

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



LAVALEF

Département Génie Chimique
Laboratoire de valorisation des énergies fossiles

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Chimique

**Analyse du cycle de vie d'un système
hybride Biomasse-Solaire pour la
production de Biocarburants**

Présentés et soutenus publiquement le (27/09/2020) par :
Azzeddine NAITALI et Tarek MEDAOUD

Sous la Direction de :
M. Toudert AHMED-ZAÏD Professeur
M. Mohamed AMOURI MRB

Composition du jury :

Président :	Mr R. BOUARAB	Prof	ENP
Examinatrices :	Mme Y. TCHOULAK-DAHOUN	CC	ENP
	Mme S. SAHI	MCB	ENP
Promoteurs :	Mr M. AMOURI	MRB	CDER
	Mr T. AHMED ZAID	Prof	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

LAVALEF

Département Génie Chimique
Laboratoire de valorisation des énergies fossiles

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Chimique

**Analyse du cycle de vie d'un système
hybride Biomasse-Solaire pour la
production de Biocarburants**

Présentés et soutenus publiquement le (27/09/2020) par :
Azzeddine NAITALI et Tarek MEDAOUD

Sous la Direction de :
M. Toudert AHMED-ZAÏD Professeur
M. Mohamed AMOURI MRB

Composition du jury :

Président :	Mr R. BOUARAB	Prof	ENP
Examinatrices :	Mme Y. TCHOULAK-DAHOUN	CC	ENP
	Mme S. SAHI	MCB	ENP
Promoteurs :	Mr M. AMOURI	MRB	CDER
	Mr T. AHMED ZAID	Prof	ENP

ملخص:

يتواصل البحث لتطوير الطاقات النقية من أجل خفض انبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحراري والحفاظ على البيئة. في خضم هذا السباق، تتسارع الأبحاث للإثبات أن الوقود الحيوي المستخرج من الطحالب الدقيقة هو الأقرب لتعويض الوقود الأحفوري. مع ذلك يبقى مصدر الطاقة الأولية المستخدمة خلال مراحل إنتاج هذا الوقود الحيوي أحفوريا ما يبقى انبعاثات الكربون مرتفعة. لتقييم وقياس التأثيرات البيئية التي ينطوي عليها هذا البديل، ومن أجل تحسين خطوات الإنتاج عن طريق تقليل هذه الانبعاثات إلى الحد الأدنى، سنقوم بإجراء تحليل دورة الحياة على عملية إنتاج الوقود الحيوي من هذه الطحالب مع اقتراح نظام هجين بين الطاقة الشمسية الحرارية والغاز المستخلص من بقايا الكتلة الحيوية لهذه الطحالب لتغطية جميع الاحتياجات الطاقوية لنظام إنتاج هذا الوقود في جميع مراحلها وفي كل الأوقات.

الكلمات الدالة: تحليل دورة الحياة، الوقود الحيوي، الطحالب المجهرية، محطة شمسية حرارية، الاثار البيئية.

Abstract

In order to reduce greenhouse gas emissions and preserve the environment, the development of bioenergy is necessary, and researchers are promoting the production of biofuels from various biomass feedstocks. Microalgae are a good alternative for producing biofuels because of their high lipid yield. However, this technology can have negative impacts which can be assessed by a life cycle analysis (LCA). In this work, an LCA an integrated process of biofuels production from microalgae was performed in order to assess its sustainability.

Key words: LCA, Biofuel, Microalgae, CSP, Environmental impact.

Résumé

Dans le but de réduire les émissions des gaz à effet de serre et de préserver l'environnement, le développement de la bioénergie semble incontournable et les biocarburants de 3^{ème} génération à base de microalgues sont les plus prometteurs pour remplacer les combustibles fossiles en raison de leur fort rendement en lipides. Cependant, certaines étapes de production de ces biocarburants consomment de l'énergie fossile et ont donc des impacts négatifs sur l'environnement. Afin d'évaluer ces impacts, une analyse de cycle de vie d'un procédé intégré de production de biocarburants à partir des microalgues est entreprise afin d'en évaluer la durabilité.

Mots clés : ACV, Biocarburant, Microalgue, centrale solaire thermique, impacts environnementaux

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents et ma chère sœur, dont nul mot ne peut exprimer mes sincères sentiments de reconnaissance, pour leur patience, pour leurs encouragements continus dès mon enfance, pour leurs aide et soutien moral dans les moments les plus difficiles, en témoignage de mon grand amour et de mon respect pour vous maman, papa, Imène.

Mes très chers amis que je n'oublierai jamais, merci d'avoir été présents, merci pour votre soutien, merci pour vos encouragements et merci pour les merveilleux moments passés ensemble, je vous adore.

A toute ma famille,

A tous ceux que j'aime, qui sans eux ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Azzeddine NAITALI

Remerciements

Au terme de ce travail,

Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements pour toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Nous remercions également nos Promoteurs le Pr Toudert AHMED ZAID et le Dr Mohamed AMOURI pour nous avoir orientés, aidés, conseillés et pour tout le temps qu'ils nous ont consacré.

Nous remercions aussi la direction du CDER qui nous a permis d'utiliser le logiciel SIMAPRO pour achever notre travail.

Nous remercions chaque membre du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail. Que le Pr Mr R. BOUARAB soit remercié pour avoir accepté de présider le jury.

Nous exprimons toute notre gratitude à nos professeurs Mme Y. TCHOULAK-DAHOUN et Mme S. SAHI pour le temps qu'elles ont consacré à l'évaluation de ce travail.

Nous présentons nos sincères remerciements à tous nos enseignants du département Génie Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique, merci de nous avoir appris le nécessaire de la formation, de nous avoir toujours guidés et soutenus, car sans vous nous ne serions jamais arrivés à réaliser ce travail.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	11
Chapitre 1: Analyse de Cycle de Vie (ACV).....	13
1.1 Introduction :.....	14
1.2 Définition de l'ACV :.....	14
1.3 Définition des objectifs et du champ d'étude :	15
1.3.1 Définition du système :.....	15
1.3.2 Unité fonctionnelle :	16
1.3.3 Règles d'allocation :.....	16
1.4 Réalisation de l'inventaire :.....	16
1.4.1 Evaluation des flux de matière :.....	17
1.4.2 Emission de substances polluantes :.....	17
1.4.3 Evaluation des consommations d'énergie :.....	18
1.5 Analyse des impacts environnementaux :.....	18
1.5.1 Consommations de ressources :.....	19
1.5.2 Impacts associés aux émissions dans l'air :.....	19
1.5.3 Impacts associés aux émissions dans l'eau :.....	19
1.5.4 Production de déchets solides :.....	19
1.5.5 Méthodologie d'évaluation :	20
1.6 Interprétation :	20
1.7 Conclusion :.....	21
Chapitre 2: Microalgues pour les biocarburants de 3ème génération.....	22
2.1 Introduction :.....	23

2.2	Généralités sur les biocarburants :.....	23
2.2.1	Définition d'un biocarburant :	23
2.2.2	Classification des biocarburants :	23
2.2.3	Les types de biocarburants :.....	27
2.3	Généralités sur les microalgues :	28
2.3.1	Définition :.....	28
2.3.2	Intérêt d'utilisation	29
2.3.3	Le choix des microalgues pour produire des biocarburants :.....	29
2.3.4	Composition biochimique des microalgues	30
2.3.5	<i>Chlorella vulgaris</i> :.....	31
2.4	La valorisation de la biomasse algale par digestion anaérobie :	33
2.4.1	Les étapes de la méthanisation :	34
2.4.2	Physico-chimie de la digestion anaérobie :.....	34
Chapitre 3: Hybridation de centrale Solaire thermique à concentration		36
3.1	Introduction.....	37
3.2	Principes de base d'une centrale solaire thermique	37
3.2.1	Irradiation solaire et potentiel.....	37
3.2.2	Technologie de production :.....	38
3.2.3	Les composantes d'une centrale CSP :	39
3.2.4	Le système hybride biomasse-solaire :.....	41
Chapitre 4: Production des biocarburants en utilisant un système hybride		43
4.1	Introduction :.....	44
4.2	Biodiesel issue des microalgues (<i>Chlorella vulgaris</i>) :.....	44
4.3	Description du cycle de production du biocarburant à partir d'algues :.....	45
4.3.1	Système de culture et récolte de la biomasse microalgale :	46
4.3.2	Processus de prétraitement de fermentation de la biomasse :	49
4.3.3	Extraction et transestérification de l'huile en biodiesel :.....	50

4.3.4	Processus de Digestion anaérobie :	50
4.3.5	Processus hybride de production de l'énergie	51
4.4	Schéma du procédé :	52
Chapitre 5: ACV de la production du Biodiesel à partir de microalgues		53
5.1	Définition des objectifs et du champ de l'étude :	54
5.1.1	Objectifs envisagés :	54
5.1.2	Public ciblé :	54
5.1.3	Le champ du système étudié :	54
5.1.4	Fonction des produits.....	54
5.1.5	L'unité fonctionnelle	54
5.1.6	Frontières et limites du système	55
5.2	Inventaire de cycle de vie :	55
5.2.1	Hypothèses de l'inventaire :	55
5.2.2	Inventaire de cycle de vie :	58
5.3	Etudes d'impacts du système :	61
5.3.1	Etudes d'impacts des différentes étapes du procédé.....	61
5.3.2	Contribution des processus aux catégories d'impact	62
5.3.3	Calcul du ratio énergétique et l'intensité de carbone	64
CONCLUSION GÉNÉRALE		65
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		67

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Classification des biocarburants selon la source de la matière première[14].....	26
Tableau 2.2 Production de microalgues : avantages et inconvénients	29
Tableau 2.3 Comparaison des sources de biodiesel[18]	30
Tableau 2.4 Compositions biochimiques de microalgues[19]	31
Tableau 5.1 Caractéristiques de l'étang de type Raceway utilisé.....	56
Tableau 5.2 Conditions opératoires de la conversion de la biomasse microalgale	56
Tableau 5.3 Principaux paramètres caractéristiques de Collecteur l'EuroTrough II[57]	57
Tableau 5.4 Inventaire de cycle de vie	58
Tableau 5.5 Bilan énergétique récapitulatif du cycle de vie	59
Tableau 5.6 Données techniques et opérationnelles spécifiques pour la centrale solaire CSP	59
Tableau 5.7 Inventaire de cycle de vie de la centrale hybride	60
Tableau 5.8 Contribution des processus aux Consommation d'énergie primaire et réchauffement climatique	64

Liste des figures

Figure 1.1 Cadre méthodologique de l'ACV, d'après la norme ISO 14040 (2006)	15
Figure 1.2 Les flux de matière et d'énergie entrants (intrants) et sortants (extrants)	17
Figure 1.3 schéma montrant la méthodologie d'évaluation des impacts	20
Figure 1.4 Schéma montrant la nécessité des données de l'ACV des intrants énergétiques et chimiques	20
Figure 2.1 Filières des biocarburants de 2e génération[11]	25
Figure 2.2 Microalgues[11].....	29
Figure 2.3 Vue microscopique d'une colonie de <i>Chlorella vulgaris</i> [23]	32
Figure 2.4 Photographie de <i>Chlorella vulgaris</i> [24]	32
Figure 2.5 La méthanisation de la biomasse microalgale	33
Figure 2.6 Les quatre étapes principales de méthanisation.....	34
Figure 2.7 Schéma des étapes de la fermentation[32].....	34
Figure 3.1 Zones appropriées pour l'installation des CSP[36]	38
Figure 3.2 Les quatre technologies principales de production d'électricité d'origine solaire par voie thermodynamique[37]	38
Figure 4.1 Schéma représentatif des différentes étapes de production de biocarburants de 3ème génération	45
Figure 4.2 Bassins ouverts de culture de microalgues	47
Figure 4.3 Description du système hybride.....	51
Figure 4.4 Organigramme des processus de production du biodiesel microalgale.....	52
Figure 5.1 Configuration d'un Bassin ouvert pour la production des microalgues[40].....	55
Figure 5.2 Contribution des sous-systèmes de production du biodiesel de chlorelle aux catégories d'impacts environnementaux.....	61
Figure 5.3 Contribution des processus de production aux catégories d'impact du biodiesel de <i>Chlorella vulgaris</i>	63

Liste des abréviations

ACV :	Analyse de cycle de vie
COV :	Composés organiques volatils
CSP :	Centrale solaire thermodynamique ; de l'anglais (Concentrated Solar Power)
DAP :	Phosphate de diammonium ; de l'anglais (Diammonium Phosphate)
DBO:	Demande biochimique en oxygène
DCE:	Epuisement abiotique ; de l'anglais (Abiotic depletion (fossil fuels))
DCO:	Demande chimique en oxygène
DNI:	Irradiation directe normale ; de l'anglais (Irradiation directe normale)
FAAE :	Esters Allyliques d'Acide Gras ; de l'anglais (Fatty Acid Alkyl Ester)
UF:	Unité fonctionnelle
GES :	Gaz à effet de serre
ISO :	Organisation internationale de normalisation
LCA :	Analyse de cycle de vie ; de l'anglais (Life cycle assessment)
PA:	Potentiel d'acidification
PE:	Potentiel d'eutrophication
PV :	Photovoltaïque
PRG:	Potentiel de réchauffement global
SETAC :	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
ST :	Solides totaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans un souci permanent de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de préservation de l'environnement, on se tourne de plus en plus vers les énergies renouvelables, dont la bioénergie.

De plus, les problèmes liés à l'instabilité politique des régions d'extraction pétrolière et l'augmentation des coûts du pétrole jouent également un rôle dans le développement des biocarburants qui apparaît comme l'une des réponses à ces difficultés. Mais c'est surtout la nécessité d'assurer une transition énergétique salubre qui justifie le plus la mise au point de carburants alternatifs pour les besoins stratégiques du secteur des transports.

Cependant, le système de production des biocarburants nécessite toujours une consommation énergétique souvent pesante, et, très souvent, l'énergie consommée est d'origine fossile. Pour répondre aux soucis environnementaux liés à la consommation d'énergie fossile, il n'y a pas d'autre choix que de s'orienter vers les énergies renouvelables. Dans ce mémoire, nous allons analyser le cycle de vie de la production de biocarburant à partir des microalgues tout en mettant en œuvre un système hybride de production d'énergie à savoir la chaleur et l'électricité à partir de l'insertion d'une unité de concentration solaire couplée avec la digestion anaérobie de la biomasse résiduelle des microalgues du procédé.

L'ACV inclura tout le processus de fabrication des biocarburants, l'énergie et le transport des biocarburants et les infrastructures afin d'évaluer et quantifier les impacts environnementaux liés aux émissions de gaz à effets de serre.

Cette étude comporte cinq chapitres. En premier lieu, nous allons introduire la notion d'analyse de cycle de vie avec toutes ses étapes. Dans le deuxième chapitre nous parlerons de la production des biocarburants de 3^{ème} génération. Dans le troisième, nous présenterons l'hybridation centrale solaire à concentration thermique, qui va assurer l'intégralité des besoins énergétiques (chaleur et électricité) de notre système de production. Nous détaillerons l'ensemble de ce procédé dans le chapitre 4. Dans le cinquième chapitre, nous établirons l'inventaire du cycle de vie du procédé tout en définissant les objectifs, le champ de l'étude et les hypothèses prises en compte dans notre travail. C'est sur la base de cet inventaire détaillé que repose l'ACV du procédé étudié. Cette ACV est entreprise à l'aide du logiciel SimaPro, véritable outil d'aide à la prise de décision. Nous donnons enfin une brève conclusion sur les résultats de ce travail.

CHAPITRE 1: ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)

1.1 Introduction :

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un des outils d'évaluation des impacts environnementaux. C'est une approche permettant de déterminer les priorités d'action à mener pour diminuer les impacts liés à la fabrication d'un produit.

Historiquement, l'ACV trouve ses origines à la fin des années 60 dans le développement par des chercheurs américains, suisses et suédois de modèles associant l'utilisation de matériaux bruts et consommation d'énergie avec la production d'un produit. Dans ce chapitre on décrit les principales étapes de la méthodologie de l'ACV. Il présente aussi des résultats d'ACV appliqués à l'évaluation des biocarburants[1].

1.2 Définition de l'ACV :

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode définie dans les normes internationales ISO (14040 :2006 et 14044 :2006) qui vise à modéliser les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service en se basant sur l'ensemble des ressources naturelles consommées et des substances émises dans l'environnement à chaque étape du cycle de vie du produit ou du service analysé[2].

La définition fournie par la norme ISO 14040 (2006) est la suivante : « L'analyse du Cycle de Vie est un outil d'évaluation des impacts sur l'environnement d'un système incluant l'ensemble des activités liés à un produit ou à un service depuis l'extraction des matières premières jusqu'au dépôt et traitement des déchets. »

Il s'agit d'une approche globale : elle est multi-étape, (l'ensemble du cycle de vie associé à la fonction étudiée est considéré), et multicritères, (plusieurs catégories d'impact sur l'environnement sont regardées). Les principaux domaines d'application de l'ACV sont :

- La quantification de l'impact environnemental d'un choix stratégique ;
- La comparaison des charges environnementales de différents produits, processus ou systèmes entre eux ou au sein des différentes étapes du cycle de vie d'un même produit ;
- L'amélioration de la performance environnementale d'un système ;

L'ACV a donc vocation à répondre aussi bien à des besoins internes (aide à l'écoconception, comparaison inter-sites...) qu'à des besoins externes (communication environnementale, rapports d'activité...). Selon les normes éditées par l'ISO et les recommandations de la SETAC, une ACV se déroule en quatre phases :

- La définition des objectifs et du champ d'étude.

