



Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Chimique

LA VALEF

Laboratoire Valorisation des Energies Fossiles

Thèse de Doctorat en Sciences

Option : Génie chimique

Développement d'une filière de biodiesel en Algérie Apport des outils d'aide à la décision

Présentée par

Mohammed AMOURI

Magister en Energies Renouvelables, option Bioénergie

Sous la direction de M. Toudert AHMED- ZAÏD Professeur ENP

Présentée et soutenue publiquement le (13/02/2019)

Composition du Jury :

Président	M. El Hadi BENYOUSSEF,	Professeur ENP
Rapporteur/ Promoteur	M. Toudert AHMED ZAÏD,	Professeur ENP
Examineurs	M. Rabah BOUARAB,	Professeur ENP
	M. Krim LOUHAB,	Professeur UMBB
	Mme Hassiba LARIBI,	MCA Univ. Saad Dahlab Blida
	Mlle Rachida RIHANI,	Professeur USTHB
Invitée	Mlle Majda AZIZA,	DR CDER Bouzaréah

ENP 2019



Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Chimique
Laboratoire Valorisation des énergies fossiles

LA VALEF

Thèse de Doctorat en Sciences

Option : Génie chimique

Développement d'une filière de biodiesel en Algérie Apport des outils d'aide à la décision

Présentée par

Mohammed AMOURI

Magister en Energies Renouvelables, option Bioénergie

Sous la direction de M. Toudert AHMED- ZAÏD Professeur ENP

Présentée et soutenue publiquement le (13/02/2019)

Composition du Jury :

Président	M. El Hadi BENYOUSSEF,	Professeur ENP
Rapporteur/ Promoteur	M. Toudert AHMED ZAÏD,	Professeur ENP
Examineurs	M. Rabah BOUARAB,	Professeur ENP
	M. Krim LOUHAB,	Professeur UMBB
	Mme Hassiba LARIBI,	MCA Univ. Saad Dahlab Blida
	Mlle Rachida RIHANI,	Professeur USTHB
Invitée	Mlle Majda AZIZA,	DR CDER Bouzaréah

ENP 2019

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, qui m'ont montré le chemin à suivre ;

A ma femme avec laquelle je le parcours ;

A mes sœurs et frères

A ma belle-famille et leurs enfants

Toute l'équipe du département de Génie chimique

Toute l'équipe de la division Bioénergie et environnement

REMERCIEMENTS

Je remercie particulièrement mon directeur de thèse, Monsieur le professeur **Toudert AHMED-ZAID**, pour sa grande disponibilité, son apport scientifique indéniable et la qualité exceptionnelle de son encadrement tout au long de l'élaboration de ma thèse, profitant de son approche rigoureuse, de ses précieux et nombreux conseils dans le domaine de la bioénergie. Je lui demeure reconnaissant pour ses qualités humaines qui m'ont accompagné jusqu'à la réussite de cette thèse.

Je tiens particulièrement à remercier tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mes travaux. Un grand merci à M. **El Hadi BENYOUSSEF** d'avoir accepté de présider le Jury. Ma reconnaissance va également à M. **Rabah BOUARAB**, M. **Krim LOUHAB**, Mme **Hassiba LARIBI** et Mlle **Rachida RIHANI**, d'avoir accepté d'examiner cette thèse, pour le temps qu'ils ont passé à lire le manuscrit et pour les commentaires constructifs qu'ils m'ont adressés et qui ont permis d'améliorer la qualité du mémoire de thèse. Je tiens à remercier également Mlle **Majda AZIZA**, Directrice de la division bioénergie et environnement au Centre de Développement des Energies Renouvelables d'Alger, pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

J'adresse ma plus profonde gratitude à la directrice de la division bioénergie et environnement du Centre de Développement des Energies Renouvelables, Mlle **Majda Aziza**, d'avoir nous procuré le matériel et données nécessaire en particulier le logiciel **SimaPro® PRé Consultants**, ainsi que l'exploitation de leurs résultats de recherche sur les algues pour la réalisation de ce travail. J'exprime aussi toutes mes gratitudes et reconnaissances à toute l'équipe de la division pour leur soutien et conseils précieux.

Je tiens à présenter toutes mes reconnaissances et gratitudes à tous les encadreurs du **Collège Doctoral Maghrébin en Sciences de l'Eau et Énergies Renouvelables** organisé par le Bureau Maghreb de l'Agence Universitaire de la Francophonie, pour leur accompagnement et leurs qualités scientifiques, méthodologiques et humaines dont ils nous ont fait profiter durant les regroupements sur trois ans. J'adresse ma plus profonde gratitude envers les différents membres de l'équipe du groupe du collège doctoral en particulier son coordinateur **Maël Baseilhac** ainsi que nous chers doctorants algériens, tunisiens et marocains pour leur accueil si chaleureux, leur sociabilité et leur disponibilité, qui ont permis de créer un environnement très agréable et extrêmement favorable au bon déroulement des regroupements.

J'exprime ma gratitude à **Javier DUFOUR**, le chef de département de l'Analyse des Systèmes, Institut IMDEA Energia, de Madrid, pour m'avoir accueilli parmi eux et apporter tout le soutien nécessaire pour réussir ce travail dans les meilleures conditions possibles. J'exprime toute ma reconnaissance à **Dr. Diego Iribarren** pour son soutien et sa constante assistance ainsi que pour tous ses précieux conseils tout au long de mon séjour scientifique au niveau de **l'Institut IMDEA Energia**. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les chercheurs de l'Institut IMDEA Energia et particulièrement ceux du département de l'Analyse des Systèmes.

Je tiens à remercier le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique de nous avoir attribué la bourse d'étude dans le cadre de Programme National Exceptionnel PNE pour la finalisation de la thèse. Je tiens à remercier vivement le directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables d'Alger, Monsieur le professeur **Noureddine YASSAA**, de nous avoir facilité la tâche pour mener nos travaux à terme.

A la fin, je tiens à présenter toutes mes gratitudes et reconnaissances à toutes et à tous qui ont participé de près ou de loin à ce travail.

ملخص

تمثل هذا العمل في دراسة تقييمية لإنتاج الديزل الحيوي في الجزائر، من خلال استغلال مصادر أولية محلية، بإستعمال تقنية تحليل دورة الحياة. قامت هذه الدراسة بتقييم جدوى و إستدامة الإنتاج من خلال تقييم الأثار المحتملة لإنتاج الديزل الحيوي من زيوت الموريتقا، الخروع و طحل الكوريليا.

على ضوء النتائج المتحصل عليها فقد تبين ان إنتاج الديزل الحيوي من زيت الموريتقا و الخروع و الكوريليا قد يساهم في تخفيض إنبعاث غاز الكربون المكافئ حيث ان الكثافة الكربونية لكل مصدر هي 21.28 و 35.89 و 61.80 غ/ميغا جولمن الديزل الحيوي، على التوالي. يؤدي هذا الى تخفيض انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون المكافئ بنسبة 70 %، 60 % بالنسبة للديزل الاحفوري، في حالة المريتقا و الخروع . . وبالإضافة إلى ذلك ، يسهم الديزل الحيوي المنتج من الكوريليا في امتصاص و تثبيت ثاني أكسيد الكربون الأحموري من خلال استخدامه في نمو الكتلة الحيوية و بالتالي المساهمة في الحد من الاحتباس الحراري.

تم تحديد الطلب التراكمي للطاقة (DCE) ، طوال دورة حياة نظام إنتاج الديزل الحيوي من المصادر المختلفة. في هذا السياق، فإن الحصيلة الطاقوية هي 2.16 ، 1.77 ، 0.68 ، لوقود الديزل الحيوي *M. oleifera*، *R. communis* و *C. vulgaris*، على التوالي.

سمح لنا تحليل دورة الحياة بتسليط الضوء على مزايا و عيوب إنتاج الديزل الحيوي من مختلف المصادر المتوفرة محليا. بالإضافة إلى ذلك، فإن وقود الديزل الحيوي الطحلبي لديه القدرة على استبدال الديزل الاحفوري على المدى الطويل الى جانب مساهمته في إمتصاص ثاني أكسيد الكربون. ومع ذلك، فإن تعميم إنتاج الديزل الحيوي في الجزائر يتطلب الاخذ بالاعتبار الجانب الاجتماعي والاقتصادي الى جانب تحليل دورة حياة نظام الإنتاج.

الكلمات المفتاحية : تحليل دورة الحياة، الديزل الحيوي، *M. oleifera*، *R. communis* و *C. vulgaris*

Abstract

This work evaluates the feasibility and sustainability of biodiesel production from local oilseed raw materials by applying the Life Cycle Assessment methodology. In this respect, the assessment of the potential impacts of the development of a biodiesel chain in Algeria, from the oils of *Moringa oleifera*, *Ricinus communis* and *Chlorella vulgaris* was carried out.

Results show that CO₂eq emissions of *M. oleifera*, *R. communis* and *C. vulgaris* biodiesels are 21.28, 35.89 and -61.80 gCO₂eq / MJ biodiesel, respectively, which contribute to CO₂eq reductions of 70%, 60% for Moringa and Castor biodiesel, compared to petrodiesel. In addition, algal biodiesel contributes to the sequestration of fossil CO₂ when used for biomass growth of algal biomass, which is a carbon sink.

Cumulative Energy Demand (CED), throughout the life cycle of the biodiesel production system for different oil sources, was determined. In this context, EROEI values of 2.16, 1.77, 0.68, are obtained, for the biodiesel of *M. oleifera*, *R. communis* and *C. vulgaris*, respectively.

The life cycle analysis allowed us to highlight the advantages and drawbacks of producing moringa and castor biodiesel. In addition, algal biodiesel has the potential to substitute petrodiesel in the long term, with substantial contributions to CO₂ sequestration. Nevertheless, the deployment of biodiesel in Algeria is quite complex and requires the integration of socio-economic aspects in the the life cycle analysis of the production system.

Keywords : Life cycle assessment, Biodiesel, *M. oleifera*, *R. communis*, *C. vulgaris*

Résumé

Le présent travail évalue la faisabilité et la durabilité de la production du biodiesel à partir des sources oléagineuses locales en appliquant la méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie. A cet égard, l'évaluation des impacts potentiels de développement d'une filière de production de biodiesel en Algérie à partir des huiles de *Moringaoleifera*, *Ricinus communi* et *Chlorella vulgaris*, a été réalisée.

Les résultats obtenus montrent que les émissions de CO₂eq du biodiesel de *M. oleifera*, *R. communis* et de *C. vulgaris* sont de 21,28, 35,89 et -61,80 gCO₂eq/MJ de biodiesel, respectivement, soit une réduction des émissions de CO₂eq de 70% et 60% pour les biodiesels issus de moringa et de ricin, comparativement à celles du gazole . En outre, le biodiesel algal contribue à la séquestration du 75 % de la source de CO₂ fossile lorsque ce CO₂ est utilisé pour la croissance de la biomasse algale.

La Demande Cumulative en Energie, (DCE), tout au long du cycle vie du système de production du biodiesel des différentes sources, a été déterminée. Ainsi, des valeurs de EROEI de 2,16, 1,77 et 0,68 sont obtenues pour les biodiesels issus de *M. oleifera*, *R. communis* et *C. vulgaris*, respectivement.

L'analyse du cycle de vie nous a permis de mettre en exergue les avantages et les inconvénients de la production des biodiesels de Moringa, de Ricin. En outre, le biodiesel algal présente le potentiel de substituer le diesel à long terme avec une contribution substantielle à la séquestration de CO₂. Néanmoins, le déploiement du biodiesel en Algérie est assez complexe et nécessite d'intégrer les aspects socioéconomiques dans l'analyse du cycle de vie.

Mots clés : Analyse du cycle de vie, Biodiesel, *M. oleifera*, *R. communis*, *C. vulgaris*,

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	13
Chapitre 1 : Biodiesel : sources, Technologies de production et soutenabilité	17
Introduction	17
1.1. Biodiesel et Matières premières	18
1.1.1 Sources de première génération pour la production du biodiesel.....	19
1.1.2 Sources d'huiles non alimentaires	19
1.1.3 Matières premières à haute teneur en Acides Gras Libres	21
1.1.4 Microalgues : matière première pour la production du biodiesel.....	22
1.1.5 Microorganismes oléagineux pour la production des lipides	26
1.2 Matières premières et technologies de production du biodiesel.....	27
1.2.1 Etapes de la production du biodiesel par transestérification	28
1.2.2 Transestérification des huiles végétales par l'utilisation des catalyseurs homogènes.....	29
1.2.2.1 Estérification par catalyse Acide.....	29
1.2.2.2 Transestérification par catalyse alcaline.....	30
1.2.3 Processus de transestérification en deux étapes	30
1.2.4 Paramètres opératoires spécifiques à la production de biodiesel	31
1.2.5 Technologies émergentes de catalyse homogène et hétérogène pour la production du biodiesel .	31
1.3 Analyse de la soutenabilité du biodiesel : Impacts socio-économiques et environnementaux de la production de biodiesel	33
1.3.1 Aspects socio-économiques	33
1.3.2 Aspect environnemental de la production de biodiesel.....	34
1.3.2.1 Emissions des GES par le diesel et le biodiesel : production et utilisation	34
1.3.1.1. Bilan hydrique de la production du biodiesel.....	35
1.3.1.2. Gestion et traitement des coproduits issus de la production du biodiesel.....	36
Conclusion	37
Chapitre 2 : Outils d'Aide à la Décision Appliqués aux Biocarburants	40
Introduction.....	40
2.1 Chaîne de valeur de la production bioénergétique (Biocarburants).....	41
2.2 Structuration de la chaîne de valeur des biocarburants	44
2.3 Cadre général de l'utilisation des outils d'aide à la décision	45
2.4 Analyse du cycle de vie.....	47
2.4.1. Introduction	47

2.4.2. Définition de l'objectif et le champ de l'étude.....	48
2.4.3. Etablissement et analyse de l'inventaire du cycle de vie	49
2.4.4. Évaluation des impacts du cycle de vie.....	49
2.4.5. Interprétation des résultats, conclusions et recommandations	50
2.5 Analyse Multicritère d'Aide à la Décision (AMAD).....	51
2.5.1. Introduction	51
2.5.2. Types d'Analyse Multicritère d'Aide à la Décision.....	51
2.5.3. Etapes du processus de l'analyse multicritère d'aide à la décision.....	52
2.6 Système d'Information Géographique (SIG).....	53
2.6.1. Introduction	53
2.6.2. Définition des systèmes d'information géographique.....	54
2.6.3. Système d'information géographique appliqué aux biocarburants	54
2.6.4. Différentes étapes d'intégration du SIG appliquée aux biocarburants.....	55
Conclusion	57
Chapitre 3 : Analyse du cycle de vie du biodiesel.....	60
Introduction	60
3.1 Principaux défis de la soutenabilité des biocarburants	61
3.1.1 Biocarburant vert : une nécessité pour le secteur des transports	61
3.1.2 Développement de biocarburants durables dans un cadre de standardisation.....	62
3.1.3 Les grands défis dans l'analyse du cycle de vie des biocarburants	63
3.2 Evaluation de la soutenabilité des biocarburants : Approche ACV	64
3.2.1 Définition de l'objectif et le champ de l'étude.....	65
3.2.2. Définition de l'unité fonctionnelle	66
3.2.3. Limites du système de l'analyse du cycle de vie.....	66
3.2.4. Inventaire du cycle de vie (ICV) : Modélisation, Outils, Disponibilité des données	68
3.2.5. Elaboration des Scenarii.....	69
3.2.6. Méthodologies d'allocation.....	70
3.2.7 Catégories et méthodes d'évaluation d'impact.....	71
3.3 Considérations relatives aux voies de production des biocarburants	73
3.3.1. Carburants de première génération.....	73
3.3.2. Biocarburants de deuxième génération	73
3.3.3. Troisième génération de biocarburant	73
3.4 Limites de l'analyse du cycle de vie	74
3.5 Analyse du cycle de vie en tant que Processus et non Produit.....	75
3.6 Recommandations et efforts d'amélioration de l'ACV.....	75
Conclusion.....	77

Chapitre 4 : Matériel et méthodes	80
Introduction	80
4.1. Matière première oléagineuse pour la production du biodiesel	81
4.1.1 Biodiesel de première génération : <i>Moringa oleifera</i>	81
4.1.2 Biodiesel de 2 ^{ème} génération issu de ressources oléagineuses non alimentaire	82
4.1.2.1. <i>Ricinus communis</i> pour la production du biodiesel.....	83
4.1.3. Biodiesel de 3 ^{ème} génération - Le potentiel des microalgues	86
4.1.3.1. <i>Chlorella vulgaris</i> : microalgue prometteuse pour la production du biodiesel	87
4.1.3.2. Utilisation et applications potentielles de la biomasse microalgale	87
4.2. Description du cycle de vie du système de production du biodiesel.....	88
4.2.1. Biodiesel de <i>Moringa oleifera</i> et <i>Ricinus communis</i>	88
4.2.2. Biodiesel issue des microalgues (<i>Chlorella vulgaris</i>).....	91
4.2.2.1 Estimation des ressources disponibles pour la culture des microalgues.....	91
4.2.2.2 Description du système de production du biodiesel microalgal	92
4.2.2.3 Système de culture et récolte de la biomasse microalgale.....	93
4.2.2.4 Source et injection de CO ₂ dans les bassins de culture	94
4.2.2.5 Estimation de la productivité de la biomasse microalgale	95
4.2.2.6 Demande en ressources hydriques.....	95
4.2.2.7 Demande en nutriments.....	96
4.2.2.8 Demande en terre.....	96
4.2.2.9 Technologie de récolte de la biomasse microalgale	96
4.2.2.10 Processus de prétraitement de fermentation de la biomasse.....	97
4.2.2.10.1 Traitement de la biomasse par l'acide sulfurique dilué	97
4.2.2.10.2 Fermentation et distillation.....	97
4.2.2.10.3 Extraction et transestérification de l'huile en biodiesel.....	98
4.2.2.10.4 Transésterification de l'huile en biodiesel.....	98
4.2.2.10.5 Processus de Digestion anaérobie/Cogénération (CHP)	100
4.3. Analyse du cycle de vie : application au biodiesel.....	101
4.3.1 Définition du champ de l'étude et l'Unité Fonctionnelle (UF)	101
4.3.2 Limites du système et inventaire du cycle de vie	101
4.3.3 Hypothèses de l'analyse du cycle de vie pour les biodiesels issus de moringa et de ricin.....	104
4.3.4 Hypothèses retenues pour la production et la conversion de la biomasse microalgale	104
4.3.4 Méthodologie d'allocation	108
4.3.5 Implémentation de l'inventaire et Evaluation des impacts du cycle de vie.....	109
4.3.6 Intensité carbone (CO ₂ eq/MJ)	110
4.3.7 Efficacité énergétique (MJ/MJ Biodiesel).....	110
4.3.8 Catégorie de dommage sur la qualité des écosystèmes	110

Chapitre 5 : Résultats et discussion	113
5.1 Caractérisation environnementale des systèmes de production de biodiesel.....	113
5.1.1 Système de production de biodiesel de <i>Moringa oleifera</i>	113
5.1.1.1. Contribution des processus aux catégories d'impact du cycle de vie du biodiesel de <i>Moringa oleifera</i>	114
5.1.2. Système de production de biodiesel de <i>Ricinus communis</i>	115
5.1.2.1. Contribution des processus aux catégories d'impact	116
5.1.3. Système de production de biodiesel de <i>Chlorella vulgaris</i>	117
5.1.3.1. Contribution des processus aux catégories d'impact	118
5.2. Contextualisation de l'analyse du cycle de vie du biodiesel selon la source	120
5.2.1 Intensité carbone (CO ₂ eq/MJ).....	120
5.2.2 Efficacité énergétique (MJ/MJ Biodiesel).....	121
5.3. Comparaison de performances des biodiesels et du gazole	123
5.4. Comparaison de performances environnementales du biodiesel selon la source.....	126
5.5 Discussion générale.....	127
Conclusion générale	129
Références bibliographiques	135

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Propriétés des huiles alimentaires	19
Tableau 1.2 : Propriétés techniques du biodiesel issu des espèces oléagineuses non alimentaires	20
Tableau 1.3 : Rendement des espèces oléagineuses non-alimentaires	20
Tableau 1.4 : Caractéristiques du biodiesel issu des huiles de friture usagées comparée avec celles du B10	21
Tableau 1.5 : Composition générale de différentes microalgues (% MS)	22
Tableau 1.6 : Comparaison des sources conventionnelles du biodiesel et les microalgues	23
Tableau 1.7: Teneur en lipides des microorganismes hétérotrophes.....	27
Tableau 1.8: Facteurs influençant l'éco-efficience et l'applicabilité industrielle de différentes technologies de transestérification pour la production de biodiesel.....	31
Tableau 1.9 : Technologies émergentes pour la production du biodiesel.....	32
Tableau 1.10: Comparaison de la réduction des émissions du B100 et B20.....	35
Tableau 1.11: Emissions de GES (g/km) du gazole et du biodiesel.....	35
Tableau 1.12: Empreinte hydrique (EH) de différentes sources biodiesel	36
Tableau 2.1: Critères d'évaluation pour l'analyse multicritère d'aide à la décision de biocarburants.....	53
Tableau 3.1: Sources d'incertitudes relatives à chaque phase de l'ACV des biocarburants.....	69
Tableau 4.1: Propriétés physico-chimiques du biodiesel de <i>M. oleifera</i>	81
Tableau 4.2: Propriétés techniques du biodiesel de ricin comparées à celles du gazole.	84
Tableau 4.3: Propriétés physicochimiques du biodiesel de ricin comparées à celles du gazole.....	87
Tableau 4.4: Critères de sélection du site de la production du biodiesel algal.....	92
Tableau 4.5: Configuration et paramètres opératoires du système de culture des microalgues	94
Tableau 4.6: Conditions opératoires de la conversion de la biomasse microalgale	99
Tableau 4.7: Limites temporels et géographiques du système de production	103
Tableau 4.8 : Inventaire du cycle de vie de biodiesel de <i>Moringa oleifera</i> par UF	105
Tableau 4.9 : Inventaire du cycle de vie de biodiesel de <i>Ricinus communis</i> par UF	106
Tableau 4.10: Inventaire du cycle de vie du biodiesel microalgale par UF	107
Tableau 4.11: Facteurs d'allocation selon la teneur énergétique.....	108
Tableau 4.12: Catégories d'impact de la méthodologie CML-IA	109

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Classification des biocarburants selon la source de la matière première.....	18
Figure 1.2 :La chaîne d'approvisionnement des biocarburants issus des algues.....	24
Figure 1.3: Différents procédés de production de biocarburants microalgales.....	25
Figure 1.4: Photobioréacteur à échelle industrielle	26
Figure 1.5: Différentes système de culture à ciel ouvert de type piste de course (Open pond)25	
Figure 1.6 : Techniques de production du biodiesel	27
Figure 1.7: Mécanismes de la réaction de la transestérification	28
Figure 1.8 : Flux de processus pour la production de biodiesel.....	29
Figure 2.1: Modélisation Multi-échelle de la chaîne de valeur des biocarburants.....	43
Figure 2.2: Différents maillons de la chaîne de valeur de production de biocarburants.	45
Figure 2.3 : Système d'analyse intégré d'aide à la décision des biocarburants.	47
Figure 2.4: Phases d'évaluation du cycle de vie et leurs interactions selon ISO 14040:2006.48	
Figure 2.5 : Démarche générale de l'analyse d'impact des émissions et les catégories de dommages d'après la norme 14042.....	50
Figure 2.6: Analyse multicritère pour un système d'analyse d'une Filière de Biocarburant...	52
Figure 2.7: Etapes du processus de l'Analyse multicritère d'Aide à la Décision	52
Figure 2.8: Différentes étapes d'intégration du SIG appliquée aux biocarburants	56
Figure 3.1: Programmes de durabilité et indicateurs standardisés.....	62
Figure 3.2: Approches et limites du système de l'analyse du cycle de vie.....	67
Figure 3.3 : Impact de la méthode d'allocation sur les bilans carbone et énergie.....	71
Figure 3.4 : Différentes sources de variation dans les études ACV.....	72
Figure 4.1: Applications industrielles potentielles de la biomasse du <i>Moringa oleifera</i>	82
Figure 4.2: Emissions du biodiesel de ricin B10 et B20	84
Figure 4.3: Applications industrielles potentielles de la biomasse du <i>Ricinus communis</i>	86
Figure 4.4: Applications industrielles potentielles de la biomasse microalgale	88
Figure 4.5: Organigramme des processus de production du biodiesel de <i>M. oleifera</i>	90
Figure 4.6: Organigramme des processus de production du biodiesel de <i>R. communis</i>	90
Figure 4.7: Configuration d'un Bassin ouvert pour la production des microalgues	94
Figure 4.8: Organigramme des processus de production du biodiesel microalgal.....	100
Figure 4.9: Limites du système du cycle de vie de biodiesel de <i>M. oleifera</i>	101
Figure 4.10: Limites du système du cycle de vie du biodiesel de <i>R. communis</i>	102
Figure 4.11: Limites du système du cycle de vie de du biodiesel issu de <i>Chlorella vulgaris</i>	102

Figure 5.1: Contribution des sous-systèmes de production aux impacts du cycle de vie du biodiesel de <i>Moringa oleifera</i>	113
Figure 5.2: Contribution des processus de production du biodiesel issu de <i>M. oleifera</i> aux catégories d'impact	114
Figure 5.3: Caractérisation environnementale du système de production de biodiesel issu de l'huile de <i>R. communis</i>	115
Figure 5.4: Contribution des processus aux catégories d'impact du biodiesel de <i>R. communis</i>	116
Figure 5.5: Contribution des sous-systèmes de production du biodiesel de Chlorelle aux catégories d'impacts environnementaux	117
Figure 5. 6: Contribution des processus de production aux catégories d'impact du biodiesel de <i>Chlorella vulgaris</i>	119
Figure 5.7: Impacts environnementaux potentiels du biodiesel de <i>M. oleifera</i> comparés à ceux du gazole	124
Figure 5.8: Impacts environnementaux potentiels du biodiesel de <i>R. communis</i> comparés à ceux du gazole	124
Figure 5.9: Impacts environnementaux du biodiesel de <i>C. Vulgaris</i> comparés à ceux du gazole	125
Figure 5.10: Comparaison des performances environnementales du biodiesel selon le type de matière première.....	126

LISTE DES ABREVIATIONS

ACV	Analyse du Cycle de Vie
AEAG	Alkyl Esters d'Acide Gras
AGL	Acide Gras Libre
AMAD	Analyse Multicritère d'Aide à la Décision
DCE	Demande Cumulée en Energie
ERNRm	Epuisement des Ressources Naturelle Non Renouvelables en matière de Matériaux
EROEI	Energy Return On Energy Investment
IA	Indice d'acidité
IC	Indice de Cetane
MS	Matière sèche
PA	Potentiel d'acidification
PEc	Point d'Ecoulement
PEcl	Point d'Eclair
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PRG	Potentiel de Réchauffement Global
PE	Potentiel d'eutrophisation
PT	Point de Trouble
RED	Renewable Enrgy Directive
SIG	Système d'Information Géographique
SO	Stabilité oxydative
SS_i	SS : Sous-Système, <i>i</i> : Numéro du sous-système
TAG	Tri-Acyl Glycérol
UF	Unité Fonctionnelle
v	Viscosité cinématique
ρ	Densité
T°	Température
EH	Empreinte hydrique

Introduction générale

Le développement de toute société moderne repose sur l'énergie dont aucune activité humaine ne peut s'en passer. Cependant, la prédominance des énergies fossiles, à l'instar du pétrole, gaz naturel et charbon, a conduit tant à l'épuisement de ces ressources naturelles qu'à la dégradation de l'environnement traduite entre autres par les changements climatiques, la pollution des milieux naturels et la perte de la biodiversité. Cette dégradation a évidemment des répercussions négatives sur le cadre de vie de l'être humain. L'exploration et l'exploitation de nouvelles énergies dites renouvelables et propres constituent donc une réponse adéquate pour enclencher une transition énergétique durable afin d'assurer l'autosuffisance et la sécurité énergétique tout en préservant l'environnement.

Dans ce contexte, toute stratégie énergétique doit s'inscrire résolument dans une perspective de développement durable adossé à une diversification des ressources énergétiques renouvelables afin d'aboutir à un mix énergétique fiable et flexible qui réponde au mieux à la demande en énergie.

En Algérie, la promotion et l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique national constituent un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles, de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable. Dans ce contexte, le programme national des énergies renouvelables de 2015-2030 prévoit une capacité de production de 22 GW. Cette production est basée essentiellement sur la production du solaire photovoltaïque avec une capacité d'environ 13575 MW, l'énergie éolienne avec 5000 MW, le solaire thermique avec 2000 MW, la biomasse avec 1000 MW, la cogénération avec 400 MW et 15 MW à partir de l'énergie géothermique.

La bioénergie, en tant que source d'énergie renouvelable, pourrait jouer un rôle très prometteur et constituer un facteur de développement économique à travers la diversité de ses formes énergétiques et produits générés tout au long de sa chaîne de production entre autres, les biocarburants, le biogaz, les combustibles solides (bois énergie), le bio-hydrogène et la bioélectricité. L'exploitation de la bioénergie nécessite néanmoins l'adoption d'une approche globale qui s'inscrirait dans une démarche de développement durable dans l'objectif d'assurer la soutenabilité de ce type de filière. Dans ce contexte, une approche d'analyse et d'investigation holistique de la chaîne de production est nécessaire pour répondre aux exigences du développement durable. Cette analyse devrait prendre en considération des aspects techniques, économiques et environnementaux en matière de la production de la matière première, les technologies de conversion et l'utilisation des produits finaux.

Le biodiesel est un biocarburant d'origine renouvelable dérivé d'une réaction de transestérification des huiles végétales ou des graisses animales avec un alcool en présence d'un catalyseur acide ou alcalin. Il est composé essentiellement des alkyles d'ester d'acide gras. Le biodiesel possède des propriétés semblables à celles du petro-diésel et peut se substituer en partie ou en totalité à ce dernier. De surcroit, le biodiesel est renouvelable, non toxique et biodégradable.

Dans cette perspective de développement durable, l'utilisation des outils d'aide à la décision pour évaluer la soutenabilité d'une filière bioénergétique est d'une importance cruciale. Les outils d'aide à la décision sont incontournables pour la promotion d'une production soutenable des biocarburants. Il en existe plusieurs dont, entre autres, l'analyse du cycle de vie dont l'objectif est de mener une évaluation des impacts environnementaux potentiels d'un système de production de biocarburants à savoir ; le bilan énergétique, le bilan carbone exprimé en CO₂ équivalent, les impacts sur les qualités des écosystèmes et la santé humaine. En outre, les systèmes d'information géographique (SIG) ont un énorme potentiel pour inclure des données relatives au développement des filières bioénergétiques en générale en tenant en compte les contraintes régissant la disponibilité de la matière première ainsi que la disponibilité des terres convenables pour la production des biocarburants et par là même, faciliter le choix des sites favorables pour l'installation des unités de transformation de la matière première. De surcroit, l'analyse multicritères offre une grande variété de techniques et de méthodologies et permet d'inclure les critères socioéconomiques et d'évaluer la faisabilité technicoéconomique d'une filière de production biogénétique.

Dans notre étude, nous avons appliqué la méthodologie de l'analyse du cycle de vie. Cette technique est introduite depuis les années 60, s'est pleinement développée dès les années 90, et se révèle une méthodologie très détaillée pour quantifier les impacts environnementaux potentiels des processus utilisés pour la production des biocarburants. Cet outil est une méthodologie très exhaustive, standardisée selon la norme ISO, et s'est imposé comme l'outil d'aide à la décision par excellence.

Ce travail avait comme objectif principal l'évaluation de la soutenabilité de la production du biodiesel à partir des matières premières locales en appliquant la méthodologie de l'analyse du cycle de vie. Cette étude porte sur l'évaluation des impacts potentiels de développement d'une filière de production de biodiesel à partir de matières premières de première génération, de deuxième génération et de troisième génération. Dans ce contexte, trois chaînes de valeur basées sur l'utilisation des espèces oléagineuses à savoir : *Moringa oleifera* en tant que source

de première génération, le *Ricinus communis* comme une source de deuxième génération et une microalgue, *Chlorella vulgaris*, en tant qu'une source de troisième génération pour la production du biodiesel.

Cette thèse est organisée en cinq chapitres. Le premier chapitre porte sur les sources et les technologies de production du biodiesel. Le deuxième chapitre décrit les outils d'aide à la décision et un aperçu général est donné sur les principaux outils d'aide à la décision utilisés dans le domaine de la production du biodiesel : l'analyse du cycle de vie, les systèmes d'information géographique, et l'analyse multicritère. Le troisième chapitre est consacré à une revue détaillée de l'analyse du cycle de vie et son application dans l'évaluation de la soutenabilité de la production du biodiesel. Les limites de cette approche sont aussi discutées. Le quatrième chapitre décrit les méthodes et matériels utilisés dans le cadre de cette étude ; il passe en revue les matières premières et les technologies de conversion ainsi que les différentes configurations des systèmes de production des trois types de génération de biocarburant, à savoir : le biodiesel dérivé de l'huile de *Moringa oleifera*, l'huile de *Ricinus communis* et l'huile de la microalgue *Chlorella vulgaris*. Le dernier chapitre de cette étude présente les résultats obtenus ainsi que leur discussion et interprétation. À l'issue de cette étude, plusieurs recommandations et perspectives sont abordées dont l'objectif est de donner une piste pour la poursuite de ce travail.

Chapitre 1

Biodiesel :

Sources, Technologies de production et
soutenabilité

Chapitre 1 : Biodiesel : sources, Technologies de production et soutenabilité

Introduction

L'intérêt aux énergies renouvelables gagne de plus en plus de grande importance tiré principalement par la croissance de la demande énergétique d'une part, et par la nécessité de la protection de l'environnement, d'autre part. La *Bioénergie*, constitue une solution prometteuse, parmi d'autres énergies renouvelables, face aux défis environnementaux ainsi qu'une force motrice au développement économique tant à l'échelle locale que globale (Williams et al., 2015).

Bioéthanol et biodiesel sont les formes majeures de biocarburants. Les biocarburants, qui sont des dérivés des huiles végétales ou animales, des sucres et d'amidon, sont qualifiés de biocarburants de *première génération*. Ces types de biocarburants sont produits à travers des processus relativement simples utilisant des technologies bien établies. Les technologies qui sont en cours de développement vont permettre la production des biocarburants de *deuxième génération*, qualifiés aussi de *biocarburants avancés*. Ces derniers sont issus de cultures non alimentaires et/ou utilisent les parties de la plante non destinées à des fins alimentaires. Les biocarburants de *troisième génération*, quant à eux, sont produits à partir des microorganismes photosynthétiques appelés algues (Williams et al., 2015).

Avant de procéder au choix et à la sélection du système de production de biodiesel, le choix de la matière première constitue l'aspect le plus important à prendre en considération. Par conséquent, un choix inapproprié de la matière première pourrait conduire à des surcoûts sachant que le coût de la matière première ne doit pas dépasser plus de 50 % du coût global de la production. De plus, le coût élevé (jusqu'à 50-70% du coût global) de la matière première pourrait être dû aux différents prétraitements avant la conversion de la matière première (Anuar and Abdullah, 2016).

En outre, Il est très important de prendre en considération d'autres paramètres lors de la comparaison de différentes matières premières. Chaque source devrait être évaluée sur la base de son cycle de vie. L'analyse de ce cycle de vie comprend la disponibilité des terres, les pratiques culturales, le bilan énergétique, les émissions de GES, l'utilisation des pesticides, la dégradation du sol et la perte de biodiversité, les coûts de transport et de stockage, la disponibilité de l'eau, les incidences sur la qualité de l'air et la création et le maintien de l'emploi (Bhuiya et al., 2016).

1.1. Biodiesel et Matières premières

La production de la matière première constitue le facteur majeur qui détermine le coût de la production du biodiesel. Le coût de la conversion de la matière première contribue pour seulement 10% dans les unités de grande taille, et 25 à 40% dans les unités de petites tailles. Les recherches actuelles se focalisent sur la prospection des matières premières de faibles coûts ainsi que le développement des procédés techniquement faisables et économiquement plus rentables. Cependant, les sources non traditionnelles suscitent plus d'intérêt telles que les plantes non alimentaires et les algues. L'extension des procédés en utilisant des catalyseurs hétérogènes bi-fonctionnels, l'utilisation des fluides supercritiques, l'intégration de la production du biodiesel avec d'autres procédés à l'instar de la production du biogaz et de la cogénération par la méthanisation des résidus sont autant de pistes privilégiées actuellement (Bhuiya et al., 2016). La figure 1.1 présente la classification des biocarburants selon la matière première ainsi que la technologie de production.

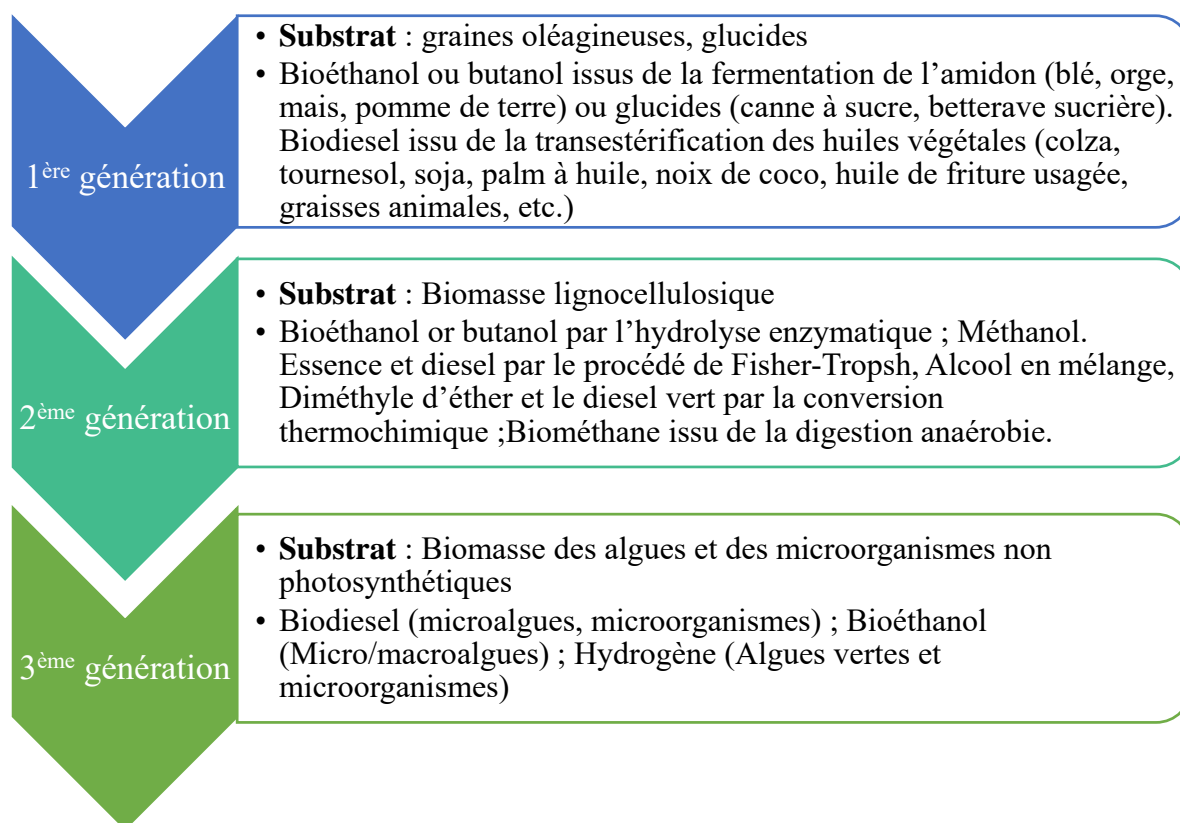


Figure 1.1: Classification des biocarburants selon la source de la matière première

1.1.1 Sources de première génération pour la production du biodiesel

Le biodiesel est généralement produit à partir de matières premières d'origine alimentaire à l'instar des huiles alimentaires telles que les huiles de soja, de colza, du palmier et de tournesol. Ce type de ressources pour la production du biodiesel est qualifié de première génération (Bhuiya et al., 2016). Cependant, ce type de biodiesel est largement controversé suite aux multiples impacts négatifs sur la sécurité alimentaire, à l'utilisation des terres pour une production à grande échelle, à la contribution aux émissions indirectes en matière de GES à la perte de la biodiversité et la rareté des ressources hydriques (Mohr and Raman, 2013). Le tableau 1.1 présente les différentes propriétés des huiles alimentaires.

