



LAVALEF

Département Génie Chimique
Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de master
pour l'obtention du diplôme de master en Génie Chimique

Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle avec valorisation énergétique des rejets de biomasse

Nourelhouda BAKHTA

Sous la direction de Mme Faroudja MOHELLEBI Professeur

Mr Toudert AHMED ZAID Professeur

Présenté et soutenu publiquement le (20/06/2016)

Composition du Jury :

Présidente	Mme Afia MEFTI	MCA	ENP
Rapporteurs/ Promoteurs	Mme Faroudja MOHELLEBI	Professeur	ENP
	Mr Mohamed AMOURI	Attaché de recherche	CDER
Examineurs	Mr Chems Eddine CHITOUR	Professeur	ENP
	Mr Ammar SELATNIA	Professeur	ENP
Invité	Mr Mohamed AMOURI	Attaché de recherche	CDER



LAVALEF

Département Génie Chimique
Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de master
pour l'obtention du diplôme de master en Génie Chimique

Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'une chlorelle avec valorisation énergétique des rejets de biomasse

Nourelhouda BAKHTA

Sous la direction de Mme Faroudja MOHELLEBI Professeur

Mr Toudert AHMED ZAID Professeur

Présenté et soutenu publiquement le (20/06/2016)

Composition du Jury :

Présidente	Mme Afia MEFTI	MCA	ENP
Rapporteurs/ Promoteurs	Mme Faroudja MOHELLEBI	Professeur	ENP
	Mr Mohamed AMOURI	Attaché de recherche	CDER
Examineurs	Mr Chems Eddine CHITOUR	Professeur	ENP
	Mr Ammar SELATNIA	Professeur	ENP
Invité	Mr Mohamed AMOURI	Attaché de recherche	CDER

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui m'ont encouragée depuis mon enfance et grâce à qui j'ai atteint ce niveau.

Ma grande sœur « Halima » qui a consacré tout son temps à m'aider

Mon cher mari « Lyamen » qui a su m'épauler, me comprendre et me soutenir à chaque instant.

Mes chers beaux-parents pour leurs précieux conseils et motivations.

Mes chères petites sœurs « Ryma, Kadidja et Safaa » pour leurs encouragements et aide.

Mes chers grands-parents pour leurs Douâas.

Mes chères tantes maternelles et leurs enfants pour leur soutien moral

A tonton Nabil pour sa disponibilité et son soutien

A Naziha et Yasmine qui ont su me faire rigoler.

A mes camarades

A ma famille

Merci à vous tous et à toutes les personnes qui m'ont aidée dans les moments les plus difficiles et grâce à qui j'ai pu accomplir ce travail.

Nourelhouda BAKHTA

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements pour toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Je remercie Allah de m'avoir donné la force, la santé, le courage et toutes les facilités afin d'accomplir ce modeste travail

Je tiens à remercier Mr Mohamed AMOURI doctorant à l'ENP et chercheur au CDER, pour son aide, ses conseils, son encouragement et sa disponibilité dans ce projet de fin d'études.

Je remercie également mes encadreurs Pr Toudert AHMED ZAID et Pr Faroudja MOHELLEBI de m'avoir encadrée, orientée, aidée, conseillée, encouragée, soutenue et pour tout le temps qu'ils m'ont consacré.

Je remercie chaque membre du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail .Que Dr Afia MEFTI soit remerciée pour avoir accepté de présider le jury. J'exprime toute ma gratitude à Monsieur le Professeur Chems Eddine CHITOUR et à Monsieur le Professeur Ammar SELATNIA pour le temps qu'ils ont accordé à l'évaluation de ce travail.

Que le Pr Chems Eddine CHITOUR, soit remercié de nous avoir ouvert l'esprit vers un monde vert, vers une alternative pour sauver les réserves énergétiques. Si j'ai choisi d'effectuer ce travail, c'est avant tout grâce à vous, à vos conseils et à votre vision du futur.

Je présente mes sincères remerciements à mes professeurs Pr El Hadi BENYOUSSEF et Dr Fairouz KIES pour leurs encouragements, conseil et soutien moral dans mes périodes les plus difficiles, ainsi qu'à tous mes enseignants du département Génie Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique, merci de m'avoir appris le nécessaire de la formation, de m'avoir toujours guidée et soutenue, car sans vous je ne serai jamais arrivées à réaliser ce travail.

ملخص :

ان قطاع النقل هو أكثر القطاعات المولدة للغازات المسببة للاحتباس الحراري وهذا بسبب استهلاكها للوقود. يعد الوقود الحيوي أحد البدائل الواعدة خاصة وقود الديزل الحيوي المستخلص من الطحالب بسبب محتواها العالي من الدهون وإنتاجيتها العالية.

ان تحليل دورة حياة هذا الأخير يبين أنه يجب تثمين المنتج المشارك طاقياً للتقليل من تأثيره على البيئة من جهة التغيير المناخي واستهلاك الطاقة الغير متجددة.

الكلمات الدالة : وقود الديزل الحيوي، الطحالب، تحليل دورة الحياة، تثمين طاقي

ABSTRACT

Transportation is one of the sectors that generates the most greenhouse gases because of the use of fossil fuels, biofuels are promising alternative, especially biodiesel of 3rd generation derived from microalgae because of their high lipid content and high productivity

Life Cycle Assesment of it shows that energy recovery is required to minimize the impact of its production in terms of climate change and primary energy consumption

Key words: Biodiesel, microalgae, Life Cycle Assesment, energy recovery.

RÉSUMÉ

Le transport est l'un des secteurs qui génère le plus de gaz à effet de serre à cause de l'utilisation des carburants fossile, les biocarburants sont une solution alternative prometteuse, en particulier le biodiesel de 3^{ème} génération issu de microalgues à cause de leur forte teneur en lipide et leur productivité élevée.

L'analyse du cycle de vie de ce dernier montre qu'une valorisation énergétique est nécessaire pour minimiser l'impact de sa production en termes de changement climatique et de consommation d'énergie primaire

Mots clés : Biodiesel, microalgue, analyse du cycle de vie, valorisation énergétique.

Table des matières

REMERCIEMENTS	4
RÉSUMÉ	5
TABLE DES MATIERES	6
LISTE DES TABLEAUX	9
LISTES DES FIGURES.....	10
LISTES DES ABREVIATIONS	11
INTRODUCTION.....	12
CHAPITRE 1 : LES MICROALGUES	14
1. LES ALGUES	15
1.1. <i>Les macroalgues</i>	15
1.2. <i>Les microalgues</i>	15
1.3. <i>Le mécanisme de photosynthèse</i>	15
2. CARACTERISTIQUES DES MICROALGUES	15
2.1. <i>Structure cellulaire</i>	15
2.2. <i>Nutrition</i>	16
2.3. <i>Facteurs influençant la croissance des microalgues</i>	16
2.3.1. La lumière.....	16
2.3.2. Le dioxyde de carbone	17
2.3.3. L'agitation.....	17
2.3.4. L'eau	17
2.3.5. Nutriments	17
2.3.7. le pH	18
3. POTENTIALITES NATURELLES ET INDUSTRIELLES DES MICROALGUES	18
4. CHLORELLA VULGARIS.....	19
4.1. <i>Définition</i>	19
4.2. <i>Caractéristiques</i>	19
CHAPITRE 2 : LES MICROALGUES POUR LA PRODUCTION DE BIODIESEL.....	21
1. INTERET DES MICRO-ALGUES COMME SOURCE DE BIOCARBURANT	22
2. LE BIODIESEL.....	22
3. PRODUCTION DE BIODIESEL A PARTIR DES MICROALGUES	23
3.1. <i>Critères de sélection des algues</i>	23
3.2. <i>Culture des microalgues</i>	24
3.3. <i>La récolte</i>	26
3.3.1. La floculation	26
3.3.2. La sédimentation gravitaire par différence de masse volumique	26
3.3.3. La centrifugation	26
3.4. <i>Le Séchage</i>	27
3.5. <i>L'extraction des huiles</i>	27
3.6. <i>Transformation de l'huile en biodiesel</i>	28
3.6.1. Effet de la teneur en acides gras libres sur la conversion des lipides en biodiesel	28
CHAPITRE 3 : LES ALGOCARBURANTS AU-DELA DU BIODIESEL	30

1.	LA VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE ALGALE	31
2.	LA DIGESTION ANAEROBIE.....	31
2.1.	<i>Les étapes de la méthanisation</i>	31
2.1.1.	Hydrolyse	31
2.1.2.	L'acidogénèse	31
2.1.3.	L'acétogénèse	32
2.1.4.	La méthanogénèse	32
2.2.	<i>Physico-chimie de la digestion anaérobie</i>	33
2.2.1.	La température	33
2.2.2.	Le pH et l'alcalinité	34
2.3.	<i>La méthanisation de la biomasse algale</i>	34
2.4.	<i>Avantages et limites de la digestion anaérobie</i>	35
3.	LE DIGESTEUR	35
4.	LE BIOGAZ	36
4.1.	<i>Définition</i>	36
4.2.	<i>Techniques d'épuration du biogaz</i>	37
4.2.1.	Technologies d'épuration, par familles de procédés	37
4.3.	<i>Valorisation énergétique du biogaz</i>	41
4.3.1.	Energie thermique.....	41
4.3.2.	L'électricité	41
4.3.3.	Carburant automobile	41
4.3.4.	Réseaux locaux de gaz	42
CHAPITRE 4 : ANALYSE DE CYCLE DE VIE		43
1.	DEFINITION	44
2.	DIFFERENTES PHASES D'UNE ACV :	44
2.1.	<i>Phase I de l'ACV : Définition des objectifs et du champ de l'étude</i>	44
2.2.	<i>Phase II de l'ACV : Analyse de l'inventaire du cycle de vie</i>	46
2.3.	<i>Phase III de l'ACV : Évaluation des impacts du cycle de vie</i>	47
2.4.	<i>Phase IV de l'ACV : Interprétation</i>	49
3.	LES EXIGENCES DE L'ACV	49
4.	LES LIMITES DE L'ACV	50
CHAPITRE 5 : ACV AVEC SIMAPRO		51
1.	DEFINITION DES OBJECTIFS ET DU CHAMP DE L'ETUDE.....	52
1.1.	<i>Définition des objectifs de l'étude</i>	52
1.1.1.	Application envisagée	52
1.1.2.	Public ciblé	52
1.2.	<i>Définition du champ de l'étude</i>	52
1.2.1.	Le système	52
1.2.2.	Fonction du produit.....	52
1.2.3.	L'unité fonctionnelle :	52
1.2.4.	Frontières et limites du système	52
2.	L'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE	55
2.1.	<i>Les hypothèses</i>	55
2.2.	<i>Hypothèses des données SimaPro</i>	56
2.3.	SCENARIO DE BASE : SANS VALORISATION ENERGETIQUE	56
2.3.1.	Les limites du système considéré	56
2.3.2.	Inventaire du cycle de vie sans valorisation énergétique.....	58
2.4.	<i>Inventaire du cycle de vie avec valorisation énergétique</i>	59
3.	ETUDE D'IMPACT	61
3.1.	<i>Scénario de base</i>	61

3.2.	<i>Scénario avec la valorisation énergétique</i>	62
3.3.	Calcul du ratio énergétique.....	64
CONCLUSION GENERALE		66
PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS		67
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		68

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques de la microalgue <i>Chlorella Vulgaris</i>	19
Tableau II.1 : Comparaison de quelques sources de biodiesel	22
Tableau II.2 : Comparaison entre les propriétés du gazole et du biodiesel issu de <i>Chlorella Vulgaris</i>	23
Tableau II.3 : Comparaison des deux systèmes de production de microalgues.....	25
Tableau III.1 : Production de biométhane à partir des microalgues et d'autres biomasses Conventionnelles.....	35
Tableau III.2 : Composition d'un biogaz issu de <i>Chloralla Vulgaris</i>	36
Tableau III.3 : Comparaison des méthodes d'épuration.....	40
Tableau V.1 : Caractéristiques de l'étang de type Raceway utilisé.....	55
Tableau V.2 : Inventaire du cycle de vie du biodiesel issu de microalgues.....	58
Tableau V.3 : Inventaire du cycle de vie du biodiesel à partir de microalgues.....	59
Tableau V.4 : Contribution des processus élémentaires pour les deux catégories de dommage : changement climatique et consommation d'énergie primaire pour le scénario de base.....	61
Tableau V.5 :Emission (kg CO ₂ eq) et consommation d'énergie primaire (GJ) pour chaque étape du système	63
Tableau V.6 : Contribution des processus élémentaires pour les deux catégories de dommage : changement climatique et consommation d'énergie primaire.....	63
Tableau V.7 : Bilan énergétique récapitulatif du cycle de vie de production du biodiesel (GJ) sans et avec valorisation.....	64
Tableau V.8 : Comparaison entre les deux scénarios : avec et sans valorisation énergétique. 65	

Listes des figures

Figure 1 : Demande en énergie primaire jusqu'à 2050.....	12
Figure 2 : Émission de gaz à effet de serre.....	13
Figure I.1 : Effet de l'intensité lumineuse sur le taux de croissance.....	16
Figure II.1: Schéma des différentes étapes de fabrication du biodiesel à partir des microalgues.....	23
Figure II. 2 : Réaction de transesterification	25
Figure II.3 : Réaction de saponification des acides gras.....	26
Figure III.1 Schéma des étapes de la fermentation.....	30
Figure III. 2 : L'intégration de la filière de production de biométhane	31
Figure III.3. Schéma simplifié de l'épuration du biogaz.....	34
Figure III.4 : Technologies d'épuration, par familles de procédés.....	34
Figure III.5 : Détail d'une membrane.....	36
Figure IV.1 Frontières et processus élémentaires d'un système de produits.....	42
Figure IV.2: Procédure de calcul de l'inventaire.	44
Figure IV.3: Éléments de la phase d'ÉICV.	45
Figure V.1 : Les limites du système.....	51
Figure V.2 : Schématisation des limites du système sans valorisation énergétique.....	54
Figure V.3 : Contribution des différentes étapes sur les deux catégories de dommage : changement climatique et consommation d'énergie primaire pour le scénario de base.....	58
Figure V.4 : Contribution des différentes étapes sur les deux catégories de dommage : changement climatique et consommation d'énergie primaire.....	59
Figure V.5 : Comparaison entre les deux scénarios : avec et sans valorisation énergétique..	62

Listes des abréviations

ACV : Analyse du cycle de vie

GES : Gaz à Effet de Serre

NF : Norme Française

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

FAAE : Fatty Acid Alkyl Ester

AGL : Acides gras libres

tkm : unité pour le facteur de transport égale au poids en tonnes fois la distance parcouru en km.

COV : Composé organique volatil

VSS : Solide volatil en suspension

MS : matière sèche

AGV : acides gras volatils

Introduction

D'ici 2030, le monde va faire face à une croissance significative de sa demande en énergie primaire qui signifiera un recours accru aux énergies fossiles

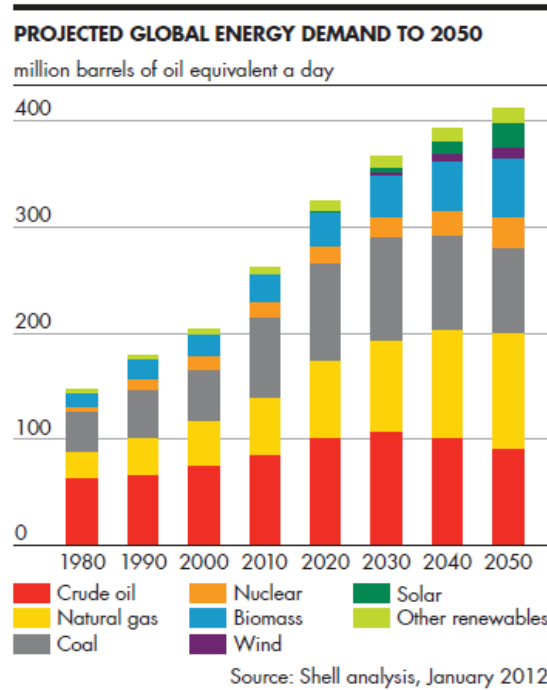


Figure 1 : Demande en énergie primaire jusqu'à 2050

Une telle évolution, illustrée par la Figure I.1 n'ira pas sans poser un certain nombre de problèmes :

- La consommation accrue d'énergies fossiles devrait entraîner une augmentation des émissions de gaz à effet de serre responsables d'importants changements du climat à la surface de la planète ;
- Concernant le pétrole, principale source d'énergie aujourd'hui, les ressources conventionnelles se raréfiant, la dépendance des pays consommateurs vis-à-vis des pays producteurs de pétrole ne fera que s'accroître.

Nombreux sont les scientifiques qui admettent que l'évolution récente démographique et économique des humains contribue significativement au changement climatique. Les causes de cette influence sont, non seulement l'industrialisation et la consommation d'énergies fossiles, mais aussi d'autres facteurs comme : la gestion de l'eau, la concentration urbaine, la gestion des forêts et la désertification. Les teneurs en CO₂, mais aussi en CH₄ et NO₂, augmentent en suivant le développement de l'industrialisation et des transports. Le risque climatique présenté par l'augmentation des gaz à effet de serre est donc majeur.