- L'inventaire des émissions et des extractions : Il consiste à quantifier les émissions polluantes et les extractions de matières premières.
- Évaluer les impacts environnementaux des émissions et des extractions inventoriées précédemment.
- L'interprétation des résultats.

La démarche mise en œuvre se veut cyclique et itérative, avec de nombreux retours à chacune des étapes pour affiner les différentes hypothèses en fonction de leur importance sur les résultats de l'étude. La [Figure 1.1] illustre le cadre méthodologique de l'ACV en mettant en évidence le processus cyclique et itératif de l'ACV.

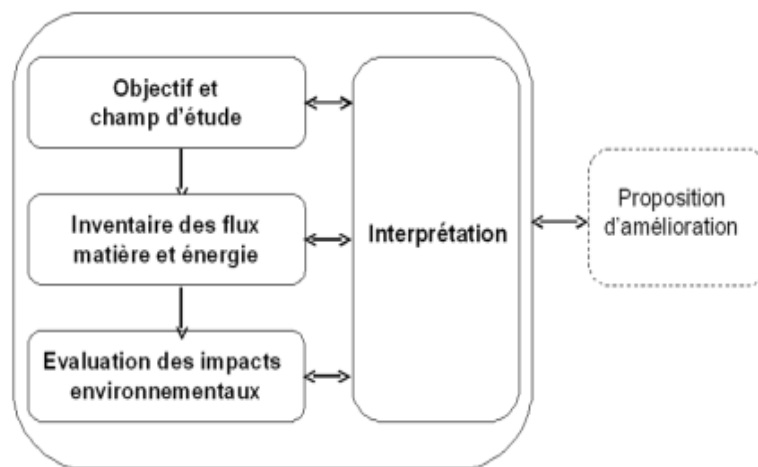


Figure 1.1 Cadre méthodologique de l'ACV, d'après la norme ISO 14040 (2006)

L'ACV se focalise uniquement sur les impacts environnementaux, et ne répond donc qu'au pilier environnemental du développement durable. Les deux autres piliers (social et l'économique) ne sont pas intégrés dans cet outil. La prise de décision faisant suite à une ACV doit donc être faite à la lumière d'analyses économiques et sociales complémentaires.

1.3 Définition des objectifs et du champ d'étude :

La phase de définition des objectifs et du champ d'étude est essentielle dans l'ACV. C'est pendant celle-ci que seront définis les objectifs de l'étude, le public concerné, le système étudié, le produit ou plus généralement la fonction du produit, l'unité fonctionnelle ainsi que la ou les méthodes choisies pour l'évaluation des impacts.

1.3.1 Définition du système :

Le champ d'étude de l'ACV est défini en fonction des domaines d'application et des motivations des commanditaires et des destinataires du travail. Selon (Guinée et al) il doit indiquer quelles sont les couvertures temporelles, géographiques et technologiques[3]. Il doit

aussi clairement définir les limites du système, l'inventaire, les émissions, les extractions et les impacts considérés. Cette étape spécifie de manière claire l'ensemble des flux entrants et sortants du système. Les critères pour l'inclusion des processus dans le système sont leur contribution en masse, en énergie ou impact environnemental, ce qui souligne le caractère itératif de l'étude[1].

1.3.2 Unité fonctionnelle :

En fonction des objectifs visés et du public concerné, l'unité fonctionnelle (UF) est choisie. Il s'agit d'une grandeur de référence adaptée à la fonction du produit évalué et à laquelle tous les flux et tous les impacts environnementaux sont rapportés. Cette unité doit impérativement être quantitative et additive, afin de pouvoir comparer différents systèmes entre eux, et traduire au mieux la fonction étudiée. L'UF peut varier fortement selon les objectifs et le contexte d'une étude. Les chercheurs ont mis en évidence des biais significatifs existant dans l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre liés à différents choix de modélisation au niveau de la définition du système et de ses limites, de l'unité fonctionnelle, du système de référence et des méthodes d'allocation. A partir de cette unité fonctionnelle, le flux de référence est défini comme la quantité de produit nécessaire pour remplir la fonction étudiée. Sur la base de ce flux de référence, il devient alors possible de réaliser l'inventaire des flux entrants (consommation de ressources) et des flux sortants (émissions vers l'environnement)[1],[4].

1.3.3 Règles d'allocation :

De nombreux systèmes conduisent à la formation de plusieurs produits remplissant différentes fonctions. Par exemple la production de biodiesel algal génère aussi la production de tourteaux, qui peut être utilisé comme source de production de bioéthanol (même fonction de production d'énergie) [5] ou comme source d'alimentation animale (fonction de nutrition)[6], Dans ces cas-là, des règles d'allocation régissent la part des flux de matière et d'énergie ainsi que des substances émises à attribuer à la réalisation de la fonction principale et à la réalisation des fonctions des coproduits[1].

1.4 Réalisation de l'inventaire :

L'étape d'inventaire concerne le recueil des données ainsi que leur traitement. Il s'agit généralement d'une phase très gourmande en temps de traitement des données. L'élément central de cette phase est l'attention portée à la qualité des données recueillies, puisque cette dernière influe directement sur celle des résultats obtenus. Plusieurs bases de données ont été

constituées au cours des dernières années, notamment Ecoinvent qui est très bien documentée et compte plus de 7900 procédés. Lors de cette étape, deux grands types de flux doivent être renseignés et quantifiés. Les flux techniques (ou économiques), qui correspondent aux produits ou services échangés entre les étapes du cycle de vie, et les flux environnementaux, qui correspondent aux extractions de ressources naturelles et aux émissions dans les trois compartiments de l'environnement (air, eau et sol)[1].

Détermination des flux de matière et d'énergie entrants (intrants) et sortants (extrants) pour l'ensemble des étapes du cycle de vie, comme montre la [Figure 1.2]

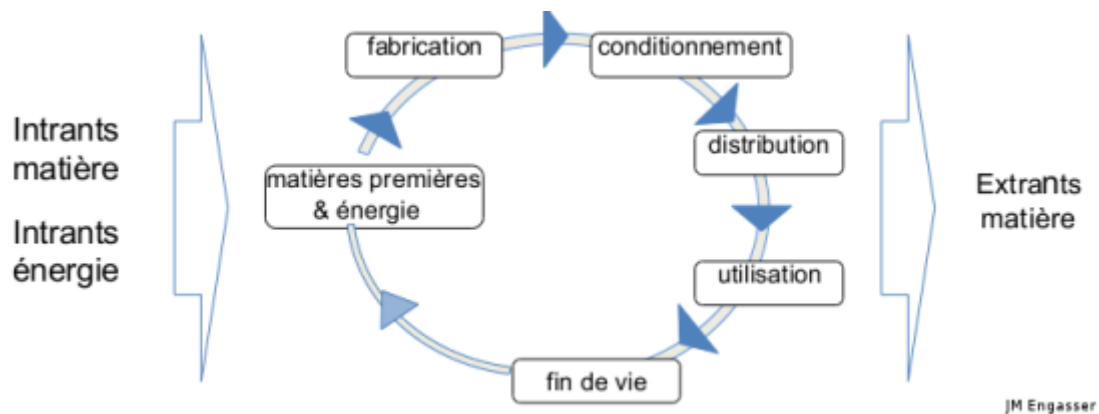


Figure 1.2 Les flux de matière et d'énergie entrants (intrants) et sortants (extrants)

1.4.1 Evaluation des flux de matière :

On évalue les différents flux de matière sortants et entrants (en kg en général) :

- Les intrants : Matières premières ; Produits chimiques ; Eau.
- Les extrants : Produit ; Coproduits ; Déchets solides, substances émises dans l'air et l'eau

1.4.2 Emission de substances polluantes :

Les substances polluantes pour l'air sont :

- CO₂, CH₄, hydrocarbures
- Composés organiques volatils (COV)
- N₂O, NO_x, NH₃
- SO_x
- HCl
- Composés halogénés

Les substances polluantes pour l'eau sont :

- Ammoniaque, nitrates
- Phosphates

- Métaux lourds
- Hydrocarbures

1.4.3 Evaluation des consommations d'énergie :

Les quantités d'énergie consommées au cours des différentes étapes du cycle de vie sont sous forme de :

- Carburant liquide : gazole, essence, en litres
- Charbon, en kg
- Gaz naturel, en m³
- Électricité, en kWh
- Biomasse, en kg

1.5 Analyse des impacts environnementaux :

A la fin de la phase d'inventaire, le praticien a recueilli l'ensemble des extractions de ressources et d'émissions vers l'environnement induites par la réalisation de l'unité fonctionnelle. Lors de l'analyse des impacts environnementaux, ces flux, dont le nombre peut atteindre plusieurs centaines, sont convertis en un nombre restreint d'indicateurs traduisant leurs impacts sur l'environnement. Les grandes aires de protection environnementale couvertes par l'ACV sont l'environnement naturel, la santé humaine et les ressources naturelles[7].

D'après le cadre méthodologique défini par les normes ISO, trois étapes sont essentielles dans l'analyse d'impact :

La première est le choix des catégories d'impact et des indicateurs associés. Les principaux critères de sélection sont (ISO 14044, 2006) :

- La complétude : l'ensemble des impacts environnementaux pertinents vis à vis du système étudié doivent être pris en compte.
- La non-redondance : les catégories d'impacts se doivent d'être les plus indépendantes possibles.
- La validité : les modèles de caractérisation des impacts doivent être acceptés et reconnus scientifiquement.

La seconde étape est la classification de chaque donnée d'inventaire dans une ou plusieurs catégories d'impacts. Par exemple le méthane a des effets sur le changement climatique et sur la formation de molécules photo-oxydantes.

Enfin le calcul des valeurs des indicateurs spécifiques à chaque catégorie d'impact est réalisé au moyen de facteurs de caractérisation. Différentes méthodes de caractérisation des impacts

existent et diffèrent selon les impacts considérés et le degré d'agrégation de ces derniers, mais il n'y a pas de consensus sur le choix d'une méthode de référence.

Les impacts environnementaux considérés dans les ACV sont :

- Consommations de ressources : énergie et matières premières ;
- Pollutions liées aux émissions dans l'air ;
- Pollutions liées aux émissions dans l'eau ;
- Productions de déchets solides ;
- Toxicité sur l'environnement (écotoxicité) et l'homme ;

1.5.1 Consommations de ressources :

La consommation des différentes ressources est considérée comme suit :

- Consommation d'énergie primaire : énergie globale consommée sous toutes les formes exprimées en Méga Joules (MJ)
- Ressources (matières premières) non renouvelables : pétrole, charbon, gaz naturel, minerais ...
- Ressources renouvelables : eau et biomasse

1.5.2 Impacts associés aux émissions dans l'air :

Les impacts liés aux émissions dans l'air sont :

- Réchauffement global : gaz à effet de serre : CO₂, H₂O, CH₄, N₂O ;
- Acidification atmosphérique : SO₂, NO_x, NH₃, HCl, HF ;
- Formation d'oxydants photochimiques : CH₄, hydrocarbures, COV, Nox ;
- Destruction d'ozone stratosphérique : composés halogénés ;
- Émission de métaux et particules

1.5.3 Impacts associés aux émissions dans l'eau :

Les impacts liés aux émissions dans l'eau sont :

- DCO (demande chimique en oxygène) ;
- DBO (demande biochimique en oxygène) ;
- Eutrophisation (phosphates, ammoniac, nitrates) ;
- Rejets de métaux ;

1.5.4 Production de déchets solides :

Les déchets solides produits peuvent être classés ainsi :

- Les déchets solides valorisés ;
- Les déchets solides éliminés non radioactifs (dangereux / non dangereux / inertes) ;
- Les déchets solides éliminés radioactifs ;

1.5.5 Méthodologie d'évaluation :

Ces indicateurs d'impact, qui mesurent l'importance des impacts pour l'ensemble du cycle, sont évalués à partir de l'inventaire matière et énergie comme illustré sur la [Figure 1.3 et Figure 1.4] :

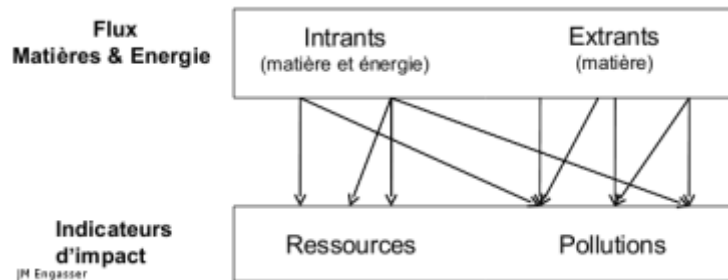


Figure 1.3 schéma montrant la méthodologie d'évaluation des impacts



Figure 1.4 Schéma montrant la nécessité des données de l'ACV des intrants énergétiques et chimiques

Calcul des indicateurs d'impact :

Chaque contribution spécifique d'un intrant ou extrant a un indicateur d'impact. Pour un impact considéré, calcul d'un indicateur global à partir des contributions des différents composants matière et énergétiques de l'inventaire selon l'équation (1) :

$$\text{Indicateur global d'impact} = \sum_i \text{quantité de composant } i \times \text{facteur d'impact du composant } i \dots\dots\dots (1)$$

1.6 Interprétation :

La dernière phase de l'ACV est l'interprétation des résultats, permettant d'évaluer les résultats obtenus et les conclusions qui en découlent. On doit y expliquer, les limites de l'étude et apporter des recommandations. L'interprétation est structurée autour de trois grands axes : l'identification des enjeux significatifs, la vérification de l'étude et l'établissement des

conclusions et des recommandations. On y estime aussi la robustesse, la qualité et l'incertitude des données utilisées et des résultats obtenus.

1.7 Conclusion :

Ce premier chapitre établit les éléments de connaissance indispensables à la compréhension de la méthodologie de l'ACV. Cette dernière s'articule autour de quatre grandes étapes, faisant chacune appel à différents champs disciplinaires [3]:

- La définition des objectifs et du champ d'étude fixe les éléments du système à inclure et à exclure de l'étude, et détermine l'unité fonctionnelle. Cette étape repose sur la consultation des différents acteurs (consommateurs, décisionnaires, scientifiques...) du système analysé.
- La réalisation de l'inventaire détermine la qualité des données et les éventuelles affectations des flux aux différents produits. Cette phase se base sur des théories d'analyse de systèmes et sur le génie des procédés.
- L'évaluation des impacts sélectionne les indicateurs de l'étude, les modèles de calculs de ces indicateurs, ainsi que les références de normalisation et les facteurs de pondération. Les champs disciplinaires majoritaires sont les sciences environnementales pour la conversion des extractions et émissions en impacts, et les sciences sociales pour la détermination des facteurs de pondération.
- L'interprétation du cycle de vie vérifie les données de l'étude et établit des conclusions et des recommandations.

**CHAPITRE 2: MICROALGUES
POUR LES
BIOCARBURANTS DE 3EME
GENERATION**

2.1 Introduction :

Les biocarburants sont présentés comme une alternative aux carburants automobiles traditionnels mais leur utilisation n'est pas une nouveauté : en 1903, le record mondial de vitesse à 177 km/h est obtenu avec une Gobron-Brillié roulant au bioéthanol.

Nikolaus Otto, inventeur du moteur à combustion interne (1876), conçoit celui-ci pour fonctionner avec de l'éthanol. La Ford T (produite de 1908 à 1927) roule également avec cet alcool, et Rudolf Diesel, inventeur du moteur portant son nom (1897), se base sur l'huile d'arachide pour faire tourner ses machines[8].

Au milieu du XX^e siècle, le pétrole devient abondant et bon marché, provoquant un désintérêt des industriels et des consommateurs pour les biocarburants. À la suite des deux chocs pétroliers de 1973 et 1979, le biocarburant devient attractif mais l'enthousiasme s'estompe en 1986 avec le contre-choc pétrolier, et ce jusque dans les années 2000.

Se basant initialement sur les huiles végétales ou sur les cultures sucrières et céréalières, les modes de production du biocarburant se sont diversifiés. Du charbon de bois aux microalgues en passant par les déchets ménagers, aucune piste n'est négligée (différentes « générations » de biocarburants)[8].

Dans ce chapitre, nous parlerons de la distinction des biocarburants de troisième génération face aux autres générations, des méthodes utilisées pour leurs extractions. Nous parlerons aussi des microalgues et leurs avantages pour pousser l'apparition des algocarburants.

2.2 Généralités sur les biocarburants :

2.2.1 Définition d'un biocarburant :

Un biocarburant est un carburant liquide ou gazeux créé à partir de la transformation de matériaux organiques non fossiles issus de la biomasse, par exemple des matières végétales produites par l'agriculture (betterave, blé, maïs, colza, tournesol, pomme de terre, etc.).

Les biocarburants sont assimilés à une source d'énergie renouvelable. Leur combustion ne produit que du CO₂ et de la vapeur d'eau et pas ou peu d'oxydes azotés et soufrés (NO_x, SO_x)[9].

