

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



**LAVALEF**

Département Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des énergies fossiles

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

Chourouk NAIT SAIDI

Nourelhouda BAKHTA

Sous la direction de Mme Faroudja MOHELLEBI Professeur

et 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 Toudert AHMED ZAID	Professeur	ENP
Examineurs	Mr Chems Eddine CHITOUR	Professeur	ENP
	Mr Ammar SELATNIA	Professeur	ENP
Invité	Mr Mohamed AMOURI	Attaché de recherche	CDER

# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

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

*Mes chers frères : Nada, Wiam, et Mohamed Islem, pour leur amour et leur soutien. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma grande gratitude.*

*Mes très chers amis et camarades : Massi, Hamza, Rabia, Yasmine, Naziha, Imene, Semra, Bouchra, Kamel, Abir, Dalal, Fatima, Islem, Zak, Romaiissa, Wahiba, Anfel, Asma et Selma. Des amis que je n'oublierai jamais, merci d'avoir été présents, merci pour votre soutien, merci pour vos encouragements et merci pour les merveilleux moments passés ensemble, je vous adore.*

*A toute ma famille,*

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

*Chourouk Nait Saïdi*

# *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.*

*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 sœurs « Halima, 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, nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements pour toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Nous tenons tout d'abord 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.

Nous remercions également nos encadreurs Pr Toudert AHMED ZAID et Pr Faroudja MOHELLEBI pour nous avoir encadrées, orientées, aidées, conseillées et pour tout le temps qu'ils nous ont consacré.

Nous remercions chaque membre du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail. Que Dr Afia MEFTI soit remerciée pour avoir accepté de présider le jury. Nous exprimons toute notre 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 nous avons choisi d'effectuer ce travail, c'est avant tout grâce à vous, à vos conseils et à votre vision du futur.

Nous présentons nos sincères remerciements à nos professeurs Pr El Hadi BENYOUSSEF et Dr Fairouz KIES pour leurs encouragements, conseil et soutien moral, ainsi qu'à tous nos enseignants du département Génie Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique, merci de nous avoir appris le nécessaire de la formation, de nous avoir toujours guidées et soutenues, car sans vous nous ne serions jamais arrivées à réaliser ce travail.

## ملخص : تحليل دورة حياة إنتاج الديزل الحيوي المستمد من أنواع غير غذائية

إن مشاكل نفاذ الموارد الطاقوية الأحفورية والإحتباس الحراري حثت العلماء على بحث بدائل لاستبدال الوقود الأحفوري بالوقود الحيوي. لكن على الرغم من أن الجيل الأول والجيل الثاني للوقود الحيوي تحدُّ من انبعاثات الغازات المسببة للإحتباس الحراري. إلا أن هذه التكنولوجيا يمكن أن تؤدي إلى آثار سلبية على البيئة الناجمة على سبيل المثال من استخدام المبيدات والأسمدة، كما يمكنها أن تنافس زراعة المحاصيل الغذائية. ولهذا تبدو الطحالب وسيلة بديلة لإنتاج الوقود الحيوي لارتفاع نسبة الدهون بها. لكن رغم هذا لا يزال غير واضح ما إذا كان إنتاج وقود الديزل الحيوي محفرا للحد من الآثار السلبية على البيئة ولذلك يستوجب علينا دراسة مراحل إنتاجه لتحديد ما يمكن تحسينه وتعديله. في هذه الدراسة سنقترح تحليلا للآثار السلبية المحتملة على البيئة لإنتاج الديزل الحيوي مع اقتراح سيناريو لتثمين الكتلة الحيوية المتبقية.

**الكلمات الدالة : طحالب، آثار بيئية سلبية، الديزل الحيوي، تحليل دورة الحياة، وقود حيوي.**

### **ABSTRACT Life Cycle Assessment of Biodiesel Production from non-food species**

During the past ten years, fossil fuel depletion and global warming issues have strongly motivated research on fuel production from biomass. Even if, first and second generation biofuel can represent an improvement in terms of emissions of fossil CO<sub>2</sub>, such a technology can also induce negative environmental impacts and can also create a competition for land use with food crops. That is why microalgae seem to be an attractive way to produce biofuel due to their ability to accumulate lipids but it is still unclear whether the production of biodiesel is environmentally interesting and which transformation steps need further adjustment and optimization. In this study's project, we provide an analysis of the potential environmental impacts of biodiesel production from microalgae with a scenario of residual biomass valorization to reduce the impacts of high energy use phases.

**Key words: Biofuels, LCA, microalgae, biodiesel, environmental impacts.**

### **RÉSUMÉ Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires**

Au cours des dix dernières années, l'épuisement des ressources fossiles et les problèmes du réchauffement climatique ont fortement motivé les scientifiques pour la recherche de nouvelles alternatives de carburant à partir de la biomasse. Bien que les biocarburants de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> génération puissent contribuer à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, une telle technologie peut également induire des impacts négatifs sur l'environnement et peut créer une concurrence dans l'utilisation des terres agricoles. Les microalgues semblent par contre être une alternative pour produire des biocarburants en raison de leur fort rendement en lipides. Mais, il est encore difficile de savoir si la production du biodiesel est durable et avantageuse pour l'environnement. C'est pourquoi, il est nécessaire de définir les étapes de production qui doivent être ajustées et optimisées. Dans ce projet de fin d'études, nous proposons une analyse d'impacts environnementaux potentiels de la production du biodiesel à partir de microalgues avec un scénario de valorisation de la biomasse résiduelle afin de minimiser les impacts des phases les plus énergivores.

**Mots clés : Biocarburants, ACV, Microalgue, Biodiesel, impacts environnementaux.**

# Table des matières

Liste des tableaux .....	10
Liste des figures .....	12
Liste des abréviations .....	15
Introduction générale.....	16
Chapitre I Analyse du cycle de vie.....	17
Introduction .....	17
1. Définition de L'ACV .....	18
2. Références normatives (série ISO 14040).....	19
3. Historique de l'ACV .....	20
4. Applications et utilisations de l'ACV .....	21
5. Les principes de la méthode ACV.....	21
5. 1. Approche fonctionnelle .....	21
5. 2. Approche cycle de vie .....	22
5. 3. Approche multicritères .....	22
5. 4. « Transferts de pollution » et « Normation » .....	22
6. Les différentes phases de l'ACV : (Methodologie normalisée).....	24
6. 1. Définition des objectifs et du champ de l'ACV .....	24
6. 1.1. Définition de l'objectif de l'étude .....	24
6. 1.2. Définition du champ de l'étude .....	24
6. 2. Définition de la fonction du système.....	25
6. 2. 1. Définition de l'unité fonctionnelle et flux de référence .....	25
6. 2. 2. Définition du système.....	25
6. 2. 3. Définition des limites du système .....	26
6. 2. 4. Processus à considérer.....	26
6. 3. Inventaire des émissions et des extractions.....	27
6. 4. Evaluation de l'impact du cycle de vie .....	29
6. 4. 1. Méthodes d'analyse de l'impact.....	29
6. 4. 2. Les étapes de l'analyse de l'impact.....	30
6. 5. Interprétation .....	33
7. Les limites de l'ACV.....	34
Conclusion.....	34
Chapitre II Les biocarburants .....	35
Introduction .....	35

1.	Définition d'un biocarburant.....	36
2.	Intérêt des biocarburants .....	36
3.	Classification des biocarburants.....	38
3. 1.	Les biocarburants de 1ère génération.....	38
3. 2.	Les biocarburants de 2ème génération .....	38
3. 3.	Les biocarburants de 3ème génération .....	39
4.	Les types de biocarburants .....	39
4. 1.	Le Biodiesel.....	39
4. 2.	L'Ethanol ou le Bioéthanol .....	39
4. 3.	Le Biogaz .....	40
5.	Méthodes d'extraction des biocarburants.....	40
5. 1.	La voie Thermochimique .....	40
a.	La Gazéification .....	40
b.	La Pyrolyse .....	41
c.	La Méthanisation .....	41
5. 2.	Voies chimiques .....	41
a.	L'hydrolyse enzymatique .....	41
b.	La fermentation.....	41
c.	La transestérification .....	42
	Conclusion.....	44
	Chapitre III Les microalgues.....	45
	Introduction .....	45
1.	Définition des algues .....	46
2.	Les microalgues .....	46
3.	Classification des microalgues.....	47
4.	Caractéristiques et avantages des microalgues .....	47
4.1.	Synthèse des lipides.....	47
4.2.	La fixation du CO <sub>2</sub> .....	47
5.	<i>Chlorella vulgaris</i> .....	48
5.1.	Définition.....	48
5.2.	Composition.....	49
6.	Paramètres de croissance des microalgues .....	50
6.1.	La lumière.....	50
6.3.	Le CO <sub>2</sub> et le pH .....	51
6.4.	La température .....	51
6.5.	Les nutriments .....	52

a.	Source d'azote .....	52
b.	Source de phosphore.....	52
	Conclusion.....	52
Chapitre IV Production du Biodiesel à partir de microalgues .....		53
1.	Description du cycle de production du biocarburant à partir d'algues.....	54
2.	La sélection des algues .....	54
3.	La culture d'algues .....	55
3.1.	Les étangs (Bassins) à ciel ouvert de type raceway .....	55
3.2.	Les photobioréacteurs .....	56
4.	La récolte des microalgues .....	57
4.1.	La floculation .....	58
4.2.	La sédimentation .....	58
4.3.	La centrifugation .....	58
5.	Le séchage des microalgues .....	58
6.	L'extraction des lipides .....	59
6.1.	L'extraction par solvant .....	60
6.2.	Le pressage mécanique.....	60
6.3.	L'extraction au CO <sub>2</sub> supercritique .....	60
6.4.	Les méthodes non conventionnelles .....	60
7.	La conversion du biodiesel .....	61
8.	Les avantages du biodiesel obtenu à partir de microalgues.....	63
	Conclusion.....	63
Chapitre V ACV de la production du Biodiesel à partir de microalgues .....		64
1.	Définition des objectifs et du champ de l'étude .....	65
1.1.	Définition des objectifs de l'étude.....	65
1.1.1.	Application envisagée.....	65
1.1.2.	Public ciblé .....	65
1.2.	Définition du champ de l'étude .....	65
1.2.1.	Le système .....	65
1.2.2.	Fonction du produit .....	65
1.2.3.	L'unité fonctionnelle .....	65
1.2.4.	Frontières et limites du système .....	65
2.	Les hypothèses.....	67
2.1.	Hypothèses de l'inventaire .....	67
2.2.	Hypothèses des données Sima Pro .....	68
3.	Inventaire du cycle de vie .....	68



4.	Arborescence du cycle de production du Biodiesel .....	70
5.	Etude d'impact.....	70
5.1.	Etude d'impact sur le changement climatique.....	70
5.1.1.	Bilan des émissions du CO <sub>2</sub> eq sur le cycle de vie de production du biodiesel.....	70
5.1.2.	Contribution par étape de production durant le cycle de vie.....	71
a.	Culture d'algues.....	71
b.	Récolte d'algues .....	72
c.	Séchage d'algues .....	73
d.	Extraction de l'huile algale.....	74
e.	Conversion de l'huile en biodiesel (Transestérification).....	75
5.2.	Etude d'impact sur les ressources énergétiques .....	77
5.2.1.	Bilan des ressources énergétiques sur le cycle de vie de production du biodiesel .....	77
5.2.2.	Contribution par étape de production durant le cycle de vie.....	79
a.	Culture d'algues.....	79
b.	Récolte d'algues .....	80
c.	Séchage d'algues .....	81
d.	Extraction des lipides.....	81
e.	Conversion de l'huile en biodiesel (Transestérification).....	83
5.2.3.	Calcul du ratio énergétique.....	84
2.	Comparaison entre le biodiesel et le Diesel.....	85
3.	Scénario de valorisation énergétique de la biomasse résiduelle .....	86
7.1.	Le système .....	86
7.2.	Les hypothèses.....	86
7.3.	Inventaire du cycle de vie avec valorisation de la biomasse résiduelle.....	88
7.4.	La comparaison avec le scénario de valorisation de la biomasse résiduelle .....	89
	Conclusion générale .....	92
	Perspectives et recommandations.....	93
	Références bibliographiques .....	94
	Annexes .....	101

# Liste des tableaux

Tableau I.1 : Energie primaire non renouvelable et émission de CO <sub>2</sub> pour différents matériaux et modes de transport sur tout le cycle de vie.....	28
Tableau I.2 : Principaux contributeurs aux catégories d'impact.....	31
Tableau II.1 : Tableau récapitulatif des différentes méthodes d'extraction des biocarburants.....	43
Tableau III .1 : Tableau comparatif entre les microalgues et les macroalgues .....	46
Tableau III.2 : Teneur et productivité en lipides de quelques espèces de microalgues.....	47
Tableau III.3 : Fiche d'identité de la <i>Chlorella Vulgaris</i> .....	49
Tableau IV.1 : Les Paramètres des étangs à ciel ouvert de type Raceway .....	56
Tableau IV.2 : Comparaison entre les deux systèmes de culture .....	57
Tableau IV.3 : Les différentes méthodes d'extraction avec leurs avantages et inconvénients.....	61
Tableau IV.4 : Comparaison entre les propriétés d'un diesel et un biodiesel issu de <i>Chlorella Vulgaris</i> .....	63
Tableau V.1 : Caractéristiques de l'étang de type Raceway utilisé .....	67
Tableau V.2 : Inventaire du cycle de vie du biodiesel à partir de microalgues .....	69
Tableau V.3 : Résultats des émissions en kg CO <sub>2</sub> eq et pourcentage de contribution des processus élémentaires.....	70
Tableau V.4 : Résultats des émissions en kg CO <sub>2</sub> eq et pourcentage de contribution des processus élémentaires de l'étape culture.....	72
Tableau V.5 : Résultats des émissions en kg CO <sub>2</sub> eq et pourcentage de contribution des processus élémentaires de l'étape récolte.....	73
Tableau V.6 : Résultats des émissions en kg CO <sub>2</sub> eq et pourcentage de contribution des processus élémentaires de l'étape séchage.....	74
Tableau V.7 : Résultats des émissions en kg CO <sub>2</sub> eq et pourcentage de contribution des processus élémentaires de l'extraction.....	75

Tableau V.8 : Résultats des émissions en kg CO <sub>2</sub> eq et pourcentage de contribution des processus élémentaires de l'étape de conversion.....	76
Tableau V.9 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires dans le cycle de vie du biodiesel. ....	77
Tableau V.10 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires durant l'étape de culture.....	79
Tableau V.11 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires durant l'étape de récolte .....	80
Tableau V.12 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires durant l'étape de séchage .....	81
Tableau V.13 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires durant l'étape d'extraction des lipides.....	82
Tableau V.14 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires durant l'étape de conversion des lipides.....	83
Tableau V.15 : Bilan énergétique du cycle de vie de production du biodiesel (GJ).....	84
Tableau V.16 : Les différents paramètres de comparaison entre l'ACV de la production du biodiesel à partir de microalgues et la production du Diesel. ....	85
Tableau V.17 : Inventaire de l'ACV du biodiesel à partir de microalgues avec valorisation énergétique de la biomasse algale résiduelle.....	88
Tableau V.18 : Les différents paramètres de comparaison entre l'ACV de la production du biodiesel à partir de microalgues avec valorisation énergétique et la production du Diesel...	90

# Liste des figures

Figure I.1 : Schéma descriptif des étapes d'une ACV.....	18
Figure I.2 : Schéma descriptif des phases de l'analyse du cycle de vie.....	19
Figure I.3 : Historique de l'ACV .....	21
Figure I.4 : Illustration d'un cas de transfert de pollution d'une étape vers une autre.....	23
Figure I .5 : Exemple d'un ensemble de processus dans un système (Norme ISO 14041).....	26
Figure I.6 : Arbre des processus et principales étapes du cycle de vie d'un produit.....	27
Figure I.7 : Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions.....	29
Figure I.8 : Structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie.....	31
Figure I.9 : Schéma récapitulatif des limites de l'ACV.....	34
Figure II.1 : Répartition de l'énergie dans les différents secteurs en 2015 .....	36
Figure II.2 : Production mondiale des biocarburants commercialisés (Biodiesel et Ethanol) entre 2004 et 2014 .....	37
Figure II.3 : Réaction de transestérification des triglycérides .....	42
Figure II.4 : Schéma réactionnel de transestérification.....	42
Figure III.1 : Vue microscopique d'une colonie de <i>Chlorella Vulgaris</i> .....	49
Figure III.2 : Cycle de la photosynthèse (cycle de Calvin) .....	50
Figure IV.1 : Schéma représentatif de différentes étapes de production de biocarburants de 3 <sup>ème</sup> génération .....	54
Figure IV.2 : Système de culture en extérieur du type Raceway (à droite) et Schéma d'une vue de haut d'un étang ouvert (à gauche) .....	55
Figure IV.3 : Variété des configurations des photobioréacteurs : A Photobioréacteur à cuve agitée – B : Photobioréacteur de type colonne à bulle – C : Air-lift photobioréacteur – D : Photobioréacteur incliné – E : Photobioréacteur héliocoïdal tubulaire – F : photobioréacteur à plaque inclinée –G : Photobioréacteur horizontal commercial en cours de construction – H photobioréacteur tubulaire .....	56

Figure IV.4 : Pâte algale.....	59
Figure IV.5 : Réaction de saponification des acides gras .....	62
Figure IV.6 : Schéma représentant le potentiel des procédés de génération de la bioénergie à partir de microalgues .....	62
Figure V.1 : Schématisation des limites du système considéré .....	66
Figure V.2 : Contribution des processus élémentaires sur le changement climatique.....	70
Figure V.3 : Contribution des différentes étapes du cycle de production du biodiesel à partir des microalgues sur les émissions en CO <sub>2</sub> eq.....	71
Figure V.4 : Contribution des processus élémentaires au changement climatique durant l'étape Culture.....	72
Figure V.5 : Contribution des processus élémentaires au changement climatique durant l'étape Récolte.....	73
Figure V.6 : Contribution des processus élémentaires au changement climatique durant l'étape Séchage.....	74
Figure V.7 : Contribution des processus élémentaires au changement climatique durant l'étape d'Extraction des lipides.....	75
Figure V.8 : Contribution des processus élémentaires au changement climatique durant l'étape Conversion des lipides.....	76
Figure V.9 : Contribution des processus élémentaires (en %) à la consommation d'énergie primaire durant le cycle de vie du biodiesel.....	77
Figure V.10 : Contribution (en %) des différentes étapes du cycle de vie de production du biodiesel à partir de microalgues à la consommation d'énergie primaire.....	78
Figure V.11 : Classement des processus de fabrication du biodiesel par ordre décroissant par rapport à leur contribution (en %) à la consommation d'énergie primaire.....	78
Figure V.12 : Contribution des processus élémentaires (en %) à la consommation d'énergie primaire durant l'étape de culture.....	79
Figure V.13 : Contribution des processus élémentaires (en %) à la consommation d'énergie primaire durant l'étape de récolte. ....	80

Figure V.14 : Contribution des processus élémentaires (en %) à la consommation d'énergie primaire durant l'étape de séchage.....	81
Figure V.15 : Contribution des processus élémentaires (en %) à la consommation d'énergie primaire durant l'étape d'extraction des lipides.....	82
Figure V.16 : Contribution des processus élémentaires (en %) à la consommation d'énergie primaire durant l'étape de conversion des lipides.....	83
Figure V.17 : Comparaison pour les deux catégories d'impacts du changement climatique et des ressources énergétiques entre le biodiesel issu de la « <i>Chlorella vulgaris</i> » et le diesel.....	85
Figure V.18 : Schématisation des limites du système considéré.....	87
Figure V.19 : Comparaison entre le biodiesel issu de la « <i>Chlorella vulgaris</i> » sans valorisation et avec valorisation de la biomasse algale résiduelle.....	89
Figure V.20 : Comparaison entre le biodiesel issu de la « <i>Chlorella vulgaris</i> » avec valorisation de la biomasse algale résiduelle et le diesel.....	90

# Liste des abréviations

ACV : Analyse du cycle de vie

GES : Gaz à Effet de Serre

NF : Norme Française

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

SETAC : Society of Environmental Toxicology and Chemistry

R&D : Recherche et Développement

REPA : Resource and Environment Profile Analysis

AFNOR : Association Française de Normalisation

CFC : Chlorofluorocarbure

HCFC : Hydrochlorofluorocarbure

ACVI : Analyse de l'inventaire du cycle de vie

PME : Petite et Moyenne Entreprise

PMI : Petite et Moyenne Industrie

FAAE : Fatty Acid Alkyl Ester

BtL : Biomasse to Liquid

FT : Fischer-Tropsch

NADP : Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate

ATP : Adenosine Tri Phosphate

NOx : Les oxydes d'azote

AGL : Acides gras libres

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

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

## Introduction générale

Le monde vit actuellement ses années les plus chaudes, cela est le résultat du changement climatique. De plus, les besoins énergétiques mondiaux ne cessent d'augmenter alors que les ressources en pétrole ne sont pas inépuisables et que la combustion du pétrole conduit à des émissions de gaz à effet de serre. Pour cela, une première réaction des Etats comme l'Algérie est la mise en œuvre de programmes de recherche et de développement en vue de diversifier leurs sources d'approvisionnement énergétique (création d'un mix énergétique) et de baisser les émissions des GES.

Le recours à des carburants alternatifs et renouvelables peut constituer une réponse à cette problématique et, parmi eux, les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération issus d'algues et en particulier des microalgues. Ces microorganismes sont considérés comme une alternative potentielle pour la production de carburants pour les transports. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'espèce « *Chlorella vulgaris* ».

L'analyse du cycle de vie (ACV) du biodiesel issu de la microalgue « *Chlorella vulgaris* » a été effectuée en vue d'estimer les impacts environnementaux de ce biodiesel. L'ACV du procédé de production du biodiesel modélisé, permettra, également d'évaluer la faisabilité du procédé et de proposer des solutions pour l'améliorer.

Cette étude comporte cinq chapitres. En premier lieu, nous définirons l'approche de l'analyse du cycle de vie. En second lieu, nous parlerons de l'importance des biocarburants et de leurs modes de production. Troisièmement, nous introduirons les microalgues et leur potentiel important dans la filière des biocarburants. Quatrièmement, nous décrirons le procédé de production du biodiesel à partir des microalgues. Dans le dernier chapitre, nous aborderons l'analyse du cycle de vie du biodiesel obtenu à partir de la chlorelle à l'aide du logiciel SimaPro. Nous étudierons les impacts sur le bilan CO<sub>2</sub> et sur le bilan énergétique et nous tenterons de proposer un scénario pour minimiser ces impacts et valoriser la biomasse résiduelle obtenue.



# Chapitre I

# Analyse du cycle de vie

## Introduction

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) apparaît comme une méthode clef pour appréhender les impacts environnementaux du biocarburant étudié. Ce type d'analyse permet d'évaluer les impacts sur l'environnement d'un produit, procédé ou service et ceci, en considérant toutes les étapes de son cycle de vie. Cette analyse est donc utile pour déterminer le potentiel environnemental de ces nouveaux carburants et elle est déjà largement utilisée.

Seulement des questions se posent : qu'est-ce qu'une ACV ? Comment se fait une démarche ACV et quels sont les impacts étudiés et pris en compte dans une ACV ?

Dans le chapitre suivant, nous essayerons de répondre à ces questions afin d'avoir une idée un peu plus précise sur l'ACV.

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

## 1. Définition de L'ACV

L'analyse du cycle de vie (ACV) évalue l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un système en relation à une formation particulière et ceci, en considérant toutes les étapes de son cycle de vie du « berceau à la tombe ». Elle permet d'identifier les points sur lesquels un produit peut être amélioré et elle contribue au développement de nouveaux produits. Cet outil permet de quantifier et d'analyser, de manière objective et de façon systématique et scientifique, les impacts d'un produit depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie en passant par les phases de fabrication, de distribution et d'utilisation [1].

L'ACV est avant tout employée pour comparer les charges environnementales de différents produits, processus ou systèmes entre eux, ainsi que les différentes étapes du cycle de vie d'un même produit. La figure suivante I.1 illustre les différentes étapes d'une ACV.



Figure I.1 : Schéma descriptif des étapes d'une ACV [2].

Elle s'exprime en France suivant la norme NF P 01-010 basée sur 10 critères qui quantifient les impacts du produit ou du système sur l'environnement : consommation d'énergie, de matières premières, d'eau et production de déchets.

Selon l'ISO, il s'agit de la compilation et de l'évaluation des consommations d'énergie, des utilisations de matières premières et des rejets dans l'environnement, ainsi que de l'évaluation de l'impact potentiel sur l'environnement associé à un produit, à un procédé ou à un service, sur la totalité de son cycle de vie. Le cycle de vie d'un produit, procédé ou service, rassemble les phases de fabrication, de transformation, d'utilisation et de destruction.

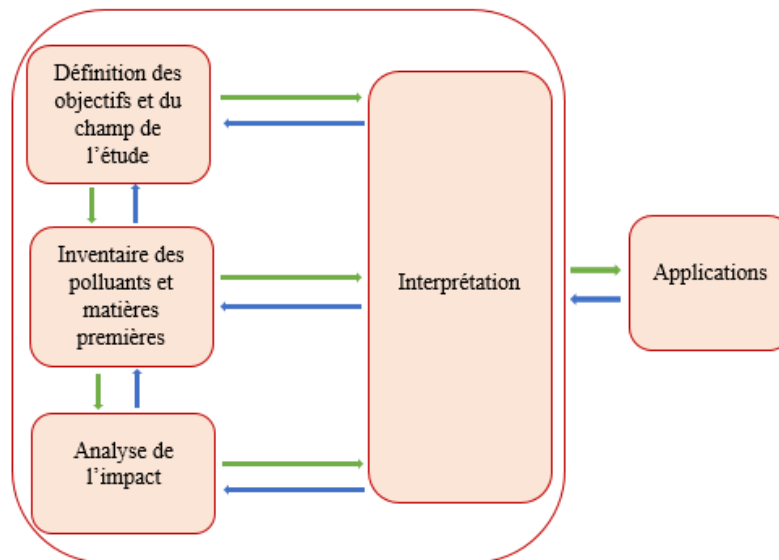
Cette méthode repose sur une démarche en quatre phases :

- la définition des objectifs et du champ de l'étude,
- l'analyse de l'inventaire des émissions et des extractions,
- l'analyse de l'impact environnemental,

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

- l'interprétation des résultats obtenus en fonction des objectifs initiaux.