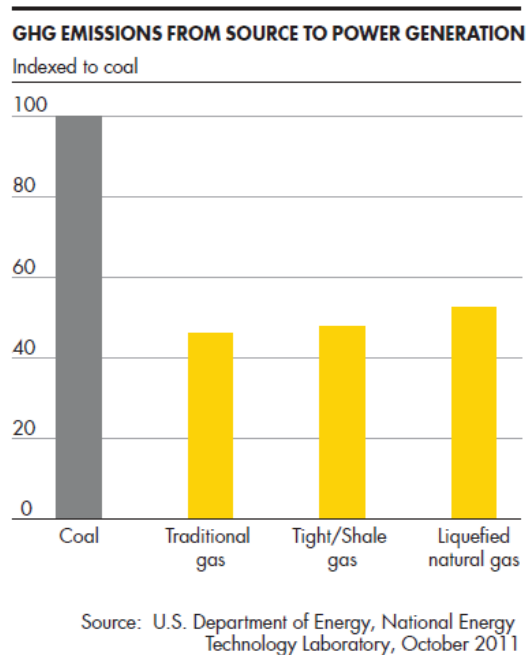


Figure 2 : Émission de gaz à effet de serre

Dans ce contexte, le secteur des transports routiers, l'un des principaux moteurs de l'augmentation de la demande d'énergie mondiale dans le futur et qui est, aujourd'hui, presque exclusivement dépendant des produits pétroliers, étudie toutes les options possibles d'un développement plus durable. Les carburants issus de la biomasse sont une de ces solutions.

La biomasse, et en particulier les microalgues, sont considérées comme une alternative potentielle pour la production de carburants pour les transports. En diversifiant le portfolio d'énergies avec plus d'énergies renouvelables cela peut aider à diminuer l'impact des gaz à effet de serre.

Dans ce travail je vais m'intéresser à l'analyse du cycle de vie d'un biodiesel issu d'une microalgue verte appelé *Chlorella vulgaris* avec une valorisation énergétique de la biomasse résiduelle en effectuant une digestion anaérobie

Ce travail comportera cinq chapitres, le premier traitera la notion des microalgues, leurs caractéristiques et potentiels, le deuxième parlera du procédé de production du biodiesel à partir des microalgues sans valorisation énergétique, le troisième éclaircira la méthode de la valorisation énergétique de la biomasse résiduelle « la digestion anaérobie », les différentes méthodes d'épuration du biogaz ainsi que son utilisation à des fins énergétiques, le quatrième fera l'objet d'une étude théorique de l'analyse de cycle de vie et sa méthodologie et enfin le dernier chapitre sera consacré pour l'analyse de cycle de vie du procédé de production du biodiesel avec valorisation énergétique à l'aide du logiciel Simapro.

Chapitre 1 :

Les

microalgues

1. Les algues

Les algues sont des organismes végétaux et aquatiques sans tiges, ni racines, ni feuilles. Dans un milieu liquide, les algues utilisent l'énergie solaire et l'eau pour transformer les composés organiques en biomasse et oxygène, en effectuant le procédé de photosynthèse. On peut différencier les algues en micro et macroalgues, classifiées selon leurs pigments, les caractéristiques de leurs parois et leurs compositions [1].

1.1. Les macroalgues

Les macroalgues sont des algues multicellulaires de taille proche du centimètre et qui croissent le plus souvent dans des bassins naturels d'eau douce ou d'eau salée [2]. Elles peuvent atteindre des tailles de 60 m. Elles sont cultivées pour produire des composants destinés aux industries cosmétique, alimentaire, pharmaceutique, etc. Aujourd'hui, les macroalgues sont utilisées dans des procédés de transformation tels que la combustion, la pyrolyse et la digestion anaérobie pour produire de l'énergie, dont le biogaz [1].

1.2. Les microalgues

Les microalgues ont une taille de l'ordre du micromètre et sont considérées comme des algues unicellulaires [2] qui peuvent habiter dans des eaux salées, douces, saumâtres et même dans des eaux usées. Elles peuvent être observées séparément ou en formant des colonies. Selon leurs types et les conditions environnementales, les microalgues peuvent produire des quantités importantes de lipides, de sucres et de protéines grâce à la photosynthèse [1].

1.3. Le mécanisme de photosynthèse

La photosynthèse est réalisée par plusieurs réactions qui utilisent l'énergie solaire, le dioxyde de carbone et l'eau pour transformer les composés organiques en biomasse et en oxygène. Les pigments captent la lumière et les réactions chimiques sont effectuées par les enzymes. L'efficacité photosynthétique est définie comme le rapport entre la biomasse produite et la lumière absorbée.

L'efficacité photosynthétique des algues est estimée à 9 %, ce qui est beaucoup plus élevé que celles des plantes terrestres (entre 1 et 2 %) [1].

2. Caractéristiques des microalgues

2.1. Structure cellulaire

La microalgue présente un noyau et une membrane plasmique contenant des organites

essentiels à son fonctionnement tel que les chloroplastes, les amyloplast, les oléoplastes et les mitochondries. Elle contient trois principaux types de pigments qui sont les chlorophylles, les caroténoïdes et les phycobiliprotéines [2].

2.2. Nutrition

Les microalgues sont majoritairement « *Photoautotrophes* » mais elles peuvent être également « *Hétérotrophes* » ou « *Mixotrophes* ». Un métabolisme autotrophe se traduit par l'utilisation d'une source de carbone inorganique comme le dioxyde de carbone ou le bicarbonate tandis que le métabolisme hétérotrophe est caractérisé par une consommation de carbone organique comme source de carbone pour leur développement. Les mixotrophes utilisent les deux types de source de carbone [2].

2.3. Facteurs influençant la croissance des microalgues

2.3.1. La lumière

La lumière est un des facteurs indispensables au métabolisme photosynthétique des microalgues. L'apport de l'énergie lumineuse peut se produire de manière naturelle grâce à l'énergie solaire ou bien artificiellement grâce à des tubes fluorescents émettant la lumière à une longueur d'onde bien spécifique [2]. Dans tout le spectre de rayonnement électromagnétique, la photosynthèse est effectuée dans la gamme du « Rayonnement photosynthétiquement actif » entre 400 et 700 nm [1].

L'intensité lumineuse doit être contrôlée. En effet, en absence de lumière, il n'y aura pas de production de matière organique et en présence d'une intensité lumineuse trop importante, il y aura un phénomène de photo-inhibition, c'est-à-dire à une diminution du taux de croissance [3] comme le montre la figure I.1.

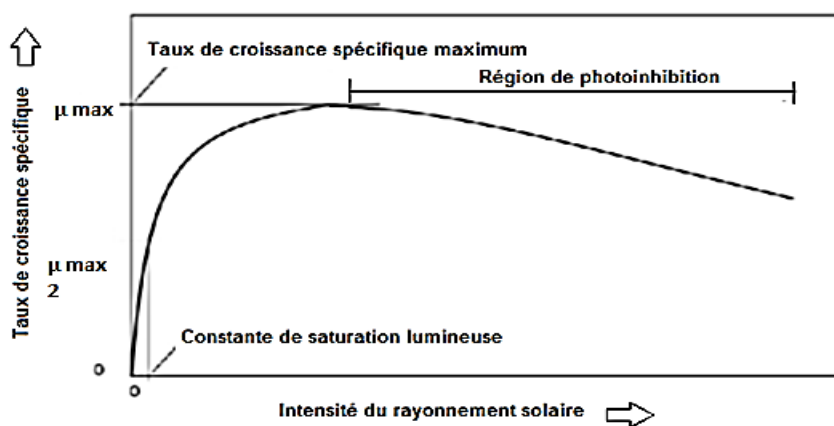


Figure I.1 : Effet de l'intensité lumineuse sur le taux de croissance [5]

2.3.2. Le dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est un élément nécessaire pour l'activité photosynthétique. Il est généralement admis qu'un kg d'algues absorbe entre 1,65 et 1,8 kg de CO₂. Selon plusieurs études expérimentales [1], une injection d'air enrichi en CO₂ dans la culture favorise la croissance des algues. Des concentrations de CO₂, de 1 à 15 v/v% ont été testées sur plusieurs espèces telles que *Chlorella vulgaris* et *Dunaliella tertiolecta*. Actuellement, des études proposent l'utilisation de fumées de centrales électriques pour récupérer principalement le CO₂. Néanmoins, il faut traiter les fumées avant de les injecter dans la culture (e.g. en contrôlant la température) [1].

2.3.3. L'agitation

L'homogénéité du milieu de culture représente un point fondamental afin d'assurer une productivité optimale de biomasse et une capacité importante de fixation de CO₂. En effet, une faible agitation entraîne une difficulté d'accès aux nutriments et à la lumière, des phénomènes de décantation de la biomasse et la création de zones « stagnantes » au sein desquelles les conditions de culture sont défavorables. D'autre part, une agitation trop élevée conduit à un cisaillement des cellules algales qui engendre des déficiences physiologiques et métaboliques ainsi que des dommages structuraux. En conséquence, le choix d'un système d'agitation adapté doit répondre à un compromis entre ces deux types de contrainte [2].

2.3.4. L'eau

La quantité et la qualité de l'eau apportée vont permettre une croissance optimale des algues. Par exemple, en photobioréacteurs, il est souvent nécessaire de débiter la culture dans une eau stérile ce qui évite la compétition entre espèces et donc l'inhibition de la croissance des algues d'intérêt par tout autre micro-organisme non désiré [4].

2.3.5. Nutriments

a. L'azote

L'azote constitue un élément nutritif essentiel pour la croissance algale. La teneur en azote des microalgues se situe aux alentours de 7% de la matière sèche algale. La source d'azote peut être organique (urée) ou inorganique (nitrate NO₃⁻, ammoniacque NH₄⁺).

Une augmentation de la concentration d'azote, jusqu'à une certaine valeur limite, entraîne une productivité cellulaire et une synthèse plus significative de chlorophylle. La carence de cet élément induit une accumulation importante de réserve lipidique [2].

b. Le phosphore

Le phosphore est impliqué dans plusieurs voies métaboliques et régulations cellulaires. Il représente environ 1% de la matière sèche algale.

La carence en phosphore joue sur l'activité photosynthétique principalement au niveau de la fonction de l'enzyme « *rubisco* », indispensable à la fixation du CO₂, sur l'accumulation des réserves lipidiques et sur la productivité en biomasse. Le phosphore forme des précipités avec les ions métalliques et de ce fait la quantité de phosphore ajoutée n'est pas totalement disponible. Il est nécessaire qu'il soit apporté en excès dans le milieu [2].

2.3.6. La température

Les conditions optimales de culture des micro-algues sont comprises entre 20 et 30°C. Beaucoup de micro-algues peuvent cependant facilement supporter des températures allant jusqu'à 15°C en dessous de leur température optimale. En revanche, la hausse de la température de seulement 2 à 4°C au-dessus de leur température optimale peut entraîner la perte totale de la culture. Le maintien de la température en dessous d'une valeur seuil est donc un facteur limitant pour la croissance [5].

2.3.7. le pH

Ce paramètre dépend notamment de la concentration en CO₂ dissous dans le milieu de culture, régie par les équilibres chimiques entre les différentes formes de carbone dans l'eau (CO₂, H₂CO₃, HCO₃⁻ et CO₃²⁻). En effet, durant la photosynthèse, la consommation de CO₂ entraîne une augmentation progressive du pH, alors qu'en présence de concentrations importantes de CO₂ dissous, le pH chute entraînant une consommation moindre en CO₂. De manière générale, la croissance algale est favorisée pour un pH proche de la neutralité. On rencontre malgré tout certaines espèces tolérantes vis-à-vis de valeurs extrêmes [2].

3. Potentialités naturelles et industrielles des microalgues [6]

- **Rendement photosynthétique élevé :** Comme nous l'avons mentionné plus haut, l'efficacité photosynthétique des algues est estimée à 9 %. Cette efficacité est beaucoup plus élevée que celles des plantes terrestres (entre 1 et 2 %).
- **Croissance rapide :** les microalgues doublent leur biomasse entre 0,3 et 3 fois par jour. Cette valeur dépend des espèces et des conditions de culture.
- **Teneur en lipides importante :** en conditions de stress (carence en azote, ...), la production de lipides par les microalgues est augmentée et peut atteindre jusqu'à 80 % en masse sèche selon les espèces.
- **Biodiversité importante :** il existerait entre 200 000 et plusieurs millions d'espèces ce qui constitue un réel potentiel pour la recherche et l'industrie.
- **Croissance dans des conditions extrêmes :** certaines espèces de microalgues ont la capacité de croître dans des conditions extrêmes (eaux salées, fort pH, ...). Une culture

dans ces conditions permet d'éviter une contamination par d'autres microorganismes non adaptés à ces milieux extrêmes.

- **Pas de concurrence avec les terres destinées à l'agriculture**
- **Captage du CO₂ provenant des fumées industrielles** : les microalgues ont une croissance plus importante lorsque le CO₂ utilisé pour la photosynthèse est en concentration élevée (2 à 15 %).
- **Utilisation des nutriments issus d'eaux usées** : les microalgues peuvent utiliser les nutriments (phosphates et nitrates) présents dans les eaux usées pour leur croissance. Les espèces couramment étudiées pour le traitement des eaux usées sont : *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. et *Spirulina* sp.

4. *Chlorella vulgaris*

4.1. Définition

Chlorella vulgaris, une microalgue unicellulaire verte marine, a été isolée et décrite pour la première fois par le professeur Néerlandais M.W. Beijerinck en 1889 à Delft. Elle appartient à l'espèce des *Chlorophytes*, avec une taille variant de 5 à 10 µm et une morphologie sphérique ou ellipsoïde [2].

4.2. Caractéristiques

Le tableau 1 ci-dessous présente quelques caractéristiques de *Chlorella vulgaris*

Tableau I.1 : Caractéristiques de la microalgue Chlorelle Vulgaris

Paramètre	donnée	Référence
Protéine (%)	51 - 58	[7]
Lipide (%)	14 - 22	[7]
Carbohydate (%)	12 – 17	[7]
Acide gras libre (%)	2.6±0.3	[9]
Taux de consommation de CO ₂ (mg. L-1. j-1)	6240	[2]
Productivité (g.m ⁻² .j ⁻¹)	24	[8]
Température de croissance optimale (°C)	25 – 30	
Métabolisme	Mixotrophe	[10]
Source de carbone Organique	Glucose, fructose, galactose, acide acétique, acétate, glycérol	[10]

Avantages de la chlorelle [11]:

- Un simple cycle de vie,

- Un taux de croissance élevé,
- Un teneur en protéines élevée (plus de 70% du poids sec),
- Une teneur en lipides élevé jusqu'à 50% et principalement des triglycérides sous des conditions de stress,
- Richesse en minéraux et en vitamines,
- Possible culture eaux usées.

Chapitre 2 :
Les microalgues
pour la
production de
biodiesel

1. Intérêt des micro-algues comme source de biocarburant [4]

Les micro-algues présentent des caractéristiques qui les rendent particulièrement intéressantes en tant que source de biocarburant.

- Contrairement aux agrocarburants des deux premières générations, l'algue toute entière est utilisée dans la production de carburant, et pas seulement, une partie de la plante.
- Le rendement en biocarburants obtenu à partir des algues est le plus élevé comparé à celui obtenu à partir d'autres substrats.
- La culture des algues permet de produire du carburant, mais aussi des co-produits également valorisables. Les molécules à haute valeur ajoutée qu'elles fournissent peuvent être employées dans l'industrie pharmaceutique (production d'antiviraux, antiprolifératifs, anti-radicalaires...), dans l'alimentation humaine, dans la cosmétique, mais aussi dans l'alimentation animale et l'aquaculture.
- L'huile produite permet, selon le procédé de transformation, la production de nombreux carburants tels que le gazole, le kérosène, l'éthanol, le méthane, qui seront utilisés seuls ou mélangés avec le carburant fossile correspondant et ils ne nécessitent pas de transformation du moteur.

Le tableau II.1 ci-dessous compare quelques sources de biodiesel

Tableau II.1 : Comparaison de quelques sources de biodiesel [12]

Filière biocarburant	Production d'huile	Surface de culture
	(L/ha)	(Mha)
Maïs	172	1540
Soja	446	594
Colza	1 190	223
Jatropha	1 892	140
Micro-algues à 70% de lipides	136 900	2
Micro-algues à 30% de lipides	58 700	4,5

2. Le biodiesel

Le biodiesel est un carburant propre qui peut être mélangé au diesel fossile car leurs propriétés physiques sont similaires et compatibles [13] (tableau II.2) . Sa structure chimique est celle des esters allyliques d'acide gras (fatty acid alkyl esters FAAE) [14].