Tableau 1.1 : Propriétés des huiles alimentaires (Balaji and Cheralathan, 2013)

<i>Propriété/ Espèce</i>	PCI (kJ/kg)	ν (mm ² /s)	PEc (°C)	PT (°C)	PE (°C)	IC
Huile de Colza	39,709	37	246	-3,9	-31,7	37,6
Huile de palme	35,780	38,59	260	14	6	42
Huile de noix de coco	37,94	29,6	182	25	-	52
Huile de soja	39,62	32,6	254	-3,9	-12,2	-37,9
Huile de tournesol	39,57	37,1	274	7,2	-15	37,1
Huile de Sésame	39,35	35,5	260	-3,9	-9,4	40,23
Huile de coton	40,1	32,8- 36	210 - 243	-8,7 - 1,7	-10 à 16	41,2- 59,5
huile de maïs	93,5	34,9	277	-1,1	-40	37,6
Huile de carthame	39,50	31,3	260	18,3	-6,6	41,3

1.1.2 Sources d'huiles non alimentaires

Les cultures énergétiques et les technologies de production de biocarburants de deuxième génération ont le potentiel d'être utilisées plus efficacement que les biocarburants dérivés des cultures énergétiques de première génération. Cependant, il existe toujours des limitations techniques pour la production de cette génération de biocarburants. Ainsi, les impacts environnementaux des carburants de deuxième génération dépendent largement du type de la matière première ainsi que des techniques de production et de la zone de production (López-Bellido et al., 2014).

Les huiles dérivées des espèces oléagineuses non alimentaires sont souvent impropres à la consommation humaine à cause de la présence des substances toxiques. La production du biodiesel à partir des huiles végétales non alimentaires pourrait apporter une réponse au débat sur le dilemme alimentation - carburant, les questions relatives aux aspects environnementaux et économiques. De surcroît, les espèces oléagineuses non alimentaires dédiées à la production du biodiesel seraient développées sur des terres marginales improductives ainsi que sur les bords des autoroutes et les canaux d'irrigation (Atabani et al., 2013), (Bhuiya et al., 2016).

Les tableaux 1.2, 1.3 présentent les propriétés techniques du biodiesel ainsi que les rendements en huile issus des espèces oléagineuses non alimentaires.

Tableau 1.2 : Propriétés techniques du biodiesel issu des espèces oléagineuses non alimentaires (Yang et al., 2014).

Nom scientifique	ν (mm ² /s à 40°C)	ρ (kg/m ³)	IC	PEcl (°C)	PT (°C)	SO (110°C)
<i>Jatropha curcas</i>	4,80	880	55,84	135	2,70	2,30
<i>Simmondsia chinensis</i>	5,20	920	55,00	186	16,00	7,10
<i>Moringa oleifera</i>	4,91	877,5	62,12	206	10,00	-
<i>Ricinus communis</i>	15,25	899	52,31	-	-13,40	1,10
<i>Azadirachta indica</i>	5,21	884	57,83	-	-	0,80
<i>Nicotiana tabaccum</i>	4,23	888	51,6	165,40	-	-
<i>Camelina sativa</i>	4,30	888	42,76	152	0	1,30
<i>Pistachia atlantica</i>			55,25			10,95
<i>Salvadora persica</i>	-	-	55,25	-	-	10,95
<i>Salicornia bigelovii</i>	5,00	-	53,9	150	-4,00	3,00
<i>Cynara cardunculus</i> ⁽¹⁾	5,10	889	59,00	182	-4,00	
<i>Ziziphus mauritiana</i> ⁽²⁾	-	-	55,37	-	-	-
<i>Pistacia chinensis</i> ⁽³⁾	4,70	879	58,54 (B30) ⁽⁴⁾			

Standard EN14214 : Viscosité cinématique (mm²/s,40°C) : 3,5-5,0, Densité (kg/m³) : 860 - 900, Indice de Cetane > 51, Point de trouble : 0,3°C max, Point d'éclair > 101°C, Stabilité oxydative à 110°C > 3.

⁽¹⁾ (Fernández et al., 2006) ⁽²⁾ (Bart, Palmeri, & Cavallaro, 2010b) ⁽³⁾ (Han et al., 2016) ⁽⁴⁾ (Zhihao et al., 2011)

Tableau 1.3 : Rendement des espèces oléagineuses non-alimentaires (Yang et al., 2014)

Nom scientifique	Type de plante	Teneur en huile (%)	Huile (kg/ha)
<i>Jatropha curcas</i>	Arbre/ arbuste	20-60	1900-2500
<i>Simmondsia chinensis</i>	Arbre/ arbuste	45-55	1818
<i>Moringa oleifera</i>	arbre	33-41	4680
<i>Ricinus communis</i>	Arbre/ arbuste	45-50	450-2300
<i>Azadirachta indica</i>	arbre	20-30	2670
<i>Nicotiana tabacum</i>	arbuste	36-41	950-1150
<i>Camelina sativa</i>	arbuste	-	800-1200
<i>Pistacia atlantica</i> ⁽¹⁾	arbre	39,80	-
<i>Salvadora persica</i>	arbre	40-45 ⁽²⁾	576 - 868
<i>Salicornia bigelovii</i> ⁽³⁾	Plante de type C4	26-33	680
<i>Cynara cardunculus</i> ⁽⁴⁾	Plante herbacé	32,47	442
<i>Ziziphus mauritiana</i> ⁽⁵⁾	Arbre	33	-
<i>Pistacia chinensis</i> ⁽⁶⁾	arbre	30	3000

⁽¹⁾ (Benhassaini et al., 2007), ⁽²⁾(Reddy et al., 2008), ⁽³⁾ (Glenn et al., 2013), ⁽⁴⁾ (Fernández et al., 2006) ⁽⁵⁾(Bart et al., 2010b), ⁽⁶⁾ (Tang et al., 2012)

1.1.3 Matières premières à haute teneur en Acides Gras Libres

La disponibilité d'une matière première à faible coût comme les huiles de friture usagées et les graisses animales est cruciale en vue de la production d'un biodiesel économiquement rentable. Les huiles de friture usagées et les graisses animales contiennent des quantités importantes d'acides gras libres (AGL) comparativement aux huiles végétales raffinées, ce qui se traduit par une valeur d'acidité très élevée. Les graisses animales contiennent des teneurs en acides gras libres comprises entre 5 et 30% contre 2 à 7% pour les huiles de friture usagées (Atadashi et al., 2012).

La collecte et le recyclage des huiles de friture usagées sous forme de biodiesel pourraient constituer un procédé propre et économiquement rentable tout en remédiant à un problème environnemental généré par le traitement de fin de vie des huiles de friture usagées (Kolyaei et al., 2016). Le tableau 1.4 compare les caractéristiques physico-chimiques des huiles de friture usagées à celle du carburant B10 (mélange contenant 10% de biodiesel et 90% de gazole).

Tableau 1.4 : Caractéristiques du biodiesel issu des huiles de friture usagées comparée avec celles du B10 (Phan & Phan, 2008).

Paramètre	EN 14214	Biodiesel de l'huile de friture usagée	B10
ρ (kg/m ³)	860 - 900	0,88	0,85
ν (mm ² /s, 40 °C)	3,5 - 5,0	4,89	3,72
P T (°C)	-	3	0
PEc (°C)	-	0	-11,5
PEcl (°C)	101	120	80,5
IA, max, (mg KOH/g)	0,5	0,43	0,12
Teneur en eau, max (ppm)	500	Traces	Traces
PCI (kJ/kg)	-	-	44978

1.1.4 Microalgues : matière première pour la production du biodiesel

Les microalgues présentent un intérêt de plus en plus croissant pour la production des biocarburants, en particulier le biodiesel. Elles représentent en effet un potentiel très important en matière de rendements en biomasse tout en évitant l'utilisation des terres agricoles. De surcroît, ces microorganismes photosynthétiques possèdent la capacité de capturer le CO₂ sous forme de bicarbonates, réduisant ainsi les émissions de CO₂ anthropogénique. Les microalgues ont la capacité de produire deux à dix fois plus de biomasse par unité de surface que les cultures énergétiques conventionnelles (Sayre, 2010). La biomasse microalgale est caractérisée par une teneur en lipide pouvant atteindre 80% du poids sèche total et une productivité journalière de plus de 7,3 gMS/L. En outre, la biomasse microalgale contient des quantités importantes de carbohydrates, protéines et autres nutriments. Ainsi, une approche bioraffinerie est une option décisive afin d'exploiter et de valoriser au maximum la biomasse algale. Cependant, le principal défi dans cette voie est la séparation de différentes fractions de la biomasse sans endommager les produits recherchés. De plus, les technologies à développer devraient être douces, économiquement faisables et avec une consommation énergétique réduite (Singh et al., 2017). Le tableau 1.5 montre la composition physicochimique des différentes microalgues.

Tableau 1.5 : Composition générale de différentes microalgues (% MS) (Trivedi et al., 2015)

Microalgue	Protéines	Carbohydrates	Lipides
<i>Anabaena cylindrica</i>	43–56	25–30	4–7
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	62	23	3
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	51	26	6
<i>Chlorella vulgaris</i>	51–58	12–17	14–22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Dunaliella bioculata</i>	49	4	8
<i>Euglena gracilis</i>	36–61	14–18	14–20
<i>Porphyridium cruentum</i>	28–39	40–57	9–14
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50–56	10–17	12–14
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	47	-	1.9
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8–18	21–52	16–40
<i>Spirogyra sp.</i>	6–20	33–64	11–21
<i>Arthrospira maxima</i>	60–71	13–16	6–7
<i>Spirulina platensis</i>	46–63	8–14	4–9
<i>Spirulina maxima</i>	60–71	13–16	6–7
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11
<i>Prymnesium parvum</i>	28–45	25–33	22–38
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3
<i>Porphyridium cruentum</i>	8–39	40–57	9–14

En outre, le tableau 1.6 présente une comparaison entre les sources oléagineuses conventionnelles pour la production du biodiesel et les avantages de du biodiesel issu de microalgues en matière de rendements et utilisation des ressources naturelles.

Tableau 1.6 : Comparaison des sources conventionnelles du biodiesel et les microalgues (Ullah et al., 2014)

Type de source de l'huile	Biodiesel (L/ha an)	Surface pour satisfaire la demande globale de pétrole (10 ⁶ ha)	Surface nécessaire par rapport la surface global disponible (%)	Surface nécessaire par rapport la surface agricole disponible (%)
Soja	446	10,932	73,4	551,6
Colza	1190	4097	27,5	206,7
Tournesol	952	5121	34,4	258,4
Jatropha	1892	2577	17,3	130
Huile de Palme	5950	819	5,5	41,3
Microalgue (10 g/m ² j à 30% TAG).	12000	406	2,7	20,5
Microalgue (50 g/m ² j à 50% TAG).	98500	49	0,3	2,5

Selon la composition chimique de la biomasse algale, plusieurs types de biocarburants pourraient être produits, entre autres, le biodiesel, le bioéthanol, le biobutanol, le biométhane, le kérosène, le biohydrogène et des produits issus de la conversion thermochimique de la biomasse microalgale comme le diesel vert (Green diesel) et les gaz de synthèse (Ranjith Kumar et al., 2015). En plus, la biomasse issue des microalgues pourrait être également utilisée pour la production de chaleur et de bioélectricité (Collet et al., 2014).

Cependant, la production du biodiesel à partir des microalgues est confrontée à des limites biologiques en matière de disponibilité des souches à fortes teneurs en lipides, ayant un rythme de croissance élevé et qui ne sont pas difficiles à récolter. D'autre part, la disponibilité d'une source de CO₂ concentré et facilement utilisable constitue un autre défi pour la production du biodiesel microalgal (Ullah et al., 2014). En effet, le coût d'approvisionnement de CO₂ nécessaire durant la culture pourrait contribuer à 50% du coût global de la production, ce qui rendrait la production du biodiesel microalgal plus coûteuse que celle du gazole (Maranduba et al., 2015).

D'autre part, la disponibilité et la qualité de l'eau sont des facteurs déterminants pour la production de la biomasse algale à la fois pour la culture et pour remplacer l'eau d'évaporation durant la culture en particulier dans le cas des systèmes de culture ouverts (Pate, 2013). Par conséquent, la production de 1 kg de biomasse nécessite l'équivalent de 3726 kg d'eau douce, alors que 84 % de l'eau serait économisée dans le cas du recyclage de l'eau après la récolte. De surcroît, l'utilisation de l'eau de mer ferait chuter cette demande de 90% (Yang et al., 2011). L'utilisation des eaux usées pour la culture des microalgues constituerait aussi une option très prometteuse tout en remédiant à un problème environnemental (Pittman et al., 2011). La figure 1.2 présente le système de production de la biomasse microalgale illustrant les ressources clés et les questions environnementales connexes qui couvrent les opérations de production de biomasse par transformation en aval et conversion en biocarburants et coproduits.

Par ailleurs, un effort consistant en matière de recherche a été entrepris ces dernières années en vue de développer des technologies de production fiables du biodiesel algal. Ces technologies comprennent la bioprospection des souches à haute teneur en lipides ainsi que la stimulation de leur production par la variation des conditions de cultures ou par modification génétique. De surcroît, l'extraction des lipides est un processus d'une extrême importance pour la production du biodiesel microalgal (Lammers et al., 2017).

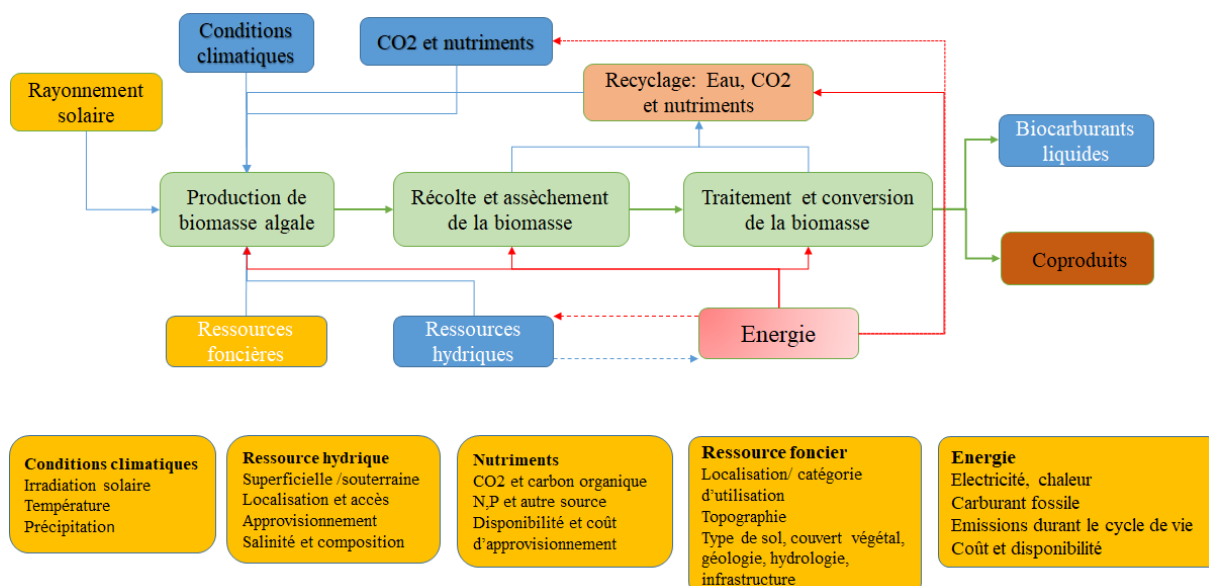


Figure 1.2 : Aperçu de la chaîne d'approvisionnement pour la production des biocarburants à partir des microalgues illustrant les ressources clés et les questions environnementales connexes qui couvrent les opérations de production de biomasse par transformation en aval et conversion en biocarburants et coproduits (Pate, 2013).

Le développement du concept de bioraffinerie intégrée pourrait être considéré comme une stratégie afin de surpasser les contraintes ainsi que d'assurer la viabilité du système de production à grande échelle. Cette approche intégrée vise à développer une industrie capable de convertir la biomasse algale en une variété de biocarburants, bioénergies et bioproduits à travers l'intégration d'une multitude de technologies de conversion. Une production intégrée sous-entend l'optimisation des inputs et les outputs matériels et énergétiques ainsi que la réduction des impacts environnementaux et par conséquent le coût de production (Maranduba et al., 2015).

La figure 1. 3 illustre les différents types de procédés de conversion possibles de la biomasse algale. Les figures 1.4 et 1.5 représentent un photobioréacteur à l'échelle industrielle et un système de culture à ciel ouvert.

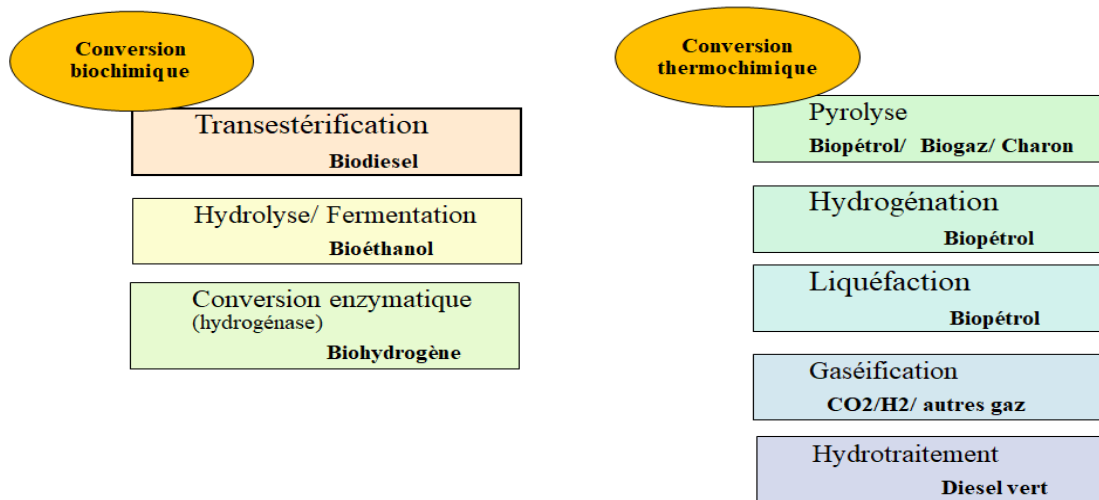


Figure 1.3: Procédés de production de biocarburants microalgales (Maranduba et al., 2015)



Figure 1.4: Système de culture des microalgues à ciel ouvert de type piste de course (Open pond raceway) (Barry et al., 2016)



Figure 1.5: Photobioréacteur à échelle industrielle (Silva et al., 2015).

1.1.5 Microorganismes oléagineux pour la production des lipides

Récemment, les micro-organismes oléagineux (levures, champignons et bactéries) ont été reconnus comme sources potentielles pour la production du biodiesel vu leur profil en acide gras convenable, la non-concurrence avec la production alimentaire, sans empiètement des terres agricoles (Bautista et al., 2012). Le tableau 1.7 présente la teneur en lipides des différents microorganismes.

Parmi les microorganismes oléagineux, les levures présentent un potentiel très prometteur vu leur cycle de dédoublement très court ainsi que leur meilleur profil en lipides, une grande productivité et un rendement élevé. Plusieurs espèces comme *Rhodotorula*, *Yarrowia*, *Rhodospiridium*, *Lipomyces*, etc. peuvent accumuler jusqu'à plus de 70% de lipide par rapport au poids sec (Chopra et al., 2016).

Les champignons sont aussi considérés comme une source potentielle pour la production du biodiesel due à leur accumulation de grande quantités de lipides en particulier les Zygomycètes. Ces champignons se développent sur des substrats riches en glycérol, en tant que source de carbone, issu de l'industrie du biodiesel de première génération (Bautista et al., 2012).

Les bactéries sont en général incapables de synthétiser des quantités significatives de lipides. Néanmoins, des souches appartenant au groupe d'Actinomycetes, à l'instar du genre *Rhodococcus*, *Nocardia* and *Mycobacterium*, ont montré un potentiel très prometteur en matière de production de triglycérides pouvant atteindre 70% de la matière (Subramaniam et al., 2010).

Tableau 1.7: Teneur en lipides des microorganismes hétérotrophes (Bautista et al., 2012).

Branchement	Souche	Teneur (% MS)
Champignons	<i>Mortierella isabelina</i>	86
	<i>Cunninghamella echinulata</i>	57
Levures	<i>Trichosporon cutaneum</i>	38,9
	<i>Lipomyces starkeyi</i>	37,2
	<i>Rhodotorula glutinis</i>	16,7
	<i>Rhodospiridium toruloides</i>	39,3
Bactérie (Subramaniam et al., 2010)	Actinomycetes	Jusqu'à 70

1.2 Matières premières et technologies de production du biodiesel

L'utilisation directe des huiles végétales ou de leurs mélanges comme carburant dans un moteur diesel s'est révélée non convenable et non pratique en raison de leur viscosité élevée, leur composition en acides gras libres et de la formation de gommages générées par l'oxydation et la polymérisation durant le stockage. Les dépôts de carbone et l'épaississement de l'huile lubrifiante sont les deux problèmes majeurs qui se posent, par conséquent, les huiles végétales sont converties en un carburant de qualité connu sous l'appellation de biodiesel (Aransiola et al., 2014).

Il existe quatre technologies bien établies pour la production du biodiesel à savoir, la microémulsion, le craquage thermique (la pyrolyse), la transestérification et la dilution (figure 1.6). La microémulsion et la dilution ne sont pas pratiquées en raison de la viscosité élevée et de la faible volatilité des huiles végétales (khan et al., 2014).

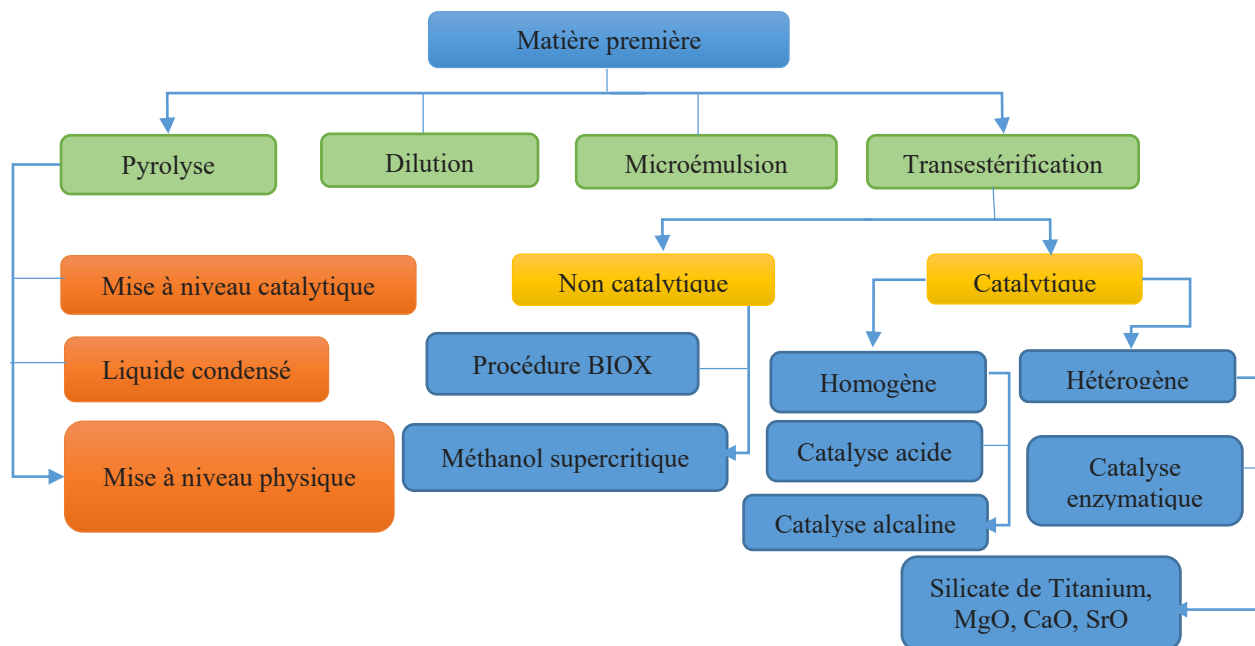


Figure 1.6 : Techniques de production du biodiesel (khan et al., 2014)

1.2.1 Etapes de la production du biodiesel par transestérification

Comme la plupart des procédés chimiques, la production de biodiesel comprend en général trois étapes séquentielles à savoir : le prétraitement, la réaction et la purification. Durant l'étape du prétraitement, les impuretés et l'eau sont éliminées afin d'éviter les effets indésirables sur la réaction de la transformation de l'huile végétale telle que la réaction de saponification. À cet effet, il est nécessaire de sécher l'huile et de neutraliser les acides gras libres par une estérification. Dans la seconde étape, l'huile est convertie en alkyl ester d'acides gras par transestérification. La transestérification est une réaction chimique de l'huile végétale, avec un alcool, en présence d'un catalyseur acide ou alcalin, qui conduit à un ester et du glycérol comme produit secondaire (figure 1.7). Il est à noter que cette réaction équilibrée nécessite un grand excès d'alcool pour favoriser la production de l'ester. A cet effet, le méthanol reste l'alcool le plus utilisé à cause de son faible coût et de ses propriétés physicochimiques adéquates. Le mélange réactionnel obtenu après transestérification contient des esters alkyliques, du glycérol, de l'alcool non consommé, Le catalyseur et les mono-, di- et triglycérides. Ce mélange doit être Purifié, afin d'obtenir un biodiesel de haute qualité selon la norme européenne (EN14214) ou la norme américaine (ASTM D6751) (figure 1.8) (Rincón et al., 2014).

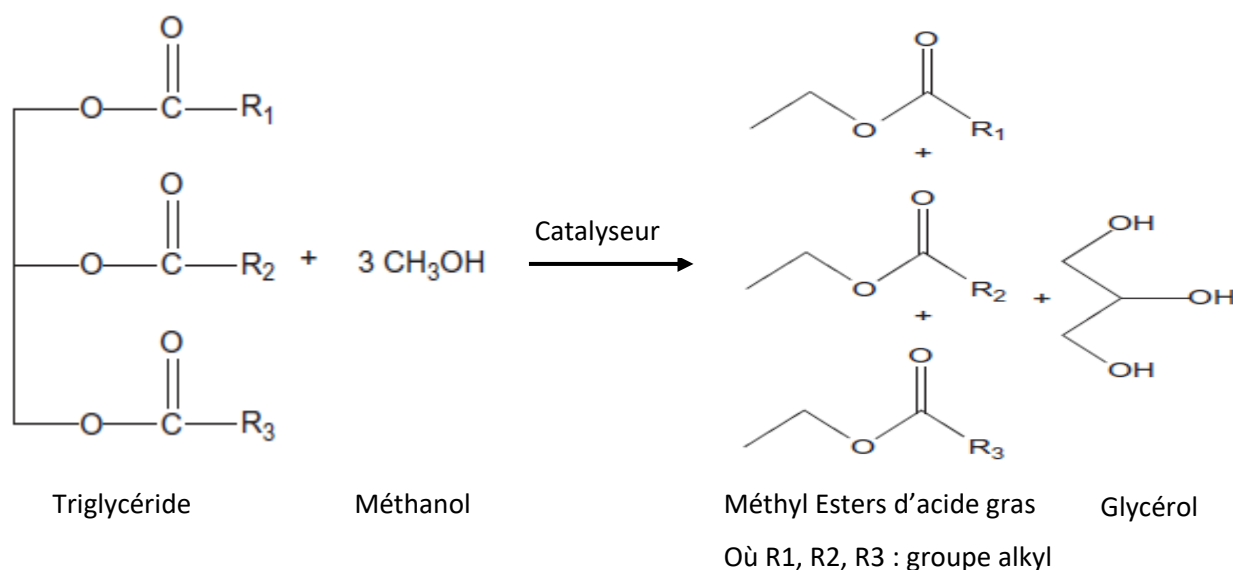


Figure 1.7: Mécanismes de la réaction de la transestérification (Patel and Shah, 2015).

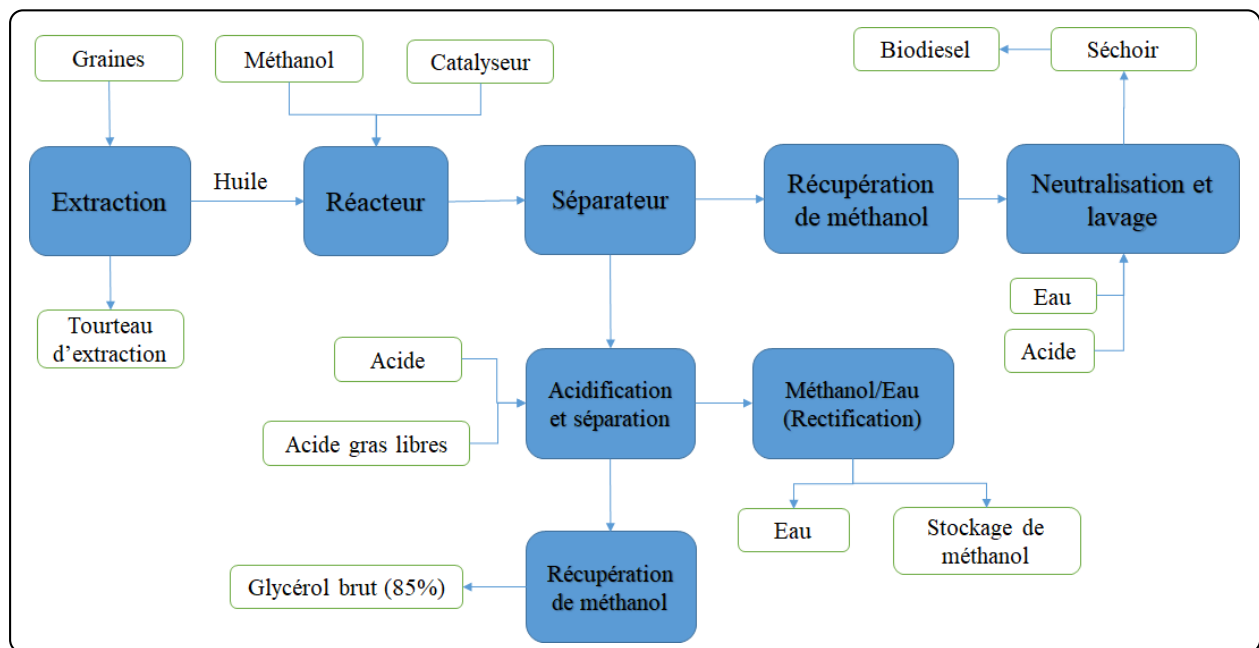


Figure 1.8 : Flux de processus pour la production de biodiesel (Bart et al., 2010b)

Actuellement, la transestérification est la technique la plus développée et la plus utilisée pour la production du biodiesel à l'échelle industrielle. De surcroît, l'utilisation des enzymes comme catalyseurs est rapportée dans la littérature. Bien que la transestérification puisse se faire en mode batch ou en continu, le procédé en batch est le plus adopté dans l'industrie de production du biodiesel. Cependant, le mode batch présente beaucoup d'inconvénients entre autres : le coût élevé de l'investissement dû à l'utilisation de réacteurs de grands volumes. Les capacités de production de biodiesel en mode batch et continu sont dans la gamme de 7,26 à 7,5 k tonne/an et 8 à 125 k tonne/an, respectivement (Bart et al., 2010b).

1.2.2 Transestérification des huiles végétales par l'utilisation des catalyseurs homogènes

Cette méthode implique l'utilisation des catalyseurs sous forme liquide comme les catalyseurs acides ou alcalins. L'utilisation des catalyseurs homogènes est la première méthode conventionnelle appliquée dans l'industrie de la production du biodiesel. Bien que son application à l'échelle industrielle soit largement adoptée, actuellement, la recherche se focalise plus sur l'application des catalyseurs hétérogènes afin d'améliorer davantage la productivité en biodiesel (Aransiola et al., 2014).

1.2.2.1 Estérification par catalyse Acide

Cette méthode convient pour les matières premières dont la teneur en acides gras libres est élevée. Les catalyseurs acides les plus utilisés sont les acides minéraux HCl, H₂SO₄, H₃PO₄. Cette méthode possède l'avantage de produire un biodiesel adapté dont les propriétés pourraient être caractérisées en se basant sur la composition en AGL présents et par conséquent les esters d'acide gras obtenu dans le produit final (Aransiola et al., 2014).

Cependant, cette méthode est sensible à la présence de l'eau. Une teneur très faible en eau de l'ordre de 1g/kg d'huile est capable d'affecter le rendement de la transestérification des huiles végétales avec le méthanol où la réaction est totalement inhibée à une concentration de 50 g/kg d'huile. Par ailleurs, l'élimination de l'eau formée après l'estérification d'AGL est nécessaire sinon la réaction de saponification sous les conditions de l'alcalinité. De surcroît, la réaction est lente et elle est souvent effectuée avec un rapport molaire alcool/huile très élevé, à une température et pression faibles à modérées avec une concentration élevée en catalyseur. La séparation et la purification du produit final constituent un inconvénient majeur en raison du surcoût exorbitant qui lui est associé (Aransiola et al., 2014).

1.2.2.2 Transestérification par catalyse alcaline

La transestérification avec un catalyseur alcalin homogène est la méthode la plus communément utilisée du laboratoire à l'échelle pilote et industrielle. Les catalyseurs les plus utilisés sont NaOH, KOH et NaOMe dans des proportions voisines de 0,5 à 1 % de la masse totale.

Le coût de production de ces catalyseurs est relativement faible et ils montrent des performances très élevées dans le cas où les matières premières utilisées ont de faibles teneurs en AGL. La réaction utilisant ce type de catalyseur est caractérisée par des rendements élevés en ester d'acides gras et un temps de réaction réduit. Cependant, cette méthode a ses propres inconvénients en l'occurrence une consommation énergétique élevée, la séparation difficile du glycérol dans le cas d'une concentration élevée en catalyseur, le catalyseur doit être enlevé du produit, les eaux usées alcalines doivent être traitées, les acides gras libres et l'eau interfèrent avec les réactions et la faible sélectivité conduit à des réactions secondaires (Aransiola et al., 2014).

1.2.3 Processus de transestérification en deux étapes

Cette technique est adoptée pour les huiles végétales riches en acides gras libres (AGL > 3%) dont les catalyseurs alcalins ne peuvent pas catalyser directement la transestérification. Par conséquent, la transestérification de ce type d'huile pourrait être réalisée en employant un processus de transestérification en deux étapes. La première phase consiste en une catalyse acide qui neutralise les acides gras libres par une estérification donnant ainsi des esters d'acide gras. Cette étape est suivie par une transestérification alcaline (Aransiola et al., 2014).

1.2.4 Paramètres opératoires spécifiques à la production de biodiesel

Les stratégies de synthèse discutées précédemment sont liées à des paramètres spécifiques du procédé influençant la qualité et le rendement du biodiesel obtenu, mais aussi à la demande énergétique globale ainsi que les impacts sur l'environnement et les coûts de production. Ce sont, par exemple, le rapport molaire alcool /huile, les conditions réactionnelles et des dispositifs pour l'intensification du procédé comme les réacteurs micro-structurés. Ainsi, la production de biodiesel en conditions supercritiques peut être considérée comme une technologie révolutionnaire pour l'exploitation des huiles riches en AGL, et en particulier les huiles usagées, qui peuvent être revalorisées efficacement (Kralisch et al., 2013). Le tableau 1.8 récapitule les facteurs influençant les différentes technologies de transestérification pour la production du biodiesel.

Tableau 1.8: Facteurs influençant l'éco-efficience et l'applicabilité industrielle de différentes technologies de transestérification pour la production de biodiesel (Kralisch et al., 2013)

Paramètre	Catalyse alcaline	Catalyse enzymatique (lipase)	Alcool supercritique	Catalyse acide	Catalyseur hétérogène
T° de réaction	60-70 °C	30-40 °C	239-365 °C	55-80 °C	180-220 °C
Teneur AGL	Saponification	Méthyl d'ester	Esters	Esters	Pas de sensibilité
Teneur en eau	Impact négatif	Pas d'influence	Pas d'influence	Impact négatif	Pas de sensibilité
Rendement en esters	Normal	Élevé	Élevé	Normal	Normal
séparation de glycérol	Difficile	Facile	Facile	Difficile	Facile
Purification des esters	Lavage répété	Pas de lavage	Pas de lavage	Lavage répété	Facile
Coût du catalyseur	Faible	Relativement élevé	-	Faible	Potentiellement faible
Ratio molaire (alcool /huile)	6 :1		42 :1	30-50 :1	4.5 :1
Pression (MPa)	0.1	0.1	>8.1	0.1	0.1-5
Temps de réaction (h)	0.5-4	1-8	Quelques minutes	0.5-4	0.5-10

1.2.5 Technologies émergentes de catalyse homogène et hétérogène pour la production du biodiesel

Les technologies actuelles de production du biodiesel de première génération présentent de grands inconvénients. L'utilisation des catalyseurs alcalins homogènes (NaOH, KOH, NaOMe et KOMe) implique l'addition de plusieurs étapes de lavage pour séparer le catalyseur de l'Alkyl d'ester d'acide gras et du glycérol. De ce point de vue, bien que le biodiesel soit un produit vert, il n'est pas actuellement produit par des procédés verts (Aransiola et al., 2014).

Un autre inconvénient de l'utilisation des catalyseurs alcalins est leur haute sensibilité aux AGL et à la présence de l'eau dans l'huile. Les AGL réagissent avec le catalyseur pour former du savon compliquant ainsi la séparation du glycérol tout en réduisant le rendement en Alkyl ester d'acide gras (AEAG). En outre, l'eau présente dans le milieu réactionnel conduit à l'hydrolyse des AEAG produisant ainsi les AGL. Par ailleurs, Les huiles non alimentaires de faible qualité ayant en général une teneur élevée en AGL et en eau ne pourraient pas être utilisées directement dans les équipements de production du biodiesel avec des catalyseurs homogènes (Aransiola et al., 2014).

Dans cette perspective, le défi le plus important pour la production du biodiesel est la synthèse des catalyseurs hétérogènes dont l'utilisation pourrait rendre la réaction plus simple, réduire le coût des procédés de séparation, réduire les rejets des eaux usées, réduisant du même coup le coût de production et la consommation de l'énergie. Récemment, les études se focalisent de plus en plus sur la combinaison de différents procédés pour la production de biodiesel dont l'objectif est d'atteindre une viabilité économique maximale et la création d'une industrie de bioraffinerie viable (Tableau 1.9) (Yoo et al., 2015).

Tableau 1.9 : Technologies émergentes pour la production du biodiesel (khan et al., 2014)

Méthodes	Biomasse	Conditions opératoires	Observation
Conversion basse température (LTC) (Pyrolyse)	Graines de ricin	T° : 380 °C	Rendement maximum : 50% PC : 35,65 MJ/kg
Processus de conversion hydrothermale (HTC)	Huile de soja et Jatropha	T°: 450 - 475 °C P: 210 bar	Rendement : 40% à 52%
	Épis de maïs	T° : 280 °C, P : 6.89 Bar	Rendement : 41,38%
Processus de liquéfaction hydrothermale (HTL)	Eucalyptus ligneux	T° : 150 - 300 °C	Le rendement le plus élevé d'huile obtenue avec les eaux usées de régénération du papier comme solvant
	Paille de riz	T° : 300 °C	Rendement diesel lourd : 21,62% pendant 30 minutes de liquéfaction hydrothermale
L'hydrodésoxygénation catalytique (HDO)	<i>Panicum virgatum</i> , <i>Eucalyptus benthamii</i>	T° : 320 °C, P : 145 bars, H ₂ atmosphère, 4 h de réaction	Bio-huile du panic raide exposée en matière de consommation de H ₂ , efficacité désoxygénante
	Pyrolyse de Sciure de pin	T° : 100 °C, P : 3 MP, H ₂ atmosphère, 2h.	Le PC de la bio-huile brute passe de 13,96MJ/kg à 14,1MJ/kg.

1.3 Analyse de la soutenabilité du biodiesel : Impacts socio-économiques et environnementaux de la production de biodiesel

La production du biodiesel dans un contexte de soutenabilité implique le développement d'une approche globale en incluant les trois dimensions de la durabilité à savoir les aspects technico-économique, social et environnemental. Dans ce contexte, l'analyse du cycle de vie à travers la considération de toutes les étapes et processus de production et d'utilisation du biodiesel ainsi que la quantification de leurs impacts est fondamentale pour évaluer la soutenabilité du biodiesel en tant qu'énergie renouvelable.

Dans cette perspective, trois groupes de critères sont établis pour évaluer la soutenabilité de systèmes bioénergétiques : la viabilité économique, les performances environnementales et l'acceptabilité sociale (Lee and Den, 2016). Par conséquent, un ensemble d'indicateurs pour chaque catégorie est utilisé afin d'évaluer la soutenabilité de la production du biodiesel tout en tenant en compte le contexte géographique et temporel, le système de production et les politiques en matière de développement des énergies renouvelables (Efroymsen et al., 2012).

De surcroît, la prise en compte des coproduits générés par la chaîne de valeur de production du biodiesel pourrait contribuer à réduire les impacts engendrés par le biodiesel. Par conséquent, la valorisation de la biomasse résiduelle pourrait générer d'autres vecteurs énergétiques à savoir le bioéthanol et le biogaz ainsi que des produits à haute valeur ajoutée telle que les biofertilisants, les produits de la chimie fine dans le domaine de la pharmacologie.

