parameters of microalgae cultivation used to perform the

preliminary TEA are presented in Table 1 while the parameters for Fourdrinier machine operation are presented in

Table 2. Energy flow analysis was evaluated by combining energy use for each piece of equipment in each treatment phase (i.e., electrical for pumps, heaters, lights, vacuum pumps, and Fourdrinier motor drive). The calculations were based on the energy required to process 2,000 m³/day of wastewater in the process inlet with a final microalgae biomass concentration of 20% on a dry basis. The energy lost at each step was calculated using Victoriaville's average temperatures for each season of the year.

Table 1: Main parameters of microalgae cultivation defining the case study.

Case study		
Wastewater stream	2,000	m ³ /day
Microalgae biomass productivity	0.375	g/L day
Cultivation time	5	day
Operation time	330	day/year
Microalgae biomass production	1,238	T/year
Total culture surface	0.7	Ha
Total culture volume	10,116	m ³
Air flow rate	942	m ³ /hr
Light intensity on top	20	μmol photon/m ² .s

Table 2 :Main parameters of Foudrinier former machine from pilot-scale data.

Foudrinier former machine		
Speed	200	m/min
Wire motors	28	kW
Flow rate	100	m ³ /h
Input siccidity	1	%
Output siccidity	20	%
Vaccum pump motor	34	kW

3.3 Economic evaluation methodology

For this TEA study, we focused on the upstream steps of this process identified as the system boundary, which comprises cultivation, harvesting and dewatering. The cost used in this TEA was in USD based on the year 2019. The cost evaluation is a factored estimate based on knowledge of major items of equipment[63], which provides an accurate estimate within ± 30 percent[61]. We estimated the purchase costs of major equipment directly from supplier prices or from literature [61]. We have suggested the price of scaling equipment using the well-known six-tenths factor rule [64]. This method can estimate the price of two similar equipment with different sizes using the Equation 1; such estimate is only possible for equipment with a size difference ratio of 10 [61].

$$\text{Cost of equipment a} = (\text{cost of equipment b}) \times 0.6 \quad \text{Equation 1}$$

To estimate the fixed capital cost investment, the Lang factor approximation was used [65]. This approach used different factors for each direct and indirect cost item (e.g., installation, piping, engineering and supervision, land, etc.). These factors are multiplied by the equipment cost to obtain a fixed capital cost estimate.

The other component calculated in this economic analysis is the cost of production. We, therefore, estimated the annual variable operation cost (TVOC), i.e., the raw materials (cellulose and chemicals) and utilities (electricity). The source of energy is therefore electricity as Quebec is a large producer of hydroelectricity with lower prices than fossil fuels. We also evaluated the labour cost as 4 persons for the shift operator and supervision as 10% of the shift operator[61]. We estimated the overhead costs from total salaries, total capital charges fixed from maintenance insurance, and taxes from direct cost investment. Depreciation is calculated with a lifetime of 20 years, i.e., total fixed cost divided by 20.

3.4 Results and discussion

3.4.1 Capital cost

The cost of the major equipment, in this case, the study reach \$2 million (Table 2). Almost 80% of this cost concerned the microalgae cultivation systems as 23 AlgaFuel™ tanks with 440m³ of working capacity would be needed to treat all the wastewater produced in the industrial park of Victoriaville.

Table 3: List and cost (USD) of the major equipment for the case study analyzed.

Item	Detail	Work Capacity		Cost \$ / unit	Unit (s)	Total Cost	%	Explanation
1	AlgaFuel™ tank	440	m ³	70,000.00 \$	23	1,610,000.00 \$	79.5	Supplier
2	Feeding pumps	80	m ³ /h	1,017.00 \$	2	2,034.00 \$	0.1	
3	Air blower	1,2	m ³ /h	8,740.00 \$	1	8,740.00 \$	0.4	
4	Discharge pumps	80	m ³ /h	1,017.00 \$	2	2,034.00 \$	0.1	[9]
5	Harvest storage tank	3	m ³	216,152.00 \$	1	216,152.00 \$	10.7	
6	Harvest pump	80	m ³ /h	1,017.00 \$	1	1,017.00 \$	0.1	
7	Fourdrinier	100	m ³ /h	150,000.00 \$	1	150,000.00 \$	7.4	Supplier
8	Vacuum pumps	3	m ³ /h	35,000.00 \$	1	35,000.00 \$	1.7	Supplier
Total						2,024,977.00 \$	100.0	

The dewatering step represents the remaining 20% of the equipment cost. This low amount is due to the use of Fourdrinier, which is more affordable than other dewatering methods [66]. After applying the Lang factor method, the fixed capital cost calculated reached \$8 million (Table 3).