Le tableau II.2 ci-dessous compare entre les propriétés du gazole et du biodiesel issu de *Chlorella Vulgaris*

Tableau II.2 : Comparaison entre les propriétés du gazole et du biodiesel issu de *Chlorella Vulgaris* [15]

Propriétés	Biodiesel issu de <i>Chlorella Vulgaris</i>	Pétrodiesel	Norme du biodiesel	
			ASTM	EN 14214
Densité à 15°C (kg.m ⁻³)	881	850	-	860 – 900
Viscosité à 40 °C (mm ² .s ⁻¹)	4,5	2,6	1,9 – 6,0	3,5 – 5,0
Pouvoir calorifique (Mj.kg ⁻¹)	38,4	42,2	-	-
Indice de cétane	54,7	49 – 55	≥ 47	≥ 51
Teneur en eau (%)	0,03	0,02	< 0,03	< 0,05

3. Production de biodiesel à partir des microalgues

La fabrication d'algocarburants, à partir de micro-algues, est un processus long et complexe, qui est encore loin d'être parfaitement maîtrisé [16]. Il comporte plusieurs étapes énumérées dans la figure II.1.

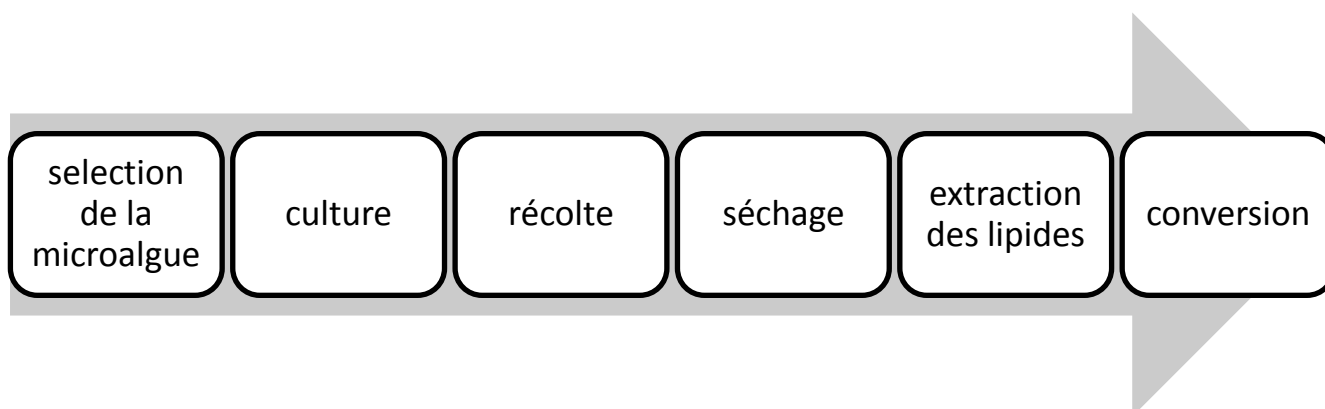


Figure II.1: Schéma des différentes étapes de fabrication du biodiesel à partir des microalgues

3.1. Critères de sélection des algues

La sélection des algues se fait selon différents critères:

- 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 de grande valeur ajoutée,
- la tolérance des écarts de température diurne / nocturne et saisonnière,
- l'efficacité photosynthétique,
- un cycle de productivité rapide,
- la capacité de croissance dans de grands volumes,
- un pouvoir calorifique élevé.

Le pouvoir calorifique des cellules est conditionné par la teneur en glucides, protéines et lipides. Le pouvoir calorifique du pétrodiesel est de 42 kJ/g. Celui des micro-algues varie entre 18-21 kJ/g dans des conditions normales de culture mais pourrait être augmenté en conditions de stress [3].



Les souches micro algales comme *Chlorella vulgaris*, *Spirulina maxima*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Nannochloropsis s*, *Neochloris oleoabundans*, *Scenedesmus obliquus*, *Nitzchia sp.*, *Schizochytrium sp.*, *Chlorella protothecoides*, *Dunaliella tertiolecta* ont été sélectionnées par plusieurs auteurs comme étant les espèces les plus productives du point de vue lipides, autrement dit comme meilleurs sources pour la production du biodiesel [13].

3.2. Culture des microalgues

La croissance des microalgues se fait naturellement dans leur milieu naturel. Elles puisent pour cela l'énergie du soleil et le CO₂ de l'atmosphère. Néanmoins, cette croissance est lente et ne permet d'envisager une culture de microalgues à l'échelle industrielle. Afin d'intensifier et de contrôler la croissance de ces microorganismes, deux systèmes de culture sont utilisés : les bassins ou étangs (systèmes ouverts) et les photobioréacteurs (systèmes fermés) [6], dont les caractéristiques principales sont exposées dans le tableau II.2.

Le tableau II.3 ci-dessous compare les deux systèmes de production de microalgues.

Tableau II.3 : Comparaison des deux systèmes de production de microalgues [6]

	<p align="center">Bassin ouvert « Pond »</p> 	<p align="center">Photobioréacteur</p> 
<p>Technologie</p>	<p>Les « ponds » sont des grands bassins ouverts, la majorité étant du type « champ de course ». La circulation et l'aération de la culture s'effectuent mécaniquement.</p>	<p>Les photobioréacteurs sont des systèmes clos où les conditions de mélange et de transfert de matière sont optimisées.</p>
<p>Principe</p>	<p>10 – 50 T/ha/an</p>	<p>30 – 150 T/ha/an</p>
<p>Rendement surfacique moyen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Facile à construire et à exploiter, • Faible coût, • Système adapté à la production de masse de microalgues, • Faible consommation d'énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Productivité surfacique élevée, • Meilleur contrôle des conditions de culture, • Optimisation des transferts de matière et de lumière.
<p>Avantages</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Risque élevé de contamination, • Faible productivité surfacique, • Peu d'optimisation des transferts de matière, • Évaporation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé • Accumulation d'O₂ dans le réacteur, • Régulation de la température nécessaire, • Consommation d'énergie généralement élevée.
<p>Inconvénients</p>		

3.3. La récolte

Pour extraire les lipides présents dans les cellules, il est nécessaire de concentrer d'abord les cellules algales de la façon la plus efficace et la plus rentable possible afin d'en valoriser les molécules d'intérêts. Pour cela, on sépare l'algue de son milieu de culture [4].

Plusieurs méthodes existent :

3.3.1. La floculation

Littéralement, la floculation est le processus physico-chimique au cours duquel des matières en suspension dans un liquide s'agglomèrent pour former de plus grosses particules [3].

Ce phénomène est provoqué en agissant sur l'état d'agrégation des cellules, ce qui facilite la décantation des micro-algues. Elle peut avoir lieu naturellement, déclenchée par un changement des conditions environnantes (pH, lumière, stress...). On parle dans ce cas d'auto-floculation ou biofloculation. Elle peut aussi être le résultat d'un ajout de floculant comme le sel de fer (FeCl_3 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, ...) ou d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), ou d'un ajout de polymères (anioniques ou cationiques, synthétiques ou naturels) [10].

La floculation est une étape préparatoire précédant la récolte qui permet de faciliter les étapes ultérieures. En général, son coût d'exploitation est faible. Toutefois, ce procédé exige une longue période de traitement qui peut entraîner un risque de décomposition du produit bioréactif [3].

3.3.2. La sédimentation gravitaire par différence de masse volumique

La sédimentation est la séparation sous l'influence de la gravité d'une phase dispersée solide ayant une densité plus grande que la phase fluide continue qui la contient. Les matières solides dont la densité est quasiment égale ou inférieure à celle de l'eau ne peuvent donc pas être séparées par sédimentation.

La vitesse de sédimentation dépend aussi directement de la taille des particules et de leur forme (résistance à l'écoulement). La concentration des algues constitue un autre paramètre qui influence la vitesse de sédimentation. Lorsque la concentration augmente, la vitesse de sédimentation est réduite [3].

3.3.3. La centrifugation

La centrifugation est un procédé de séparation utilisant la force centrifuge pour séparer les algues en suspension de leur milieu de culture. L'outil utilisé pour cela est une centrifugeuse. Plusieurs systèmes ont été développés : la centrifugeuse à bol, le séparateur à assiettes, le décanteur centrifuge ou Sédicanter et l'hydrocyclone. La centrifugation permet de concentrer

les micro-algues d'une solution initiale ayant une concentration en biomasse de 10 à 20 g/L en une pâte de 100 à 200 g/L.

La centrifugation est, à l'heure actuelle, une des techniques les plus utilisées mais elle reste encore malgré tout coûteuse en investissement et en consommation énergétique [3].

3.4. Le Séchage

Quelle que soit la méthode précédemment employée, on obtient une pâte algale dont le taux d'humidité est diminuée. Toutefois, il est encore nécessaire de sécher cette pâte pour obtenir un pourcentage de masse sèche maximum afin d'optimiser la durée de vie du produit final [4].

L'étape de séchage peut être fortement énergivore. Il est important de trouver l'équilibre entre l'efficacité et le coût du séchage afin de maximiser le rendement de la stratégie de production de biocarburant à partir d'algues. Le résultat final est l'obtention d'une concentration d'environ 90% de masse sèche.

Plusieurs procédés existent [3] :

- Le séchage solaire, qui est le plus ancien, consiste à étendre la pâte d'algues sous serre ou à l'air libre afin d'en évaporer le contenu en eau,
- Le séchage en sécheur convectif ou conductif, résulte d'échanges couplés de chaleurs et de matières avec l'air et la pâte algale,
- Le séchage par atomisation, consiste à faire passer de l'air chaud dans un cylindre vertical, ce qui déshydrate le liquide sous forme de poudre,
- Le séchage par lyophilisation, consiste à ôter l'eau d'un produit liquide, pâteux ou solide, à l'aide de la surgélation puis d'une évaporation sous vide de la glace sans la faire fondre (sublimation). La vapeur d'eau quitte le produit puis est capturée par congélation à l'aide d'un condenseur, ou d'un piège à froid. Cette technique permet de conserver à la fois le volume, l'aspect et les propriétés du produit traité. Mais, elle est consommatrice en énergie.

3.5. L'extraction des huiles

L'extraction des huiles dans la biomasse microalgale peut se faire par trois procédés principaux [6] :

3.5.1. Presse : Une presse à huile va permettre d'extraire les lipides contenus dans les microalgues. Ce procédé est simple mais a un rendement faible en comparaison avec d'autres procédés : de l'ordre de 70- 75 %. Il peut cependant être utilisé comme étape

préliminaire avant une extraction avec un solvant afin d'assurer une meilleure imprégnation du solvant.

3.5.2.Extraction avec un solvant : Les lipides sont solubles dans les solvants organiques et peuvent être extraits à l'aide d'un solvant apolaire comme l'hexane. Le rendement de cette étape est de 95 %. Les triglycérides seront ensuite récupérés par distillation. Les lipides sont composés en moyenne de 65 % de triglycérides.

3.5.3.Extraction avec un fluide supercritique (CO₂) : Sous certaines conditions de température et de pression, le CO₂ va avoir des propriétés physiques intermédiaires entre celles d'un gaz et celles d'un liquide. Le CO₂ supercritique va agir comme un solvant sur la biomasse pour extraire les huiles. Le rendement obtenu est proche de 100%.

3.6. Transformation de l'huile en biodiesel

La transestérification est une réaction catalytique homogène ou hétérogène des triglycérides et d'alcool. Le catalyseur est un acide ou une base [17].

Les triglycérides extraits subissent une réaction de trans-estérification afin de produire du biodiesel (ester méthylique) et du glycérol selon la réaction de la figure II.2. Cette étape de trans-estérification de l'huile microalgale est semblable à celle qui permet la transformation de l'huile de palme en biodiesel [6].

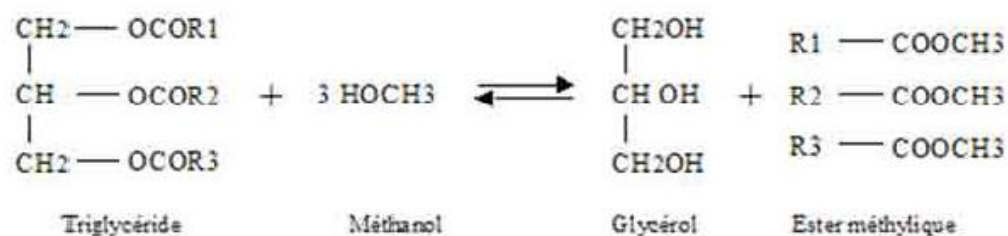


Figure II. 2 : Réaction de transesterification [18]

La réaction se produit en 3 étapes successives et réversibles : un triglycéride est d'abord converti en diglycéride, puis en monoglycéride et finalement en glycérol. Un méthyl ou éthyl-ester est libéré à chaque fois [3].

3.6.1. Effet de la teneur en acides gras libres sur la conversion des lipides en biodiesel

Ces molécules, lors de la réaction de transestérification, forment des réactions secondaires indésirables (saponification). En effet, les AGL vont réagir avec la base forte utilisée comme

catalyseur (NaOH ou KOH) dont le résultat est la formation d'un sel de carboxylate, soit du savon (figure II.3).

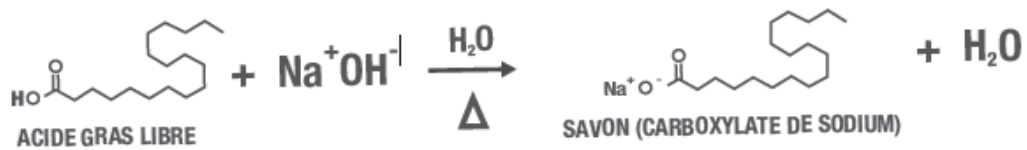


Figure II.3 : Réaction de saponification des acides gras

La réaction compétitive de saponification réduit l'efficacité de production de biodiesel. Pour empêcher la perte de rendement de biodiesel due à la réaction de saponification, l'alcool doit être sec et l'huile devrait avoir une quantité minimum d'acides gras libres. Le biodiesel est finalement récupéré par le lavage répété à l'eau pour enlever le glycérol, le savon et l'excès du méthanol [17].

Chapitre 3 :

Les

algocarburants

au-delà du

biodiésel

1. La valorisation énergétique de la biomasse algale

La forte teneur en huile des algues 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 cocombustion dans les centrales électriques. Elles peuvent aussi être utilisées comme substrat de digestion anaérobie, processus qui génère du biogaz [19].

Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser plus précisément à la digestion anaérobie comme une méthode de la valorisation énergétique des microalgues.

2. La digestion anaérobie

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 [20].

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 [21].

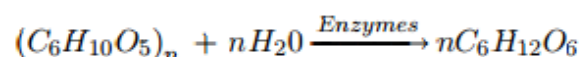
L'illustration la plus spectaculaire de ce phénomène réside dans la formation des nappes pétrolifères à partir de dépôts de végétaux avec comme étape ultime la formation de gisements de gaz naturel [20].

2.1. Les étapes de la méthanisation

La biométhanisation est un processus biochimique qui se déroule en quatre étapes principales schématisées dans la figure III.1

2.1.1. Hydrolyse [22]

Au cours de l'étape d'hydrolyse, les macromolécules complexes sont solubilisées sous l'action d'enzymes extracellulaires excrétées par des bactéries anaérobies. Les composés particuliers sont scindés en monomères (ou dimères) de taille suffisamment petite pour pouvoir être transportés au travers de la membrane cellulaire. On peut schématiser les réactions d'hydrolyse enzymatique comme suit, en considérant la dégradation de cellulose en glucose, où les enzymes joueraient le rôle de catalyseur :



2.1.2. L'acidogénèse [22]

Dans une seconde étape, les monomères issus de l'hydrolyse, ainsi que les composés dissous, servent de substrats à des microorganismes fermentaires qui les dégradent principalement en

acides de faibles poids moléculaires comme les acides gras volatils [AGV] tels que l'acide propionique et butyrique ou en alcools tels que le méthanol et l'éthanol. Du gaz carbonique et du dihydrogène sont également produits au cours de ces réactions.

En considérant le glucose comme substrat de référence on représente l'acidogénèse par les équations suivantes :

- Ethanol : $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$
- Propionate : $C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$
- Butyrate : $C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2 + 2CO_2$

2.1.3. L'acétogénèse [22]

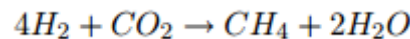
Elle permet la transformation des composés formés précédemment en précurseur du méthane, l'acide acétique, le dioxyde de carbone et l'hydrogène.