1.3.1 Aspects socio-économiques

Le développement du biodiesel à partir des espèces oléagineuses non alimentaires pourrait constituer un programme de levé pour la réduction de la pauvreté dans les zones rurales déshéritées tout en assurant la sécurité énergétique globalement et dans les zones rurales en particulier, encourageant ainsi le secteur non-agricole. Tous ces aspects ont un grand impact sur le développement et la soutenabilité de la production de biodiesel (Atabani et al., 2013).

L'acceptabilité sociale de l'utilisations du biodiesel en tant que source énergétique alternative dépend de plusieurs facteurs, entre autres, la qualité du biodiesel, un engagement des pouvoirs publics à promouvoir un tel type de carburant pour gagner la confiance du consommateur final (Anuar and Abdullah, 2016).

Afin de réduire les impacts environnementaux et économiques, la valorisation de la biomasse résiduelle est cruciale. Dans ce contexte, les microalgues présentent le potentiel de produire des coproduits à haute valeur ajoutée en particulier des sucres, des lipides, des protéines, de l'amidon, de la cellulose, des acides gras poly-insaturés, des pigments, des antioxydants, des principes actifs pour l'industrie pharmaceutique, des fertilisants et des colorants naturels. Les microalgues pourraient servir comme aliment de bétail une fois l'huile extraite (Trivedi et al., 2015).

1.3.2 Aspect environnemental de la production de biodiesel

L'industrie des biocarburants recèle de multiples avantages du point de vue social et environnemental. Cependant, elle présente aussi des répercussions négatives si les aspects de la soutenabilité du système de production ne sont pas correctement appliqués. La production de l'énergie à partir des cultures énergétiques pourrait contribuer à réduire les impacts des GES par la séquestration du CO₂ atmosphérique sous forme de carbone organique dans le sol. (Balaji and Cheralathan, 2013).

1.3.2.1 Emissions des GES par le diesel et le biodiesel : production et utilisation

Durant la croissance, les cultures oléagineuses assimilent une quantité de CO₂ atmosphérique qui pourrait atteindre 10 tonnes/ha environ. Par conséquent, les revenus supplémentaires peuvent être générés dans le cadre du Mécanisme de Développement Propre (MDP) dont l'article 12 du Protocole de Kyoto précise que les pays en développement peuvent bénéficier de projets MDP ayant pour résultat des « réductions certifiées d'émissions » et que les pays industrialisés peuvent utiliser des RCE pour respecter leurs engagements en matière de réduction des émissions en GES. (Balaji and Cheralathan, 2013).

Lors de sa combustion, le biodiesel émet la même quantité de CO₂ que celle qui a été séquestrée durant la phase de croissance de la plante. Il en résulte un impact neutre sur le réchauffement global. Les émissions en GES dû à la production et l'usage du diesel sont estimées à 278,16 g/km. Par contre, ces émissions sont seulement de 76 g/km dans le cas du biodiesel conduisant ainsi à une réduction des émissions en matière de GES d'environ 72% par rapport au diesel (Balaji and Cheralathan, 2013).

La réduction des émissions en GES du biodiesel pourrait être améliorée par l'utilisation des technologies propres pour la production et la conversion de la matière première. Le tableau 1.10 fait la comparaison des réductions des émissions issues de la production et de l'utilisation du biodiesel pur (B100) et en mélange (B20). Le tableau 1.10 fait la comparaison des émissions générées par le gazole et le biodiesel (Balaji and Cheralathan, 2013).

Les émissions de GES des différentes étapes impliquées dans l'extraction et la production du diesel et biodiesel sont clairement indiquées dans le tableau 1.11. Les émissions pour la production du diesel sont 33,16 g/km et de 76 g/km pour le biodiesel. Cependant, durant la phase de l'usage du diesel, les émissions sont de 245 g/km et 0 g/km pour le biodiesel. Ceci s'explique par le fait que les plantes oléagineuses absorbent du CO₂ durant la production de l'huile par le processus de la photosynthèse, ce qui compense les émissions émises lors de l'étape ultime de combustion du biodiesel.

Tableau 1.10: Comparaison de la réduction des émissions du B100 et B20 (Balaji and Cheralathan, 2013)

Emissions	B100 (%)	B20 (%)
Emissions réglementées		
Total des hydrocarbures non brûlés	-93	-30
Carbone monoxyde (CO)	-50	-20
Particules fines	-30	-22
NO _x	+13	+2
Emissions non réglementées		
Sulfates	-100	-20
hydrocarbures Polycyclique aromatiques (HPA)	-80	-13
Hydrocarbures polyaromatiques nitrés (NPAH)	-90	-50

Tableau 1.11: Emissions de GES (g/km) du gazole et du biodiesel (Balaji and Cheralathan, 2013)

Gazole		Biodiesel	
Extraction	15,84	Production de Fertilisant	15
Transport	2,74	Application de Fertilisants	10
Raffinage	13,63	Machinisme Agricole	25
Distribution	0,95	Production de l'huile	3
		Traitement de paille	1
		Traitement de gaz	17
		Transport	5
Total (production)	33,16	Total (production)	76
Utilisation sur véhicule	245	utilisation sur véhicule	0
Total	278,16	Total	76

1.3.1.1. Bilan hydrique de la production du biodiesel

L'empreinte hydrique est définie comme étant la quantité d'eau douce utilisée pour la production d'un produit. Cette empreinte est évaluée tout au long du cycle de vie du produit. L'empreinte hydrique (EH) d'un produit comprend trois composantes en l'occurrence celle de l'eau verte qui se réfère aux eaux pluviales, l'eau bleue qui se rapporte aux eaux d'irrigation superficielles ou souterraines, et l'eau grise qui se rapporte aux eaux polluées durant le processus de production (Gerbens-Leenes et al., 2009).

Le tableau 1.12 montre la consommation de l'eau pour nécessaire pour la production du bioéthanol et du biodiesel suivant la matière première. L'empreinte hydrique du biodiesel dérivé des cultures oléagineuses comme le soja, le colza et le jatropha présente une disparité due principalement au facteur géographique, vu que le colza est principalement produit en Europe, le soja en Amérique du sud, tandis que le jatropha est produit essentiellement en Asie. De surcroit, le biodiesel dérivé des microalgues présente une empreinte hydrique plus efficace par rapport à celle du biodiesel de première génération.

Tableau 1.12: Empreinte hydrique (EH) de différentes sources biodiesel (Gerbens-Leenes et al., 2009).

Culture	EH totale	EH Bleue	EH verte	Eau totale	Eau bleue	Eau verte
	m3 / GJ biodiesel			L eau/ L biodiesel		
Soja	394	217	177	13676	7521	6155
Colza	409	245	165	14201	8487	5714
Jatropha	574	335	239	19924	11636	8288
Microalgue (Yang et al., 2011)	-	-	-	591-3727	-	-

1.3.1.2. Gestion et traitement des coproduits issus de la production du biodiesel

Fondamentalement, le biodiesel est produit par transestérification de triglycérides. Le produit de cette réaction est composé de 90% d'esters méthyliques et de 10% de glycérol. Cependant, La production du biodiesel à grande échelle -la mise en vigueur de la directive européenne de 2005 qui vise l'intégration des biocarburants de 5,75% avant 2010- avait conduit à la saturation du marché en glycérol et la déstabilisation du prix, réduisant ainsi sa valeur économique (Anuar and Abdullah, 2016).

Cependant, il existe plusieurs technologies alternatives pour la gestion et la valorisation du glycérol. L'utilisation du glycérol en codigestion avec les résidus agricoles pour la production du biogaz est une alternative très prometteuse qui améliore la productivité des digesteurs de 8 à 12% (Choudri and Baawain, 2015). De surcroît, la conversion du glycérol en tant qu'additif lui ouvre des vastes débouchés, comme accélérateur de combustion des carburants, son incorporation dans les surfactants, désinfectants, et produits cosmétique et également son utilisation dans le secteur médical (Anuar and Abdullah, 2016).

L'évaluation multicritère des systèmes de production de biocarburants pourraient être réalisés ou conduites en appliquant la méthodologie de l'analyse du cycle de vie. Cette méthodologie évalue les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un système de production tout en prenant en considération chaque étape de la chaîne de production. L'analyse du cycle de vie est un outil essentiel pour établir des comparaisons entre différentes technologies et systèmes de production que ce soit entre les biocarburants ou entre les biocarburants et les carburants fossiles (López-Bellido et al., 2014).

Conclusion

Le biodiesel est un biocarburant d'origine renouvelable dérivé d'une réaction de transestérification des huiles végétales ou des graisses animales avec un alcool en présence d'un catalyseur acide ou alcalin. Il est composé essentiellement d'esters éthyliques ou méthyliques d'acide gras. Le biodiesel possède des propriétés semblables à celles du Gazole. De surcroît, le biodiesel est renouvelable, non toxique et biodégradable. La production de biodiesel dans le monde ne cesse de croître, ce qui lui taille une place incontournable dans le mix énergétique dans le secteur du transport.

La production de biodiesel est étroitement liée au choix de la matière première qui constitue le facteur le plus important à prendre en considération. Un choix inapproprié de la matière première pourrait conduire à des surcoûts pouvant atteindre 80 % du coût global de la production. Par ailleurs, il existe de multiples sources pour la production du biodiesel classifié généralement en trois générations.

La première génération concerne le biodiesel dérivé des huiles végétales alimentaires à savoir l'huile de soja, l'huile de colza, l'huile de palme, et l'huile de tournesol. Le biodiesel de deuxième génération est essentiellement produit à partir des cultures oléagineuses non alimentaires entre autres l'huile de jatropha, l'huile de ricin et l'huile de Moringa. En outre, les huiles de friture usagées sont recyclées et utilisées aussi comme un substrat à faible coût pour la production de biodiesel à faibles impacts environnementaux. La production du biodiesel de troisième génération fait appel à l'exploitation de biomasse algale plus au moins largement disponible et dont la teneur en lipides est très prometteuse. Également, certains micro-organismes oléagineux (levures, champignons et bactéries) sont considérés aussi comme sources potentielles pour la production de biodiesel en raison de leurs profils en acide gras convenables et de leur teneur élevée en lipides.

L'utilisation directe des huiles végétales ou leurs mélanges comme un carburant dans un moteur diesel s'est révélée non pratique due à des contraintes techniques en l'occurrence la valeur excessive de la viscosité de l'huile, la composition en acides gras libres ainsi que la formation des dépôts dans le moteur, ce qui diminue sa performance et par conséquent sa durée de vie. C'est pour cela que les huiles végétales sont converties en un carburant de qualité connue sous l'appellation du biodiesel.

Il existe quatre technologies bien établies pour la production du biodiesel à savoir, la dilution, la microémulsion, le craquage thermique (la pyrolyse) et la transestérification. La microémulsion et la dilution ne sont pas pratiquées vue la viscosité élevée ainsi que la faible volatilité des huiles végétales. Par ailleurs, la transestérification est la technique la plus développée et la plus adoptée pour la production du biodiesel à l'échelle industrielle. Néanmoins, les technologies actuelles de production du biodiesel ne sont appropriées pour les huiles non alimentaires riches en acides gras libres. Dans ce contexte, le défi le plus important pour la production du biodiesel est la synthèse des catalyseurs hétérogènes dont l'utilisation pourrait rendre la réaction plus simple, réduire le coût des procédés de séparation, réduire le volume des effluents aqueux, réduisant ainsi le coût de production et la consommation de l'énergie.

La recherche actuelle se focalise sur la prospection des matières premières de faible coût ainsi que le développement des procédés techniquement faisable et économiquement plus rentable. Ainsi, les sources non traditionnelles suscitent plus d'intérêt en l'occurrence les plantes non alimentaires et les microalgues, les procédés utilisant des catalyseurs hétérogènes, l'utilisation des méthodes supercritiques et l'intégration de la production du biodiesel avec d'autres co-processus à l'instar de la production du biogaz et de la cogénération par la méthanisation des résidus.

Cependant, L'utilisation de la biomasse comme une source énergétique n'implique pas automatiquement que sa production, conversion et utilisation soient soutenables. La pression sur les terres agricoles en vue de la production des cultures énergétique et biocarburants contribue à exacerber les conflits entre plusieurs services écosystémiques (production économique de denrées alimentaires, aliments de bétail et biocarburants, biodiversité, valeurs culturelles et sociales, etc.)

De surcroît, il est très important de prendre en considération d'autres paramètres lors de la comparaison de différentes matières premières. Chaque source devrait être évaluée en se basant sur son analyse du cycle de vie. Cette analyse comprend la disponibilité des terres, les pratiques culturales, le bilan énergétique, les émissions de GES et leurs effets sur la qualité de l'air, l'utilisation des pesticides, la dégradation du sol et la contribution à la perte de la biodiversité, les coûts de transport et de stockage, la disponibilité de l'eau, la création et le maintien de l'emploi.

Dans cette perspective, la durabilité doit toujours être évaluée dans un contexte bien cadré. Le contexte influence la sélection, la mesure et l'interprétation appropriée des indicateurs de durabilité des systèmes de production de biocarburants. En raison des impacts potentiels à grande échelle des biocarburants et de la prise de conscience accrue des impacts des méthodes de production alternatives de carburants, des indicateurs de durabilité sont en cours d'élaboration à des fins tant générales que spécifiques. Des séries d'indicateurs environnementaux peuvent fournir des mesures sur les effets de différentes voies d'approvisionnement en énergie si elles sont sélectionnées de manière appropriée et correctement interprétées.

Chapitre 2

Outils D'aide à la Décision Appliqués aux Biocarburants

Chapitre 2 : Outils d'Aide à la Décision Appliqués aux Biocarburants

Introduction

La production des biocarburants à partir de la biomasse ainsi que d'autres produits énergétiques avait été proposée comme une partie de la stratégie pour lutter tant contre le changement climatique que la dépendance envers les carburants fossiles. La biomasse en tant que matière première pourrait être produite d'une manière renouvelable à partir de multiples types et sources avec moins d'impact environnemental relativement aux carburants fossiles. Dans cette perspective, le développement de plusieurs chaînes de valeur, ou d'approvisionnement, robustes et durables est crucial. Ces chaînes de valeur font relier une source de biomasse durable avec les biocarburants finaux dans l'objectif d'avoir un coût de revient plus compétitif, de faibles impacts environnementaux et d'importants bénéfices sociaux que possible.

Dans ce contexte, l'utilisation des biocarburants en tant qu'une alternative aux carburants fossiles impose une prise en considération des défis relatifs à leur durabilité. Ceci permettrait de réduire les impacts sur l'écosystème et d'améliorer la rentabilité économique globale ainsi que les bienfaits sociaux qui en découlent. Dans cette perspective, une modélisation systématique et un cadre d'optimisation sont nécessaires simultanément dans le but d'évaluer et d'identifier des solutions pour la conception et l'opération de la chaîne de valeur des biocarburants.

Par ailleurs, et vue la grande complexité relative au développement des systèmes bioénergétiques, la question cruciale, qui s'impose, c'est comment gérer cette complexité d'une manière à être utile dans le processus d'aide à la décision pour le développement d'une filière de production de biocarburants durable et compétitive. Dans ce contexte, plusieurs outils sont proposés et utilisés à savoir, les systèmes d'information géographique (**SIG**), analyse multicritères d'aide à la décision (**AMAD**) et Analyse du cycle de vie (**ACV**). Cette panoplie d'outils permettrait le développement d'une approche holistique afin de contribuer activement au processus de la prise de la décision dans le cadre du déploiement de ce type de filière bioénergétique. Ces outils feront l'objet d'une discussion générale sur le contexte d'application et la contribution de chaque outil dans la chaîne de valeur de la production des biocarburants.

De surcroît, l'utilisation de ces outils chacun à part dépend de la phase et du niveau de la décision souhaitée à prendre en considération. Les systèmes d'information géographique sont nécessaires pour l'évaluation du potentiel réel de la biomasse disponible et accessible dans une zone ou une région bien précise, prenant en compte de multiples paramètres et critères pour

l'installation d'une filière de production ainsi que l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement et la localisation de l'unité de conversion de la biomasse en biocarburants.

L'analyse multicritère d'aide à la décision est une approche très puissante qui implique la prise de la décision tenant compte de multiples critères technico-économiques et socio-culturels dont ils sont potentiellement conflictuels. L'objectif de l'analyse multicritère d'aide à la décision est la sélection de meilleures solutions que possible à partir d'alternatives caractérisées précédemment selon de multiples attributs

L'analyse du cycle de vie pourrait être utilisée généralement pour l'évaluation des performances environnementales comme l'une des dimensions de la durabilité. Cet outil est largement utilisé pour évaluer les impacts environnementaux potentiels en l'occurrence du bilan des émissions des gaz à effet de serre, bilan énergétique et les impacts sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes naturels. Cet outil permettrait l'évaluation de toute la chaîne de valeur d'une filière de production dès le choix de la matière première, la transformation et l'utilisation ainsi que les différents traitements de déchets durant tout le cycle de vie. En outre, cet outil permettrait aussi de savoir et de déterminer les points critiques de la chaîne de valeur et ainsi, des solutions et des adaptations pourraient être apportées en vue d'améliorer les performances du système de production.

Néanmoins, l'accélération de la transition vers une production durable de la bioénergie à grande échelle ainsi que l'utilisation des biocarburants et les autres produits bioénergétiques par l'évaluation et l'optimisation de la chaîne de valeur tout au long du cycle de vie, de la production de la matière première à l'utilisation finale à travers différentes échelles spatiales, des opérations unitaires au processus de bioraffinerie, exige de grands efforts de recherche.

2.1 Chaîne de valeur de la production bioénergétique (Biocarburants)

La soutenabilité de la chaîne de valeur de biocarburants est cruciale à travers l'implémentation des solutions techniquement efficaces, économiquement viables, respectant l'environnement et socialement acceptables (Perimenis et al. 2011). La chaîne de valeur de biocarburants comprend cinq grandes étapes, à savoir : le système de production de la biomasse (matière première), système de logistique, système de production de biocarburants, système de distribution et l'utilisation finale de biocarburants (Yue et al., 2014).

Ce contexte souligne le fait que l'évaluation des chaînes de production de biocarburants est une tâche complexe. D'une part, la grande variété de matières premières, et d'autre part, les différentes voies de conversion conduisent à un grand nombre d'options de biocarburants, chacun d'entre eux a des impacts économiques, environnementaux et sociaux différents tout au long de la chaîne de production. Les questions concernant la disponibilité des terres, la production et l'approvisionnement en biomasse, la conversion de la biomasse, la distribution des biocarburants et l'utilisation finale combinées avec des cadres politiques spécifiques dans divers pays montrent clairement qu'il existe un grand nombre d'informations pertinentes pour l'évaluation des filières de production. Par conséquent, un système de gestion pour aider à la gestion efficace de cette information est nécessaire. Les outils d'aide à la décision sont présentés comme un moyen de traiter ces problèmes ([Perimenis et al. 2011](#)).

D'ailleurs, la modélisation et l'optimisation de telle complexité nécessitent la prise en considération de plusieurs aspects afin d'établir un cadre holistique qui intègre organiquement toutes les composantes de la chaîne de valeur des biocarburants. Dans ce contexte, les caractéristiques suivantes sont à prendre en compte, à savoir l'aspect multi-échelle de la décision, le caractère spécifique et unique de la chaîne de valeur des biocarburants, la stratégie de production distribuée ou centralisée, la compétition entre des acteurs dans la chaîne de valeur, l'impact du commerce international de la biomasse ainsi que l'intégration avec les autres chaînes de valeur comme la chaîne de valeur pétrolière, alimentaire et mitigation de carbone. La figure ci-dessous présente les différentes composantes et aspects de la chaîne de valeur à prendre en considération pour l'évaluation de la durabilité de la production des biocarburants (figure 1) ([Yue et al., 2014](#)).

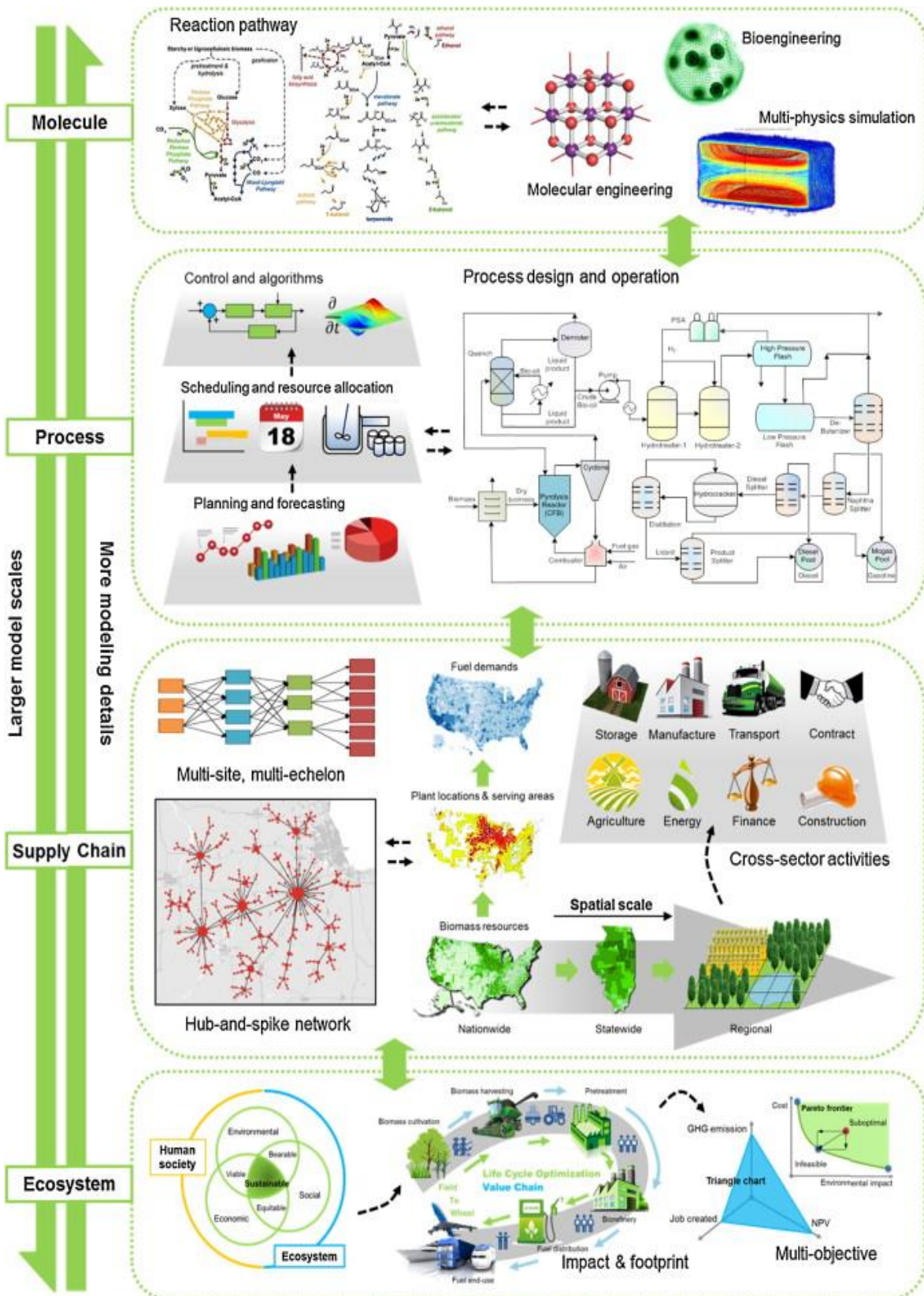


Figure 2. 1: Modélisation et optimisation Multi-échelle de la chaîne de valeur des biocarburants (Laboratoire Argonne, USA) (Yue et al., 2014).

2.2 Structuration de la chaîne de valeur des biocarburants

L'évaluation de la voie de production en matière de type du biocarburant, le type de la biomasse, la zone géographique de production et la technologie utilisée se fait par la segmentation de la chaîne de valeur tout en se basant sur la méthodologie du cycle de vie (figure 2.2) (Perimenis et al. 2011). Cette chaîne de valeur est structurée selon différentes phases, à savoir :

1- Phase de production de la biomasse : Elle comprend plusieurs étapes à savoir, le type de biomasse et son utilisation (i.e. culture, récolte, collection, le séchage et le transport) (Perimenis et al. 2011). L'un des défis majeurs de cette phase est la nature saisonnière de la production de la biomasse conduisant à une variabilité en matière d'approvisionnement. Par contre, cette variabilité est confrontée par une demande constante tout au long de l'année, entre autres, les biocarburants de 1^{ère} et 2^{ème} génération, ce qui nécessite un système de stockage convenable afin de limiter la dégradation quantitative et qualitative de la biomasse. Ceci implique la prise en compte d'un compromis entre le coût du système de stockage et la perte en biomasse (Yue et al., 2014).

2- Phase de transport de la biomasse : Elle consiste à l'approvisionnement de l'unité de transformation de la biomasse. C'est une étape avec des concepts de logistiques complexes (la distance, le type et moyens de transportation, distribution spatiale) (Perimenis et al. 2011), (Yue et al., 2014).

3- Phase de conversion de la biomasse : Cette étape inclut toutes les étapes nécessaires à savoir, prétraitement, conversion et conditionnement du produit final. Souvent, chaque étape est traitée séparément, impliquant la séparation du produit principal et les coproduits ainsi que les différentes étapes supplémentaires et leurs émissions. L'une des solutions la plus prometteuse est l'utilisation du concept d'une bioraffinerie produisant ainsi du biocarburant, énergie et coproduits à haute valeur ajoutée. Ceci permettrait de réduire les impacts environnementaux ainsi que l'utilisation de l'énergie fossile. De surcroît, la rentabilité économique serait améliorée vue la stratégie de diversification des produits.

4- Phase de distribution du biocarburant : Elle consiste au transport du biocarburant vers les sites d'accès public au consommateur final. Cette phase est cruciale dans le cas des biocarburants de 1^{ère} et 2^{ème} génération vue l'incompatibilité de l'infrastructure actuelle qui compromettrait la durabilité et la rentabilité économique. Par ailleurs, l'utilisation des biocarburants synthétiques pourrait répondre à ces exigences.

5- Phase de l'utilisation du biocarburant : Elle comprend l'utilisation et la combustion dans le moteur pour fournir l'énergie mécanique nécessaire pour la mobilité. Cependant, l'utilisation des biocarburants dans les moteurs à combustion interne est encore délicate d'où l'utilisation du biodiesel en mélange en respectant un certain ratio de 10 à 20% afin de maintenir les performances techniques du moteur.

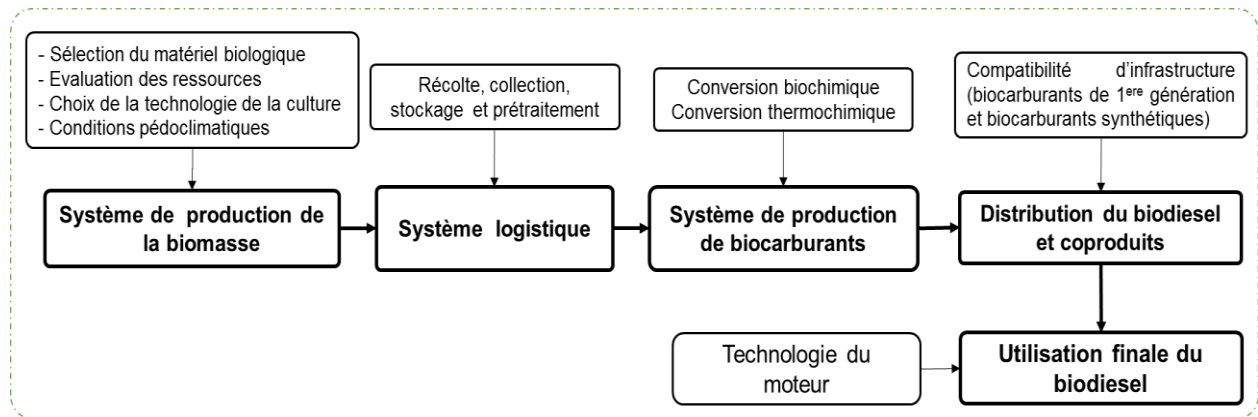


Figure 2. 2: Diagramme des interactions d'opérations de la chaîne de valeur des biocarburants.

2.3 Cadre général de l'utilisation des outils d'aide à la décision

Les outils d'aide à la décision sont introduits pour faciliter l'évaluation des projets exigeants, en matière de traitement et d'analyse de l'information. En principe, ils sont des systèmes informatiques ayant pour but d'aider les décideurs en analysant l'information et en identifiant des solutions. Leur objectif est de relier les attributs strictement informatiques d'un système d'information de gestion à la capacité de jugement du décideur. Selon (Perimenis et al. 2011), un outil d'aide à la décision contribue à :

- 1- L'analyse de l'environnement de la décision par l'identification des secteurs, les risques, les contraintes et les conséquences.
- 2- La structure de la procédure de l'aide de la décision par la détermination des objectifs et le développement des processus pour les atteindre.
- 3- La collaboration entre les parties prenantes impliquées par la consolidation des différences d'opinions.

Les outils d'aide à la décision avaient été implémentés dans plusieurs secteurs que ce soit régional ou local à l'instar de la planification énergétique, la gestion des déchets, la gestion des ressources hydriques et la protection de l'environnement.

Bien qu'il existe une littérature très riche en matière de l'étude des biocarburants, néanmoins, elles ne couvrent pas suffisamment tous les aspects de la chaîne de valeur des biocarburants. Par conséquent, nous avons besoin d'un cadre de modélisation et d'optimisation multi-échelle pour fournir une vision holistique et intégrer organiquement les différentes composantes de la chaîne d'approvisionnement en biocarburants. En effet, un cadre schématique de modélisation et d'optimisation multi-échelle pour les chaînes d'approvisionnement en biocarburants est donné, ainsi intégrant les quatre échelles temporelles et spatiales caractérisent le niveau de l'écosystème, la chaîne d'approvisionnement, le procédé et la molécule (Yue et al., 2014).

Dans ce contexte, la procédure est conceptuellement séparée en deux phases (figure 2.3). La première phase est la pré-décision /analyse suivi d'une phase de décision finale. Dans la phase de pré-décision, la voie de biocarburants sélectionnée est séparée en modules tout au long de la chaîne de production. Les aspects pris en compte dans l'évaluation des voies de production sont l'aspect technique, économique, environnemental et social. Les critères de chaque aspect sont définis et les algorithmes sont conçus pour l'analyse de chaque aspect séparément. Les données requises pour l'analyse sont recueillies auprès de diverses sources puis traitées, organisées et stockées dans une base de données intégrée. Par ailleurs, les outils des systèmes d'information géographique et l'analyse du cycle de vie sont utilisés en tant qu'outil d'aide à la décision pour l'intégration de l'échelle spatiale ainsi que l'analyse de différents aspects environnementaux, sociaux et économiques tout au long du cycle de vie de la chaîne de valeur (Perimenis et al. 2011).

La deuxième étape, la décision finale, la méthodologie de l'analyse multicritère est utilisée pour l'évaluation des résultats, présenté par scores de critère-indicateur, issus de la précédente étape en décidant sur l'importance relative de chaque critère sur l'échelle de valeur du décideur où le scénario reçoit un score finale qui indique les performances globale comparativement aux autres scénarii (Perimenis et al. 2011), (Hiloidhari et al., 2017).

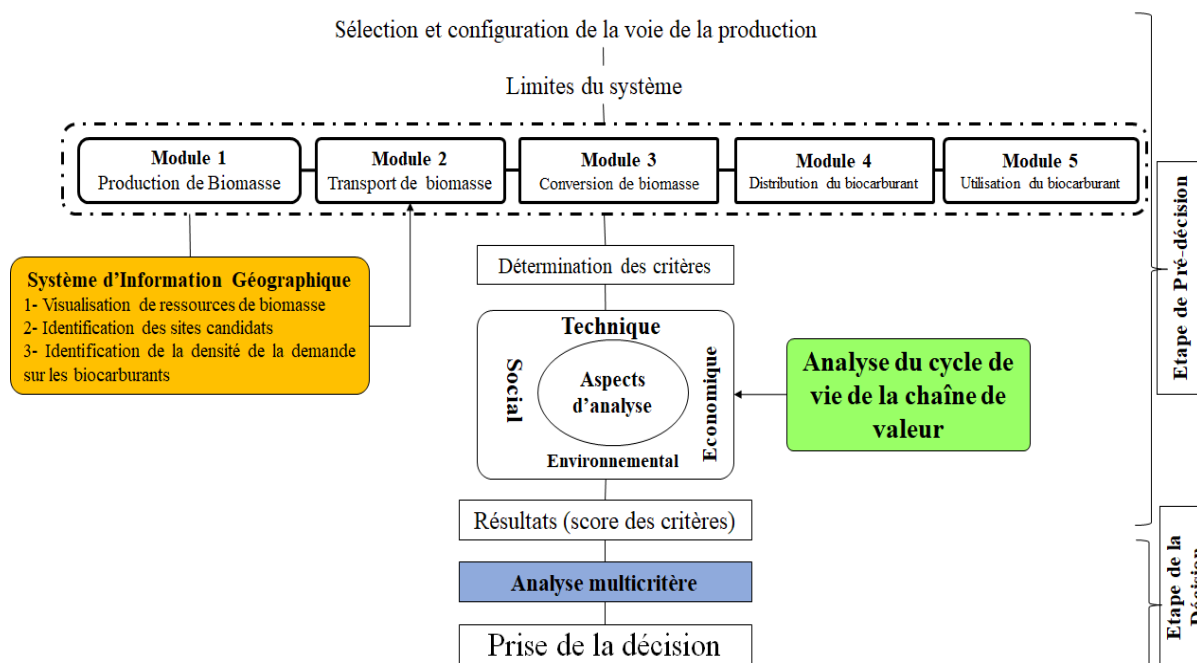


Figure 2. 3 : Analyse intégrée d'aide à la décision des biocarburants (Perimenis et al. 2011).

2.4 Analyse du cycle de vie

2.4.1. Introduction

L'utilisation des biocarburants en tant qu'une alternative aux carburants fossiles impose la prise en considération les défis liés à leur durabilité. Ceci permet de réduire les impacts sur l'écosystème et d'améliorer la rentabilité économique globale ainsi que les bienfaits sociaux. De surcroît, la prise de conscience croissante et le resserrement de la politique environnementale ont donné plus d'intérêt aux études de la soutenabilité environnementale dans ces dernières décennies. Dans ce cadre, parmi tant d'approches, l'analyse du cycle de vie en tant que méthodologie d'analyse environnementale se démarque d'être l'outil le plus réussi pour l'analyse des impacts environnementaux d'un système de produit (Yue et al., 2014).

L'analyse du cycle de vie est un outil d'aide à la décision et non un outil scientifique de mesure, où chaque choix méthodologique doit être basé sur le contexte de la décision. Par ailleurs, l'analyse du cycle de vie est supposée de supporter le processus de la prise de décision. Par conséquent, le contexte de la décision devrait être clairement définie et avec précision dans les rapports d'une étude de cycle de vie afin d'éviter une utilisation hors contexte (Sandin et al., 2015). D'autre part, l'objectif de l'ACV est de fournir une base pour évaluer les améliorations potentielles de la performance environnementale du système. Cette dernière peut revêtir une importance particulière pour les ingénieurs et les gestionnaires de l'environnement car elle peut suggérer des moyens de modifier ou de concevoir un système afin de réduire ses impacts environnementaux globaux (Azapagic, 1999).

L'analyse du cycle de vie est structurée en quatre phases selon la norme ISO, 14044 (figure 2.4). La première étape est la définition de l'objectif et le champ de l'étude, la seconde étape est l'établissement et l'analyse de l'inventaire, la troisième est l'évaluation des impacts et la dernière étape et l'interprétation des impacts environnementaux afin de fournir des conclusions et des recommandations selon le cadre de l'étude (Klöpffer and Grahl, 2014).

2.4.2. Définition de l'objectif et le champ de l'étude

La première étape dans une étude d'analyse du cycle de vie est la définition de l'objectif et le champ de l'étude. La définition de l'objectif est cruciale vue quelle influence tant les résultats que les conclusions pertinentes. L'objectif devrait indiquer clairement l'application prévue, les raisons pour lesquelles elle était menée, ainsi que le public concerné. La définition du champ de l'analyse du cycle de vie est également de grande importance et devrait être bien définie afin de s'assurer que l'objectif de l'étude sera suffisamment abordé. En outre, le champ d'une ACV devrait tenir compte de la/les fonctions afin de définir une unité fonctionnelle représentative ainsi que l'identification des limites du système sous investigation (Fokaides & Christoforou, 2016).

L'unité fonctionnelle sélectionnée, les procédures d'allocation, les types de méthodologie d'évaluation d'impact et les catégories d'impact devraient également être inclus dans le champ d'étude. D'autre part, les exigences en matière de données de point de vue quantitatif et qualitatif, les hypothèses, les limites du système, l'examen critique des sources d'incertitude, devraient être prise en considération. De surcroit ; l'approche de l'analyse du cycle de vie adopté à savoir, attributive ou conséquentielle, est d'une grande importance pour la réalisation de ce genre d'étude (Ces points seront traités en détail dans le chapitre III).

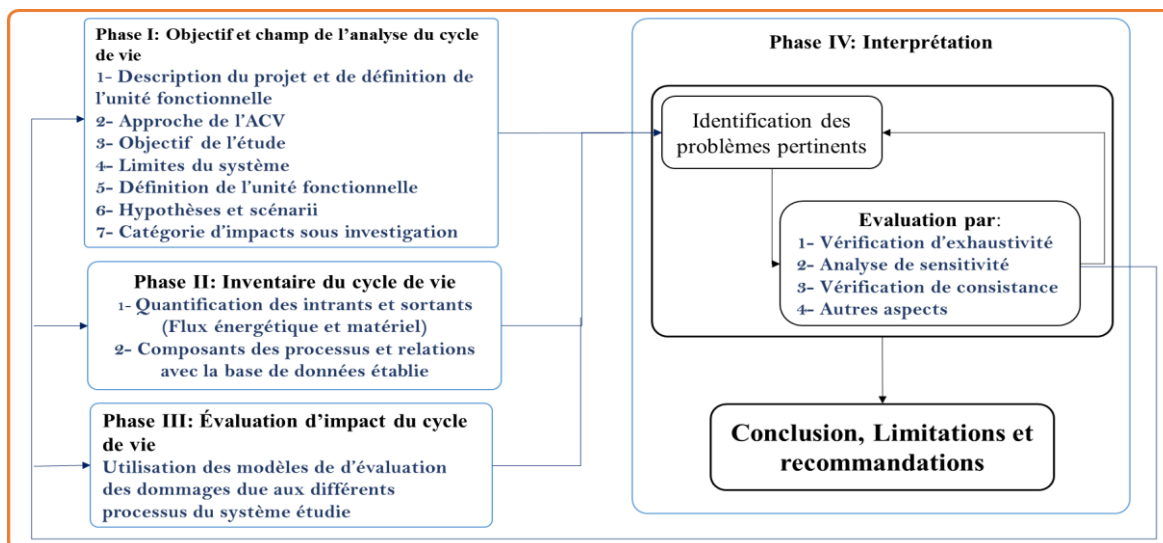


Figure 2. 4: Phases de l'Evaluation du cycle de vie et leurs interactions selon ISO 14040:2006 (Klöpffer and Grahl, 2014).

2.4.3. Établissement et analyse de l'inventaire du cycle de vie

Selon la norme ISO 14040 : 2006, l'inventaire du cycle de vie implique la compilation et la quantification des intrants/ sortants d'un système tout au long de son cycle de vie (Klöppfer and Grahl, 2014). Durant cette phase de l'ACV, l'élaboration et l'analyse de l'inventaire sont entreprises, dans laquelle, tous les flux élémentaires d'extractions et d'émissions sont comptabilisés. Elle consiste à la quantification 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, surface de sol, etc..) au cours du cycle de vie du produit ou du service analysé (Jolliet et al., 2010).

Davantage, les données de plusieurs processus pourront être trouvés dans des bases de données commerciales dédiées à l'analyse du cycle de vie, entre autres, Ecoinvent (2008), GaBi (2011), Greet (2012) et open LCA (2012). En revanche, certains nouveaux processus, qui ne sont pas suffisamment documentés, nécessitent l'établissement d'inventaire cumulatif en se basant sur les principes de conservation d'énergie et de masse par l'utilisation des données des processus unitaire et l'inventaire du cycle de vie des processus d'arrière-plan (Yue et al., 2014).