Table 4: Fixed Capital estimated for the case study TEA (USD)

Item	Detail	Factor	Cost
1	Major purchased equipment	1.00	2,024,977.00 \$
2	Installation costs	0.39	789,741.03 \$
3	Instrumentation and control	0.26	526,494.02 \$
4	Piping	0.31	627,742.87 \$
5	Electrical	0.10	202,497.70 \$
6	Buildings	0.29	587,243.33 \$
7	Yard improvements	0.12	242,997.24 \$
8	Service facilities	0.20	404,995.40 \$
9	Land	0.06	121,498.62 \$
10	Engineering and supervision	0.32	647,992.64 \$
11	Construction expenses	0.39	789,741.03 \$
12	Contractor's fee	0.19	384,745.63 \$
13	Contingency	0.35	708,741.95 \$
	Total fixed capital (TFC)		8,059,408.46 \$

3.4.2 Operating cost

The annual operating cost of the microalgae production system in Victoriaville would be \$1.3M (Table 4). From this, a variable operation cost (e.g., chemicals, electricity, etc.) would represent 27.64%, mostly from the electricity needed to heat the open tanks under the low winter temperature (down to -20°C) in the case study location. However, the system's operating cost is lowered with the energy cost from the dewatering using Fourdrinier machine in comparison to other conventional and costly dewatering methods for large-scale microalgae production (e.g., centrifugation, drying, etc.) [66].

Table 5: Operating cost for the case study analyses.

Items	Amount (\$/year)	Percent (%)	Explanation
Cellulose fiber for Fourdrinier	6,979.50 \$	0.52	Calculations
Chemicals (floculants)	55,836.00 \$	4.14	Pilot-scale data
Electricity for heating photobioreactors	262,422.20 \$	19.46	Calculations
Electricity for photobioreactors (light, etc.)	36,422.60 \$	2.70	Calculations
Electricity for dewatering	11,081.72 \$	0.82	Calculations
Total annual variable operation cost	372,742.02 \$	27.64	
Manager Salaries	21,840.00 \$	1.62	10% Shift operator
Shift operator Salary	218,400.00 \$	16.20	4 persons
Total Salaries	240,240.00 \$	17.82	
Overhead	120,120.00 \$	8.91	50% total salary
Depreciation	402,970.42 \$	29.89	TFC/20
Maintenance	40,499.54 \$	3.00	2% equipment cost
Insurance	161,188.17 \$	11.95	2% of TFC
Taxes	80,594.08 \$	5.98	1% of TFC
Total fixed operating cost	1,045,612.22 \$	77.4	
Water treatment saves	(69,960.00) \$	-5.19	
Total annual operating cost	1,348,394.23 \$	100.00	

3.5 Microalgae production cost

Scaling up microalgae production is challenging. Potential biological contamination and consortium crashes can lead to a decrease in the growth rate[67] thus negatively impacting biomass production, which is the main source of income. Other studies have shown that one of the major factors influencing TEA of microalgae production is the

microalgae biomass productivity [68, 69]. This present TEA is a case study with a location already specified, and parameters such as electricity cost, labour cost, taxes, etc. are therefore fixed. In the present case, microalgae biomass productivity is the main sensitive parameter of biomass cost. Table 6 shows the results of the sensitivity analysis of microalgae biomass productivity (0.150 g/L.day; 0.250 g/L.day; 0.375 g/L.day;) on biomass production cost with 2000 m³/day of wastewater.