2.2.2 Classification des biocarburants :

2.2.2.1 Biocarburants issus de ressources agricoles : la 1^{ère} génération

Un biocarburant de première génération est un agrocarburant produit à partir de cultures destinées traditionnellement à l'alimentation. Plus spécifiquement, ce sont les organes de

réserve des plantes oléifères (à huile) ou des plantes à sucre qui sont utilisés pour produire du biodiesel ou du bioéthanol. Trois filières peuvent être distinguées :[10]

Filière huile

Ce sont des plantes oléagineuses telles que le colza ou le tournesol qui sont les matières premières des combustibles tels que l'huile végétale brute et le biodiesel[11].

Filière alcool

Les plantes concernées sont celles qui possèdent des matériaux, comme le sucre ou l'amidon, capables de fermenter pour donner un alcool : canne à sucre, betterave sucrière, maïs, blé ou ulve, ou encore algue verte[11].

Filière gaz

Les combustibles de cette filière sont obtenus à partir du méthane qui constitue 50 à 90% des biogaz. Le biogaz résulte de la fermentation des matériaux organiques tels que les déchets des produits des cultures. Il se positionne comme un substitut au gaz naturel. Les réductions des gaz à effet de serre sont au minimum de 50% et varient fortement selon le substrat utilisé. Des gains sur les émissions de particules autour de 40% ont été observés par rapport à une référence fossile[11].

2.2.2.2 Biocarburants issus de la biomasse lignocellulosique : la 2^e génération

Face aux limites de la première génération de biocarburants, la recherche s'oriente vers les matériaux lignocellulosiques issus de végétaux non alimentaires : bois, pailles, résidus agricoles, déchets forestiers, macroalgues ou encore plantes cultivées spécialement pour cette utilisation comme le Miscanthus Giganteus, le Switchgrass et le Peuplier à courte rotation. Cette 2^{ème} génération concerne les filières éthanol et biodiesel avec des technologies différentes de celles de la première [Figure 2.1][12].

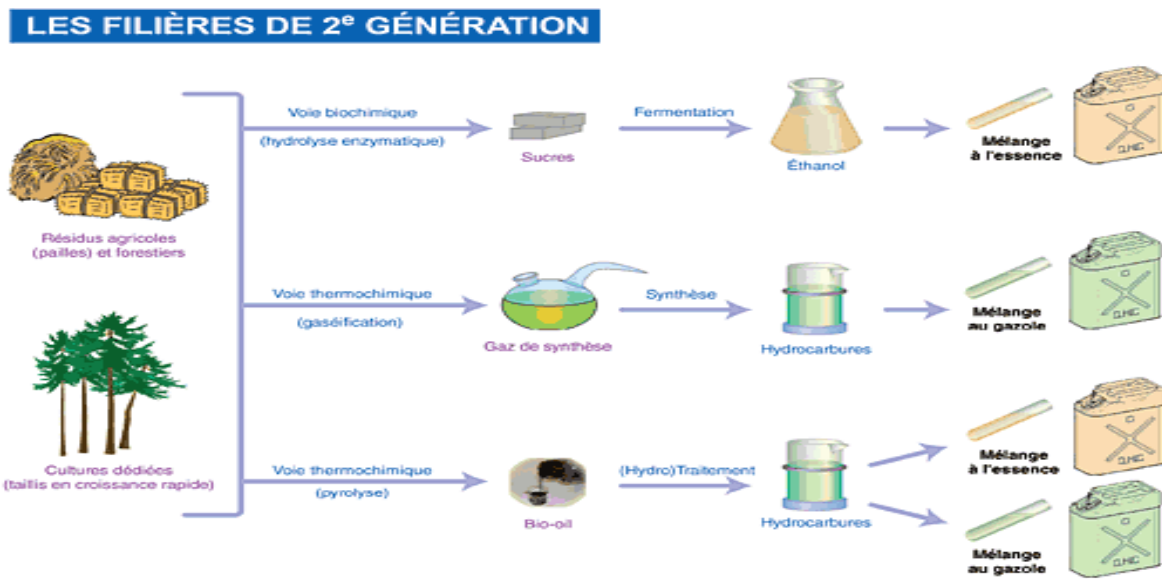


Figure 2.1 Filières des biocarburants de 2^e génération[11]

Pour transformer la biomasse lignocellulosique en carburant, il existe deux voies possibles : la voie thermochimique et la voie biochimique.

2.2.2.3 Biocarburants issus des algues : la 3^{ème} génération

Les biocarburants de 3^{ème} génération sont issus des algues et sont appelés algocarburants.

Les recherches scientifiques et l'étude de la faisabilité industrielle de la mise en œuvre des biocarburants de troisième génération sont nées des polémiques provoquées par les biocarburants de 1^{ère} génération et de l'industrialisation à court terme des biocarburants de deuxième génération. Ces trois générations de biocarburants ont en commun d'être des énergies non fossiles, renouvelables et donc permettent de répondre à l'épuisement des ressources fossiles. Toutefois, la particularité et les avantages de la dernière génération de biocarburant peuvent s'apprécier notamment à travers trois paramètres :

- Les émissions globales de GES (gaz à effet de serre) nécessaires à la production de biocarburant ;
- L'efficacité énergétique pour produire le biocarburant c'est-à-dire la quantité d'énergie produite rapportée à la surface nécessaire pour sa production ;
- Et la concurrence éventuelle des dispositifs de culture vis-à-vis de cultures agricoles pouvant servir à l'alimentation humaine ou animale ;[13]

La production des biocarburants de 3^e génération passe par quatre étapes :

- 1) Sélection des microalgues pour leur richesse en huile.
- 2) Culture dans des grands bassins de plein air ou dans des photo-bioréacteurs (tubes transparents).

- 3) Récupération de la biomasse microalgale (Récolte) et extraction de l'huile selon différentes méthodes (filtration membranaire, centrifugation, traitement au solvant, pyrolyse thermique).
- 4) Conversion de l'huile en biocarburant.

Le [Tableau 2.1] ci-dessous présente la classification des biocarburants ainsi que les atouts et les inconvénients de chaque génération de biocarburants.

Tableau 2.1 Classification des biocarburants selon la source de la matière première[14]

1ère Génération	<p>Substrat : graines oléagineuses, glucides</p> <p>Produits : Bioéthanol ou butanol issus de la fermentation de l'amidon (blé, orge, maïs, pomme de terre) ou glucides (canne à sucre, betterave sucrière). Biodiesel issu de la transestérification des huiles végétales (colza, tournesol, soja, palm à huile, noix de coco, huile de friture usagée, graisses animales,)</p>	<p>Inconvénients et limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sécurité alimentaire • Disponibilité des terres • Demande des ressources hydriques • Émissions indirectes en GES
2ème Génération	<p>Substrat : Biomasse lignocellulosique</p> <p>Produits : Bioéthanol or butanol par l'hydrolyse enzymatique ; méthanol. Essence et diesel par le procédé de Fisher-Tropsch, alcool en mélange, diméthyle d'éther et le diesel vert par la conversion thermochimique ; Biométhane issu de la digestion anaérobique</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilisation des terres marginales • Utilisation de la biomasse résiduelles
3ème Génération	<p>Substrat : biomasse des algues et microorganismes non photosynthétiques</p> <p>Produits : Biodiesel (microalgues, microorganisme) ; bioéthanol (micro/ macro algues) ; hydrogène (algue verte et microorganisme)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilisation faible de terre • Productivité élevée en biomasse • Offre = Demande

2.2.3 Les types de biocarburants :

2.2.3.1 Le Biodiesel

Le biodiesel est un carburant propre produit à partir d'huiles végétales (culture énergétique, recyclage d'huile de friture) ou, plus rarement, de graisse animale (recyclage).

Sa structure chimique est celle des esters allyliques d'acide gras (FAAE). Les impacts environnementaux du biodiesel sont plus favorables que ceux du carburant issu des ressources d'origine fossile. Sa combustion est plus propre avec une teneur en soufre plus faible que celle du gazole[15].

2.2.3.2 L'Éthanol ou le Bioéthanol :

L'éthanol est un biocarburant non toxique (à la manipulation notamment) et biodégradable. Il est obtenu à partir du sucre qui peut être issu de la matière végétale. Aux Etats-Unis, la majorité de l'éthanol provient du maïs. Cet éthanol sert à fabriquer du E10 (10% d'éthanol et 90% d'essence) dans 99% des cas.

Concrètement, deux types d'éthanol peuvent être produits : celui dit industriel et celui dit carburant. Ce dernier est distillé puis déshydraté (afin de pouvoir le mélanger à l'essence) pour obtenir un alcool anhydre à indice d'octane élevé. Dès l'intégration, même minime (inférieure à 10%), de l'éthanol à l'essence, on observe une réduction du monoxyde de carbone émis par les véhicules[16].

2.2.3.3 Le Biogaz :

Le biogaz est le gaz produit par la fermentation de matières organiques animales ou végétales en l'absence d'oxygène. Cette fermentation appelée aussi méthanisation se produit naturellement dans les marais ou spontanément dans les décharges contenant des déchets organiques, mais on peut aussi la provoquer artificiellement dans des digesteurs (pour traiter des boues d'épuration, des déchets organiques industriels ou agricoles, etc)[16].

La première étude en laboratoire de la digestion anaérobie utilisant la biomasse d'algues comme substrat a été réalisée par Golueka en utilisant *Scenesmus sp* et *Chlorella vulgaris* pour les procédés de traitement des déchets. Dans des études ultérieures, des étangs ouverts ont été utilisés pour traiter les eaux usées avec des microalgues, et la biomasse de microalgues a été utilisée pour la digestion anaérobie. Ces travaux peuvent être considérés comme une étape importante pour le développement des études sur les algues en termes d'intégration des bioprocédés et également pour l'utilisation du concept de culture de masse. La digestion

anaérobie des microalgues ressemblait plus à une connaissance de la littérature jusqu'à la crise du combustible de 1970. Bien que similaire à d'autres carburants alternatifs, le biogaz a recommencé à être considéré comme une possibilité, avec un accent particulier sur le concept de bioraffinerie. Dans le cas du biogaz, la biomasse de microalgues est elle-même le substrat principal. Ainsi, la composition cellulaire de la biomasse affecte directement le rendement de la digestion anaérobie. La structure complexe des algues a rendu difficile l'estimation des rapports des substrats pour la digestion, de sorte que les équations de base ont été adaptées des stratégies conventionnelles.

Actuellement, plutôt que d'être un processus distinct, la production de biogaz à partir de microalgues est considérée comme une étape du concept de bioraffinerie. La biomasse résiduelle perturbée et extraite par le pétrole contient des concentrations élevées de protéines, de glucides et d'autres composés. L'utilisation des déchets pour la production de biogaz pourrait également être une voie plus réaliste pour la politique de traitement des déchets. Jusqu'à présent, diverses recherches sur la production de biogaz de microalgues ont été menées[17].

2.3 Généralités sur les microalgues :

2.3.1 Définition :

Les algues microscopiques ou microalgues à haute teneur en lipides sont la matière première destinée à produire cette nouvelle génération de carburants. Selon l'Encyclopédie Larousse, l'algue est un "végétal chlorophyllien aquatique ou des lieux humides, n'ayant ni feuilles, ni racines, ni vaisseaux, ni fleurs, ni graines". Les microalgues sont des micro-organismes photosynthétiques Eucaryotes [Figure 2.2].



Figure 2.2 Microalgues[11]

2.3.2 Intérêt d'utilisation :

Les microalgues grandissent dans tous les milieux aqueux, doux ou salés, à condition d'avoir accès à la lumière, du CO₂ et des nutriments. Leur biodiversité est à peine explorée : environ 30 000 espèces décrites pour 200 000 à 1 million estimées. Elles représentent environ 40% de la photosynthèse terrestre. Si les microalgues suscitent autant d'intérêt, c'est qu'elles présentent certains avantages [Tableau 2.2][11].

Tableau 2.2 Production de microalgues : avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Productivité surfacique élevée, • Composition de la biomasse flexible, • Peu de compétition avec la production alimentaire, • Peu de compétition avec les ressources en eau, • Recyclage de déchets urbains (N, P, S,) ou industriels (CO₂). 	<ul style="list-style-type: none"> • Recours aux conditions de carence pour induire l'accumulation de produits riches en énergie, • Pas d'amélioration génétique (adaptation aux systèmes de culture), • Systèmes de culture et de récolte coûteux.

En plus de leurs propriétés de croissance exceptionnelle, les microalgues peuvent produire les molécules souhaitées, telles que des lipides ou des biopolymères, avec de forts rendements.

2.3.3 Le choix des microalgues pour produire des biocarburants :

La culture de microalgues semble être un moyen prometteur afin de répondre aux besoins énergétiques futurs du fait de leur teneur en lipides élevée et de leurs productivités en biomasse élevées. Les microalgues présentent un net avantage par rapport aux biocarburants des générations antérieures en termes de rendement d'huile par surface. En effet, comme l'indique

le [Tableau 2.3] les microalgues contenant 30% de lipides (en masse sèche) ont besoin d'environ 350 fois moins d'espace que le maïs pour une production d'huile par hectare bien plus élevée (58 700 L.ha⁻¹.an⁻¹ contre 172 L.ha⁻¹.an⁻¹). Cet écart est encore plus important quand les lipides représentent 70% du poids des micro algues (136 900 L. ha⁻¹.an⁻¹ contre 172 L. ha⁻¹.an⁻¹). En effet, dans ce cas, la production d'huile par hectare est environ 800 fois plus élevée que le maïs[18].

Tableau 2.3 Comparaison des sources de biodiesel[18]

Espace	Biodiesel (Litre/hectare)
Blé	172
Soja	446
Colza	1190
Coco	2689
Palme	5950
Microalgue	136900

Beaucoup de recherches ont été effectuées sur la productivité en biomasse et la teneur en lipides des microalgues. En 2004, Richmond démontre que le taux de lipides peut atteindre 70% et même 85% du poids sec d'une cellule d'algue lorsque les conditions de culture favorisant leurs productions sont réunies. Mata et son équipe affirme que le rendement net global en énergie provenant d'une culture d'algue en étang ouvert est de 1444 GJ.ha⁻¹.an⁻¹ contre 163,9 G.J.ha¹.an⁻¹ pour du biocarburant issu de canne à sucre[18].

Les microalgues semblent donc plus avantageuses que les cultures terrestres en termes de productivité en biomasse, de teneur en lipides et de productivité d'huile par hectare.

2.3.4 Composition biochimique des microalgues :

L'intérêt des microalgues se manifeste par la diversité de leurs compositions biochimiques. Cette biomasse se différencie principalement des autres végétaux par sa richesse en lipides, protéines, polysaccharides, vitamines, pigments et antioxydants. Le [Tableau 2.4] recense la composition chimique de différentes microalgues[19].

Tableau 2.4 Compositions biochimiques de microalgues[19]

Microalgues	Protéines (%)	Polysaccharides (%)	Lipides (%)
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Spirulina platensis</i>	46-63	8-14	4-9
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11

Le contenu élevé en protéines, peptides et acides aminés (entre 12 et 65% de matière sèche) de plusieurs espèces de microalgues est une des principales raisons pour les considérer comme une source non conventionnelle de protéines dans l'alimentation humaine et animale (pisciculture). Certaines espèces présentent aussi une richesse en oligosaccharides et polysaccharides qui présentent une très grande variété de structure et de molécules (unités glucuroniques) ainsi que les fonctions associées (sulfates). Les hydrolysats et les fractions de grands polysaccharides peuvent présenter des activités biologiques (activité antivirale, antibiotique, ou anti-prolifératrice) chez l'homme[20].

2.3.5 *Chlorella vulgaris* :

2.3.5.1 Définition :

Le nom *Chlorella* dérive de la *chlorophylle* et des deux mots latins signifiant "feuille" et "petit". *Chlorella vulgaris* est une microalgue verte, unicellulaire, sphérique, eucaryote. En taxonomie, elle fait partie de la classe des *Chlorophytes*. Cette algue sphérique mesure entre 2 et 8 μm et possède un noyau bien spécifique et une membrane cellulosique. Elle est constituée de 50 à 60% de protéines, de nombreux minéraux (cuivre, fer, magnésium,), d'acides gras dont certains oméga-3 et de pigments tels que la chlorophylle qui représente de 2 à 4% de son poids sec. Elle existe sur terre depuis plus de 2,5 milliards d'années[21].

Chlorella vulgaris est une microalgue du genre *chlorelle* [Figure 2.3 et Figure 2.4]. Elle peut vivre dans les eaux douces, les eaux salées ou aussi les eaux usées. *Chlorella* a longtemps été utilisée comme organisme modèle pour comprendre la photosynthèse et l'assimilation du carbone dans les microorganismes. Elle possède les avantages suivants :[22]

- Un simple cycle de vie,
- Un taux de croissance élevé,
- Une teneur en protéines élevée,

- Un taux élevé en minéraux et vitamines,
- Une teneur en lipide élevée jusqu'à 50% et principalement des triglycérides sous des conditions de stress.