Les réactions suivantes expliquent l'étape de l'acétogénèse:

- Ethanol : $CH_3CH_2OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2H_2$
- Propionate : $CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$
- Butyrate : $CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$

2.1.4. La méthanogénèse [22]

Elle constitue l'étape de réduction finale du processus de méthanisation. Elle est réalisée par une classe spécifique de bactéries anaérobies qui peuvent utiliser divers substrats comme l'acétate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène pour la formation du méthane. Toutes les bactéries méthanogènes sont capables de réduire H_2/CO_2 comme le montre l'équation suivante :



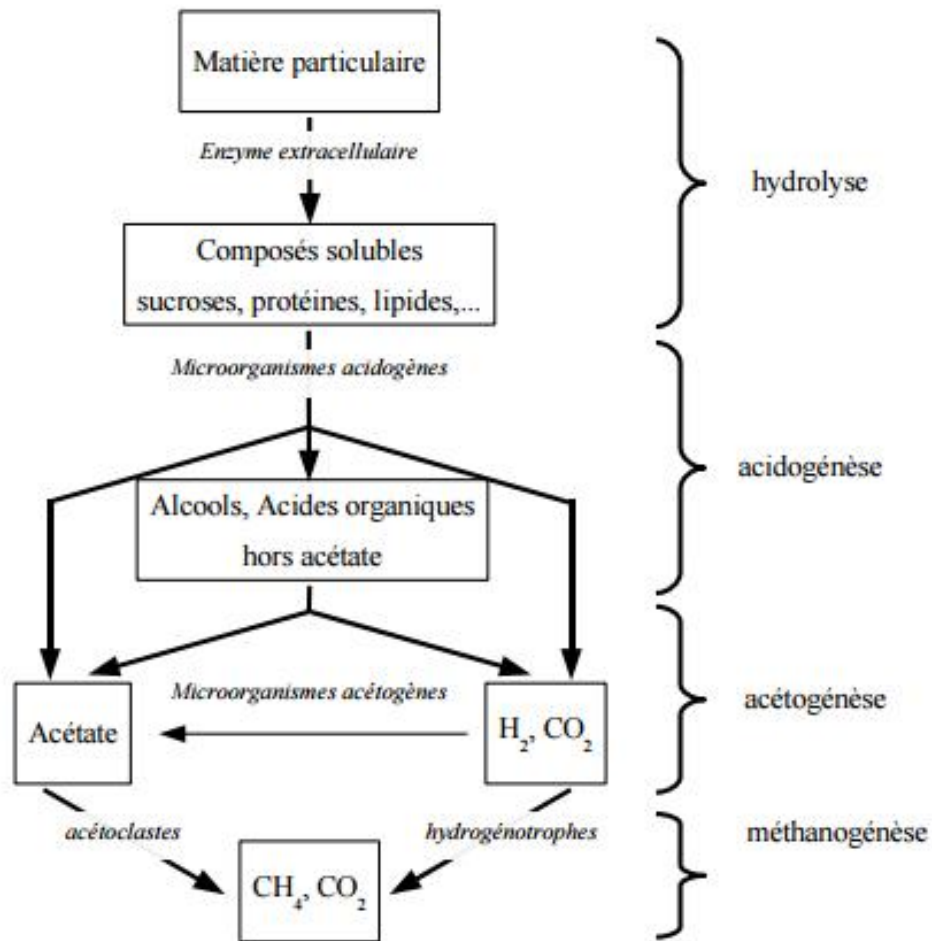


Figure III.1 Schéma des étapes de la fermentation [22]

2.2. Physico-chimie de la digestion anaérobie

La méthanogénèse est influencée par de nombreux facteurs environnementaux comme le pH et la température [22].

2.2.1. La température [22]

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 sub-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.

La température peut affecter les réactions biochimiques au travers des cinétiques bactériennes. Plus spécifiquement, l'activité enzymatique reste faible jusqu'à une température minimale, puis augmente avec la température jusqu'à la température optimale. Aux températures extrêmes, les enzymes sont dénaturées et le taux de croissance des bactéries décroît.

2.2.2. Le pH et l'alcalinité [22]

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 : $8,5 < \text{pH} < 11,5$.

Un procédé opérant à un pH trop bas (en deçà de pH 4) ou trop élevé (au dessus de pH 9) aura tendance à inhiber l'activité bactérienne. La variation de la croissance bactérienne est liée à un changement d'activité enzymatique avec le pH ; le site réactionnel des enzymes comporte souvent des espèces ioniques, et un changement du pH du milieu de croissance modifiera la structure spatiale de l'enzyme ce qui la rendra inefficace. C'est pour cette raison qu'il est conseillé de maintenir le pH d'un digesteur dans la gamme optimale pour la méthanisation.

2.3. La méthanisation de la biomasse algale [6]

Parmi les voies de valorisation énergétiques des microalgues, la digestion anaérobie est la plus mature actuellement et ne nécessite aucune levée de verrous technologiques. De plus, elle s'intègre parfaitement dans l'ensemble de la chaîne de valorisation des microalgues.

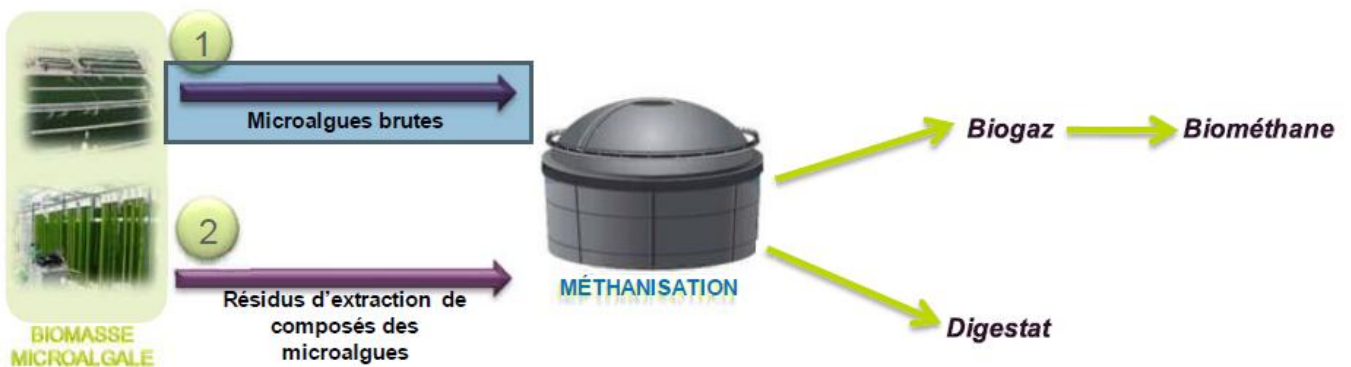


Figure III. 2 : Schéma de production de biométhane [6]

Les premières études sur la digestion anaérobie des microalgues à des fins énergétiques ont été faites sur des espèces de microalgues prélevées des bassins ouverts pour le traitement des eaux. Les études montrent que la digestion de la biomasse microalgale s'opère en des temps de rétention compris entre 10 et 40 jours avec une production de méthane comprise entre 0,1 et 0,4 L/gVSS.

Une approche prometteuse est d'utiliser des espèces à croissance rapide de manière à avoir une biomasse suffisante. Mais il est à noter que la quantité de biogaz produit est dépendante des espèces utilisées et peut facilement varier du simple au double.

La production de biométhane à partir d'une culture de microalgues avec les deux technologies de culture est représentée dans le Tableau III.1 et est comparée à la production de biométhane associé à d'autres biomasses conventionnelles.

Tableau III.1 : Production de biométhane à partir des microalgues et d'autres biomasses conventionnelles [6]

Type de biomasse	Productivité (tMS/ha/an)	Production Biométhane (m ³ /ha/an)	Production d'énergie associée (MWh/ha/an)
Microalgues-ponds	27	6 520	65
Microalgues-photobioréacteurs	76	18 392	184
Maïs	9 – 30	1 660 – 12 150	17 – 122
Blé	3.6 – 11.75	1 244 – 4 505	12 - 45
Sorghum	8 - 25	2 124 – 8 370	21 – 84
Miscanthus	8 - 25	289 – 4 905	13 - 49

2.4. Avantages et limites de la digestion anaérobie [22]

La digestion anaérobie constitue un moyen efficace pour traiter les eaux usées, les boues de stations d'épuration, les rejets de l'industrie agro-alimentaire, ou encore les déjections animales. Différentes technologies de méthanisation ont été développées pour s'adapter au mieux aux effluents à traiter, pour simplifier le procédé et en minimiser le coût, ou pour optimiser la production de biogaz.

Le traitement d'effluents par digestion anaérobie présente de nombreux avantages par rapport à la technologie aérobie qui est plus largement répandue :

- Faible coût énergétique : contrairement aux procédés aérobies, il ne faut pas transférer de l'oxygène au milieu, action qui consomme beaucoup d'énergie,
- Valorisation énergétique : le biogaz produit peut servir de carburant.

Cependant la méthanisation des déchets présente également certains inconvénients comme:

- la faible vitesse de croissance des bactéries anaérobies impose une cinétique lente,
- une réputation d'instabilité liée à la sensibilité de la dynamique de croissance des bactéries,
- un post-traitement aérobie peut être nécessaire avant de rejeter l'effluent dans le milieu naturel.

3. Le digesteur [21]

Quand la méthanisation est menée dans un digesteur, le biogaz a une teneur en méthane de 50 à 70 %, ce qui en fait un bon gaz combustible.

Un digesteur est un récipient cylindrique horizontal ou vertical, fixe ou rotatif où le produit est brassé et séjourne un temps suffisant. Le brassage peut être assuré par la rotation du

cylindre, ou par le mouvement de bras ou encore par des injections de gaz (procédé Valorga). La matière organique, introduite en "batch" ou en continu, y séjourne deux à trois semaines ; elle est progressivement transformée par des bactéries ; la partie dégradable est transformée en méthane et gaz carbonique en plusieurs stades, chacun mettant en œuvre des bactéries différentes.

Une température adéquate doit être maintenue à un niveau suffisant dépendant du type de méthanisation, par chauffage des parois par exemple ou par l'introduction d'un fluide, liquide ou gaz, réchauffé.

Un défaut de brassage peut en quelques heures laisser se former une croûte à la surface de la matière; le gaz ne pouvant plus passer, la pression augmente très vite jusqu'à l'explosion du réacteur. Lorsque les produits sont de consistance pâteuse, l'autre cause principale de panne ou d'accident dans les réacteurs fonctionnant en continu est le blocage des orifices de sortie de la matière.

La quantité de biogaz produite est de 100 m³ de biogaz par tonne de produit introduit, contenant 53 kg de carbone, soit 25 à 30 % du carbone contenu dans les matières entrantes. Le poids du digestat est à peu près de 60% du poids entrant.

4. Le biogaz

4.1. Définition

Le biogaz est un gaz facilement inflammable d'odeur désagréable, il est nocif voire toxique par accumulation. C'est un gaz à effet de serre (GES) car l'effet du méthane est 20 à 23 celui du CO₂ [17].

Le biogaz est un mélange principalement de méthane (CH₄), de dioxyde de carbone (CO₂) ; mais il contient aussi de la vapeur d'eau (H₂O), du sulfure d'hydrogène (H₂S), des composés fluorés, des COV,[17].

Le tableau, ci-dessous, donne la composition chimique moyenne du biogaz issu de *Chlorella Vulgaris*.

Tableau III.2 : Composition d'un biogaz issu de *Chloralla Vulgaris* [23]

Composé	% vol dans le biogaz issu de biomasse résiduelle de <i>Chlorella vulgaris</i>
CH ₄	73
CO ₂	21
autre	6

4.2. Techniques d'épuration du biogaz

L'épuration consiste à éliminer du biogaz brut les substances indésirables (ammoniacque, éléments soufrés, minéraux...) et augmenter sa teneur en méthane (par retrait du CO₂ et autres composés gazeux) pour produire un gaz comparable au gaz naturel [24].

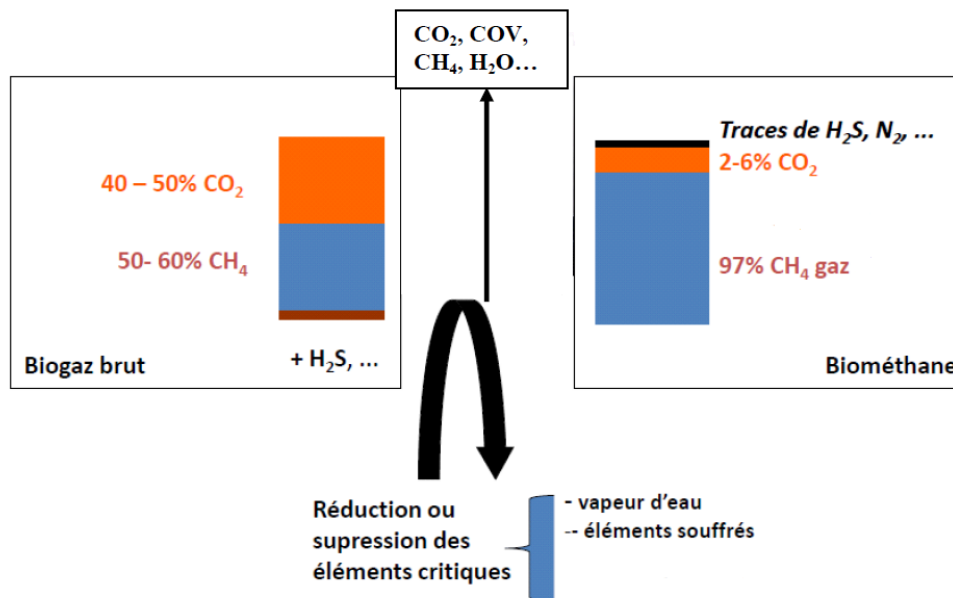


Figure III.3. Schéma simplifié de l'épuration du biogaz [24]

4.2.1. Technologies d'épuration, par familles de procédés [24]

Les technologies existantes d'épuration peuvent être regroupées selon les familles de procédés suivantes :

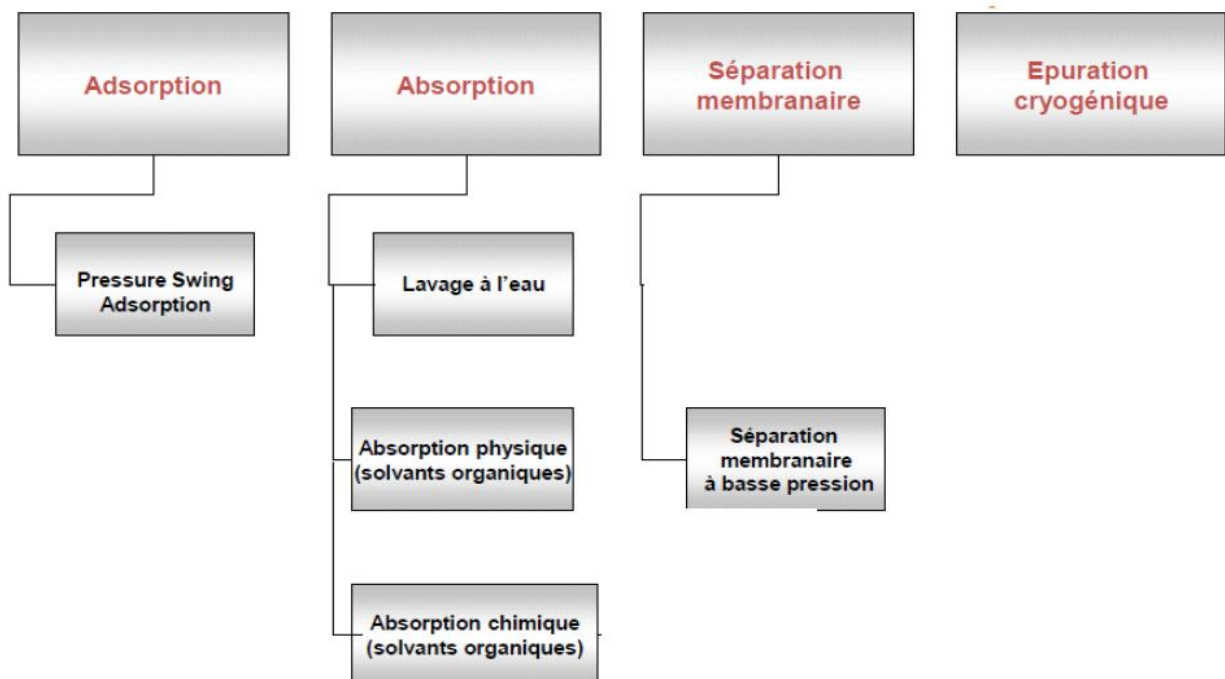


Figure III.4 : Technologies d'épuration, par familles de procédés [24]

a. Adsorption par variation de pression PSA (Pressure Swing Adsorption) [24]

Le PSA épure le biogaz par adsorption : les molécules de gaz se fixent sur des supports (l'adsorbant étant constitué de filtres moléculaires ou zéolithes), les molécules qui se fixent sont différentes selon la pression utilisée et la pression de traitement varie généralement entre 4 et 7 bars: Ceci permet de séparer le CO₂ mais aussi l'eau, le H₂S et l'oxygène.

Avant entrée dans les colonnes, un prétraitement est requis :

– Le gaz est séché (car le procédé nécessite un gaz sec) et désulfuré dans un filtre à charbon actif (le soufre peut altérer les filtres).

– Ensuite, un cycle de pression/dépression permet l'épuration.