Table 6 : Biomass production cost related to the microalgae biomass productivity based on a flow of wastewater of 2,000 m³/day

Microalgae biomass productivity (g/L/day)	Biomass production cost (\$/dry ton)
0.150	2,648
0.250	1,608
0.375	1,023

In this case study, the variable operating cost to obtain 20% dry matter represents 5.48 % of the total annual operating cost, either 0.06\$/kg of dry microalgae (i.e., electricity, cellulose fiber, and chemical costs). The production cost of 20% dry content microalgae of 1,023 \$/dry ton, which is high for biofuel production[70]. It demonstrates the need for extracting high value co-products from microalgae (in our case biosurfactant) before the conversion into biocrude (and eventually biofuel) to reach economic viability. The technical and economic feasibility of these co-product extraction steps remains to be determined with further research.

Conclusion

This paper presents a case study of microalgae wastewater treatment in the industrial park of Victoriaville City (QC, Canada) in colocation with a dairy plant. We have utilized pilot-scale data for microalgae production to assess the feasibility of a circular economy approach employing a techno-economic analysis methodology. Our assessment reveals that the AlgaFuel™ tank for microalgae cultivation plays a central role in the capital investment, accounting for 79% of the total budget required for equipment procurement. Additionally, the energy required for heating the photobioreactor, representing 20% of the operating costs, holds substantial significance. These findings highlight the critical importance of the optimal design of reactors in microalgae wastewater treatment. A well-designed reactor has the potential to enhance microalgae production rates and reduce biomass production costs. For instance, increasing the microalgae biomass productivity rate from 0.150 g/L.day to 0.375 g/L.day can result in a significant reduction in production cost, from \$2648 to \$1023 per ton of dry biomass.

Acknowledgments

This work was funded by MITACS, the City of Victoriaville, Sani-Marc, the Consortium de recherche et d'innovation en bioprocédés industriels (CRIBIQ) and the Fonds de recherche du Québec – Nature et Technologies (FRQ-NT) (QC, Canada). The authors wish to express thanks to the staff of the Industrial Research Chair on Environment and Biotechnology of the University of Quebec at Trois-Rivières (now the Municipal research chair for sustainable cities) (QC, Canada) and Innofibre of the Cegep of Trois-Rivières (QC, Canada) for their technical support.

CONCLUSION

Ce projet de maîtrise se concentre sur le bioraffinage algal comme une voie potentielle pour la production de biocarburants et de bioproduits. La technologie des microalgues est une des solutions de remplacement aux produits et énergies issus du pétrole, réduisant ainsi les émissions de GES. Ce mémoire par article présente une étude de cas concret sur le traitement des eaux usées industrielles et agroalimentaires par une culture de microalgues dans le parc industriel de la ville de Victoriaville (QC, Canada). Nous avons utilisé des données de laboratoire et des essais à l'échelle pilote du procédé RT-Algae utilisé dans le cadre du projet Vertech pour la production de biomasse à partir des microalgues. Ces données ont permis d'évaluer la faisabilité d'une approche d'économie circulaire en utilisant une méthodologie d'analyse technico-économique. Notre évaluation révèle que le réservoir AlgaFuel™ pour la culture de microalgues joue un rôle central dans l'investissement en capital, représentant 79% du budget total nécessaire pour l'acquisition d'équipements. De plus, l'énergie requise pour chauffer le photobioréacteur, constituant 20% des coûts d'exploitation, ce qui constitue une partie substantielle. Ces résultats mettent en évidence l'importance cruciale de la conception optimale des réacteurs dans le traitement des eaux usées par les microalgues. Un réacteur bien conçu a le potentiel d'améliorer les taux de production de microalgues et de réduire les coûts de production de la biomasse. Par exemple, augmenter le taux de productivité de la biomasse de microalgues de 0,150 g/L.jour à 0,375 g/L.jour peut entraîner une réduction significative des coûts de production, passant de 2648 \$ à 1023 \$ par tonne de biomasses sèche.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] H. Lee, K. Calvin, D. Dasgupta, G. Krinner, A. Mukherji, P. Thorne, C. Trisos, J. Romero, P. Aldunce, and A. C. Ruane, “CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report Summary for Policymakers,” *CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report: Summary for Policymakers*, 2024.
- [2] N. Unies, "Convention-cadre sur les changements climatiques."
- [3] IRENA, *Renewable energy statistics 2023*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2023.
- [4] F. Cherubini, G. Jungmeier, M. Mandl, C. Philips, M. Wellisch, H. Jrgensen, I. Skiadas, L. Boniface, M. Dohy, and J.-C. Pouet, "IEA bioenergy Task 42 on biorefineries: co-production of fuels, chemicals, power and materials from biomass." pp. 1-37.
- [5] F. Cherubini, “The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals,” *Energy conversion and management*, vol. 51, no. 7, pp. 1412-1421, 2010.
- [6] H. Y. Leong, C.-K. Chang, K. S. Khoo, K. W. Chew, S. R. Chia, J. W. Lim, J.-S. Chang, and P. L. Show, “Waste biorefinery towards a sustainable circular bioeconomy: a solution to global issues,” *Biotechnology for Biofuels*, vol. 14, no. 1, pp. 1-15, 2021.
- [7] M. Benyagoub, and A. B. Amor, “Bioeconomy in Québec: Innovations to Shift from Fossil-Based to Biobased Industries,” *Industrial Biotechnology*, vol. 15, no. 3, pp. 110-112, 2019.
- [8] T. Werpy, and G. Petersen, *Top value added chemicals from biomass: volume I-- results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas*, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2004.
- [9] L. Zhu, “Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: An innovative framework,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 41, pp. 1376-1384, 2015.
- [10] A. Singh, P. S. Nigam, and J. D. Murphy, “Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels,” *Bioresource technology*, vol. 102, no. 1, pp. 26-34, 2011.
- [11] M. Rizwan, G. Mujtaba, S. A. Memon, K. Lee, and N. Rashid, “Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 394-404, 2018.