Figure 2.3 Vue microscopique d'une colonie de *Chlorella vulgaris*[23]

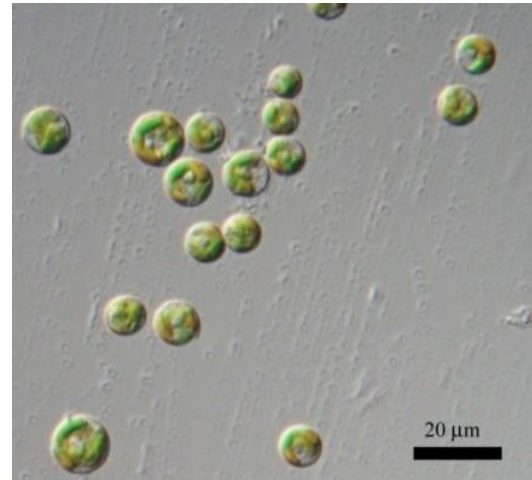


Figure 2.4 Photographie de *Chlorella vulgaris*[24]

2.3.5.2 Composition :

La *Chlorella vulgaris*, sous des conditions de culture avec une source de carbone, est composée de :[25]

- Protéines qui représentent 42% à 58% du poids de la biomasse sèche contenu dans une *C. vulgaris* mature,
- Lipides qui sont des composés définis non pas par leur structure, mais plutôt par rapport à leur solubilité dans des solvants non polaires et leur insolubilité dans l'eau. Dans des conditions de croissance optimales, *C. vulgaris* peut atteindre une production de 5 à 40 % de lipides par poids de biomasse sèche composés principalement de substances glycolipidiques, de cires, d'hydrocarbures, de phospholipides, et de petites quantités d'acides gras libres,
- Glucides,
- Pigments : Le pigment le plus abondant est la chlorophylle, qui peut atteindre de 1 à 2% de son poids sec,
- Vitamines et de minéraux.

2.3.5.3 Fiche d'identité de la *Chlorella vulgaris* :[26, 27]

- La souche d'algue : *Chlorella vulgaris*
- Composition élémentaire de la biomasse : C106H181O45N16P
- Productivité : Entre 15 et 25 g/ (m².j)
- Pourcentage des lipides contenus dans la biomasse sèche : 18%
- Masse volumique : 920 kg/ m³
- Rendement en huile : 58%

2.4 La valorisation de la biomasse algale par digestion anaérobie :

La forte teneur en huile des microalgues par rapport aux autres espèces les rend idéales pour la production de biocarburants, mais il y a d'autres moyens d'exploiter l'énergie des algues. Par exemple, elles peuvent être séchées pour former une sorte de charbon d'algues et mélangées à du charbon fossile en co-combustion dans les centrales électriques. Elles peuvent aussi être utilisées comme substrat de digestion anaérobie, processus qui génère du biogaz[28].

Actuellement ; la digestion anaérobie est la voie de valorisation énergétiques des microalgues la plus mature et elle ne nécessite aucune levée de verrous technologiques. De plus, elle s'intègre parfaitement dans l'ensemble de la chaîne de valorisation des microalgues. Dans la [Figure 2.5] nous avons un schéma de production de biométhane[29].

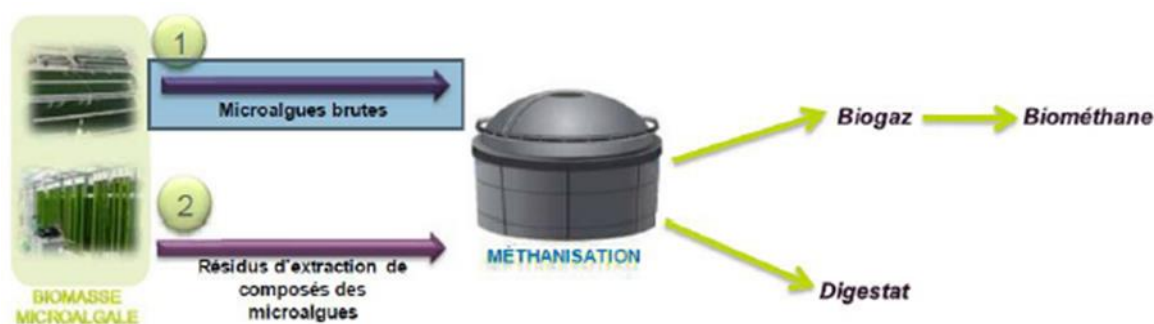


Figure 2.5 La méthanisation de la biomasse microalgale

La méthanisation, ou digestion anaérobie, est un processus biologique naturel qui permet de transformer en milieu privé d'oxygène, un substrat complexe pouvant être composé de molécules organiques lourdes, souvent insolubles, en biogaz[30]. Cette transformation produit un mélange de gaz carbonique et de méthane, le biogaz, et un résidu, appelé digestat, un produit liquide ou pâteux riche en matière organique qui peut être valorisé en tant que fertilisant, et dont la teneur en eau dépend de celle du produit entrant[31]. L'illustration la plus spectaculaire de ce phénomène réside dans la formation des nappes pétrolifères à partir de dépôts de végétaux avec comme étape ultime la formation de gisements de gaz naturel[30].

2.4.1 Les étapes de la méthanisation :

La biométhanisation est un processus biochimique qui se déroule en quatre étapes principales schématisées dans les [Figure 2.6 et Figure 2.7].

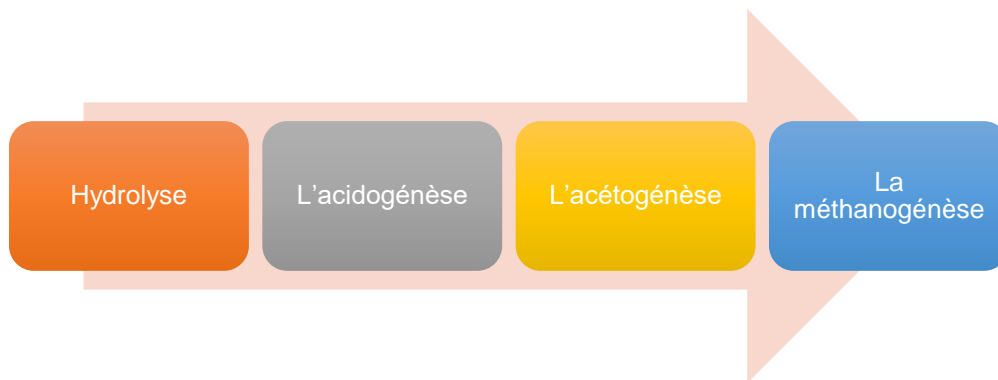


Figure 2.6 Les quatre étapes principales de méthanisation

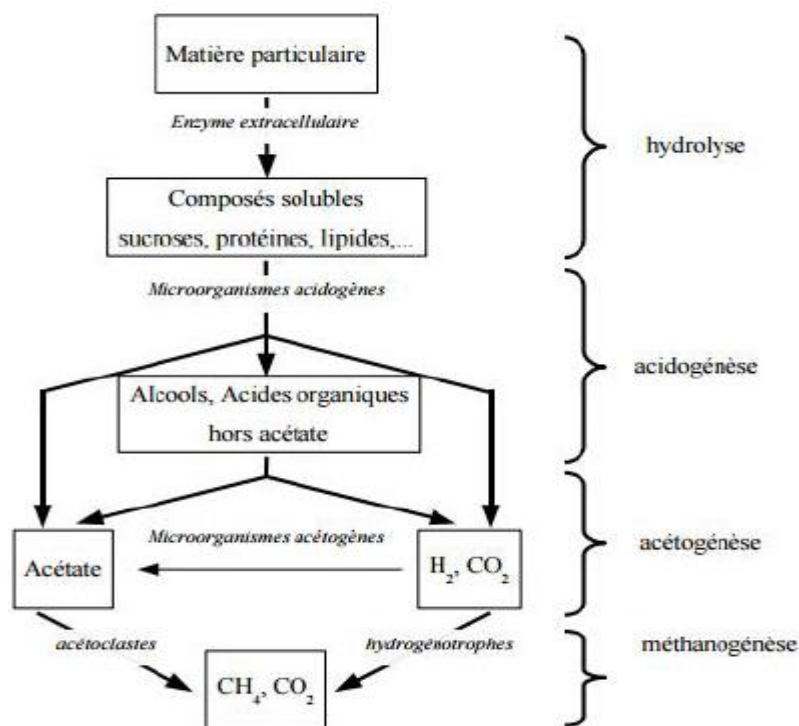


Figure 2.7 Schéma des étapes de la fermentation[32]

2.4.2 Physico-chimie de la digestion anaérobie :

La méthanogénèse est influencée par de nombreux facteurs environnementaux comme le pH et la température[32]

2.4.2.1 La température :

On répartit les organismes en trois catégories, selon la plage de températures à laquelle leur croissance est optimale :

- ✓ Les psychrophiles dominant entre 4-20°C, avec un optimum de croissance vers 15°C,
- ✓ Les mésophiles et mésophiles dominant entre 20-45°C avec un optimum vers 37°C
- ✓ Les thermophiles dominant entre 55-70°C, avec un optimum vers 60°C.

2.4.2.2 Le pH et l'alcalinité :

Les organismes peuvent être séparés en fonction de leur pH optimal de croissance :

- ✓ Les acidophiles : $1 < \text{pH} < 5$
- ✓ Les neutrophiles : $5,5 < \text{pH} < 8$
- ✓ Les alcalophiles ou les alcalophiles : $8,5 < \text{pH} < 11,5$

**CHAPITRE 3: HYBRIDATION
DE CENTRALE SOLAIRE
THERMIQUE A
CONCENTRATION**

3.1 Introduction :

Le soleil donne dans une région ensoleillée de l'ordre de 1 KW/m^2 de puissance crête (W_c), et il a été remarqué que la terre reçoit en un an de l'ordre de 14000 fois la consommation d'énergie de l'humanité (400.1018 Joules) sous la forme de rayonnement solaire. La surface du soleil est à 5770 Kelvin, et par suite de l'absorption atmosphérique (en particulier dans l'ultraviolet), 2/3 de son énergie rayonnée arrive au niveau du sol dans les conditions d'un bon ensoleillement. La récupération de cette énergie dispersée au niveau du sol est un vieux problème.[33] Pour la génération d'électricité, deux méthodes ont été privilégiées : le photovoltaïque (PV) et le solaire thermique à concentration (on utilisera l'acronyme anglo-saxon : CSP pour Concentrated Solar Power)[34].

Cependant, nous ne pouvons en bénéficier que dans les heures d'ensoleillement. Pour assurer la disponibilité de l'énergie produite durant 24h, l'utilisation d'un système hybride présente l'une des meilleures alternatives car le stockage thermique n'est pas sans mauvaises conséquences. La présence de biogaz produit par la digestion anaérobique donne la possibilité d'avoir un système hybride biomasse-solaire.

3.2 Principes de base d'une centrale solaire thermique :

3.2.1 Irradiation solaire et potentiel :

L'irradiation solaire globale est constituée de l'irradiation directe et de l'irradiation diffuse. L'énergie solaire peut être utilisée pour un usage thermique direct, par exemple pour le chauffage, la cuisson, pour produire de l'électricité à partir des systèmes photovoltaïques (utilisation de l'irradiation directe et diffuse), et finalement pour produire de la chaleur puis de l'électricité à partir des systèmes thermiques à concentration. Ces derniers systèmes utilisant seulement l'irradiation directe, ils ne peuvent être installés que dans des zones fortement ensoleillées [Figure 3.1]. Ainsi, un ensoleillement de $1800 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ est le seuil minimum estimé nécessaire pour obtenir un rendement suffisant. Les mesures du gisement solaire ont concerné essentiellement, dans un premier temps, la durée d'ensoleillement[35].

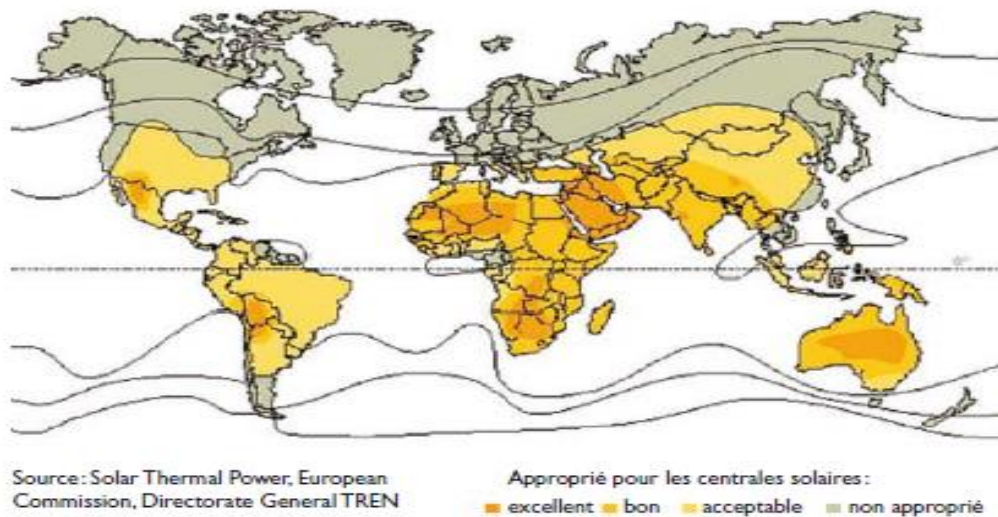


Figure 3.1 Zones appropriées pour l'installation des CSP[36]

3.2.2 Technologie de production :

Dans la technologie de la centrale solaire thermique, l'une des composantes importantes est le réflecteur. Les quatre types de réflecteurs existants sont illustrés dans la [

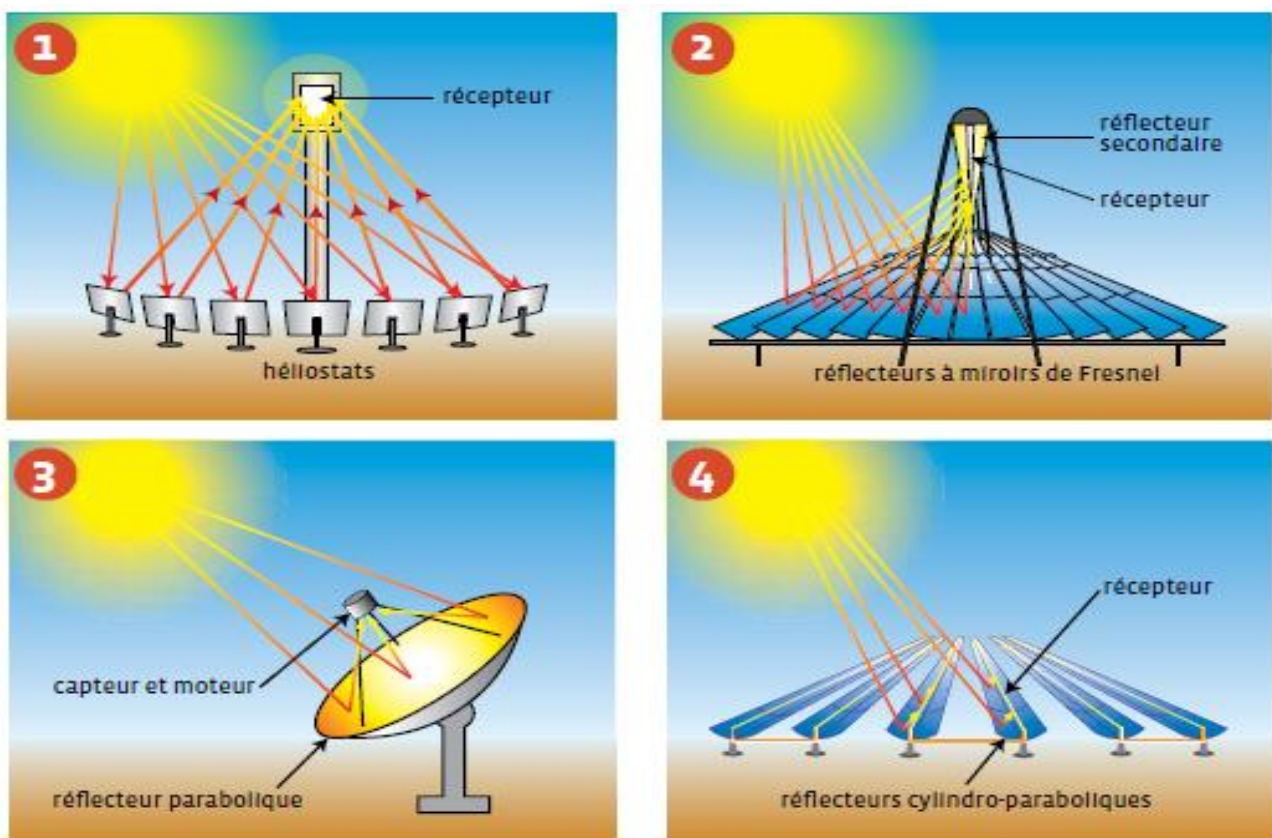


Figure 3.2]

Figure 3.2 Les quatre technologies principales de production d'électricité d'origine solaire par voie thermodynamique[37]

3.2.2.1 Les héliostats et centrales à tour

Des centaines, voire des milliers de miroirs (héliostats) équipés d'un système de suivi du soleil (deux axes de rotation) concentrent les rayons du soleil sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.

3.2.2.2 Les collecteurs à réflecteurs linéaires de Fresnel

Sont composés d'une succession de miroirs plans qui suivent la courbe du soleil (un axe de rotation) et redirigent les rayons sur un tube absorbeur (récepteur). L'utilisation de réflecteurs non incurvés permet d'abaisser considérablement le coût, comparativement aux collecteurs cylindro-paraboliques, malgré un rendement inférieur.

3.2.2.3 Les disques paraboliques

En forme d'assiettes, suivent la course du soleil (deux axes de rotation) et concentrent les rayonnements vers un récepteur situé au point focal de la parabole. Au point focal se trouve une enceinte à l'intérieur de laquelle un gaz entraîne un moteur Stirling. Peu d'industriels dans le monde portent cette technologie.