Les unités se composent de 4 ou de 6 colonnes. Une partie du méthane résiduel est renvoyé à l'aspiration du compresseur, et le reste est envoyé dans l'évent riche en CO₂.

b. Le lavage à l'eau [24]

Le système de lavage à l'eau comprend :

- une tour de lavage où le biogaz est amené à une pression d'environ 9 bars et à une température de 7°C et entre en contact, à contre-courant, avec l'eau. L'absorption du CO₂ et des autres gaz solubles tels que le H₂S est assurée par l'eau
- une tour de dégazage (flash tank, pression à 4 bars) permet de récupérer une partie du méthane dissous et de le remettre dans le circuit de traitement,
- une tour de stripping (à pression atmosphérique) régénère l'eau de process et permet la désorption du CO₂, de l'H₂S et du CH₄ résiduel avant son évacuation à l'atmosphère.

Le système comprend également un séchage du gaz.

Si la teneur en éléments soufrés dans le biogaz est élevée, une étape de désulfuration en amont peut s'avérer nécessaire (pour les boues de STEP par exemple).

c. Absorption physique (aux glycols) [24]

L'épuration aux glycols est similaire au procédé du lavage à l'eau, le solvant étant dans ce cas un fluide organique (polyéthylène glycol, principalement le Selexol et le Genosorb). La solubilité du CO₂ dans le glycol étant plus élevée que dans l'eau, la hauteur des tours est également moindre. La pression est amenée à 8 bars.

De la chaleur est également nécessaire pour la régénération du fluide, mais de manière moins élevée (environ. 50°C) que pour le lavage aux amines.

d. Absorption chimique (lavage aux amines) [24]

L'absorption chimique est un procédé sensiblement similaire au lavage à l'eau, la différence résidant dans l'usage du solvant à la place de l'eau et dans le mécanisme d'absorption/désorption:

- alors que le CO_2 s'absorbe dans l'eau, le CO_2 ici réagit avec l'amine, la solubilité du CO_2 dans l'amine étant 9 fois plus élevée que dans l'eau,
- les deux amines communément utilisées sont la monoéthanolamine (MEA) ou la diméthylethanolamine (DMEA).

Dans la tour d'absorption, le biogaz entre par le bas, l'amine entre par le haut.

Ensuite, le fluide (amine) doit être régénéré pour être réutilisé :

- il est alors nécessaire de « cracker » les molécules pour créer une réaction chimique inverse, ce qui permet aussi au CO_2 d'être relargué dans l'atmosphère.
- ce processus de régénération du fluide nécessite une source de chaleur importante (300°C), chaleur qui peut aussi être réutilisée ensuite pour chauffer le digesteur.
- la source de chaleur peut venir d'une source proche résiduelle (énergie fatale) ou d'un réseau de chaleur.

e. Séparation par membrane [24]

La séparation par membrane fonctionne comme un simple filtre.

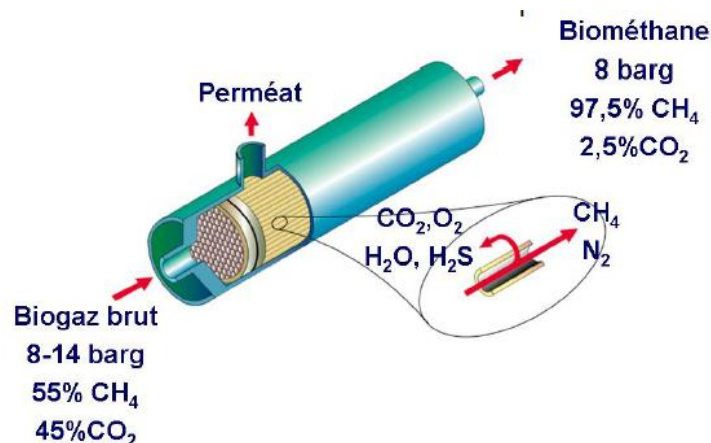


Figure III.5 : Détail d'une membrane [24]

- **Principe :** La séparation du CO_2 du biogaz est due à la différence de perméabilité des membranes vis-à-vis des composés du biogaz: Le dioxyde de carbone traverse plus vite la membrane que le méthane, ce qui permet de concentrer le méthane d'un côté du module.

- **Fonctionnement** : le biogaz est comprimé entre 8 et 13 bar. Un traitement permet de retirer les composés halogénés du biogaz. Le biogaz traverse ensuite un filtre à particules puis alimente les membranes. Un procédé membrane est très souvent constitué de deux étages pour permettre un bon rendement. Un post-traitement est possible pour valoriser le méthane résiduel car celui-ci n'est pas dilué. Le biométhane est produit à une pression supérieure à 7 bar.
- **Technologie** : Les membranes, en forme de fibre, sont en polymère (acétate de cellulose, aussi nommée zylonite / polyamide) capable de séparer les petites molécules polaires telles que CO₂, H₂S, O₂, H₂, H₂O...

f. Epuration cryogénique (distillation à froid) [24]

La cryogénie est actuellement en expérimentation en Suède.

Elle met à profit les différents points d'ébullition des composés gazeux du biogaz :

- le CO₂ a son point d'ébullition à - 78°C à pression atmosphérique ;
- celui du méthane se situe à - 160°C à pression atmosphérique.

On porte le biogaz à - 165°C, ce qui permet d'extraire le méthane durant sa phase liquide.

Deux produits apparaissent : l'un composé de méthane, l'autre de CO₂.

L'eau et le H₂S doivent être préalablement traités pour notamment éviter les problèmes de gel.

Si l'azote doit être également retiré, le biogaz peut être refroidi d'autant, le point d'ébullition du N₂ étant de -195°C

Cette technique est particulièrement adaptée aux gaz de décharge car elle traite efficacement les siloxanes et l'azote.

g. Comparaison des méthodes d'épuration [24]

Le tableau III.3. ci-dessous compare entre les différentes techniques d'épuration.

Tableau III.3 : Comparaison des méthodes d'épuration [24]

	PSA	Lavage à l'eau	Lavage au glycol	Lavages aux amines	Séparation membranaire	Cryogénie
Prétraitement nécessaire	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Pression (bar)	4-7	4-7	4-7	-	8-13	17-26
Utilités requises	Electricité	Eau + électricité	Eau + glycols + électricité + Chaleur	Eau + amine + électricité + chaleur	Electricité	Electricité

4.3. Valorisation énergétique du biogaz

Le biogaz est utilisé en tant que combustible ou carburant pour éviter le rejet à l'atmosphère du méthane, gaz participant à l'effet de serre. Il peut servir à la production de chaleur ou d'électricité ou des deux à la fois (co-génération) [25, 26]. Par ailleurs, il peut aussi être injecté dans les réseaux locaux de gaz naturel. Les quantités de biogaz récupérées lors du traitement des effluents sur les installations anaérobies peuvent être importantes et l'économie énergétique non négligeable [20].

4.3.1. Energie thermique

La chaleur de combustion du biogaz peut servir pour la production d'eau chaude, de vapeur à moyenne ou haute pression, ou bien dans des fours de procédés [27]:

- chaudière au gaz naturel : le biogaz est en général utilisé en mélange avec le gaz naturel pour réduire l'impact de l'hydrogène sulfuré ;
- chaudière à autre combustible : le biogaz est introduit à l'aide d'un brûleur annexe (chaudière à fuel) ou d'une lance (solide, charbon) et l'apport de biogaz ou le fonctionnement du brûleur ou de la lance doit se faire en parallèle du brûleur principal.

Les calories produites dans ces conditions servent à produire de l'eau chaude utilisée soit pour réchauffer les effluents à l'entrée de la station d'épuration, soit pour un besoin en usine [20]

4.3.2. L'électricité [20]

Le biogaz peut alimenter un moteur à gaz ou une turbine qui produit de l'électricité ou la cogénération (électricité et chaleur). Lorsque l'électricité est produite seule, celle-ci est le plus souvent exportée vers le réseau public. La chaleur peut être utilisée pour le chauffage des digesteurs et le reste peut servir à tout autre usage. Bien que couramment privilégiée dans le cas des décharges, cette voie reste peu utilisée en industrie. Cependant la récente augmentation du prix des énergies fossiles et du prix de rachat de l'électricité produite à partir des énergies renouvelables est en train d'influer positivement sur ce choix.

4.3.3. Carburant automobile [20]

La valorisation du biogaz dans quelques pays comme la France est destinée, pour l'instant, à l'alimentation des véhicules des collectivités locales : collecte des ordures ménagères, transport en commun. Son intérêt est à la fois économique et environnemental compte tenu de la qualité des rejets des moteurs à gaz.

4.3.4. Réseaux locaux de gaz [20]

Lorsqu'une unité de méthanisation se trouve à proximité d'une canalisation de gaz naturel, l'injection du biogaz dans le réseau peut être envisageable. La composition finale du biogaz injectable (teneurs en méthane, en gaz carbonique, en sulfure d'hydrogène et en oxygène) ainsi que sa pression dépendent des spécifications imposées par le réseau. Cette méthode est courante dans certains pays comme le Danemark, les Pays-Bas et la Nouvelle-Zélande

Chapitre 4 :

Analyse de

cycle de vie

1. Définition

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 [28].

2. Différentes phases d'une ACV :

2.1. Phase I de l'ACV : Définition des objectifs et du champ de l'étude [28]

La première phase de l'ACV, appelée définition des objectifs et du champ de l'étude, présente essentiellement la raison de l'étude et la façon dont celle-ci sera conduite afin d'atteindre cette fin (c.-à- d. le modèle d'étude définissant le cadre méthodologique auquel doivent se conformer les phases subséquentes de l'ACV).

L'application envisagée et le public cible doivent d'abord être clairement définis puisqu'ils vont fixer la profondeur et l'ampleur de l'étude.

Selon l'ISO, les ACV s'effectuent en mettant au point des modèles qui décrivent les éléments clés des systèmes physiques. Le système de produits¹ représente les activités humaines considérées dans l'étude et l'évaluation des impacts est basée sur des modèles (mécanismes environnementaux) qui lient les interventions environnementales de ces activités et leurs effets potentiels sur l'environnement.

L'ISO définit un système de produits comme un ensemble de processus élémentaires liés par des flux de matière et d'énergie qui remplissent une ou plusieurs fonctions. Dans ce sens, le sujet d'une ACV est caractérisé par ses fonctions et non seulement en termes de ses produits finaux. Ceci permet la comparaison de produits qui n'ont pas la même performance fonctionnelle par unité de produit (p. ex. une tasse de Styromousse à usage unique et une tasse en céramique qui est réutilisée plusieurs fois), puisque la quantification de la performance fonctionnelle, au moyen de l'unité fonctionnelle, fournit une référence à partir de laquelle sont mathématiquement normalisés les entrants et les sortants des systèmes comparés (p. ex. boire 2 tasses de café par jour durant un an). La spécification de l'unité fonctionnelle est le point de départ de la définition des frontières du système de produits puisqu'elle indique quels sont les processus élémentaires qui doivent être inclus pour remplir cette fonction. Plus la définition de l'unité fonctionnelle est précise, plus les frontières du système sont restrictives.

Un processus élémentaire, tel que défini par l'ISO, est la plus petite partie d'un système de produits pour laquelle sont recueillies des données (c.-à-d. il peut représenter un procédé chimique spécifique ou une usine complète incluant de nombreux sous-procédés). Un processus élémentaire est caractérisé par ses entrants et sortants, si le processus élémentaire représente plus d'un sous-procédé, leurs entrants et sortants sont alors agrégés ensemble.

Selon l'ISO, les processus élémentaires sont liés aux écosystèmes naturels (ou écosphère) par des flux élémentaires et aux systèmes économiques (ou technosphère, c.-à-d. la part de l'éco-sphère qui a été transformée par les activités humaines) par des flux de produits (Figure IV.1). On distingue également les flux de produits intermédiaires, entre les processus du système de produits étudié. Ainsi, les flux élémentaires sont puisés directement de ou émis directement dans l'environnement et donc, contribuent aux catégories d'impacts, tandis que les flux de produits (matière, énergie ou service, incluant les coproduits, sous-produits et déchets) sont plutôt utilisés pour déterminer l'intensité des processus modélisés.

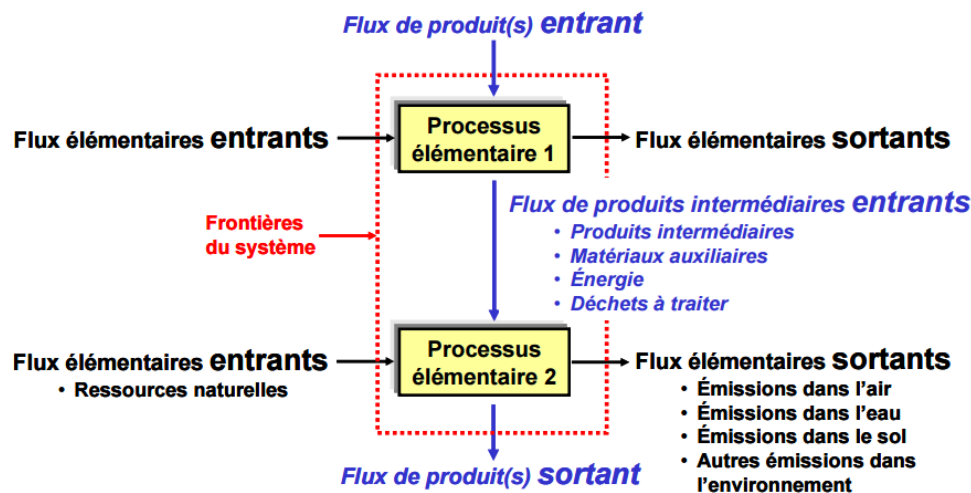


Figure IV.1 Frontières et processus élémentaires d'un système de produits [28].

L'utilisation d'un diagramme de procédés illustrant les processus élémentaires et leurs interrelations (flux de matières et d'énergie) permet le suivi des frontières du système de produits.

Selon l'ISO, dans l'idéal il convient de modéliser le système de produits de telle sorte que les entrants et les sortants à ses frontières soient des flux élémentaires. Dans de nombreux cas, il n'y a cependant ni assez de temps, ni assez de données, ni assez de ressources pour effectuer une étude aussi complète. Des décisions doivent être prises concernant les processus élémentaires et les flux élémentaires qui doivent être initialement inclus dans l'étude. L'ISO stipule également qu'il n'est pas nécessaire de quantifier des entrants et des sortants qui ne changeront pas de façon significative les conclusions globales de l'étude, elle suggère aussi

des critères pour l'inclusion des flux (p. ex. contribution au-dessus d'un certain seuil aux bilans de masse ou d'énergie ou pertinence environnementale).

La liste de tous les processus élémentaires et flux élémentaires à modéliser peut être corrigée avec l'acquisition de nouvelles informations, les décisions menant à ce raffinement des frontières du système devant être clairement présentées.

Une fois que la liste des processus élémentaires inclus dans le système de produits est complétée et afin de construire l'inventaire du système et de poursuivre avec l'évaluation des impacts potentiels, les données pertinentes concernant ces processus (c.-à-d. les entrants et les sortants) doivent être collectées. Cependant, avant de faire cette collecte, les exigences relatives à leur qualité (couverture temporelle, géographique et technologique, précision et complétude), leurs sources (spécifiques ou génériques), leur type (mesurées, calculées ou estimées), leur nature (déterministe ou probabiliste), et leur niveau d'agrégation doivent être déterminées afin de respecter les objectifs de l'étude.

2.2. Phase II de l'ACV : Analyse de l'inventaire du cycle de vie [28]

La seconde phase de l'ACV, appelée l'analyse de l'inventaire du cycle de vie (AICV), est la quantification des flux élémentaires pertinents qui traversent les frontières du système de produits.

La procédure de calcul utilisée pour compléter l'inventaire est présentée à la Figure IV.2.