La collecte des données est suivie d'une étape de calcul des données relativement à l'unité fonctionnelle, ainsi une validation des données et de procédures d'allocation sont appliquées. La validation des données est utilisée pour améliorer la qualité des données recueillies et par conséquent les résultats pertinents ou pourrait indiquer la nécessité d'acquérir de données supplémentaires. L'allocation dans une ACV est effectuée pour attribuer la part de contribution aux impacts environnementaux globaux due aux différents produits d'un système. Le concept d'allocation est extrêmement important pour les systèmes bioénergétique, qui sont habituellement caractérisés par de multiples produits et par conséquent, une grande influence sur les résultats finaux (Fokaides & Christoforou, 2016).

2.4.4. Évaluation des impacts du cycle de vie

L'objectif de l'évaluation d'impact sur le cycle de vie est d'exprimer les résultats obtenus durant la phase de l'inventaire selon certains modèles d'évaluation de dommages (figure 2.5). Ces modèles peuvent générer un indicateur unique ou une série d'indicateurs de performance environnemental qui sont facile à communiquer, comprendre et à exploiter (Yue et al., 2014). Les modèles d'évaluation communément utilisés sont le Potentiel de Réchauffement Global (PRG) (IPCC, 2007), Eco-indicateur 99 (2001), CML (2001) (Guinée and Lindeijer, 2002), IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003).

Par ailleurs, chaque modèle d'évaluation a ses caractéristiques et ses avantages. Le potentiel de Réchauffement Global se focalise davantage sur l'évaluation et la quantification des émissions des gaz à effet de serre exprimées par le CO₂ équivalent, alors que l'Eco-indicateur 99 et IMPACT 2002+ évaluent les impacts environnementaux selon des catégories de dommage plus complètes à savoir, la santé humaine, la qualité de l'écosystème et la consommation des ressources. Il est à noter un problème majeur qui a été soulevé récemment sur l'évaluation de l'empreinte hydrique de la chaîne de valeur des biocarburants et qui devrait être pris en compte parmi les impacts (Yue et al., 2014).

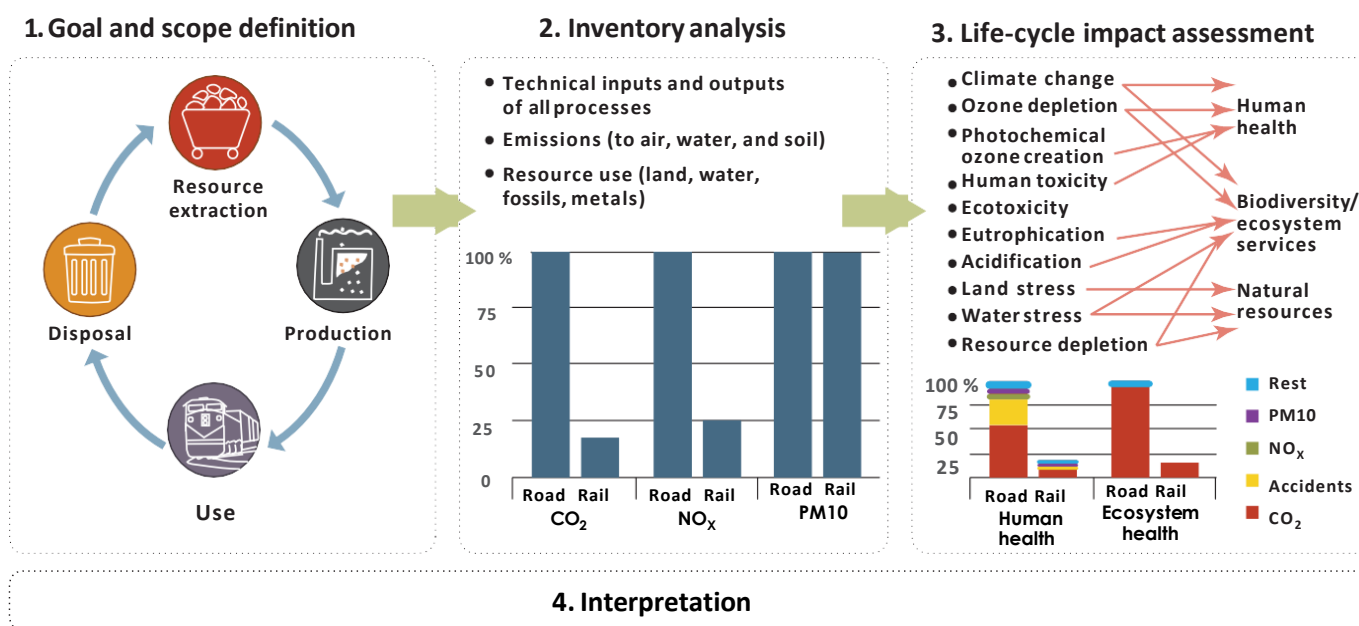


Figure 2.5 : Démarche générale de l'analyse d'impact des émissions et les catégories de dommages d'après la norme 14042 (Hellweg and Canals, 2014).

En outre, il faut souligner que ces méthodes d'analyse n'indiquent pas que les impacts réels seront observés dans l'environnement en raison du cycle de vie du produit ou du procédé à l'étude, mais seulement qu'il existe un lien potentiel entre le cycle de vie du produit ou du processus et les impacts (Klöpffer and Grahl, 2014).

2.4.5. Interprétation des résultats, conclusions et recommandations

Au cours de cette phase, les résultats obtenus de l'inventaire et l'évaluation d'impacts sont analysés et évalué d'une manière critique dans le but de vérifier la pertinence de résultats suivant les objectifs et le champ de l'étude ainsi que d'établir une série de conclusions et de recommandations (Klöpffer and Grahl, 2014).

Cependant, la généralisation des conclusions devrait être évaluée d'une manière critique encore une autre fois selon un processus itératif. Pour ce faire, la norme ISO 14044 : 2006 indique la procédure à suivre afin d'éviter une surestimation ou une interprétation incorrecte. Cette procédure inclut l'identification de facteurs significatifs suivie par une phase d'évaluation afin de vérifier l'exhaustivité, la sensibilité et la consistance de l'analyse (Klöpffer and Grahl, 2014).

2.5 Analyse Multicritère d'Aide à la Décision (AMAD)

2.5.1. Introduction

L'évaluation de la durabilité d'une filière biocarburant est en lui-même un problème multicritère. La production de biocarburants à grande échelle aura des interactions avec différents secteurs à savoir ; le secteur énergétique, agricole et le transport. Du point de vue du décideur public, il s'avère nécessaire d'élargir le cadre traité par les modèles classiques qui ont du mal à rendre compte de l'ensemble des interactions, souvent non linéaires, entre les sous-systèmes affectés.

L'analyse multicritère d'aide à la décision est une approche très puissante qui implique la prise de la décision tenant compte de multiples critères technico-économiques et socio-culturels dont ils sont potentiellement conflictuels. L'objectif de l'analyse multicritère d'aide à la décision est la sélection de meilleures solutions que possible à partir d'alternatives caractérisées précédemment selon de multiples attributs (Nwokoagbara et al., 2015).

2.5.2. Types d'Analyse Multicritère d'Aide à la Décision

L'analyse multicritère de la décision est une aide au processus de la décision ainsi qu'un outil mathématique qui permet la comparaison de différentes alternatives ou scénarii selon plusieurs critères, dont elles sont souvent conflictuelles, dont l'objectif est d'aider les décideurs à faire le choix le plus adéquat ainsi que le tri ou le classement des bonnes alternatives selon un ordre décroissant sur l'échelle de valeur/ de préférences (figure 2.6) (De Meyer et al., 2014).

L'analyse multicritère d'aide à la décision pourrait être considérée comme un processus complexe et dynamique tout en incluant le niveau de la gestion ou celui de l'engineering. Le premier niveau détermine l'objectif afin de prendre l'alternative la plus optimale. Dans le second niveau, il y a une détermination des alternatives qui met en exergue les conséquences d'un choix de l'une des alternatives de point de vue de plusieurs critères, suivi d'un tri des alternatives (Mateo, 2012).

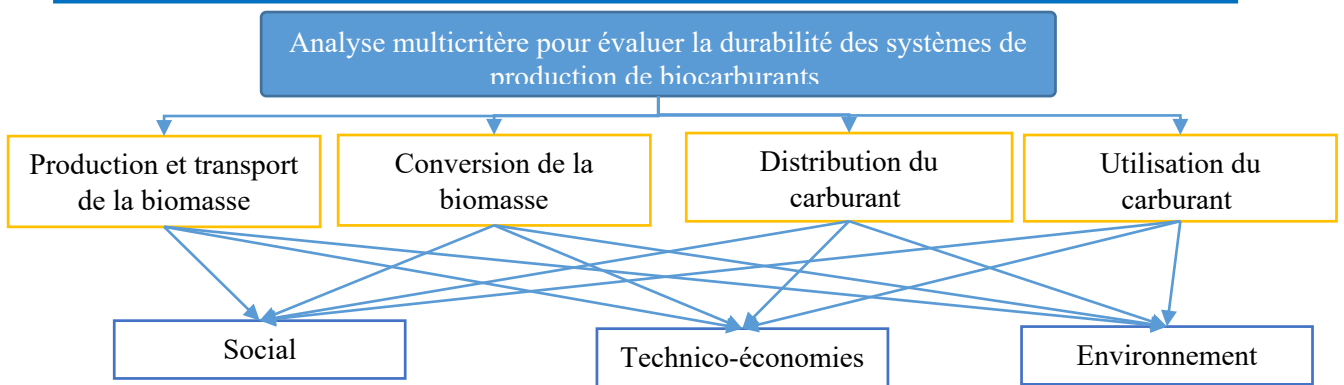


Figure 2. 6: Analyse multicritère pour un système d’analyse d’une filière de biocarburant

2.5.3. Etapes du processus de l’analyse multicritère d’aide à la décision

L’analyse multicritère est un élément essentiel dans le système/ processus d’aide à la décision. Etant donnée un nombre de critères prédéfinis, l’objectif des décideurs est d’identifier une solution qui optimise tous les critères. Cependant, dans des projets avec de telle complexité où l’évaluation et l’optimisation de tous les critères sont souvent non faisable et afin d’y remédier, l’élaboration d’une solution compromise s’impose (Perimenis et al. 2011).

Le processus d’aide à la décision comprend souvent 5 étapes à savoir, la définition de la problématique, l’élaboration des alternatives et la détermination des critères, sélection des critères ; pondération des critères ; évaluation matricielle des critères ; sélection de la méthode adéquate d’évaluation multicritère et finalement le classement des alternatives selon leur performance (figure 2.7) (Mateo, 2012).

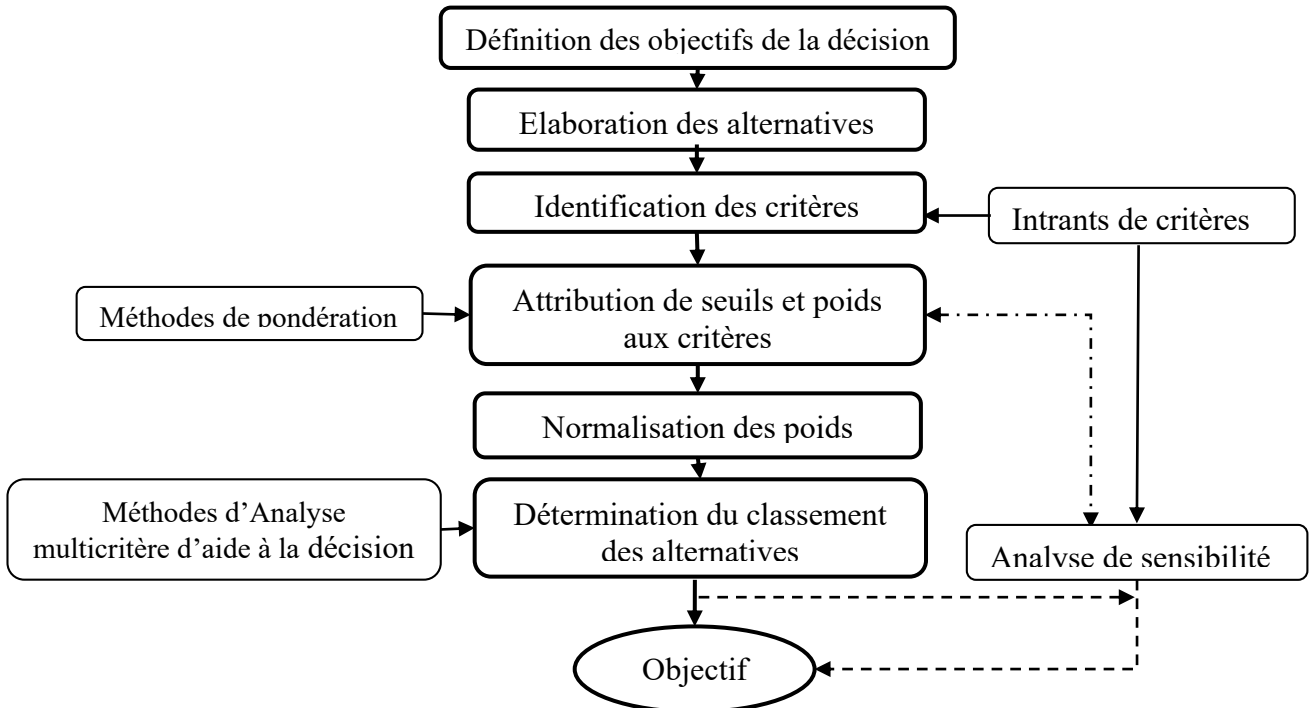


Figure 2. 7: Etapes du processus de l’Analyse multicritère d’Aide à la Décision (Nwokoagbara et al., 2015).

Tableau 2. 1: Critères d'évaluation pour l'analyse multicritère d'aide à la décision de biocarburants (Nwokoagbara et al., 2015).

Aspect	Critère
Critères techniques	<ul style="list-style-type: none"> - Fiabilité et sûreté du système de production - Teneur en huile et le profil en acide gras - Disponibilité des ressources à l'instar des nutriments, terres, eaux - Efficacité énergétique (teneur énergétique, ratio énergétique).
Critères environnementaux	<ul style="list-style-type: none"> - Changement d'utilisation direct et indirect des terres - Empreinte hydrique - CO2 séquestration et le bilan carbone - Qualité des écosystèmes et santé humaine
Critères économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts d'investissement - Coût d'opérations (Coût des intrants de différentes phases) - Durée d'amortissement - Coût d'utilisation des coproduits
Critères sociaux	<ul style="list-style-type: none"> - Compétition envers le secteur de l'alimentation - Développement technologique et développement durable - Acceptabilité sociale et bienfaits sociaux - Création d'emploi

2.6 Système d'Information Géographique (SIG)

2.6.1. Introduction

Les biocarburants comme bien d'autres sources d'énergie renouvelable constituent, pour les autorités, une option majeure de diversification et de renforcement du mix énergétique. Par ailleurs, le cadre multi-échelle de la modélisation et l'optimisation de la chaîne de valeur bioénergétique impliquent l'intégration de l'échelle spatiale (Yue et al., 2014). En effet, les systèmes d'information géographique constituent un outil communément exploité pour l'évaluation du potentiel réel en biomasse d'une zone géographique spécifique. Cette analyse constitue une phase critique pour développer une cartographie fiable dans l'objectif d'optimiser la localisation et la capacité des unités de conversion de la biomasse en biocarburant. Ceci dit, cet outil permettrait la conception et la création d'une chaîne de valeur ou filière bioénergétique économiquement rentable et durable à long terme, en particulier dans le contexte des pays en voie de développement (Natarajan et al., 2016).

La filière de production bioénergétique pourrait être divisée en 3 éléments spatiaux majeurs interconnectés, à savoir (1) évaluation des ressources disponibles en biomasse, (2) la planification logistique, (3) la conception et localisation de l'unité de transformation de la biomasse. Par conséquent, l'utilisation des SIG est nécessaire pour la planification des projets

de développement des filières bioénergétiques (Hiloidhari et al., 2017). Cet outil permettrait l'élaboration des bases de données concernant (1) l'inventaire des différents types de la biomasse disponible ainsi que ses caractéristiques physicochimiques et leur distribution spatiale. Les SIG offrent un guide pour les industriels en ce qui concerne l'optimisation de la collection et donc réduire le coût de revient de la matière première ; (2) l'établissement d'une base de données pour assurer une chaîne d'approvisionnement soutenable en biomasse aux unités de transformation de la biomasse ; (3) la considération des exigences en ce qui concerne les impacts environnementaux, les contraintes économiques, technologiques, le dynamisme socio-politique local, l'affectation du sol et l'infrastructure existante (Hiloidhari et al., 2017).

2.6.2. Définition des systèmes d'information géographique

Il y avait plusieurs tentatives pour définir les systèmes d'information géographique (SIG). Néanmoins, la plupart des définitions se focalisent sur deux aspects, à savoir l'aspect technologique et la résolution du problème. Les SIG constituent un ensemble d'outils pour l'acquisition, stockage, récupération, traitement et analyse et représentation spatiale des données (Malczewski, 2004).

2.6.3. Système d'information géographique appliqué aux biocarburants

L'utilisation des SIG dans l'évaluation du potentiel en biomasse dont elle dispose une région particulière est très pratique, vu le caractère dispersé de la biomasse. Cet outil d'aide à la décision permet de compiler les informations qui sont issues d'un ensemble de bases de données organisées sous différentes formes à l'instar de la cartographie digitalisée pour les caractéristiques du sol, la description agronomique qualitative des espèces végétales et la carte d'utilisation des terres. Cet outil met en exergue le potentiel réel accessible et exploitable en matière première pour la production de biodiesel tenant compte des contraintes-critères prédéfinis. De surcroît, cette cartographie permettrait le choix des sites pour l'installation des unités de conversion ainsi que leurs capacités, où la chaîne logistique est la plus optimale et la plus compétitive (Sahoo et al., 2016).

Dans le développement d'une filière de production bioénergétique, le transport est l'un des paramètres le plus important qui influence le coût de revient de la biomasse selon le type de transport, le type de la biomasse en fonction de sa densité et sa concentration. Par conséquent, l'optimisation du réseau du transport pourrait significativement réduire le coût du transport en utilisant les capacités des SIG à modéliser et à optimiser le coût minimum du transport (Hiloidhari et al., 2017).

La sélection du site d'installation de l'unité de conversion de la biomasse pour la production des biocarburants, entre autres, le biodiesel et le bioéthanol, pourrait se faire par deux méthodes, à savoir l'analyse d'aptitude pour faire le choix entre plusieurs sites-candidats selon des contraintes-critères prédéfinis, ainsi que l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement afin de réduire le coût du transport et augmenter la compétitivité envers les autres types de carburants fossiles. Dans ce contexte, l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement se fait généralement à travers l'application de la technique de la modélisation localisation-allocation. Cette technique permettrait de bénéficier des économies d'échelle en augmentant la capacité de l'unité industrielle de production (Yue et al., 2014 ; Hiloidhari et al., 2017).

En outre, l'utilisation des SIG est utile, particulièrement pour l'évaluation de la demande sur les ressources pour la production des biocarburants à grande échelle. Cette évaluation est cruciale pour la réussite du déploiement de ce type de filière tant pour la 1^{ère} génération et la 2^{ème} génération que pour la 3^{ème} génération. Cette analyse prend en considération les contraintes qui sont liés à la production à grande échelle, entre autres, la disponibilité des terres convenables, la demande en ressources hydriques, la demande en nutriments et l'infrastructure pour la logistique afin d'optimiser le coût de revient des produits finaux (Yue et al., 2014).

2.6.4. Différentes étapes d'intégration du SIG appliquée aux biocarburants

Plusieurs approches SIG ont été proposées pour être appliquées à l'évaluation du potentiel réel en biomasse dans une région géographique bien déterminée. Dans ces approches, l'affectation des terres pour la production à l'échelle locale se fait à travers d'une cartographie et des bases de données souvent bien détaillées tout en considérant des caractéristiques morphologiques, pédologiques, climatiques, délimitations administratives et l'utilisation actuelle des terres. Généralement, ces approches se focalisent sur les points principaux suivants (figure 8) (Fiorese and Guariso, 2010) :

- 1- **Sélection des espèces** : les exigences agronomiques de chaque espèce devraient être définies (Base de données phytologique) ;
- 2- **Aptitude des terres** : les données décrivant les caractéristiques du sol sont nécessaires afin de comprendre où chaque espèce pourrait croître selon ses exigences agronomiques (Cartographie du sol) ;
- 3- **Disponibilité des terres** : Comme toutes les terres disponibles ne sont pas automatiquement convenables pour recevoir des cultures énergétiques, elles devraient être identifiées prenant en considération des données tant l'affectation du sol que les contraintes sociopolitiques ;

4- **Attribution des terres/localisation des cultures** : Un processus de décision devrait être défini afin de déterminer l'affectation d'une espèce à une parcelle ou à une région de production favorable ainsi que la localisation du site de conversion pour une exploitation énergétique de la biomasse produite.

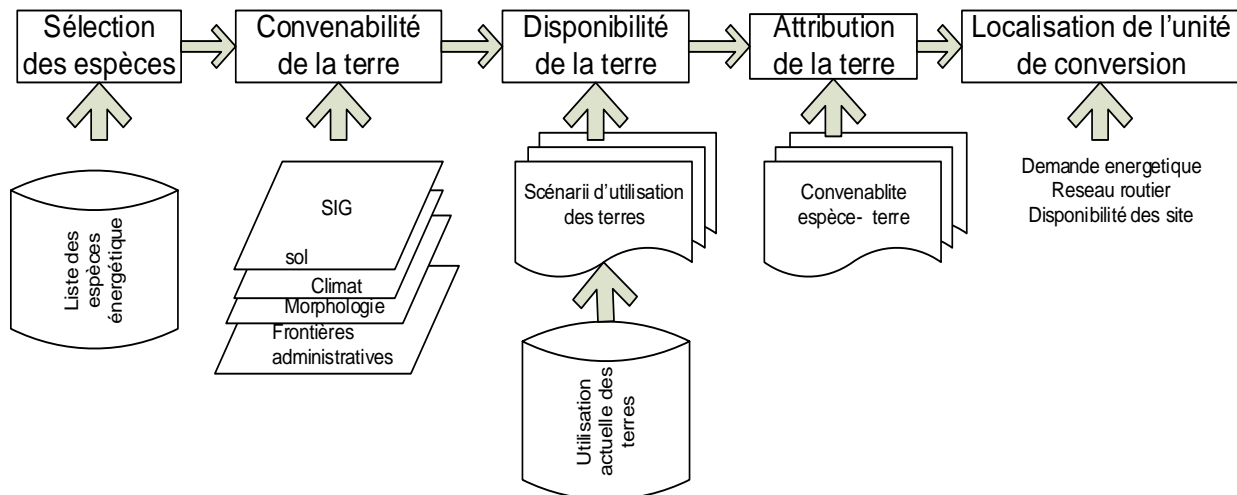


Figure 2. 8: Différentes étapes d'intégration du SIG appliquée aux biocarburants (Fiorese and Guariso, 2010).

La spatialisation de la chaîne de valeur de biomasse en vue de production des biocarburants, utilisant les SIG, permet de mesurer et d'intégrer des contraintes-critères propres aux systèmes de production de la biomasse dans une région géographique bien précise. En outre, l'utilisation des SIG permettrait de prendre en considération les interactions complexes des variations spatio-temporelles d'un ensemble de paramètres sur la disponibilité soutenable de la biomasse, à savoir les propriétés du sol, la topographie du sol, le rendement en biomasse d'une culture énergétique, le climat et les pratiques culturales (Sahoo et al., 2016).

Dans le contexte de production de biodiesel à base des microalgues, l'utilisation des SIG en tant que système de visualisation est un outil d'analyse indispensable pour l'évaluation de filière de production de biocarburant microalgal, vu sa capacité de réaliser une cartographie et une évaluation des ressources à l'échelle locale, régionale et nationale (Barry et al., 2016). Dans ce contexte, des données sur le climat et les ressources naturelles sont accessibles, à savoir :

- 1- Ressources en terre et hydrique (Caractéristiques et disponibilité) ;
- 2- Caractéristiques climatiques (température, précipitation, rayonnement solaire, évaporation) ;
- 3- Disponibilité de sources de CO₂ à faible coût (sources d'émissions de CO₂)
- 4- Conditionnement et transport de carburants ainsi que l'infrastructure de stockage.
- 5- Autres infrastructures et leurs caractéristiques en matière d'impacts environnementaux.

Conclusion

La contribution de la biomasse dans le mix énergétique est revue à la hausse pour atteindre jusqu'au 50% (AIE, 2015). Cependant, une multitude de contraintes et d'incertitudes limitent un développement durable et efficace des filières bioénergétiques. Dans ce contexte, le développement d'une filière de production soutenable et compétitive est une condition sine qua non. Pour atteindre cet objectif, plusieurs méthodologies et outils sont développés pour être utilisés dans le processus d'aide à la décision. Parmi ces outils, l'analyse du cycle de vie (ACV), Les systèmes d'information géographique (SIG) et l'analyse multicritère d'aide à la décision (AMAD) sont communément les plus employés pour l'évaluation de la durabilité à différents niveaux et échelles.

Par ailleurs, dans un contexte de prise de conscience qui ne cesse de gagner de l'ampleur et le resserrement de la politique environnementale a donné plus d'intérêt aux études de la soutenabilité environnementale tout au long du cycle de vie d'un système. De surcroît, l'aspect multi-échelle de la filière de biocarburants a impliqué l'utilisation et l'exploitation des capacités de l'analyse du cycle de vie en tant que méthodologie et outil afin de dresser les questions complexes liées à la quantification et le calcul des impacts environnementaux d'une filière bioénergétique. Par conséquent, l'analyse du cycle de vie est devenue une composante importante en tant qu'un instrument des différentes politiques de développement de biocarburants à l'échelle internationale.

En plus, l'analyse multicritère d'aide à la décision (AMAD) est un ensemble de méthodes et techniques qui sont utilisées pour évaluer les performances d'une série d'alternatives suivant un ensemble de critères, souvent conflictuels, en vue de faire un tri ou un classement sur l'échelle des préférences et d'établir un ordre de propriété. Cet outil est considéré comme une structure d'évaluation pour la résolution des contraintes environnementales, socio-économiques, techniques et les barrières institutionnelles impliquées dans la planification des projets énergétiques. Elle permettrait le développement d'une approche holistique afin de contribuer activement au processus de la prise de la décision pour le déploiement de ce type de filière bioénergétique.

En outre, L'utilisation et l'intégration des systèmes d'information géographique se sont montrées comme un outil de grande efficacité dans le cadre de l'évaluation du potentiel réel en biomasse pour la production des biocarburants prenant en compte des contraintes-critères relatives au choix et la sélection du site d'installation des unités de transformation, la production globale en biomasse, ainsi que l'optimisation du réseau de transport de la chaîne logistique.

L'analyse multicritère est régulièrement combinée avec les systèmes d'information géographique, permettant ainsi de manipuler et de visualiser les intrants et les résultats d'une part, les fonctions disponibles dans les SIG permettent de calculer et d'optimiser la chaîne d'approvisionnement pour réduire le coût de revient de la biomasse et la localisation de l'unité de transformation de la biomasse d'autre part. Du surcroît, l'utilisation des SIG-AM permet d'établir une carte d'aptitude du sol et du potentiel de la production de la biomasse réelle et accessible afin de développer une chaîne d'approvisionnement plus fiable et plus durable pour assurer la compétitivité du produit final dans le marché de l'énergie. De plus, l'intégration et l'utilisation de l'analyse du cycle de vie avec les SIG et AM pourraient permettre de prendre en considération les trois dimensions du développement durable, à savoir l'évaluation de l'aspect environnemental, technique et social tout au long du cycle de vie de la chaîne de production, permettant ainsi d'offrir un outil très puissant et très complet dans le processus de la prise de la décision pour la promotion des filières bioénergétiques.

Cependant, le développement de tel modèle pour les filières bioénergétiques, entre autres, la production de biocarburants nécessite de grande quantité d'information à travers l'élaboration de bases de données à plusieurs niveaux et échelles tout au long de la chaîne de valeur, partant de l'évaluation des ressources pour la production de la biomasse, la transformation de la biomasse, le choix technologique et le choix du site d'installation de l'unité de transformation, arrivant à la distribution et utilisation du produit final. De surcroît, les interactions entre les différentes composantes de la filière sont aussi à prendre en considération.

Dans ce contexte, nous avons opté pour l'utilisation de l'analyse du cycle de vie dans une première étape pour son énorme potentiel à contribuer au processus de la prise de décision. Dans le chapitre suivant, nous avons étalé les principaux points forts par sa capacité de prendre en considération plusieurs facteurs qui interprète la complexité de la production de la biomasse, ainsi que les limites de cet outil dans le secteur des biocarburants.

Nos travaux se sont focalisés sur l'utilisation de l'analyse du cycle de vie afin d'évaluer la soutenabilité de la production des biocarburants dans le contexte de l'Algérie. Ceci dit, se fait à travers le choix et la sélection des sources de production du biodiesel en utilisant un matériel biologique local à l'instar des plantes oléagineuses de 1^{ère} et 2^{ème} génération à savoir, *Moringa oleifera* et *Ricinus communis*. Par ailleurs, un biodiesel de 3^{ème} génération à partir des microorganismes photosynthétiques comme les microalgues, localement isolés avec un haut potentiel oléagineux et qui s'adaptent aisément à la culture dans les photo-bioréacteurs, a fait aussi l'objet d'une analyse du cycle de vie très détaillée.

Chapitre 3

Analyse du Cycle de Vie du Biodiesel

Chapitre 3 : Analyse du cycle de vie du biodiesel

Introduction

La production soutenable de bioénergie est considérée comme une question clé dans l'effort global consenti dans le cadre de la stratégie de réduction des émissions de GES pour atténuer les impacts du changement climatique. A cet effet, une approche holistique à propos de la chaîne de valeur et des procédés de production de biocarburants serait cruciale en vue d'accomplir un système de production soutenable. Cette approche prendrait en compte les aspects technique, économique et environnemental concernant l'utilisation de la matière première, les technologies de conversion adoptées ainsi que la distribution et l'utilisation des produits finaux. Alors que les aspects technique et économique sont évalués en utilisant des techniques bien établies, la quantification des impacts environnementaux a toujours été une tâche complexe. Dans cette perspective, l'analyse du cycle de vie (ACV), une technique introduite dans les années 60, puis standardisée ultérieurement (ISO, 2006), se présente comme une méthodologie plus exhaustive pour une évaluation quantitative et qualitative des impacts environnementaux d'un système de production de biocarburants. Cette méthodologie est considérée actuellement comme la plus efficace en tant qu'outil à intégrer dans le processus d'aide à la décision (Azapagic, 1999).

La question la plus pertinente porte sur la manière de mesurer la soutenabilité des biocarburants dans un système complexe avec une diversité des matières premières, une multitude de procédés de conversion ainsi que des divergences d'intérêts exprimés par les différentes parties prenantes. Dans ce contexte, l'établissement d'indicateurs qui pourraient être utilisés pour l'évaluation de la soutenabilité de différents systèmes bioénergétiques est très crucial et elles devraient être applicables aussi à grande échelle qu'à des sites locaux et devraient être utile pour les diverses parties prenantes (Fokaides and Christoforou, 2016).

Cependant, à ce jour, il n'existe pas de lignes directrices pour l'ACV des biocarburants, d'où l'utilisation de différentes méthodologies pour la définition des limites des systèmes, choix de l'unité fonctionnelle, catégories d'impact à évaluer, techniques d'allocation, hypothèses du système et le système de référence auquel les systèmes de production de biocarburants sont comparés. Dans le cas de la directive européenne sur les énergies renouvelables et les standards américains du carburant renouvelable, elles se focalisent particulièrement sur l'évaluation des émissions de GES et le bilan énergétique. Cependant, les études d'ACV montrent que la réduction des émissions de CO₂ ne conduit pas automatiquement à la diminution des autres

catégories d'impacts. En effet, elle pourrait être accompagnée d'une dégradation, entre autres, de la qualité des écosystèmes et de la santé humaine (Collet et al., 2015).

Ainsi, l'analyse du cycle de vie appliquée à la production des biocarburants se trouve confrontée à de multiples difficultés. Au cours de ce chapitre, nous allons discuter un ensemble de points critiques relatifs à l'analyse du cycle de vie du biodiesel, portant entre autres, sur des aspects tant méthodologiques que technologiques.

3.1 Principaux défis de la soutenabilité des biocarburants

3.1.1 Biocarburant vert : une nécessité pour le secteur des transports

La nécessité de la réduction des émissions des GES, associée aux conséquences négatives de l'utilisation extensive des carburants fossiles, a incité la promotion de l'utilisation des carburants plus soutenables avec une empreinte carbone neutre ou réduite. Une grande attention a été portée, ces dernières années sur la production de biocarburants et des efforts significatifs sont consentis pour identifier les meilleures voies de production. Ces efforts impliquent la sélection des matières premières, le développement et le choix des technologies de conversion les plus efficaces ainsi que l'amélioration des caractéristiques techniques du produit final à travers la standardisation (ASTM6751 et la EU 14214) (Fokaides and Christoforou, 2016). Dans la perspective d'une production soutenable de biocarburants, chaque élément de la chaîne de valeur devrait être évalué en utilisant des critères et des indicateurs prédéfinis. Cette évaluation est toujours difficile vu le nombre de paramètres à prendre en compte et aux différentes pondérations suivant les parties prenantes impliquées.

Dans ce contexte, les futures générations de matières premières pour la production des biocarburants devraient être analysées d'une manière très critique afin de quantifier leurs impacts environnementaux potentiels. Comparées au biocarburant de première et deuxième générations, les microalgues sont considérées comme une source très prometteuse en tant que source de biomasse pour la production des biocarburants (Quinn et al., 2014; Alaswad et al., 2015). Cependant, le biodiesel issu de la biomasse algale est confronté à de multiples contraintes pour une production à l'échelle industrielle (Salian and Strezov, 2017). Par conséquent, il est recommandé que l'analyse du cycle de vie d'un système de production de biodiesel algal soit basé sur l'analyse d'un système à une échelle commerciale afin d'appuyer et de justifier la sélection et le choix d'une méthode de production particulière pour une région donnée et dans un contexte technologique bien déterminée (Laurens et al., 2017).

3.1.2 Développement de biocarburants durables dans un cadre de standardisation

La production durable de biocarburant impose le développement des critères de soutenabilité relatifs à l'évaluation des catégories de dommage impactant les compartiments eau, sol et air. De surcroît, la combinaison des dimensions technico-économique, sociale et environnementale pourrait maximiser les avantages des biocarburants. Par ailleurs, le développement des biocarburants dans le cadre du concept de bioraffinerie intégrée pourrait promouvoir la soutenabilité globale due à la diversification du type de biocarburants finaux ainsi associé aux autres co-produits à haute valeur ajoutée (Živković et al., 2017).

Dans ce contexte, afin de mesurer la soutenabilité des biocarburants à différents niveaux, la Commission Européenne a approuvé une série de 133 indicateurs relatifs aux diverses catégories et thèmes, à savoir le développement socio-économique, les changements démographiques, la santé publique, les changements climatiques et l'énergie, les transports durables, les ressources naturelles, le partenariat mondial et la bonne gouvernance (RED, 2009). Divers systèmes de certification ont également été élaborés afin de répondre aux préoccupations concernant l'évaluation de la durabilité, entre autres, les Standards du carburant renouvelable, établis par l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (figure 3.1) (US EPA, 2015). Toutefois, les méthodologies développées pour fournir des réponses et des solutions à différentes préoccupations et questions varient considérablement (Shonnard et al., 2015).

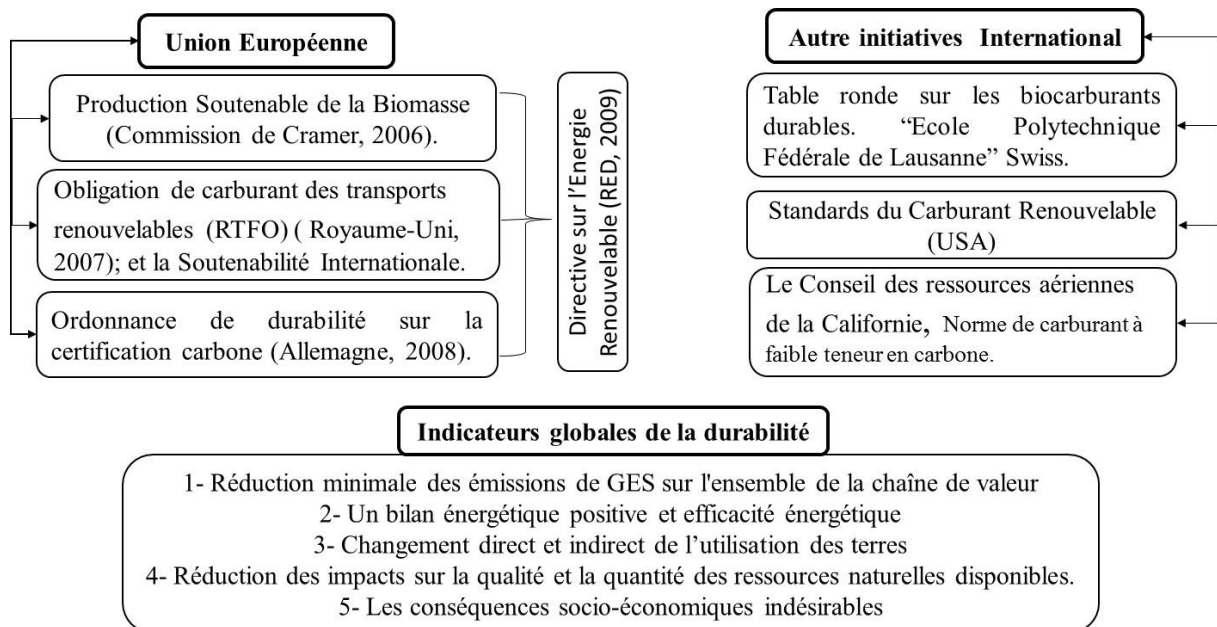


Figure 3. 1: Programmes de durabilité et indicateurs standardisés (Fokaides and Christoforou, 2016)

3.1.3 Les grands défis dans l'analyse du cycle de vie des biocarburants

L'analyse du cycle de vie des biocarburants fait face à de grands défis. En fait, le premier maillon pour les biocarburants est la source de biomasse qui est encore issue majoritairement du secteur agricole avec les répercussions dues au changement de l'utilisation des terres qui en découle. En outre, la chaîne de valeur des biocarburants est souvent confrontée aux incertitudes dues à des facteurs tels que les conditions météorologiques et la complexité des marchés. De surcroît, la nature multifonctionnelle du système de production se répercute sur le choix et l'application des approches d'allocation constituant ainsi deux autres facteurs cruciaux qui influencent les résultats finaux de l'ACV. Par conséquent, l'utilisation de l'ACV dans le processus de la décision pourrait conduire à la surestimation ou sous-estimation de la soutenabilité de la production des biocarburants et donc des incertitudes pour son déploiement à grande échelle (McKone et al., 2011).

Du surcroît, l'ACV devrait prendre en compte le niveau de maturité technologique et l'application des biocarburants. Dans ce contexte, une grande partie de la variabilité entre les résultats des ACV provient du manque de connaissances sur la façon avec laquelle évolueront les technologies de production et de conversion de la biomasse en biocarburants. Pour l'ACV, la pléthore d'options pose des défis en ce qui concerne le niveau d'application, à savoir : (a) le choix de la combinaison procédé/carburant la plus probable et la plus représentative, (b) application à toute la gamme des combinaisons de procédé/carburant, (c) application à un sous-ensemble de combinaisons de procédé/carburant qui illustrent une gamme de résultats informatifs pour les décideurs (McKone et al., 2011).

En outre, il existe un ensemble de problèmes généraux qui sous-tendent le cadre de l'utilisation de l'analyse du cycle de vie, entre autres, la crédibilité, la transparence, la gestion de la complexité et la communication (McManus et al., 2015). Par ailleurs, l'utilisation des bilans carbone et énergie comme principaux indicateurs dans les ACV ne conduit pas automatiquement à la réduction des autres catégories d'impacts tels que l'acidification, l'eutrophisation et le changement d'utilisation de terre. Afin de permettre une comparaison effective des systèmes de biocarburants, une extension des limites du système est nécessaire afin de pouvoir inclure le cycle de vie des coproduits. En plus, dans certains cas, les résultats devraient être rapportés selon plusieurs unités fonctionnelles. Afin d'éviter une translocation d'impacts, il faudrait prendre des catégories d'impacts autres que les émissions de GES et le bilan énergie en l'occurrence du potentiel d'acidification, d'eutrophisation et l'utilisation des terres (Czyrnek-Delêtre et al., 2017).

3.2 Evaluation de la soutenabilité des biocarburants : Approche ACV

Récemment, plusieurs méthodes ont été développées pour évaluer la soutenabilité des biocarburants, à savoir : méthode de critère-indicateur, l'analyse du cycle de vie, l'évaluation des impacts environnementaux et la méthode de l'analyse coût-bénéfice (Fokaides and Christoforou, 2016). Cependant, l'analyse du cycle de vie se démarque par sa focalisation unique sur un produit selon une perspective de cycle vie. En fait, l'analyse du cycle de vie permettra d'éviter la translocation des impacts, par exemple, d'une phase du cycle de vie à une autre, d'une région à une autre ou d'un impact environnemental à un autre (Finnveden et al., 2009).