- [12] P. Spolaore, C. Joannis-Cassan, E. Duran, and A. Isambert, "Commercial applications of microalgae," *Journal of bioscience and bioengineering*, vol. 101, no. 2, pp. 87-96, 2006.
- [13] C. Safi, B. Zebib, O. Merah, P.-Y. Pontalier, and C. Vaca-Garcia, "Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 265-278, 2014.
- [14] L. Machado, G. Carvalho, and R. N. Pereira, "Effects of innovative processing methods on microalgae cell wall: Prospects towards digestibility of protein-rich biomass," *Biomass*, vol. 2, no. 2, pp. 80-102, 2022.
- [15] S. Jareonsin, and C. Pumas, "Advantages of heterotrophic microalgae as a host for phytochemicals production," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 9, pp. 628597, 2021.
- [16] J. S. Tan, S. Y. Lee, K. W. Chew, M. K. Lam, J. W. Lim, S.-H. Ho, and P. L. Show, "A review on microalgae cultivation and harvesting, and their biomass extraction processing using ionic liquids," *Bioengineered*, vol. 11, no. 1, pp. 116-129, 2020.
- [17] R. R. Narala, S. Garg, K. K. Sharma, S. R. Thomas-Hall, M. Deme, Y. Li, and P. M. Schenk, "Comparison of microalgae cultivation in photobioreactor, open raceway pond, and a two-stage hybrid system," *Frontiers in Energy Research*, vol. 4, pp. 29, 2016.
- [18] K. Larsdotter, "Wastewater treatment with microalgae-a literature review," *Vatten*, vol. 62, no. 1, pp. 31, 2006.
- [19] G. Chen, L. Zhao, and Y. Qi, "Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: a critical review," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 282-291, 2015.
- [20] D. Puyol, D. J. Batstone, T. Hülsen, S. Astals, M. Peces, and J. O. Krömer, "Resource recovery from wastewater by biological technologies: opportunities, challenges, and prospects," *Frontiers in microbiology*, vol. 7, pp. 2106, 2017.
- [21] F. Wollmann, S. Dietze, J. U. Ackermann, T. Bley, T. Walther, J. Steingroewer, and F. Krujatz, "Microalgae wastewater treatment: Biological and technological approaches," *Engineering in Life Sciences*, vol. 19, no. 12, pp. 860-871, 2019.
- [22] S. Henkanatte-Gedera, T. Selvaratnam, M. Karbakhshravari, M. Myint, N. Nirmalakhandan, W. Van Voorhies, and P. J. Lammers, "Removal of dissolved organic carbon and nutrients from urban wastewaters by *Galdieria sulphuraria*: Laboratory to field scale demonstration," *Algal Research*, vol. 24, pp. 450-456, 2017.
- [23] S. F. Mohsenpour, S. Hennige, N. Willoughby, A. Adeloje, and T. Gutierrez, "Integrating micro-algae into wastewater treatment: A review," *Science of the Total Environment*, vol. 752, pp. 142168, 2021.
- [24] A. Abdelfattah, S. S. Ali, H. Ramadan, E. I. El-Aswar, R. Eltawab, S.-H. Ho, T. Elsamahy, S. Li, M. M. El-Sheekh, and M. Schagerl, "Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects," *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 13, pp. 100205, 2023.
- [25] G. Singh, and S. Patidar, "Microalgae harvesting techniques: A review," *Journal of environmental management*, vol. 217, pp. 499-508, 2018.