Ces phases ne constituent pas seulement une succession de séquences, mais il s'agit également d'un processus itératif comme présenté sur la figure I.2.



**Figure I.2 : Schéma descriptif des phases de l'analyse du cycle de vie [1].**

## 2. Références normatives (série ISO 14040)

Initialement les bases méthodologiques de l'ACV ont été posées par la SETAC. Elle constitue, encore aujourd'hui, l'instance de référence pour de nouveaux développements, c'est donc une sorte d'enceinte de réflexions R&D, en amont de la normalisation internationale ISO.

L'ACV est aujourd'hui définie par les normes internationales ISO. Quatre normes ISO (ISO 14040-14043) furent édictées entre 1997 et 2000. En 2006, toutes furent remplacées par deux nouvelles : ISO 14040 (2006) et ISO 14044 (2006). Elles spécifient le cadre, les principes généraux ainsi que les exigences pour la réalisation d'ACV et la communication relative à ces études [3].

- La Norme ISO 14040 : « Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadres » décrit les caractéristiques essentielles de l'ACV et les bonnes pratiques de conduite d'une telle étude et rend obligatoire la déclaration de la procédure utilisée et de la mise à disposition du public d'un rapport complet sur les résultats de l'étude.

- La Norme ISO 14041 couvre les deux premières phases de l'ACV (objectifs, champs de l'étude et inventaire).

- La Norme ISO 14042 décrit les lignes directrices de la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie.

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

- La Norme ISO 14043 spécifie les exigences et les recommandations en vue de l'analyse des résultats de l'inventaire et de l'évaluation de l'impact du cycle de vie.

- La Norme ISO 14044 couvre l'évaluation du cycle de vie (ACV) des études et l'inventaire du cycle de vie (ICV) études [4].

## 3. Historique de l'ACV

Les premières études de ce type ont été réalisées aux États-Unis dans les années 60 où des chercheurs développent le « Resource and Environment Profile Analysis » (REPA), précurseur des bilans matières.

L'apparition des Analyses de Cycle de Vie est due : aux premières études visant l'optimisation des consommations énergétiques. Les pollutions chroniques locales et/ou globales constituent aussi des facteurs ayant contribué à la genèse de l'Analyse du Cycle de Vie et à son développement.

Une étude ACV ayant permis de poser les bases de la méthodologie ACV, telle qu'elle est structurée de nos jours, a été réalisée par la compagnie Coca-Cola en 1969 pour déterminer l'intérêt ou non de fabriquer des cannettes métalliques. Cette étude est reconnue comme étant une référence en raison de son caractère multicritères.

En 1972, il y'a eu la fondation du club de Rome où, pour la première fois, on a réalisé que les ressources sont limitées et que le développement s'étudie sur la base de simulations : «penser globalement, agir localement ».

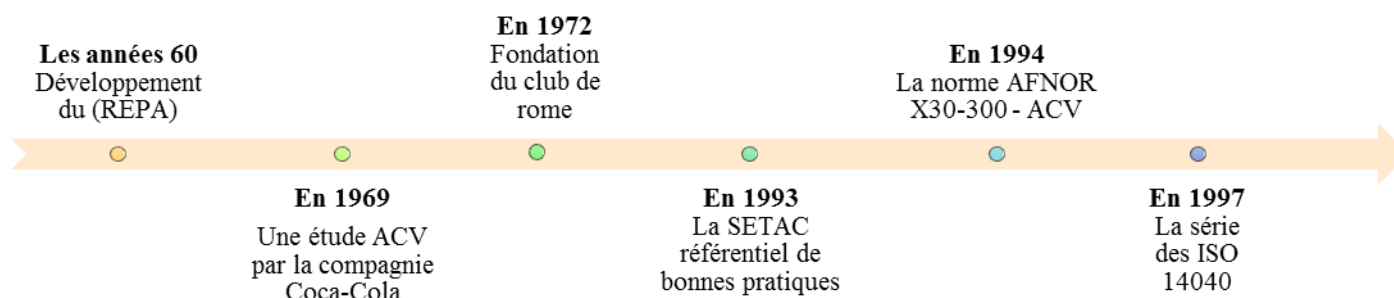
En 1973, une crise d'énergie a eu lieu et l'approche bilans se généralise, bilans essentiellement énergétiques. Le progrès dans le développement de cette méthodologie a été rapide durant « les années 70 ». Plusieurs études similaires ont été réalisées par la suite aussi bien aux États-Unis qu'en Europe.

La SETAC publie, en 1993, un référentiel de bonnes pratiques et en 1994, la France publie la norme AFNOR X30-300 - Analyse de cycle de vie : définition, déontologie et méthodologie.

En 1997, est publiée la première norme internationale de la série des ISO 14040 relative aux ACV [1,5].

L'axe temporel, représenté dans la figure I.3, résume les différentes phases du développement de l'ACV.

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie



**Figure I.3 : Historique de l'ACV.**

## 4. Applications et utilisations de l'ACV

Une ACV permet de comprendre quels sont les étapes et les aspects environnementaux clés et selon son importance, nous pouvons distinguer différentes applications [6] :

- La réduction de l'impact environnemental en prenant en compte l'environnement dès l'étape de conception d'un nouveau produit,
- L'élaboration des stratégies de marketing en améliorant la position de marché de certains produits en mettant en avant les avantages environnementaux associés,
- La diffusion de l'information aux responsables de la prise de décision tant aux privés qu'aux gouvernements,
- La sélection (le choix) du produit ou du procédé le plus respectueux de l'environnement parmi plusieurs solutions proposées (en comparant leurs cycles de vie),
- La proposition de réglementations concernant l'environnement par comparaison d'ACV de plusieurs procédés rendant le même service,
- L'évaluation de plusieurs scénarios alternatifs,
- L'identification des risques énergétiques et environnementaux.

## 5. Les principes de la méthode ACV

### 5.1. Approche fonctionnelle

L'ACV évalue les impacts environnementaux induits par la fonction rendue par un produit.

Elle permet ainsi, par exemple, de comparer :

- la qualité écologique de deux produits analogues, mais avec des durées de vie différentes,
- la qualité écologique de deux produits différents rendant la même fonction (une voiture et un moyen de transport en commun),
- la qualité écologique d'une fonction assurée par un bien matériel « classique » et par un service « dématérialisé » (envoyer une lettre par courrier postal et par courrier électronique).

Il est important de bien définir la fonction réalisée par un produit afin de pouvoir, par la suite, comparer les impacts environnementaux de deux produits remplissant la même

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

fonction. Pour cela, la fonction rendue par le produit ou service évalué est décrite sous la forme d'« unité fonctionnelle » : il s'agit de la fonction de référence à laquelle sera ramené l'ensemble des impacts quantifiés pour ce produit [1].

## 5. 2. Approche cycle de vie

L'ACV utilise un modèle mathématique permettant d'exprimer les flux physiques (flux de matières, d'énergie, de rejets dans les milieux), entrants et sortants du système considéré en termes d'impacts potentiels sur l'environnement. Toutes les étapes du cycle de vie du produit sont prises en compte pour l'inventaire des flux : extraction des matières premières énergétiques et non-énergétiques nécessaires à la fabrication du produit, fabrication, distribution, utilisation, collecte et élimination en fin de vie et toutes les étapes de transport [1].

## 5. 3. Approche multicritères

Les consommations de matière et d'énergie, les rejets et émissions dans l'air, dans l'eau et dans les sols et la production de déchets sont quantifiés à chaque étape du cycle de vie et sont exprimés en termes d'indicateurs d'impacts potentiels sur l'environnement.

La complexité des phénomènes mis en jeu et de leurs interactions est source d'incertitude sur la valeur réelle des impacts sur l'environnement (non prise en compte des effets de synergie ou d'antagonisme entre polluants, des caractéristiques particulières du milieu local, des effets de cinétique, des concentrations, des expositions) : c'est à ce titre que l'on qualifie les impacts évalués de « potentiels » [1].

Différentes méthodes existantes permettent de caractériser les flux inventoriés en indicateurs d'impact environnemental de différents niveaux.

Les méthodes les plus reconnues et les plus utilisées aujourd'hui permettent de caractériser les flux inventoriés en indicateurs d'impacts potentiels (ou indicateurs « *midpoint* »). Certaines méthodes telle que la méthode Impact 2002+ permettent d'aller à un second niveau de caractérisation pour obtenir des indicateurs de dommages potentiels (ou indicateurs « *endpoint* »).

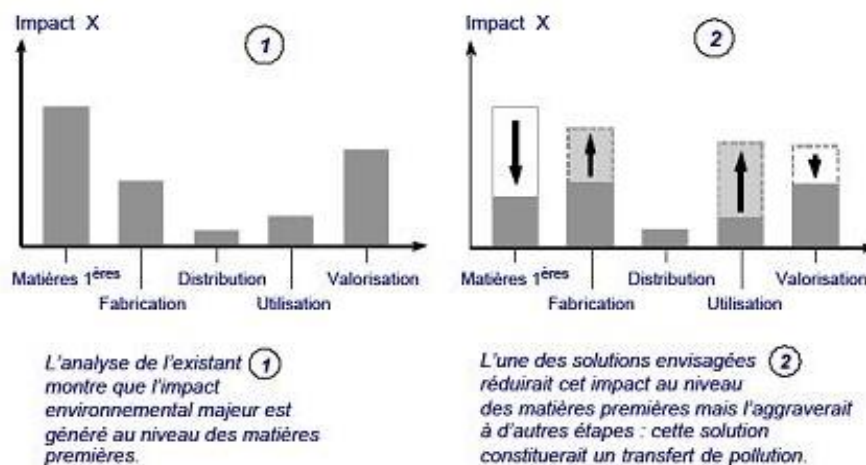
## 5. 4. « Transferts de pollution » et « Normation »

L'intérêt de l'ACV est d'évaluer plusieurs natures d'impacts environnementaux et toutes les étapes du cycle de vie. Lors d'une comparaison, elle peut faire ressortir qu'un produit à moins d'impacts qu'un autre à l'aune d'un critère (les émissions de gaz à effet de serre par exemple) mais en a davantage à l'aune d'un autre critère (l'acidification de l'air, par exemple). Elle peut aussi souligner qu'un gain à une étape de cycle de vie peut avoir des conséquences dégradantes en une autre étape [1,7].

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

L'évaluation environnementale est souvent utilisée de manière comparative : comparer deux options techniques pour un concepteur, comparer deux produits pour un acheteur, comparer deux orientations politiques pour un décideur. La force de l'ACV est de restituer la complexité de l'environnement et d'éviter des choix qui auraient pour conséquence de dégrader des milieux qui n'avaient pas été considérés, ou de déplacer les impacts d'une étape du cycle de vie à une autre. L'ACV rend compte de transferts de pollution potentiels dans la comparaison de deux scénarios alternatifs.

La figure I.4 donne une illustration d'un cas de transfert de pollution d'une étape vers une autre.



**Figure I.4 : Cas de transfert de pollution d'une étape vers une autre [1].**

Lorsque l'on compare les impacts environnementaux de deux produits (calculés par le biais d'ACV sur la base d'une unité fonctionnelle commune), il est fréquent d'observer un transfert de pollution sur lequel il est nécessaire d'arbitrer. La difficulté est alors de comparer deux impacts quantifiés avec des unités différentes (exemple : comment comparer un impact sur l'effet de serre en grammes équivalent carbone à un impact sur l'eutrophisation en grammes équivalent phosphates). Aucune méthode consensuelle n'existant pour réduire à une note unique la dizaine d'indicateurs d'impacts généralement calculés, deux méthodes ont été développées permettant de ramener des indicateurs hétérogènes à des indicateurs soit sans unité (la « normation ») soit avec une unité monétaire commune (la « monétarisation »).

La monétarisation consiste en une évaluation économique des dommages environnementaux (ou « externalités »), mais elle est moins utilisée que la normation car considérée comme trop peu fiable à ce jour.

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

## **6. Les différentes phases de l'ACV : (Méthodologie normalisée)**

### **6. 1. Définition des objectifs et du champ de l'ACV**

La définition des objectifs et du système « champ de l'étude de l'ACV » est la première phase de l'ACV. Elle peut paraître triviale, mais elle est de fait essentielle pour la qualité de l'étude. Cette phase détermine une série d'éléments cruciaux : la fonction du système, l'unité fonctionnelle à laquelle les émissions seront ensuite rapportées. Elle définit également les limites du système considéré. C'est aussi dans cette étape que les scénarios de base et les alternatives à étudier sont définis en détail.

#### **6. 1.1. Définition de l'objectif de l'étude**

Comme l'explique la norme ISO 14040, la définition des objectifs d'une ACV doit indiquer, sans ambiguïté, les éléments suivants :

- l'application envisagée,
- l'application conduisant à réaliser l'étude,
- le public concerné, c'est-à-dire les personnes auxquelles il est envisagé de communiquer les résultats de l'étude,
- s'il est prévu que les résultats soient utilisés dans des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public.

En définissant l'objectif, les exigences, citées ci-dessus, doivent être prises en compte. Ceci est très important car une étude interne d'une entreprise, qui a l'intention de fournir des données dans le but de la recherche d'une amélioration ou d'optimisation de sa production, peut être structurée très différemment par rapport à une étude qui a l'intention de faire des comparaisons publiques entre deux produits qui seront divulguées au public pour intérêt commercial. Les raisons de la mise en œuvre de l'étude doivent être clairement expliquées.

#### **6. 1.2. Définition du champ de l'étude**

La définition du champ de l'étude d'une ACV doit prendre en compte les éléments suivants et les décrire clairement comme l'explique la norme ISO 14040 :

- Le système de produits à étudier,
- Les fonctions du système ou des systèmes dans le cas d'études comparatives,
- L'unité fonctionnelle,
- La frontière du système,
- Les règles d'affectation,
- La méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et les types d'impact,
- L'interprétation à utiliser,
- Les exigences portant sur les données,
- Les hypothèses,
- Les choix de valeurs et les éléments facultatifs,



# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

- Les exigences de qualité des données,
- Le type de revue critique, le cas échéant,
- Le type et le format du rapport spécifié pour l'étude.

Il est à préciser que l'analyse du cycle de vie est une démarche itérative. Par conséquent, il peut être nécessaire de modifier le champ de l'étude au cours de l'analyse lorsque des informations supplémentaires sont recueillies.

## 6. 2. Définition de la fonction du système

La fonction du produit ou du système étudié doit être clairement définie car elle sert de base pour déterminer deux éléments essentiels de l'ACV : l'unité fonctionnelle et les limites du système. Afin de conserver une approche critique vis-à-vis d'une application, il est très profitable de réfléchir à la fonction avant d'avoir défini l'unité fonctionnelle ou les limites du système.

Il n'est pas toujours facile de cerner la fonction exacte d'un système car un seul produit peut avoir une fonction multiple. Dans ce cas, on distinguera entre fonction principale et fonction secondaire. La fonction principale doit être, par définition, commune aux différentes alternatives [1].

### 6. 2. 1. Définition de l'unité fonctionnelle et flux de référence

Une fois la fonction du système définie, l'unité fonctionnelle peut être dérivée. Cette unité est la grandeur quantifiant la fonction du système sur la base de laquelle les scénarios sont comparés. Son rôle est d'offrir une référence à laquelle tous les flux de l'inventaire sont rapportés. Par conséquent, l'unité fonctionnelle est la même dans les différents scénarios. C'est une grandeur, définie en cohérence avec les objectifs de l'étude, qui doit être mesurable et additive et n'est donc pas un rapport : l'impact de deux unités fonctionnelles doit être le double de l'impact d'une unité fonctionnelle [1].

Selon la norme ISO 14044 (2006), l'unité fonctionnelle est la performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une ACV.

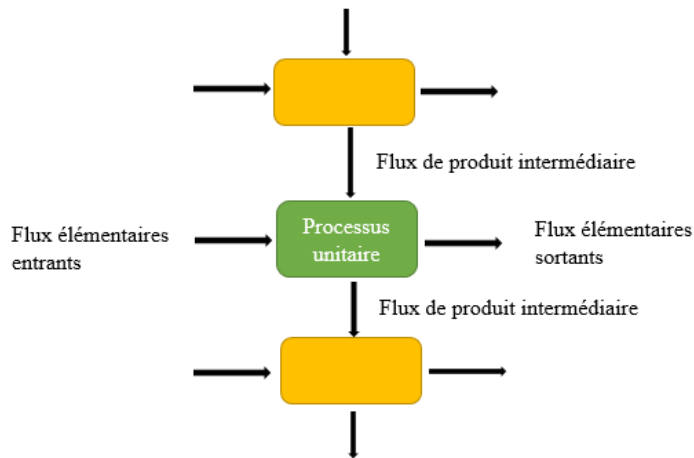
Pour une unité fonctionnelle donnée, on mesure, pour chaque scénario, les flux de référence c'est-à-dire les quantités de produits nécessaires et achetées pour remplir cette fonction. Ces flux doivent être quantifiés et ils peuvent varier d'un scénario à l'autre. Sur la base des flux de référence, il deviendra possible de faire l'inventaire des flux entrants (inputs) et des flux sortants (outputs) du système nécessaires à la réalisation de la fonction (ISO 14040).

### 6. 2. 2. Définition du système

Un système est plus que la somme de tous ses éléments, il doit être considéré dans sa totalité, sa complexité et sa dynamique. Bien définir le système revient à déterminer

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

l'ensemble des processus unitaires requis à l'accomplissement de sa fonction. Les processus unitaires sont associés entre eux par des flux intermédiaires et reliés à l'environnement par des flux élémentaires comme le schématise la figure I.5 [8].



**Figure I .5 : Exemple d'un ensemble de processus dans un système (ISO 14041).**

## 6. 2. 3. Définition des limites du système

Les limites du système déterminent la portée de l'enquête, les processus unitaires qui seront inclus dans l'ACV et d'autres qui seront exclus. Il est important de préciser les critères de cette décision. A ce stade, il convient de définir l'horizon temporel et géographique.

Selon la Norme ISO 14044, la frontière du système est l'ensemble de critères qui spécifient quels processus élémentaires font partie du système de produits [1].

Plusieurs facteurs déterminent les limites du système tels que l'application envisagée de l'étude, les hypothèses émises, les critères d'exclusion, la qualité des données, le public et les contraintes économiques. En s'appuyant sur la définition donnée pour l'unité fonctionnelle, plusieurs types de frontières peuvent être fixés :

- Frontière temporelle : la durée de vie considérée,
- Frontière géographique : par exemple la production des matières premières est faite en des lieux différents,
- Frontière technologique.

## 6. 2. 4. Processus à considérer

La sélection des processus à considérer commence par l'analyse de l'ensemble des processus impliqués dans la réalisation de la fonction. A cet effet, l'élaboration d'un arbre des processus est extrêmement utile et permet une visualisation des différents processus en cause [1]. Cela veillera en particulier à couvrir l'ensemble des différentes étapes du cycle de vie (figure I.6) :

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

- l'extraction et la préparation des matières premières et de l'énergie,
- La mise à disposition des infrastructures, des machines et des intrants ainsi que les transports,
- La phase principale de production,
- La phase d'utilisation des produits, entretien compris,
- La phase de traitement des déchets en tenant compte des mises en valeur possibles sous forme de réutilisation, de recyclage ou de valorisation énergétique.

Comme l'élimination des déchets génère des émissions, leur traitement est à considérer à l'intérieur des limites du système et les émissions correspondantes seront prises en compte dans le bilan.

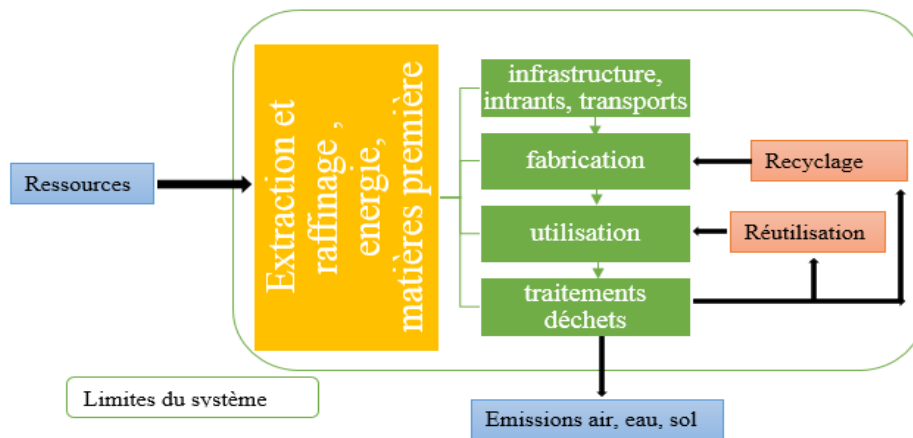


Figure I.6 : Arbre des processus et principales étapes du cycle de vie d'un produit.

## 6. 3. Inventaire des émissions et des extractions

L'inventaire des flux élémentaires ou inventaire des extractions et des émissions est la description quantitative des flux de matière, d'énergie et de polluants qui traversent les limites du système. Il regroupe donc les quantités de substances polluantes émises ainsi que les ressources extraites (minerais, vecteurs énergétiques, surfaces de sol) au cours du cycle de vie du produit ou du service analysé.

Pour l'approche processus, cet inventaire se calcule en multipliant l'inventaire de production par des facteurs d'émission ou d'extraction. L'inventaire regroupe donc l'ensemble des intrants (quantités de matière et d'énergie consommées) pour le produit ou le service lors des différentes bases de données et donne la quantité de chaque substance émise ou extraite par unité d'intrant utilisé. Les flux élémentaires peuvent parfois être calculés directement à partir du bilan de masse du processus étudié permettant un contrôle des données utilisées.

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

Pour l'approche input-output (entrants-sortants), l'inventaire se calcule en multipliant les dépenses par unité fonctionnelle par des facteurs d'émission par coût dépensé [1].

Le tableau I.1 montre l'inventaire d'énergie primaire non renouvelable et d'émission de CO<sub>2</sub> pour différents matériaux et modes de transport sur tout le cycle de vie.

**Tableau I.1 : Energie primaire non renouvelable et émission de CO<sub>2</sub> pour différents matériaux et modes de transport sur tout le cycle de vie [1].**

	Energie primaire non renouvelable [MJ par unité]	CO <sub>2</sub> [kg par unité]	Rapport gCO <sub>2</sub> /MJ primaire non renouvelable
<b>Energie</b>			
1kWh électricité (Europe)	10,5	0,49	46
1kWh électricité (US)	12,1	0,71	59
1kWh électricité (Japon)	11,6	0,53	45
1kWh électricité (Suisse)	7,3	0,11	16
1kg bois de chauffe (granules)	0,3	0,01	45
1L essence (sans combustion)	43,2	0,49	11
1L essence (avec combustion)	43,2	2,81	65
1kg fioul léger (42,7 MJ )	56,9	3,71	65
<b>Transport</b>			
1000 km kg transport camion 40t	2,8	0,16	56
1 pers.km train (Inter cité)	1,1	0,06	55
1 pers.km avion (Vol inter continental)	3,3	0,19	57
1 pers.km voiture	3,2	0,18	56
<b>Matériau</b>			
1 kg acier faiblement allié	24,7	1,26	51
1 kg aluminium primaire	162	9,52	59
1 kg aluminium recyclé	21,8	1,22	56
1 m <sup>3</sup> béton	1320	255	192
1 kg cuivre	26,8	1,52	57
1 m <sup>3</sup> eau	6,3	0,32	51
1 kg papier d'emballage blanchi	31,2	1,58	51
1 kg polyéthylène HDPE	79,9	1,75	22
1 kg verre	11,7	0,62	53
<b>Fin de vie</b>			
1 kg acier mis en décharge	0,205	0,00691	34
1 kg aluminium mis en décharge	0,526	0,0208	40
1 kg polypropylène incinéré	0,212	2,53	11 962

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

## 6. 4. Evaluation de l'impact du cycle de vie

L'évaluation des impacts du cycle de vie est une étape importante de l'Analyse du Cycle de Vie. Elle vise à transformer un inventaire de flux en une série d'impacts potentiels clairement identifiables. Par rapport au système de produits analysés, les résultats de cette étape peuvent servir pour :

- Identifier et aider à classer les opportunités d'amélioration,
- Caractériser la performance environnementale du produit,
- Le comparer à d'autres systèmes de produits ayant la même fonction,
- Indiquer les points environnementaux nécessitant une action éventuelle (peut-être l'éco-conception ou la ré-conception du produit).

L'évaluation des impacts s'appuie sur l'Unité Fonctionnelle. Elle prend, comme données d'entrée, l'analyse de l'Inventaire du Cycle de Vie.

Les méthodes d'analyse de l'impact vont modéliser les voies d'impact des différentes substances et relier, autant que possible, chaque donnée d'inventaire à ses dommages environnementaux potentiels [1].

De manière schématique, la démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions correspond à l'illustration de la figure I.7.