L'analyse du cycle de vie est une méthodologie et un outil très utile, efficace et largement utilisé pour la quantification des impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service par la prise en considération des intrants et des sortants d'un système incluant ainsi l'approvisionnement des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit ou du service (Fokaides and Christoforou, 2016). Elle permet de comprendre le système de production et d'identifier les impacts environnementaux potentiels les plus pertinents. En outre, cette analyse va servir de guide pour l'amélioration du système de production, de la communication pour les parties prenantes contribuant ainsi au processus de la prise de la décision (Shonnard et al., 2015).

L'analyse du cycle de vie des biocarburants pourrait être une analyse très compliquée suivant le champ de l'étude où l'analyse pourrait inclure de centaines de processus, des milliers d'éléments dans l'inventaire et de multiples points intermédiaires ou finaux de catégories d'impacts. De surcroît, des aspects méthodologiques comme le choix des limites du système, la source et la qualité des données pour l'inventaire des inputs des processus unitaires et la décision sur le choix de la méthode d'allocation, ont une influence profonde sur les résultats finaux de l'étude (Shonnard et al., 2015).

L'analyse du cycle de vie considère la consommation des ressources, les émissions relatives à chaque étape du cycle de vie ainsi que l'évaluation des impacts dus aux diverses phases du cycle de vie. Suivant l'objectif de l'étude, l'ACV pourrait être réalisée en utilisant plusieurs approches entre autres l'approche attributive et l'approche conséquentielle. La première approche décrit les flux environnementaux pertinents vers et depuis le système ou sous-systèmes de production tout au long de son cycle de vie. Cependant, la deuxième approche décrit de manière exhaustive les conséquences d'une action humaine, liées souvent à des politiques ou à des décisions stratégiques, de point de vue environnemental. Cette approche

permettra de décrire le changement dans les flux environnementaux en réponse à une décision possible (Fokaides and Christoforou, 2016).

L'analyse du cycle de vie avait émergé en tant qu'un outil fondamental pour l'évaluation de la durabilité des biocarburants de nouvelle génération. Les résultats de l'ACV dépendent fortement de la définition des limites du système, de l'inventaire du cycle de vie, de l'efficacité des procédures et de l'unité fonctionnelle, d'où la nécessité de mener une analyse de sensibilité (Quinn et al., 2014). L'analyse du cycle de vie est une technique standardisée selon la norme ISO 14040 définissant les principales étapes d'une analyse du cycle de vie en quatre phases, à savoir : (1) Définition de l'objectif et le champ de l'étude, (2) Inventaire du cycle de vie du système étudié, (3) Evaluation des impacts du cycle de vie, (4) Interprétation.

3.2.1 Définition de l'objectif et le champ de l'étude

La première étape dans une étude ACV est la définition de l'objectif et du champ de l'étude. La définition de l'objectif est cruciale vue son influence tant sur les résultats que les conclusions pertinentes. L'objectif doit indiquer clairement l'application prévue, les raisons pour lesquelles l'analyse est menée, ainsi que le public concerné. La définition du champ de l'étude d'ACV est également importante et doit être bien définie afin de s'assurer que l'objectif de l'étude sera suffisamment abordé. Le champ de l'ACV doit tenir compte des fonctions du système et de l'identification des limites du système sous investigation. Par ailleurs, étant donnée la nature itérative de l'ACV, le champ de l'étude pourrait être redéfini afin d'atteindre les objectifs de l'étude (Klöpffer and Grahl, 2014).

En outre, le paramètre clé dans la définition de l'objectif et le champ de l'étude est sans doute le type d'approche à adopter, à savoir attributive ou conséquentielle. Une approche attributive évalue les performances d'un système de production en se basant uniquement sur l'approche statique où les flux environnementaux (intrants et sortants) sont suivis et évalués sur la base du cycle de vie. En revanche, une analyse du cycle de vie conséquentielle prend en considération les changements d'un système dû à une décision donnée afin de comprendre les flux environnementaux issus des processus directs et indirects de ces changements. Pour l'analyse du cycle de vie des biocarburants, le couple décision-conséquence le plus marquant est le changement de l'utilisation des terres (Kendall and Yuan, 2013).

Le choix entre une LCA attributive et conséquentielle va influencer aussi les limites du système relatif à l'allocation des ressources et pourrait influencer aussi les autres choix

méthodologiques, à savoir la définition de l'unité fonctionnelle et le choix des méthodes de l'évaluation d'impact du cycle de vie (Finnveden et al., 2009).

3.2.2. Définition de l'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle est une description quantitative de la performance du service du système sous investigation généralement définie sur la base de la fonction qu'elle remplit (Rebitzer et al., 2004). Ce paramètre doit être clairement défini puisqu'il constitue la référence à laquelle tous les intrants et les sortants se rapportent, ce qui permet d'établir des comparaisons avec d'autres systèmes de production de biocarburants. L'unité fonctionnelle des systèmes de biocarburants est définie sur différentes bases : énergétique, massique, volumique, distance parcourue par un véhicule fonctionnant avec un biocarburant pur et la surface occupée par unité de production. Néanmoins, l'utilisation d'une unité énergétique est souvent l'unité fonctionnelle la plus utilisée, facilitant ainsi la comparaison de l'efficacité de production (Shonnard et al., 2015).

3.2.3. Limites du système de l'analyse du cycle de vie

Les limites du système devraient être définies suivant l'objectif et le champ de l'étude où une description claire et complète est donnée. Les processus et leurs flux devraient être listés afin de savoir lequel à inclure dans l'analyse du cycle de vie. Néanmoins, les premières études d'analyse du cycle de vie n'avaient pas intégré les coproduits et les résidus, ce qui a donné des résultats biaisés sur les performances environnementales des systèmes de production des filières bioénergétiques en général et celles des biocarburants en particulier. D'où l'importance de l'expansion des limites du système de production afin de prendre en considération les résidus et co-produits (Czyrnek-Delêtre et al., 2017).

Dans de nombreux cas, les limites du système entre la technosphère et l'environnement sont claires. Cependant, lorsque l'analyse du cycle de vie inclut des systèmes forestiers, agricoles, des systèmes d'émissions des eaux usées et des décharges, les limites du système nécessitent une définition explicite (Finnveden et al., 2009).

Par conséquent, les limites du système tout entier dans le cadre d'une ACV pourraient inclure plusieurs approches selon l'étape spécifique à inclure ou à exclure dans l'analyse. Par ailleurs, il existe quatre approches (Figure 3.2), à savoir l'approche *du Berceau à la tombe* (*Cradle to grave*), incluant l'extraction des ressources, la production, l'utilisation et le traitement ultime des déchets. Tandis que, une approche *Berceau à la porte* (*de l'usine*) (*Cradle to gate*) ne prend pas en compte la totalité du cycle de vie d'un produit. Cette approche partielle analyse

uniquement le système jusqu'à l'obtention du produit final (jusqu'à la porte ou la sortie de l'usine de production). Les phases de l'utilisation et le traitement de fin de vie sont omises dans ce cas. De surcroît, une analyse selon une approche de la *Porte à la tombe* (*Gate to Grave*) se focalise uniquement sur la phase de l'utilisation et de traitement de fin de vie dès la sortie du produit de l'unité de production. Finalement, l'approche *Berceau au berceau* (*Cradle to Cradle*) inclut aussi le recyclage des ressources (Fokaides and Christoforou, 2016).

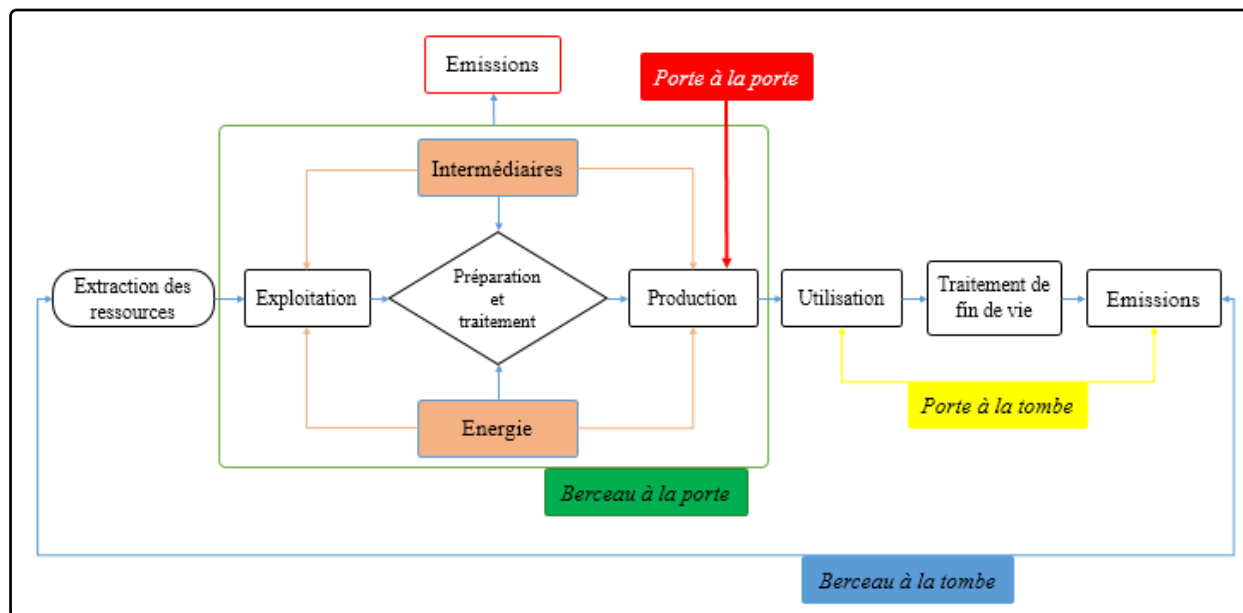


Figure 3. 2: Approches et limites du système de l'analyse du cycle de vie (Fokaides and Christoforou, 2016).

Dans ce contexte, plusieurs analyses du cycle de vie pour l'évaluation de la soutenabilité de la production du biodiesel algal sont caractérisées par l'utilisation de différentes approches, champs d'étude, hypothèses, limites du système, en sélectionnant des processus uniques ou des inputs à inclure dans la chaîne de valeur algale. De surcroît, plusieurs types d'hypothèses sont établis pour le choix des technologies utilisées pour les différentes unités de production impliquées, les caractéristiques de la productivité ainsi que le rendement et les impacts environnementaux associés aux inputs nécessaires à la production de la biomasse algale, ce qui ne reflète pas la réalité du contexte technologique. Le manque de la transparence dans l'établissement des limites du système étudié est le principal facteur qui rend la comparaison des études d'ACV très difficile. Par ailleurs, les résultats ne sont pas transposables d'un contexte à un autre, selon les options retenues. Dans cette perspective, les études ACV des microalgues en tant qu'outil de prévision et de décision à l'échelle industrielle ne prennent pas en considération les mêmes limites du système et les mêmes hypothèses pour la production et la conversion de la biomasse microalgale, d'où des conclusions tirées différentes pour les catégories d'impacts prises en considération (Handler et al., 2012).

3.2.4. Inventaire du cycle de vie (ICV) : Modélisation, Outils, Disponibilité des données

Dans cette étape de l'ACV, les décisions les plus importantes sont le choix de la base de données d'arrière-plan et la méthode d'allocation appliquée aux coproduits. Une ACV exige que les flux environnementaux soient attribués entre les produits lorsque le système de production est multifonctionnel, en faisant assigner les flux par une allocation basée soit sur la valeur économique, sa teneur énergétique ou sur une base massique. En outre, cette attribution pourrait se faire par une expansion du système pour les coproduits (substitution). Cependant, Il n'existe pas de consensus parmi les praticiens de l'ACV sur la méthode d'allocation la plus adéquate (Kendall and Yuan, 2013).

La collection des données relatives à la fonction ou les produits générés par un système est l'étape la plus difficile et la plus consommatrice en matière de ressources et de temps (Rebitzer et al., 2004). Le plus important défi dans l'élaboration de l'inventaire du cycle de vie est le manque des données et les incertitudes associées aux procédés industriels qui ne sont pas suffisamment matures. De surcroît, les incertitudes restent très importantes dans le cas des systèmes agricoles dus à la complexité de leurs chaînes de valeur (Voet et al., 2010). Dans le contexte des ACV des biocarburants issus de la biomasse algale, l'inventaire du cycle de vie devrait inclure les technologies de la production et de la conversion de la biomasse ainsi que les hypothèses et les paramètres de performances pertinents (Handler et al., 2012).

Dans le contexte de la production des biocarburants de 2^{ème} et 3^{ème} génération où la viabilité technico-économique n'est pas encore établie, les données de bonne qualité sont manquantes, et par conséquent, les méthodes estimatives sont largement employées. Dans ce contexte, la plupart des sources de données d'inventaire sont tirés de la littérature ou à partir des bases de données comme *Ecoinvent*, souvent utilisé en association avec SimaPro® Pré Consult. Les variations liées à la source de données et les méthodes d'obtention des données primaires démontrent la nécessité d'avoir des données temporelles et spatiales les plus à jour possible afin de générer des conclusions les plus précises (Shonnard et al., 2015).

Tableau 3. 1: Sources d'incertitudes relatives à chaque phase de l'ACV des biocarburants. (Shonnard et al., 2015)

Source de variabilité	Définition de champ et de l'objectif	Inventaire du cycle de vie	Evaluation des impacts
Méthode et modèle-variabilité induite	1- Attributive vs conséquente. 2- Sélection et choix des limites du système. 3- Changement de l'utilisation du sol et les règles de troncature 4- Les catégories d'impacts modélisés.	1- Qualité des bases de données de l'inventaire d'arrière-plan. 2- Méthodes d'allocation pour les coproduits.	1- Méthode d'évaluation d'impact.
Variabilité et incertitudes des performances des procédures de production des biocarburants	1- Rétrospective vs prospective 2- Hétérogénéité spatio-temporelle (hypothèses sur le climat, sol, les pratiques agricoles, rendement et systèmes régionaux. 3- Sélection et configuration de la technologie.	1- Hétérogénéité spatio-temporelle d'inventaire. 2- Utilisation des coproduits. 3- Performance réelle/projetée des technologies de production qui se reflètent dans les flux environnementaux.	1- Hétérogénéité spatio-temporelle dans l'évaluation d'impacts. 2- Performance réelle/projetée des technologies de production et son incidence sur l'évaluation d'impacts.

3.2.5. Elaboration des Scenarii

Il est pertinent de modéliser un scénario futur dans le cas d'une ACV conséquente ou dans le cas d'étude d'un système et d'une technologie futur. Dans tous les cas, la décision porte avant tout sur l'approche de la modélisation de ce système. Par ailleurs, la modélisation pourrait partir de l'hypothèse que le système « futur » est comparable au système actuel. Cette approche constitue parfois une bonne option pour la modélisation du scénario mais dans d'autres cas, l'élaboration d'un autre système est souhaitable (Finnveden et al., 2009).

La typologie suivante pourrait être utilisée en se basant sur le type de la question à résoudre (Finnveden et al., 2009):

- 1- Un scénario prédictif visant à répondre la question : qu'arrivera-t-il ?
- 2- Un scénario exploratoire visant à répondre à la question : Que peut-il arriver ?
- 3- Un scénario normatif visant à répondre la question : comment atteindre une cible spécifique ?

Dans le contexte de la production du biodiesel, l'établissement des scénarii constitue une approche très pratique pour l'évaluation des impacts environnementaux liés à l'utilisation d'une source de matière première en l'occurrence des huiles non alimentaires ainsi que pour l'identification et l'évaluation des technologies émergentes à employer pour leur conversion (khan et al., 2014). L'établissement et l'évaluation des scénarii pour la production du biodiesel permettraient de faciliter le processus de prise de décision en proposant des alternatives pour les parties prenantes dans le secteur des biocarburants.

3.2.6. Méthodologies d'allocation

Un système de production de biocarburants est souvent multifonctionnel dû à la génération de multiples coproduits selon les voies technologiques de conversion de la biomasse. Par conséquent, l'utilisation de différentes méthodologies d'allocation à côté du choix des limites du système pourrait influencer significativement les résultats et les conclusions finales d'une ACV (Morais et al., 2010 ; Zaines and Khanna, 2014).

En outre, le choix de la méthode d'allocation est crucial dans un système de production multifonctionnel afin de répartir les impacts environnementaux durant les phases de production et transformation de la biomasse. Ce choix pourrait influencer les résultats de l'analyse du cycle de vie et par conséquent le processus de la prise de la décision. De surcroît, les méthodes d'allocation ont une grande importance dans le cas d'une analyse du cycle de vie conséquentielle (Sandin et al., 2015).

Dans ce contexte, on distingue trois types de problème d'allocation (Finnveden et al., 2009) :

- 1- Multi-output (dans ce type de système, plusieurs produits sont générés e.g. cas d'une raffinerie).
- 2- Multi-input (le système reçoit plusieurs produits : ex. incinérateur de déchets).
- 3- Recyclage en boucle ouverte (cas des déchets qui sont recyclés en d'autres produits).

Dans le contexte de la production des biocarburants, les méthodes d'allocation les plus communément utilisés sont (1) l'expansion du système, (2) allocation massique, (3) allocation énergétique, (4) allocation économique. Le choix d'une méthode d'allocation conduit à des impacts différents, même si les hypothèses du système de production sont égales. De surcroît, dans la mesure du possible, il est recommandé d'utiliser une méthode d'allocation en l'occurrence d'une allocation massique ou énergétique, afin qu'on puisse établir des comparaisons entre les différents résultats issus des différents cadres de référence ainsi que pour l'évaluation des résultats finaux, quand les seuils d'émission sont considérés (Shonnard et al., 2015).

Dans cette optique, le système de production du biodiesel microalgal est multifonctionnel. Par conséquent, le choix de la méthode d'allocation influence significativement la performance énergétique ainsi que le potentiel de réduction des émissions des gaz à effet de serre. Par ailleurs, la méthode d'allocation pourrait impacter le niveau de performance du système conduisant ainsi à des décisions erronées, ce qui met en exergue l'importance cruciale du choix de la méthode d'allocation dans le cas où l'ACV est utilisée comme outil d'aide à la décision (Zaines and Khanna, 2014).

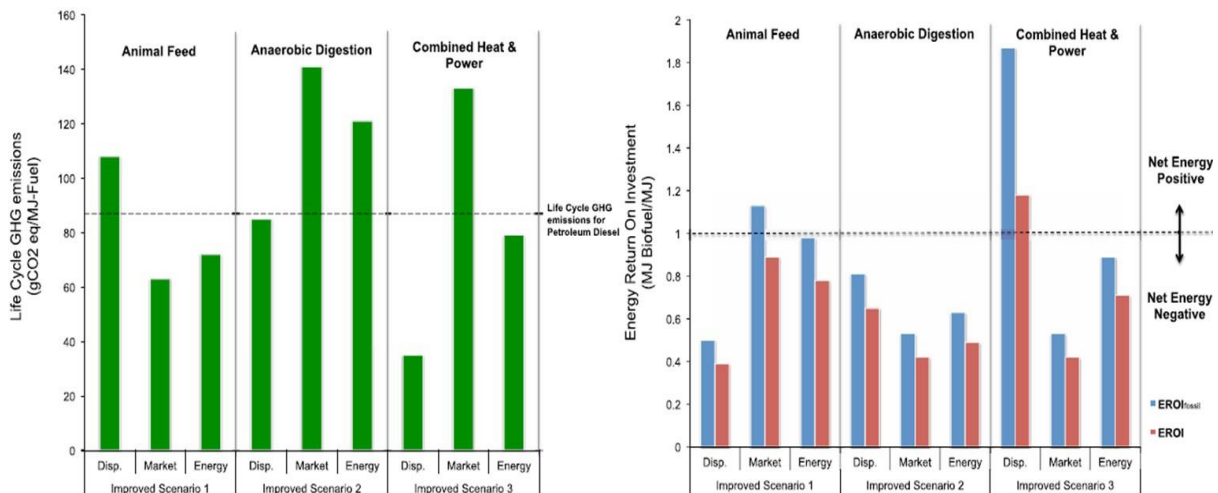


Figure 3.3 : Impact de la méthode d'allocation sur les bilans carbone et énergie (Zaines and Khanna, 2014).

3.2.7 Catégories et méthodes d'évaluation d'impact

Les catégories d'impacts sont classées en des catégories intermédiaires et catégories de dommage. La première approche se focalise sur les problèmes environnementaux potentiels dans la phase intermédiaire de la chaîne « cause à effet » environnementale, alors que la seconde approche se focalise sur la modélisation d'autres mécanismes dans le but d'estimer le dommage actuel sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes et l'épuisement des ressources. Les catégories intermédiaires sont faciles à modéliser pendant que les mécanismes de catégories de dommage demanderont un savoir très détaillé par les décideurs. Néanmoins, les dommages sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes comme impacts finaux sont faciles à interpréter et à communiquer (Shonnard et al., 2015).

Suivant l'objectif et le champ de l'étude, une ou plusieurs catégories d'impact sont incluses dans l'évaluation des impacts du cycle de vie. Alors que le potentiel de changement climatique et la demande cumulative d'énergie (DCE) sont souvent inclus dans la majorité des ACV des biocarburants, une évaluation environnementale complète devrait inclure également d'autres

impacts associés à l'écosystème et la santé humaine. En général, les biocarburants surpassent les carburants fossiles en matière d'émissions des gaz à effet de serre et de bilan énergétique. Néanmoins, les biocarburants sont à l'origine de nuisances telles que les phénomènes d'eutrophisation et d'acidification, qui sont dus principalement à l'utilisation importante des fertilisants durant la phase de la culture. Du surcroît, les différences constatées parmi les autres catégories d'impact proviennent des méthodes de production de la biomasse, des limites du système, des données d'inventaire, du transport de la biomasse vers l'unité de conversion, et de la proportion de mélange du biocarburant avec les carburants fossiles (Shonnard et al., 2015).

Dans cette perspective, les principales catégories d'impacts considérées pour l'analyse d'impact du cycle de vie sont le potentiel du réchauffement climatique, la demande cumulative en énergie fossile, l'empreinte hydrique, l'impact sur la qualité des écosystèmes et l'impact sur la santé humaine. Dans le contexte du biodiesel issu de la biomasse microalgale, les études d'analyse du cycle de vie ont montré des impacts moindres relativement au biodiesel de 1^{ère} et 2^{ème} génération mais cela n'est pas toujours démontré si on inclut des impacts autres que le bilan carbone tels celui sur la toxicité humaine, l'acidification et l'eutrophisation des eaux douces (Collet et al., 2014).

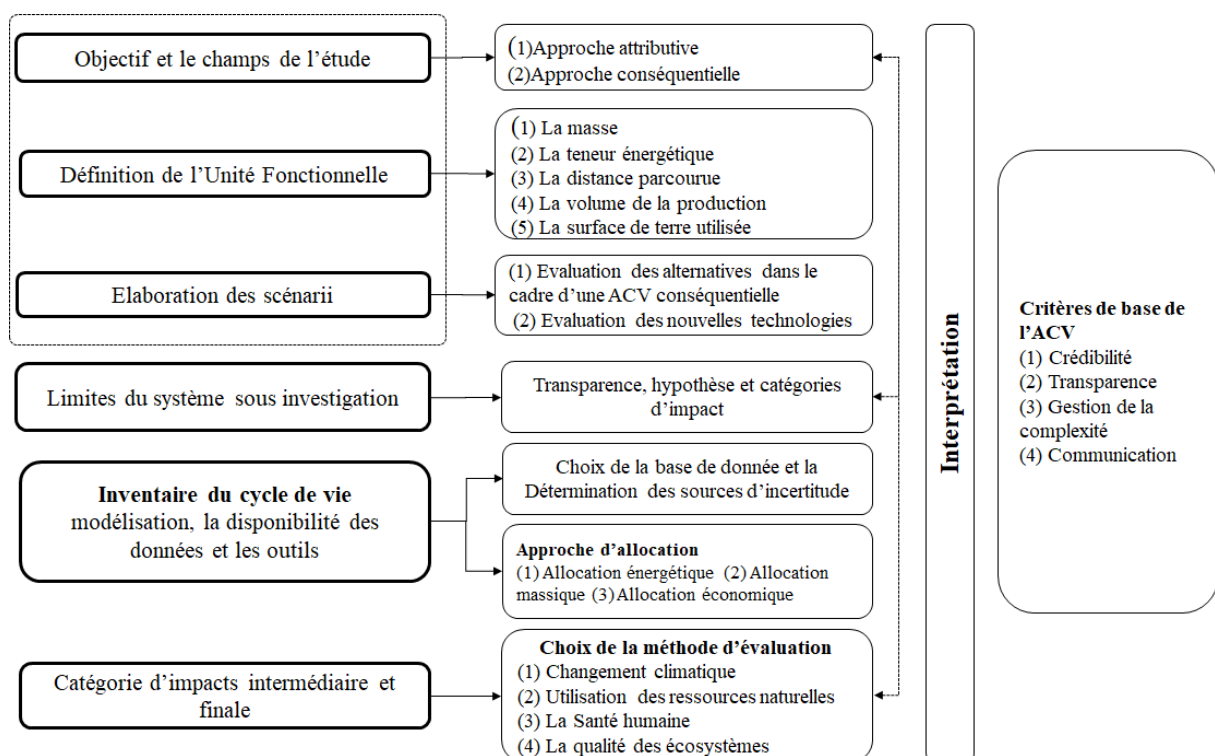


Figure 3.4 : Différentes sources de variation dans les études ACV

3.3 Considérations relatives aux voies de production des biocarburants

L'analyse du cycle de vie avait été utilisée pour plusieurs types de biocarburants et systèmes bioénergétique avec différentes technologies de production et de conversion de la biomasse en biocarburants (Zaimis and Khanna, 2014). En effet, l'analyse du cycle de vie est pertinente et permet d'éviter toute transposition des charges environnementales tout au long du cycle de vie du système de production (Finnveden et al., 2009).

3.3.1. Carburants de première génération

Les biocarburants de première génération proviennent, dans la majorité des cas, de cultures alimentaires, et malgré les nombreux avantages qu'ils présentent, diverses questions entravent leur déploiement généralisé. Ceci a créé un débat social opposant les besoins alimentaires avec ceux en carburants. En effet, les conséquences de la hausse des prix de produits alimentaires de base seraient dues à l'augmentation de la demande sur les biocarburants, entre autres, dans les régions arides où la production des biocarburants de première génération n'est pas réalisable sur le plan écologique et technique. En outre, grâce à la mise en œuvre de l'analyse par SIG, il a été montré que la possibilité de promouvoir des cultures énergétiques dans un environnement semi-aride et subtropical est extrêmement limitée et en tout cas insuffisante pour satisfaire la contribution attendue des biocarburants (Fokaidis and Christoforou, 2016).

3.3.2. Biocarburants de deuxième génération

Les biocarburants de deuxième génération proviennent de la biomasse lignocellulosique, des matières premières non alimentaires, des résidus agricoles et forestiers et des déchets industriels. Ils sont principalement produits grâce à l'utilisation de technologies physiques, thermochimiques et biochimiques, généralement après une phase de prétraitement de la matière première. L'étape de prétraitement est une étape très importante pour améliorer les propriétés de la biomasse (taille, humidité, densité, etc.) afin de faciliter les processus de conversion (Fokaidis and Christoforou, 2016).

3.3.3. Troisième génération de biocarburant

Les biocarburants de troisième génération se réfèrent aux combustibles issus de la biomasse des algues. Actuellement, il est considéré comme une source alternative, renouvelable pour la production de biocarburants, en surmontant les inconvénients des biocarburants de la première et de la deuxième génération. Les algues présentent une grande efficacité dans la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique. Par conséquent, elles offrent une meilleure perspective de production de biocarburants par rapport aux précédentes générations. Ce fait, combiné avec leur capacité à accumuler des lipides, leur capacité à être cultivées dans des milieux contrôlés

et à l'utilisation de CO₂ issu des unités industrielles pour leur croissance, pourrait potentiellement donner des biocarburants qui ont une faible concurrence avec les cultures alimentaires, des impacts environnementaux réduits et une contribution significative à l'atténuation des GES (Collet et al., 2013, Fokaides and Christoforou, 2016).

Bien que la production de biocarburants à l'aide de microalgues semble éviter l'utilisation des terres à vocation agricole, ce qui constitue un désavantage dans les biocarburants de première et deuxième génération, d'autres recherches sont nécessaires pour améliorer la soutenabilité de la production tout au long de son cycle de vie par le choix de la voie de conversion appropriée (Mu et al., 2017). Les recommandations sur l'analyse du cycle de vie du biodiesel issu des microalgues insistent sur l'importance de réaliser des études sur les systèmes de production à l'échelle industrielle afin d'appuyer et de justifier la sélection des voies de production pour un site géographique donné ainsi que pour la confirmation des résultats antérieurs basés sur des expériences à l'échelle du laboratoire ou pilote (Laurens et al., 2017).

Du surcroît, Il est souvent difficile de faire une comparaison entre les différentes ACV de la biomasse algale en tant que matière première pour la production des biocarburants. Cette difficulté est liée aux divers modes d'agrégation des données, aux limites imposées au système du cycle de vie, aux hypothèses admises, aux choix technologiques arrêtés pour le système de production, aux impacts environnementaux pris en considération, à l'extrapolation des données expérimentales ou à la modélisation des données (Handler et al., 2012). En outre, le choix du mode de conversion et la méthode d'allocation auront une influence significative sur les résultats finaux de l'analyse du cycle de vie en terme du bilan énergétique et de performances environnementales (Zaimis and Khanna, 2014, Gnansounou and Kenthorai Raman, 2016).

3.4 Limites de l'analyse du cycle de vie

Vu la multitude des variables impliquées dans la production des biocarburants, il existe une gamme étendue d'incertitudes dans l'analyse du cycle de vie des filières bioénergétiques. Par conséquent, il est difficile de quantifier définitivement les impacts environnementaux susceptibles d'être engendrés par les systèmes de production bioénergétique. Néanmoins, Il subsiste toujours quelques variables clés, comme, entre autres, le recyclage des nutriments, la mitigation de la pollution et les processus contrôlés à travers les systèmes écologiques souvent mal connus et grandement liés à des conditions climatiques locales. Bien que les décideurs et les concepteurs de la politique générale exigent souvent des méthodologies standards, la recherche scientifique est encore à ses débuts en matière de détermination de ces impacts indirects (López-Bellido et al., 2014).

3.5 Analyse du cycle de vie en tant que Processus et non Produit

Bien qu'une analyse du cycle de vie puisse donner un aperçu sur les alternatives à moindres impacts, elle n'a pas été conçue pour répondre à la dynamique de la technologie d'où la nature informative des résultats. De surcroît, ceci rend difficile l'application de l'ACV durant les premières phases lors d'une évolution majeure de la technologie dans le secteur des carburants liquides en matière de systèmes de transport existants, de technologie du moteur et de chaîne de distribution. A cet égard, l'utilisation de l'ACV dans la prise de décision devrait se faire dans un cadre adaptatif par l'intégration des nouvelles avancées dans les premières phases du développement de la technologie. Par conséquent, l'utilisation de l'ACV en tant que processus permet de mettre en évidence les véritables atouts de l'ACV. L'ACV coexiste avec une technologie et fournit une base pour une planification adaptative en fournissant ainsi des informations précieuses pour guider et éclairer les décisions, mais elle ne peut pas remplacer la sagesse, la mesure et la responsabilité dont peuvent faire preuve des décideurs expérimentés (McKone et al.,2011).

3.6 Recommandations et efforts d'amélioration de l'ACV

La variabilité dans les résultats de différentes études due principalement au cadre-guide et à la modélisation des hypothèses (champ de l'étude, unité fonctionnelle et méthode d'allocation, données de l'inventaire, catégories d'impacts à évaluer, et processus de production retenus pour les biocarburants). Cette variabilité rend la comparaison des performances des différents biocarburants très difficile et plus particulièrement elle rend difficile la compréhension et la détermination des principales causes de dommages, ce qui empêche toute amélioration effective du système de production des biocarburants. Par conséquent, plusieurs recommandations sont proposées afin d'exploiter les potentialités de l'analyse du cycle vie en tant qu'outil d'évaluation environnementale et, ainsi, améliorer la qualité des résultats obtenus (Shonnard et al., 2015) :

- 1- **Guide-cadre de l'analyse du cycle de vie des biocarburants** : plusieurs guides-cadres et schémas sont utilisés dans l'ACV des biocarburants conduisant à des résultats divergents. Par conséquent, une évaluation de l'impact des guide-cadres sur les procédés de production devrait être entreprise dans le futur d'où la possibilité de l'utilisation de la méthode de la *Product Category Rule*, une méthode déjà standardisée par ISO.
- 2- **Qualité des données d'inventaire du cycle de vie** : l'amélioration de la qualité des données d'inventaire est nécessaire afin d'améliorer la précision et la qualité des résultats de l'analyse du cycle de vie des biocarburants et des systèmes bioénergétiques en général.

- 3- **Les systèmes de culture** : cet aspect prend en compte les grands changements que les sols vont subir pendant la phase de la production la biomasse à grande échelle. Ces changements vont se répercuter sur les inputs dans l'inventaire des émissions de GES ainsi que dans les autres catégories d'impact importantes sur le plan de la durabilité. De ce fait, les études de différents systèmes de culture sous différentes conditions géographique et climatique sont nécessaires pour déterminer leurs impacts sur la variabilité des processus de production.
- 4- **Catégories d'impacts du cycle de vie** : la plupart des analyses de cycle de vie de biocarburants se focalisent sur l'évaluation des émissions des GES. Cependant, d'autres catégories d'impact sont également importantes à l'instar de la qualité des écosystèmes, de la disponibilité des ressources hydriques ainsi que les catégories d'impact sur la santé humaine.
- 5- **Analyse de durabilité des systèmes de production de biocarburants** : l'analyse du cycle de vie en tant qu'outil constitue une bonne plateforme pour l'intégration des informations et des données à travers tous les processus de production des biocarburants suivant les limites du système. De surcroit, l'utilisation de méta-analyse permet d'inclure d'autres dimensions de la durabilité en l'occurrence celle de l'analyse socio-économique.
- 6- **La sensibilisation** : la recherche dans le domaine de l'analyse du cycle de vie devrait être transmise en dehors de la communauté professionnelle vers les décideurs et le public en général, ce qui assurerait une dissémination effective des bonnes pratiques de la durabilité.

Conclusion

L'analyse du cycle de vie est l'un des outils les plus performants en tant que méthodologie d'évaluation uniforme de la soutenabilité des biocarburants. L'ACV suit les méthodes internationalement standardisées selon la norme ISO 14040 et 14044 ainsi que les pratiques pour évaluer les exigences et les impacts des technologies, des procédés et des produits afin de déterminer leur propension à consommer des ressources et à générer de la pollution. Dans ce contexte, un biocarburant durable doit répondre au moins aux exigences suivantes ; (1) être neutre en matière du bilan carbone, (2) Privilégier une utilisation rationnelle des ressources naturelles disponibles, (3) ne pas avoir des conséquences sociales indésirables, (4) Contribuer à l'économie par la création de valeur ajoutée.

Dans ce contexte, les considérations environnementales doivent être intégrées dans de nombreux types de décisions. Cela comprend les décisions relatives aux biens et aux services. Pour ce faire, les connaissances et sources d'information doivent être disponibles lors de l'étude des impacts environnementaux du système sous investigation. Il est essentiel de les étudier dans une perspective de cycle de vie, afin d'éviter la translocation des charges polluantes d'une phase du cycle de vie à une autre et d'une zone géographique à une autre. Il est également important de faire une évaluation complète en matière des catégories de dommage afin d'éviter les changements de problèmes d'un domaine de préoccupation environnementale à un autre.

A ce jour, il n'existe pas des lignes directrices qui font consensus pour l'analyse du cycle de vie appliquée aux biocarburants. Ceci est traduit par l'existence et l'utilisation de différentes approches méthodologiques, de multiples unités fonctionnelles, de limites des systèmes variables, de la disponibilité et de la qualité des données d'inventaire du cycle de vie, des choix des catégories d'impacts, et de la modélisation des scénarii considérés, la dynamique technologique, approches d'allocation et hypothèses retenues vis-à-vis des coproduits et le système de référence au quel le système de production des biocarburants est comparé. En outre, la Directive Européenne sur les Energies Renouvelables (RED, 2009) et la Norme Américaine sur les Carburants Renouvelables (RFS) se focalisent davantage sur l'évaluation des émissions des GES et le bilan énergétique. Cependant, d'autres études d'analyse du cycle de vie montrent que la réduction des émissions de CO₂ ne conduit pas automatiquement à la diminution des autres catégories d'impacts et peuvent au contraire mettre en évidence une augmentation des impacts négatifs en l'occurrence le potentiel de l'eutrophisation, acidification et le changement d'utilisation des terres.

A cet égard, l'utilisation de l'ACV dans le processus d'aide à la prise de décision devrait être dans un cadre adaptatif en donnant une grande importance à la collaboration et la concertation entre la recherche fondamentale et les praticiens de l'ACV afin d'intégrer les concepts de l'ACV dans les premières phases d'évaluation des systèmes et des technologies. Dans l'ensemble, des approches sont nécessaires pour créer davantage de discussions entre toutes les parties prenantes dans le secteur des biocarburants. Idéalement, les efforts visant à développer la science et la technologie des biocarburants seront continuellement documentés par les experts dans l'évaluation d'impact, et ce, pour atteindre les objectifs de développement durable recherchés.

Chapitre 4

Matériels et Méthodes

Chapitre 4 : Matériel et méthodes

Introduction

Le présent chapitre aborde l'ensemble des matériels et méthodologies employés pour la réalisation de l'analyse du cycle de vie pour évaluer les performances environnementales ainsi que les performances énergétiques du biodiesel issu de plusieurs sources. Dans la présente étude, l'analyse du cycle de vie a porté sur trois types de biodiesels, chacun représentant une génération de biocarburant. Le choix et la sélection de la matière première utilisée pour la production de ces biodiesels tiennent compte de la disponibilité et de l'adaptation aux conditions pédoclimatiques de l'espèce considérée. Ainsi, l'espèce *Moringa oléifera* a été sélectionnée en tant que source de biodiesel de première génération, tandis que l'espèce *Ricinus communis* a été retenue comme source de matière première de deuxième génération vu que cet arbuste est une espèce non alimentaire. En outre, la biomasse issue de la culture d'une souche de microalgue, *Chlorella vulgaris*, isolée à partir des milieux locaux constitue une matière première abondante en vue de la production du biodiesel de troisième génération.

Cette analyse prend en compte les modèles retenus pour les systèmes de production de ces trois types de biodiesel et définit le champ de l'étude et les limites des systèmes sur lesquelles se fait l'intégration de l'ensemble des processus à prendre en considération pour l'élaboration de l'inventaire du cycle de vie. Par conséquent, un ensemble de catégories d'impacts pertinents au système modélisé sont choisis, selon la description des systèmes de production, pour l'évaluation des performances énergétiques et environnementales.

4.1. Matière première oléagineuse pour la production du biodiesel

4.1.1 Biodiesel de première génération : *Moringa oleifera*

Le *Moringa oleifera*, communément connue sous le nom de moringa, est un arbre à graines oléagineuses appartenant à la famille des moringaceae. Cette espèce est caractérisée par sa croissance rapide atteignant facilement quatre mètres en dix mois seulement après sa plantation et par sa mise en production dès la première année et sa pleine production dès la 2^{ème} année (Council, 2006), (Karmakar et al., 2010). De surcroît, le moringa est une espèce qui tolère des sols de faible fertilité et même la sécheresse. Elle se développe dans des conditions de précipitation allant de 250 à 3000 mm/an. A la maturité, les graines sèches contiennent entre 33-41 % d'huile avec une concentration en acide oléique dépassant les 70 % (Tomes et al., 2010). La production en huile s'élève de 1000-2000 l/ha/an (Karmakar et al., 2010).

De plus, les esters méthyliques de cet acide gras présentent un indice de cétane (IC) élevé, voisin de 67. Néanmoins, ces esters présentent aussi des comportements à froid (Point d'écoulement (PEc) et point de trouble (PT) médiocres, avec des valeurs de PEc et PT élevées (Tableau 4.1).