- [26] A. I. Barros, A. L. Gonçalves, M. Simões, and J. C. Pires, "Harvesting techniques applied to microalgae: a review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 41, pp. 1489-1500, 2015.
- [27] M. Roy, and K. Mohanty, "A comprehensive review on microalgal harvesting strategies: Current status and future prospects," *Algal Research*, vol. 44, pp. 101683, 2019.
- [28] N. Uduman, Y. Qi, M. K. Danquah, G. M. Forde, and A. Hoadley, "Dewatering of microalgal cultures: a major bottleneck to algae-based fuels," *Journal of renewable and sustainable energy*, vol. 2, no. 1, 2010.
- [29] F. Fasaei, J. Bitter, P. Slegers, and A. Van Boxtel, "Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems," *Algal Research*, vol. 31, pp. 347-362, 2018.
- [30] A. K. Lee, D. M. Lewis, and P. J. Ashman, "Harvesting of marine microalgae by electroflocculation: the energetics, plant design, and economics," *Applied Energy*, vol. 108, pp. 45-53, 2013.
- [31] D. L. Barreiro, W. Prins, F. Ronsse, and W. Brilman, "Hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae for biofuel production: state of the art review and future prospects," *Biomass and bioenergy*, vol. 53, pp. 113-127, 2013.
- [32] M. L. Menegazzo, and G. G. Fonseca, "Biomass recovery and lipid extraction processes for microalgae biofuels production: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, pp. 87-107, 2019.
- [33] A. Hosikian, S. Lim, R. Halim, and M. K. Danquah, "Chlorophyll extraction from microalgae: A review on the process engineering aspects," *International journal of chemical engineering*, vol. 2010, 2010.
- [34] V. Pasquet, J.-R. Chérouvrier, F. Farhat, V. Thiéry, J.-M. Piot, J.-B. Bérard, R. Kaas, B. Serive, T. Patrice, and J.-P. Cadoret, "Study on the microalgal pigments extraction process: Performance of microwave assisted extraction," *Process Biochemistry*, vol. 46, no. 1, pp. 59-67, 2011.
- [35] J. Rajesh Banu, S. Kavitha, M. Gunasekaran, and G. Kumar, "Microalgae based biorefinery promoting circular bioeconomy-techno economic and life-cycle analysis," *Bioresource technology*, 2020.
- [36] G. Towler, and R. Sinnott, *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*: Butterworth-Heinemann, 2021.
- [37] S. Barnabé, Dubois-Caléro, N., Adjallé, K., Bourdeau, N., Lemire, M., Boens, B., Duquette, S. , *Culture intensive d'algues à haute valeur calorifique et valorisation de la biomasse dans une aluminerie pour réduire sa dépendance aux carburants fossiles. Final technical report (for Rio Tinto Alcan)*, UQTR-Innofibre-Alga-Labs, 2014.
- [38] F. G. Acién, E. Molina, J. M. Fernández-Sevilla, M. Barbosa, L. Gouveia, C. Sepúlveda, J. Bazaes, and Z. Arbib, "20 - Economics of microalgae production," *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts*, C. Gonzalez-Fernandez and R. Muñoz, eds., pp. 485-503: Woodhead Publishing, 2017.
- [39] A. Abdelfattah, S. S. Ali, H. Ramadan, E. I. El-Aswar, R. Eltawab, S.-H. Ho, T. Elsamahy, S. Li, M. M. El-Sheekh, M. Schagerl, M. Kornaros, and J. Sun, "Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent