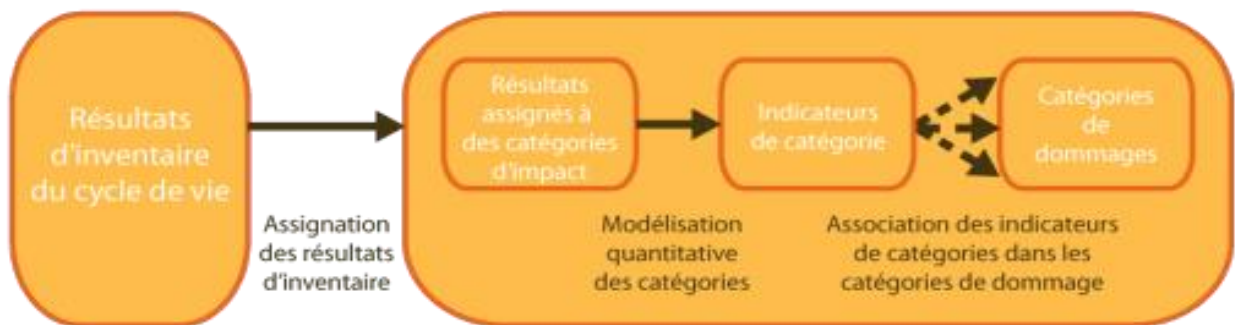


Figure I.7 : Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions [4].

### 6. 4. 1. Méthodes d'analyse de l'impact

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser une telle évaluation. Ces méthodes peuvent se subdiviser en deux catégories et ce, en fonction de leur positionnement sur le continuum de la chaîne des causes à effet [1].

#### a. Méthodes orientées problèmes

La chaîne de cause à effet pour les problématiques environnementales est assez complexe. On peut généralement distinguer des effets primaires, découlant directement des activités étudiées, comme l'émission de CFC, et les effets secondaires, qui sont en fait les

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

conséquences comme la diminution de l'ozone stratosphérique, résultant en une augmentation des rayons UV touchant le sol causant des problèmes de cataracte et de cancer.

Les méthodes orientées problèmes vont s'attacher à catégoriser les impacts de premier ordre, par exemple l'émission des CFC. Ces méthodes sont également connues sous le nom de méthode « *mid-point* ».

## **b. Méthodes orientées dommages**

Contrairement aux méthodes orientées problèmes, les méthodes orientées dommages vont s'attacher à regrouper les impacts en fonction des résultats, aussi loin que possible dans la chaîne de cause à effet. C'est pour cela que ces méthodes sont également qualifiées de "end-point".

### **6. 4. 2. Les étapes de l'analyse de l'impact**

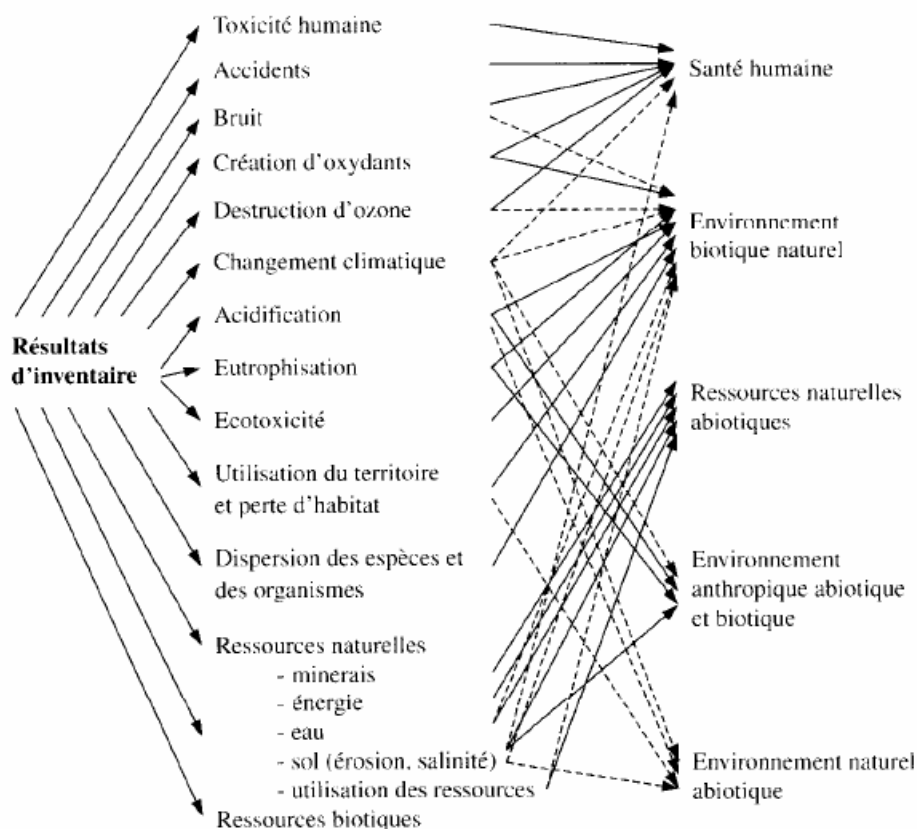
Selon les normes en vigueur, les éléments suivants sont obligatoires dans la phase d'ACV :

- Sélection des catégories d'impact, des indicateurs de catégorie et des modèles de caractérisation,
- Attribution des résultats de l'ACV aux catégories d'impact sélectionnées (classification),
- Calcul des résultats d'indicateurs de catégorie (caractérisation).

#### **a. Choix des catégories d'impacts**

Le but des méthodes d'analyse de l'impact est de relier les données d'inventaire aux dommages environnementaux causés par les substances inventoriées. Pour ce faire, il est utile de grouper les résultats d'inventaire ayant des effets similaires dans des catégories d'impact à un niveau intermédiaire, appelées catégories intermédiaires. On peut en ressortir deux types qui jouent à deux niveaux : les catégories orientées dommages (*endpoint*) et les catégories orientées problèmes (*midpoint*). Pour chaque catégorie intermédiaire, on définit un indicateur intermédiaire en vue de comparer et de caractériser les flux de substance tablés dans l'inventaire contribuant à cette catégorie. La figure I.8 résume les différents impacts que l'on peut trouver. Les flèches, en pointillés, représentent les informations entre catégories intermédiaires et les dommages qui sont particulièrement incertains.

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie



**Figure I.8 : Structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie [1].**

Plusieurs autres catégories existent, les principales différences étant que certaines regroupent ou non certains impacts sous une même bannière. Selon la Norme ISO 14042, les critères présidant au choix de bonnes catégories d'impacts sont :

- pas de redondance entre catégories afin qu'il n'y ait pas de double comptage,
- pas de déguisement d'impacts importants.

Ces bonnes catégories d'impacts doivent être complètes et doivent permettre la traçabilité. Le tableau I.2 montre les principaux contributeurs aux catégories d'impact.

**Tableau I.2 : Principaux contributeurs aux catégories d'impact [1].**

Catégories d'impact	Principales substances ou espèces chimiques recensées
Épuisement des ressources abiotiques	Ressources minérales et fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole)
Changement climatique	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, CFC, HCFC
Diminution d'ozone stratosphérique	CFC, H CFC, Halon
Toxicité humaine	Nombreux composés chimiques (dont notamment NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> , CO, HAP, COV, métaux lourds), pesticides, particules
Écotoxicité	
Formation de photo-oxydants	COV, NO <sub>x</sub>
Acidification	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> , HCl, HF
Eutrophisation	Composés azotés (dont NO <sub>x</sub> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) et phosphorés (dont P0 <sub>4</sub> <sup>3+</sup> )
Impact des radiations ionisantes	Ensemble des isotopes radioactifs

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

## b. Classification

Lors de cette étape, une série de catégories d'impact environnemental intermédiaires, correspondant aux types de problèmes environnementaux retenus, est définie. Les émissions et extractions de substance contribuant aux problèmes environnementaux sont ensuite classifiées dans ces catégories d'impact, une émission pouvant contribuer à plusieurs catégories [1].

## c. Caractérisation

### c.1. Caractérisation intermédiaire (midpoint)

Pour la caractérisation intermédiaire, on fait appel à des facteurs de caractérisation intermédiaires qui expriment l'importance relative des émissions (ou de l'extraction) de telle substance dans le contexte d'une catégorie d'impact environnemental intermédiaire spécifique. Ces facteurs doivent être modélisés d'une façon scientifiquement valide et quantifiée autant que possible. Les masses émises ou extraites sont multipliées par ces facteurs puis sommées dans chaque catégorie intermédiaire pour fournir un score d'impact intermédiaire, souvent exprimées en kg équivalents d'une substance de référence :

$$SI_i = \sum_s FI_{s,i} \cdot M_s$$

Avec

$SI_i$  : Le score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie  $i$ ,

$FI_{s,i}$ : Le facteur de caractérisation intermédiaire de la substance  $S$  dans la catégorie intermédiaire  $i$ ,

$M_s$  : La masse émise ou extraite de la substance  $S$ .

### c. 2. Caractérisation des dommages (endpoint)

Les méthodes orientées dommages ont pour principale vocation de regrouper les impacts intermédiaires en fonction des dommages sur un sujet à protéger.

L'avantage de cette méthode est la compréhension facile des résultats de l'étude par le public [1].

## d. Les étapes optionnelles

Des éléments et des informations facultatifs peuvent être utilisés en fonction des objectifs et du champ de l'étude. Nous pouvons citer :

1. **La Normalisation** qui porte sur le calcul de l'importance des résultats d'indicateurs de catégorie par rapport à une information de référence. Elle permet de représenter les impacts sur un même graphique,



# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

2. **Le Regroupement** qui consiste en un tri et éventuellement en un classement des catégories d'impact,
3. **La Pondération** qui est la conversion et éventuellement l'agrégation des résultats d'indicateurs dans des catégories d'impacts en utilisant des facteurs numériques fondés sur des choix de valeurs. L'objectif est de donner des facteurs de pondération à toutes les catégories afin de les agréger en un score unique.

Les méthodes les plus couramment utilisées sont :

- L'évaluation sociale des dommages en menant des enquêtes auprès de la population sur le poids relatif qu'elle attribue à chacun des impacts,
- Le dépassement d'un seuil. Cette étape est déconseillée, dans certains cas, car elle est la phase la plus subjective de l'ACV.

4. **L'Analyse de la qualité des données** pour une meilleure compréhension de la fiabilité de l'ensemble des résultats d'indicateurs et du profil de l'évaluation de l'impact.

Ces éléments facultatifs peuvent utiliser des informations n'appartenant pas au cadre de l'évaluation à condition que l'utilisation de ces informations soit expliquée et que l'explication soit consignée.

## 6. 5. Interprétation

L'interprétation est la dernière phase de l'Analyse du Cycle de Vie. Durant cette étape, les résultats de l'inventaire et de l'évaluation de l'impact du cycle de vie (ACVI) sont combinés. Le but est de vérifier la cohérence des résultats avec les objectifs et le champ de l'étude et de conclure en expliquant les limitations et en fournissant des recommandations.

La phase d'interprétation du cycle de vie d'une étude type Analyse du Cycle de Vie comprend plusieurs éléments :

- L'identification des enjeux significatifs,
- La vérification, par des contrôles de complétude, de sensibilité et de cohérence,
- Les conclusions, limitations et recommandations.

On doit également tenir compte des éléments fixés par les objectifs de l'étude, à savoir :

- Le caractère approprié des définitions des fonctions du système, de l'unité fonctionnelle et de la frontière du système.
- Les limitations identifiées par l'évaluation de la qualité des données et par l'analyse de sensibilité.

# Chapitre I : Analyse du cycle de vie

## 7. Les limites de l'ACV

Une Analyse de Cycle de Vie ne couvre pas l'ensemble de la problématique environnementale, seuls les aspects quantitatifs (mesurables) et extensifs (sommables) sont pris en compte. Des aspects comme : l'impact des activités sur les paysages, le bruit, les odeurs, le temps, la toxicité des produits émis (incertitudes importantes), ne sont pas considérés de façon directe dans les ACV, selon la méthodologie actuellement en vigueur.

Une autre difficulté concerne l'interprétation des résultats d'une Analyse du Cycle de Vie et ceci ne touche pas uniquement le cercle des spécialistes concernés. Ces aspects doivent être particulièrement soignés, ainsi que leur communication.

Des limites pratiques peuvent également apparaître pour la réalisation d'une ACV. A titre d'exemple, on cite la disponibilité des données et surtout leur collecte qui est très lourde, parfois même impossible à faire [1]. La figure I.9 résume les différentes limites d'une ACV.

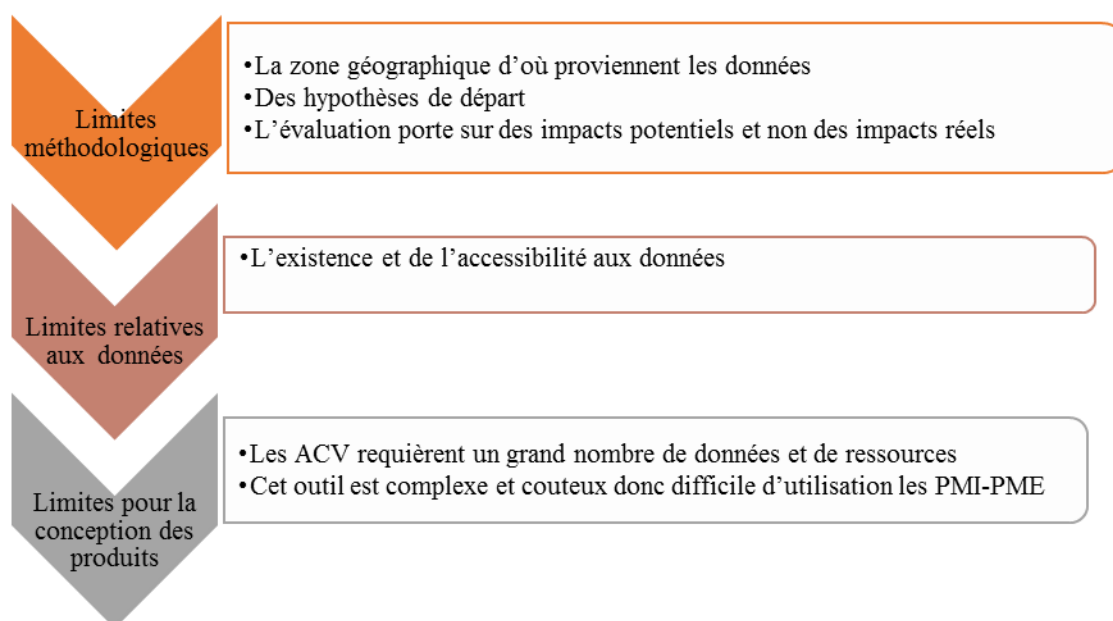


Figure I.9 : Schéma récapitulatif des limites de l'ACV.

## Conclusion

L'Analyse du Cycle de Vie permet la quantification des impacts environnementaux potentiels d'un produit grâce à une vision globale sur son cycle de vie.

Parce que certains paramètres ne peuvent pas être quantifiés en totalité, l'ACV ne pourra jamais devenir un outil universel et complet. Il est quasi-impossible par exemple d'obtenir l'intégralité des flux utilisés pour un produit ou de fixer les limites exactes d'un système. Compte tenu de ce fait, il faut parfois faire appel à des données génériques ou restreindre le périmètre de l'étude en utilisant des données limitées.

# Chapitre II

# Les biocarburants

### **Introduction**

Aujourd'hui, les transports dépendent jusqu'à 97 % du pétrole. Réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et notre dépendance au pétrole dans les transports passe par une diversification des sources d'énergie utilisées. Parmi les alternatives envisagées, les biocarburants constituent une solution largement utilisée au niveau mondial.

Dans ce chapitre, nous parlerons de l'intérêt de ces biocarburants, des différents types qui existent, de leurs avantages et de leurs inconvénients ainsi que des méthodes utilisées pour leurs extractions.

# Chapitre II : Les biocarburants

## 1. Définition d'un biocarburant

Le mot biocarburant est formé du grec « bios » : vie, et de « carburant » [9]. Ce sont des carburants utilisés à la place des combustibles fossiles pour alimenter des moteurs à combustion interne dans le secteur des transports, pour la production d'électricité ou comme source de chaleur.

Les biocarburants sont produits à partir de ressources renouvelables : la biomasse \* végétale, les huiles végétales ainsi que les effluents municipaux et industriels [10].

Les biocarburants sont utilisés sous forme d'additifs ou de compléments aux carburants fossiles suivants : gazole (incorporation en tant que biodiesel), essence (incorporation sous forme d'éthanol ou d'ETBE lui-même produit à partir d'éthanol), kérosène et aux carburants gazeux [11].

\* La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique.

## 2. Intérêt des biocarburants

Les biocarburants permettent :

- D'accroître l'indépendance énergétique des pays non producteurs de pétrole,
- De limiter les émissions de CO<sub>2</sub> liées au transport en utilisant des ressources renouvelables. La réduction de ces émissions de gaz à effet de serre peut aider à diminuer le réchauffement climatique,
- De développer de nouveaux débouchés en agriculture et de créer de l'emploi.

A partir de la figure II.1, nous remarquons que 20% de l'énergie dans le monde,

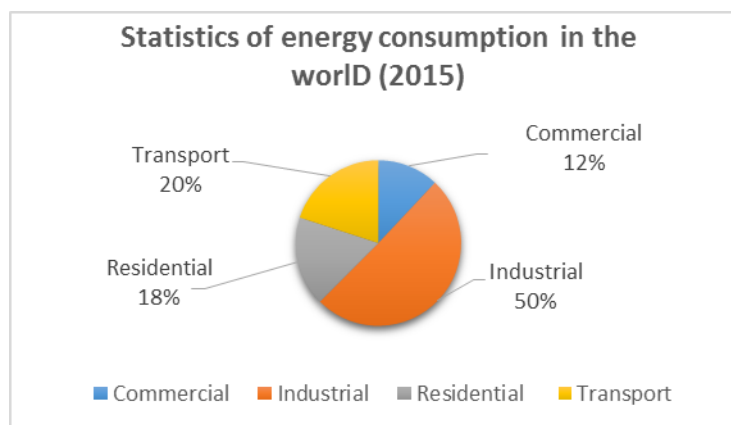
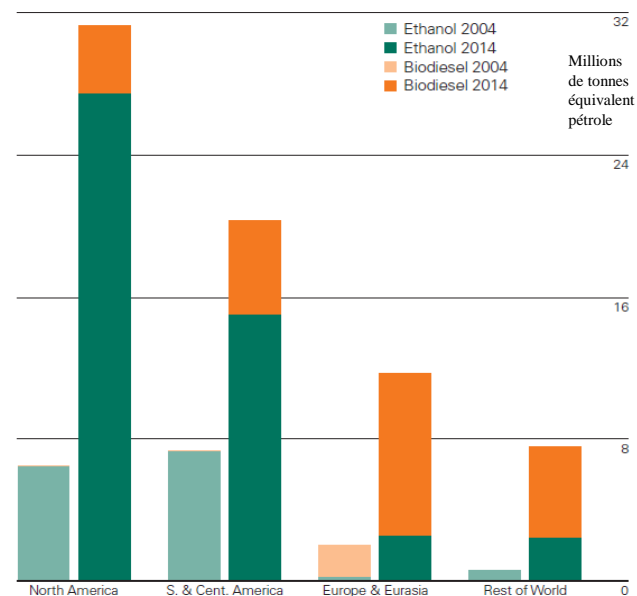


Figure II.1 : Consommation énergétique dans le monde en 2015 [12].

## Chapitre II : Les biocarburants

en 2015, ont été utilisés dans le secteur du transport ce qui montre la nécessité de trouver de nouvelles ressources durables et écoenvironnementales qui peuvent constituer des solutions alternatives aux carburants fossiles et en même temps qui ont un impact environnemental moins négatif et moins dangereux pour notre environnement.

La production mondiale, en 2014, des biocarburants a augmenté de 7,4%. L'éthanol a marqué une augmentation de 6% tandis que le biodiesel a enregistré une hausse de 10,3%. La figure II.2 montre la répartition des biocarburants dans le monde et leur pourcentage d'augmentation entre 2004 et 2014.



**Figure II.2 : Production mondiale des biocarburants commercialisés (Biodiesel et Ethanol) entre 2004 et 2014 [13].**

Les biocarburants émettent nettement moins de polluants tels que le soufre (à l'origine des pluies acides), les suies, les particules fines (à l'origine de nombreuses affections pulmonaires ainsi que de la couche noire sur les bâtiments), etc.

La production des biocarburants, qu'il s'agisse d'huile pure, de biodiesel ou de bioéthanol, génère des coproduits valorisés dans l'alimentation animale [14].

# Chapitre II : Les biocarburants

## 3. Classification des biocarburants

En général, les biocarburants sont classés, selon les matières premières utilisées, en trois générations.

### 3. 1. Les biocarburants de 1ère génération

La première génération de biocarburants repose sur l'utilisation des organes de réserve des cultures :

- Les graines des céréales (blé, maïs) ou les oléagineux (colza, tournesol),
- Les racines de la betterave ou de la canne à sucre,
- Les fruits du palmier à huile.

L'amidon du blé est fermenté pour donner du bioéthanol. Les graines de tournesol ou de colza sont pressées pour produire de l'huile végétale qui peut être utilisée pour la fabrication de biodiesel [15].

#### Avantages :

- A l'inverse de la combustion des énergies fossiles, le carbone émis lors de la combustion de biocarburants a préalablement été fixé par les plantes (colza, blé, maïs...) lors de la photosynthèse.

#### Inconvénients :

- Les matières premières utilisées pour produire ce type de biocarburant peuvent être utilisées dans une chaîne alimentaire animale ou humaine ; par conséquent, ils entrent en concurrence directe avec celle-ci. De plus, le bilan énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub> liés à la production de cette génération de biocarburants ne sont pas toujours très favorables à cause notamment de l'énergie nécessaire à leur extraction (par exemple : chauffage pour la distillation du bioéthanol).

### 3. 2. Les biocarburants de 2ème génération

La deuxième génération utilise la plante entière. Elle utilise l'intégralité de la lignocellulose des plantes ou de la biomasse : bois, paille, déchets, résidus agricoles et forestiers [15].

Les produits finaux peuvent être du bioéthanol (éthanol cellulosique), du biodiesel, du biohydrogène ou du biogaz.

#### Avantages :

## Chapitre II : Les biocarburants

- Production à base de végétaux non comestibles, dissociation des cultures alimentaires et énergétiques.

### Inconvénients :

- Les carburants de synthèse nécessitent des technologies coûteuses qui ne sont pas encore au point pour produire des carburants économiquement rentables à grande échelle.

### 3. 3. Les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération

Les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération sont issus des algues : microalgues et également macroalgues en condition autotrophe.

Il est à noter qu'il n'y a pas encore de consensus sur la définition de la 3<sup>ème</sup> génération. Certains chercheurs, en plus des microalgues, y incluent l'ensemble des microorganismes [15].

## 4. Les types de biocarburants

### 4. 1. Le Biodiesel

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

Sa structure chimique est celle des esters allyliques d'acide gras (FAAE). Les impacts environnementaux du biodiesel sont plus favorables que ceux du carburant issu des ressources d'origine fossile [16]. Sa combustion est plus propre avec une teneur en soufre plus faible que celle du gazole. Suivant la concentration en biodiesel du carburant commercialisé, on parle de B5, de B30 ou de B100 (respectivement 5 %, 30 % et 100 % de biocarburant). Jusqu'à 30 % de biogazole, les moteurs diesel ne nécessitent pas de modification particulière [17].

### 4. 2. L'Éthanol ou le Bioéthanol

L'éthanol est un biocarburant non toxique (à la manipulation notamment) et biodégradable. Il est obtenu à partir du sucre qui peut être issu de la matière végétale. Aux Etats-Unis, la majorité de l'éthanol provient du maïs. Cet éthanol sert à fabriquer du E10 (10% d'éthanol et 90% d'essence) dans 99% des cas [18,19].

Concrètement, deux types d'éthanol peuvent être produits : celui dit industriel et celui dit carburant. Ce dernier est distillé puis déshydraté (afin de pouvoir le mélanger à l'essence) pour obtenir un alcool anhydre à indice d'octane élevé [20]. Dès l'intégration, même minime (inférieure à 10%), de l'éthanol à l'essence, on observe une réduction du monoxyde de carbone émis par les véhicules [18,19].

Le bioéthanol peut être produit à partir :

## Chapitre II : Les biocarburants

- de substrats riches en sucrose (canne à sucre, betterave sucrière), en amidon (maïs, orge, blé, pomme de terre),
- de substrats cellulosiques tels que les résidus agricoles (la paille ou les cannes de maïs), les résidus forestiers, cultures énergétiques (le panic érigé ou les arbres à courte rotation) [21].

### 4. 3. Le Biogaz

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

Le biogaz est un mélange composé essentiellement de méthane (entre 50% à 70%) et de dioxyde de carbone, avec des quantités variables d'eau, et de sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) qui pourrait être utilisé dans tout système naturel dérivé du gaz et aussi dans les véhicules à gaz naturel.

## 5. Méthodes d'extraction des biocarburants

Pour créer un biocarburant libre de toute impureté, en termes technologiques, nous pouvons distinguer deux voies :

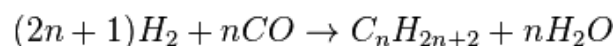
### 5. 1. La voie Thermochimique

La voie thermochimique consiste, tout d'abord, à dégrader la biomasse pour en extraire un gaz de synthèse. Ce dernier sera à son tour synthétisé pour être transformé en hydrocarbure qui pourra être ajouté au carburant actuel. Ce processus est considéré comme la voie la plus robuste.

#### a. La Gazéification

La gazéification consiste en une décomposition thermique des substances organiques solides en élevant la température entre 900°C et 1100°C en milieu oxygéné ou en présence de vapeur d'eau. Le gaz obtenu, très riche en hydrogène (80 à 85%), est appelé Singaz [22].

Le syngaz peut être utilisé pour produire de l'éthanol (ou d'autres alcools) par fermentation. Il permet également d'accéder à des hydrocarbures grâce à la synthèse catalytique Fisher-Tropsch.



L'ensemble de ce procédé, permettant la production d'hydrocarbures liquides à partir de biomasse par synthèse FT, est appelé BtL.