3.2.2.4 Les réflecteurs cylindro-paraboliques

Miroirs en forme d'auges, concentrent les rayons du soleil vers un tube (récepteur) placé sur la ligne focale.

Les systèmes de génération d'électricité sont divers : turbine à gaz, cycle de Rankine, Moteur Stirling, Cycle de Rankine organique sont les options généralement choisies.

Le stockage constitue un aspect important des centrales solaires. Il permet de rendre la production d'électricité constante et indépendante de la disponibilité du rayonnement solaire.

La majorité des systèmes utilise des miroirs de verre pour réfléchir la radiation solaire. Des recherches sont en actuellement en cours avec comme objectif d'améliorer les propriétés physiques des matériaux réflecteurs, (réflectivité, résistance aux chocs, etc.)

Un aspect très important des systèmes à concentration et que seule la radiation directe peut être mise à profit, la radiation diffuse ne pouvant pas être focalisé par le concentrateur. La centrale solaire ne peut donc fonctionner que si le ciel est dégagé et que la radiation directe n'est pas diffusée par la couverture nuageuse[38].

3.2.3 Les composantes d'une centrale CSP :

Les composantes de base d'une centrale CSP sont : [39]

3.2.3.1 Le champ solaire

Qui représente l'équivalent de l'alimentation en combustible (charbon, pétrole, gaz, uranium) pour les centrales thermiques. Dans les centrales CSP de type Fresnel, le champ solaire joue aussi le rôle de la chaudière, vu que la production de la vapeur se fait elle aussi au niveau du champ solaire. Le champ solaire est composé de miroirs cylindro-paraboliques, qui concentrent les rayons solaires sur un tube noir (le capteur) formant l'axe focal des miroirs. Les rayons solaires sont absorbés à la surface noire, transformés en chaleur, qui est transférée au fluide caloporteur traversant le capteur.

3.2.3.2 Le réseau de conduites

Qui assure le transfert du fluide caloporteur chauffé du champ solaire vers l'unité de production d'électricité et son retour après refroidissement vers le champ solaire.

3.2.3.3 L'unité de puissance

(C'est-à-dire l'unité de production d'électricité), qui contient les pompes à eau de haute pression, les échangeurs de chaleur pour le préchauffage de l'eau, la production de vapeur, le chauffage de la vapeur, la turbine à vapeur, le générateur, le tour de refroidissement et l'unité de déminéralisation, requise pour éviter la formation de cristaux de sel très abrasifs dans la turbine.

3.2.3.4 Les composantes en option d'une centrale CSP sont :

3.2.3.4.1 Source de chaleur supplémentaire :

L'intégration d'une source supplémentaire de chaleur réduit l'impact de l'intermittence du rayonnement solaire sur la production d'électricité. Un autre effet de cette introduction a été la réduction du coût moyen de production du kWh ; ce fut le cas pour les centrales solaires de la Californie étant donné le niveau des prix du gaz à la fin des années 80. Actuellement, étant donné l'enrichissement foudroyant des ressources fossiles, la réduction des coûts d'investissement des centrales solaires et les objectifs de réduction des émissions de CO₂, de plus en plus contraignants, cette option perd en importance.

3.2.3.4.2 Élargissement du champ solaire et introduction d'un système de stockage de chaleur :

Cette option présente plusieurs avantages :[36]

- a) Améliorer la stabilité de la production en réduisant considérablement les pertes de qualité de production résultant des variations d'irradiation, par exemple dues aux passages de nuages ;
- b) Permettre une production à base d'énergie solaire après le coucher du soleil ;
- c) Permettre un démarrage de production avant le lever du soleil ;
- d) Augmenter le facteur de capacité, qui peut atteindre, selon la capacité de stockage, le niveau des centrales répondant aux besoins en heures pleines et même celui des centrales de base. Ainsi, une centrale CSP avec une capacité de stockage permettant 15 heures de fonctionnement à puissance nominale est comparable à une centrale de base, vu que le rapport de la production annuelle à la puissance nominale dépasse alors 6 500 heures par an.
- e) Permettre une réduction du coût de production du kWh.
- f) Vu que la réduction attendue des investissements sera essentiellement au niveau des composantes où le potentiel de développement est le plus important, le champ solaire et le système de stockage, l'impact économique de l'introduction de cette option ne peut que s'améliorer dans l'avenir.

3.2.4 Le système hybride biomasse-solaire :

La génération d'électricité avec des installations solaires à concentration (Concentration Solar Power, CSP en Anglais) est présentée comme une source d'avenir pour produire de l'électricité renouvelable.

Les centrales solaires sont confrontées au problème de l'indisponibilité de l'énergie solaire liée à l'intermittence de la source.

Pour compenser cette dernière, notamment pendant la nuit, c'est le biogaz issu de la digestion anaérobie qui prend le relais et alimente la chaudière qui fait tourner la turbine grâce à la vapeur d'eau. La centrale intégrée biomasse-solaire peut ainsi fonctionner en base 24h/24. Nous éviterons le stockage de chaleur et d'électricité à cause des coûts élevés et des problèmes techniques qui peuvent se présenter.

- ✓ Le solaire à concentration permet de fournir de la chaleur et de l'électricité de façon fiable et prédictive grâce à l'hybridation ;
- ✓ La biomasse solide est facilement utilisable en association avec les cycles à vapeur, la biomasse liquide et gazeuse avec les cycles à gaz ;

Les systèmes de cogénération à cycles combinés sont principalement composés d'une turbine à gaz et d'une turbine à vapeur. Les gaz d'échappement de la turbine à gaz chauffent l'eau dans la bouilloire afin de produire la vapeur nécessaire pour entraîner la turbine à vapeur.

La chaleur utile récupérée par le système hybride à des fins de chauffage correspond à la quantité de chaleur récupérée à la sortie de la turbine à air chaud. Cette quantité de chaleur utile dépend du mode de fonctionnement du système hybride.

**CHAPITRE 4: PRODUCTION
DES BIOCARBURANTS EN
UTILISANT UN SYSTEME
HYBRIDE
(BIOMASSE-SOLAIRE)**

4.1 Introduction :

La fabrication d'algocarburants, à partir de microalgues, est un processus long et complexe, qui est encore loin d'être parfaitement maîtrisé. Dans cette partie on va décrire les différentes étapes de production du biodiesel à partir des microalgues en considérant une source hybride biomasse-solaire qui permet d'optimiser la consommation d'énergie lors de la production de ce biodiesel.

4.2 Biodiesel issue des microalgues (*Chlorella vulgaris*) :

Nous prenons en compte l'estimation des ressources disponibles pour la production à grande échelle qui est basée sur un ensemble de critères à savoir : le rayonnement solaire annuel, la disponibilité d'une source de CO₂ et d'eau, et la configuration du système de production afin de faire l'analyse de cycle de vie du biodiesel issue de la culture de microalgue, et plus précisément *Chlorella vulgaris*. C'est une étape qui va permettre le choix de la région de la production ainsi que la configuration du système de production.

Pour estimer la consommation énergétique nécessaire pour les différentes opérations de la culture tels : que l'agitation de la culture, l'injection de CO₂, le remplissage et la recirculation de l'eau avant et après la récolte de la biomasse algale; nous devons choisir le type de système de culture ainsi que son dimensionnement, ce qui fera l'objet de la deuxième étape qui va permettre l'estimation de la productivité et du rendement annuel en biomasse ainsi que la consommation des ressources en matière de nutriments, d'eau et des types de matériaux utilisés pour la construction du système de culture qui est le bassin ouvert dans notre cas.

Ensuite, nous feront le choix de la technologie de récolte et de conversion de la biomasse micro algale qui est basé sur la maturité à l'échelle commerciale et les exigences en matière de consommation d'énergie.

Pour la conversion de la biomasse, nous prenons un système basé sur la diversification des produits finaux en l'occurrence le biodiesel et le bioéthanol. Son intégration énergétique est un facteur important pour améliorer l'efficacité énergétique du système et pour réduire le coût de revient. Et donc, dans cette étude, nous avons retenu un système de traitement combiné de biomasse algale selon le concept de bioraffinage où la biomasse algale résiduelle est valorisée par la digestion anaérobique pour la production du biogaz qui assurera une certaine autonomie énergétique de l'unité de conversion de la biomasse par l'alimentation d'une installation de cogénération. le processus de digestion anaérobique permet de recycler le CO₂, de nutriments et d'eau pour la phase de la culture afin de réduire la demande sur les ressources naturelles[40].

Critères de sélection des algues:[41]

La sélection des algues se fait selon différents critères à savoir :

- La robustesse et la résistance au stress,
- La domination de l'espèce d'intérêt sur les autres espèces et les contaminants, dans les bassins ouverts de production,
- La haute capacité de capture du dioxyde de carbone,
- Le faible besoin en nutriments,
- La production de co-produits à haute valeur ajoutée,
- La tolérance des écarts de température diurne / nocturne et saisonnière,
- L'efficacité photosynthétique,
- Le cycle de productivité rapide,
- La capacité de croissance dans de grands volumes,
- Le pouvoir calorifique de la biomasse algale.

4.3 Description du cycle de production du biocarburant à partir d'algues :

La production de biocarburants à partir d'algues est divisée en quatre étapes [Figure 4.1] :

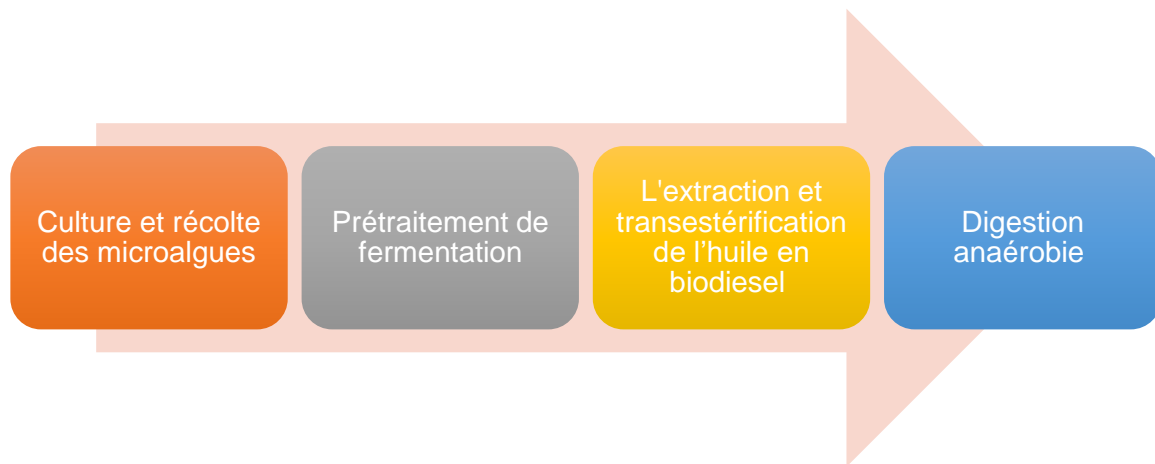


Figure 4.1 Schéma représentatif des différentes étapes de production de biocarburants de 3ème génération

Le système de production du biodiesel microalgale comprend le choix et la configuration du système de culture où les conditions opératoires sont bien définies. De plus, l'estimation des ressources nécessaires pour la culture est faite en se basant sur la quantité de CO₂ disponible et la productivité de la biomasse retenue. En outre, la demande en énergie pour les différents processus, à savoir l'agitation de la culture, le pompage de l'eau et la récolte de la biomasse,

est aussi évaluée. D'autre part, le système de la culture inclut l'infrastructure nécessaire pour la construction des bassins ouverts.

La partie en aval consiste en la conversion de la biomasse en biocarburant en partant par une configuration du sous-système de conversion utilisant la conversion intégrée de la biomasse dans l'objectif d'améliorer l'efficacité énergétique du système de production.

L'approche intégrale est basée sur le recyclage et l'intégration énergétique afin d'améliorer les performances en matière de soutenabilité de la filière de production du biodiesel[42].

4.3.1 Système de culture et récolte de la biomasse microalgale :

La production de microalgues est en forte augmentation à travers le monde. La production annuelle est estimée à 6 000 tonnes par an de matière sèche [43]. La culture des microalgues à grande échelle peut être conduite selon deux modes, soit à l'aide de bassins ouverts à haut rendement, le raceway ou dans une enceinte transparente fermée utilisant la lumière naturelle ou artificielle, le photo-bioréacteur.

Les bassins ouverts (bassins, « raceway ») [Figure 4.2] sont les systèmes de culture les plus utilisés pour la culture des microalgues à l'échelle industrielle vue leur simplicité technique et le coût d'investissement relativement faible[44]. Le mélange et la circulation du milieu sont possibles grâce à une roue à aube : le flux est guidé par la vitesse de rotation de cette roue. Un bullage permet un apport en CO₂ mais le transfert dans la phase liquide est souvent compliqué à cause de la faible profondeur des bassins. La température du milieu fluctue selon les cycles diurnes (nuit) et saisonniers.

Dans notre étude, la configuration du système de culture se fait d'une manière à disposer de trois bassins par hectare dans le but de réduire les risques, particulièrement dans le cas d'une contamination.

L'agitation de la culture des microalgues est généralement assurée par une roue à aubes fréquemment utilisée à l'échelle industrielle pour la production des différents types de microalgues destinées à l'alimentation. La demande en électricité dépend largement de la vitesse d'agitation qui est généralement fixée à 0,3m/s[44]. L'estimation de l'énergie électrique nécessaire pour l'agitation est estimée à l'aide des équations utilisée qui tiennent compte notamment des pertes de charge, le long de la section du canal ainsi que dans ses parties courbées.

L'injection de CO₂ se fait par l'utilisation d'un puisard (Sump) de 1 m de profondeur à partir duquel le CO₂ est injecté à contre-courant avec un taux d'absorption du CO₂ pouvant atteindre

95 % dans les conditions optimales[45]. Cependant, dans ce travail le taux d'absorption de CO₂ dans la culture est de 70 %.

Le choix des matériaux de construction des bassins dépend de plusieurs facteurs dont la salinité du milieu de culture qui est la principale contrainte. En effet, l'utilisation du béton dans la construction constitue l'option la plus effective et la moins chère dans le cas de l'utilisation d'eau douce pour le milieu de culture. L'installation de membranes de chlorure de polyéthylène est nécessaire pour la protection contre la corrosion.[40]

L'estimation de la quantité de CO₂ nécessaire pour la photosynthèse se fait en se basant sur la formule stœchiométrique de la souche de la chlorelle (*Chlorella vulgaris*) qui est de C₁₀₆H₁₈₁O₄₅N₁₆P [46]. De même, le taux d'absorption de CO₂ dans les bassins de culture est généralement de 70 % selon les récents travaux d'optimisation et de contrôle de l'injection de CO₂ selon les conditions de la culture (pH du milieu notamment).

Dans notre étude, le CO₂ est supposé provenir d'une unité de traitement de gaz naturel pour l'élimination du CO₂. Le CO₂ est fourni au site de la culture par un système de transport par pipeline à haute pression (10 atm, 298 K). Le CO₂ est stocké dans des réservoirs de stockage sphériques à proximité des bassins de culture puis distribué par diffusion dans les bassins durant la journée[40].



Figure 4.2 Bassins ouverts de culture de microalgues

La récolte est une étape limitante de nombreuses voies de valorisation des microalgues. En effet, les microalgues ont une taille le plus souvent de l'ordre du micron et leur récolte n'est pas aisée. Cette étape peut s'avérer coûteuse et représenter une part économique importante dans le

coût d'un procédé à échelle industrielle. La récolte peut se faire par centrifugation, filtration, floculation, sédimentation ou flottation.

Les techniques de récupération de la biomasse peuvent être classées comme récolte primaire ou comme récolte secondaire. La récolte primaire se réfère à la séparation des cellules d'algues de leur milieu de croissance et peut être réalisée par sédimentation ou par floculation. Le produit de la récolte est une bouillie d'algues, avec une teneur totale en solides comprise entre 0,5 et 6 %. Les systèmes de récolte secondaire servent à épaissir la boue pour obtenir une teneur en solides totaux comprise entre 10 et 20% en utilisant la centrifugation ou la filtration.[47]

Les étapes de la récolte sont :

1. La floculation

La floculation est utilisée pour agréger les cellules de microalgues dans le but d'augmenter la taille des particules. Elle facilite donc la sédimentation et la centrifugation. En général, le coût d'exploitation de la floculation est faible. Toutefois, ce procédé exige une longue période de traitement qui peut entraîner un risque de décomposition du produit bioréactif[48].

2. La sédimentation

La sédimentation est un procédé peu coûteux qui permet la séparation des cellules d'algues en utilisant les forces de gravitation. Ce processus engendre généralement une boue volumineuse, principalement en raison de la lenteur de la sédimentation. L'efficacité de la sédimentation varie entre 65% à 90%.si elle est précédée par une floculation[49].

3. La centrifugation

Pour les petites microalgues, c'est la centrifugation qui est le procédé le plus efficace. La centrifugation est un procédé de séparation qui utilise la force centrifuge pour séparer des solides en suspension dans des liquides. Alors que les systèmes de centrifugation sont très fiables et ont un pourcentage élevé de capture des solides, les coûts d'exploitation et d'entretien sont considérables. Une centrifugeuse consomme environ 3 000 kWh/tonne de biomasse sèche d'algues, ce qui peut limiter leur application pour le traitement de biocarburant issu d'algues[50]. Par conséquent, l'utilisation de la centrifugation peut être rentable pour récolter des produits de grande valeur mais demeure beaucoup trop coûteuse dans le cadre de la production de biocarburant à partir d'algues.