- advances, and future prospects,” *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 13, pp. 100205, 2023/01/01/, 2023.
- [40] A. Chan, H. Salsali, and E. McBean, “Nutrient removal (nitrogen and phosphorous) in secondary effluent from a wastewater treatment plant by microalgae,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 118-124, 2014.
- [41] X. You, L. Yang, X. Zhou, and Y. Zhang, “Sustainability and carbon neutrality trends for microalgae-based wastewater treatment: A review,” *Environmental Research*, vol. 209, pp. 112860, 2022/06/01/, 2022.
- [42] M. Schagerl, I. Ludwig, M. El-Sheekh, M. Kornaros, and S. S. Ali, “The efficiency of microalgae-based remediation as a green process for industrial wastewater treatment,” *Algal Research*, vol. 66, pp. 102775, 2022/07/01/, 2022.
- [43] B. Boëns, G. Pilon, N. Bourdeau, K. Adjallé, and S. Barnabé, “Hydrothermal liquefaction of a wastewater native *Chlorella* sp. bacteria consortium: biocrude production and characterization,” *Biofuels*, vol. 7, no. 6, pp. 611-619, 2016.
- [44] P. Bhatt, G. Bhandari, K. Bhatt, and H. Simsek, “Microalgae-based removal of pollutants from wastewaters: Occurrence, toxicity and circular economy,” *Chemosphere*, vol. 306, pp. 135576, 2022.
- [45] N. Abdel-Raouf, A. Al-Homaidan, and I. Ibraheem, “Microalgae and wastewater treatment,” *Saudi journal of biological sciences*, vol. 19, no. 3, pp. 257-275, 2012.
- [46] L. Moreno-Garcia, K. Adjallé, S. Barnabé, and G. Raghavan, “Microalgae biomass production for a biorefinery system: recent advances and the way towards sustainability,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 493-506, 2017.
- [47] L. Moreno-Garcia, Y. Gariépy, N. Bourdeau, S. Barnabé, and G. Raghavan, “Optimization of the proportions of four wastewaters in a blend for the cultivation of microalgae using a mixture design,” *Bioresource technology*, vol. 283, pp. 168-173, 2019.
- [48] M. Cinq-Mars, N. Bourdeau, P. Marchand, I. Desgagné-Penix, and S. Barnabé, “Characterization of two microalgae consortia grown in industrial wastewater for biomass valorization,” *Algal Research*, vol. 62, pp. 102628, 2022.
- [49] L. M. García, Y. Gariépy, S. Barnabé, and V. Raghavan, “Biorefinery of microalgae biomass cultivated in wastewaters,” *Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts*, pp. 149-180: Elsevier, 2020.
- [50] F. Bélanger-Lépine, M. Lemire-Lamothe, A. Tremblay, S. Rondeau, P. Marchand, Y. Huot, and S. Barnabé, “Cultivation of an algae-bacteria consortium in a mixture of industrial wastewater to obtain valuable products for local use,” *Industrial Biotechnology*, vol. 16, no. 1, pp. 33-42, 2020.
- [51] J. K. Pittman, A. P. Dean, and O. Osundeko, “The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources,” *Bioresource technology*, vol. 102, no. 1, pp. 17-25, 2011.
- [52] M. Zabochnicka, M. Krzywonos, Z. Romanowska-Duda, S. Szufa, A. Darkalt, and M. Mubashar, “Algal Biomass Utilization toward Circular Economy,” *Life (Basel)*, vol. 12, no. 10, Sep 23, 2022.
- [53] G. B. Leite, A. E. Abdelaziz, and P. C. Hallenbeck, “Algal biofuels: challenges and opportunities,” *Bioresour Technol*, vol. 145, pp. 134-41, Oct, 2013.