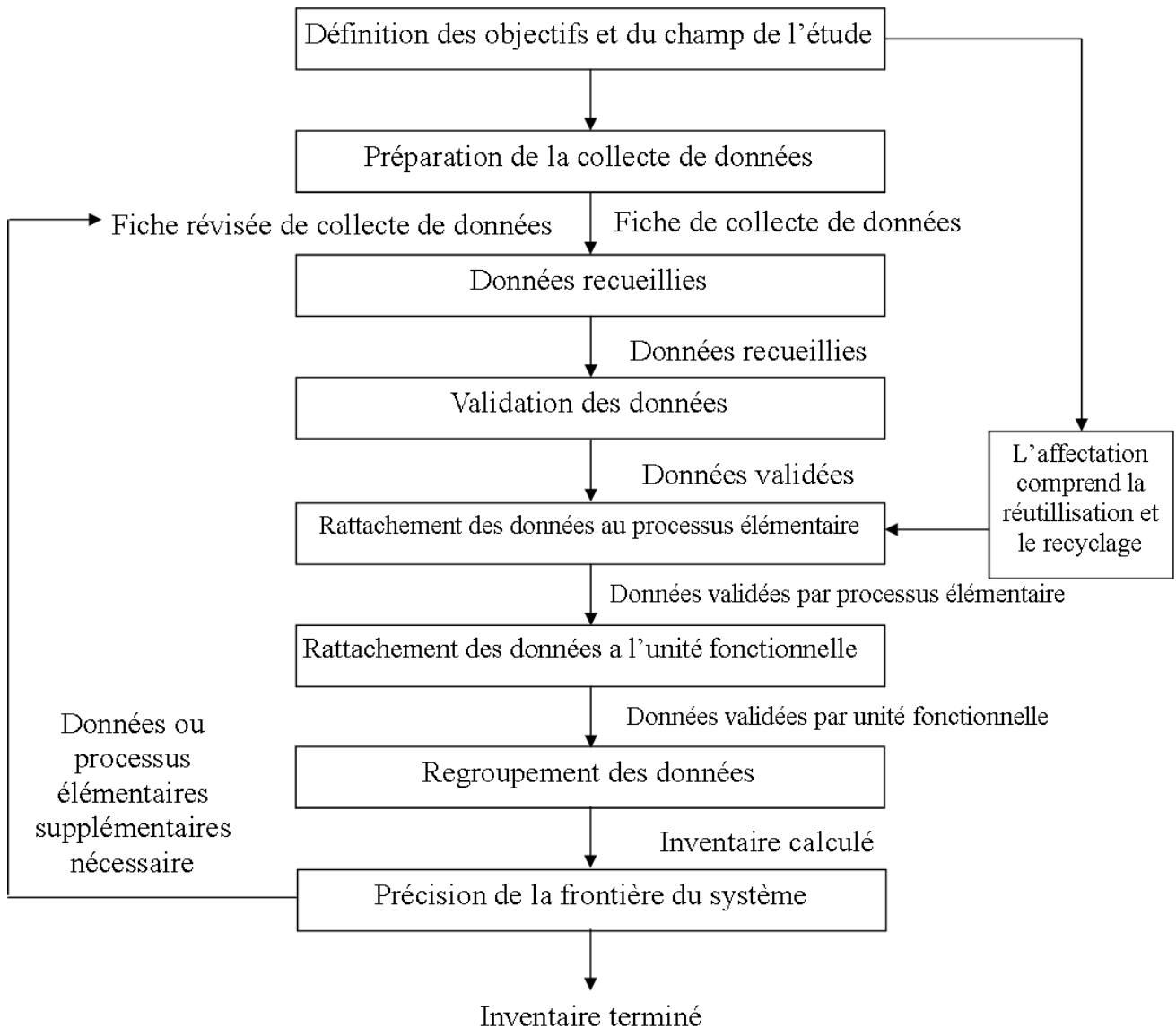


Figure IV.2: Procédure de calcul de l'inventaire [28].

2.3. Phase III de l'ACV : Évaluation des impacts du cycle de vie [28]

La troisième phase de l'ACV, appelée l'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV), est l'interprétation des résultats de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie du système de produits étudié afin d'en comprendre la signification environnementale.

L'analyse de l'inventaire permet la quantification des échanges entre le système de produits et l'environnement. Selon le champ d'étude, l'information obtenue sera plus ou moins importante (c.-à-d. des centaines de flux de ressources naturelles et d'émissions dans l'environnement peuvent être quantifiés) et son utilisation pratique peut s'avérer difficile. Durant la phase d'ÉICV, certains enjeux environnementaux, appelés catégories d'impacts, sont modélisés et des indicateurs de catégories sont utilisés pour condenser et expliquer les résultats de la phase d'inventaire.

Selon l'ISO, le cadre méthodologique de l'ÉICV présente des éléments obligatoires et des éléments optionnels (Figure IV.3).

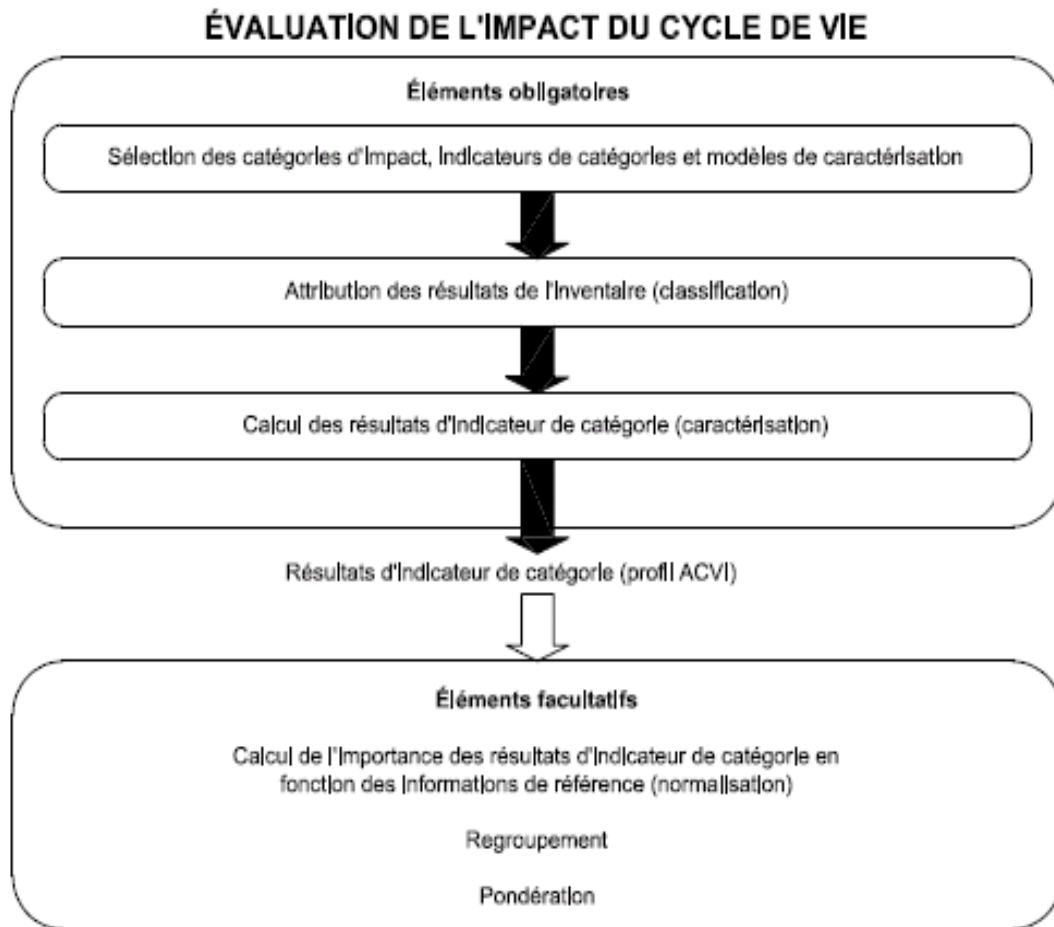


Figure IV.3: Éléments de la phase d'ÉICV [28].

Les catégories d'impacts souvent considérées en ACV sont les suivantes :

- Réchauffement global
- Appauvrissement de la couche d'ozone
- Acidification
- Eutrophisation
- Smog photochimique
- Toxicité humaine
- Écotoxicité
- Utilisation des ressources abiotiques
- Utilisation des terres
- Utilisation de l'eau

2.4. Phase IV de l'ACV : Interprétation [28]

Les objectifs de la quatrième phase de l'ACV, appelée interprétation, sont d'analyser les résultats, d'établir des conclusions, d'expliquer les limites et de fournir des recommandations en se basant sur les résultats des phases précédentes de l'étude et de rapporter les résultats de l'interprétation du cycle de vie de manière transparente de façon à respecter les exigences de l'application telles que décrites dans l'objectif et le champ de l'étude.

Idéalement, l'interprétation se fait de façon interactive avec les trois autres phases de l'ACV, avec les phases de définition de l'objectif et du champ de l'étude et d'interprétation du cycle de vie formant le cadre de l'étude et les phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation des impacts fournissant les informations relatives au système de produits.

Selon l'ISO, l'interprétation du cycle de vie comporte trois éléments :

- L'identification des points significatifs à partir des résultats des phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation des impacts en liaison avec les objectifs et le champ de l'étude.
- La vérification, qui prend en compte les contrôles de complétude, de sensibilité et de cohérence.
- les conclusions, les recommandations et la rédaction d'un rapport.

La vérification a pour objectifs d'établir et de renforcer la confiance dans les résultats de l'étude, ainsi que leur fiabilité. Le contrôle de complétude a pour objectif de garantir que toutes les informations et données pertinentes nécessaires à l'interprétation sont disponibles et complètes. Le contrôle de sensibilité a pour objectif de vérifier la fiabilité des résultats et des conclusions en déterminant s'ils sont affectés par des incertitudes dans les données et les divers choix méthodologiques (p. ex. les critères d'inclusion, les méthodes d'imputation ou les indicateurs de catégorie). Le contrôle de cohérence a pour objectif de déterminer si les hypothèses, les méthodes et les données sont cohérentes avec l'objectif et le champ de l'étude et si elles ont été appliquées de façon constante durant toute l'étude, et dans le cas d'une comparaison entre diverses alternatives, aux systèmes de produits comparés.

3. Les exigences de l'ACV [29]

Parmi les exigences notables pour la réalisation d'une analyse de cycle de vie, on peut citer l'exigence de qualité des données. Celle-ci doit être cohérente avec les objectifs de l'étude (comparaison de produit, re-conception de produit, communication, etc.).

L'autre exigence concernant l'ACV est l'exigence d'une revue critique. La revue critique est un processus selon lequel les résultats d'une ACV sont analysés par une partie externe à

l'étude mais également par les parties intéressées. La revue critique permet d'assurer la cohérence des résultats vis-à-vis des objectifs de l'étude mais aussi de leur apporter une crédibilité supplémentaire.

4. Les limites de l'ACV [29]

Bien que l'analyse de cycle de vie soit une méthode globale permettant d'évaluer les impacts d'un produit sur l'environnement, certaines limitations sont à prendre en compte. Tout d'abord, comme décrit précédemment, il ne s'agit que d'évaluer les impacts potentiels et non réels, mesurés d'un produit ou d'un service.

De plus, les résultats sont particulièrement dépendants des hypothèses choisies au début de l'étude (périmètre de l'étude, unité fonctionnelle, etc.) mais aussi de la qualité des données (disponibilité, confidentialité, complexité, etc.). De ce fait, la réalisation de ce genre d'étude requiert un niveau de connaissances et de compétences important dans le domaine.

En ce qui concerne la conception de produit, l'un des facteurs limitant de l'ACV est le volume de données nécessaire à la réalisation de l'étude. Lors du développement d'un nouveau produit, l'analyse de cycle de vie nécessite d'avoir une connaissance suffisamment avancée du produit et donc d'avoir arrêté un nombre important de choix techniques qui détermineront par la suite l'impact du produit.

Enfin, l'analyse de cycle de vie étant centrée sur l'évaluation des impacts environnementaux d'un produit, il n'est pas rare que les recommandations qui peuvent émerger de l'interprétation des résultats soient en conflit avec d'autres intérêts liés au produit tel que des considérations économiques ou sociales.

Chapitre 5 :

ACV avec

Simapro

1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

1.1. Définition des objectifs de l'étude

1.1.1. Application envisagée

L'objectif est d'évaluer les impacts environnementaux d'un biodiesel issu d'une microalgue verte nommée « *chlorella vulgaris* » avec une valorisation énergétique de la biomasse résiduelle en faisant une digestion anaérobie pour obtenir un biogaz qui va être purifié pour donner du méthane et du dioxyde de carbone; le méthane produit sera utilisé pour la production de la chaleur et le CO₂ pour la culture des microalgues, et les comparer avec les impacts environnementaux de ce même biodiesel mais sans valorisation énergétique de la biomasse résiduelle.

1.1.2 Public ciblé

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un mémoire de master pour fournir des informations qui seront divulguées au public dans l'intérêt de la recherche.

1.2. Définition du champ de l'étude

1.2.1. Le système

Notre système consiste à la production du biodiesel de 3^{ème} génération avec valorisation énergétique de la biomasse résiduelle. Les étapes qui décrivent le processus de fabrication sont les suivantes :

- La culture d'algues,
- La récolte de la biomasse et le séchage,
- L'extraction de l'huile d'algue,
- La digestion anaérobie de la biomasse résiduelle,
- la conversion de l'huile par transestérification,
- Le transport du biodiesel.

1.2.2. Fonction du produit

Le procédé envisagé a pour but la production du biodiesel qui servira de carburant.

1.2.3. L'unité fonctionnelle :

L'unité fonctionnelle est 1 tonne de biodiesel produite.

1.2.4. Frontières et limites du système

Dans le cas de cette étude, les limites des étapes de production du biodiesel sont présentées dans la figure V.1. Donc cette étude ne tient pas compte de sa distribution et de l'impact de son utilisation.

a) Limites géographiques

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

b) 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.

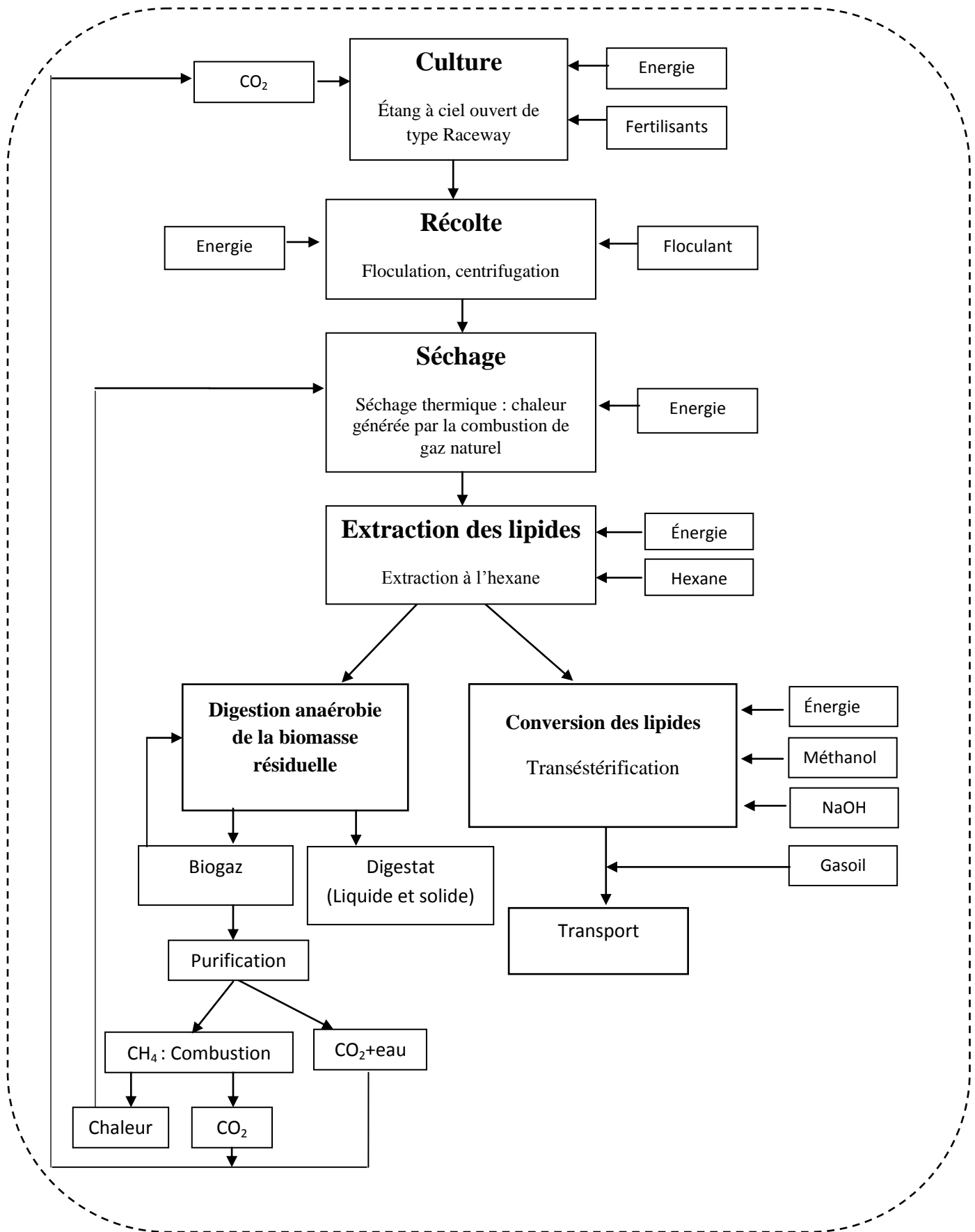


Figure V.1 : Les limites du système

2. L'inventaire du cycle de vie

2.1. Les hypothèses

- La productivité d'algues est estimée à 24 g/m²/jour [30].
- Le rendement du contenu des lipides dans la biomasse sèche est de 18%.
- Le rendement de la floculation est estimé à 72% [30].
- Le rendement de la centrifugation est estimé à 90% [30].
- Le rendement de l'extraction est estimé à 80% [30].

D'après ces hypothèses, pour avoir 1 tonne de biodiesel, il faut 11,25 tonnes d'algues soit 12 tonnes.

- Les hypothèses pour le type d'étang Raceway utilisé sont représentées sur le tableau V.1.

Tableau V.1 : Caractéristiques de l'étang de type Raceway utilisé.