La récolte de la biomasse microalgale est l'étape qui suit la culture. La phase de séparation de la biomasse produite est très conséquente en termes d'énergie, elle limite le développement de la culture des microalgues. La technologie de la filtration membranaire est celle choisie parmi les différentes technologies proposées, elle est appliquée pour les différentes phases de la culture des microalgues et pour les différents traitements de la biomasse sous l'hypothèse que

la récolte de la biomasse est assurée par un système avancé de filtration membranaire récolte/déshydratation à une capacité de filtration de 20 m³/h, développé et commercialisé par la société Global Algae Innovation.

Cette technologie permet une récupération totale de la biomasse avec une concentration de 15 à 20 %, une consommation faible en énergie (0,04 kWh/m³) et un recyclage très pratique pour le système de la culture car l'eau sortante est claire, libre de microorganismes[51].

4.3.2 Processus de prétraitement de fermentation de la biomasse :

Afin de tirer le maximum de produits bioénergétiques des microalgues, plusieurs méthodes avaient été proposées pour la conversion de la biomasse microalgale en biocarburants. Le fractionnement de la biomasse, en ses constituants majeurs, est la voie choisie dans notre approche de bioraffinerie. Ce procédé intégré de bioraffinage permet de diversifier les produits finaux pour la commercialisation des biocarburants issus de microalgues.

Un traitement combiné de la biomasse microalgale a été étudié, il présente de nombreux avantages dont la maximisation de la récupération de l'énergie de la biomasse microalgale en produisant à la fois de l'éthanol et du biodiesel, réduire l'énergie consommée et améliorer l'efficacité d'extraction des lipides suite au prétraitement de la biomasse[52]. La biomasse résiduelle est utilisée comme un substrat pour la digestion anaérobie en vue de générer l'énergie nécessaire dans l'installation de conversion. Cette digestion permet le recyclage des nutriments, du CO₂ et de l'eau pour la croissance des microalgues, réduisant ainsi la demande sur les ressources naturelles[53].

4.3.2.1 Traitement de la biomasse par l'acide sulfurique dilué :

Pour convertir la biomasse microalgale en sucres pour la production du bioéthanol nous passons par hydrolyse à l'aide de l'acide dilué.

Dans le but d'hydrolyser les sucres complexes en sucres pour faciliter l'extraction des constituants, la biomasse est traitée par la vapeur et l'acide sulfurique (catalyseur de la réaction) à haute température pendant un temps très court. Ensuite, l'ammoniac (NH₃) est utilisé pour neutraliser la biomasse après l'hydrolyse pour favoriser la fermentation alcoolique.

4.3.2.2 Fermentation et distillation :

La fermentation se fait en mode batch pour la production de bioéthanol avec les organismes fermentatifs après concentration de la biomasse à 20 % de solides totaux et son refroidissement.

A l'aide de tamis à absorption moléculaire, Le bioéthanol dilué est distillé à une concentration azéotrope pour atteindre une concentration de 99.5%. Les résidus de la distillation riche en matière solide sont ensuite destinés pour l'extraction des lipides.

Le CO₂ produit de la fermentation est recyclé afin de l'utiliser pour la croissance des microalgues.

4.3.3 Extraction et transestérification de l'huile en biodiesel :

Les résidus de la distillation sont alimentés dans une colonne d'extraction liquide-liquide à contre-courant en utilisant de l'hexane comme solvant avec un rapport massique de 5:1 (hexane : biomasse en matière sèche). La phase légère, contenant principalement le solvant et l'huile extraite, est ensuite alimentée dans une colonne de stripping pour récupérer le solvant avec des pertes négligeables et une concentration finale en huile de 99.5 % (lipides neutres et polaires). L'huile est ensuite épurée afin d'éliminer les lipides polaires et autres impuretés. Le rendement d'extraction de l'huile est de 95%. Enfin, la phase aqueuse est envoyée pour la digestion anaérobique[54].

Pour produire du biodiesel, une transestérification de l'huile avec le méthanol en présence d'un catalyseur alcalin est faite.

Afin d'établir l'inventaire, des bilans énergétiques et massiques du processus de la production du biodiesel sont nécessaires et ils sont établis à partir des données de l'étude. Le rendement global en biodiesel est de 95% et la teneur en acides gras libres dans l'huile obtenue est supposée être égale à 0,05%.[40]

Les étapes du processus de production de biodiesel sont toutes prises en considération, même l'élimination du catalyseur par addition de H₃PO₄. Le glycérol et les effluents d'eaux usées sont destinés pour la digestion anaérobie avec la biomasse résiduelle issue de l'extraction de l'huile, ce qui permet de rééquilibrer le rapport C/N. En effet, l'utilisation du glycérol dans la digestion anaérobie améliore le rendement en CH₄ dans une fermentation mésophile en co-digestion. [40]

4.3.4 Processus de Digestion anaérobie :

Le biogaz produit par la digestion anaérobie de la biomasse résiduelle, après purification. Il alimente la chaudière de la centrale hybride pour combler parallèlement avec l'énergie solaire thermique l'ensemble des besoins énergétique du système.

Afin de réduire la demande en nutriments (N, P), les effluents de la digestion anaérobie sont recyclés vers le système de culture des microalgues.

En matière de gestion de digestat solide et liquide, nous avons opté, dans ce travail, pour la mise en décharge du digestat solide et le traitement du digestat liquide comme eaux usées.

4.3.5 Processus hybride de production de l'énergie :

Afin d'assurer une énergie sans interruption, nous avons opté pour un système hybride intégré utilisant une centrale solaire thermique d'une part durant la période d'ensoleillement et hors cette période, la digestion anaérobie d'autre part. Des collecteurs de soleil paraboliques sont regroupés et orientés automatiquement selon l'heure de la journée. Ces collecteurs permettent alors d'utiliser la chaleur du soleil pour chauffer une huile synthétique stockée sous les capteurs. Dès qu'elle atteint une température assez élevée, cette huile chauffée dégage de la vapeur à haute pression et est ensuite transférée dans une turbine produisant de l'électricité. Ce système est décrit sur la [Figure 4.3] ci-dessous.

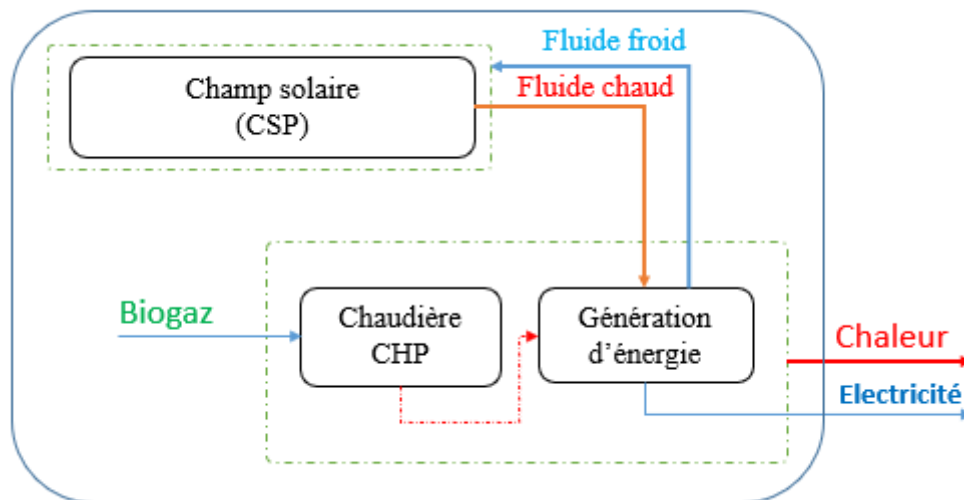


Figure 4.3 Description du système hybride

4.4 Schéma du procédé :

Le procédé global est décrit dans les [Figure 4.4]

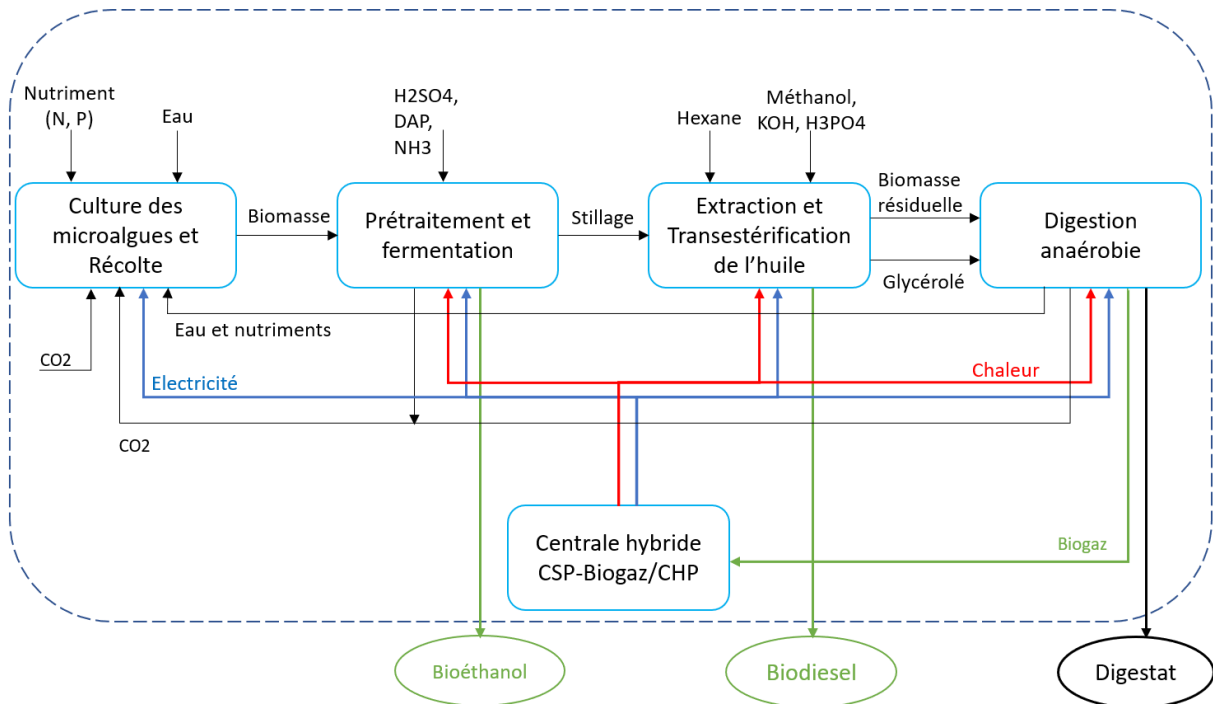


Figure 4.4 Organigramme des processus de production du biodiesel microalgale

**CHAPITRE 5: ACV DE
LA PRODUCTION DU
BIODIESEL A PARTIR
DE MICROALGUES**

5.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude :

5.1.1 Objectifs envisagés :

L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts environnementaux d'un biodiesel issu d'une microalgue verte nommée « *Chlorella vulgaris* » en utilisant un système de production d'énergie renouvelable avec un système de production d'énergie (chaleur et électricité) hybride valorisant la biomasse résiduelle par une digestion anaérobie pour obtenir du biogaz qui sera purifié. Le CO₂ produit sera utilisé pour la culture des microalgues et le biométhane sera utilisé en parallèle avec l'énergie solaire thermique dans une centrale hybride afin de couvrir l'ensemble des besoins énergétique du système étudié

5.1.2 Public ciblé :

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un projet de fin d'études pour fournir des informations qui seront divulguées au public dans l'intérêt de la recherche.

5.1.3 Le champ du système étudié :

Notre système consiste à la production des biocarburants de 3^{ème} génération avec valorisation énergétique de la biomasse résiduelle. Les étapes qui décrivent les processus pris en compte sont les suivantes :

- ✓ La culture et la récolte des microalgues
- ✓ Prétraitement et fermentation
- ✓ L'extraction de l'huile des microalgues et la transestérification
- ✓ La digestion anaérobie de la biomasse résiduelle
- ✓ L'électricité et la chaleur nécessaires pour les différentes phases de production et de conversion de la biomasse sont assurées par la centrale CSP
- ✓ Récupération de la chaleur à partir du CSP et du biogaz suite à la production de l'électricité

5.1.4 Fonction des produits :

Le procédé envisagé a pour but la production du biodiesel et de bioéthanol qui serviraient des carburants et du biogaz afin d'assurer une partie des besoins énergétique de système

5.1.5 L'unité fonctionnelle :

L'unité fonctionnelle est 1 tonne de biodiesel produite

5.1.6 Frontières et limites du système :

Dans le cas de notre étude, nous nous limiterons aux étapes de production du biodiesel sans tenir compte de sa distribution et de l'impact de son utilisation

5.1.6.1 Limites géographiques :

La validité géographique de l'étude se limite à la production du biodiesel en Algérie.

5.1.6.2 Catégories d'impact prises en compte :

L'étude de dommage dans le logiciel SimaPro considère 04 catégories d'impact qui sont : le changement climatique, la consommation d'énergie primaire, la santé humaine et la qualité des écosystèmes. Dans le cas de cette étude, seuls les impacts du changement climatique et de la consommation d'énergie primaire ont été pris en considération.

5.2 Inventaire de cycle de vie :

5.2.1 Hypothèses de l'inventaire :

- Le CO₂ vient d'une centrale (proche) de décarbonation du gaz naturel, le recyclage du CO₂ issu de la fermentation alcoolique et le CO₂ issu de la purification du biogaz produit
- L'eau utilisée est issue d'un forage sur site.
- L'installation fonctionne 330 jours par an.
- La culture des microalgues se fait dans des bassins ouverts de type Raceway illustrés dans la [Figure 5.1] et dont les dimensions sont résumées dans le [Tableau 5.1].

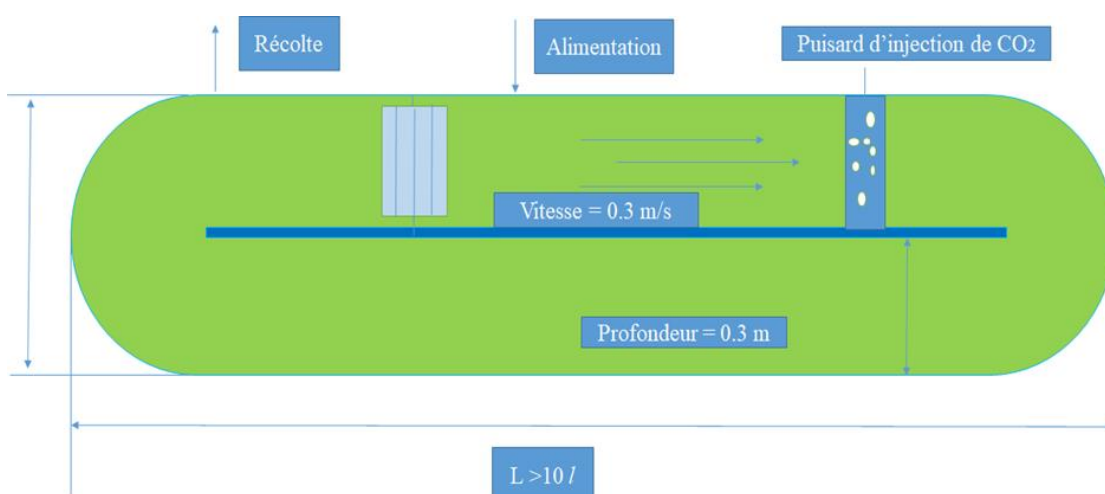


Figure 5.1 Configuration d'un Bassin ouvert pour la production des microalgues[40]

- La distance de transport des inputs chimiques, les matériaux de constructions et les équipements est supposées de ne pas dépasser 1000 km.

- La mise en décharge du digestat solide et le traitement du digestat liquide comme eaux usées.

Tableau 5.1 Caractéristiques de l'étang de type Raceway utilisé

Paramètres	Valeur	Unités
Profondeur	0,3	m
Longueur	200	m
Largeur	13,99	m
Profondeur hydraulique	0,28	m
Surface de l'étang	2950,83	m ²

- Les conditions opératoires lors des étapes de la conversion de biomasse algale sont résumées dans le [Tableau 5.2]

Tableau 5.2 Conditions opératoires de la conversion de la biomasse microalgale

Paramètre	Valeur	Source
Prétraitement à l'acide dilué (Hydrolyse acide)		
Charge solide total (% en masse)	20	[54]
H ₂ SO ₄ (% en masse)	1	[54]
Température (°C)	150	[54]
Pression (atm)	4,6	[54]
Temps de séjour (min)	5	[54]
Rendement en glucose (%)	90	[54]
Fermentation alcoolique		
Charge totale initiale (% TS)	20	[54]
Température (°C)	37	[54]
Temps de séjour (h)	36	[54]
Diammonium phosphate (DAP) (g/L)	0,33	[54]
Conversion Glucose en bioéthanol (%)	95	[54]
Perte par contamination (%)	3	[54]
Extraction de l'huile		
Efficacité de l'extraction d'huile (%)	99.5	[54]
Charge de solvant (rapport massique solvant : biomasse)	5 :1	[54]

Transestérification de l'huile		
Rendement de transestérification (%)	95	[54]
Température (°C)	60	[54]
Pression (atm)	3.95	[54]
Catalyseur (%)	1	[54]
Ratio molaire Méthanol : huile	6 :1	[54]
Digestion Anaérobie		
Température(°C)	35	[55]
Temps de séjour hydraulique (jour)	20	[55]
Charge en solides totaux (ST) (%)	9	[54]
Rendement en CH ₄ dans le biogaz (L/g ST)	0,2	[54]
Composition du biogaz (% vol)	67% CH ₄ / 33% CO ₂	[56]
Demande thermique DA (kWh/kg ST)	0,22	[56]
Demande électrique (kWh/kg ST)	0,085	[56]
Récupération de N net dans les effluents (%)	75	[54]
Récupération de P des effluents (%)	50	[56]
Biodisponibilité de N du digestat solide (%)	40	[54]
Matière insoluble dans le digestat solide (%)	30	[54]

- L'intégralité des besoins énergétiques établis dans l'inventaire sont assurés par le système (Centrale hybride).
- L'inventaire du cycle de vie de la partie CSP a été estimé à l'aide de guides techniques et de la littérature scientifique sur les centrales solaires en utilisant la technologie des collecteur solaire EuroTrough II dont les caractéristiques sont résumées dans le [Tableau 5.3] [57].