- [54] J. Chen, Q. Li, C. Chang, J. Bai, L. Liu, S. Fang, and H. Li, "Techno-economic analysis of biodiesel production from microalgae: a review," *Trends Renewable Energy*, vol. 3, pp. 141-152, 2017.
- [55] W. N. A. Kadir, M. K. Lam, Y. Uemura, J. W. Lim, and K. T. Lee, "Harvesting and pre-treatment of microalgae cultivated in wastewater for biodiesel production: a review," *Energy conversion and management*, vol. 171, pp. 1416-1429, 2018.
- [56] L. Brennan, and P. Owende, "Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 14, no. 2, pp. 557-577, 2010.
- [57] F. Bélanger-Lépine, A. Tremblay, Y. Huot, and S. Barnabé, "Cultivation of an algae-bacteria consortium in wastewater from an industrial park: Effect of environmental stress and nutrient deficiency on lipid production," *Bioresource technology*, vol. 267, pp. 657-665, 2018.
- [58] N. Dubois-Calero, Magnin, G. , *System and process for the treatment of gases and effluents, and production of alga biomass*, 2011.
- [59] N. Bourdeau, K. Adjallé, J. Paradis, S. Duquette, R. Dosnon-Olette, N. Dubois-Calero, and S. Barnabé, "Les technologies papetières appliquées à la production de microalgues," 2015.
- [60] N. Bourdeau, Boëns, B., Adjallé, K., Paradis, J., Pilon, G., Dubois-Caléro, N., Olette, R., Barnabé, S., "RT - Algae: an integrated cultivation, harvesting, dewatering and conditioning process of microalgae biomass for biofuel and high value compounds production," in World Congress on Industrial Biotechnology, Montreal, Canada, 2015.
- [61] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, R. E. West, K. Timmerhaus, and R. West, *Plant design and economics for chemical engineers*: McGraw-Hill New York, 2010.
- [62] S. Barnabé, Bourdeau, N., *Projet pilote VERTECH I : Résultats et perspectives. Final technical report (for Sani-Marc, Victoriaville City, Lactalis Canada, Abbott Laboratoires, Gesterra)*, UQTR-Innofibre, 2019.
- [63] F. Acién, J. Fernández, J. Magán, and E. Molina, "Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it," *Biotechnology advances*, vol. 30, no. 6, pp. 1344-1353, 2012.
- [64] M. A. Tribe, and R. L. W. Alpine, "Scale economies and the "0.6 rule"," *Engineering Costs and Production Economics*, vol. 10, no. 4, pp. 271-278, 1986/12/01/, 1986.
- [65] H. J. Lang, "Simplified approach to preliminary cost estimates," *Chemical Engineering*, vol. 55, no. 6, pp. 112-113, 1948.
- [66] M. Musa, A. Doshi, R. Brown, and T. J. Rainey, "Microalgae dewatering for biofuels: A comparative techno-economic assessment using single and two-stage technologies," *Journal of Cleaner Production*, vol. 229, pp. 325-336, 2019/08/20/, 2019.
- [67] M. A. Borowitzka, and A. Vonshak, "Scaling up microalgal cultures to commercial scale," *European Journal of Phycology*, vol. 52, no. 4, pp. 407-418, 2017.
- [68] J. Hoffman, R. C. Pate, T. Drennen, and J. C. Quinn, "Techno-economic assessment of open microalgae production systems," *Algal research*, vol. 23, pp. 51-57, 2017.

- [69] Y. Sui, Y. Jiang, M. Moretti, and S. E. Vlaeminck, “Harvesting time and biomass composition affect the economics of microalgae production,” *Journal of Cleaner Production*, pp. 120782, 2020.
- [70] M. Wiatrowski, B. C. Klein, R. W. Davis, C. Quiroz-Arita, E. C. Tan, R. W. Hunt, and R. E. Davis, “Techno-economic assessment for the production of algal fuels and value-added products: opportunities for high-protein microalgae conversion,” *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, vol. 15, no. 1, pp. 1-14, 2022.