**La méthanation** est un procédé catalytique qui permet la conversion du syngaz en méthane. Le gaz obtenu est appelé « BioSNG » et possède les mêmes propriétés que le gaz naturel.



# Chapitre II : Les biocarburants

## **b. La Pyrolyse**

La pyrolyse est également une technique de décomposition thermique de substances organiques dans un milieu avide d'air [22]. Cependant, elle a lieu à des températures variant entre 450°C et 500°C. Un de ses grands avantages est qu'elle permet de diminuer le gaspillage d'énergie et qu'elle s'adapte à plusieurs types de biomasses agro-forestières et autres résidus de transformation [23].

## **c. La Méthanisation**

La méthanisation (ou digestion anaérobie) consiste en la transformation de matière organique en biogaz. Cette dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène donne naissance à plus de 90% à du biogaz, le méthane [23] le reste étant du gaz carbonique.

## **5. 2. Voies chimiques**

Les voies chimiques permettent de convertir deux macromolécules principales : les sucres et les lipides.

Cela nécessite au préalable d'extraire ces molécules de la biomasse terrestre et aquatique : des plantes sucrières pour la première génération : canne à sucre, betterave sucrière, maïs, blé ; pour les générations avancées : microalgues, biomasse lignocellulosique et plantes oléagineuses (colza, soja, microalgues).

### **a. L'hydrolyse enzymatique**

L'hydrolyse enzymatique par des enzymes spécifiques permet de fragmenter les molécules de cellulose en sucres fermentescibles, les sucres en C6. L'hydrolyse est catalysée par des acides forts ou enzymes (cellulases). Cette catalyse enzymatique est aussi efficace que l'hydrolyse acide mais bien meilleure en termes de rendement (pas de génération de déchets) et d'impact environnemental (conditions douces de température et de pression) [23].

### **b. La fermentation**

La fermentation des sucres en C6 par des levures est similaire à celle pour la production des biocarburants de première génération mais la présence de lignine dans la biomasse limite la concentration initiale en sucres en C6 et donc la teneur finale en éthanol. Par ailleurs, certains composés toxiques de l'étape de prétraitement peuvent être présents lors de la fermentation. Enfin, les sucres en C5 issus de l'hydrolyse de l'hémicellulose sont difficiles à convertir en éthanol et nécessitent des microorganismes fermentaires différents.

## Chapitre II : Les biocarburants

En plus des alcools, d'autres produits de sortie sont attendus de cette étape de fermentation, notamment les isoprénoïdes (famille des isoprènes, terpènes) et les biodiesels et biokérosènes obtenus par des voies biochimiques avancées.

### c. La transestérification

Les esters méthyliques sont obtenus par réaction de transestérification des triglycérides avec le méthanol selon le schéma sur la figure II.3.

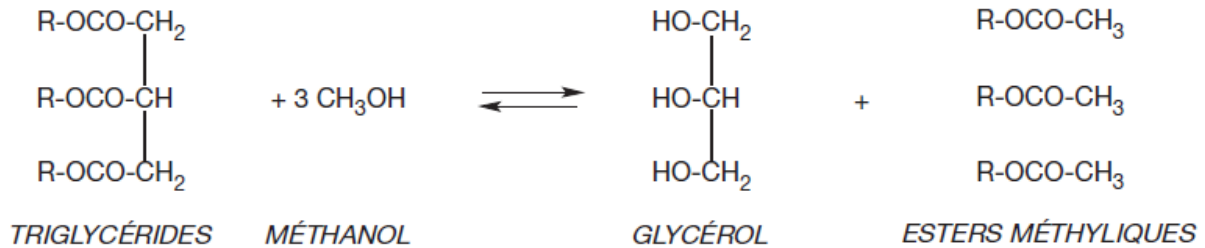


Figure II.3 : Réaction de transestérification des triglycérides [23].

Cette réaction est équilibrée et elle s'effectue en présence d'un catalyseur.

Les triglycérides des huiles sont des esters de glycérol, encore désignés sous le nom de glycérine, et d'acides gras R-COOH.

À l'aide du schéma réactionnel présenté dans la figure II.4, on visualise bien que la libération du glycérol n'est définitive qu'après les réactions consécutives de transestérification des triglycérides en diglycérides, puis en monoglycérides et la formation de la troisième molécule d'ester méthylique d'acide gras.

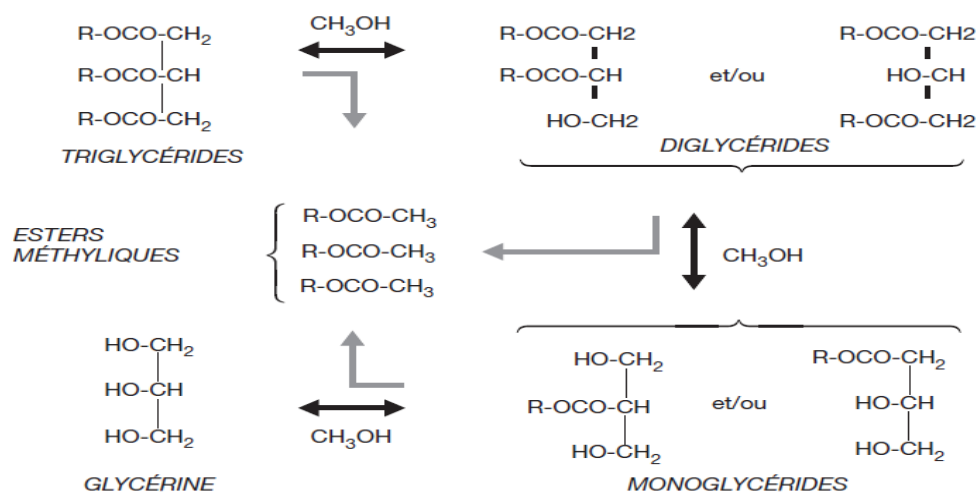


Figure II.4 : Schéma réactionnel de transestérification [23].

## Chapitre II : Les biocarburants

Cette réaction peut être effectuée par catalyse homogène, avec des catalyseurs solubles dans le milieu réactionnel, ou par catalyse hétérogène, avec des catalyseurs totalement insolubles dans les réactifs.

D'autres techniques permettent d'effectuer cette réaction en utilisant des technologies innovantes comme le chauffage par micro-ondes (avec des temps de catalyse fortement réduits) ou par catalyse enzymatique (avec, dans ce cas, des temps de séjour relativement longs). Il s'agit de technologies peu suffisamment avancées à l'heure actuelle pour être industrialisées dans un avenir proche [23]. Le tableau II.1 résume les différentes méthodes d'extraction citées au paravent.

**Tableau II.1 : Tableau récapitulatif des différentes méthodes d'extraction des biocarburants [10].**

Procédé de transformation	Transformation 1	Molécule plateforme	Transformation 2	Produit final
<b>Voies chimiques</b>	Hydrolyse enzymatique	Sucres	Fermentation	Ethanol (1G,2G) Alcools lourds Isoprénoides
	Récolte, extraction	Lipides	Transestérification	Biodiesel (1G,3G) Esters méthyliques d'acides gras
			Décarboxylation	Hydrocarbures
<b>Voies thermochimiques</b>	Gazéification	Syngaz	Fermentation	Alcools (dont éthanol)
			Fisher-Tropsch	BtL (Biomass to Liquid)
			Méthanation	Alcools BioSNG
	Pyrolyse/torréfaction	Biobruts/ Biohuiles	Raffinage	Hydrocarbures
	Méthanisation	Biogaz	Méthanation	Biométhane

## Chapitre II : Les biocarburants

### **Conclusion**

Les biocarburants offrent de réelles perspectives et représentent effectivement un domaine d'actualité. L'avenir de ces filières se trouve de plus en plus lié à leur contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dont l'influence sur le réchauffement climatique est reconnue par l'ensemble de la communauté scientifique. De plus, les biocarburants présentent de très bonnes caractéristiques en mélange avec les carburants d'origine fossile. C'est pourquoi, il est important de développer ces filières de production et de participer à leur recherche et développement.

# Chapitre III

# Les microalgues

### **Introduction**

Les organismes photosynthétiques suscitent un intérêt grandissant, en raison de leurs propriétés biologiques et métaboliques intéressantes. Le terme « microalgue » s'est progressivement imposé dans les mondes scientifique et industriel. En effet, depuis quelques années, la biotechnologie microalgale est devenue un thème de recherche privilégié permettant d'explorer et d'exploiter l'énorme potentiel de ces microorganismes intervenant au sein de nombreux systèmes et dans de multiples secteurs industriels comme les domaines énergétique, pharmaceutique, alimentaire et plus récemment environnemental.

Ce chapitre comporte une initiation, à travers une analyse bibliographique, à la notion de microalgues et aux différentes caractéristiques de ces microorganismes photosynthétiques ainsi qu'aux facteurs influençant leur croissance.

# Chapitre III : Les microalgues

## 1. Définition des algues

Les algues sont des organismes chlorophylliens se développant dans l'eau ou dans des milieux très humides, n'ayant ni feuilles, ni racines, ni vaisseaux, ni fleurs, ni graines [24].

La biodiversité des microalgues est énorme et est estimée entre 200 000 et plusieurs millions d'espèces. Avec une telle diversité non exploitée, les algues représentent, sans nul doute, une opportunité de développement énorme [25].

Il est possible de classifier l'ensemble de ces espèces en deux catégories, les microalgues et les macroalgues, qui offrent des avantages et des inconvénients.

**Tableau III .1 : Tableau comparatif entre les microalgues et les macroalgues.**

Catégorie	Microalgues	Macroalgues
<b>Les avantages</b>	- Contiennent beaucoup d'huile	- Culture peu onéreuse - Possibilité actuelle de les utiliser comme matières premières
<b>Les inconvénients</b>	- Difficile à cultiver de manière rentable	- Certaines espèces sont faibles en lipides

Les algues représentent une grande variété d'espèces photosynthétiques. Elles peuvent être cultivées suivant deux modalités :

- soit en **conditions photoautotrophes** : la lumière solaire sert de source d'énergie et, grâce à la photosynthèse, les algues élaborent leur propre substance à partir des éléments minéraux dissous dans l'eau et du CO<sub>2</sub>,
- soit en **conditions hétérotrophes** : de la matière organique est utilisée par fermentation comme source de carbone et d'énergie. Quelques espèces d'algues peuvent aussi utiliser les molécules de carbone, inorganiques et organiques, de l'environnement et ce processus est appelé **mixotrophie** [26].

## 2. Les microalgues

Les microalgues sont des organismes photosynthétiques qui utilisent la lumière du soleil comme source d'énergie pour fixer le dioxyde de carbone. Les lipides accumulés par les microalgues, pouvant atteindre jusqu'à 80 % de leur poids sec, sont principalement des triglycérides. Ces derniers peuvent ensuite être utilisés pour produire du biodiesel via une réaction appelée transestérification [25]. Un des avantages de l'utilisation des microalgues, pour la production de biodiesel, est leur croissance extrêmement rapide puisque certaines espèces peuvent doubler leur biomasse de une à trois fois en 24 heures (tableau III.2) [27].

# Chapitre III : Les microalgues

**Tableau III.2 : Teneur et productivité en lipides de quelques espèces de microalgues [28,29,30].**

<b>Espèces de microalgues</b>	<b>Teneur maximale en lipides (% poids sec)</b>	<b>Productivité en lipides (mg/L/jour)</b>
<b>Chlorella emersonii</b>	28-32	50
<b>Chlorella protothecoides</b>	57,9	1214
<b>Chlorella vulgaris</b>	14-22	40
<b>Neochloris oleoabundans</b>	35-54	90-134
<b>Monodus subterraneus</b>	16	30,4

## 3. Classification des microalgues

Les microalgues sont très rarement regroupées en fonction de leur métabolisme énergétique ou encore en fonction de leur habileté à synthétiser les métabolites nécessaires, mais plutôt en fonction de leurs propriétés morphologiques [31]. Il existe donc différentes classes taxonomiques de microalgues dont les principales sont les cyanophycées, les chrysophycées, les rhodophycées, les euglenophycées, les chlorophycées et les bacillariophycées.

## 4. Caractéristiques et avantages des microalgues

### 4.1. Synthèse des lipides

Les acides gras produits par les algues peuvent être à chaîne moyenne (C10- C14), à longue chaîne (C16-C18) et à très longue chaîne ( $\geq$ C20). Des dérivés d'acides gras sont également produits. Par contre, sous des conditions environnementales défavorables ou de stress, de nombreuses algues modifient leurs voies de biosynthèse des lipides vers la formation et l'accumulation de lipides neutres (20-50 % du poids sec de la cellule), principalement sous la forme de triglycérides. L'accumulation de lipides dans les algues commence lors de l'épuisement d'un nutriment du milieu de culture, généralement l'azote. A ce moment, l'excès de carbone du milieu de culture est encore assimilé par les cellules et est converti en triglycérides [32].

### 4.2. La fixation du CO<sub>2</sub>

Les microalgues sont largement et principalement connues comme étant des organismes photo autotrophes. Avant que le CO<sub>2</sub> ne soit consommé au cours de la photosynthèse, il doit être

# Chapitre III : Les microalgues

solubilisé dans le milieu de culture, principalement sous forme de bicarbonate  $\text{HCO}_3^-$  et de  $\text{CO}_2$  dissous [25,32].

- Les algues se développent beaucoup plus rapidement que les plantes terrestres et sur des surfaces qui n'entrent pas, ou peu, en compétition avec les surfaces agricoles,
- Dans les conditions optimales de croissance, les algues synthétisent des acides gras qui constituent environ 5 à 20 % du poids sec de la cellule,
- Différents types d'eau sont utilisables : douce, saumâtre, salée et même des eaux usées,
- La croissance des microalgues pour la production des lipides nécessitant d'importantes quantités de  $\text{CO}_2$ , on peut envisager de recycler ainsi le  $\text{CO}_2$  émis par des usines ou des centrales thermiques,
- Les microalgues ont une tolérance pour un vaste intervalle de salinité,
- Une surface de culture de microalgues peut produire jusqu'à 10 à 100 fois plus de lipides comparativement aux autres cultures oléagineuses, voire celles de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> générations. De même, alors qu'un cycle de récolte terrestre prend de 3 mois à 3 ans pour être exploité, les algues commencent à produire des lipides entre 3 à 5 jours de culture, de plus la récolte peut se faire quotidiennement [33].

## 5. *Chlorella vulgaris*

### 5.1. Définition

Le nom *Chlorella* dérive de la chlorophylle et des deux mots latins signifiant "feuille" et "petit".

La Chlorelle est une microalgue unicellulaire sphérique verte (plus petite qu'un globule rouge humain). Son diamètre est compris entre 2 à 10  $\mu\text{m}$ . Elle existe sur terre depuis plus de 2,5 milliards d'années [34].

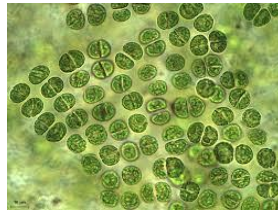
*Chlorella vulgaris* est une microalgue du genre chlorelle (figure III.1). Elle peut vivre dans les eaux douces, les eaux salées ou aussi les eaux usées. *Chlorella* a longtemps été utilisée comme organisme modèle pour comprendre la photosynthèse et l'assimilation du carbone dans les microorganismes. Elle possède les avantages suivants [35] :

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



# Chapitre III : Les microalgues

- Une teneur en lipide élevée jusqu'à 50% et principalement des triglycérides sous des conditions de stress.



**Figure III.1 : Vue microscopique d'une colonie de *Chlorella Vulgaris* [34].**

À ce jour, *Chlorella* est produit comme aliment santé et aliment pour animaux en Allemagne, au Japon, en Chine, et dans plusieurs autres pays asiatiques.

## 5.2. Composition

La *Chlorella Vulgaris*, sous des conditions de culture avec une source de carbone, est composée de [36] :

- Protéines qui représentent 42% à 58% du poids de la biomasse sèche contenu dans une *C. vulgaris* mature [37],
- Lipides qui sont des composés définis non pas par leur structure, mais plutôt par rapport à leur solubilité dans des solvants non polaires et leur insolubilité dans l'eau [38]. Dans des conditions de croissance optimales, *C. vulgaris* peut atteindre une production de 5 à 40 % de lipides par poids de biomasse sèche [39] composés principalement de substances glycolipidiques, de cires, d'hydrocarbures, de phospholipides, et de petites quantités d'acides gras libres ,
- Glucides,
- Pigments : Le pigment le plus abondant est la chlorophylle, qui peut atteindre de 1 à 2 % de son poids sec,
- Vitamines et de minéraux.

Le tableau III.3 représente la fiche d'identité d'une microalgue de souche *chlorella vulgaris*.

**Tableau III.3 : Fiche d'identité de la *Chlorella Vulgaris* [40,41].**

<b>La souche d'algue</b>	<i>Chlorella Vulgaris</i>
<b>Composition élémentaire de la biomasse</b>	$C_{106}H_{181}O_{45}N_{16}P$
<b>Productivité</b>	Entre 15 et 25 g/ m <sup>2</sup> /j
<b>Pourcentage des lipides contenus dans la biomasse sèche</b>	18% *
<b>Masse volumique</b>	920 kg/ m <sup>3</sup> (146,268 kg-oil/ j)
<b>Rendement en huile</b>	58% *

\*Estimation par rapport aux données locales.

# Chapitre III : Les microalgues

## 6. Paramètres de croissance des microalgues

### 6.1. La lumière

Comme tout organisme photosynthétique, une microalgue trouve sa source d'énergie dans la lumière. Celle-ci a une influence notable sur la composition de la biomasse produite et sur la vitesse de croissance. En absence de lumière, il n'y aura pas de production de matière organique et un excès de l'intensité lumineuse provoque un phénomène de saturation des systèmes photosynthétiques ou une photo inhibition. Les meilleures vitesses de photosynthèse s'obtiennent avec une alternance de périodes de lumière et d'ombre [42]. Les réactions photochimiques de la photosynthèse vont permettre la réduction du CO<sub>2</sub> et la formation de glucides. Ce recyclage est réalisé grâce au cycle de Calvin Benson comme le montre la figure III.2.

- pendant la période lumineuse, l'énergie lumineuse est absorbée et convertie en énergie chimique qui permet la production d'enzymes (NADPH<sub>2</sub> et ATP) et de l'oxygène,
- pendant la période d'ombre, le NADPH<sub>2</sub> et l'ATP sont utilisés pour réduire le dioxyde de carbone et le transformer en molécules organiques.

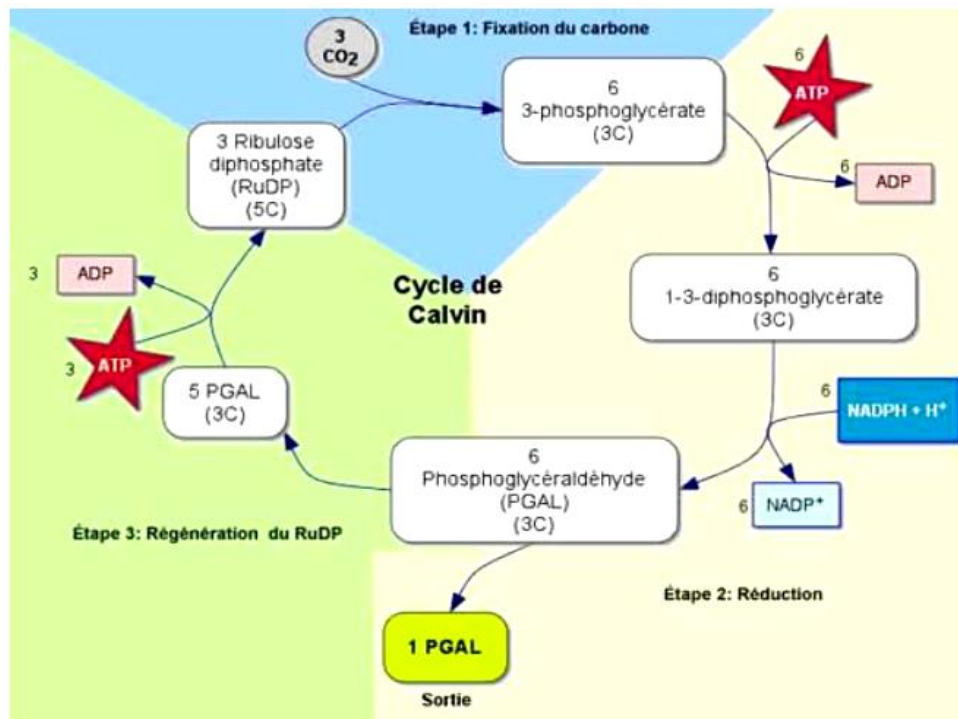


Figure III.2 : Cycle de la photosynthèse (cycle de Calvin) [43].

# Chapitre III : Les microalgues

## 6.2. L'agitation

L'homogénéité du milieu de culture représente un point fondamental assurant une productivité optimale de biomasse et une capacité importante de fixation de CO<sub>2</sub>. En effet, une faible agitation entraîne non seulement une difficulté d'accès aux nutriments et à la lumière mais aussi des phénomènes de décantation de la biomasse et la création de zones « stagnantes ». Dans ces dernières, les conditions de cultures sont défavorables ce qui peut conduire à une mortalité cellulaire à travers l'accumulation de produits toxiques. En outre, une agitation trop élevée conduit à un cisaillement des cellules algales ce 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 [44].

## 6.3. Le CO<sub>2</sub> et le pH

Le CO<sub>2</sub> est un facteur important et limitant de la photosynthèse. Pour les microalgues, une concentration de CO<sub>2</sub> de 1 à 5% en volume donne une efficacité maximum. Une grande quantité de CO<sub>2</sub> permet d'améliorer l'efficacité de la photosynthèse et donc d'obtenir une grande quantité de biomasse. L'ajout de NaHCO<sub>3</sub> au milieu de culture permet non seulement d'apporter du CO<sub>2</sub> pour augmenter la productivité mais aussi de contrôler le pH du milieu (agent tampon) [35].

La gamme de pH toléré par les microalgues se situe entre 7 et 9 avec un optimum généralement compris entre 8,2 et 8,7 [45,46]. Néanmoins, il existe quelques espèces qui prospèrent bien dans des milieux acides ou basiques. La défaillance d'une culture peut être due à un problème de non maintenance d'un pH acceptable. Le maintien du pH se fait par l'aération de la culture. Dans le cas d'une densité cellulaire élevée, l'addition du CO<sub>2</sub> permet de rectifier le pH qui pourrait atteindre une valeur de 9 durant la croissance de la culture [47].

## 6.4. La température

C'est un facteur qui conditionne la conversion globale de l'énergie lumineuse et en conséquence la croissance cellulaire. La plupart des microorganismes survivent à l'exposition à de larges gammes de température.

Dans le cas de *Chlorella vulgaris*, Mayo en 1997 a constaté que lorsque la température dépasse 40°C, l'espèce devient moins résistante au milieu acide. D'autres travaux effectués par Converti et al en 2009 ont rapporté que les lipides augmenteraient de 5,9 à 14,7 % lorsque la température passe de 30 °C à 25 °C. La température optimale serait comprise entre 25 et 30 °C. Bajguz [38] a noté que, dans le cas d'un stress thermique ou d'un choc thermique, la teneur en protéines diminue suivie d'une production d'acide abscissique (ABA), une hormone végétale. Si

## Chapitre III : Les microalgues

l'hormone du stress est produite, elle est considérée comme un facteur clé dans le contrôle de la croissance de l'espèce [48].

### 6.5. Les nutriments

#### a. Source d'azote

L'azote est un élément essentiel des protéines de structure et de fonctionnement. C'est l'élément le plus important après le carbone [39]. Le taux de croissance des microalgues est à peu près identique selon les sources d'azote utilisées (urée, nitrate de sodium ou de potassium ( $\text{NaNO}_3$  ou  $\text{KNO}_3$  ou nitrate d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )) [48].

De nombreuses études montrent l'amélioration de la production et du stockage de lipides dans le cas d'une carence en azote.

#### b. Source de phosphore

La carence en phosphore ressemble beaucoup à celle en azote. La teneur initiale en cet élément modifie la phase exponentielle de croissance et influence la biomasse obtenue en fin de culture. La croissance cellulaire se voit limitée à des concentrations égales ou inférieures à 30 mg/l [49]. La carence en phosphore peut produire une dégradation légère du collecteur d'énergie lumineuse de l'appareil photosynthétique [50].

## Conclusion

Les microalgues sont des espèces prometteuses pour la production du biodiesel du fait de leur forte teneur en lipides. Néanmoins, il faut bien étudier leurs paramètres de croissance et trouver l'optimum de chacun pour avoir une productivité élevée et un bon rendement de biodiesel.

# Chapitre IV

## Production du Biodiesel à partir de microalgues

### **Introduction**

La troisième génération des biocarburants utilise les algues, et plus précisément les microalgues, comme source de carburant et ce, à cause de leurs taux de croissance et de leur contenu en huile élevés par rapport à ceux des cultures traditionnelles.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différentes étapes du procédé de production d'un biodiesel, depuis la culture des algues jusqu'à la transformation des composés extraits en agrocarburants.

# Chapitre IV : Production du biodiesel à partir de microalgues

## 1. Description du cycle de production du biocarburant à partir d'algues

La production de biocarburants à partir d'algues est divisée en cinq étapes (figure IV.1) :

- La culture d'algues,
- La récolte de la biomasse et le séchage,
- L'extraction de l'huile d'algue,
- La conversion de l'huile et les résidus,
- La répartition des bioproduits.



**Figure IV.1 : Schéma représentatif des différentes étapes de production de biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération.**

En examinant les entrées et les sorties d'une voie particulière ou d'un processus au sein d'un cycle, les externalités environnementales peuvent être anticipées et traitées de manière appropriée.