Tableau 4.1: Propriétés physico-chimiques du biodiesel de *M. oleifera* (Fernandes et al., 2015)

Propriété	Valeur	Limite	Méthodes
Viscosité cinématique (mm ² s ⁻¹ , 40 °C)	4.50	1.9–6.0	ASTM D445
Indice d'Acidité (mg KOH g ⁻¹)	0.21	0.50	EN 14104
Stabilité Oxydative (h, à 110 °C)	19.3	>6.0	EN 14112
Point d'Écoulement (°C) (Rashid et al., 2008)	18	-	-
Point de Trouble (°C) (Rashid et al., 2008)	17	-	-
Teneur en humidité (ppm)	257.3	200	EN ISO 12937

Selon (Tilman et al., 2009), le développement des espèces pérennes sur des terres marginales permettrait de créer un système forestier, accroîtrait le couvert végétal et contribuerait à la séquestration du CO₂ atmosphérique. Il réduirait également la compétition avec la production alimentaire tout en fournissant de multiples services écosystémiques, entre autres, la promotion de la biodiversité, la rétention de l'eau et des nutriments dans le sol. Dans ce contexte, *M. oleifera* pourrait être intégrée dans des programmes de lutte contre la désertification et de mise en valeur des terres. De plus, l'espèce *M. oleifera* présente une production stable et uniforme sous les conditions méditerranéennes pour la production d'huile et de protéines (Vaknin and Mishal, 2017).

De plus, la *M. oleifera* est une espèce à usage diversifié, pouvant offrir, dans une plateforme de bioraffinerie, des produits chimiques verts pour l'industrie pharmaceutique, des produits pour l'alimentation humaine et animale, et trouver des applications dans les systèmes agricoles pour la génération des services écosystémiques (Raman et al., 2018). La figure 4.1 ci-dessous résume l'ensemble des applications industrielles potentielles pour la valorisation de la biomasse issue de *Moringa oleifera*.

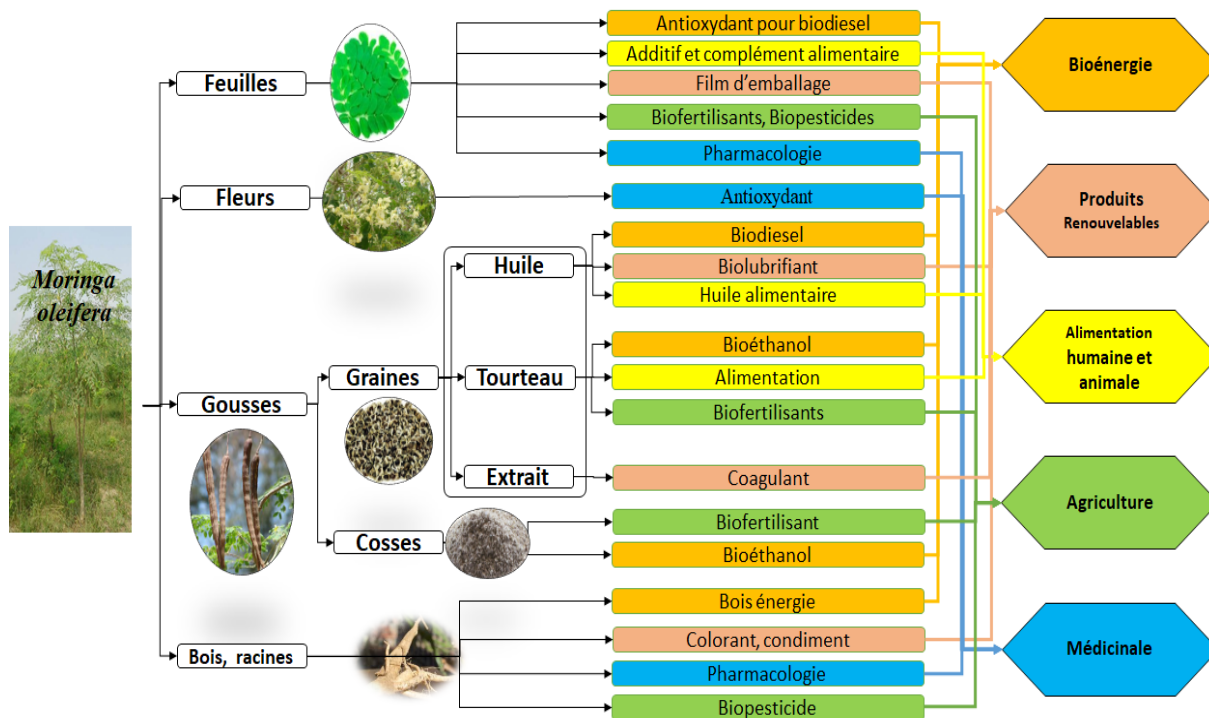


Figure 4. 1: Applications industrielles potentielles de la biomasse du *Moringa oleifera* (Raman et al., 2018)

4.1.2 Biodiesel de 2^{ème} génération issu de ressources oléagineuses non alimentaire

Actuellement, la production du biodiesel est majoritairement assurée par la conversion des huiles alimentaires avec 84% de la production mondiale provenant de la culture de colza (*Brassica napus*) (khan et al., 2014). Cela a soulevé de graves questions au sujet de la compétition vis-à-vis de l'utilisation des terres agricoles, de la pression sur les ressources hydriques et de l'augmentation des prix des huiles alimentaires qui menace la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale en raison du déséquilibre des marchés (Rulli et al., 2016). Tout ceci démontre la nécessité de l'exploitation des ressources non alimentaires qui ont la capacité de se développer sur des terres marginales de faible fertilité et avec une faible empreinte hydrique (Banković-Ilić et al., 2012).

Ainsi, les huiles non-alimentaires comme les huiles de jojoba et jatropha, les huiles usagées de friture, les graisses animales, sont aujourd'hui considérées comme des matières premières oléagineuses de deuxième génération (Sarin, 2012). Les huiles non alimentaires se caractérisent principalement par leur disponibilité et répartition dans différentes régions du monde ainsi que par leur capacité à se développer sur des terres marginales non convenables aux cultures alimentaires. De plus, elles sont plus efficaces, et plus favorables du point de vue environnemental, générant des coproduits à hautes valeurs ajoutées (Bhuiya et al., 2016),(Babazadeh, 2017).

4.1.2.1. *Ricinus communis* pour la production du biodiesel

Le *Ricinus communis* (ricin) est une espèce appartenant à la famille des euphorbiaceae. Elle se caractérise par sa résistance à la sécheresse et elle est bien adaptée aux régions tempérées tout en se développant dans une large gamme de conditions pédoclimatiques. Le ricin est une espèce oléagineuse non alimentaire de grande importance avec des teneurs en huile pouvant atteindre 50% de la matière sèche, composée principalement d'acide ricinoléique à hauteur de 89,5% environ (Kumar and Sharma, 2011).

Le rendement moyen en grains de ricin à l'échelle mondiale se situe autour de 1,1 t/ha. Néanmoins, des rendements de 4 à 5 t/ha sont obtenus dans des conditions de culture favorables avec des rendements en huile de 2 t/ha (Scholz and da Silva, 2008) (Kumar and Sharma, 2011). De surcroît, la culture de ricin pourrait contribuer à la séquestration d'importantes quantités CO₂ estimées entre 10 et 35 t/ha, constituant ainsi un bon potentiel d'échange de carbone (Lal and Stewart, 2009),(Panwar et al., 2010). En Algérie, le ricin pousse spontanément à l'état sauvage sur tout le territoire national.

Le biodiesel issu de l'huile de ricin présente une viscosité cinématique de 8,5 mm² s⁻¹, 1,4 fois plus élevée que celle du gazole. Le pouvoir calorifique du biodiesel de ricin est de 43,16 MJ/kg, inférieur à celui du gazole (46,22 MJ/kg). Le point d'éclair du biodiesel de ricin est de 129°C ; il est donc largement supérieur à celui du gazole (47°C) (tableau 4.2) (Panwar et al., 2010). Il présente un indice de cétane (IC) de 50 (Bueno et al., 2017).

Tableau 4. 2: Propriétés techniques du biodiesel de ricin comparées à celles du gazole (Panwar et al., 2010).

Propriétés	Huile de ricin	Biodiesel	Gazole	Méthode d'analyse
Densité (kg/m ³)	960	913	830	ASTM D1298
Viscosité cinématique (mm ² s ⁻¹ , 38°C)	226.82	4.6-8.50	5.80	ASTM D445
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	36.20	43.16	46.22	ASTM D240
point d'Eclair (°C)	317	129	47	ASTM D93
Indice d'acidité (mg KOH/g)	1.64	1.01	0.00	ASTM D 664
AGL (%)	2.8	1.36	0.00	-
Indice de Cetane (Bueno et al., 2017)		50	49.9	-
Point de Trouble (°C) (Ijaz et al., 2016)		-10		-
Point d'Écoulement (°C) (Ijaz et al., 2016)		-20		

L'utilisation du biodiesel de ricin en mélange avec le gazole à raison de 10 - 20 % (B10, B20), ne réduit pas de manière significative l'efficacité thermique du moteur. En matière d'émissions du NOx, il y a une augmentation des quantités émises mais, elles sont moindres que celles issues du biodiesel de l'huile de soja. De plus, le mélange gazole-biodiesel de ricin montre une réduction en matière d'émission de particules fines (PF), d'émissions d'hydrocarbures (EH) et de monoxyde de carbone (CO) (Bueno et al., 2017).

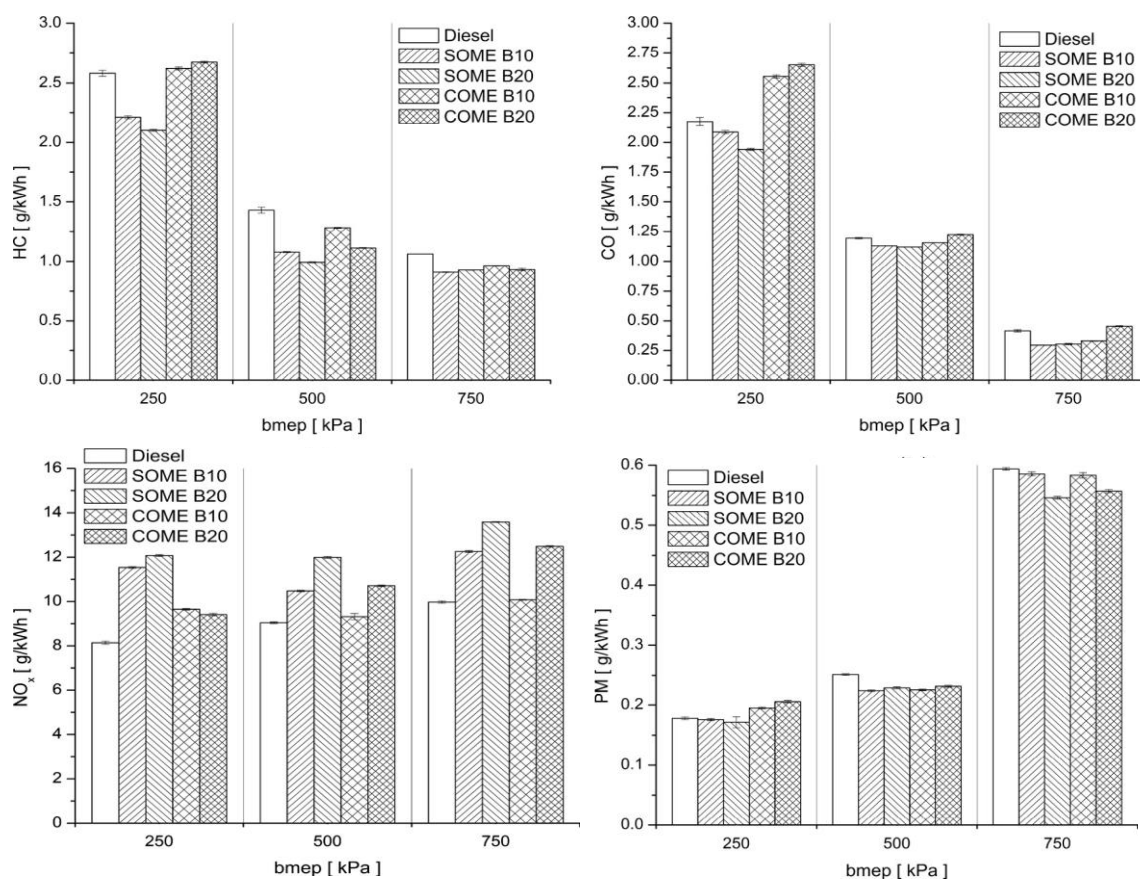


Figure 4. 2: Emissions du biodiesel de ricin B10 et B20 (Bueno et al., 2017).

Bien que le ricin soit une espèce non alimentaire, son huile est caractérisée par ses utilisations polyvalentes. Elle constitue la matière première de base pour la fabrication de nombreux produits de l'industrie chimique, comme les peintures, les vernis, et toute une gamme d'autres produits variés et sophistiqués tels que les fibres plastiques, les lubrifiants pour l'aviation, les fluides hydrauliques, le cuire artificiel, les fibres optiques, les prothèses, les antigels pour carburants, le verre résistant aux balles et les lubrifiants utilisés dans les navettes spatiales et les missiles (Ogunniyi, 2006). Par ailleurs, l'huile de ricin est d'un grand intérêt pour l'industrie pharmaceutique (Ribeiro et al., 2016).

La biomasse résiduelle issue de la culture de ricin telle que les tiges, les feuilles et le tourteau d'extraction, pourrait être utilisée comme un substrat pour la production de bioéthanol et de biogaz (Bateni et al., 2014). Dans cette perspective, il est proposé de développer une plateforme de bioraffinerie pour la production simultanée de biocarburants (biodiesel, bioéthanol et biogaz) (Bateni and Karimi, 2016), (Khoshnevisan et al., 2017), et de produits à haute valeur ajoutée en l'occurrence des fibres de cellulose pour l'industrie de textile (D.L. et al., 2017). De surcroît, le ricin pourrait être utilisé pour la phytoremédiation des sols contaminés (González-Chávez et al., 2015).

Le tourteau de ricin est très riche en protéines avec une teneur de 43% environ. Il est souvent utilisé comme fertilisant organique vue sa source excellente en azote ainsi que ses propriétés insecticides et nématicides. Cependant, cette source de protéines ne pourrait pas être recommandée pour l'alimentation de bétail à cause de la présence d'une protéine toxique, à savoir la ricine ainsi que des composés allergisants. Par ailleurs, la teneur élevée en protéines et carbohydrates fait du tourteau de ricin un substrat d'excellence pour les processus de fermentation pour la production de biogaz ou de bioéthanol (Martín et al., 2010). La figure 4.3 ci-dessous montre l'ensemble des applications industrielles potentielles pour la valorisation de la biomasse issue de *Ricinus communis*.

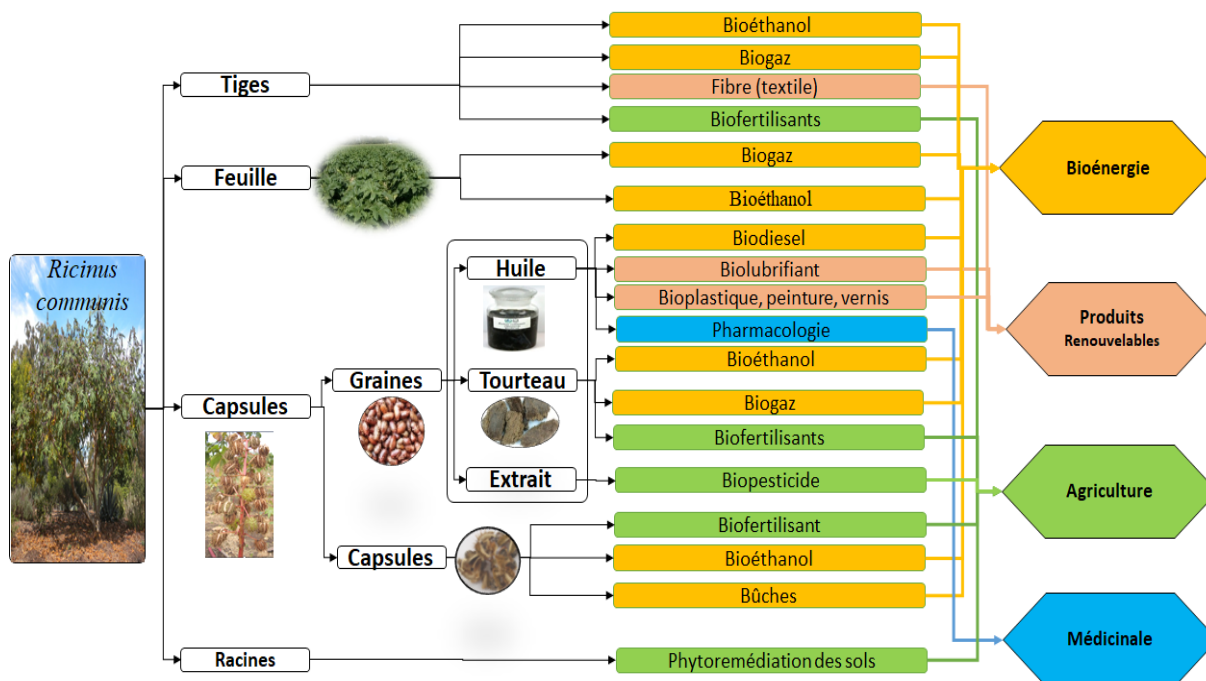


Figure 4. 3: Applications industrielles potentielles de la biomasse du *Ricinus communis*

4.1.3. Biodiesel de 3^{ème} génération - Le potentiel des microalgues

Les microalgues sont considérées parmi les matières premières les plus prometteuses pour la production des biocarburants. Ce sont des microorganismes photosynthétiques qui se caractérisent par leur productivité élevée en matière de lipides, comparativement aux plantes oléagineuses. En outre, la biomasse algale pourrait être utilisée pour le développement d'une plateforme de bioraffinerie pour la production et de biocarburants et de produits chimiques divers (Wijffels and Barbosa, 2010).

À ce jour, les microalgues restent l'une des sources de matière première pour la production durable des biocarburants tels que le biodiesel, le bioéthanol et le biogaz. Ceci est dû à la fois à leur métabolisme biochimique, leur capacité de production sur des terres non arables, leur croissance rapide et leur efficacité photosynthétique élevée comparativement aux plantes terrestres (Laurens et al., 2017).

Cependant, la production de biodiesel algal est confrontée à plusieurs difficultés et verrous technologiques. Le défi qui reste à relever reste la maîtrise et l'amélioration de la productivité en biomasse qui devrait être multipliée par 3 afin de réduire le coût de la biomasse ainsi que le développement de technologies de séparation des différents composés extraits, protéines, sucres, acides gras, pigments et vitamines (Albers et al., 2016).

4.1.3.1. *Chlorella vulgaris* : microalgue prometteuse pour la production du biodiesel

La chlorelle (*Chlorella vulgaris*) est une microalgue chlorophycée la plus étudiée et cultivée à l'échelle commerciale par plus de 70 compagnies dans le monde. Elle se présente comme une microalgue de choix pour la production des lipides, de protéines et de sucres. La teneur en lipides peut atteindre de 40-45 % de la matière sèche (Guccione et al., 2014).

Chlorella vulgaris est une microalgue unicellulaire à croissance photoautotrophe, limitée uniquement par la disponibilité des nutriments, particulièrement l'azote, l'atténuation de la lumière, des variations de pH et l'accumulation d'oxygène dans le milieu de culture. La chlorelle se positionne par son excellent potentiel pour le développement d'une future industrie bioénergétique. C'est un microorganisme photosynthétique robuste qui accumule des teneurs importantes en lipides avec un profil équilibré en acide gras. Elle se caractérise aussi par sa croissance dans des conditions de culture mixotrophe, sa tolérance au stress physiologique et aux teneurs élevées en métaux lourds (Znad et al., 2018).

D'après le tableau 4.3 le biodiesel issu des lipides de *Chlorella vulgaris* présente des caractéristiques techniques qui répondent aux normes déjà en vigueur (ASTM6751 et EN 14214).

Tableau 4. 3 : Propriétés physicochimiques du biodiesel de ricin comparées à celles du gazole (Mathimani et al., 2017).

Propriétés	Biodiesel	Gazole	Méthode d'analyse
Densité (kg/m ³)	895	830	ASTM D1298
Viscosité cinématique (mm ² s ⁻¹ , 38°C)	4.1	5.80	ASTM D445
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	42.7	46.22	ASTM D240
Indice d'acidité (mg KOH/g)	0.51	0.00	ASTM D 664
Teneur en Acide Gras Libre (%)	1.36	0.00	-
Indice de Cetane	50	49.9	-
Point de trouble (°C)			-
Point d'Écoulement (°C)	< -7		D97
point d'Éclair (°C)	129	47	ASTM D93

4.1.3.2. Utilisation et applications potentielles de la biomasse microalgale

La culture de *chlorella vulgaris* pourrait être intégrée aux procédés de traitement des eaux usées permettant ainsi le recyclage des nutriments et la réduction du coût de revient de la biomasse algale pour la production de biodiesel, de bioéthanol, de biogaz et de matières premières pour des applications dans l'industrie chimique et alimentaire.

De plus, en utilisant les rejets de CO₂ et les eaux usées, la culture des microalgues pourrait avoir une réduction de son coût de revient allant de 35 à 86 %, contribuant en même temps aux efforts pour la réduction des émissions de CO₂ à l'échelle mondiale (Judd et al., 2017).

En effet, les microalgues jouent un rôle important dans le cycle du carbone atmosphérique avec 40 % de CO₂ total capté et assimilé par la biomasse microalgale, ce qui indique toute l'importance de son potentiel de séquestration des émissions anthropogéniques en CO₂ (Pires, 2017).

Actuellement, des études sont faites pour l'utilisation de la biomasse de la chlorelle pour la production soutenable du charbon actif dopé en azote pour les dispositifs de stockage d'énergie (Lee et al., 2017). D'autres applications et utilisations de la biomasse de la chlorelle sont mentionnées dans la figure 4.4 ci-dessous.

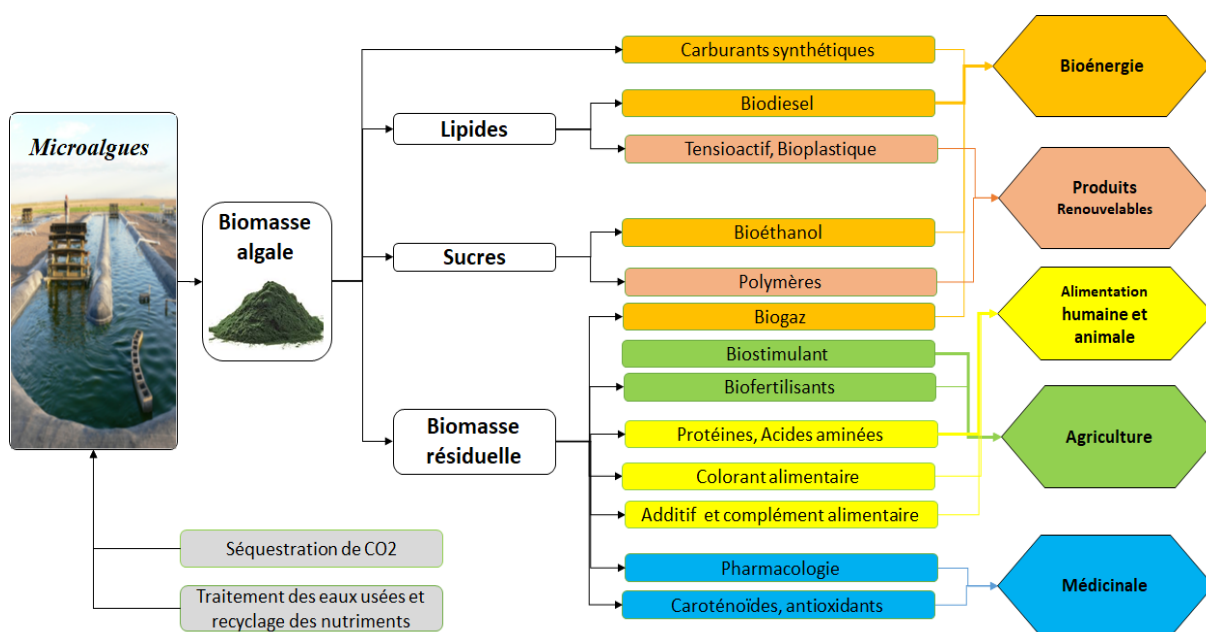


Figure 4. 4: Applications industrielles potentielles de la biomasse microalgale

4.2. Description du cycle de vie du système de production du biodiesel

4.2.1. Biodiesel de *Moringa oleifera* et *Ricinus communis*

La chaîne de valeur de la production des biocarburants comprend généralement quatre phases à savoir la production de la biomasse, le transport de la biomasse, sa conversion en biocarburant et la distribution et l'utilisation du biocarburant. Dans ce contexte, l'analyse du système de production du biodiesel à partir des huiles de *Moringa oleifera* et *Ricinus communis* inclut la phase agricole pour la production de l'huile et la phase industrielle en l'occurrence l'extraction et la conversion de l'huile en biodiesel par transestérification, puis le transport du biodiesel à la station de service pour la distribution.

En ce qui concerne le flux de matière durant la phase de culture de *Moringa oleifera* et de *Ricinus communis* pour la production des graines oléagineuses, le système nécessite l'utilisation des fertilisants chimiques ainsi que des pesticides (insecticides et herbicides). Par conséquent, l'ensemble des données nécessaires pour l'établissement de l'inventaire du cycle de vie sont prises de la littérature vue que la culture des deux espèces n'est pas encore établie à grande échelle en Algérie. Les figures 4.5 et 4.6 ci-

dessous montrent les différentes étapes et processus impliqués dans le système de production de biodiesel issu de l'huile de *Moringa oleifera* et *Ricinus communis*, les différents types de flux de matière et d'énergie et les sortants de chaque processus à savoir le produit principale (biodiesel), la biomasse résiduelle en l'occurrence le tourteau, le glycérol et les flux en matière de déchets comme les eaux usées dues à la réaction de transestérification.

Par ailleurs, *Moringa oleifera* est une espèce pérenne avec une durée de vie de 15 ans. En revanche, la culture de *R. communis* est considérée dans cette étude comme culture annuelle en raison des possibilités de mécanisation de la récolte de ricin à grande échelle et de l'adaptation du matériel agricole de récolte local à cette culture. La biomasse résiduelle des deux cultures peut être utilisée comme amendement organique afin d'améliorer la teneur en matière organique du sol et donc la séquestration du carbone tout en améliorant les propriétés physico-chimiques du sol, néanmoins, cette utilisation n'est pas incluse dans la présente analyse du cycle de vie.

En ce qui concerne les flux énergétiques durant la phase de culture, il comprend deux types de flux à savoir les flux directs et indirects. Les flux directs sont liés principalement aux différents travaux culturaux, entre autres, l'énergie utilisée pour le travail du sol et la récolte mécanisée dans le cas du ricin et le battage des gousses dans le cas de *M. oleifera*. L'utilisation des fertilisants chimiques et des pesticides durant la phase de culture implique une consommation intensive d'énergie nécessaire pour la production de ces intrants qui est considérée comme énergie « indirecte ».

En outre, la phase d'extraction et de la transésterification de l'huile *M. oleifera* et de *R. communis* nécessite une utilisation d'énergie calorifique sous forme de vapeur et d'électricité pour le préchauffage de l'huile et l'agitation pendant la réaction de la transésterification (Kalaivani et al., 2014).

En matière de la technologie de transformation de la graine oléagineuse l'extraction mécanique reste le procédé le plus courant avec des rendements élevés en huile de bonne qualité. Par ailleurs, l'extraction de l'huile de ricin se fait généralement à une température modérée de 70 °C, conduisant ainsi à un rendement en huile de 38 à 48 % (Scholz and da Silva, 2008).

La conversion de l'huile en biodiesel se fait par transestérification, une technologie déjà bien établie. Elle consiste à une réaction chimique entre l'huile et un alcool à courte chaîne comme l'éthanol ou le méthanol en présence d'un catalyseur alcalin ou acide. Le temps de réaction dépend du type d'alcool, la méthanolyse étant beaucoup plus rapide (Simoni M. Plentz Meneghetti et al., 2006). Le méthoxyde de sodium est en outre le catalyseur le plus efficace avec de faibles impacts sur la phase de séparation et d'épuration (Peña et al., 2009) (Kılıç et al., 2013).

Toutefois, la production du biodiesel génère des déchets, tels que des eaux usées issues du lavage du biodiesel pour l'élimination des contaminants et des impuretés afin de répondre aux spécifications en vigueur. Les contaminants et les impuretés sont constitués par le savon, le catalyseur, le glycérol, l'alcool résiduel, l'eau et les acides gras libres. Ainsi, l'industrie de la production du biodiesel à l'échelle

mondiale a généré approximativement 28 millions de m³ des eaux usées, issues du procédé du lavage. La quantité d'eau générée par le processus de lavage du biodiesel est estimée autour de 20-120 L/100 L de biodiesel. En général, les eaux usées sont traitées dans une station d'épuration (Daud et al., 2015). L'infrastructure pour la production du biodiesel n'est pas prise en compte vue sa contribution négligeable aux impacts environnementaux tout au long du cycle de vie du système de production (Klöpffer and Grahl, 2014).

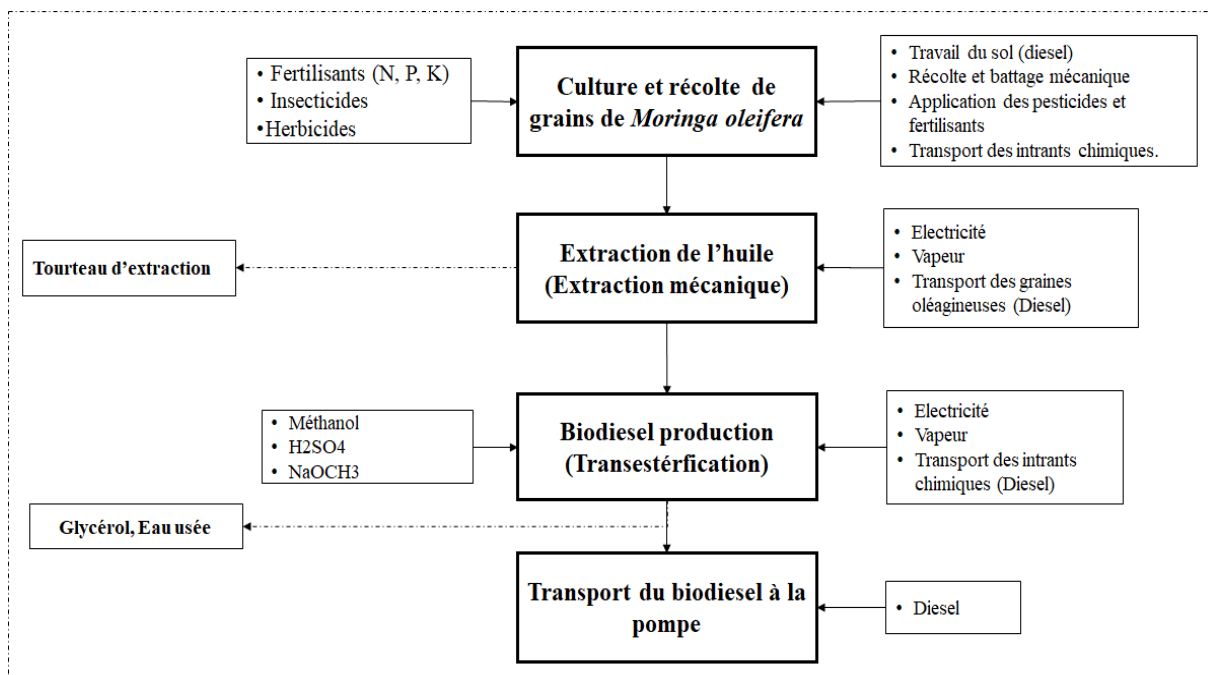


Figure 4. 5: Organigramme des processus de production du biodiesel de *M. oleifera*

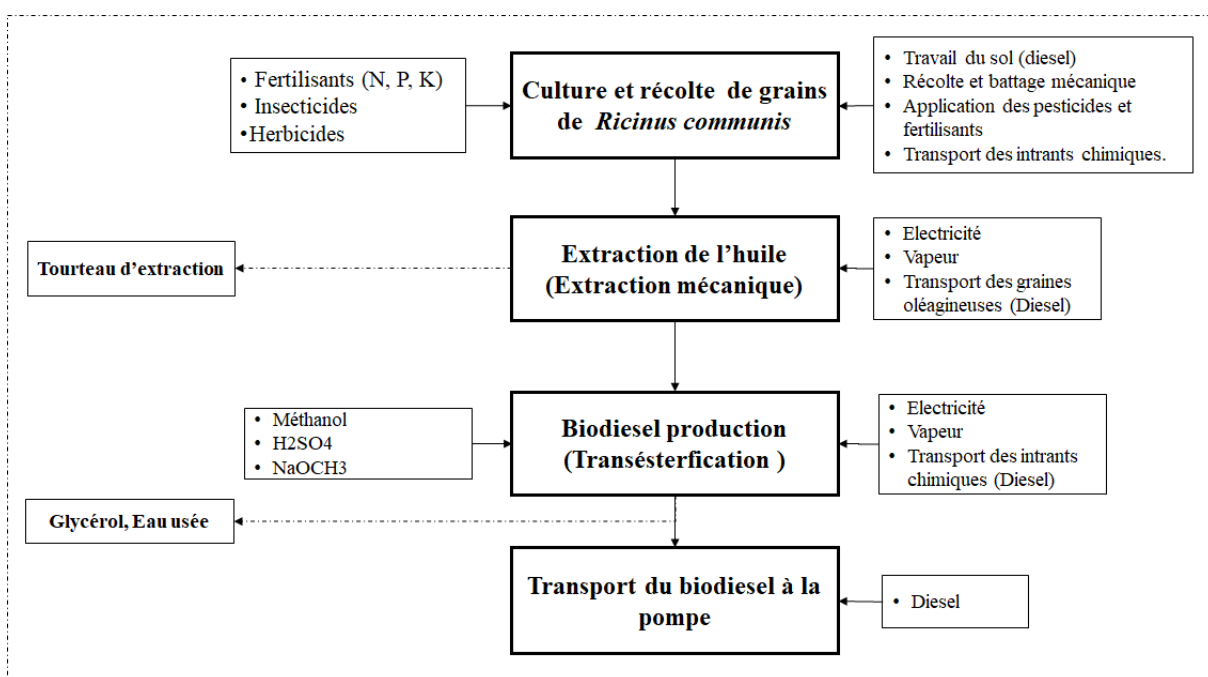


Figure 4. 6: Organigramme des processus de production du biodiesel de *R. communis*

4.2.2. Biodiesel issue des microalgues (*Chlorella vulgaris*)

La méthodologie adoptée pour l'analyse du cycle de vie du biodiesel issu de la culture de *Chlorella vulgaris*, prend en compte l'estimation des ressources disponibles pour la production à grande échelle et la configuration du système de production.

L'estimation des ressources pour la culture des microalgues est basée sur un ensemble de critères à savoir : le rayonnement solaire annuel, la disponibilité d'une source de CO₂ et d'eau. Cette étape permettra le choix de la région de la production ainsi que la configuration du système de production.

La deuxième étape consiste à choisir le type de système de culture et son dimensionnement dans le but d'estimer la consommation énergétique nécessaire pour les différentes opérations de la culture tels que l'agitation de la culture, l'injection de CO₂, le remplissage et la recirculation de l'eau avant et après la récolte de la biomasse algale. Cette étape permet l'estimation de la productivité et le rendement annuel en biomasse. Elle permet aussi l'estimation de la consommation des ressources en matière de nutriments et d'eau ainsi que les types de matériaux utilisés pour la construction du système de culture (bassin ouvert).

La troisième étape consiste au choix de la technologie de récolte et de conversion de la biomasse microalgale. Par ailleurs, le choix de la technologie de récolte s'est basé sur la maturité de la technologie à l'échelle commerciale ainsi que l'exigence en matière de la consommation énergétique.

Le système de conversion de la biomasse retenu dans cette étude est basé sur la diversification des produits finaux en l'occurrence le biodiesel et le bioéthanol. D'autre part, l'intégration énergétique dans le système constitue un autre facteur important tant pour améliorer l'efficacité énergétique du système que pour réduire le coût de revient. Par conséquent, un système de traitement combiné de biomasse algale selon le concept de bioraffinage est retenu dans cette étude. [Ce système a été testé](#) avec succès par le National Renewable Energy Laboratory ([R. Davis et al., 2014](#)). Dans ce procédé, la biomasse algale résiduelle est valorisée par la digestion anaérobique pour la production du biogaz qui alimentera une installation de cogénération afin d'assurer une certaine autonomie énergétique de l'unité de conversion de la biomasse. Le surplus en électricité est utilisé pour réduire la demande en électricité d'origine fossile durant les phases de culture et de récolte de la biomasse algale. En outre, le processus de digestion anaérobique permet de recycler le CO₂, de nutriments et d'eau pour la phase de la culture afin de réduire la demande sur les ressources naturelles.

4.2.2.1 Estimation des ressources disponibles pour la culture des microalgues

L'estimation des ressources est une étape cruciale pour la culture des microalgues à grande échelle. L'utilisation de biocarburants issus des microalgues implique une demande importante en matière de ressources naturelles telles que le foncier, l'eau, l'énergie, une source de CO₂ à faible coût ainsi que des nutriments (Azote et le phosphore). Ceci impose des contraintes en matière de soutenabilité de la production des biocarburants ([Pate, 2013](#)) ([Chisti, 2013](#)), ([Venteris et al., 2014](#)). [Bennett et al. 2014](#), ont

développé une méthodologie pour l'évaluation du potentiel de la culture des microalgues dans les systèmes à ciel ouvert tenant en compte un ensemble de critères, à savoir l'irradiation solaire, les précipitations, la disponibilité et la topographie des terres. De plus, des incertitudes résident dans l'estimation des ressources émanant des différentes stratégies d'intégration des processus. Par ailleurs, une voie de production intégrant la digestion anaérobie de la biomasse résiduelle permettrait le recyclage des nutriments tel que l'azote et le phosphore, réduisant ainsi la demande sur les ressources naturelles (Quinn and Davis, 2015).

Bien que les études expérimentales sur la culture des algues à grande échelle n'existent pas encore en Algérie, les conditions de la culture des microalgues sont très favorables en particulier dans la région du sud du pays. Dans ce contexte, des données moyennes sur une période de 10 ans pour l'irradiation annuelle, la température, la durée du jour, sont obtenues des bases de données dédiées aux énergies renouvelables du Centre des Données des Sciences de l'Atmosphère (Atmospheric Science Data Center, (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>)). La situation du système de production de la culture des microalgues présente des avantages qui répondent aux critères mentionnés plus haut et résumés dans le tableau 4.4. Les ressources hydriques utilisées pour la culture des algues sont supposées être prélevées des eaux douces souterraines comme première approche de modélisation. Dans ce contexte, les ressources disponibles sont rapportées par Kettab 2001. Les données météorologiques sont utilisées pour estimer la quantité d'évaporation. La quantité de CO₂ disponible est calculée sur la base de la production annuelle d'une unité de décarbonatation de gaz naturel ayant une teneur en CO₂ de 3,4%.

Tableau 4. 4: Critères de sélection du site de la production du biodiesel algal

Critère	Valeur	Valeur de référence (Bennett et al., 2014)
Irradiation annuelle (kWh/m ²)	5,78	4,65 MIN
Durée du jour (heure/jour)	12	-
Température minimale (°C)	4,5°C	4°C
Température maximale (°C)	39,5	20-35
Source de CO ₂ (t/an)	Colocation avec une industrie de gaz naturel.	-
Ressources hydrique	Eau douce souterraine	-

4.2.2.2 Description du système de production du biodiesel microalgal

Le système de production du biodiesel microalgal comprend le choix et la configuration du système de culture où les conditions opératoires sont bien définies. De plus, l'estimation des ressources nécessaires pour la culture est faite en se basant sur la quantité de CO₂ disponible et la productivité de la biomasse

retenue. En outre, la demande en énergie pour les différents processus, à savoir l'agitation de la culture, le pompage de l'eau et la récolte de la biomasse, est aussi évaluée. D'autre part, le système de la culture inclut l'infrastructure nécessaire pour la construction des bassins ouverts.

La partie en aval consiste en la conversion de la biomasse en biocarburant. La section suivante décrit l'approche adoptée pour la configuration du sous-système de conversion en utilisant la conversion intégrée de la biomasse dans l'objectif d'améliorer l'efficacité énergétique du système de production. L'approche intégrale est basée sur le recyclage et l'intégration énergétique afin d'améliorer les performances en matière de soutenabilité de la filière de production du biodiesel.

4.2.2.3 Système de culture et récolte de la biomasse microalgale

Les bassins ouverts sont les systèmes de culture les plus utilisés pour la culture des microalgues à l'échelle industrielle vue leur simplicité technique et le coût d'investissement relativement faible (Kumar et al., 2015) (Chisti, 2016). Dans notre étude, la configuration du système de culture se fait d'une manière à disposer de trois bassins par hectare dans le but de réduire les risques, particulièrement dans le cas d'une contamination. La configuration retenue s'appuie sur les considérations mentionnées par (Weissman and Goebel, 1987), (Lundquist et al., 2010), (Chisti, 2012), (White and Ryan, 2015), (Chisti, 2016). Les dimensions du système de culture sont résumées dans le tableau 4.5 ci-dessous. La figure 4.7 illustre le système de culture dans les bassins ouverts avec sa configuration.