Tableau 5.3 Principaux paramètres caractéristiques de Collecteur l'EuroTrough II[57]

Modèle EuroTrough	ET150 (EuroTrough II)
Longueur focale	1.71 m
Rayon de l'absorbeur	3.5 cm
Largeur	5.77 m
Superficie d'ouverture	817.5 m ²
Longueur du collecteur	148.5 m
Nombre de modules par ligne	12

Nombre de facettes de verre	336
Nombre de tubes absorbeurs (4,1 m)	36
Réfectivité du miroir	94%
Poids de la structure	18.5 kg/m ²

5.2.2 Inventaire de cycle de vie :

Tableau 5.4 Inventaire de cycle de vie

Etape	Paramètre	Donnée	Unité
Culture et récolte			
Entrants chimique	Azote	0,423	t
	Phosphore	0,1	t
	CO ₂	6,0412	t
Energie	Electricité	2993	kwh
Infrastructure		0,2645	t
Prétraitement et fermentation			
Entrants chimique	Acide sulfurique	0,1432	t
	Ammoniac	0,050	t
	DAP	0.006	t
Energie	Electricité ¹	351,11	kwh
	Chaleur ¹	4855,32	MJ
Infrastructure		0,0770	t
Output	Bioéthanol	0.43	t
Extraction et Transestérification de l'huile			
Entrants chimique	Hexane	0,006	t
	Méthanol	0,1426	t
	KOH	0,005	t
	H ₃ PO ₄	0,0026	t
Energie	Electricité ¹	49,19	kwh
	Chaleur ¹	3154,43	MJ
Infrastructure		0,01	t
Output	Biodiesel	1	kwh
Digestion anaérobie			
Energie	Electricité ¹	176,8	kwh

	Chaleur ¹	1647,36	MJ
Infrastructure		0,18	t
Output	Biogaz ²	416,8	m ³
	Digestat	0,2	t
Transport de composants	1000 km	1406,83	tkm

¹ L'ensemble des besoins énergétique sera assuré par la centrale CSP

² Quantité de biogaz utilisée pour alimenter la chaudière de la centrale hybride

Tableau 5.5 Bilan énergétique récapitulatif du cycle de vie

Etape	Energie	Quantité
Culture et récolte	Electricité (kwh)	2993
	Chaleur (MJ)	/
Prétraitement et fermentation	Electricité (kwh)	351,11
	Chaleur (MJ)	4855,32
Extraction et Transestérification de l'huile	Electricité (kwh)	49,19
	Chaleur (MJ)	3154,43
Digestion anaérobie	Electricité (kwh)	176,8
	Chaleur (MJ)	1647,36
Total	Electricité (kwh)	3570,1
	Chaleur (MJ)	9657,11

Les quantités totales dans le [Tableau 5.5] d'électricité et de chaleur sont les besoins énergétiques annuels assurés par la centrale hybride pour produire une tonne de biodiesel, l'inventaire de cycle de vie de la partie CSP présenté dans le [Tableau 5.7] ci-dessous est établi sur la base des données techniques illustrées dans le [Tableau 5.6].

Tableau 5.6 Données techniques et opérationnelles spécifiques pour la centrale solaire CSP

Paramètre	Valeur	Unité
Espérance de vie des capteurs solaires thermiques	30	Ans
Espérance de vie des usines de fabrication	30	Ans
Puissance nominale	10	MWe
Nombre de capteurs solaires dans le système	120	Unités

Irradiation directe normale (DNI)	600	W/m ²
Efficacité Nominale	70%	
Taille du champ solaire	98100	m ²
Puissance thermique nominale	34	MW _{th}

Tableau 5.7 Inventaire de cycle de vie de la centrale hybride

Paramètre	Valeur	Unité
Champ solaire		
Collecteur		
Panneaux solaire (verre)	1.46	kg
Acier de la structure and pylônes (kg)	2.35	kg
Acier total pour tubes collecteurs et boucles	0.20	kg
Tube récepteur (UVAC)		
Récepteur en acier inoxydable (tuyau) (kg)	0.09	kg
Revêtement en acier inoxydable (Al ₂ O ₃) (kg)	0.000002	kg
Couvercle en verre (enveloppe) (borosilicate) (kg)	0.027	kg
Enrobage des panneaux	0.0000049	kg
Transport de composants (tkm)	4.132	tkm
Fondation		
Béton de fondation	0.0035	kg
Système de biomasse		
Digesteur de biogaz INPUTS		
Fonte (avec revêtement en verre)	0.19	kg
Acier	0.03	kg
HDPE	0.02	kg
Ciment	4.15	kg
INPUTS chaudière (CHP)		
Fonte	0.23	kg
Gazomètre de biogaz INPUTS (Gas Holder)		
PVC	0.011	kg
Systèmes d'injection		
Pompes (acier)	0.021	kg

Vannes (acier)	0.005	kg
Tuyaux (acier)	0.073	kg
Tuyaux (HDPE)	1.554	kg
Output		
CO	3.31	kg
SO ₂	0.13	kg
NO _x	1.42	kg
NO	0.89	kg

5.3 Etudes d'impacts du système :

5.3.1 Etudes d'impacts des différentes étapes du procédé :

Pour caractériser notre système de production de biodiesel à partir de *Chlorella vulgaris* environnementalement, nous avons effectué une analyse de cycle de vie sur tout le procédé de production. La contribution spécifique de chaque sous-système aux impacts environnementaux pour toutes les catégories est illustrée sur la [Figure 5.2] ci-dessous.

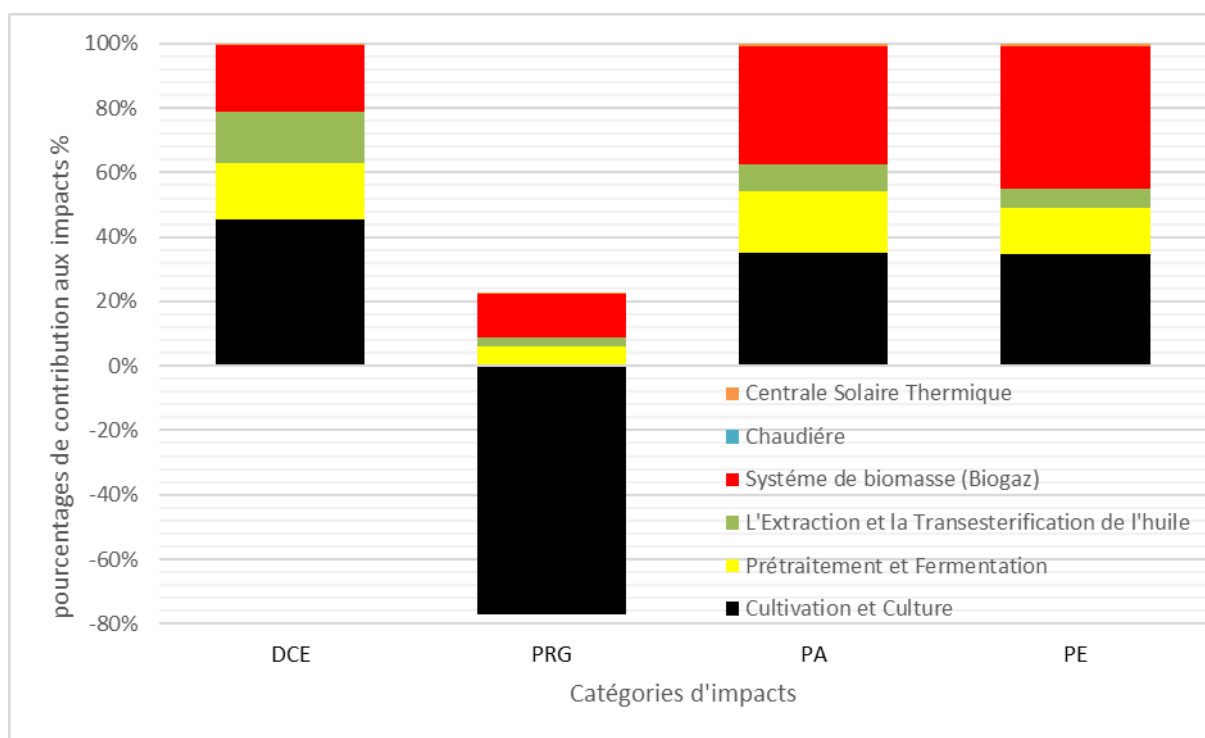


Figure 5.2 Contribution des sous-systèmes de production du biodiesel de chlorelle aux catégories d'impacts environnementaux

La culture et la récolte représentent les phases les plus conséquentes en termes contribution pour toutes les catégories d'impacts avec une contribution à la consommation des ressources abiotiques non renouvelables à savoir, matériaux et énergie fossile, au potentiel du réchauffement global, à l'acidification et à l'eutrophisation avec des contributions respectives de 45% DCE, -77% PRG, 35% PA et 34,5% PE.

En second lieu, le système de biomasse (biogaz) présente aussi une contribution importante à toutes les catégories d'impact avec des contributions de 21% DCE, 13,5% PRG, 37% PA et 44% PE.

Les phases de Prétraitement et de fermentation présentent des contributions à hauteur de 18% DCE, 6% PRG, 19% PA et 14% PE.

Tandis que, la phase d'extraction et transestérification de l'huile montre une contribution de 16% DCE et inférieure à 8,5% pour toutes les autres catégories d'impacts.

Finalement, la contribution de la centrale solaire thermique et de la chaudière sont négligeables. Dans cette étude, nous avons obtenu des résultats en accord avec ceux de la littérature scientifique. De plus, l'utilisation d'un système hybride avec des sources non fossiles pour alimenter le système en énergie favorise considérablement la diminution d'impacts environnementaux de notre système.

Notre système présente moins d'impacts que des études précédentes sans source d'énergie renouvelables aux différentes étapes notamment l'étape de la culture et récolte (64% DCE, -67% PRG, 56% AP et 50% PE)[40].

Selon les résultats obtenus, 1 ton de biodiesel évite une émission de 3411.79 kgCO₂eq. Par ailleurs, La consommation énergétique est dominée par la phase de la culture, essentiellement l'électricité nécessaire pour l'agitation et l'utilisation des engrais et le transport.

5.3.2 Contribution des processus aux catégories d'impact :

La contribution des processus aux différentes catégories d'impacts environnementaux pour la fabrication de biodiesel à partir de la *Chlorella vulgaris* est illustrée sur la [Figure 5.3] ci-dessous.

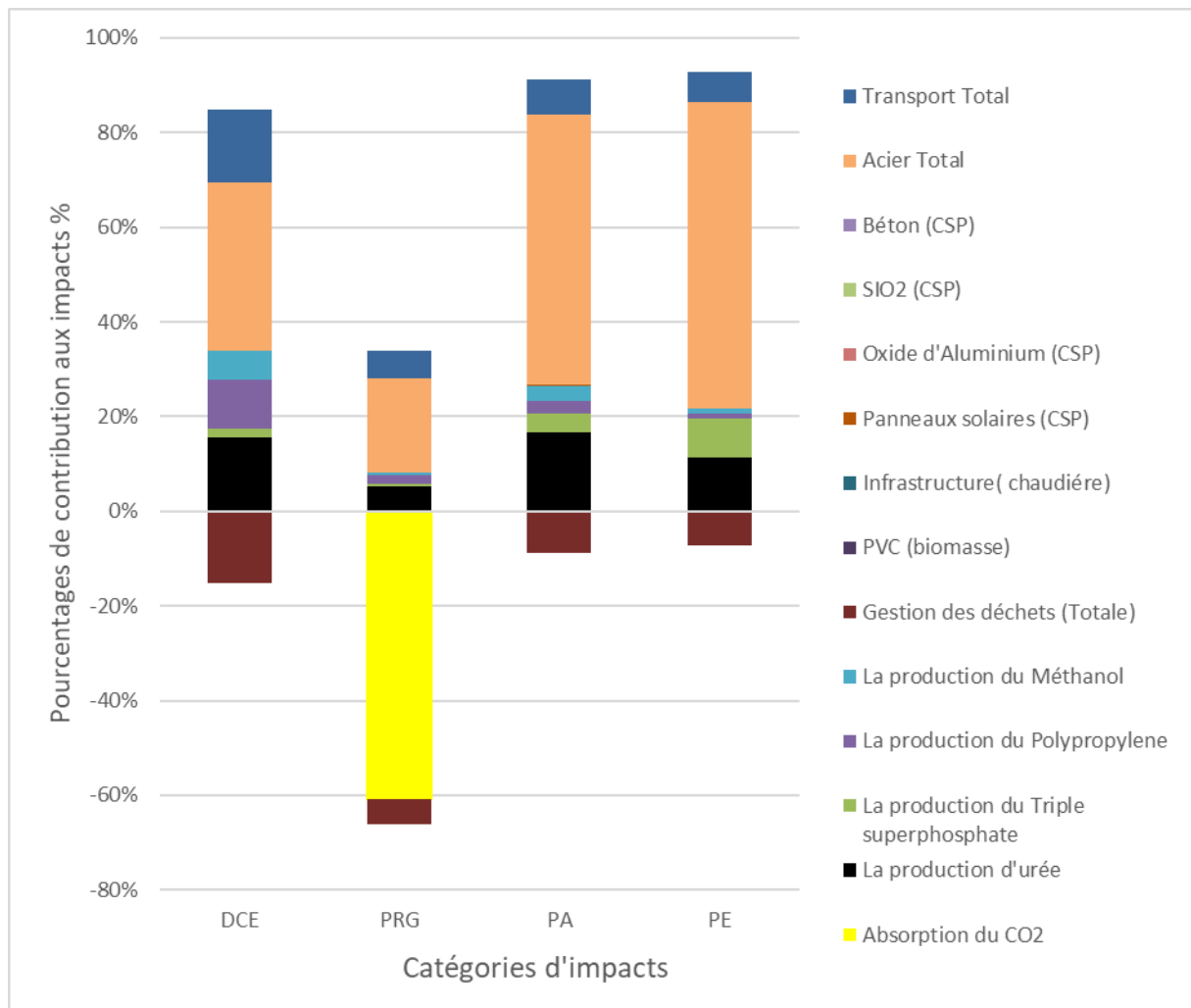


Figure 5.3 Contribution des processus de production aux catégories d'impact du biodiesel de *Chlorella vulgaris*

La production d'acier est majoritairement à l'origine des impacts DCE, PA et PE, dus à l'infrastructure nécessaire aux différents sous-systèmes pour la construction des réacteurs.

En second lieu, une contribution significative est constatée pour la production de l'urée qui est utilisée comme engrais pour la croissance de la biomasse algale, plus précisément aux impacts DCE, PA et PE

Par ailleurs, le transport contribue aussi pour tous les impacts en raison de la longue distance de transportation des intrants chimiques et les matériaux nécessaires pour la culture des microalgues et l'installation de transformation.

Enfin, les processus résiduels comme la production du méthanol, la production de polyéthylène, du Triple superphosphate contribuent marginalement aux différentes catégories d'impacts.

En général, l'analyse du cycle de vie de notre système en globalité nous permet de classer les impacts majeurs des différentes étapes dans l'ordre d'importance décroissant suivant : la

production de l'acier nécessaire pour les réacteurs et les biodigesteurs qui est une source importante d'émission de CO₂, la production de l'urée et le transport.

L'absorption de CO₂ dans l'étape de cultivation et de culture est un processus qui contribue positivement à l'impact PRG. Ceci est dû au fait que les microalgues utilisent le CO₂ durant leur croissance. Les principales sources d'émissions sont dues à l'utilisation de l'énergie fossile durant la culture des microalgues pour l'agitation.

En plus, la gestion des déchets contribue aussi positivement aux différents types d'impacts sur toutes les phases de notre procédé.

5.3.3 Calcul du ratio énergétique et l'intensité de carbone :

Les impacts liés aux DCE et Le PRG sont présents dans le [Tableau 5.8]ci-dessous.