## 2. La sélection des algues

La sélection des algues se fait selon différents critères à savoir [51] :

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

# Chapitre IV : Production du biodiesel à partir de microalgues

## 3. La culture d'algues

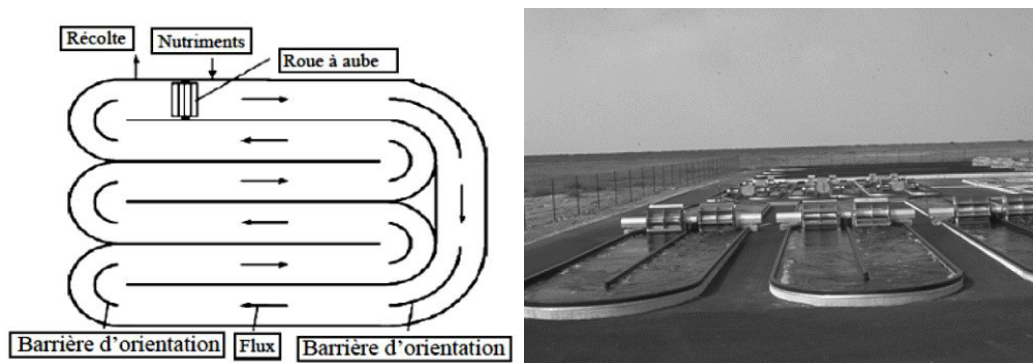
Industriellement, deux procédés de production des microalgues sont actuellement utilisés :

- Les Bassins à ciel ouvert,
- Les Photobioréacteurs.

### 3. 1. Les étangs (Bassins) à ciel ouvert de type Raceway

Les étangs à ciel ouvert (figure IV.2) sont des dispositifs les plus communs, les plus simples et les plus économiques pour la culture des microalgues. Ils sont sous forme de chemin à roulement où une ou plusieurs roues à aube sont placées pour permettre la nutrition de toutes les cellules algales. Ces systèmes sont classés selon la source d'eau utilisée : eaux naturelles (lacs, lagunes et étangs) ou eaux usées. Ils sont généralement construits à côté des industries lourdes où il y'a un dégagement de dioxyde de carbone, source de nutrition principale des microalgues autotrophes et des  $\text{NO}_x$ . La profondeur optimale de l'étang est de 15-50 cm et ce, afin de permettre facilement l'exposition des cellules à la lumière du soleil [36].

Ces systèmes sont utilisés aux Etats Unis, au Japon, en Australie, en Inde et aussi en Chine. C'est un mode de culture qui est peu onéreux, sauf que la contamination est probable, ce qui ne permet pas de réaliser la culture de toutes les espèces.



**Figure IV.2 : Système de culture en extérieur du type Raceway [25] (à droite) et Schéma d'une vue de haut d'un étang ouvert (à gauche) [53].**

La culture de *Chlorella* est réussie dans les étangs. La figure IV.2 représente le schéma d'un étang, la roue à aube fonctionne continuellement afin d'assurer l'agitation du milieu et d'empêcher la sédimentation [52].

Le tableau IV.1 met en relief les paramètres des deux types d'étangs à ciel ouvert.

# Chapitre IV : Production du biodiesel à partir de microalgues

Tableau IV.1 : Les Paramètres des étangs à ciel ouvert de type Raceway [54].

Paramètres	Unités	Raceway type
Profondeur	m	0,3
Longueur	m	190
Largeur	m	20
Profondeur hydraulique	m	0,28
Surface de l'étang	ha	0,88
Volume de l'étang	m <sup>3</sup>	2651

## 3. 2. Les photobioréacteurs

Les photobioréacteurs sont différents types de réservoirs ou systèmes fermés, exposés à la lumière et dans lesquels les algues sont cultivées. Cette technologie a été principalement mise en œuvre pour surmonter certains facteurs limitants dans les systèmes d'étangs ouverts. Dans ce type de réacteurs, les paramètres de croissance d'algues sont contrôlés (pH, intensité lumineuse, température, concentration de dioxyde de carbone) et peuvent être optimisés pour une production maximale de biomasse [36]. La figure IV.3 suivante montre les différents types de photobioréacteurs.

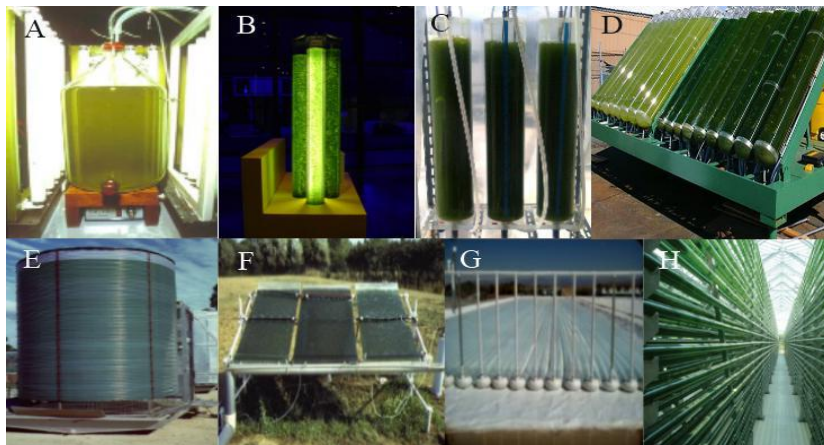


Figure IV.3 : Variété des configurations des photobioréacteurs : A Photobioréacteur à cuve agitée – B : Photobioréacteur de type colonne à bulle – C : Air-lift photobioréacteur – D : Photobioréacteur incliné – E : Photobioréacteur hélicoïdal tubulaire – F : photobioréacteur à plaque inclinée – G : Photobioréacteur horizontal commercial en cours de construction – H photobioréacteur tubulaire [44].



# Chapitre IV : Production du biodiesel à partir de microalgues

Le tableau IV.2 donne un aperçu sur les différences qui existent entre les deux configurations de production des microalgues.

**Tableau IV.2 : Comparaison entre les deux systèmes de culture [29].**

	<b>PBR</b>	<b>RACEWAY</b>
<b>Contrôle de la contamination</b>	Facile	Difficile
<b>Risque de contamination</b>	Réduit	Important
<b>Contrôle du process</b>	Facile	Difficile
<b>Contrôle des espèces d'algues</b>	Facile	Difficile
<b>Mélange</b>	Uniforme	Très faible
<b>Surface requise (m<sup>2</sup>)</b>	Faible	Elevée
<b>Densité des algues</b>	Elevé	Faible
<b>Investissement</b>	Elevé	Faible
<b>Coût du process</b>	Elevé	Faible
<b>Efficacité d'utilisation de la lumière</b>	Elevé	Faible
<b>Contrôle de la température</b>	Plus uniforme	Difficile
<b>Contrôle du transfert de gaz</b>	Elevé	Faible
<b>Concentration en biomasse</b>	3 à 5 fois plus concentrée	Moins concentrée
<b>Utilisation à grande échelle</b>	Facile	Difficile

## 4. La récolte des microalgues

La récolte des microalgues représente un facteur économique important pour la production de biodiesel puisqu'il s'agit d'une étape limitante dans la production de biocarburants. Certaines estimations permettent de conclure que la récolte représente 20 à 30% du coût total de production du biodiesel [25].

Les techniques de récupération de la biomasse peuvent être classées comme récolte primaire ou comme récolte secondaire. La récolte primaire se réfère à la séparation des cellules d'algues de leur milieu de croissance et peut être réalisée par sédimentation ou par floculation. Le produit de la récolte est une bouillie d'algues, avec une teneur totale en solides comprise entre 0,5 et 6 %. Les systèmes de récolte secondaire servent à épaissir la boue pour obtenir une teneur en solides totaux comprise entre 10 et 20% en utilisant la centrifugation ou la filtration [55].

# Chapitre IV : Production du biodiesel à partir de microalgues

## 4.1. La floculation

La floculation est utilisée pour agréger les cellules de microalgues dans le but d'augmenter la taille des particules. Elle facilite donc la sédimentation et la centrifugation. En général, le coût d'exploitation de la floculation est faible. Toutefois, ce procédé exige une longue période de traitement qui peut entraîner un risque de décomposition du produit bioréactif [56].

## 4.2. La sédimentation

La sédimentation est un procédé peu coûteux qui permet la séparation des cellules d'algues en utilisant les forces de gravitation. Ce processus engendre généralement une boue volumineuse, principalement en raison de la lenteur de la sédimentation. L'efficacité de la sédimentation varie entre 65% à 90% [57] si elle est précédée par une floculation [56].

## 4.3. La centrifugation

Pour les petites microalgues, c'est la centrifugation qui est le procédé le plus efficace. La centrifugation est un procédé de séparation qui utilise la force centrifuge pour séparer des solides en suspension dans des liquides. Alors que les systèmes de centrifugation sont très fiables et ont un pourcentage élevé de capture des solides, les coûts d'exploitation et d'entretien sont considérables. Une centrifugeuse consomme environ 3 000 kWh/tonne de biomasse sèche d'algues, ce qui peut limiter leur application pour le traitement de biocarburant issu d'algues [58]. Par conséquent, l'utilisation de la centrifugation peut être rentable pour récolter des produits de grande valeur mais demeure beaucoup trop coûteuse dans le cadre de la production de biocarburant à partir d'algues [56].

## 5. Le séchage des microalgues

Certains procédés demandent la déshydratation de la biomasse ce qui augmente également sa durée de vie et celle du produit final. Plusieurs méthodes ont été employées pour le séchage des microalgues telles que la *Chlorella*. Ces procédés courants sont le séchage par atomisation, le séchage dans des tambours, la lyophilisation et le séchage au soleil

- Le séchage solaire, qui est le plus ancien, consiste à étendre la pâte d'algues (figure IV.4) 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 chaleur et de matière 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,

## Chapitre IV : Production du biodiesel à partir de microalgues

- 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. Elle est, cependant, la plus consommatrice en énergie [59].



**Figure IV. 4 : Pâte algale.**

En raison de la teneur élevée en eau de la biomasse algale, le séchage au soleil n'est pas une méthode très efficace pour la production de poudre d'algues et le séchage par atomisation n'est pas économiquement faisable pour les produits de faible valeur comme les biocarburants [58].

Grace au séchage, la concentration de la biomasse passe de 15-25 % au moment de la récolte, à une concentration d'au moins 90 %. Par contre, le séchage nécessite beaucoup d'énergie. Quelle que soit la technologie utilisée, l'évaporation de 1 kg d'eau nécessite toujours le besoin d'au moins 800 kilocalories [60]. 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 biocarburants à partir d'algues.

### **6. L'extraction des lipides**

Il existe trois procédés d'extraction des huiles d'algue : le pressage mécanique, l'extraction par un solvant (hexane le plus souvent) et l'extraction au CO<sub>2</sub> supercritique.

Ces procédés nécessitent de l'énergie et possèdent des rendements différents. Dans le but d'obtenir quasiment 100 % de rendement, une combinaison de deux techniques peut être utilisée comme le pressage et l'extraction par solvant [61]. Cependant, de nouvelles approches dans l'extraction des lipides de microalgues sont nécessaires afin que le coût total de production de biodiesel devienne commercialement compétitif [56].

# Chapitre IV : Production du biodiesel à partir de microalgues

## 6.1. L'extraction par solvant

Pour les lipides, une extraction par solvant peut être effectuée directement à partir de la biomasse déshydratée. C'est une méthode d'extraction rapide et efficace qui réduit légèrement la dégradation des lipides. Plusieurs solvants peuvent être utilisés tels que l'hexane, l'éthanol (96%), ou un mélange hexane-éthanol (96%). Il est possible d'obtenir jusqu'à 98% d'extraction des acides gras purifiés [56,62].

## 6.2. Le pressage mécanique

Le pressage mécanique est une technique physique utilisée suite au séchage de la biomasse algale. Elle permet de récupérer de 70 à 75% de l'huile contenue dans les algues et est fréquemment utilisée en combinaison avec l'extraction par l'utilisation de solvants. C'est donc suite au pressage qu'une solution de cyclohexane peut être ajoutée pour extraire les huiles résiduelles. La combinaison de ces deux techniques permet d'atteindre une efficacité de récupération de 95% [56].

## 6.3. L'extraction au CO<sub>2</sub> supercritique

L'utilisation du CO<sub>2</sub> comme solvant permet aussi la récupération des huiles et il s'agit d'une méthode particulièrement efficace qui permet de récolter approximativement 100% de l'huile. Afin de permettre au CO<sub>2</sub> d'agir comme un solvant, celui-ci est liquéfié par l'application d'une pression importante et est chauffé afin que celui-ci puisse posséder les caractéristiques d'un gaz et d'un liquide simultanément. Cette technique d'extraction au CO<sub>2</sub> supercritique nécessite toutefois des appareils particuliers afin que la pression puisse être maintenue.

## 6.4. Les méthodes non conventionnelles

Certaines études ont été menées sur l'extraction des lipides utilisant les ultrasons et les microondes. En comparaison avec les méthodes conventionnelles, ces nouvelles méthodes peuvent grandement améliorer l'extraction des lipides avec une plus grande efficacité. Le temps d'extraction a été réduit et les rendements ont augmenté. Dans le cas de la microalgue *Cryptocodinium cohnii*, les ultrasons ont perturbé efficacement la paroi cellulaire améliorant considérablement le rendement d'extraction de 4,8% (en soxhlet) à 25,9% [63].

Le tableau IV.3 représente les différentes méthodes d'extraction avec leurs avantages et leurs inconvénients.

# Chapitre IV : Production du biodiesel à partir de microalgues

Tableau IV.3 : Les différentes méthodes d'extraction avec leurs avantages et leurs inconvénients [64].

Méthodes d'extraction	Avantages	Limites
<b>Pressage mécanique</b>	-Facile, -Pas d'utilisation de solvant.	-Une grande quantité d'échantillon, -Procédés lent.
<b>Extraction par solvant</b>	-Solvants utilisés peu coûteux avec possibilité de régénération.	-La plupart des solvants organiques sont très inflammables et toxiques, -La régénération du solvant est coûteuse et énergivore, -Un grand volume de solvant est nécessaire.
<b>Extraction par fluide super critique</b>	-Non toxique (absence de solvant organique dans le résidu ou extraits), -Non inflammable et simple en opération.	-Coûteux et utilisé pour des produits de hautes valeurs tels l'alimentation et les cosmétiques.

## 7. La conversion du biodiesel

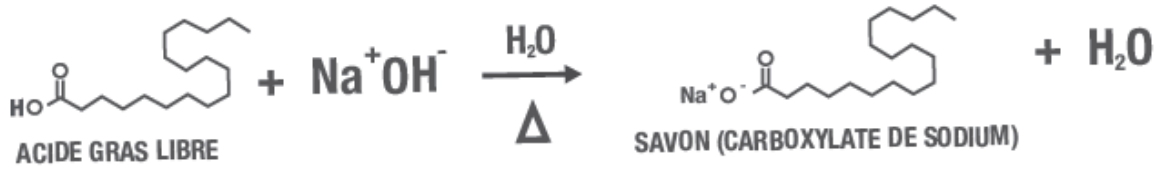
La transformation des lipides en biodiesel par transestérification en une étape nécessite la déshydratation préalable de la biomasse algale parce que l'eau est un inhibiteur de la réaction. Cette conversion chimique implique la transestérification des triglycérides en biodiesel qui peut se faire en présence d'un catalyseur. Il existe des catalyseurs homogènes ou hétérogènes, acides ou basiques qui améliorent le taux de conversion en biodiesel. La plupart des processus industriels utilisent des catalyseurs homogènes alcalins, par exemple NaOH ou KOH [65].

Généralement, après l'extraction de l'huile algale et avant sa conversion, une analyse du profil des acides gras dans l'huile est effectuée.

### 7.1. 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) et le résultat est la formation d'un sel de carboxylate, soit du savon (figure IV.5).

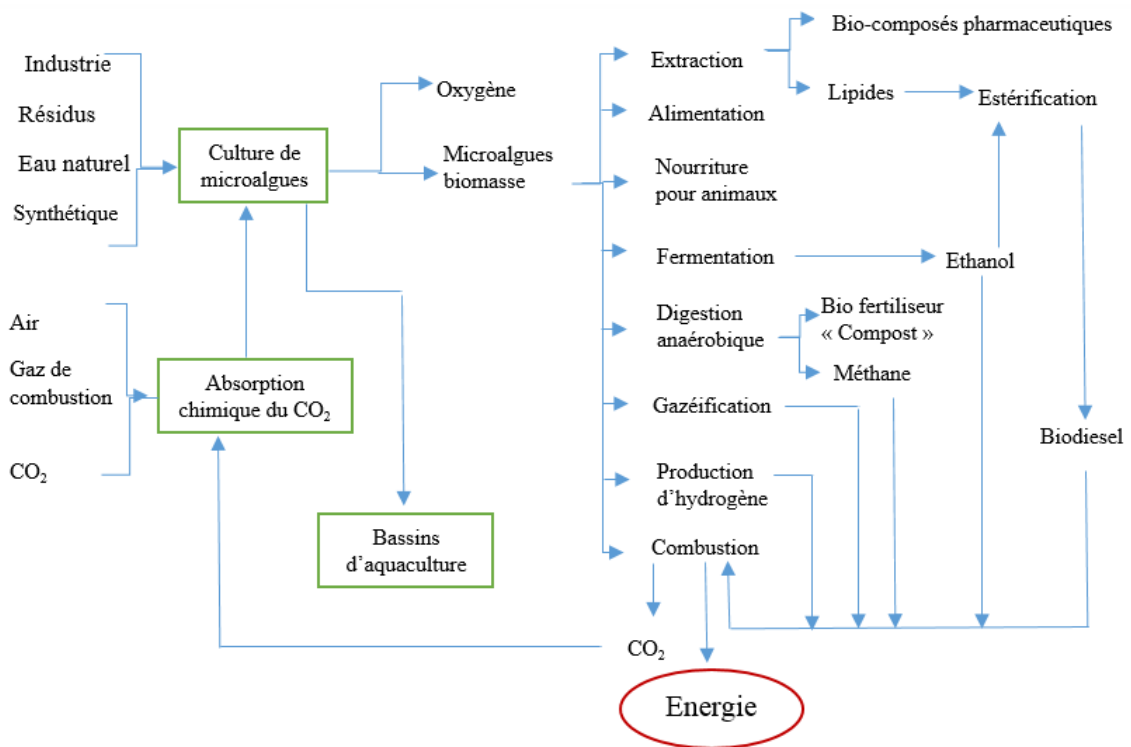
# Chapitre IV : Production du biodiesel à partir de microalgues



**Figure IV.5 : Réaction de saponification des acides gras [66].**

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 doit 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 [66].

Le diagramme représentant le potentiel des procédés de génération de la bioénergie à partir de microalgues est représenté sur la figure IV.6.



**Figure IV.6 : Schéma représentant le potentiel des procédés de génération de la bioénergie à partir de microalgues [41].**

# Chapitre IV : Production du biodiesel à partir de microalgues

## 8. Les avantages du biodiesel obtenu à partir de microalgues

Le biodiesel ainsi obtenu présente plusieurs avantages dont :

- L'absence de soufre,
- La non toxicité,
- La biodégradabilité,
- La possibilité d'utilisation des extraits d'huile d'algues comme aliments pour le bétail,
- La possibilité de transformation en éthanol,
- L'amélioration de son comportement au froid (point d'écoulement et point de trouble) du fait de la présence de niveaux élevés d'acides gras poly-insaturés dans le biodiesel [67].

Le tableau IV. 4 met en relief les différences de propriétés entre un diesel et un biodiesel issu de la *Chlorella Vulgaris*.

**Tableau IV.4 : Comparaison entre les propriétés d'un diesel et un biodiesel issu de *Chlorella Vulgaris* [68].**

Propriété	Biodiesel issu de <i>Chlorella Vulgaris</i>	Diesel	Norme du biodiesel		
			ASTM	EN 14214	IS 15607
<b>Densité à 15°C (kg/m<sup>3</sup>)</b>	881	850	-	860 – 900	870 – 900
<b>Viscosité à 40 °C (mm<sup>2</sup>/s)</b>	4,5	2,6	1,9 – 6.0	3,5 – 5.0	3,5 – 5.0
<b>Pouvoir calorifique (MJ/kg)</b>	38,4	42.2	-	-	-
<b>Indice de cétane</b>	54,7	49 – 55	≥ 47	≥ 51	≥ 51
<b>Teneur en eau (%)</b>	0,03	0,02	< 0,03	< 0,05	≤ 0,05

## Conclusion

Le biodiesel est un carburant alternatif qui a des propriétés similaires au diesel. Sa production nécessite le choix de technologies et de méthodes efficaces et rentables pour chaque phase. C'est pourquoi, il est nécessaire de bien connaître et comprendre les différents processus qui existent afin de faire un choix judicieux en termes de qualité et de coût.

# Chapitre V

## ACV de la production du Biodiesel à partir de microalgues



# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

## 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 micro algue verte nommée « *Chlorella Vulgaris* » et de les comparer avec les impacts environnementaux du diesel pétrolier.

#### 1.1.2 Public ciblé

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

### 1.2. Définition du champ de l'étude

#### 1.2.1. Le système

Notre système concerne la production du biodiesel de 3<sup>ème</sup> génération. 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 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 notre étude, nous nous limiterons aux étapes de production du biodiesel sans tenir compte de sa distribution et de l'impact de son utilisation (figure V.1).

##### a) Limites géographiques

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

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

## b) Catégories d'impact prises en compte

Dans le cas de cette étude, seuls les impacts du changement climatique et de l'utilisation de l'énergie non renouvelable ont été pris en considération. Les catégories de dommages sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes n'ont pas été prises en compte.

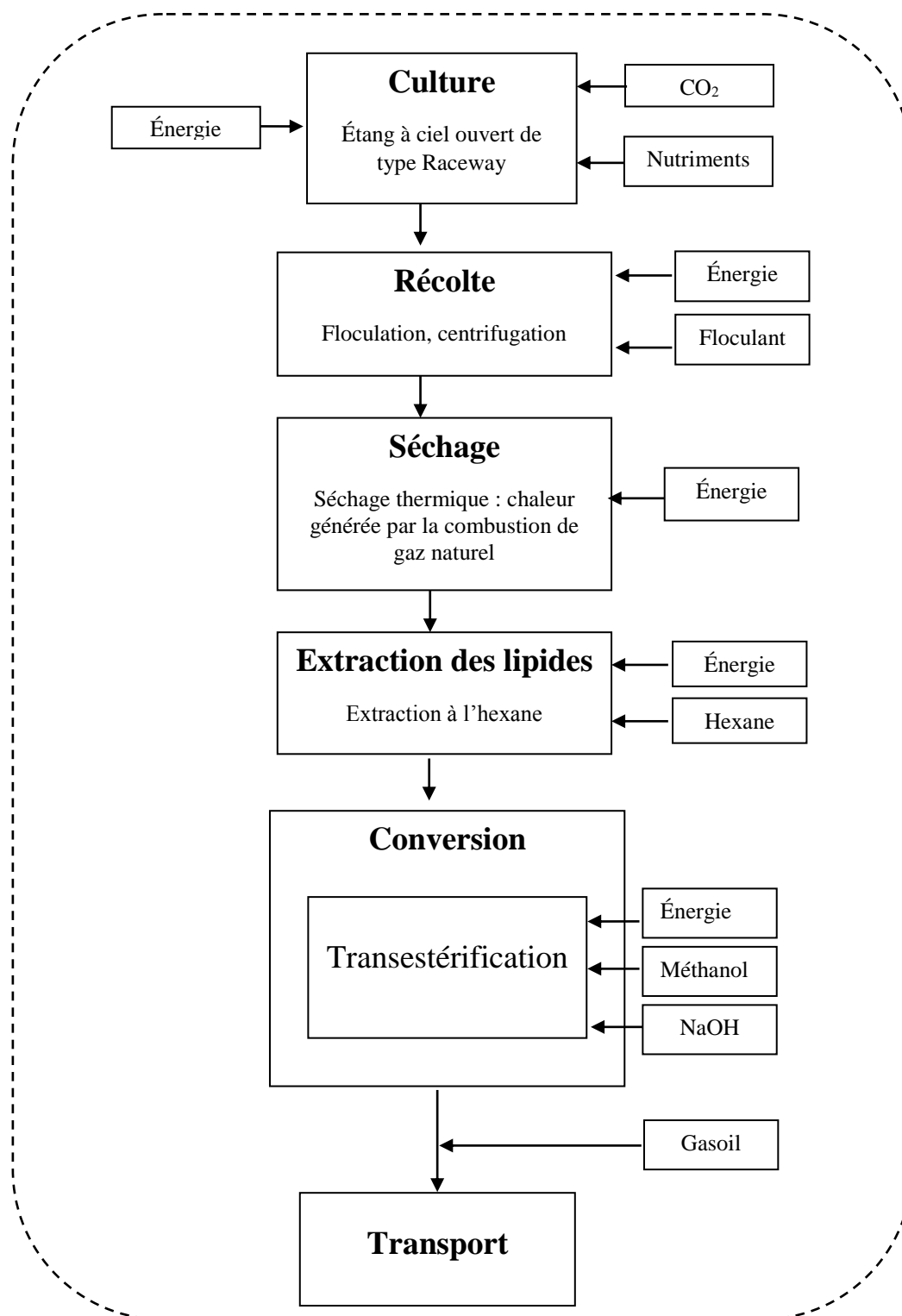


Figure V.1 : Schématisation des limites du système considéré.

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

## 2. Les hypothèses

### 2.1 Hypothèses de l'inventaire

- La productivité d'algues est estimée à 24 g/m<sup>2</sup>/jour [40],
- Le rendement du contenu des lipides dans la biomasse sèche est de 18%,
- Le rendement de la floculation est estimé à 72% [57],
- Le rendement de la centrifugation est estimé à 90% [57],
- Le rendement de l'extraction est estimé à 80% [57].