Paramètres	Unités	Raceway type
Profondeur	m	0,3
Longueur	m	180
Largeur	m	20
Profondeur hydraulique	m	0,28
Surface de l'étang	ha	0,36

- La centrifugation se fait dans un décanteur centrifuge.
- Afin d'atteindre une efficacité de séchage de 90% [31] les sècheurs utilisés seront de type « Belt Dryer ». Ils sont caractérisés par une consommation d'électricité de 400Wh et une consommation de chaleur de 13,8 MJ par kg de matière séchée.
- L'huile extraite a un contenu de $2,6 \pm 0,3$ % d'acides gras libres [32]. Donc une teneur inférieure à 5% [33] ce qui implique que la réaction secondaire de saponification n'aura pas un grand impact sur la qualité de biodiesel après sa conversion. Par conséquent il n'est pas nécessaire d'avoir recours à la réaction d'estérification pour le procédé de conversion.
- Dans le procédé d'extraction la régénération du solvant « hexane » est incluse. La chaleur fournie est destinée à la distillation du mélange huile-hexane.
- La biomasse résiduelle est estimée à 6000 kg par rapport aux rendements de la floculation, de la centrifugation et du séchage.

- La digestion anaérobie est effectuée dans un digesteur cylindrique sur site. [34]
- Le Biogaz est composé de 70% de méthane et 30% de CO₂. [34]
- Le temps de rétention hydraulique (HRT) est de 46 jours pour avoir un rendement de méthanisation supérieur à 75%. [34]
- La biodégradabilité de la biomasse est de 0,56. [34]
- Une partie de ce biogaz est destinée à la production de chaleur pour le digesteur. ce gaz va être brûlé dans un bouilleur. [34]
- Le méthane produit va subir une combustion pour générer de la chaleur pour le séchage et du CO₂ pour la culture.
- La conversion de l'huile algale en biodiesel est totale, rendement de 100%, la quantité de l'huile extraite est la même que celle du biodiesel « 1 tonne ». [34]
- La distance de transport des inputs chimiques, l'huile et le biodiesel est supposée de ne dépasser 100 km.

2.2. Hypothèses des données SimaPro

- Le type de fertilisants est choisi parmi ceux disponibles sur le marché Algérien, en l'occurrence le fertilisant « Fertial » :
 - ✚ Sulfate d'ammonium (NH₄)₂ SO₄ à 21% de N (Engrais azotés simple)
 - ✚ Triple super phosphate TSP P₂O₅ à 46%
 - ✚ Sulfate de potassium K₂O à 50%
- Le CO₂ utilisé est supposé issu d'une production industrielle. En raison de l'indisponibilité des données locales nous avons utilisés des données européennes disponible sur la base de données Ecoinvent v2.
- L'électricité utilisée tient compte des données locales disponibles dans la base de données Ecoinvent v2. L'électricité est produite essentiellement à partir de gaz naturel.
- La chaleur est principalement générée par la combustion du gaz naturel.
- La méthode utilisée pour l'évaluation des impacts est « IMPACT 2002+ ».

2.3. Scénario de base : sans valorisation énergétique

2.3.1. Les limites du système considéré

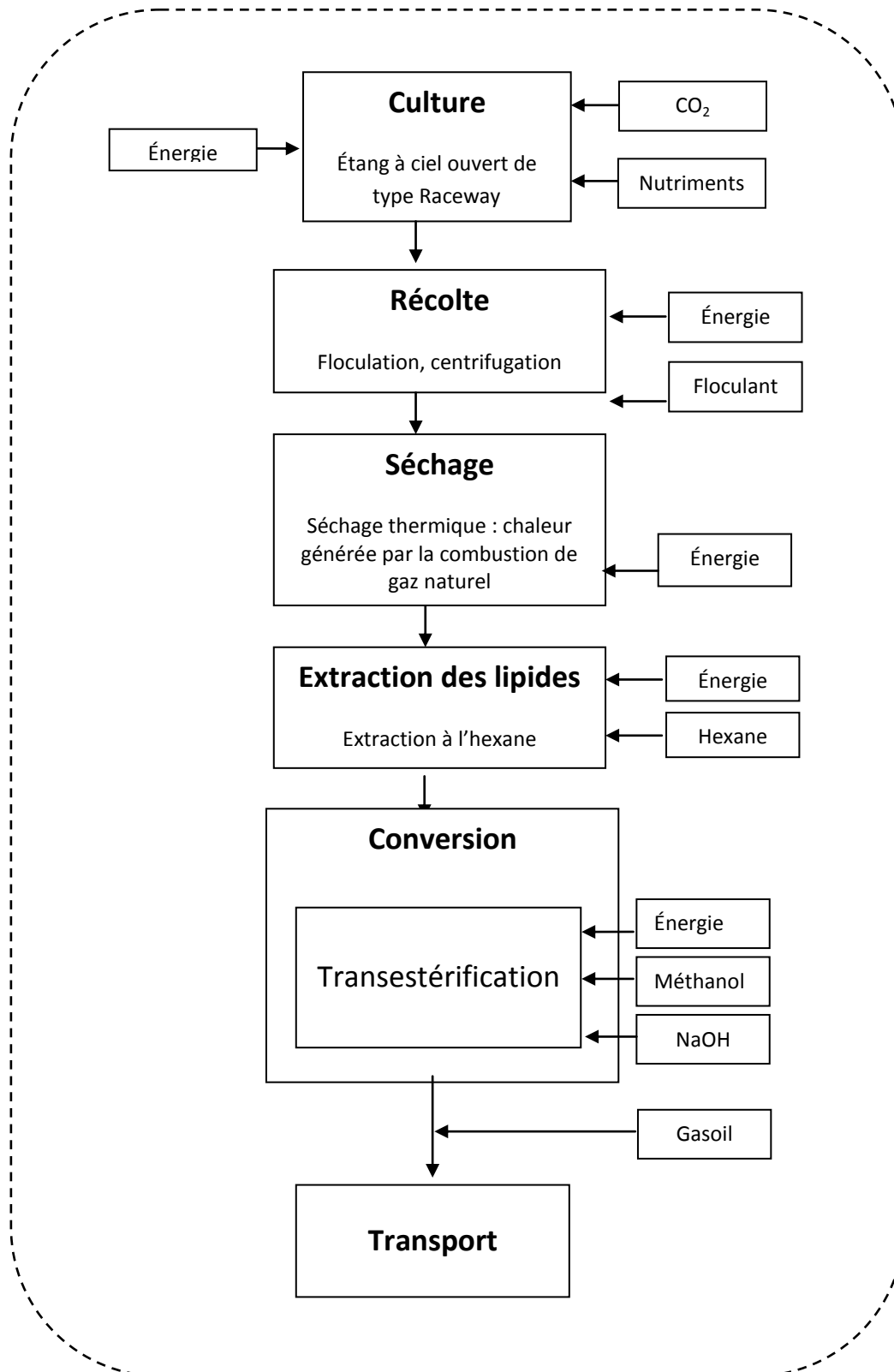


Figure V.2 : Schématisation des limites du système sans valorisation énergétique.

2.3.2. Inventaire du cycle de vie sans valorisation énergétique

L'inventaire du cycle de vie du biodiesel issu de microalgues est résumé dans le tableau V.2.

Tableau V.2 : Inventaire du cycle de vie du biodiesel issu de microalgues.

Etape	Paramètre	Donnée	Unité	Références
Culture <i>Chlorella vulgaris</i>				
Entrants chimiques	L'azote	106,2	kg	[34]
	Le phosphore	32,30	kg	[34]
	Le potassium	13,8	kg	[34]
	Le CO ₂	10400	kg	[31]
Energie	L'énergie pour l'injection du CO ₂	312	kWh	[34]
	L'énergie pour l'agitation	2400	kWh	[34]
Transport	Pour une distance de 100 km	1055	tkm	
Récolte de la biomasse algale				
Inputs chimiques	Floculant (sulfate d'Aluminium)	260	kg	[35]
Energie	Floculation	0,5	GJ	
	Centrifugation	504	kWh	[34]
Transport	Pour une distance de 100 km	26	tkm	
Extraction de l'huile algale				
Inputs chimiques pour l'extraction	Hexane	3	kg	[35]
Transport	Pour une distance de 100 km	0,3	tkm	
Energie pour l'extraction	Chaleur	1,7	GJ	[35]
	Electricité	0,2	GJ	[35]
Energie pour le séchage	Chaleur	81,8	GJ	[31]
	Electricité	8,52	GJ	[31]
Conversion de l'huile en biodiesel				
Entrants chimiques	Méthanol	110	kg	[35]
	NaOH	10,5	kg	[36]
Energie	Chaleur	1,6	GJ	[35]
	Electricité	0,2	GJ	[36]
Outputs	Biodiesel	1	tonne	[35]
Transport	Pour une distance de 100 km	112,05	tkm	[36]

2.4. Inventaire du cycle de vie avec valorisation énergétique

Tableau V.3 : Inventaire du cycle de vie du biodiesel à partir de microalgues.

Etape	Paramètre	Donnée	Unité	Références
Culture Chlorella vulgaris				
Entrants chimiques	L'azote	106,2	kg	[34]
	Le phosphore	32,3	kg	[34]
	Le potassium	13,8	kg	[34]
	Le CO ₂	7219	kg	[31]
Energie	L'énergie pour l'injection du CO ₂	312	kWh	[34]
	L'énergie pour l'agitation	2400	kWh	[34]
Transport	Pour une distance de 100 km	737,13	tkm	
Récolte de la biomasse algale				
Inputs chimiques	Floculant (sulfate d'Aluminium)	260	kg	[35]
Energie	Floculation	0.5	GJ	
	Centrifugation	504	kWh	[34]
Transport	Pour une distance de 100 km	26	tkm	
Extraction de l'huile algale				
Inputs chimiques	Hexane	3	kg	[35]
Transport	Pour une distance de 100 km	0,3	ktm	
Energie pour l'extraction	Chaleur	1.7	GJ	[35]
	Electricité	0.2	GJ	[35]
Energie pour le séchage	Chaleur	38.6	GJ	[31] - la chaleur produite par la combustion du biométhane
	Electricité	8.52	GJ	[31]

Digestion anaérobie de la biomasse résiduelle				
Energie	Chaleur	-14.69	GJ	[34]
	Electricité (agitation)	2.33	GJ	[34]
Outputs	Biogaz	2250	m ³	

Purification du biogaz				
Entrants chimiques	Eau	402	kg	[34]
Energie	Electricité	1.79	GJ	[34]
Outputs	Biométhane	809.1	kg	[34]
	CO ₂	956.2	kg	[34]

Combustion du biométhane				
Entrants chimiques	Méthane	809.1	kg	[34]
Outputs	Energie	43.2	Gj	[34]
	CO ₂	2225	kg	[34]

Conversion de l'huile en biodiesel				
Entrants chimiques	Méthanol	110	kg	[35]
	NaOH	10.5	kg	[36]
Energie	Chaleur	1.6	GJ	[35]
	Electricité	0.2	GJ	[36]
Outputs	Biodiesel	1	tonne	
Transport	Pour une distance de 100 km	112,05	tkm	

La chaleur produite par la combustion du méthane (43.2 GJ), va être utilisée pour le séchage. Chaque produit ou énergie qui sera réutilisé dans le procédé sera introduite dans le logiciel avec un signe (-).

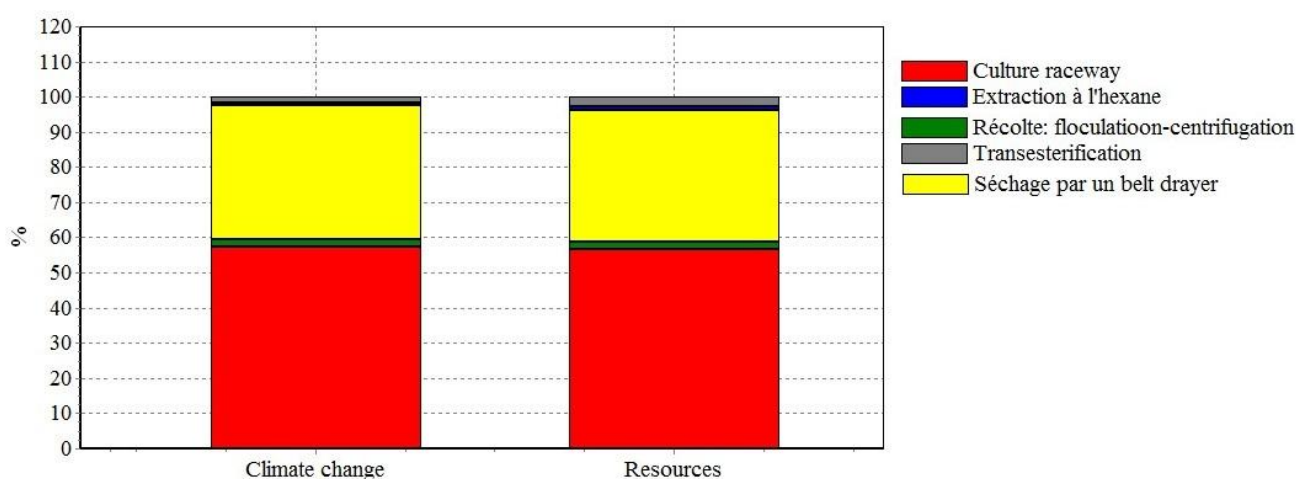
La valorisation du digestat comme engrais n'a pas été prise en considération à cause de l'indisponibilité des données concernant la composition du digestat.

3. Etude d'impact

L'étude d'impact s'effectue en se basant sur deux catégories de dommages qui sont : le changement climatique et la consommation d'énergie primaire.

3.1. Scénario de base

La figure V.3 montre la contribution de chaque étape du procédé de production du biodiesel sans valorisation énergétique de la biomasse résiduelle.



Analyse de 1 p 'acv', méthode: IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+ / étude de dommages

Figure V.3 : Contribution des différentes étapes sur les deux catégories de dommage : changement climatique et consommation d'énergie primaire pour le scénario de base

Le tableau V.4 montre la contribution des processus élémentaires dans ce scénario

Tableau V.4 : Contribution des processus élémentaires pour les deux catégories de dommage : changement climatique et consommation d'énergie primaire pour le scénario de base

Paramètre	Changement climatique (kg CO ₂ eq)	Consommation d'énergie primaire (GJ)
CO ₂	6630	116
Electricité	1270	21
Chaleur	4950	86.8

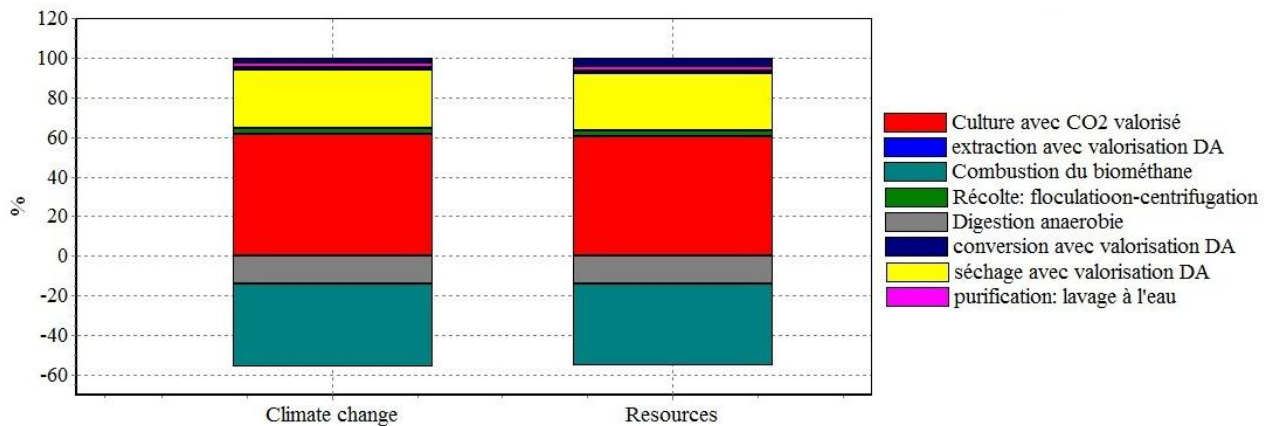
Transport	386	6.58
Sulfate d'ammonium	286	2.43
Triple super phosphate	65,3	1.09
Sulfate de potassium	20,4	0.35
Floculant	126	2.43
Hexane	2,62	0.19
Méthanol	73,6	4.32
NaOH	8,87	0.20

A partir de la figure V.3 et le tableau V.4, nous constatons que l'étape de culture à cause du CO₂ industriel séquestré par les microalgues et l'étape de séchage qui utilise de la chaleur par combustion du gaz naturel sont les étapes qui génèrent le plus d'impact.

Il s'avère de ce fait que les processus élémentaires qui doivent être optimisées sont le CO₂ industriel et chaleur générée par la combustion de gaz naturel.

3.2. Scénario avec la valorisation énergétique

La figure V.4 et le tableau V.5 montrent la contribution de chaque étape du procédé de production du biodiesel avec la valorisation énergétique de la biomasse résiduelle.