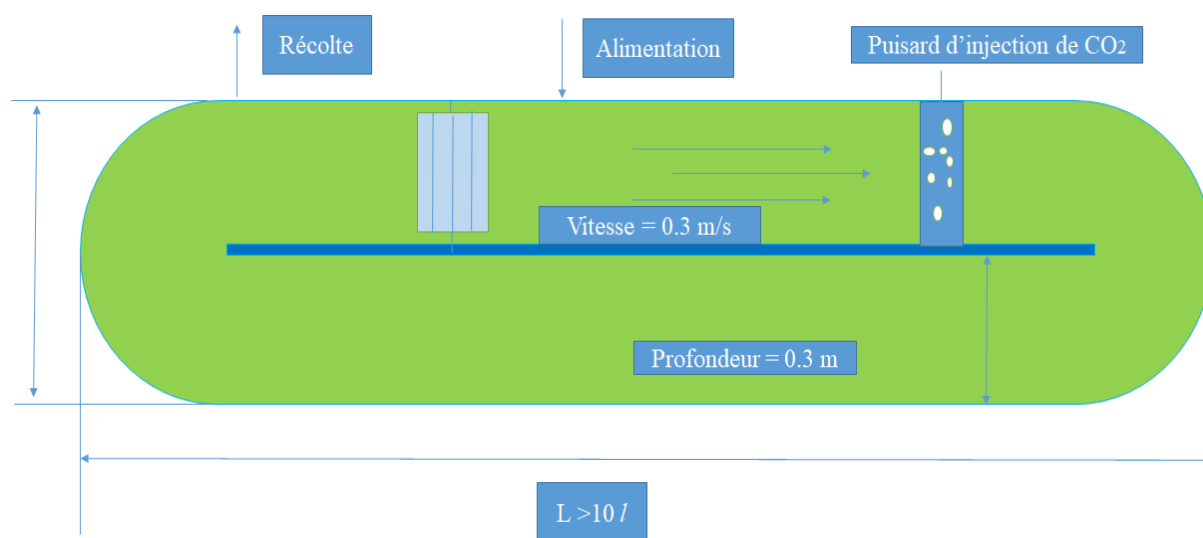
L'agitation de la culture des microalgues est généralement assurée par une roue à aubes fréquemment utilisée à l'échelle industrielle pour la production des différents types de microalgues destinées à l'alimentation (Lundquist et al., 2010). La demande en électricité dépend largement de la vitesse d'agitation qui est généralement fixée à 0,3m/s (Chisti, 2016). L'estimation de l'énergie électrique nécessaire pour l'agitation est estimée à l'aide des équations utilisées par (Lundquist et al., 2010) qui tiennent compte notamment des pertes de charge, le long de la section du canal ainsi que dans ses parties courbées.

L'injection de CO₂ se fait par l'utilisation d'un puisard (Sump) de 1 m de profondeur à partir duquel le CO₂ est injecté à contre-courant avec un taux d'absorption du CO₂ pouvant atteindre 95 % dans les conditions optimales (de Godos et al., 2014). Cependant, dans ce travail le taux d'absorption de CO₂ dans la culture est de 70 %.

Le choix des matériaux de construction des bassins dépend de plusieurs facteurs dont la salinité du milieu de culture qui est la principale contrainte. En effet, l'utilisation du béton dans la construction constitue l'option la plus effective et la moins chère dans le cas de l'utilisation d'eau douce pour le milieu de culture. L'installation de membranes de chlorure de polyéthylène est nécessaire pour la protection contre la corrosion (Andersen, 2005).

Tableau 4. 5: Configuration et paramètres opératoires du système de culture des microalgues

Paramètre	Valeur
Longueur (m)	200
largeur (m)	14
Largeur du canal (m)	7
Rapport longueur /largeur	14,3
Profondeur du bassin (m)	0,3
Epaisseur du séparateur entre les canaux (m)	0,1
Surface du bassin (m ²)	2950
Volume du bassin (m ³)	885
Ratio Surface/volume	3,33
Vitesse d'agitation de la culture (m/s)	0,3
Efficacité de la roue à aubes (%)	40
Taux de dilution ((jour) ⁻¹)	0,167
Taux d'absorption du CO ₂	0,7
Concentration de la biomasse (kg/m ³)	0,5
Productivité (g/m ² jour)	25
Durée annuelle de fonctionnement (jour/an)	330
Rendement de la biomasse (t MS/ha an)	73

**Figure 4. 7:** Configuration d'un Bassin ouvert pour la production des microalgues

4.2.2.4 Source et injection de CO₂ dans les bassins de culture

Le CO₂ est essentiel pour la photosynthèse et constitue le facteur décisif pour accélérer la croissance des microalgues. Il constitue également un élément critique pour la viabilité économique de la culture des microalgues pour la production des biocarburants dont sa contribution au coût de revient peut atteindre 50% du coût global de production (Quinn and Davis, 2015). En plus, l'approvisionnement de CO₂ est un facteur à considérer pour le choix du site d'installation de la culture pour pérenniser le système de production (Chisti, 2013). L'estimation de la quantité de CO₂ nécessaire se fait en se basant sur la formule stœchiométrique de la souche de la chlorelle (*Chlorella vulgaris*) qui est de C₁₀₆H₁₈₁O₄₅N₁₆P

(Goldman et al., 1972), (Rogers et al., 2014), (Huntley et al., 2015). De même, le taux d'absorption de CO₂ dans les bassins de culture est généralement de 70 % selon les récents travaux d'optimisation et de contrôle de l'injection de CO₂ selon les conditions de la culture (pH du milieu notamment) (Chisti, 2012), (de Godos et al., 2014), (Pawlowski et al., 2014).

Dans notre étude, le CO₂ est supposé provenir d'une unité de traitement de gaz naturel pour l'élimination du CO₂. Le CO₂ est fourni au site de la culture par un système de transport par pipeline à haute pression (10 atm, 298 K). Le CO₂ est stocké dans des réservoirs de stockage sphériques à proximité des bassins de culture puis distribué par diffusion dans les bassins durant la journée. Le transport du CO₂ par pipeline est supposé de se faire sur une distance n'excédant pas 15 km (Kadam, 1997), (Huntley et al., 2015), (Davis et al., 2016).

4.2.2.5 Estimation de la productivité de la biomasse microalgale

La production de biomasse microalgale est considérée comme une étape clé pour la production des biocarburants à partir de microalgues. Dans notre travail, le système de la culture est en mode continu avec une concentration en biomasse de 0,5g/L. La productivité est estimée sur la base moyenne annuelle du taux de dilution pour la culture de la souche de *Chlorella vulgaris* évalué autour de 0,167 jour⁻¹ en conditions réelles avec une productivité moyenne de 25 g/m² jour (Chisti, 2012). Cette productivité est très proche de celle démontrée à l'échelle industrielle pour les autres souches de microalgues en l'occurrence les diatomées *Staurosira* et chlorophyte *Desmodesmus*, rapportée par (Huntley et al., 2015). En outre, la composition chimique de la biomasse et sa teneur en huile sont basées sur le potentiel d'une souche localement isolée. Celle-ci contient 26,84% de sucres, 30,58% de lipides, 22,58% de protéines et 20 % de cendres. La période d'opération est supposée de 330 jours/an avec un rendement en biomasse de 73 t MS /ha.an et un rendement en huile de 22,6 t /ha.an (tableau 4.5).

2.2.6 Demande en ressources hydriques

L'eau est un facteur très crucial pour le développement de la culture de microalgues à grande échelle (Pate, 2013), (Chisti, 2013). Par conséquent, le recyclage de l'eau après la récolte de la biomasse algale est une étape de grande importance pour une production soutenable particulièrement dans les zones arides où le niveau de l'évaporation est très important (White and Ryan, 2015). Dans notre étude, et comme première approche, l'approvisionnement en eau est supposé être assuré par un forage artésien dans la région de la production et la quantité d'eau nécessaire pour tout le système de culture est calculée en prenant en compte et l'eau nécessaire pour le milieu de la culture et l'eau évaporée en utilisant la formule de Hargreaves (George H. Hargreaves and Zohrab A. Samani, 1985). De plus, l'eau est recyclée dans les bassins de culture après la récolte de la biomasse. Une partie de l'eau est également recyclée au niveau de l'installation de conversion de la biomasse.

L'énergie nécessaire au pompage de l'eau à partir et vers les bassins de la culture est estimée par l'utilisation des pompes standards pour les eaux usées à forte charge en matière solide pour lesquelles l'énergie nécessaire, rapportée par [Xu et al., 2011](#), est de 0,052 kWh/m³.

2.2.7 Demande en nutriments

La quantité de nutriments nécessaire pour la culture de la biomasse est estimée sur la base de la composition stœchiométrique de la biomasse de *Chlorella vulgaris* sans tenir compte de l'efficacité d'absorption ainsi que des pertes due à la concurrence avec d'autres microorganismes dans la culture, sachant que l'environnement ouvert de la culture n'est jamais un système en monoculture ([Davis et al., 2016](#)). Les nutriments nécessaires pour la croissance des microalgues sont assurés par l'utilisation d'urée comme source d'azote ([Lammers et al., 2017](#)), sachant qu'un approvisionnement externe en azote est intensif en matière d'énergie ([Peccia et al., 2013](#)). En plus, le triple superphosphate est utilisé comme source de phosphore, ce type d'engrais présentent les impacts environnementaux les plus faibles durant son cycle de vie ([Handler et al., 2012](#)).

2.2.8 Demande en terre

L'utilisation des microalgues pour la production de biocarburants contribuera à la réduction de l'utilisation des terres comparativement aux plantes terrestres et ceci par l'efficacité de sa photosynthèse ([Pate, 2013](#)). Cependant, plusieurs considérations affectent la disponibilité et l'aptitude des terres dans une région donnée, entre autres, la topographie, la disponibilité d'une source de CO₂ et les conditions climatiques ([Pate et al., 2011](#)), ([Bennett et al., 2014](#)), ([R. E. Davis et al., 2014](#)).

2.2.9 Technologie de récolte de la biomasse microalgale

Après la culture, la biomasse produite devrait être séparée du milieu de culture. Cette étape reste encore l'une des phases qui limite le développement de la culture des microalgues vue que cette étape est très énergivore. Dans ce contexte, plusieurs technologies et concepts sont proposés pour la récolte des microalgues ([Milledge and Heaven, 2013](#)). Ainsi, la technologie de la filtration membranaire a été appliquée dans différentes phases de la culture des microalgues et pour les différents traitements de la biomasse ([Bilad et al., 2014](#)), ([Mo et al., 2015](#)). Comme hypothèse retenue pour cette étude, la récolte de la biomasse est assurée par un système avancé de filtration membranaire récolte/déshydratation développé et commercialisé par la société Global Algae Innovation. Sa capacité de filtration est de 20 m³/h. Cette technologie présente plusieurs avantages, entre autres, une consommation faible en énergie (0,04 kWh/m³) et une récupération de la biomasse à 100%, avec une concentration en biomasse de 15 à 20 %. En plus, l'eau à la sortie se trouve totalement claire est libre de microorganismes comme les bactéries ainsi permettant un recyclage très pratique pour le système de la culture ([Barry et al., 2016](#)).

4.2.2.10 Processus de prétraitement de fermentation de la biomasse

Les microalgues ont un potentiel énorme pour la production des biocarburants liquides renouvelables. Plusieurs méthodes avaient été proposées pour la conversion de la biomasse microalgale en biocarburants afin de tirer le maximum de produits bioénergétiques. Le fractionnement de la biomasse, en ses constituants majeurs, constitue l'une des voies qui dans laquelle l'approche de bioraffinerie est privilégiée (Laurens et al., 2017).

Dans cette perspective, le développement d'un procédé intégré de bioraffinage permettant de diversifier les produits finaux est crucial pour la commercialisation des biocarburants issus de microalgues. De même, un traitement combiné de la biomasse microalgale a été étudié par (Laurens et al., 2015) et (Dong et al., 2016a). Ce procédé présente de nombreux avantages dont la maximisation de la récupération de l'énergie de la biomasse microalgale en produisant à la fois de l'éthanol et du biodiesel. En plus, il réduit l'énergie nécessaire pour le séchage de la biomasse. Il permet aussi l'amélioration de l'efficacité d'extraction des lipides suite au prétraitement de la biomasse (Dong et al., 2016b). L'utilisation du procédé de traitement combiné de la biomasse microalgale à grande échelle a fait l'objet d'une étude menée par le National Renewable Energy Laboratory (NREL). La biomasse résiduelle est utilisée comme un substrat pour la digestion anaérobie en vue de générer l'énergie nécessaire dans l'installation de conversion. De même, le surplus en électricité est utilisé pour couvrir partiellement les besoins énergétiques dans le système de culture des microalgues (R. Davis et al., 2014). En outre, l'intégration de la technologie de la digestion anaérobie permettra le recyclage des nutriments, du CO₂ et de l'eau pour la croissance des microalgues, réduisant ainsi la demande sur les ressources naturelles (Sialve et al., 2009), (Lammers et al., 2017).

4.2.2.10.1 Traitement de la biomasse par l'acide sulfurique dilué

L'Hydrolyse par l'utilisation de l'acide dilué est une méthode effective pour la conversion de la biomasse microalgale en sucres pour la production du bioéthanol (Ho et al., 2013). Durant cette étape, la biomasse est traitée à la fois par la vapeur et par l'acide sulfurique comme catalyseur de la réaction à haute température pendant un temps très court dans le but d'hydrolyser les sucres complexes en sucres monomères tout en rendant d'autres constituants plus facile à extraire. Ensuite, l'ammoniac (NH₃) est utilisé pour neutraliser la biomasse après l'hydrolyse pour atteindre un pH de 5 qui est favorable pour la fermentation alcoolique (R. Davis et al., 2014). Les conditions du prétraitement appliquées et l'efficacité de la conversion sont résumées dans le tableau 4.6.

4.2.2.10.2 Fermentation et distillation

Après concentration de la biomasse à 20 % de solides totaux, elle est refroidie puis inoculée avec les organismes fermentatifs où la fermentation se fait en mode batch pour la production de bioéthanol. Le bioéthanol se trouve à état dilué et est distillé à une concentration azéotrope pour atteindre une concentration de 99.5% par l'utilisation de tamis à absorption moléculaire. Les résidus de la distillation

riche en matière solide sont ensuite destinés pour l'extraction des lipides. Quant au CO₂ issu de la fermentation, il est recyclé pour la croissance des microalgues (R. Davis et al., 2014). Les conditions appliquées durant la fermentation et le rendement en bioéthanol sont récapitulés dans le tableau 4.6. L'acier inoxydable d'épaisseur de 5 mm est utilisé pour la construction des fermenteurs dont les dimensions sont prises de la littérature (R. Davis et al., 2014).

4.2.2.10.3 Extraction et transestérification de l'huile en biodiesel

Les résidus de la distillation sont alimentés dans une colonne d'extraction liquide-liquide à contre-courant en utilisant de l'hexane comme solvant avec un rapport massique de 5:1 (hexane : biomasse en matière sèche). La phase légère, contenant principalement le solvant et l'huile extraite, est ensuite alimentée dans une colonne de stripping pour récupérer le solvant avec des pertes négligeables et une concentration finale en huile de 99.5 % (lipides neutres et polaires). L'huile est ensuite épurée afin d'éliminer les lipides polaires et autres impuretés. Le rendement d'extraction de l'huile est de 95% (R. Davis et al., 2014). Enfin, la phase aqueuse est envoyée pour la digestion anaérobique.

4.2.2.10.4 Transésterification de l'huile en biodiesel

La production du biodiesel se fait par transestérification de l'huile avec le méthanol en présence d'un catalyseur alcalin. Les bilans énergétiques et massiques du processus de la production du biodiesel nécessaires pour l'établissement de l'inventaire sont obtenus en se basant sur les données de l'étude de (Varanda et al., 2011). La teneur en acides gras libres dans l'huile issue de *Chlorella vulgaris* est supposée être égale à 0,05% en masse (Pokoo-Aikins et al., 2010). Le rendement global en biodiesel est de 95%. Toutes les étapes nécessaires au processus de production de biodiesel sont prises en compte, à savoir la réaction de transestérification, la récupération du méthanol, la séparation du glycérol et la purification du biodiesel comme produit final. Par ailleurs, l'élimination du catalyseur qui se fait par addition de H₃PO₄, est aussi prise en considération (Varanda et al., 2011). Le glycérol et les effluents d'eaux usées sont destinés pour la digestion anaérobique avec la biomasse résiduelle issue de l'extraction de l'huile. Ceci permet de rééquilibrer le rapport C/N vue que la biomasse résiduelle est déficitaire en carbone. En effet, l'utilisation du glycérol dans la digestion anaérobique améliore le rendement en CH₄ dans une fermentation mésophile en co-digestion (Choudri and Baawain, 2015).

En outre, l'infrastructure nécessaire pour la construction des réacteurs implique l'utilisation d'acier inoxydable. L'estimation de la quantité d'acier est basée sur les unités industrielles pour la production du biodiesel développées par la société Alfa Laval Ageratec system.

Tableau 4.6: Conditions opératoires de la conversion de la biomasse microalgale

Process	Paramètre	Valeur
Prétraitement à l'acide dilué (Hydrolyse acide)	Charge solide total (% masse)	20
	H ₂ SO ₄ (% mass)	1
	Température (°C)	150
	Pression (atm)	4,6
	Temps de séjour (min)	5
	Rendement en glucose (%)	90
Fermentation alcoolique	Charge totale initiale (% TS)	20
	Température (°C)	37
	Temps de séjour (h)	36
	Diammonium phosphate (DAP) (g/L)	0,33
	Conversion Glucose en bioéthanol (%)	95
	Perte par contamination (%)	3
Extraction de l'huile	Efficacité de l'extraction d'huile (%)	99,5
	Charge de solvant (rapport massique solvant : biomasse)	5 :1
	Rendement de transestérification (%)	95
Transésterification de l'huile	Température (°C)	60
	Pression (atm)	3,95
	Catalyseur (%)	1
	Ratio molaire Méthanol : huile	6 :1
	Température(°C)	35
Digestion Anaérobique	Temps de séjour hydraulique (jour)	20
	Charge en solides totaux (ST) (%)	9
	Rendement en CH ₄ dans le biogaz (L/g ST, 48% dégradation de carbone)	0,2
	Composition du biogaz composition (%vol)	67% CH ₄ / 33% CO ₂
	Demande thermique DA (kWh/kg ST)	0,22
	Demande électrique (kWh/kg ST)	0,085
	Récupération de N net dans les effluents (%)	75
	Récupération de P des effluents (%)	50
	Biodisponibilité de N du digestat solide (%)	40
	Matière insoluble dans le digestat solide (%)	30

4.2.2.10.5 Processus de Digestion anaérobique/Cogénération (CHP)

La biomasse résiduelle issue du processus d'extraction de l'huile, le glycérol et les effluents d'eaux usées sont utilisés pour la digestion anaérobique pour la production du biogaz et le recyclage des nutriments pour la croissance des microalgues. Le biogaz produit alimente une unité de microgénération pour produire de l'électricité afin de répondre aux besoins de l'installation de conversion de la biomasse microalgale. Le surplus est utilisé pour combler partiellement les besoins en électricité du système de culture.

Les effluents thermiques sont récupérés pour la génération de vapeur nécessaire pour satisfaire la demande en chaleur de l'installation de conversion. Les effluents de la digestion anaérobique sont recyclés vers le système de culture des microalgues afin de réduire la demande en nutriments (N, P) (R. Davis et al., 2014). La demande thermique et électrique pour le processus de digestion anaérobique est donnée dans le tableau 4.6 (Wigmosta et al., 2012).

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

L'acier inoxydable avec une épaisseur de 5 mm (ISSF, 2012) est utilisé pour la construction des digesteurs dont les dimensions sont adaptées et estimées selon (R. Davis et al., 2014) et le rapport de (Wigmosta et al., 2012).

L'ensemble des processus impliqués dans la culture des microalgues et la conversion de la biomasse microalgale sont illustrées sur la figure 4. 8.

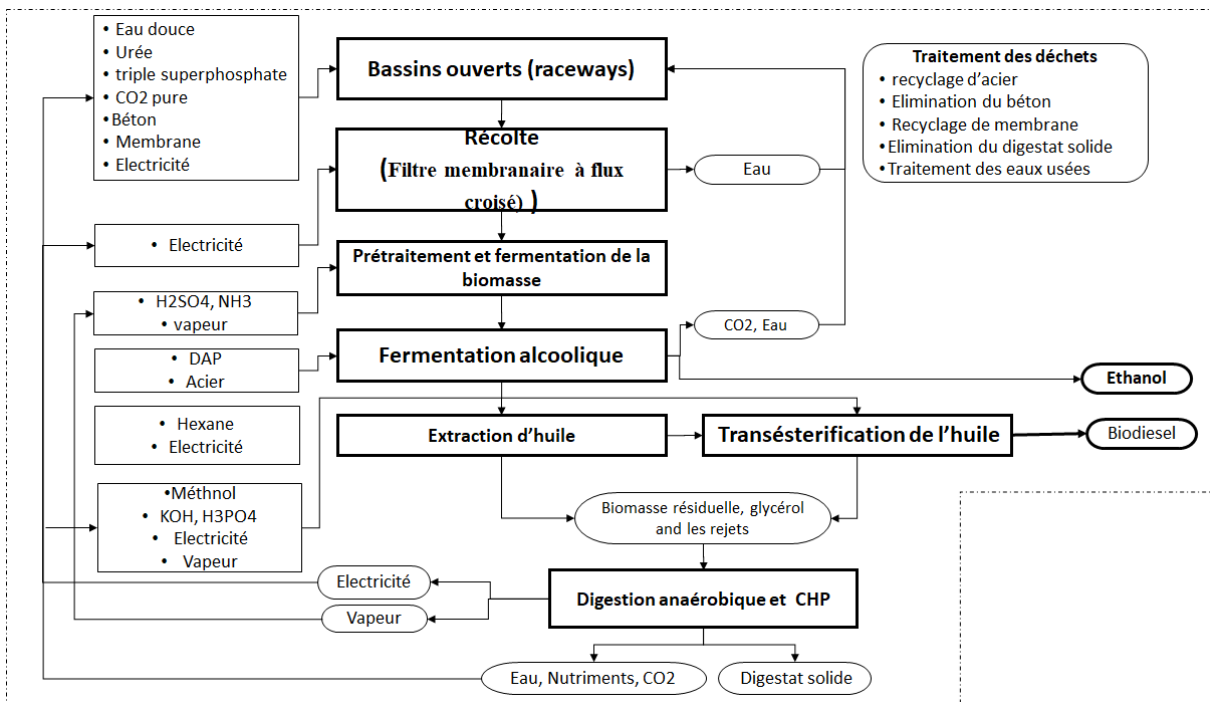


Figure 4. 8: Organigramme des processus de production du biodiesel microalgale

4.3. Analyse du cycle de vie : application au biodiesel

4.3.1 Définition du champ de l'étude et l'Unité Fonctionnelle (UF)

L'objectif principal de cette étude est l'évaluation des ressources locales en tant que matière première pour le développement d'une filière soutenable de production de biodiesel. Dans cette perspective, l'analyse du cycle de vie est utilisée pour l'évaluation de trois sources locales, à savoir les biodiesels issus des huiles de *Moringa oleifera*, de *Ricinus communis* et de *Chlorella vulgaris*. L'unité fonctionnelle utilisée dans cette étude est une tonne de biodiesel.

Cette analyse du cycle de vie est une étude prospective selon une approche attributive dont l'objectif est l'évaluation des sources de matières premières oléagineuses pour la production du biodiesel. Cette évaluation vise la quantification des performances potentielles de la filière de production du biodiesel, à savoir les bilans énergétiques, les émissions de carbone, et la catégorie de dommages sur la qualité des écosystèmes.

4.3.2 Limites du système et inventaire du cycle de vie

Dans une analyse du cycle de vie du biodiesel, les limites du système doivent être définies quand une voie de production est examinée. Les limites des systèmes permettent la détermination des différents processus unitaires à inclure dans le système sous investigation, assurant ainsi une comparaison juste et sensible des alternatives. Les limites du système considérées dans cette étude est du type *du Berceau à la pompe* (*Cradle to Gate* ou *Cradle to Wheel* utilisé dans le cas des carburants) en commençant par la production de la biomasse jusqu'au transport du biodiesel à la station de service. Les systèmes de production du biodiesel sont composés des sous-systèmes (SS) illustrés dans les figures 4.9, 4.10, 4.11, ci-dessous.

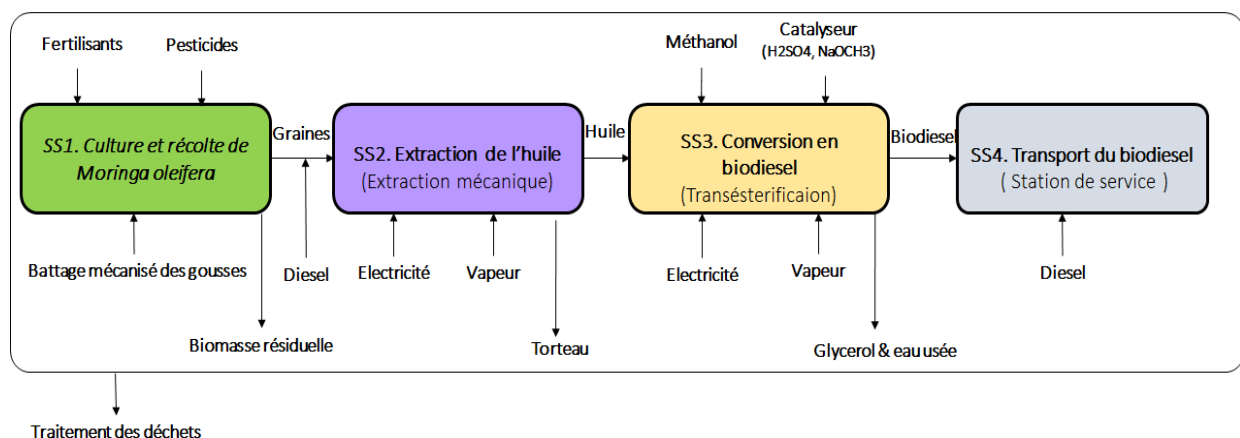


Figure 4. 9: Limites du système du cycle de vie de biodiesel de *M. oleifera*

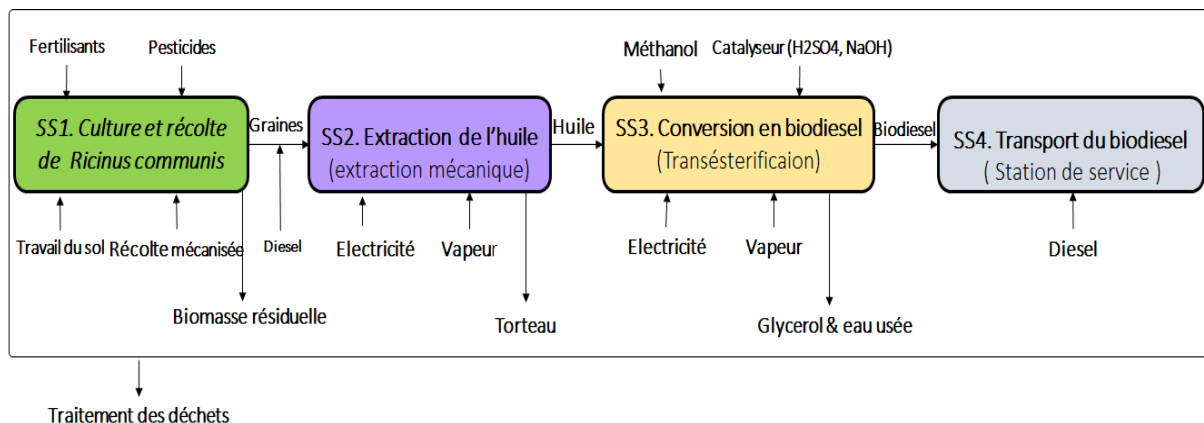


Figure 4. 10: Limites du système du cycle de vie du biodiesel de *R. communis*

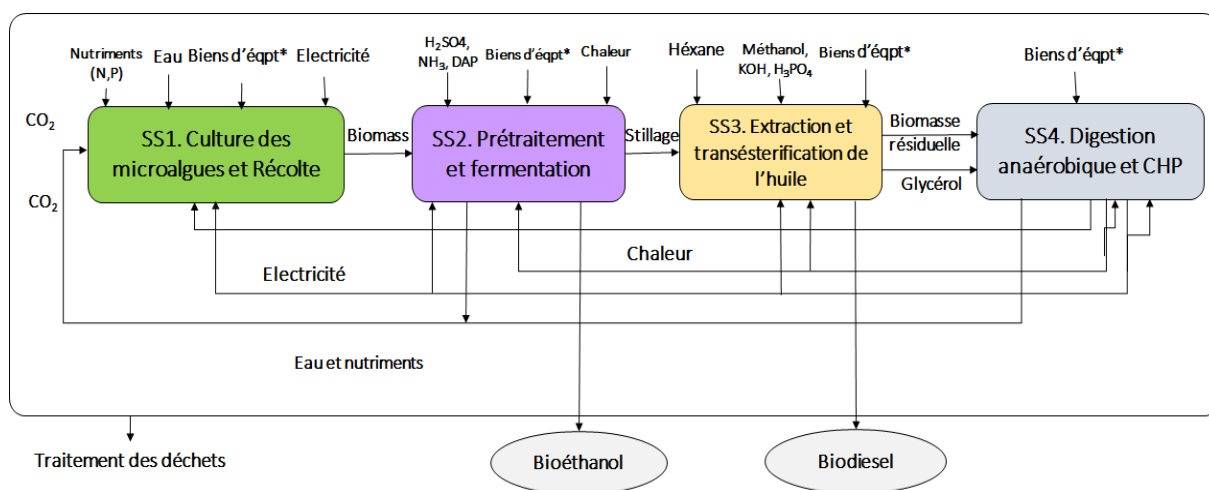


Figure 4. 11: Limites du système du cycle de vie de du biodiesel issu de *Chlorella vulgaris*

L'inventaire du cycle de vie est établi sur la base du bilan matière et énergie qui prenne en compte le CO₂, les nutriments et les flux énergétiques à travers l'ensemble des sous-systèmes de production rapportés à l'unité fonctionnelle. Pour les flux d'énergie et de matière sont rapportés pour une unité fonctionnelle de 1 t de biodiesel pour chaque source dans les tableaux 4.8, 4.9, 4.10.

L'inventaire du cycle de vie est basé sur les flux de matière et d'énergie traversant les limites du système de production tel est défini dans la description du système de production. L'élaboration de l'inventaire du cycle de vie s'est fait selon une approche itérative dans l'objectif de l'amélioration éventuelle de la qualité des données disponibles et pour combler les lacunes de données après réévaluation des objectifs de l'étude. Finalement, la durée de vie du système de production est estimée à 30 ans, néanmoins, la durée de vie du sous-système de culture est différente de celle du système de production et elle varie selon le type de culture (tableau 4.7).

Tableau 4. 7: Limites temporels et géographiques du système de production

Espèce	Limite temporel		
	<i>M. oleifera</i>	<i>R. communis</i>	<i>Ch. vulgaris</i>
Type de culture	Pérenne	Annuelle	Annuelle
Système de production	30	30	30
Sous-système de culture	15 ans	1 an	1 an
Limites géographiques	Algérie	Algérie	Algérie

La collection des données primaires est tirée principalement de la littérature scientifique particulièrement pour les intrants agronomiques durant les différentes phases de production des graines oléagineuses. Dans le cas de la production de la biomasse microalgale, les données de l'inventaire sont calculées et quantifiées après la configuration du système de culture en utilisant des formules établies et publiées dans la littérature scientifique.

En outre, pour la phase de conversion de l'huile en biodiesel, les données sont soit prises de la littérature en faisant prévaloir celles qui sont issues des installations industrielles, soit inspirées des études de simulation de la production du biodiesel à grande échelle basées sur les bilans matière et énergie. Ainsi, la vérification de la vraisemblance des données s'est faite en considérant les deux critères de crédibilité et de transparence qui sont des critères de base dans toute analyse de cycle de vie.

Le système de production du biodiesel microalgal prend en compte les biens d'équipement ainsi que l'infrastructure essentielle pour la construction des bassins de culture et le plastique pour le recouvrement des bassins. En outre, la construction des réacteurs de fermentation et la conversion de l'huile ainsi que les digesteurs de la méthanisation sont inclus dans les limites du système. La gestion de déchets et les différents effluents ainsi que les déchets de fin de vie des biens d'équipement et d'infrastructure sont aussi inclus.

Par ailleurs, les biens d'équipement pour la production du biodiesel issu de moringa et de ricin, ne sont pas pris en compte pour la phase de la culture, de transport, de conversion en biodiesel et sa distribution. En revanche, l'infrastructure des processus d'arrière-plan est prise en compte dans les limites du système de production.

Les données pour les processus d'arrière-plan sont prises de la base de données d'Ecoinvent V.3. Les processus unitaires d'arrière-plan comprennent le traitement des déchets ainsi que les ressources nécessaires pour la production des intrants chimiques.

4.3.3 Hypothèses de l'analyse du cycle de vie pour les biodiesels issus de moringa et de ricin

- 1- La source d'énergie est assurée par le réseau national dont l'énergie primaire est dominée par l'utilisation du gaz naturel pour la génération de l'électricité.
- 2- L'utilisation des fertilisants chimiques et les pesticides où les données d'arrière-plan sont prises de l'Ecoinvent V. 3.
- 3- La mécanisation de la récolte et battage des graines oléagineuses pour la culture de moringa et de ricin.
- 4- Le système de culture des espèces oléagineuses se fait dans des conditions de culture pluviale.
- 5- Le transport des intrants chimiques se fait par voie routière. La distance de transport depuis le fournisseur au site de la culture et l'unité de conversion est supposée de ne pas dépasser 100 km. Le transport se fait par l'utilisation des camions de transport dont les émissions sont prises de l'Ecoinvent v.3.
- 6- L'application des engrais et la pulvérisation des pesticides sont prises en considération. La consommation d'énergie y afférente est prise de l'Ecoinvent v3.

4.3.4 Hypothèses retenues pour la production et la conversion de la biomasse microalgale

- 1- Le système de culture à ciel ouvert est utilisé sous des conditions normales sans stress d'azote ;
- 2- Le système de culture est à proximité d'une installation de gaz naturel pour la fiabilité de l'approvisionnement en CO₂ issu de la décarbonatation du gaz naturel ;
- 3- La récolte se fait par l'utilisation de la technologie de filtration membranaire à flux croisé développé par la société Global Algae Innovation. Cette technologie présente la meilleure efficacité énergétique et elle est évolutive.
- 4- La conversion de la biomasse se fait par le traitement combiné de la biomasse microalgale pour la production de biodiesel et bioéthanol, développé et démontré à l'échelle pilote par NREL.
- 5- La demande en électricité nécessaire pour le fonctionnement de la culture est assurée par le réseau national avec de l'électricité générée essentiellement dans des centrales alimentées au gaz naturel ;
- 6- Le CO₂ généré par la digestion anaérobique est recyclé vers la culture des microalgues ;
- 7- Le système d'inoculation pour la phase de la culture et la phase de la fermentation alcoolique, n'est pas prise en considération dans l'inventaire vue sa contribution marginale en matière de consommation énergétique ;
- 8- L'infrastructure essentielle est incluse dans l'inventaire en l'occurrence le béton, le plastique pour le système de la culture et l'acier inoxydable pour la construction des réacteurs de fermentation alcoolique et de production du biodiesel et des digesteurs anaérobiques ;
- 9- Le transport des intrants chimiques (fertilisants, réactifs) et les biens d'équipement sont pris en considération dans l'inventaire du cycle de vie ;
- 10- La durée de vie du système de production est de 30 ans.

Tableau 4. 8 : Inventaire du cycle de vie de biodiesel de *Moringa oleifera* par UF

Intrants	Unité	Quantité
Technosphère		
Herbicide (SS1) (Biswas and Rosano, 2009)	kg	2,66
Insecticide (SS1) (Biswas and Rosano, 2009)	kg	3,03
Azote (SS1) (Adebayo et al., 2017)	kg	30,00
Phosphore (SS1) (Adebayo et al., 2017)	kg	30,00
Potassium (SS1) (Adebayo et al., 2017)	kg	30,00
Diesel (SS1) (Biswas and Rosano, 2009)	kg	74,70
Electricité (SS1) (Biswas and Rosano, 2009)	kWh	60,00
Transport (SS1)	tkm	28,10
Transport (SS2)	tkm	1.00 E+02
Electricité (SS2) (Kalaivani et al., 2014)	kWh	68,20
Chaleur (SS2) (Kalaivani et al., 2014)	MJ	5,94E+02
Méthanol (SS3) (Drapcho et al., 2008), (Rashid et al., 2008)	kg	79,20
Acide sulfurique H ₂ SO ₄ (SS3) (Drapcho et al., 2008), (Rashid et al., 2008)	kg	12,00
NaOCH ₃ (SS3) (Drapcho et al., 2008), (Rashid et al., 2008)	kg	12,00
Electricité (SS3) (Kalaivani et al., 2014)	kWh	3,95
Chaleur (SS3) (Kalaivani et al., 2014)	MJ	3,01 E+03
Transport (SS3)	tkm	10,32
Transport (SS4)	tkm	2 E+02
Outputs		
Produits		
Biodiesel	kg	1E+03
Gestion des déchets		
Traitement des eaux usées (SS3)	L	2 E+02

Tableau 4. 9 : Inventaire du cycle de vie de biodiesel de *Ricinus communis* par UF

Intrants	Unité	Quantité
Technosphère		
Herbicide (SS1) (Koutroubas et al., 1999)	kg	1,2
Insecticide (SS1) (Koutroubas et al., 1999)	kg	35,02
Azote (SS1) (Brigham, 1993)(Labalette et al., 1996)	kg	50
Phosphore (SS1) (Brigham, 1993)(Labalette et al., 1996)	kg	48
Potassium (SS1) (Brigham, 1993)(Labalette et al., 1996)	kg	19
Travail du sol (SS1) (Kitani, 1999)	MJ	1,85E+03
Hersage du sol (SS1) (Kitani, 1999)	MJ	131,60
Récolte (SS1)	MJ	123,20
Transport (SS1)	tkm	36,95
Electricité (SS2) (Kalaivani et al., 2014)	kWh	68,20
Chaleur (SS2) (Kalaivani et al., 2014)	MJ	59,87
Transport (SS2)	tkm	26,10
Méthanol (SS3)	kg	79,20
Acide sulfurique H2SO2	kg	12
NaOH	kg	12
Electricité (SS3) (Kalaivani et al., 2014)	kWh	3,95
Chaleur (SS3) (Kalaivani et al., 2014)	MJ	3,01 E+03
Transport (SS3)	tkm	10,31
Transport (SS4)	tkm	100,00
Outputs		
Produits		
Biodiesel	t	1,00
Gestion des déchets		
Traitement des eaux usées (Transésterification)	L	200,00

Tableau 4. 10: Inventaire du cycle de vie du biodiesel microalgale par UF

Intrants	Unité	Quantité
Technosphère		
CO ₂ (SS1)	t	7,59
N_Urée (SS1)	t	0,42
P ₂ O ₅ _Triple phosphate (SS1)	t	0,10
Acide sulfurique H ₂ SO ₄ (SS2)	t	0,14
Ammonium (SS2)	t	0,05
DAP (SS2)	t	6,07E-03
Hexane (SS3)	t	6,07E-03
Méthanol (SS3)	t	0,14
Catalyseur KOH (SS3)	t	4,37E-03
Acide phosphorique H ₃ PO ₄ (SS3)	t	2,55E-03
Eau (SS1)	t	4,97E+02
Bloc de béton (SS1)	t	0,16
Liner (Polypropylène chloré) (SS1)	t	0,11
Acier pour réacteurs (SS2)	t	0,08
Acier pour réacteurs (SS3)	t	0,02
Acier pour réacteurs (SS4)	t	0,18
électricité net (SS1)	kWh	1,67E+03
Chaleur (SS2)	MJ	3,88E+03
Outputs		
Produits		
Biodiesel	t	1,00
Bioéthanol	t	0,43
Gestion des déchets		
Solides à la décharge		0,16
Recyclage des Solides	t	0,38
Traitement de digestat solide	t	0,18
Traitement des eaux usées (Digestat liquide)	t	1,19

4.3.4 Méthodologie d'allocation

Le système de production de biocarburant algal retenu génère à la fois du biodiesel et du bioéthanol. Il s'agit donc d'un système de production multifonctionnel. Par conséquent, l'application d'une méthode d'allocation est nécessaire afin de répartir l'inventaire du cycle de vie ainsi que les impacts environnementaux qui en découlent. Dans ce contexte, une allocation énergétique est appliquée dans notre étude.