D'après ces hypothèses, pour avoir 1 tonne de biodiesel, il faut 11,25 tonnes d'algues soit près de 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% [69], les sécheurs 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 [71]. Donc, le contenu est inférieur à 5% [72] 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 conversion de l'huile algale en biodiesel est totale, rendement de 100%, soit la quantité de l'huile extraite est la même que celle du biodiesel « 1 tonne ».

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

- La distance de transport des inputs chimiques, de l'huile et du biodiesel est supposée ne pas dépasser 100 km.

## 2.2. Hypothèses des données Sima Pro

- Le type de fertilisants est choisi parmi ceux disponibles sur le marché Algérien, en l'occurrence le fertilisant « Fertial » :
  -  Sulfate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$  à 21% d'azote (Engrais azotés simple)
  -  Triple super phosphate TSP  $\text{P}_2\text{O}_5$  à 46%
  -  Sulfate de potassium  $\text{K}_2\text{O}$  à 50%
- Le  $\text{CO}_2$  utilisé est supposé issu d'une production industrielle. En raison de l'indisponibilité des données locales, nous avons utilisé des données européennes disponibles 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 du gaz naturel,
- La chaleur est principalement générée par la combustion du gaz naturel.
- La méthode utilisée pour l'évaluation des impacts est « IMPACT 2002+ ».

## 3. Inventaire du cycle de vie

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

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

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

Etape	Paramètre	Donnée	Unité	Références
<b>Culture Chlorella vulgaris</b>				
<b>Entrants chimiques</b>	L'azote	106,2	kg	[40]
	Le phosphore	32,30	kg	[40]
	Le potassium	13,8	kg	[40]
	Le CO <sub>2</sub>	10400	kg	[69]
<b>Energie</b>	L'énergie pour l'injection du CO <sub>2</sub>	312	kWh	[40]
	L'énergie pour l'agitation	2400	kWh	[40]
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	1055	tkm	

<b>Récolte de la biomasse algale</b>				
<b>Inputs chimiques</b>	Floculant (sulfate d'Aluminium)	260	kg	[54]
<b>Energie</b>	Floculation	0,5	GJ	
	Centrifugation	504	kWh	[40]
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	26	tkm	

<b>Extraction de l'huile algale</b>				
<b>Inputs chimiques pour l'extraction</b>	Hexane	3	kg	[54]
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	0,3	tkm	
<b>Energie pour l'extraction</b>	Chaleur	1,7	GJ	[54]
	Electricité	0,2	GJ	[54]
<b>Energie pour le séchage</b>	Chaleur	81,8	GJ	[69]
	Electricité	8,52	GJ	[69]

<b>Conversion de l'huile en biodiesel</b>				
<b>Entrants chimiques</b>	Méthanol	110	kg	[54]
	NaOH	10,5	kg	[70]
<b>Energie</b>	Chaleur	1,6	GJ	[54]
	Electricité	0,2	GJ	[54]
<b>Outputs</b>	Biodiesel	1	tonne	
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	112,05	tkm	

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

## 4. Arborescence du cycle de production du Biodiesel

L'arborescence du système est donnée en annexe 1.

## 5. Etude d'impact

### 5.1. Etude d'impact sur le changement climatique

#### 5.1.1. Bilan des émissions du CO<sub>2</sub> eq sur le cycle de vie de production du biodiesel

La figure V.2 montre la contribution des processus élémentaires sur l'impact du changement climatique du cycle de production du biodiesel et le tableau V.3 donne les résultats de leurs émissions en CO<sub>2</sub> eq et de leurs pourcentages de contribution.

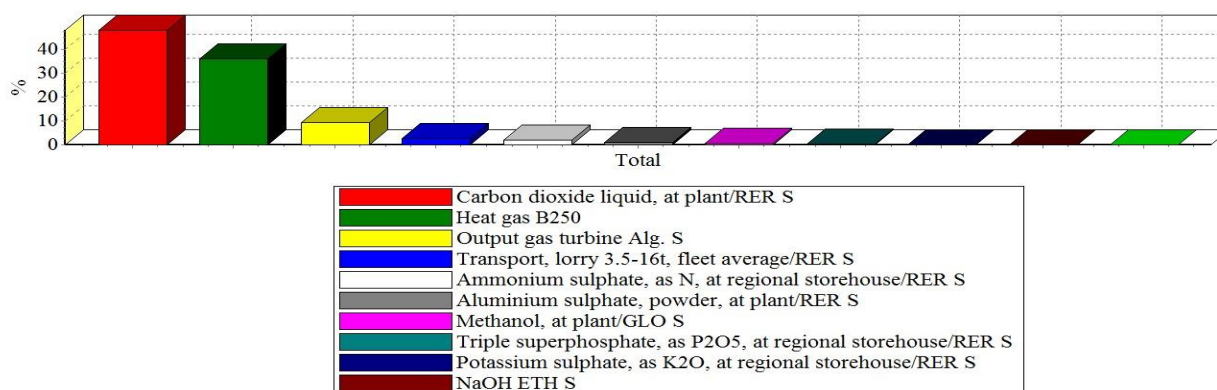


Figure V.2 : Contribution des processus élémentaires au changement climatique.

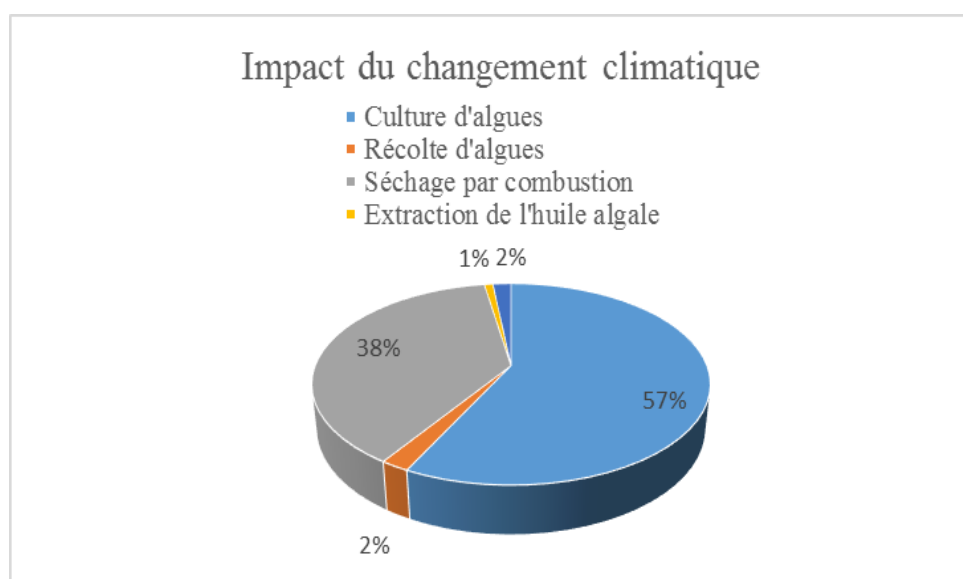
Tableau V.3 : Résultats des émissions en kg CO<sub>2</sub> eq et des pourcentages de contribution des processus élémentaires.

Paramètre	kg CO <sub>2</sub> eq	Pourcentage (%)
CO <sub>2</sub>	6630	48
Electricité	1270	9,16
Chaleur	4950	35,8
Transport	386	3
Sulfate d'ammonium	286	2
Triple super phosphate	65,3	0,5
Sulfate de potassium	20,4	0,15
Floculant	126	0,9
Hexane	2,62	0,02
Méthanol	73,6	0,5
NaOH	8,87	0,06
<b>Total</b>	<b>13800</b>	<b>100</b>

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

Le taux d'émissions CO<sub>2</sub>eq du cycle de vie de la production du biodiesel à partir des microalgues « *Chlorella vulgaris* » est évalué à 14 tonnes CO<sub>2</sub> eq.

A partir de la figure V.3 et du tableau V.3, il a été constaté que 48% des émissions de CO<sub>2</sub> sont dus à l'origine au CO<sub>2</sub> séquestré par les microalgues et 35 % reviennent à l'utilisation de la chaleur par combustion du gaz naturel.



**Figure V.3 : Contribution des différentes étapes du cycle de production du biodiesel à partir des microalgues sur les émissions en CO<sub>2</sub> eq.**

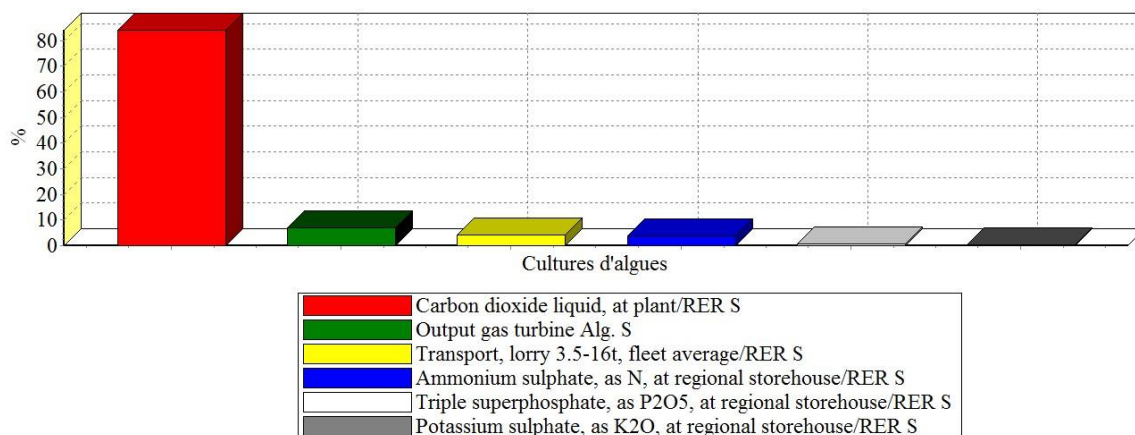
Il s'avère de ce fait que les étapes qui doivent être optimisées sont la culture avec une contribution de 57% et le séchage avec une contribution de 38%.

## 5.1.2. Contribution par étape de production durant le cycle de vie

### a. Culture d'algues

La figure V.4 montre la contribution des processus élémentaires sur l'impact du changement climatique généré par l'étape de culture des microalgues. Le tableau V.4 quant à lui met en évidence les résultats de leurs émissions en CO<sub>2</sub> eq et de leurs pourcentages de contribution.

## Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues



**Figure V.4 : Contribution des processus élémentaires au changement climatique durant l'étape Culture.**

**Tableau V.4 : Résultats des émissions en kg CO<sub>2</sub> eq et des pourcentages de contribution des processus élémentaires de l'étape culture.**

Paramètre	kg CO <sub>2</sub> eq	Pourcentage (%)
CO <sub>2</sub> (liquide industriel)	6630	83,6
Electricité : Electricité- Gaz naturel (Algérie)	589	7,43
Transport : Camion de 3,5-16t	341	4,3
Sulfate d'ammonium	286	3,61
Triple super phosphate	65,3	0,82
Sulfate de potassium	20,4	0,26
<b>Total</b>	<b>7931,7</b>	<b>100</b>

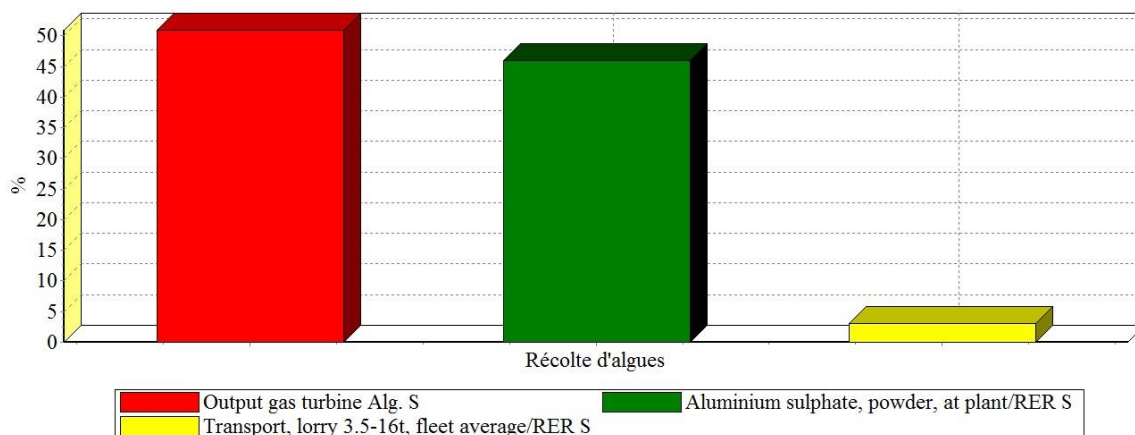
Le plus grand impact revient à l'utilisation du CO<sub>2</sub> industriel avec une contribution de plus de 80% dans l'étape de culture soit 6630 kg CO<sub>2</sub> eq suivie de l'énergie électrique consommée avec un pourcentage de 7% et des émissions de CO<sub>2</sub> de 589 kg CO<sub>2</sub> eq.

### **b. Récolte d'algues**

La figure V.5 montre la contribution des processus élémentaires sur l'impact du changement climatique généré par l'étape de récolte des microalgues. Le tableau V.5 donne les résultats de leurs émissions en CO<sub>2</sub> eq et de leurs pourcentages de contribution.



## Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues



**Figure V.5 : Contribution des processus élémentaires au changement climatique durant l'étape de Récolte.**

**Tableau V.5 : Résultats des émissions en kg CO<sub>2</sub> eq et des pourcentages de contribution des processus élémentaires de l'étape de récolte.**

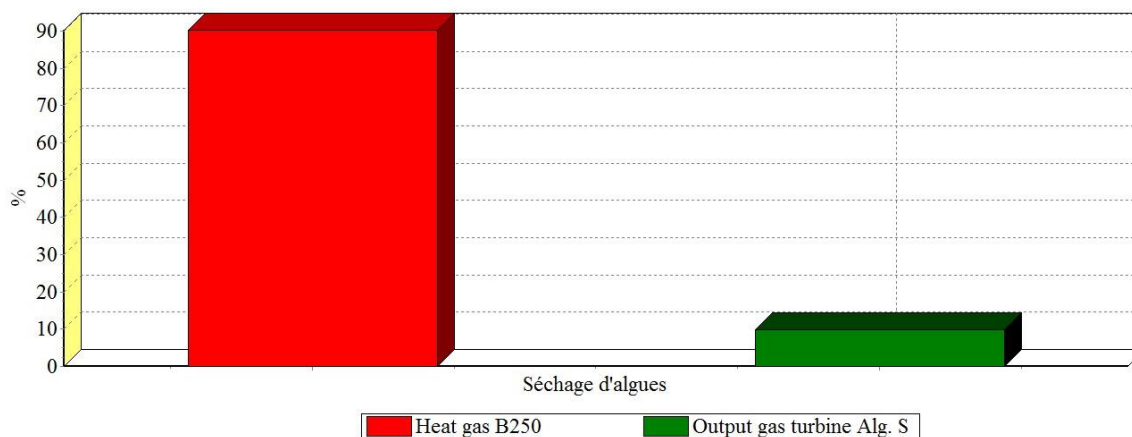
Paramètre	kg CO <sub>2</sub> eq	Pourcentage (%)
<b>Electricité : Electricité- Gaz naturel (Algérie)</b>	140	51
<b>Transport : Camion de 3,5-16t</b>	8,4	3
<b>Floculant : Sulfate d'aluminium</b>	126	46
<b>Total</b>	274	100

Contrairement à l'étape de culture, la récolte n'a pas un grand impact sur les émissions du CO<sub>2</sub> eq. Toutefois le processus élémentaire qui contribue le plus dans cette étape est l'utilisation de l'électricité pour la centrifugation et la floculation générée par la combustion du gaz naturel avec 51% suivie de l'utilisation du floculant qui est d'origine industrielle avec une contribution de 46%.

### c. Séchage d'algues

La figure V.6 montre la contribution des processus élémentaires sur l'impact du changement climatique généré par l'étape de séchage des microalgues. Le tableau V.6 donne les résultats de leurs émissions en CO<sub>2</sub> eq et de leurs pourcentages de contribution.

## Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues



**Figure V.6 : Contribution des processus élémentaires au changement climatique durant l'étape Séchage.**

**Tableau V.6 : Résultats des émissions en kg CO<sub>2</sub> eq et des pourcentages de contribution des processus élémentaires de l'étape séchage.**

Paramètre	kg CO <sub>2</sub> eq	Pourcentage (%)
Electricité : Electricité- Gaz naturel (Algérie)	514	9,7
Chaleur par la combustion du gaz naturel	4760	90,3
<b>Total</b>	<b>5280</b>	<b>100</b>

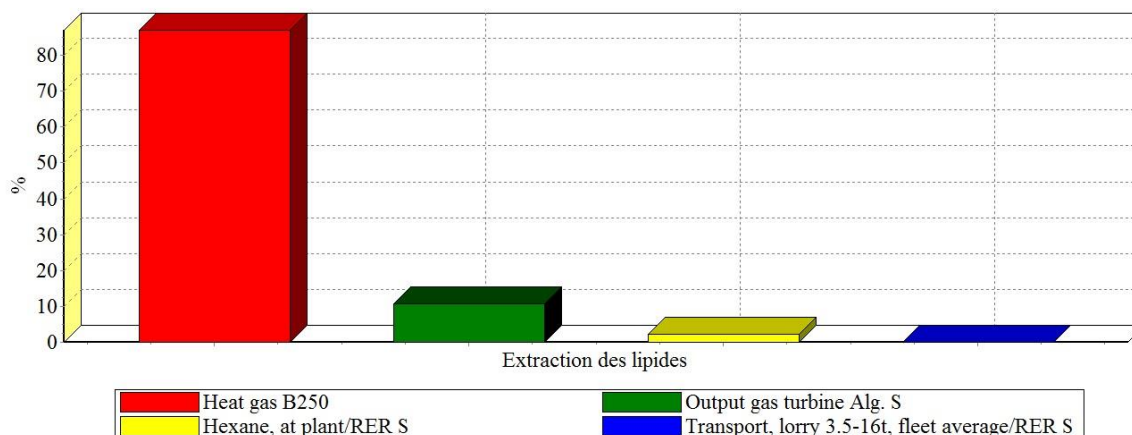
Cette étape est très énergivore mais afin d'augmenter la qualité des lipides et le rendement de l'extraction, le séchage est souvent nécessaire dans le processus de production du biodiesel à partir de microalgues.

Les émissions en CO<sub>2</sub> eq reviennent à 90% à la chaleur dégagée par la combustion du gaz naturel. Ils sont estimés à 4760 kg CO<sub>2</sub> eq.

### **d. Extraction de l'huile algale**

La figure V.7 montre la contribution des processus élémentaires sur l'impact du changement climatique généré par l'étape d'extraction de l'huile algale. Le tableau V.7 montre les résultats de leurs émissions en CO<sub>2</sub> eq et leurs pourcentages de contribution.

## Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues



**Figure V.7 : Contribution des processus élémentaires au changement climatique durant l'étape d'Extraction des lipides.**

**Tableau V.7 : Résultats des émissions en kg CO<sub>2</sub> eq et des pourcentages de contribution des processus élémentaires d'extraction des lipides.**

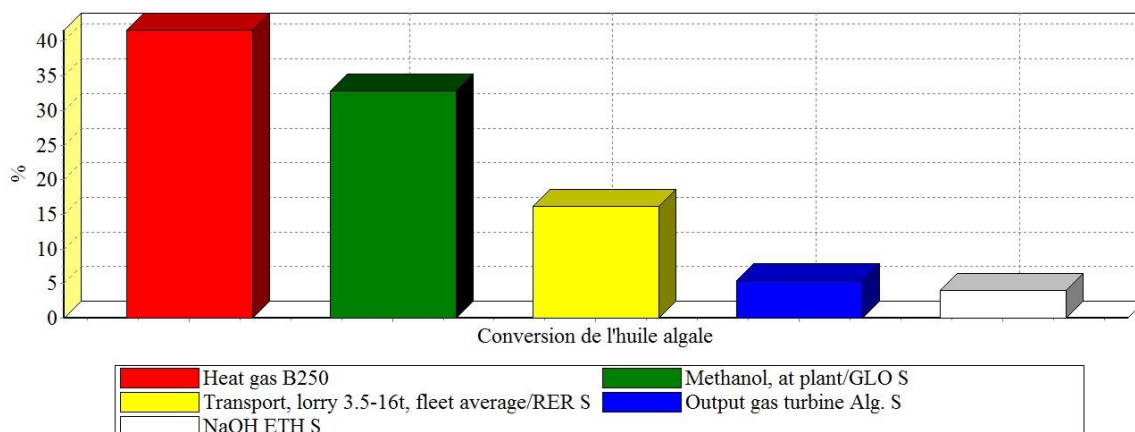
Paramètre	kg CO <sub>2</sub> eq	Pourcentage (%)
Electricité : Electricité- Gaz naturel (Algérie)	12,1	10,6
Chaleur par la combustion du gaz naturel	99	87
Hexane industriel	2,62	2,3
Transport : Camion de 3,5-16t	0,1	0,1
<b>Total</b>	<b>114</b>	<b>100</b>

Cette étape a un faible taux de contribution sur l'impact du changement climatique durant le cycle de production du biodiesel à partir de microalgues avec un taux d'émission de 114 kg CO<sub>2</sub> eq essentiellement généré par la chaleur utilisée lors de la régénération du solvant.

### **e. Conversion de l'huile en biodiesel (Transestérification)**

La figure V.8 montre la contribution des processus élémentaires sur l'impact du changement climatique généré par l'étape de conversion de l'huile algale en biodiesel. Le tableau V.8 donne les résultats de leurs émissions en CO<sub>2</sub> eq et de leurs pourcentages de contribution.

## Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues



**Figure V.8 : Contribution des processus élémentaires au changement climatique durant l'étape Conversion des lipides.**

**Tableau V.8 : Résultats des émissions en kg CO<sub>2</sub> eq et des pourcentages de contribution des processus élémentaires de l'étape de conversion.**

Paramètre	kg CO <sub>2</sub> eq	Pourcentage (%)
Transport : Camion de 3,5-16t	12,1	5,4
Chaleur par la combustion du gaz naturel	93,2	41,6
Méthanol industriel	73,6	33
NaOH industriel	8,87	4
Transport : Camion de 3,5-16t	36,2	16
<b>Total</b>	<b>244</b>	<b>100</b>

Dans cette étape, les plus grandes émissions reviennent à l'utilisation de la chaleur générée par la combustion du gaz naturel soit 93,2 Kg CO<sub>2</sub> eq et aux émissions de la production du méthanol soit 73,6 Kg CO<sub>2</sub> eq.

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

## 5.2. Etude d'impact sur les ressources énergétiques

### 5.2.1. Bilan des ressources énergétiques sur le cycle de vie de production du biodiesel

Ce bilan est schématisé par la figure V.9 sur la base des valeurs consignées dans le tableau V.9.

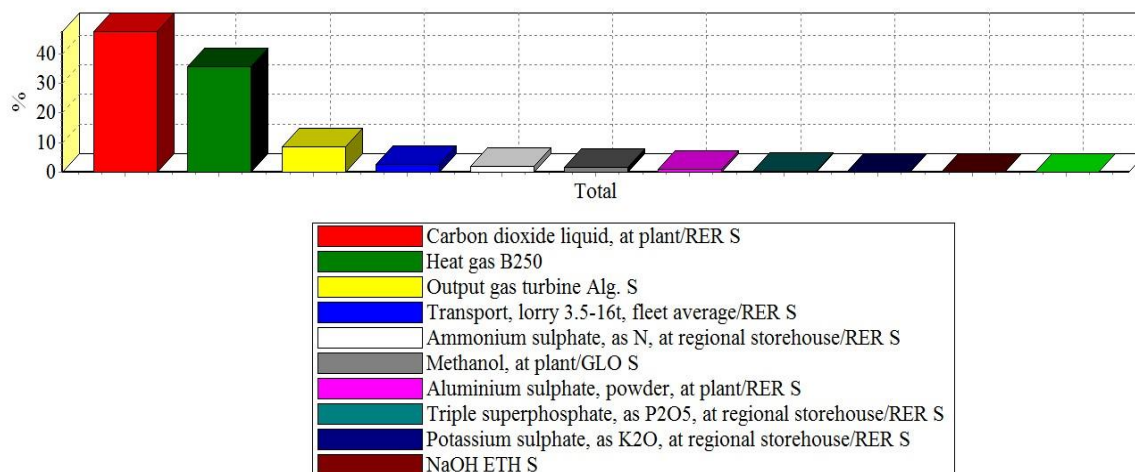


Figure V.9 : Contribution des processus élémentaires (en%) à la consommation d'énergie primaire durant le cycle de vie du biodiesel.

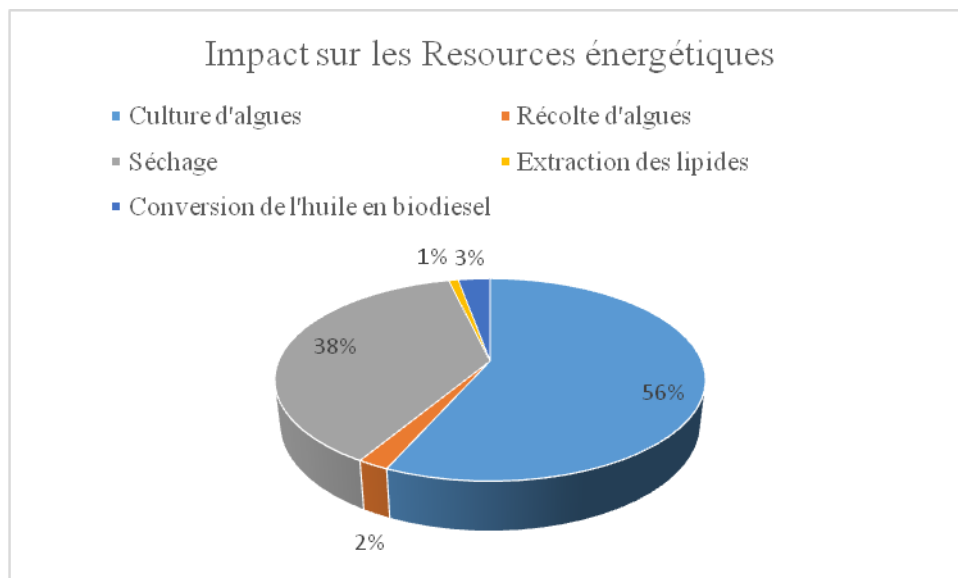
Tableau V.9 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires dans le cycle de vie du biodiesel.