Analyse de 1 p 'ACV avec digestion anaérobie', méthode: IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+ / étude de dommages

Figure V.4 : Contribution des différentes étapes sur les deux catégories de dommage : changement climatique et consommation d'énergie primaire

Tableau V.5 : Emission (kg CO₂ eq) et consommation d'énergie primaire (GJ) pour chaque étape du système

Catégories de dommage	Total	Culture	Récolte	Séchage	Extraction	Digestion anaérobie	Purification	Combustion du biométhane	Conversion
Changement climatique (kg CO ₂ eq)	4,15.10 ³	5,80.10 ³	2,74.10 ²	2,76.10 ³	1,14.10 ²	-1,32.10 ³	2,31.10 ²	-3,93.10 ³	2,24.10 ²
Energie primaire (GJ)	74,7	101,04	4,88	47,90	2,12	-23,33	4,04	-68,92	6,97

D'après le tableau V.4, nous constatons que :

- Le procédé émet 4,15.10³ kg de CO₂ eq et consomme 74,7 GJ d'énergie primaire,
- La digestion anaérobie et la combustion ont un impact positif car elles apportent de la chaleur et du CO₂ pour le système,
- La culture et le séchage restent les étapes qui ont le plus d'impact.

La contribution des processus élémentaires dans le procédé avec valorisation pour les deux catégories d'impact est résumée dans le tableau V.5

Tableau V.6 : Contribution des processus élémentaires pour les deux catégories de dommage : changement climatique et consommation d'énergie primaire

Processus \ Catégorie d'impact	Changement climatique (kg CO ₂ eq)	Consommation d'énergie primaire (GJ)
Total	4,15.10 ³	74,7
CO₂ industriel	2,57.10 ³	45,1
Electricité générée par le gaz naturel en Algérie	1,52.10 ³	25,2
Sulfate d'ammonium	286	5,1
Le transport : camion de 3,5 à 16 t	283	4,8
Sulfate d'aluminium	126	4,3
L'eau	123	2,4
Méthanol industriel	73,6	2,2
Triple superphosphate	65,3	1,1
Sulfate de potassium	20,4	0,35
NaOH industriel	8,87	0,20
Hexane industriel	2,62	0,19
La chaleur fournie par le gaz naturel	-931	-16,3

Certes la valorisation de la biomasse ne couvre pas toute la chaleur nécessaire pour le procédé mais elle fournit plus de sa moitié ce qui fait un bilan de chaleur négatif c'est-à-dire un impact positif.

Le CO₂ a toujours le plus grand impact.

3.3. Calcul du ratio énergétique

Le tableau V.7 donne le bilan énergétique du cycle de vie de production du biodiesel avec et sans valorisation énergétique et mentionne le ratio énergétique ou rendement de production de biodiesel pour chaque scénario calculé par le biais de la formule ci-dessous.

$$\text{Ratio énergétique} = \frac{\text{Energie output}}{\text{Energie input}}$$

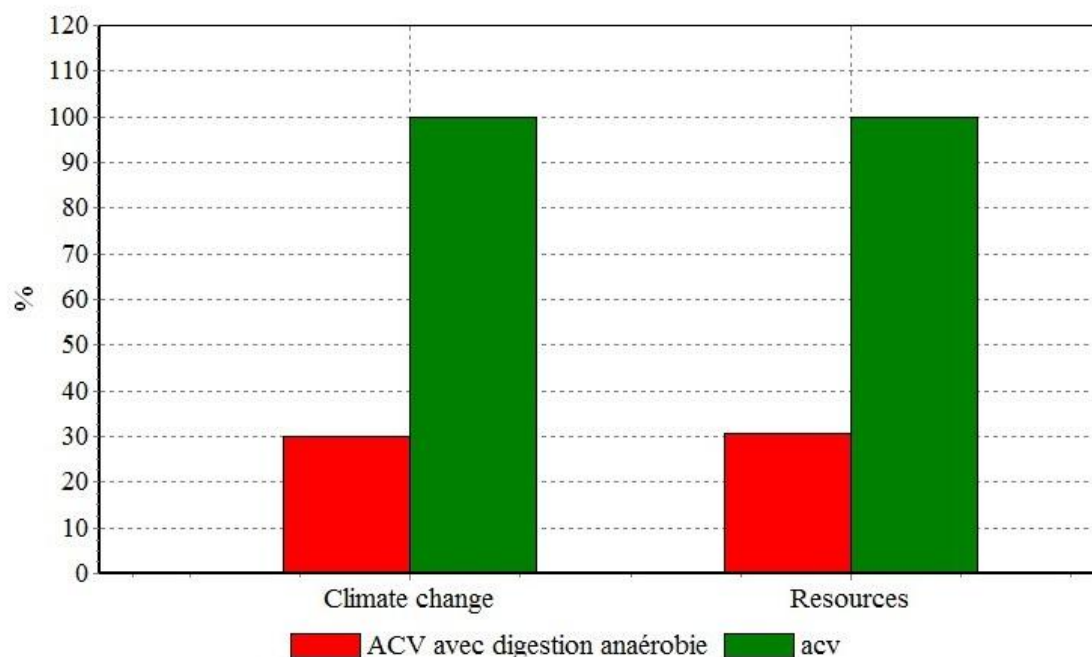
Tableau V.7 : Bilan énergétique récapitulatif du cycle de vie de production du biodiesel (GJ) sans et avec valorisation.

Etape	Processus	Energie (GJ)
Energie pour la culture	L'énergie pour l'injection du CO ₂	1,12
	L'énergie pour l'agitation	8,64
Energie pour la récolte	Floculation	0,5
	Centrifugation	1,8
Energie pour le séchage sans valorisation	Chaleur	81,8
	Electricité	8,52
Energie pour le séchage avec valorisation	Chaleur	38,6
	Electricité	8,52
Energie pour l'extraction	Chaleur	1,7
	Electricité	0,2
Energie pour la conversion	Chaleur	1,6
	Electricité	0,2
Total énergie input sans valorisation	Total	106,08
Total énergie input avec valorisation	Total	67,48
Energie output (tableau II.2)	1 tonne de Biodiesel	38,4
Ratio énergétique sans valorisation énergétique		0,36
Ratio énergétique avec valorisation énergétique		0,57

Nous remarquons que malgré que le ratio énergétique a été amélioré avec la valorisation énergétique, le procédé n'est toujours pas rentable.

4. Comparaison avec le scénario de base

La figure V.5 et le tableau V.8 montre les résultats de la comparaison entre les deux scénarios



Comparaison de 1 p 'ACV avec digestion anaérobie' avec 1 p 'acv', méthode: IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+ / étude de dommages

Figure V.5 : Comparaison entre les deux scénarios : avec et sans valorisation énergétique

Tableau V.8 : Comparaison entre les deux scénarios : avec et sans valorisation énergétique

Catégorie de dommages	ACV avec digestion anaérobie	ACV sans valorisation énergétique
Changement climatique (kg CO ₂ eq)	4147,98	13822,41
Energie primaire (GJ)	74,71	244,27

Nous constatons une réduction des impacts après la valorisation énergétique de la biomasse résiduelle.

Nous avons une réduction de 70% des impacts pour les deux catégories de dommage.

Conclusion générale

De nombreux progrès ont été faits depuis que la recherche sur les micro-algues s'est intensifiée. Dans le domaine des biocarburants, des étapes ont été franchies, mais ce domaine est tellement étendu et peu connu que de nombreux efforts en recherche et développement restent à fournir. 2020 et 2030 seront des étapes clés pour connaître la viabilité ou non de cette 3^{ème} génération de biocarburants.

Ce projet de fin d'études est une contribution à la recherche. Il a pour but de faire l'analyse du cycle de vie. Ces analyses consistent à prendre en compte et à évaluer au mieux les bilans énergétiques ainsi que les impacts environnementaux globaux dans le but de parvenir à les améliorer

Nous avons pu faire l'analyse du cycle de vie du biodiesel à partir de microalgues avec une valorisation énergétique de la biomasse résiduelle. Les résultats montrent que la valorisation énergétique diminue nettement l'impact de la production du biodiesel.

Pour les données utilisées, nous avons choisi les processus au moindre impact environnemental. Toutefois, il ne s'agit que d'une modélisation faite dans l'unique intérêt de contribuer à la recherche scientifique dans notre pays et d'aider à la prise de décision au cas où la filière du biodiesel de 3^{ème} génération serait envisagée dans le mix énergétique de l'Algérie.

Actuellement, les biocarburants à partir de microalgues restent cantonnés dans le stade recherche et leur technologie n'est pas encore maîtrisée à grande échelle. Toutefois cette filière est très prometteuse en raison des rendements élevés attendus.

Cependant, pour être réaliste, le plus rentable maintenant pour l'Algérie serait d'investir pour des installations pilotes dans la filière des biocarburants de 2^{ème} génération vu la disponibilité de la matière première, tout en étudiant le potentiel des biocarburants à partir des microalgues.

Perspectives et recommandations

La filière de production du biodiesel à partir de microalgues est très prometteuse en termes de réduction d'impact sur le changement climatique, de préservation des ressources non renouvelables et de contribution à la sécurité énergétique. Pour cela, il faut maîtriser l'efficacité énergétique des différentes phases, notamment la culture des microalgues et leur séchage. C'est pourquoi nous proposons les scénarios suivants :

- La culture des microalgues en utilisant du CO₂ provenant de déchets industriels par exemple : CO₂ à partir des émissions des cimenteries ou des centrales électriques en installant les étangs à côté de ces usines tout en allant vers une stratégie de symbiose industrielle,
- Chercher et développer d'autres techniques de séchage comme le séchage solaire,
- valoriser le digestat comme engrais.

Cependant, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude restent toujours préliminaires car nécessitant d'être approfondis par la prise en considération d'autres facteurs socio-économiques.

Références bibliographiques

- [1]. Ana Rengel. Energy and environmental analyses of a bioreactor for microalgae culture for energy production. Chemical and Process Engineering. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010.
- [2]. Rayen Filali. Estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique de CO₂. Thèse de doctorat. Sup_elec, 2012.
- [3]. Lydia RICHEZ. Algocarburants : Modes de production et faisabilité. These pour le diplôme d'état de docteur en pharmacie. Université de POITIERS. Faculté de Médecine et de Pharmacie. 2016.
- [4]. Julie Person, Livre turquoise. *Person et al, 2011*. D'après le colloque : Algues, filières du futur! Accessible sur http://www.adebiotech.org/home/img/algues/LIVRE_TURQUOISE-V.screen.pdf
- [5]. Mata, Martins, Caetano. Microalgae for biodiesel production and others applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2009. 14 (2010) 217–232
- [6]. L'entreprise GrDF «Gaz réseau Distribution France». Biométhane de microalgues – évaluation du potentiel de production en France aux horizons 2020 et 2050 – rapport final – janvier 2013.
- [7]. Anoop Singh , Stig Irving Olsen. A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. *Quantitative Sustainability Assessment*, Department of Management Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark. *Applied Energy* 88. 2011.
- [8]. Pierre Collet, Arnaud Hélias, Laurent Lardon, Jean-Philippe Steyer , Olivier Bernard. Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels. *Applied Energy* 154. 2015. pp.1089-1102
- [9]. Farooq Ahmad, Amin U. Khan and Abdullah Yasar. Transesterification of oil extracted from different species of algae for biodiesel production. *African Journal of Environmental Science and Technology*, Vol.7(6)p.358-364, June 2013 - DOI:10.5897/AJEST12.167
- [10]. Isabelle Cantin. La production de biodiesel à partir des microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env). Université de sherbrooke. 2010.
- [11]. ZHU J, RONG J, ZONG B. Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel. *Chin J Catal*. Volume 34, Issue 1, January 2013, Pages 80–100

- [12]. Chisty. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*, Volume 25, Issue 3, May–June 2007, Pages 294–306
- [13]. L. Gouveta, *Microalgae as a Feedstock for Biofuels*, London, Springer 2011.
- [14]. María del Pilar Rodríguez, production de biodiesel à partir d'une huile modèle de microalgues par voie de catalyse enzymatique hétérogène, Mémoire de maîtrise, [Http://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/111/Rodriguez_Maria_del_Pilar_msc_2014.pdf.pdf?Sequence=6](http://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/111/Rodriguez_Maria_del_Pilar_msc_2014.pdf.pdf?Sequence=6)
- [15]. Nirupama Mallick, Shovon Mandal, Amit Kumar Singh, Moumita Bishai and Archana Dash. Green microalga *Chlorella vulgaris* as a potential feedstock for biodiesel. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Volume 87, Issue 1, pages 137–145, January 2012 - DOI: 10.1002/jctb.2694
- [16]. Markou G, Nerantzis E. Microalgae for high-value compounds and biofuels production: A review with focus on cultivation under stress conditions. *Biotechnology advances*, vol 31, 2013.
- [17]. Mesbahi Dalila. La Transestérification Hétérogène De L'huile De Tournesol Sous Alumine : Production Du Biodiesel. Mémoire De Magister. L'université Abou Bekr Belkaid De Tlemcen. Faculte Des Sciences. Departement De Chimie. 2012.
- [18]. Anders S Carlsson, Jan B Van Beilen, Ralf Möller And David Clayton, micro- and macro-algae: utility for industrial applications, université de york, 2007. Disponible sur: http://www.biofuelstp.eu/downloads/epobio_aquatic_report.pdf
- [19]. BIOTECHNOLOGIE Biocarburant algal, biotechnologie industrielle documentation, Parlons sciences. 2013. Disponible sur le site : <http://explorecuriocite.org/portals/2/themes/biotechnology/Biocarburant-algal.pdf>
- [20]. Jin Bai ZHANG. Procèdè de traitement anaerobie des boues et de valorisation du biogaz. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Industries Chimiques. Laboratoire Réactions et Génie des Procédés. 2011.
- [21]. Henri Prévot. La récupération de l'énergie issue du traitement des déchets. Rapport du conseil générale des Mines 2000. Disponible sur le site : <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/014000625.pdf>
- [22]. Jonathan HESS. Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation. Thèse de Doctorat. Université de Nice. Discipline : Automatique, Traitement du Signal et des Images. 2007.
- [23]. E.P. S~mchez Hern~indez and L. Travieso C6rdoba, Anaerobic digestion of *Chlorella vulgaris* for energy production. Thèse de doctorat, Elsevier Science.1993

- [24]. L'entreprise GrDF et ADAME. Principes et procédés d'épuration du biométhane pour l'injection dans les réseaux de gaz naturel Phase : Faisabilité du projet d'injection Etape : Considérations générales. 2011.
- [25]. AEAG. La digestion anaérobie des boues urbaines, état des lieux, état de l'art. Toulouse, Agence de l'Eau Adour Garonne, pp. 3. 2001.
- [26]. Bonnier S. 2008. Etat de la valorisation du biogaz sur site de station d'épuration en France et en Europe. Synthèses techniques en gestion de l'eau, AgroParisTech. 2008.
- [27]. Wauthelet M. Traitement anaérobie des boues et valorisation du biogaz. Séminaire International sur la réutilisation des eaux usées traitées et des sous-produits de l'épuration, Tunis. 2003.
- [28]. Thomas DANDRES. développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie conséquentielle prospective macroscopique : évaluation d'une politique de bioénergie dans l'union européenne à l'horizon 2025. Ecole polytechnique de montréal. Département de génie chimique. 2012.
- [29]. OUTILS D'ECO-CONCEPTION - Analyse de Cycle de vie Juillet 26, 2014. Disponible sur le site : <http://eco3e.eu/boite-a-outils/acv>
- [30]. Collet. P, Arnaud Hélias, Laurent Lardon, Jean-Philippe Steyer , Olivier Bernard Recommendations For Life Cycle Assessment Of Algal Fuels Applied Energy , vol. 154, issue C, pages 1089-1102 1089–1102. 2015
- [31]. Laurent Lardon Life-Cycle Assessment Of Biodiesel Production From Microalgae INRA, UR50 Laboratoire De Biotechnologie De l'Environnement, France Policy Analysis 2009.
- [32]. Farooq Ahmad, Transesterification Of Oil Extracted From Different Species Of Algae For Biodiesel Production, Gc University, Sustainable Development Study Centre, Lahore, Pakistan, 2013.
- [33]. Jon Van Gerpen, Biodiesel Processing And Production, University Of Idaho, Moscow, Fuel Processing Technology 86 (2005) 1097– 1107.
- [34]. Collet. P Life-Cycle Assessment Of Microalgae Culture Coupled To Biogas Production Bioresource Technology, 2011.
- [35]. Anna L. Stephenson, Life-Cycle Assessment Of Potential Algal Biodiesel Production In The United Kingdom: A Comparison Of Raceways And Air-Lift Tubular Bioreactors Energy Fuels 2010, 24, 4062–4077.
- [36]. Gnansounou. E Comparative Life Cycle Assessment Of Biodiesel From Algae And Jatropa: A Case Study Of India, Bioresource Technology 150 (2013) 429–437