Le ratio énergétique dans notre système est calculé par la formule (2) ci-dessous.

$$\text{Ratio énergétique} = \frac{\text{Energie output}}{\text{Energie input}} = \frac{38400}{32901,79} = 1,167 \dots \dots \dots (2)$$

Par ailleurs, l'intensité de carbone est calculée en utilisant le bilan PRG par la formule (3) suivante :

$$\text{Intensité Carbone} = \frac{\text{Total PGR}}{\text{Energie output}} = \frac{-3411,49}{38400*1000} = -88,84 \text{ gCO}_2 \text{ eq/MJ biodiesel} \dots \dots \dots (3)$$

Tableau 5.8 Contribution des processus aux Consommation d'énergie primaire et réchauffement climatique

	DCE (MJ)	PRG (kg CO₂ eq)
Cultivation et Culture	14887,23	-4827,98
Prétraitement et Fermentation	5862,03	377,60
L'Extraction et la Transestérification	5163,52	178,47
Système de biomasse (Biogaz)	6847,18	843,91
Chaudière	3,2	0,46
Centrale Solaire Thermique	138,63	16,04
Total	32901,79	-3411,49

Pour produire une tonne de biodiesel, notre système consomme 32901,79 MJ d'énergie primaire. Les résultats nous indiquent que notre système est producteur d'énergie tout en diminuant les émissions du carbone.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail nous a permis d'évaluer et quantifier les impacts environnementaux de notre système intégré de production des biocarburants à partir des microalgues en utilisant une source d'énergie renouvelable et avoir des bilans carbone et énergétiques globaux. L'analyse du cycle de vie a permis de mettre en exergue les avantages et les inconvénients de la production des biocarburants à partir des microalgues.

Selon les résultats obtenus, une tonne de biodiesel évite une émission de 3411.79 kg CO₂eq. Par ailleurs, La consommation énergétique est dominée par la phase de la culture, tandis que les impacts environnementaux majeurs sont présentés par l'infrastructure et le transport qui pourrait contribuer plus fortement aux impacts environnementaux dans le cas où la distance de transport des intrants est longue, ainsi que la production d'urée comme nutriment.

Les résultats montrent que l'utilisation d'une source renouvelable pour produire l'énergie nécessaire pour notre système diminue nettement l'impact environnemental de la production des biocarburants.

Avant d'intégrer une source d'énergie renouvelable pour assurer les besoins énergétiques du système de production, on avait une intensité carbone de l'ordre -61,8gCO₂/MJ qui s'est amélioré à -88,84 gCO₂/MJ et un ratio énergétique qui a évolué de 0,68 à 1,167. C'est vrai qu'on a gagné en intensité carbone mais le ratio énergétique reste faible, donc le système nécessite plus d'améliorations.

En outre le biodiesel algal présente le potentiel à substituer le diesel à long terme ainsi que la séquestration du CO₂. Mais malgré toutes les améliorations proposées et les progrès technologiques, l'impact zéro sera loin d'être atteint ; Ce système nécessite encore plus d'optimisations pour améliorer le bilan énergétique ainsi que le choix de la zone avec un potentiel solaire plus important.

L'infrastructure et le transport les conséquents majeurs des impacts environnementaux, et ils ne dépendent pas nécessairement de notre système. Pour y faire face, l'écosystème global doit se tourner vers une énergie verte y compris pour la production des matières premières (notamment l'acier).

En plus de cette étude qui ne concerne que le bilan environnemental du procédé, une étude de faisabilité technique et économique serait nécessaire afin de mettre en œuvre concrètement ce projet.

**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1]. COLLET, Pierre. *Analyse de Cycle de Vie de la valorisation énergétique de la biomasse algale : prise en compte des aspects dynamiques dans l'étape d'inventaire*. *Sciences du Vivant* [en ligne]. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 2012. [Consulté le 1 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/tel-02811206>
- [2]. THOMAS, Dandres. *Développement d'une méthode d'Analyse du Cycle de Vie Conséquentielle prospective macroscopique : Evaluation d'une politique de bioénergie dans l'Union Européenne à l'horizon 2025* [en ligne]. Thèse de doctorat. Ecole polytechnique de Montréal, 2012. [Consulté le 1 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <https://publications.polymtl.ca/>
- [3]. GUINEE, Jeroen B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2002. DOI 10.1007/bf02978897.
- [4]. GNANSOUNOU, Edgard, DAURIAT, Arnaud et VILLEGAS, Juan. Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances. *Bioresource Technology*. novembre 2009. Vol. 100, n° 21, pp. 4919-4930. DOI 10.1016/j.biortech.2009.05.067.
- [5]. SANDER, Kyle et MURTHY, Ganti S. Life cycle analysis of algae biodiesel. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2010. DOI 10.1007/s11367-010-0194-1.
- [6]. POWERS, Susan E. et BALIGA, Rudras. Sustainable algae biodiesel production in cold climates. *International Journal of Chemical Engineering*. 2010. DOI 10.1155/2010/102179.
- [7]. DE HAES, Helias A. Udo, JOLLIET, Olivier, FINNVEDEN, Göran, HAUSCHILD, Michael, KREWITT, Wolfram et MÜLLER-WENK, Ruedi. Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. mars 1999. Vol. 4, n° 2, pp. 66. DOI 10.1007/BF02979403.
- [8]. Le biocarburant est une innovation récente. [en ligne]. 2013. [Consulté le 30 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.connaissancedesenergies.org>
- [9]. Les biocarburants. [en ligne]. 2013. [Consulté le 30 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.connaissancedesenergies.org/>
- [10]. Biocarburant de première génération. [en ligne]. 2013. [Consulté le 1 septembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.futura-sciences.com/>
- [11]. BERTHIER, Clotilde et DELOULE, Vivien. Microalgues pour biocarburants de 3e

- génération. [en ligne]. 2013. [Consulté le 1 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/>
- [12]. VALLÉE, Julie et BEHAGHEL, Romain. Biocarburants de 2ème génération : comment se positionnent les papetiers ? [en ligne]. 2008. [Consulté le 15 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/>
- [13]. SYLVAIN, Frédéric. Les Biocarburants. [en ligne]. 2009. [Consulté le 30 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.techniques-ingenieur.fr/>
- [14]. AMOURI, Mohammed. Analyse du cycle de vie appliquée aux systèmes de production du biodiesel. *CDER. Bulletin des Energies Renouvelables N°48-2019*. 2019.
- [15]. Biodiesel. [en ligne]. 2018. [Consulté le 30 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.futura-sciences.com/>
- [16]. PALLUET, Élodie et PIERRE-OLIVIER, Pineau. *Les biocarburants : matières premières, transformation et produits* [en ligne]. 2012. Disponible à l'adresse : <https://expertise.hec.ca/>
- [17]. ONCEL, Suphi S., KOSE, Ayse, VARDAR, Fazilet et TORZILLO, Giuseppe. From the Ancient Tribes to Modern Societies, Microalgae Evolution from a Simple Food to an Alternative Fuel Source. In : *Handbook of Marine Microalgae* [en ligne]. Elsevier, 2015. pp. 127-144. ISBN 9780128011249. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128007761000091>
- [18]. CHISTI, Yusuf. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* [en ligne]. mai 2007. Vol. 25, n° 3, pp. 294-306. DOI 10.1016/j.biotechadv.2007.02.001. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734975007000262>
- [19]. BECKER, E. Wolfgang. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*. mars 2007. Vol. 25, n° 2, pp. 207-210. DOI 10.1016/j.biotechadv.2006.11.002.
- [20]. DEJOYE, Céline. *Eco-Extraction et Analyse de lipides de Microalgues pour la production d'algo-carburant* [en ligne]. Thèse de doctorant. l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 2013. [Consulté le 7 août 2020]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01712195>
- [21]. GUIRY, Michael D. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. [en ligne]. 2020. [Consulté le 30 août 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.algaebase.org>
- [22]. ZHU, Junying, RONG, Junfeng et ZONG, Baoning. Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*. 2013. DOI 10.1016/s1872-2067(11)60497-x.

- [23]. PAVAL, Škaloud. culture collection of algae Charles University in Prague. *Image gallery of CAUP strains* [en ligne]. 2010. [Consulté le 4 septembre 2020]. Disponible à l'adresse : http://botany.natur.cuni.cz/algo/CAUP/H1955_Chlorella_vulgaris.htm
- [24]. RAMARAJ, Rameshprabu, UNPAPROM, Yuwalee et DUSSADEE, Natthawud. Cultivation of Green Microalga, *Chlorella vulgaris* for Biogas Purification. *International Journal of New Technology and Research* [en ligne]. 2016. Disponible à l'adresse : <https://www.researchgate.net/>
- [25]. SAFI, Carl, ZEBIB, Bachar, MERAH, Othmane, PONTALIER, Pierre-Yves et VACAGARCIA, Carlos. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 35, pp. 265-278. DOI 10.1016/j.rser.2014.04.007.
- [26]. COLLET, Pierre, HÉLIAS, Arnaud et LARDON, Laurent. Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102, n° 1, pp. 207-214. DOI 10.1016/j.biortech.2010.06.154.
- [27]. ROGERS, Jonathan N., ROSENBERG, Julian N., GUZMAN, Bernardo J., OH, Victor H., MIMBELA, Luz Elena, GHASSEMI, Abbas, BETENBAUGH, Michael J., OYLER, George A. et DONOHUE, Marc D. A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. *Algal Research*. 2014. DOI 10.1016/j.algal.2013.11.007.
- [28]. KRYSTA, Levac. Biocarburant algal: alimenter la planète avec l'écume d'étang. *Parlons sciences* [en ligne]. 2019. [Consulté le 30 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : <https://parlonssciences.ca>
- [29]. GRDF et CRIGEN. Biométhane de microalgues: évaluation du potentiel de production en France aux horizons 2020 et 2050. [en ligne]. 2013. [Consulté le 6 juin 2020]. Disponible à l'adresse : <https://france-biomethane.fr/>
- [30]. ZHANG, Jin Bai. *Procédé de traitement anaérobie des boues et de valorisation du biogaz* [en ligne]. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2011. [Consulté le 7 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749534>
- [31]. HENRI, Prévot. La récupération de l'énergie issue du traitement des déchets. *Rapport du conseil général des Mines* [en ligne]. 2000. [Consulté le 15 août 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.ladocumentationfrancaise.fr>
- [32]. JONATHAN, HESS. *Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation* [en ligne]. Thèse de

- Doctorat. Université de Nice, 2007. [Consulté le 3 septembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00257347>
- [33]. AGENCY INTERNATIONAL ENERGY. Technology Roadmap Solar Thermal Electricity. *SpringerReference* [en ligne]. 2014. DOI 10.1007/SpringerReference_7300. Disponible à l'adresse : www.iea.org/roadmaps
- [34]. RICHTER, Christoph. *Concentrating Solar Power Global Outlook* [en ligne]. 2009. Disponible à l'adresse : <https://www.iea.org/>
- [35]. ROLDÁN, Serrano et MARÍA, Isabel. Concentrating Solar Thermal Technologies. . 2017. pp. 11-24. DOI 10.1007/978-3-319-45883-0_2.
- [36]. FICHE TECHNIQUE PRISME N° 4. L'énergie solaire thermique à concentration. Thématique: Les énergies nouvelles et renouvelables. *Les fiches techniques PRISME (Programme International de Soutien à la Maîtrise de l'Énergie)* [en ligne]. 2008. [Consulté le 15 juin 2020]. Disponible à l'adresse : www.bibliotheque.assnat.qc.ca
- [37]. Le Baromètre 2019 des énergies renouvelables électriques en France: Observ'ER. *EurObserv'ER* [en ligne]. 2019. [Consulté le 7 octobre 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.energies-renouvelables.org/>
- [38]. SYLVAIN, Quoilin. *Les Centrales Solaires à Concentration* [en ligne]. Faculté des sciences appliquées, Université de Liège, 2007. [Consulté le 23 août 2020]. Disponible à l'adresse : labothap.ulg.ac.be
- [39]. HOFFMANN, Jean-Francois. *Stockage thermique pour centrale solaire thermodynamique à concentration mettant en oeuvre des matériaux céramiques naturels ou recyclés* [en ligne]. thèse de doctorat. Université de Perpignan, 2015. [Consulté le 6 septembre 2020]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01284834>
- [40]. AMOURI, Mohammed. *Développement d'une filière de biodiesel en Algérie: apport des outils d'aide à la décision*. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechniques, 2019.
- [41]. DAY, John G., SLOCOMBE, Stephen P. et STANLEY, Michele S. Overcoming biological constraints to enable the exploitation of microalgae for biofuels. *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 109, pp. 245-251. DOI 10.1016/j.biortech.2011.05.033.
- [42]. DAVIS, Ryan, MARKHAM, Jennifer, KINCHIN, Christopher, GRUNDL, Nicholas, TAN, Eric C.D. et HUMBIRD, David. *Process Design and Economics for the Production of Algal Biomass: Algal Biomass Production in Open Pond Systems and Processing Through Dewatering for Downstream Conversion* [en ligne]. Golden, CO

- (United States), 2016. Disponible à l'adresse : <http://www.osti.gov/servlets/purl/1239893/>
- [43]. PULZ, Otto. Photobioreactors: Production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2001. DOI 10.1007/s002530100702.
- [44]. CHISTI, Yusuf. Large-Scale Production of Algal Biomass: Raceway Ponds. . 2016. pp. 21-40. DOI 10.1007/978-3-319-12334-9_2.
- [45]. DE GODOS, I., VARGAS, V. A., GUZMÁN, H. O., SOTO, R., GARCÍA, B., GARCÍA, P. A. et MUÑOZ, R. Assessing carbon and nitrogen removal in a novel anoxic-aerobic cyanobacterial-bacterial photobioreactor configuration with enhanced biomass sedimentation. *Water Research*. 2014. DOI 10.1016/j.watres.2014.04.050.
- [46]. GOLDMAN, Joel C, PORCELLA, Donald B, JOE MIDDLEBROOKS, E et TOERIEN, Danie F. The effect of carbon on algal growth—Its relationship to eutrophication. *Water Research*. juin 1972. Vol. 6, n° 6, pp. 637-679. DOI 10.1016/0043-1354(72)90182-0.
- [47]. WILEY, Patrick E., CAMPBELL, J. Elliott et MCKUIN, Brandi. Production of Biodiesel and Biogas from Algae: A Review of Process Train Options. *Water Environment Research* [en ligne]. avril 2011. Vol. 83, n° 4, pp. 326-338. DOI 10.2175/106143010X12780288628615. Disponible à l'adresse : <http://doi.wiley.com/10.2175/106143010X12780288628615>
- [48]. MOLINA GRIMA, E., BELARBI, E.-H, ACIÉN FERNÁNDEZ, F.G, ROBLES MEDINA, A. et CHISTI, Yusuf. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*. janvier 2003. Vol. 20, n° 7-8, pp. 491-515. DOI 10.1016/S0734-9750(02)00050-2.
- [49]. COLLET, Pierre, HÉLIAS, Arnaud, LARDON, Laurent, STEYER, Jean Philippe et BERNARD, Olivier. Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels. *Applied Energy*. 2015. DOI 10.1016/j.apenergy.2015.03.056.
- [50]. SCHENK, Peer M., THOMAS-HALL, Skye R., STEPHENS, Evan, MARX, Ute C., MUSSGUG, Jan H., POSTEN, Clemens, KRUSE, Olaf et HANKAMER, Ben. Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *BioEnergy Research*. 4 mars 2008. Vol. 1, n° 1, pp. 20-43. DOI 10.1007/s12155-008-9008-8.
- [51]. BARRY, Amanda, WOLFE, Alexis, ENGLISH, Christine, RUDDICK, Colleen et LAMBERT, Devinn. *National Algal Biofuels Technology Review* [en ligne]. 2016. Disponible à l'adresse : <http://www.osti.gov/servlets/purl/1259407/>
- [52]. DONG, Tao, KNOSHAUG, Eric P., PIENKOS, Philip T. et LAURENS, Lieve M.L. Lipid recovery from wet oleaginous microbial biomass for biofuel production: A critical

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- review. *Applied Energy*. 2016. Vol. 177, pp. 879-895. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.06.002.
- [53]. LAMMERS, Peter J., HUESEMANN, Michael et BOEING, Wiebke. Review of the cultivation program within the National Alliance for Advanced Biofuels and Bioproducts. *Algal Research*. 2017. DOI 10.1016/j.algal.2016.11.021.
- [54]. RYAN, Davis, KINCHIN, C., J., Markham, ERIC C D, Tan et LAURENS, Lieve M.L. *Process Design and Economics for the Conversion of Algal Biomass to Biofuels : Algal Biomass Fractionation to Lipid- Products Process Design and Economics for the Conversion of Algal Biomass to Biofuels : Algal Biomass Fractionation to Lipid and Carbohydr* [en ligne]. 2014. Disponible à l'adresse : <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62368.pdf>
- [55]. WANG, Lawrence K., SHAMMAS, Nazih K. et HUNG, Yung-Tse (éd.). *Biosolids Treatment Processes* [en ligne]. Totowa, NJ : Humana Press, 2007. Handbook of Environmental Engineering. ISBN 978-1-58829-396-1. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/10.1007/978-1-59259-996-7>
- [56]. RYAN, Davis. Renewable Diesel from Algal Lipids: An Integrated Baseline for Cost, Emissions, and Resource Potential from a Harmonized Model. *NREL/TP-5100-55431* [en ligne]. 2012. Disponible à l'adresse : <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/55431.pdf>
- [57]. GEYER, Michael, LÜPFERT, Eckhard, OSUNA, Rafael, NAVA, Paul, LANGENKAMP, Josef et MANDELBERG, Eli. EURO TROUGH - Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation. *11th SolarPACES International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies* [en ligne]. 2002. pp. 04-06. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/profile/Wolfgang_Schiel2/publication/282858870