Processus élémentaire	Energie primaire(GJ)	Pourcentage (%)
<b>CO<sub>2</sub> (liquide industriel)</b>	116	47,6
<b>Azote : sulfate d'ammonium</b>	5,07	2,07
<b>Phosphore : Triple super phosphate</b>	1,09	0,45
<b>Potassium : sulfate de potassium</b>	0.35	0,15
<b>Sulfate d'aluminium (floculant)</b>	2,43	1
<b>Hexane industriel</b>	0.19	0,08
<b>Méthanol industriel</b>	4,32	1,77
<b>NaOH</b>	0.20	0,08
<b>Electricité : Electricité- Gaz naturel (Algérie)</b>	21	8,62
<b>Chaleur par la combustion de gaz naturel</b>	86,8	35,5
<b>Transport : camion de 3.5 -16t</b>	6,58	2,69
<b>Total</b>	<b>244</b>	<b>100</b>

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

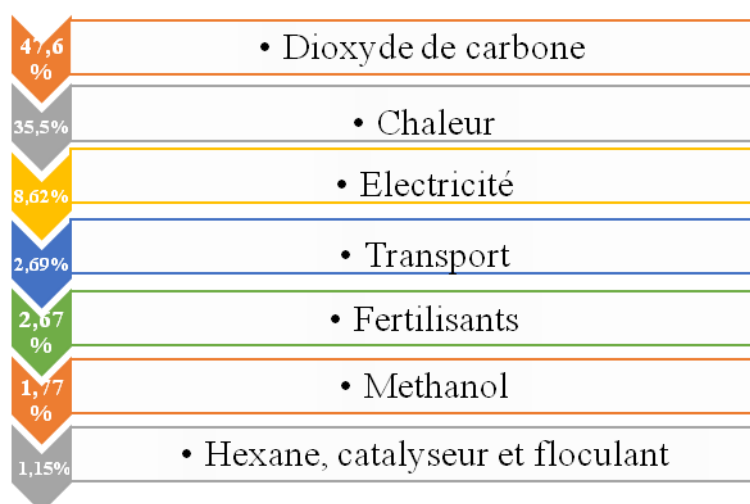
L'énergie primaire totale du cycle de vie de production du biodiesel est de 243 GJ.

D'après cette analyse, les étapes qui ont le plus d'impact en terme de consommation d'énergie primaire sont la culture avec 56% et le séchage avec 38% comme le montre la figure V.10.



**Figure V.10 : Contribution (en %) des différentes étapes du cycle de vie de production du biodiesel à partir de microalgues à la consommation d'énergie primaire.**

Le classement des processus de fabrication du biodiesel par ordre décroissant par rapport à leur impact en termes de consommation d'énergie primaire est représenté par la figure V.11.



**Figure V.11 : Classement des processus de fabrication du biodiesel par ordre décroissant par rapport à leur contribution (en %) à la consommation d'énergie primaire.**

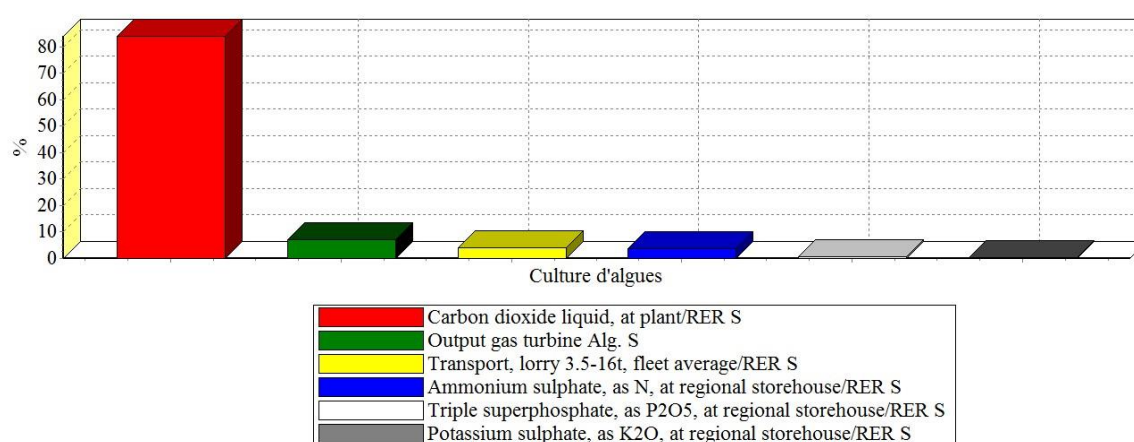
# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

Par conséquent, les processus qui ont le plus d'impact sont : le dioxyde de carbone avec 47,6% et la chaleur fournie par le gaz naturel avec 35,5%.

## 5.2.2. Contribution par étape de production durant le cycle de vie

### a. Culture d'algues

La figure V.12 montre la contribution des processus élémentaires durant l'étape de culture des microalgues à la consommation d'énergie primaire et le tableau V.11 donne la consommation d'énergie primaire et le pourcentage de contribution de chaque processus élémentaire.



**Figure V.12 : Contribution des processus élémentaires (en%) à la consommation d'énergie primaire durant l'étape de culture.**

**Tableau V.10 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires durant l'étape de culture.**

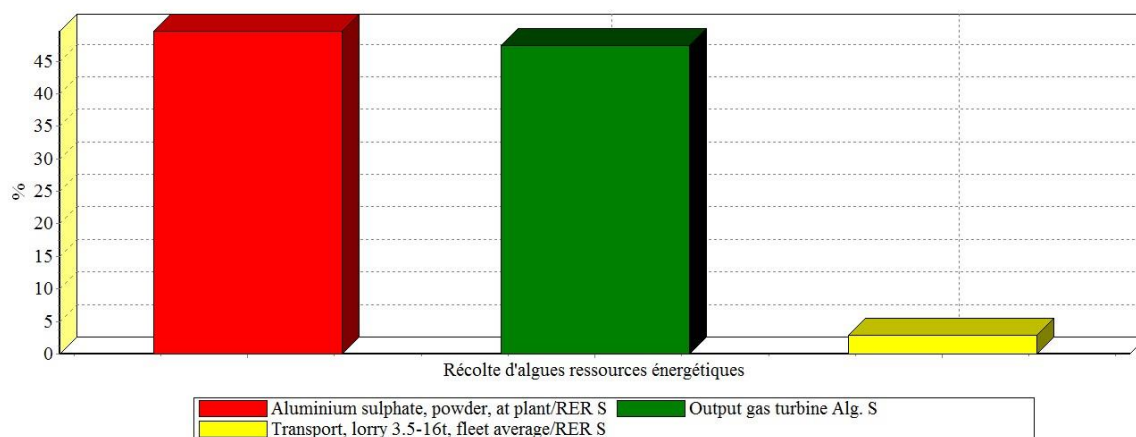
Processus élémentaire	Energie primaire (GJ)	Pourcentage (%)
CO <sub>2</sub> (liquide industriel)	116	84
Azote : sulfate d'ammonium	5,06	3,66
Phosphore : Triple super phosphate	1,09	0,79
Potassium : sulfate de potassium	0,35	0,26
Electricité : Electricité- Gaz naturel (Algérie)	9,79	7,08
Transport : Camion de 3,5-16t	5,81	4,20
<b>Total</b>	<b>138</b>	<b>100</b>

## Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

Le dioxyde de carbone industriel fourni pour la croissance des microalgues est le processus élémentaire qui a le plus d'impact en terme de consommation d'énergie primaire avec 116 GJ soit 84% des impacts de l'étape de culture.

### b. Récolte d'algues

La figure V.13 montre la contribution des processus élémentaires durant l'étape de récolte des microalgues à la consommation d'énergie primaire et le tableau V.12 donne la consommation d'énergie primaire et le pourcentage de contribution de chaque processus élémentaire.



**Figure V.13 : Contribution des processus élémentaires (en%) à la consommation d'énergie primaire durant l'étape de récolte.**

**Tableau V.11 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires durant l'étape de récolte.**

Processus élémentaire	Energie primaire (GJ)	Pourcentage (%)
<b>Floculant : Sulfate d'aluminium</b>	2,43	49,8
<b>Electricité : Electricité- Gaz naturel (Algérie)</b>	2,31	47,3
<b>Transport : Camion de 3,5-16t</b>	0,14	2,94
<b>Total</b>	4,88	100

Le floculant « sulfate d'aluminium » et l'électricité sont les processus élémentaires qui ont le plus d'impact dans l'étape de récolte des microalgues en terme de consommation d'énergie

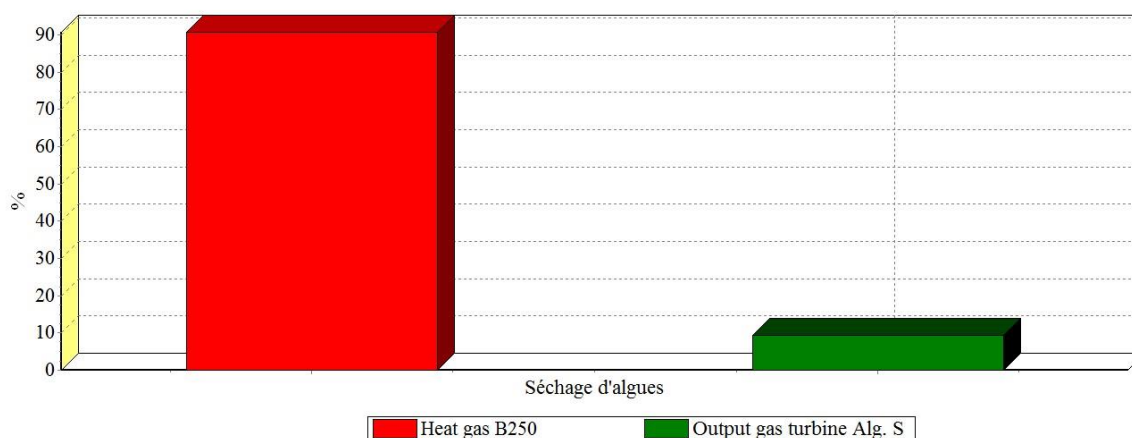


## Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

primaire avec presque la même contribution respectivement 2,43 et 2,31 GJ soit 49,8 et 47,3 % de contribution.

### c. Séchage d'algues

La figure V.14 montre la contribution des processus élémentaires durant l'étape de séchage des microalgues à la consommation d'énergie primaire et le tableau V.13 met en relief la consommation d'énergie primaire et le pourcentage de contribution de chaque processus élémentaire.



**Figure V.14 : Contribution des processus élémentaires (en%) à la consommation d'énergie primaire durant l'étape de séchage.**

**Tableau V.12 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires durant l'étape de séchage.**

Processus élémentaire	Energie primaire(GJ)	Pourcentage (%)
<b>Chaleur par la combustion de gaz naturel</b>	83,4	90,7
<b>Electricité : Electricité- Gaz naturel (Algérie)</b>	8,55	9,3
<b>Total</b>	92	100

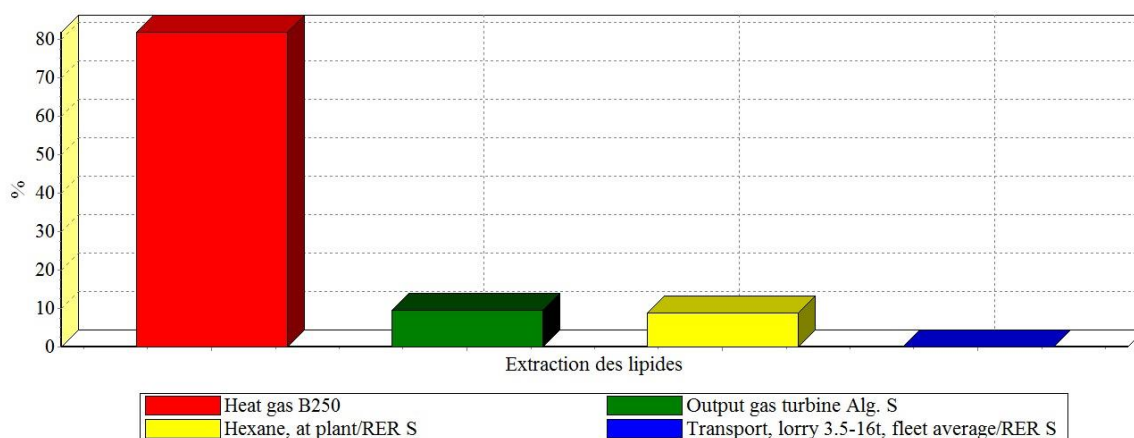
La chaleur fournie au séchage par la combustion de gaz naturel est le processus élémentaire qui a le plus d'impact avec 83,1 GJ soit 90,7% de contribution dans l'étape de séchage.

### d. Extraction des lipides

La figure V.15 montre la contribution des processus élémentaires durant l'étape d'extraction de l'huile algale à la consommation d'énergie primaire et le tableau V.14 met en

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

évidence la consommation d'énergie primaire et le pourcentage de contribution de chaque processus élémentaire.



**Figure V.15 : Contribution des processus élémentaires (en%) à la consommation d'énergie primaire durant l'étape d'extraction des lipides.**

**Tableau V.13 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires durant l'étape d'extraction des lipides.**

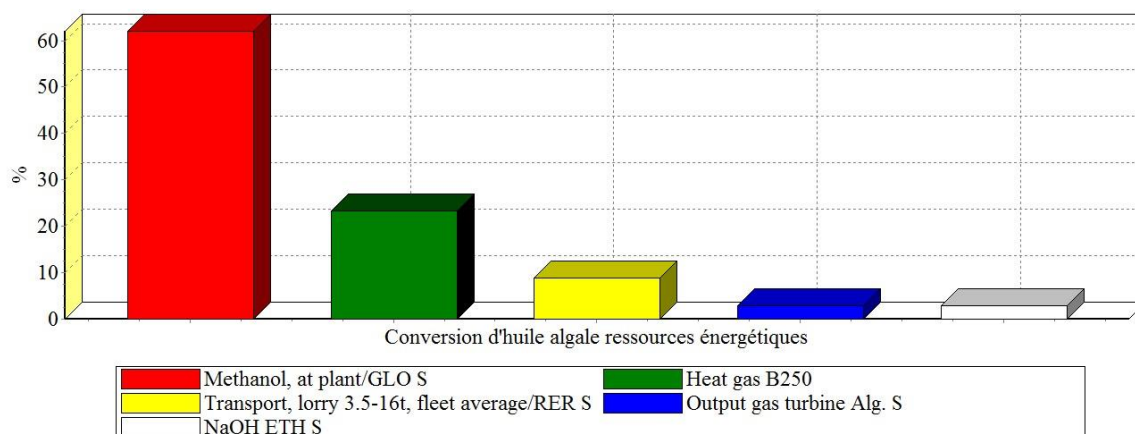
Processus élémentaire	Energie primaire (GJ)	Pourcentage (%)
Hexane industriel	0.19	8.71
Chaleur par la combustion de gaz naturel	1,73	81.7
Electricité : Electricité- Gaz naturel (Algérie)	0.20	9.46
Transport : Camion de 3,5-16t	0.002	0.09
<b>Total</b>	<b>2,12</b>	<b>100</b>

La chaleur fournie pour la distillation afin de séparer le mélange huile-hexane est le processus élémentaire qui a le plus d'impact avec 1,73 GJ soit 81,7% de contribution dans l'étape de d'extraction.

## Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

### e. Conversion de l'huile en biodiesel (Transestérification)

La figure V.16 montre la contribution des processus élémentaires de l'étape de conversion de l'huile algale en biodiesel dans l'impact en ressources énergétiques et le tableau V.15 donne les résultats en énergie et leurs pourcentages de contribution.



**Figure V.16 : Contribution des processus élémentaires (en%) à la consommation d'énergie primaire durant l'étape de conversion des lipides.**

**Tableau V.14 : Consommation d'énergie primaire (en GJ) et contribution (en %) des processus élémentaires durant l'étape de conversion des lipides.**

Processus élémentaire	Energie primaire (GJ)	Pourcentage (%)
Méthanol industriel	4,32	62
NaOH	0,20	2,84
Chaleur par la combustion de gaz naturel	1,63	23,4
Electricité : Electricité- Gaz naturel (Algérie)	0,20	2,88
Transport : Camion de 3,5-16t	0,62	8,86
<b>Total</b>	<b>6,97</b>	<b>100</b>

Le méthanol a le plus grand impact dans l'étape de conversion avec 4,32 GJ soit 62% de contribution, suivie de la chaleur fournie à ce procédé qui contribue avec 1,63 GJ soit 23,4%.

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

## 5.2.3. Calcul du ratio énergétique

Le tableau V.15 donne le bilan énergétique du cycle de vie de production du biodiesel et mentionne le ratio énergétique ou rendement de production de biodiesel calculé par le biais de la formule ci-dessous.

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

**Tableau V.15 : Bilan énergétique récapitulatif du cycle de vie de production du biodiesel (GJ).**

<b>Etape</b>	<b>Processus</b>	<b>Energie (GJ)</b>
<b>Energie pour la culture</b>	L'énergie pour l'injection du CO <sub>2</sub>	1,12
	L'énergie pour l'agitation	8,64
<b>Energie pour la récolte</b>	Floculation	0,5
	Centrifugation	1,8
<b>Energie pour le séchage</b>	Chaleur	81,8
	Electricité	8,52
<b>Energie pour l'extraction</b>	Chaleur	1,7
	Electricité	0,2
<b>Energie pour la conversion</b>	Chaleur	1,6
	Electricité	0,2
<b>Total énergie input</b>	Total	106,08
<b>Energie output</b>	1 tonne de Biodiesel	38,4
<b>Ratio énergétique</b>		0,36

Nous remarquons que la quantité d'énergie produite par le biodiesel est très inférieure à celle fournie pour sa fabrication.

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

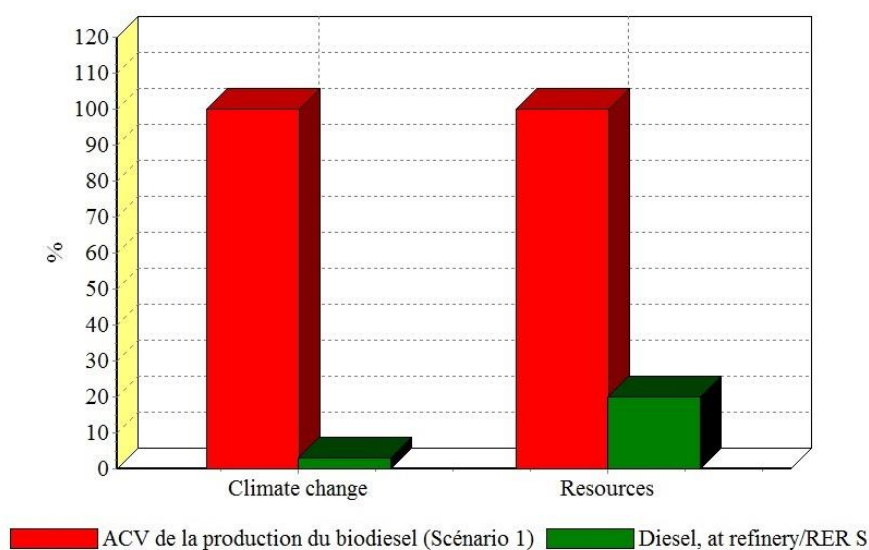
## 2. Comparaison entre le biodiesel et le Diesel

Les différents paramètres de comparaison entre l'ACV de la production du biodiesel à partir de microalgues et la production du Diesel sont donnés dans le tableau V.16.

**Tableau V.16 : Les différents paramètres de comparaison entre l'ACV de la production du biodiesel à partir de microalgues et la production du Diesel.**

Produit	Processus sur Simapro	Pouvoir calorifique MJ/kg	Quantité kg	Emissions kg CO <sub>2</sub> eq	Energie primaire GJ
Diesel	Diesel raffinerie	42,8 (Ecoinvent)	897	405	48,5
Biodiesel issu de « <i>Chlorellavulgaris</i> »	L'ACV réalisée	38,4 [68]	1000	13800	245

Pour pouvoir comparer en terme de quantité d'énergie produite, il faut considérer 897 kg de Diesel.



**Figure V.17 : Comparaison pour les deux catégories d'impacts du changement climatique et des ressources énergétiques entre le biodiesel issu de la « *Chlorella vulgaris* » et le diesel.**

D'après ce scénario, le diesel a moins d'impact sur le changement climatique et la consommation d'énergie primaire que le biodiesel.

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

## 3. Scénario de valorisation énergétique de la biomasse résiduelle

D'après la comparaison entre le cycle de production du biodiesel et celui du diesel, il a été constaté que la production du biodiesel a plus d'impact que le diesel.

D'après les résultats de l'analyse d'impacts de la production du biodiesel et de la comparaison, il faut agir sur les processus élémentaires : CO<sub>2</sub> fourni dans l'étape de culture et la chaleur nécessaire pour le séchage.

### 7.1. Le système

Notre système concerne la production du biodiesel de 3<sup>ème</sup> 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 combustion de la biomasse résiduelle,
- la conversion de l'huile par transestérification,
- Le transport du biodiesel.

### 7.2. Les hypothèses

Les hypothèses du scénario de base sont maintenues et de plus, nous avons :

- La biomasse résiduelle contient 50% du CO<sub>2</sub> séquestré,
- La biomasse sèche est estimée à 6000 kg par rapport aux rendements de la floculation, de la centrifugation et du 1<sup>er</sup> séchage,
- Le pouvoir calorifique de la combustion d'1kg de biomasse algale résiduelle sèche génère 15,8 MJ [73].
- Les émissions du CO<sub>2</sub> dégagé par la combustion seront égales à la quantité du CO<sub>2</sub> séquestrée dans la biomasse résiduelle sèche soit 3000 kg de CO<sub>2</sub>,
- L'épuration des fumées pour l'obtention du CO<sub>2</sub> n'est pas prise en compte.
- L'oxygène nécessaire pour la combustion est fourni à partir de l'air. La combustion est totale avec un excès d'air,
- La cendre générée par la combustion de la biomasse résiduelle représente près de 5,3% [74] sera valorisé comme fertilisant pour la culture d'algues tout en assurant un apport de fertilisants industriels, qui sera injecté pour la culture d'algues.

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

La figure V.18 schématise les limites du système considéré.

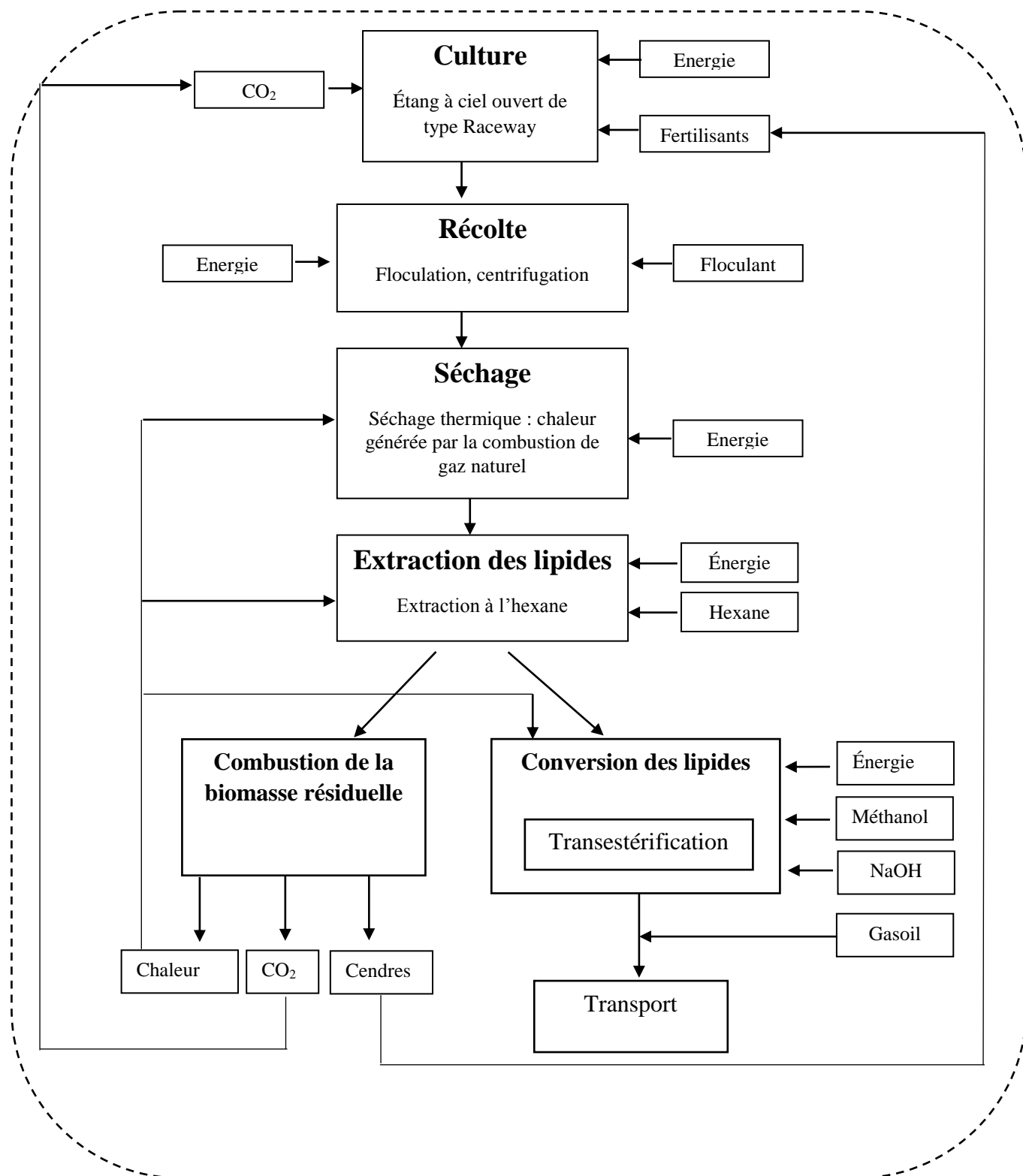


Figure V.18 : Schématisation des limites du système considéré.

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

## 7.3. Inventaire du cycle de vie avec valorisation de la biomasse résiduelle

Le tableau V.17 donne l'inventaire de l'ACV du biodiesel à partir de microalgues avec valorisation énergétique de la biomasse algale résiduelle.

**Tableau V.17 : Inventaire de l'ACV du biodiesel à partir de microalgues avec valorisation énergétique de la biomasse algale résiduelle.**

Etape	Paramètre	Donnée	Unité	Références
<b>Culture <i>Chlorella vulgaris</i></b>				
<b>Entrants chimiques</b>	Le CO <sub>2</sub>	7400	kg	Sénario1 – 50% de la biomasse sèche
	Le phosphore	16,15	kg	50% du scénario 1
	Le potassium	6,9	kg	50% du scénario 1
	L'azote	53,1	kg	50% du scénario 1
<b>Energie</b>	L'énergie pour l'injection du CO <sub>2</sub>	312	kWh	[40]
	L'énergie pour l'agitation	2400	kWh	[40]
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	748	tkm	
<b>Récolte de la biomasse algale</b>				
<b>Entrants chimiques</b>	Floculant (sulfate d'Aluminium)	260	kg	[54]
<b>Energie</b>	Floculation	0,5	GJ	
	Centrifugation	504	kWh	[40]
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	26	tkm	
<b>Extraction de l'huile algale</b>				
<b>Inputs chimiques pour l'extraction</b>	Hexane	3	kg	[54]
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	0,3	tkm	
<b>Energie pour l'extraction</b>	Chaleur	--	GJ	[54]
	Electricité	0,2	GJ	
<b>Energie pour le séchage</b>	Chaleur	--	GJ	[69]
	Electricité	8,52	GJ	
<b>Combustion de la biomasse algale résiduelle</b>				
<b>Cendre</b>	Fertilisants	320	kg	valorisé
<b>Output chimique</b>	CO <sub>2</sub>	3000	kg	valorisé
<b>Energie output</b>	Chaleur	86,9	GJ	valorisé
<b>Conversion de l'huile en biodiesel</b>				
<b>Entrants chimiques</b>	Méthanol	110	kg	[54]
	NaOH	10,5	kg	[70]
<b>Energie</b>	Chaleur	--	GJ	[54]
	Electricité	0,2	GJ	
<b>Outputs</b>	Biodiesel	1	tonne	
	Chaleur valorisée	1,8	GJ	
<b>Transport</b>	Pour une distance de 100 km	112,05	tkm	



# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

L'arborescence représentant l'ACV du scénario de valorisation de la biomasse algale résiduelle est donnée en Annexe 2.

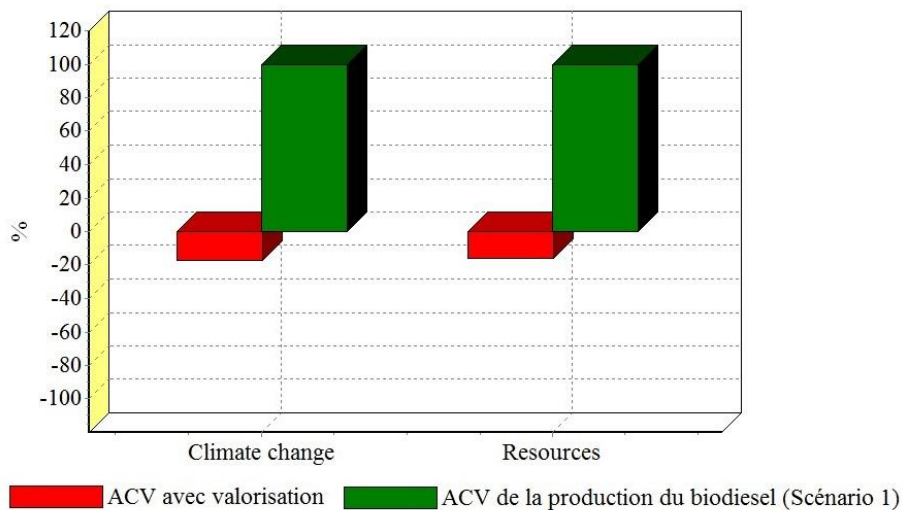
La quantité d'énergie nécessaire pour la fabrication du biodiesel avec valorisation énergétique est de 21GJ soit 5 fois moins que la quantité utilisée pour notre scénario de base estimé à 106 GJ.

La quantité d'énergie produite dans ce cas avec un gain de chaleur de 1,8GJ est estimé à :  $38,4 + 1,8 = 40,2$  GJ, d'où le ratio énergétique :

$$\text{Ratio énergétique} = \frac{\text{Energie output}}{\text{Energie input}} = \frac{40,2}{21} = 1,9$$

Nous constatons que la quantité d'énergie produite fait le double de notre quantité d'énergie consommée, donc le procédé avec valorisation est rentable.

## 7.4. La comparaison avec le scénario de valorisation de la biomasse résiduelle



**Figure V.19 : Comparaison entre le biodiesel issu de la « *Chlorellavulgaris* » sans valorisation et avec valorisation de la biomasse algale résiduelle.**

D'après la figure V.19, nous remarquons que le scénario de valorisation de la biomasse algale par combustion économise 120% des ressources et réduit l'impact engendré par les émissions des gaz à effet de serre (exprimée par kg CO<sub>2</sub> eq) jusqu'à 120% par rapport au scénario de base.

## Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

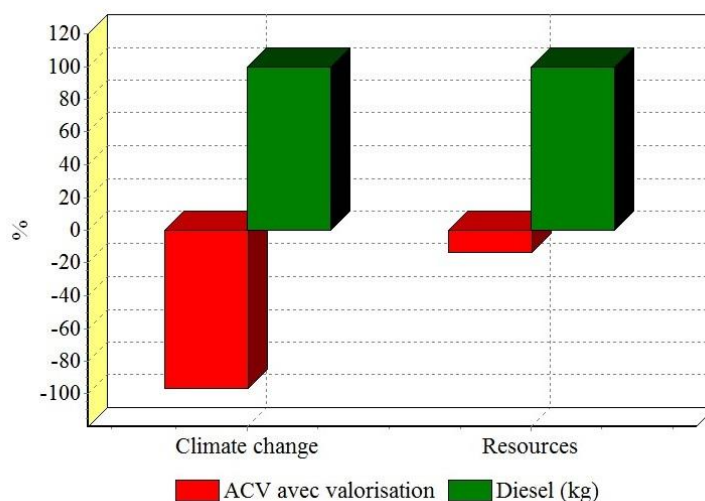
Pour pouvoir comparer l'ACV du biodiesel avec le diesel en terme de quantité d'énergie produite, il faut considérer 939 kg de diesel.

Le tableau V.18 donne un aperçu sur les différents paramètres nécessaires à la comparaison de la production du biodiesel à partir de microalgues avec valorisation énergétique et la production du Diesel.

**Tableau V.18 : Les différents paramètres de comparaison entre l'ACV de la production du biodiesel à partir de microalgues avec valorisation énergétique et la production du Diesel.**

Produit	Processus sur Sima pro	Pouvoir calorifique MJ/kg	Quantité kg
Diesel	Diesel raffinerie	42,8 (Ecoinvent)	939
Biodiesel issu de « <i>Chlorellavulgaris</i> »	L'ACV 2 réalisée	40,2	1000

La figure V.20 schématise les résultats de la comparaison entre l'ACV du biodiesel avec valorisation énergétique et le diesel.



**Figure V.20 : Comparaison entre le biodiesel issu de la « *Chlorellavulgaris* » avec valorisation de la biomasse algale résiduelle et le diesel.**

D'après la figure V.20, nous remarquons que le biodiesel économise 110% d'énergie primaire par rapport au diesel. De surcroît, le biodiesel microalgal contribue à la réduction des émissions des gaz à effet de serre (exprimée par kg CO<sub>2</sub> eq) jusqu'à 195%. Par conséquent, le

# Chapitre V : ACV de la Production du biodiesel à partir de microalgues

deuxième système de production contribue à la séquestration de CO<sub>2</sub>, donc peut être considéré comme un puits de carbone.

D'après ces résultats, nous pouvons conclure que la production du biodiesel à partir des microalgues sans valorisation des coproduits ne peut être rentable au vu du rendement énergétique obtenu. C'est pourquoi, comme première approche, la valorisation énergétique de la biomasse résiduelle semble une solution pour optimiser le procédé. Néanmoins, dans notre cas d'étude, il est bien de rappeler que nous n'avons considéré que le bilan CO<sub>2</sub> et le bilan énergétique. Cependant, les résultats obtenus montrent quand même la faisabilité du système.

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

## Conclusion générale

Le but de ce projet de fin d'études est d'évaluer l'impact environnemental du cycle de vie du biodiesel à partir de microalgues. Les résultats montrent que le biodiesel ne peut être rentable que s'il y a une valorisation de ses co-produits. Dans notre travail, nous avons pris en particulier le cas de la valorisation énergétique de la biomasse algale résiduelle riche en CO<sub>2</sub>.

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<sup>ème</sup> 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. En Algérie, par exemple, nous pouvons envisager de l'exploiter en phase semi-pilote dans le Sahara vu la disponibilité des surfaces, des industries pétrolières génératrices de CO<sub>2</sub> et des conditions d'ensoleillement très favorables pour la croissance des microalgues.

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<sup>ème</sup> génération vu la disponibilité de la matière première, tout en étudiant le potentiel des biocarburants à partir des microalgues.

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

## 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 CO<sub>2</sub> provenant de déchets industriels par exemple : CO<sub>2</sub> à partir des émissions des cimenteries ou des centrales électriques en installant les étangs à côtés de ces usines tout en allant vers une stratégie de symbiose industrielle.

- La culture des microalgues associée au traitement des eaux usées.

- La production du biodiesel à partir de microalgues avec valorisation de la biomasse résiduelle dans un procédé de cogénération, où l'énergie produite serait utilisée sous forme de chaleur et où l'électricité générée serait injectée dans le réseau d'alimentation de la station.

- La valorisation de la biomasse résiduelle par la digestion anaérobie dans un digesteur pour la production du Biogaz qui est composé de méthane et de CO<sub>2</sub>. Le méthane serait utilisé pour la production d'énergie, et le CO<sub>2</sub> pour l'étape de culture.

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

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

## Références bibliographiques

1. O.Jolliet, M.Saade, P.Crettaz, S. Shaked. Analyse Du Cycle De Vie – Comprendre Et Réaliser Un Eco-Bilan, 2ème Edition. Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes, 2010. 289 p.
2. Pôle de compétitivité Industries & Agro-Ressources, site internet 2012. Disponible sur : <http://www.iar-pole.com/le-pole/services/iar-acv> (Consulté en mars 2016).
3. N.Boeglin et D.Veuillet. Rapport ADEME : Notes de synthese externe, département Eco-Conception & Consommation Durable, Introduction à l'Analyse de cycle de vie (ACV). Mai 2005. Disponible sur : [http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/noteACVexterne\\_ADEME\\_mai\\_2005.pdf](http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/noteACVexterne_ADEME_mai_2005.pdf) (Consulté en mars 2016).
4. Norme ISO : Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices. Catalogue ISO [En ligne] mise à jour en 2010. Disponible sur : [http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=38498](http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38498) (Consulté en mars 2016).
5. SHIRLEY FAGNEN. Analyse du cycle de vie axée sur les conséquences d'un biocarburant de deuxième génération à base de saule. Département de Génie Chimique, École Polytechnique de Montréal, mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées. Décembre 2009. Disponible sur : [https://publications.polymtl.ca/204/1/2009\\_ShirleyFagnen.pdf](https://publications.polymtl.ca/204/1/2009_ShirleyFagnen.pdf) (Consulté mars 2016).
6. Y.Loerincik et O. Jolliet. ACV et Ecoconception : Comparaison des filières de production d'électricité, eointesys-life cycle systems. Parc Scientifique De l'EPFL Lausanne, mars 2007.
7. Samuel Le Féon. Rapport de l'évaluation environnementale de la mobilité urbaine : notions de cycle de vie et besoins de déplacement, encadrée par l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, 2011. Disponible sur : <http://encyclopedie-dd.org/encyclopedie/economie/l-analyse-du-cycle-de-vie-acv.html> (Consulté mars 2016).
8. Le Moigne J.L, La Modélisation Des Systèmes Complexes, Dunod, 1990.

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

9. Définitions lexicographiques et étymologiques de « bio et carburant » du trésor de la langue française informatisé. Site du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, <http://www.cnrtl.fr/definition/> (Consulté mars 2016).
10. Nadia Boukhetia, Pascal Blanquet. Rapport sur l'industrie des énergies décarbonées. Direction générale de l'énergie et du climat en 2010. Disponible sur : [http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport\\_energies\\_decarbonees\\_2011\\_complet02.pdf](http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_energies_decarbonees_2011_complet02.pdf) (Consulté mars 2016).
11. Directive 2009/28/CE Article 2 De La Directive Du 23 Avril 2009 (Directive (UE) N° 2015/1513 Du 9 Septembre 2015).
12. Energie: Statistiques 2015 Et Rapport Sur La Géopolitique De l'énergie, Publié le 22/06/2015, <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/actualites/veille/energie-les-statistiques-2015> (Consulté avril 2016).
13. Bp statistical review of world energy, Juin 2015. Disponible sur : <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>
14. Bruxelles Environnement, IBGE (Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement) Infos-Fiches Energie, Les biocarburants ou agrocaburants, Février 2009. [http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/IF\\_Energie\\_ER13\\_Part\\_F\\_R.PDF](http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/IF_Energie_ER13_Part_F_R.PDF) (Consulté avril 2016).
15. Sylvain Frédéric Directeur Recherche Et Développement De Naskeo Environnement. Article posté le 30 septembre 2009 sur Techniques de l'ingénieur : Les Biocarburants, <http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/les-biocarburants-de-troisieme-generation-6831/> (Consulté avril 2016).
16. Emad A. Shalaby. "Liquid, Gaseous and Solid Biofuels - Conversion Techniques: chap 15 Biofuel: Sources, Extraction and Determination. Publié le 20 mars 2013 sous CC BY 3.0 license. ISBN 978-953-51-1050-7. DOI: 10.5772/51943. Disponible [en ligne] sur: <http://www.intechopen.com/books/liquid-gaseous-and-solid-biofuels-conversion-techniques/biofuel-sources-extraction-and-determination>
17. Futura sciences : <http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/dico/d/energie-renouvelable-biodiesel-6687/> (Consulté mars 2016).

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

18. U.S. Energy Information Administration (EIA) 2015. Disponible sur : [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2015\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2015).pdf)
19. Élodie Palluet Et Pierre-Olivier Pineau. Gridd-HEC, Rapport : Les Notes Thématiques 1 Les Biocarburants : Matières Premières, Transformation Et Produits, Groupe de recherche interdisciplinaire sur le développement durable. HEC, Montréal (Québec) 2012. <http://expertise.hec.ca/gridd>
20. Office De l'efficacité Énergétique, 2009.
21. SADI Meriem. Rapport : Le Bioéthanol : une véritable alternative pour une énergie propre. Division bioénergie et environnement, CDER 2012.
22. National Renewable Energy Laboratory, 2009. Consultable sur : [http://publications.gc.ca/collections/collection\\_2012/rncan-nrcan/M141-1-2009-fra.pdf](http://publications.gc.ca/collections/collection_2012/rncan-nrcan/M141-1-2009-fra.pdf)
23. D. Ballerini et N. Alazard-Toux. Les Biocarburants état des lieux, perspectives et enjeux du développement. Paris : IFP Publication, 2006. 369p. ISBN : 2-7108-0869-2.
24. Dictionnaire de français Larousse. [En ligne] <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais> (Consulté avril 2016).
25. J. P. Cadoret, & O. Bernard. La production de biocarburant lipidique avec les microalgues : promesses et défi. Journal De La Société Biologique, 201-211, 2008.
26. Isabelle Cantin. la production de biodiesel à partir des microalgues ayant un métabolisme hétérotrophe. Centre universitaire de formation en environnement, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, Juillet 2010. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement.
27. Giuliana Patricia and Becerra Celis. Proposition de stratégies de commande pour la culture de microalgues dans un photobioréacteur continu. Thèse de doctorat Ecole Centrale des Arts et Manufactures « Ecole Centrale de Paris » avril 2009. Chapitre 2 Page 39 – 60 : 265.
28. Barnabas Gikonyo, Phd. Advances in Biofuel Production: Algae and Aquatic Plants. Apple Academic Press, Toronto, 2014. ISBN: 978-1-4822-3276-9.
29. T.M. Mata, A.A. Martins, N.S. Caetano. Microalgae for biodiesel production and other applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. 14(1):217–232.
30. K.G. Satyanarayana. A Review on Microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials. International Journal of Energy Research. 2011. 35(4) : 291-311.



# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

31. Fogg, G.E. The Metabolism Of Algae, Collection Methuen's Monographs On Biological Subjects, London, Methuen 1953.
32. Hu Q. Sommerfeld. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. The Plant Journal. 2008. 54:621–639.
33. G. Luis, Torres Erick and R. Bandala. Energy and environment nowadays energy science. Engineering and Technology, Nova Science 2014.
34. Dr. Frank Liebke. Chlorella Vulgaris - Medicinal Food. Preface and important background information. <http://www.klinghardtacademy.com/articles/chlorella-vulgaris-medicinal-food.html> (Consulté avril 2016).
35. J. Zhu, J. Rong, B. Zong. Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel. Chin J Catal. 2013 Jan ;34(1):80–100.
36. Carl Safi. Morphology, composition, production, processing and applications of Chlorella vulgaris. Renewable and sustainable Energy reviews, 2014.
37. Seyf abadi J, Ramez anpour Z, Amini Khoeyi Z. Protein, fatty acid and pigment content of chlorella vulgaris under different light regimes. J Appl Phycol 2011;23:721–6.
38. Bajguz A. Effect of brassinosteroids on nucleic acids and protein content in cultured Cells of Chlorella Vulgaris. Plant physiolbiochem 2000.
39. Becker EW. Microalgae: Biotechnology and Microbiology. New York: Cambridge University Press, 1994.
40. P.Collet. Life cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. Bioresource Technology, 2011.
41. J.N. Rogers and Al. A Critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. Algal Res. 2013.
42. J. Masojídek, M. Koblížek and G. Torzillo. « Photosynthesis In Microalgae », In: Handbook Of Microalgal Culture: Biotechnology And Applied Phycology, Richmond A. (Ed.), Blackwell Publishing Ltd., Oxford, Pp. 3-19, 2004.
43. <http://www.geneve-illesetchamps.ch/wp-content/uploads/2014/09/Les-micro-algues.pdf> (Consulté mars 2016).
44. Rayen FILALI. estimation et commande robustes de culture de microalgues pour la valorisation biologique de CO<sub>2</sub>. Thèse de doctorat à l'école doctorale « Sciences et

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

- technologies de l'information des télécommunications et des systèmes ». Supélec, 2012.
45. W. Fulks, K.L MAIN. The design and operation of commercial scale live feeds production systems, 1991. Rotifer and microalgae culture systems, Proc. US/Asia Workshop. The Oceanic Institute, Hawaiï : 3-52.
  46. E. Stengel. 1970. Anlagentypen Und Verfahren Der Technische Algen massen produktion Ber. Dtsch. Bot. Bd. 83 (11): 589-606.
  47. L. Barsanti and P. Gualtieri. Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology. Taylor & Francis Group (2006).
  48. Aurélie LUCCHETTI. Thèse sur la modélisation et conception d'un système de culture de microalgues, Chapitre I. Microalgues : biologie et moyens de culture - système expérimental, page 18. l'école nationale supérieure des mines de Paris. Spécialité " Energétique et Procédés ", Avril 2014.
  49. S.L.Estrada Duran. Simulation dynamique des photobioréacteurs : étude de l'influence de l'azote et du phosphore sur la croissance de porphyridium purpureum. Thèse doctorale, Ecole Centrale de Paris, France, 2007.
  50. Collier J.L and A.R. Grossman. Chlorosis induced by nutrient deprivation in Synechococcus Sp. Strain PCC7942: not all bleaching is the same . The Journal of Bacteriology, 174, Pp. 4718-4726, 1992.
  51. John G. Day, Stephen P. Slocombe, Michele S. Stanley, Overcoming biological constraints to enable the exploitation of microalgae for biofuels. bioresource technology, 2012, Vol 109, P 245-251.
  52. A. Demirbas and M.F. Demirbas. Algae energy: algae as a new source of biodiesel. London, Springer, Pp. 29 – 47, 2010.
  53. M.E.A. Belkadi. Etude technique pour la valorisation énergétique des microalgues. Mémoire de magister en management des projets énergétiques. Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, 49 P., 2009.
  54. Anna L. Stephenson. Life Cycle Assessment of potential algal biodiesel production in the United Kingdom: a comparison of raceways and airlift tubular bioreactors. Energy Fuels 2010, 24, 4062–4077.
  55. Wiley P.E., Campbell J.E., Mckuin B. Production of biodiesel and biogas from algae. A Review of Process Train Options. Water Environment Research. 2011. 83(4):326-38.

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

56. Françoise Lohéziec, Pierre-François, Master Biologie Gestion - Synthèse Bibliographique « Les Algues Comme Biocarburant » - Mars 2012, Université De Rennes 1. disponible sur : [www.geneve-villesetchamps.ch/wp-content/uploads/2014/09/Les-algues-comme-biocarburant.pdf](http://www.geneve-villesetchamps.ch/wp-content/uploads/2014/09/Les-algues-comme-biocarburant.pdf) (Consulté en mars 2016).
57. Collet. P, Arnaud Hélias, Laurent Lardon, Jean-Philippe Steyer, Olivier Bernard. Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels. *Applied Energy* 154 (2015) 1089–1102.
58. P.M. Schenk, S.R. Thomas-Hall, E. Stephens, U.C. Marx, J.H. Mussgnug, C.Posten, O.Kruse, B.Hankamer. Second-generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenergy Research*. 2008. 1:20–43.
59. Guillaume Kerlero de Rosbo, Olivier Bernard. Evaluation du gisement potentiel de ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à horizon 2030. [Rapport Technique] ADEME. 2014, pp.164. <hal-01102032>
60. Singh A., Nigam P.S., Murphy J.D. Mechanism and Challenges In Commercialisation Of Algal Biofuels. *Bioresource Technology*. 2011. 102:26–34.
61. Satyanarayana K.G., Mariano A.B., Vargas J.V.C. A Review on Microalgae. A Versatile Source for Sustainable Energy and Materials. *International Journal of Energy Research*. 2011. 35(4) : 291-311.
62. Richmond A. *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Blackwell Science Ltd. 2004.
63. Cravotto G., Boffa L., Mantegna S., Perego P., Avogadro M., Cintas P. Improved Extraction of Vegetable Oils under High-Intensity Ultrasound and/or Microwaves. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2008. 15(5): 898–902.
64. Jasvinder Singh, Sai Gu. A commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 2596–2610.
65. Y.Warabi, D.Kusdiana, S.Saka. Reactivity of triglycerides and fatty acids of rapeseed oil in supercritical alcohols. *Bioresource Technology*. 2004. 91(3):283–7.
66. MESBAHI Dalila. La transestérification hétérogène de l'huile de tournesol sous alumine : production du Biodiesel EEHV. Mémoire de magister, l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. Faculté des sciences. Departement de Chimie. 2012.

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

67. Ayhan Demirbas, M. Fatih Demirbas. Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 2011.
68. Mallick Nirupama, Shovon Mandal, Amit Kumar Singh, Moumita Bishai and Archana Dash. Green microalga *Chlorella vulgaris* as a potential feedstock for biodiesel. *Research Article*. 2011.
69. Laurent Lardon Life-Cycle Assessment of biodiesel production from microalgae. INRA, UR50 laboratoire de biotechnologie de l'environnement. France Policy Analysis 2009.
70. Gnansounou. Comparative Life Cycle Assessment of biodiesel from algae and jatropha: a case study of India. *Bioresource Technology* 150 (2013) 429–437.
71. Farooq Ahmad. Transesterification of oil extracted from different species of algae for biodiesel production. Gc University, Sustainable Development Study Centre, Lahore, Pakistan, 2013.
72. Jon Van Gerpen. Biodiesel processing and production. University of Idaho, Moscow, *Fuel Processing Technology* 86 (2005) 1097– 1107.
73. Henri Prévot, Ingénieur général des mines. Rapport sur La récupération de l'énergie issue du traitement des déchets. Conseil général des Mines, Ministère de l'Economie, des finances et de l'industrie Juillet 2000.  
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/014000625.pdf> ,  
(Consulté mai 2016).
74. Steve Clarke et Fernando. Fiche technique : Caractéristiques de combustion de la biomasse, publiée en juin 2001. Ontario, ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales. [En ligne]. Mise à jour : août 2015.  
<http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/11-034.htm> (Consulté juin 2016).

# Analyse du cycle de vie du biodiesel issu d'espèces non alimentaires

## Annexes

Annexe 1 : L'arborescence du cycle de vie de la production du biodiesel à partir d'algues.

Annexe 2 : L'arborescence de cycle de vie de la production du biodiesel à partir d'algues avec valorisation énergétique de la biomasse algale résiduelle.