Dans le cas de la production du biodiesel de moringa et de ricin, l'allocation se fait sur la base de la teneur énergétique, exprimée en PCI, vu que le système de production est multifonctionnel où une partie importante de la biomasse produite est considérée comme une biomasse résiduelle, qui est valorisée sous d'autres formes de produit à valeur économique. La teneur énergétique du biodiesel issue de l'huile de ricin est estimée à 43.000 MJ/t (Panwar et al., 2010). De même, le pouvoir calorifique inférieur du biodiesel de *M. oleifera* est estimé à 39.500 MJ/t (Ramírez-Verduzco et al., 2012). Dans le cas du biodiesel de moringa et de ricin, deux approches d'allocation et sans allocation sont utilisées dans notre étude, l'objectif étant de mettre en exergue l'importance de la diversification des produits du système de production de biodiesel par l'utilisation des espèces énergétiques pour la production de produits à valeur économique ou de produits énergétiques, en l'occurrence de la production du biogaz dans le cas où la biomasse résiduelle n'est pas convenable pour être utilisée pour l'alimentation.

Dans le cas de l'allocation, les données de l'inventaire du cycle de vie sont allouées sur la base de la teneur énergétique de la biomasse produite vu que seulement une partie de celle-ci est exploitée pour la production du biodiesel. Les facteurs d'allocation sont mentionnés dans le tableau 4.11 (Collet et al., 2014). L'allocation se fait sur la base de la teneur énergétique des différents biodiesels produits et leur contribution dans la production. Les facteurs d'allocation dans le cas du biodiesel algal et de bioéthanol sont calculés sur la base d'une teneur énergétique de 38400 MJ/UF et 12504 MJ/UF, respectivement. Pour la digestion anaérobique et le sous-système CHP, les facteurs d'allocation sont attribués à la production de la chaleur et d'électricité selon, prenant en compte la qualité de l'énergie, avec des facteurs de 70% et 30%, respectivement.

Tableau 4. 11: Facteurs d'allocation selon la teneur énergétique

	M. oleifera	R. communis	C. vulgaris
PCI Biodiesel (MJ/t)	43000	39500	38400
PCI Bioéthanol (MJ/t)	-	-	12504
PCI Biomasse résiduelle (MJ/t biodiesel)	28960,53	44356,37	-
Energie totale	71960,53	83856,37	-
Facteur d'allocation (%)			
Biodiesel	59,75	47,10	75,44
Biomasse résiduelle	40,25	52,90	-
Bioéthanol	-	-	24,56

4.3.5 Implémentation de l'inventaire et Evaluation des impacts du cycle de vie

Une fois l'inventaire du cycle de vie établi pour les trois systèmes sous investigation, les données sont implémentées dans le code de calcul dédié à l'analyse du cycle de vie. A cet effet, nous avons utilisé le code commercial SimaPro version 8.0.3, 2014, développé par la firme PRé Sustainability qui est un outil de choix dédié pour les analyses de cycles de vie. Cet outil puissant permet d'estimer les impacts environnementaux en tenant en compte de tous les intrants directs et indirects impliqués tout au long du cycle de vie du système étudié. Les résultats obtenus sont ensuite interprétés selon l'objectif, le champ de l'étude et les limites du système ainsi que les catégories d'impact qui sont pris en considération dans les étapes antérieures.

En outre, il existe plusieurs méthodes d'évaluation d'impacts disponibles dans le code Simapro8. Dans notre étude, la méthodologie d'évaluation du cycle de vie utilisée est celle de CML-IA développée par le Center of Environmental Science (CML) de l'Université de Leiden aux Pays-bas. Cette méthodologie comprend un ensemble de catégories d'impact, plus particulièrement l'épuisement des ressources abiotiques (Extraction des minéraux et Energie fossile, le Potentiel de réchauffement global, l'Acidification et l'Eutrophisation. Le tableau 4.12 ci-dessous donne une description des catégories d'impact évaluées par la méthodologie CML (Jolliet et al., 2010).

Néanmoins, Il faut souligner que ces méthodes d'analyse n'indiquent pas que les impacts réels seront observés dans l'environnement en raison du cycle de vie du produit ou du procédé à l'étude, mais seulement qu'il existe un lien potentiel entre le cycle de vie du produit ou du processus et les impacts (Klöpffer and Grahl, 2014).

Tableau 4. 12: Catégories d'impact de la méthodologie CML-IA (Jolliet et al., 2010).

Catégorie d'impact	Description
Epuisement des ressources abiotique (minéraux et énergie)	Elle comprend l'énergie nécessaire pour l'extraction des minerais ainsi que l'énergie fossile consommée par les différents processus de production tout au long du cycle de vie du système production.
Potentiel de réchauffement global (GWP100)	Facteur de conversion permettant de comparer l'effet sur le climat de chaque gaz à effet de serre, en référence au CO ₂ .
Acidification	Phénomène correspondant à l'augmentation de la concentration des ions H ⁺ , provenant de HNO ₃ ou H ₂ SO ₄ dérivés des gaz NO _x et SO ₂ , dans les eaux, entraînant une baisse du pH. Cette acidification entraîne la dissolution de certains métaux toxiques comme l'aluminium.
Eutrophisation	Enrichissement excessif d'un milieu aquatique en éléments nutritifs (N, P) ou en matière organique, provoquant un développement surabondant de la biomasse végétale dont la décomposition ultérieure consomme, en partie ou en totalité, l'oxygène dissous dans l'eau réduisant ainsi la biodiversité du milieu aquatique.

4.3.6 Intensité carbone (CO₂eq/MJ)

La réduction des émissions de CO₂ est un paramètre clé dans la promotion et le développement des biocarburants. La réduction ou l'économie d'émissions en gaz à effet de serre est exprimé en émission de CO₂ équivalent (CO₂eq) qui inclut les émissions de CH₄ et NO_x.

Le calcul de ce paramètre se fait selon la Directive Européenne sur les Energies Renouvelables RED 2009, où une comparaison avec le gazole est faite en utilisant l'intensité carbone de référence indiquée dans la même directive (83,8 gCO₂eq/MJ d'énergie fossile) (RED, 2009).

$$CO_{2eq} = \frac{Emission_{DF} - Emission_{BD}}{Emission_{DF}} \times 100 \quad (1)$$

DF: Diesel fossile (gazole)

BD: Biodiesel

4.3.7 Efficacité énergétique (MJ/MJ Biodiesel)

L'intensité énergétique du système de production doit avoir un bilan énergétique positif qui est exprimé par l'intensité énergétique. Elle est déterminée par le rapport entre le rendement énergétique ou (Energie_{Output}) et l'énergie consommée (Energie_{Input}) par le système de production sous investigation (Firrisa et al., 2014). L'estimation de l'intensité énergétique se fait sur la base du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du biodiesel issu des différentes biomasses oléagineuses.

$$EROEI = \frac{Energie_{Output}}{Energie_{Input}} \quad (2)$$

4.3.8 Catégorie de dommage sur la qualité des écosystèmes

Les catégories de dommage sur la qualité des écosystèmes comprennent un ensemble de catégories d'impacts intermédiaires (*midpoint categories*) dont la pertinence est liée aux types de polluant inclus dans l'inventaire. Dans ce contexte, l'eutrophisation et l'acidification sont les deux catégories intermédiaires qui sont retenues dans la présente étude pour servir de comparaison des sources de biodiesel sous investigation. Par ailleurs, les deux indicateurs intermédiaires d'acidification et d'eutrophisation, retenus pour la qualité des écosystèmes, sont liés pertinemment aux émissions de NO_x, de SO₂ et des éléments nutritifs (N, P).

4.3.9 Comparaison de performances du biodiesel vs gazole

Dans ce travail, une comparaison, entre les performances des biodiesels issus des trois matières premières végétales et le, a été réalisé gazole. Cette comparaison est basée sur les teneurs énergétiques des biodiesels et du gazole. Toutefois, le biodiesel produit est destiné à être utilisé en mélange, et de préférence pour des applications locales comme le transport dans le secteur agricole, et ce en vue de réduire les charges environnementales et d'assurer une certaine forme d'autonomie énergétique. Le système de production du gazole est pris dans la base de données d'Ecoinvent v3. La comparaison est étendue aux autres catégories d'impacts retenus pour le système de production.

4.3.10 Comparaison des performances du biodiesel selon la source dont il est issu

Dans cette étude, une comparaison de performances du biodiesel selon les trois sources de matières premières a été faite dans le but de comparer les gains environnementaux de chaque source d'une part, et, d'autre part, d'établir les futures promesses et défis de chaque filière selon une approche prospective. Par ailleurs, l'étude comparative s'articule essentiellement sur l'intensité carbone, l'intensité énergétique et les impacts sur la qualité des écosystèmes.

Chapitre 5

Résultats et discussion

Chapitre 5 : Résultats et discussion

5.1 Caractérisation environnementale des systèmes de production de biodiesel

5.1.1 Système de production de biodiesel de *Moringa oleifera*

La caractérisation environnementale du système de production de biodiesel à partir de l'huile de *Moringa oleifera* est étudiée selon l'approche du cycle de vie de toute la chaîne de valeur de la production. Par ailleurs, la contribution spécifique pour chaque sous-système aux impacts environnementaux de catégories d'impacts intermédiaires (*Mid-point*) est présentée sur la figure 5.1 ci-dessous. Cette caractérisation comprend les catégories d'impact d'épuisement des ressources naturelles non renouvelables pour matériaux (ERNRm), la Demande Cumulative d'Énergie (DEC), le Potentiel du Réchauffement Global (PRG), le Potentiel d'Acidification (PA) et le Potentiel d'Eutrophisation (PE).

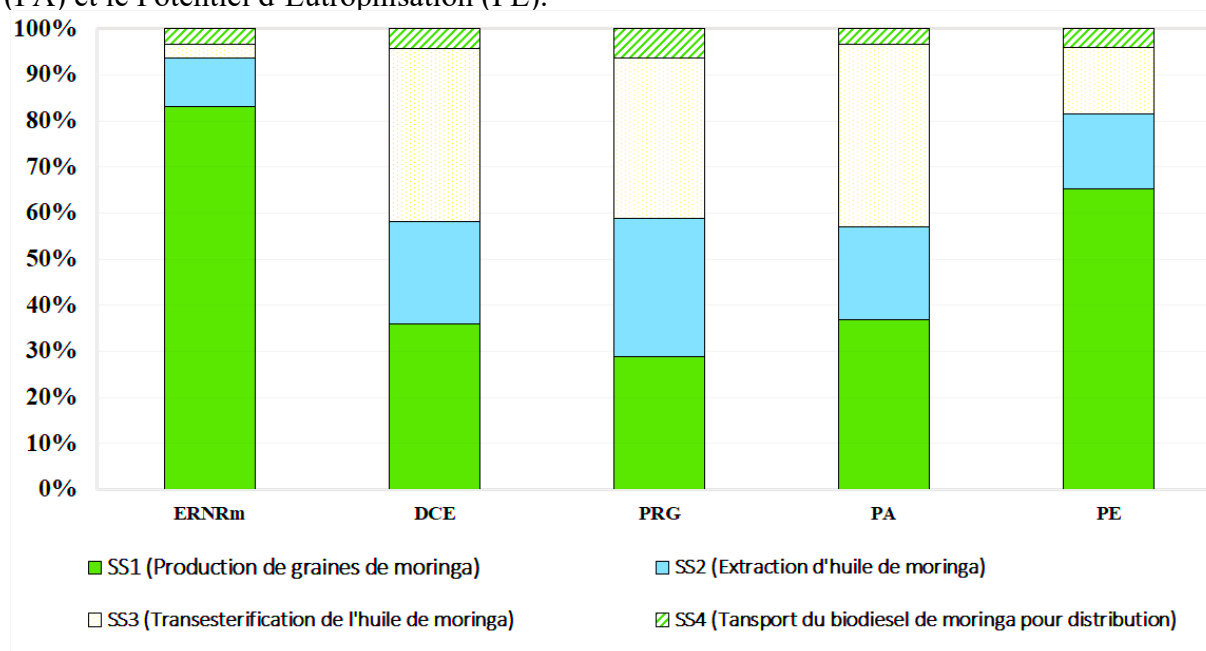


Figure 5. 1: Contribution des sous-systèmes de production aux impacts du cycle de vie du biodiesel de *Moringa oleifera*

Selon la figure 5.1, le sous-système de la production de graines de moringa (SS1) est la phase qui contribue le plus aux catégories d'impact de l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables (ERNRm) et le potentiel d'eutrophisation (PE) avec des contributions de 83 % et 65 % respectivement. Pour les autres catégories d'impact, sa contribution est de 36 % (DCE), 29 % (PRG) et 37% (PA).

D'autre part, le sous-système (SS3) de transestérification de l'huile présente aussi des contributions significatives aux différentes catégories d'impact avec une contribution de 37 % (DCE), 35 % (PRG) et 40 % (PA).

Le sous-système (SS2) d'extraction mécanique de l'huile de *Moringa oleifera* montre des contributions aux catégories d'impacts de 22 % (DCE), 30 % (PRG) et 20 % (PA).

Finalement, le sous-système (SS4) le transport du biodiesel pour la distribution contribue de manière marginale aux catégories d'impact du système de production avec une contribution qui ne dépasse pas 6 % pour toutes les catégories d'impacts tout au long du cycle de vie.

5.1.1.1. Contribution des processus aux catégories d'impact du cycle de vie du biodiesel de *Moringa oleifera*

Cette section identifie les différents processus spécifiques se trouvant derrière chaque catégorie d'impact du système de production tout au long du cycle de vie. La figure 5.2 ci-dessous montre la contribution des différents processus aux catégories d'impact du système de production du biodiesel issu de l'huile de *Moringa oleifera*.

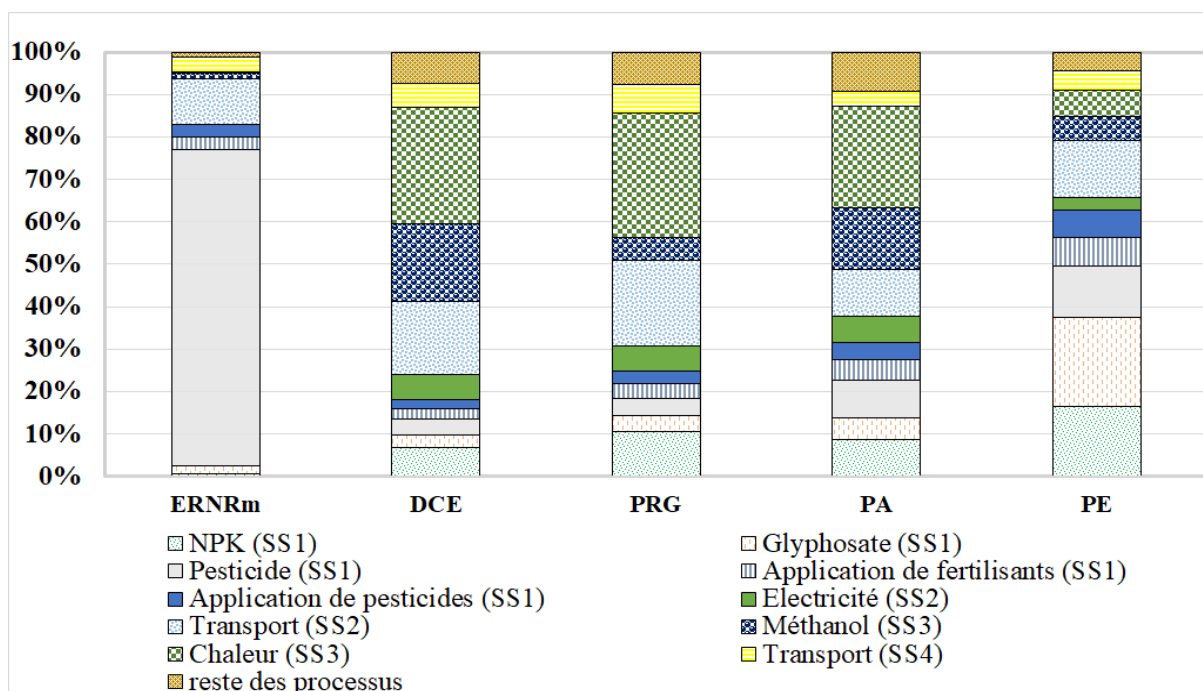


Figure 5. 2: Contribution des processus de production du biodiesel issu de *M. oleifera* aux catégories d'impact

Le processus Chaleur (SS3), montre une contribution très importante dans les trois catégories d'impact à savoir : le DCE, PRG, et PA. La demande en chaleur est nécessaire pour l'extraction mécanique et la transestérification de l'huile en biodiesel.

Le processus du transport (SS2) contribue aussi significativement dans les catégories d'impact ERNRm, DCE, PRG, PE, PA. Ceci est dû principalement à l'utilisation de diesel fossile pour le transport de graines de *Moringa oleifera* jusqu'au site de transformation pour la production du biodiesel.

L'utilisation du méthanol pour la transestérification, Méthanol (SS3), présente une contribution plus importante pour les catégories d'impact DCE et PA. Le méthanol utilisé est d'origine fossile et tous les processus d'arrière-plan pour sa production consomment beaucoup d'énergie.

L'utilisation de fertilisants chimiques durant la croissance de la culture, NPK (SS1), est à l'origine des impacts ERNRm, DCE, PRG, PA et PE. En outre, l'utilisation de pesticides et le glyphosate contribuent plus particulièrement aux catégories ERNRm et EP, respectivement.

5.1.2. Système de production de biodiesel de *Ricinus communis*

La caractérisation environnementale du système de production de biodiesel à partir de l'huile de *Ricinus communis* est étudiée selon l'approche du cycle de vie de toute la chaîne de valeur de la production. Par ailleurs, la contribution spécifique pour chaque sous-système aux impacts environnementaux de catégories d'impacts intermédiaires (*Mid-point*) est présentée sur la figure 5.3 ci-dessous. Cette caractérisation comprend les catégories d'impact en matière de l'Épuisement des Ressources naturelles Non Renouvelables pour matériaux et énergie (**ERNRm, DCE**), le Potentiel du Réchauffement Global (**PRG**), le Potentiel de l'Acidification (**PA**) et le Potentiel d'Eutrophisation (**PE**).

Selon la figure 5.3, le sous-système de production de graines de ricin (SS1) est la phase dominante pour les catégories d'impact pour l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables (ERNRm) et Potentiel d'eutrophisation (PE) avec des contributions de 98 % et 89 %, respectivement. Ses contributions aux autres catégories d'impact sont de 51 % (DCE), 59 % (PRG), et 72% (PA).

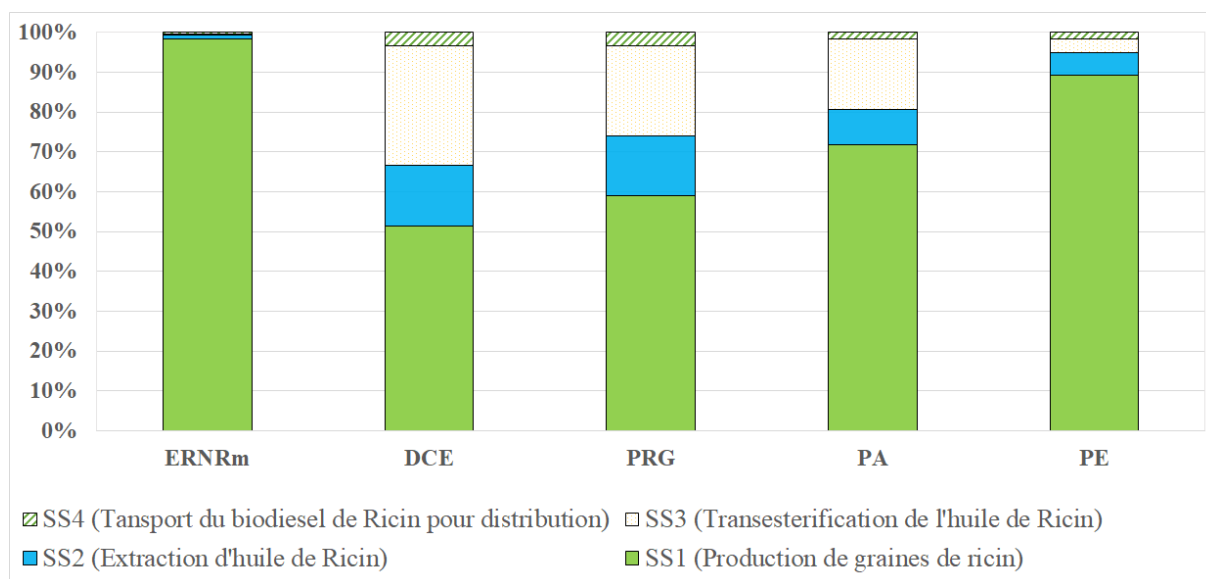


Figure 5. 3: Caractérisation environnementale du système de production de biodiesel issu de l'huile de *R. communis*

Le sous-système Transestérification de l'huile (SS3) contribue principalement aux catégories d'impact DCE, PRG et PA, avec des pourcentages de 30 %, 23 % et 18 %, respectivement.

Finalement, le sous-système d'Extraction de l'huile (SS2) contribue principalement aux catégories d'impact de la demande cumulative en énergie DCE, potentiel de réchauffement global (PRG) et potentiel d'acidification (PA) avec des contributions de 15 %, 15% et 9 %, respectivement.

5.1.2.1. Contribution des processus aux catégories d'impact

Le système de production du biodiesel issu de l'huile de *Ricinus communis* est dominé par l'utilisation des pesticides durant la phase de culture et contribue diversement dans la plupart des catégories d'impact sous investigation (figure 5.4). Ce processus (Pesticides (SS1)) contribue fortement à l'épuisement des ressources en matériaux (ERNRm) suivi par sa contribution pour PE, PA, PRG et le DCE. Ceci est expliqué par les différentes consommations de ressources nécessaires aux processus d'arrière-plan pour la production des pesticides et les émissions qui en découlent.

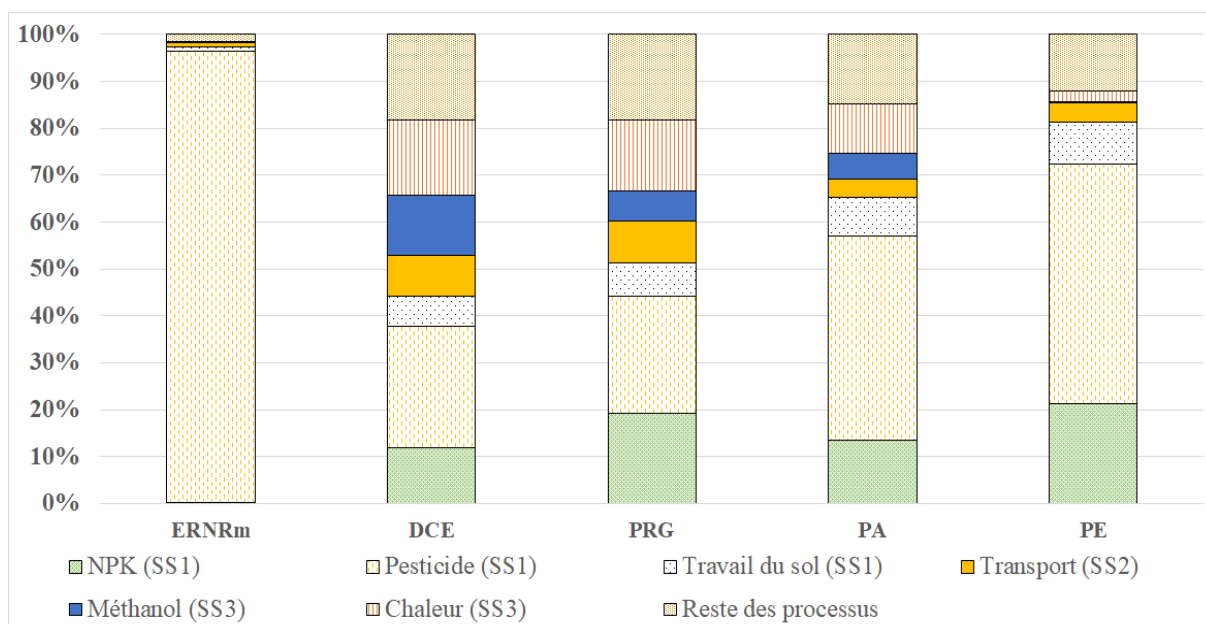


Figure 5. 4: Contribution des processus aux catégories d'impact du biodiesel de *R. communis*.

Le processus Chaleur (SS2), montre une contribution très importante dans trois catégories d'impact à savoir, DCE, PRG et PA. La demande en chaleur est nécessaire pour l'extraction mécanique. En outre, la source de chaleur est d'origine fossile, le gaz naturel étant utilisé pour la génération de la vapeur surchauffée.

L'utilisation des fertilisants chimiques, NPK (SS1) est le troisième processus qui contribue aux catégories d'impacts PE, PRG, PA et DCE. Ces impacts potentiels sont dus essentiellement aux processus d'arrière-plan de leur production qui implique une consommation d'énergie fossile et des émissions de CO₂. Les impacts potentiels d'eutrophisation et d'acidification sont dus à l'accumulation des nutriments (N, P) dans le milieu naturel et aux émissions de NO_x et de SO₂ lors de la production de ces fertilisants.

En fin, les processus Méthanol (SS3), Transport (SS2) et travail du sol (SS1) contribuent aux catégories d'impact DCE et PRG. Ceci est dû principalement à l'utilisation de diesel fossile pour le travail du sol et le transport de graines de ricin jusqu'au site de transformation ainsi que l'utilisation de méthanol lors de l'estérification de l'huile.

5.1.3. Système de production de biodiesel de *Chlorella vulgaris*

La caractérisation environnementale du système de production de biodiesel à partir de *Chlorella vulgaris* est étudiée selon l'approche du cycle de vie de toute la chaîne de valeur de la production. La contribution spécifique de chaque sous-système aux impacts environnementaux pour toutes les catégories est illustrée sur la figure 5.5 ci-dessous.

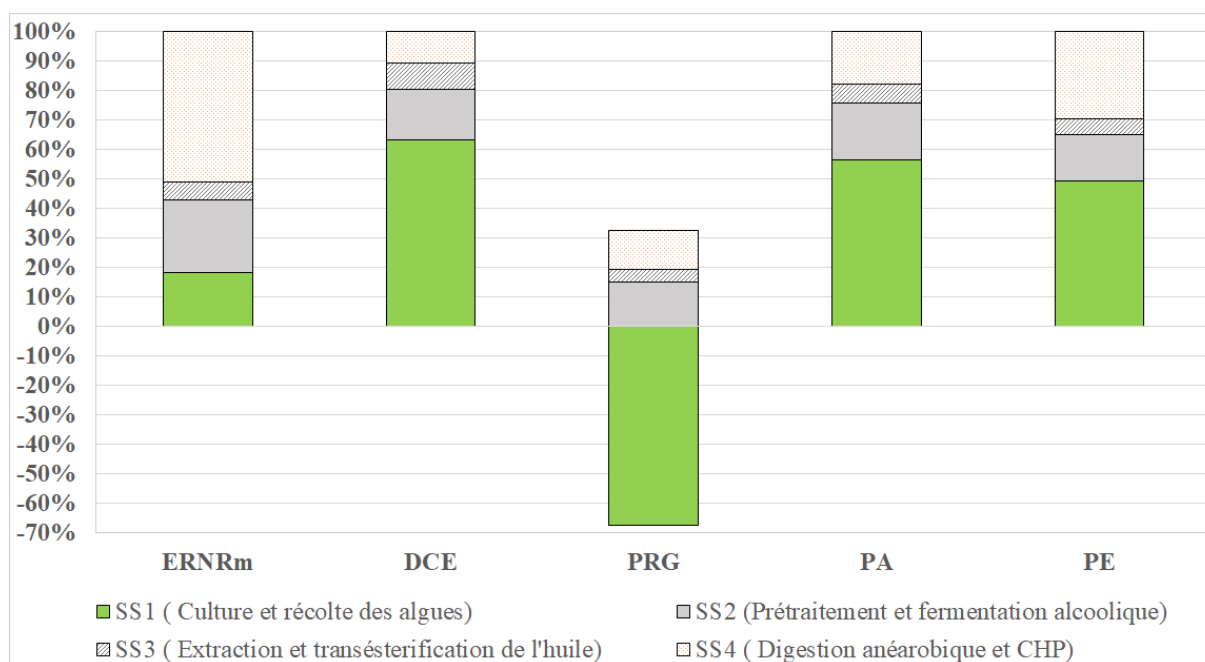


Figure 5. 5: Contribution des sous-systèmes de production du biodiesel de *Chlorella* aux catégories d'impacts environnementaux

Le sous-système culture et récolte (SS1) présente la contribution la plus importante pour toutes les catégories de dommages avec une contribution à la consommation des ressources abiotiques non renouvelables à savoir, matériaux et énergie fossile, au potentiel du réchauffement global, à l'acidification et à l'eutrophisation avec des contributions respectives de 19% ERNRm, 64% DCE, -67 % PRG, 56% AP et 50% PE.

De plus, le sous-système prétraitement et fermentation (SS2) présente aussi une contribution importante à toutes les catégories d'impact avec des contributions qui varient respectives de 29 % ERNRm, 17 % DCE, 15 % PRG, 19 % PA et 29 % PE.

Le sous-système digestion anaérobique et CHP (SS4) présente des contributions à hauteur de 51% (ERNRm) et 29% (PE).

Finalement, le sous-système extraction et transestérification de l'huile montre une contribution inférieure à 9% pour toutes les catégories d'impacts.

Les résultats obtenus dans cette étude sont en accord avec ceux d'études rapportés dans la littérature scientifique (Dutta et al., 2016) et (Mu et al., 2017). Par ailleurs, l'étape de la culture contribue à hauteur de 50 à 60 % à la demande totale de l'énergie fossile utilisée notamment pour l'agitation, la récolte et la recirculation de l'eau dans le système de culture. Ces résultats sont en accord avec l'analyse réalisée pour la production à grande échelle de biodiesel à partir de microalgues (Rogers et al., 2014).

5.1.3.1. Contribution des processus aux catégories d'impact

La figure 5.6 ci-dessous montre les processus contribuant aux différentes catégories d'impacts pour la fabrication de biodiesel à partir de la chlorelle. La production d'acier est à l'origine des impacts ERNRm, PA et PE, dus à l'infrastructure nécessaire aux sous-systèmes SS2 et SS4 pour la construction des réacteurs. La production de l'électricité nécessaire dans le sous-système SS1 est la source des impacts DCE et PE. L'électricité est utilisée pour l'agitation de la culture des microalgues dans les bassins à ciel ouvert, la compression de CO₂ utilisé pour la production de la biomasse algale, l'énergie nécessaire pour le pompage de l'eau durant la récolte des algues ainsi que la recirculation de l'eau après la récolte et l'énergie consommée durant la culture.

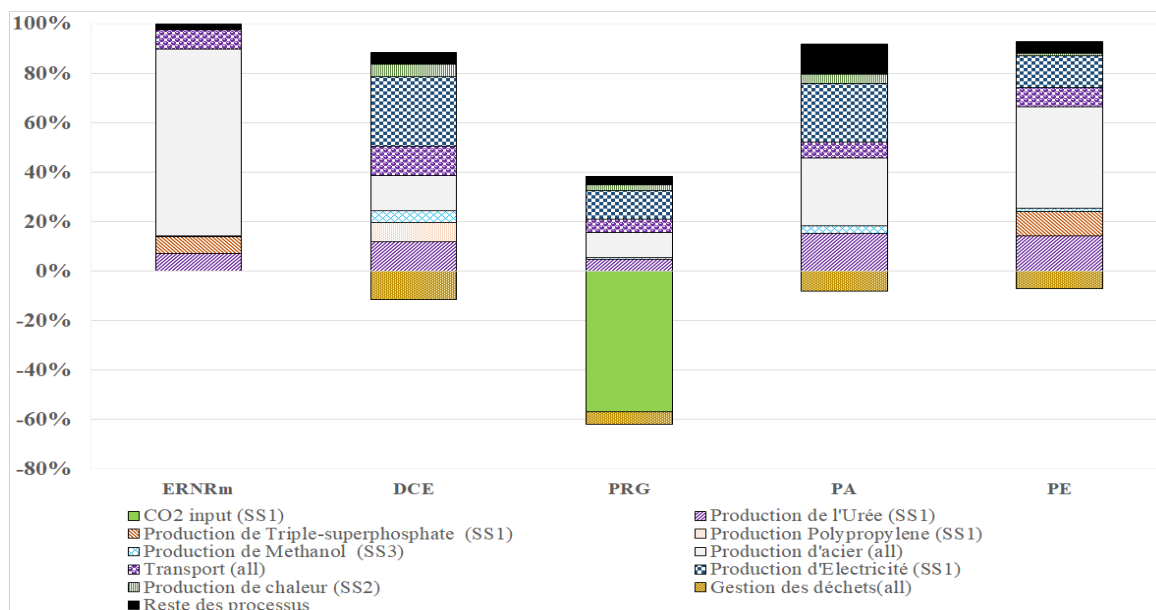


Figure 5. 6: Contribution des processus de production aux catégories d'impact du biodiesel de *Chlorella vulgaris*

La production de l'urée ajoute une contribution significative du sous-système SS1 aux impacts DCE, AP et PE. L'urée est utilisée comme engrais pour la croissance de la biomasse algale. Par ailleurs, le transport contribue aussi pour tous les impacts en raison de la longue distance de transportation des intrants chimiques et les matériaux nécessaires pour la culture des microalgues et l'installation de transformation.

Enfin, les processus résiduels comme la production du méthanol (SS3), la production de chaleur (SS2), la production de polyéthylène, contribuent marginalement aux différentes catégories d'impacts.

D'une manière générale, les impacts des différentes étapes du cycle de vie du système de production du biodiesel pourraient être classés dans l'ordre d'importance décroissant suivant : le processus de production de l'électricité, la production de l'acier nécessaire pour les réacteurs et les bio-digesteurs des sous-systèmes SS2 et SS4 et la production de l'urée pour le sous-système SS1. De surcroît, le transport pourrait contribuer plus fortement aux impacts environnementaux dans le cas où la distance de transport des intrants est longue.

L'absorption de CO₂ dans le sous-système SS1 est le seul processus qui contribue positivement à l'impact PRG. Ceci est dû au fait que les microalgues utilisent le CO₂ durant leur croissance. Les principales sources d'émissions sont dues à l'utilisation de l'énergie fossile durant la culture des microalgues pour l'agitation, la récolte et la recirculation de l'eau dans le système de production.

La deuxième source d'émission de CO₂eq est la production de l'acier nécessaire pour la construction des réacteurs. La production de l'urée contribue également aux émissions de CO₂eq.

La production de chaleur contribue marginalement aux émissions de CO₂ vue que la génération de la chaleur se fait dans le système de production par valorisation de la biomasse résiduelle (digestion anaérobique/CHP).

5.2. Contextualisation de l'analyse du cycle de vie du biodiesel selon la source

Dans l'objectif de situer notre étude, une comparaison des impacts du potentiel de Réchauffement Global (PRG) et la Demande Cumulative en Energie (DCE) avec ceux rapportés dans d'autres études récentes est faite, tout en prenant en compte les grandes disparités des systèmes de production de biocarburants issus de la biomasse algale. Les résultats obtenus dans cette étude sont comparés sur la base d'une approche *du Berceau à l'usine* (Cradle to gate). Le PRG et l'efficacité énergétique sont rapportés en gCO₂eq/MJ et MJ/MJ de l'énergie produite par le système.

5.2.1 Intensité carbone (CO₂eq/MJ)

Les émissions de CO₂eq sont les principales catégories d'impact considérées pour l'analyse d'impact du cycle de vie des biocarburants vue leur impact sur le potentiel du réchauffement global. A cet égard, les émissions en CO₂eq tout au long des étapes du cycle de vie sont évaluées pour le biodiesel de l'huile de *Moringa oleifera* et l'huile de *Ricinus communis*. Ainsi, le biodiesel de l'huile de *Moringa oleifera* présente une valeur de 21,28 gCO₂eq/MJ de biodiesel. Le biodiesel de l'huile de *Ricinus communis* présente une valeur plus élevée : 35,89 gCO₂eq/MJ de biodiesel.

La production du biodiesel de l'huile de soja présente une intensité en carbone de 100,65 gCO₂eq/MJ de biodiesel. Cette valeur est influencée principalement par le rendement faible en huile qui est de 549,64 kg/ha (Rajaeifar et al., 2014). Dans une autre étude d'analyse du cycle de vie du biodiesel de l'huile de soja, l'intensité de carbone varie entre 37 et 134 gCO₂eq/MJ de biodiesel, la source de variations étant due à la distance du transport et la méthode d'allocation (Castanheira et al., 2015).

Toutefois et comparativement aux autres études trouvées dans la littérature, le développement d'un système multifonctionnel de production de biodiesel et de biogaz en utilisant la biomasse issue de la culture de *Ricinus communis*, présente les meilleures performances en matière d'émissions de CO₂eq. L'émission en CO₂eq tout au long du cycle de vie se situe autour de

36,05 gCO₂eq/MJ du biodiesel, résultat voisin de celui de notre étude. Cette émission est due principalement à l'utilisation de NaOH, nécessaire pour le prétraitement de la biomasse lignocellulosique, ainsi que les différents processus de la phase de culture (Khoshnevisan et al., 2017).

Les émissions en CO₂eq tout au long des étapes du cycle de vie du biodiesel issu de *Chlorella vulgaris* sont de -61,80 gCO₂eq/MJ du biodiesel. Dans cette perspective, la comparaison entre les autres systèmes de production sont rapportés pour Liquéfaction Hydrothermique (HTL), Prétraitement par hydrolyse hydrothermique (HTTP) et Extraction humide des lipides (WLE) comme 280, 360, 330 gCO₂eq/MJ du biodiesel (Mu et al., 2017).

(Dutta et al., 2016) ont réalisé une analyse du cycle de vie pour la même voie de conversion intégrée, et ont rapporté une valeur de 60 gCO₂eq/MJ de biodiesel produit en assumant une productivité de 30 g/m² j et une teneur en lipides de 41% pendant 330 j de production. Cependant, la productivité est considérée comme étant le facteur le plus important qui affecte les résultats de l'analyse du cycle de vie.

(Quinn and Davis, 2015) ont rapporté dans une synthèse que les émissions de CO₂ du point de vue cycle de vie sont dans une fourchette allant de - 44 à 33 gCO₂eq/MJ en fonction de la voie de transformation et des hypothèses admises concernant les performances de chaque procédé. Par ailleurs, la majorité des voies de transformation implique l'intégration de la digestion anaérobique pour la génération de chaleur et d'électricité et le recyclage des nutriments pour la culture de la biomasse algale. De plus, la source de l'énergie produite influence significativement les émissions de CO₂eq. Ainsi, l'utilisation des énergies renouvelables alternatives peut réduire d'une manière significative les émissions de CO₂eq et satisfaire la Directive Européenne sur les Energies renouvelables (RED, 2009) qui fixent des économies des émissions en CO₂ de 60 % au-delà de 2018 (Collet et al., 2014).

5.2.2 Efficacité énergétique (MJ/MJ Biodiesel)

La Demande Cumulative en Energie, (DCE), tout au long du cycle vie du système de production du biodiesel selon les différentes sources d'huile, a été déterminée. Le bilan énergétique est estimé à l'aide de l'indice EROIE, en se basant sur le pouvoir calorifique inférieur, pour l'évaluation de l'efficacité énergétique du système de production et par conséquent la soutenabilité potentielle du système de production du point de vue énergétique.

A cet égard, les productions de biodiesel à partir des huiles de moringa et de ricin nécessitent respectivement une consommation d'énergie de 0.46 MJ et 0.56 MJ par MJ de biodiesel produit indiquant ainsi une efficacité énergétique positive.

Dans ce contexte, et prenant en compte les hypothèses retenues pour les limites du système de production pour les deux sources de biodiesel (moringa et ricin), la production nette en énergie du système de production tout au long du cycle de vie, exprimé en indice EROEI, est de 2,16 et 1,77 pour le biodiesel de *M. oleifera* et *R. communis*, respectivement.

La comparaison avec les autres sources de biodiesel telle que l'huile de soja, de tournesol et de colza indique que les taux de retour énergétique des trois sources se trouvent dans l'intervalle de 0,78 - 4,56, 0,76 - 4,5 et 1,21 - 3,71 pour les biodiesels de soja, de tournesol et de colza, respectivement (Garza, 2015). Cependant, il convient de prendre en compte les différentes hypothèses retenues pour la modélisation des limites des systèmes de production du biodiesel ainsi que des méthodologies d'allocation utilisées pour chaque cas.

Ainsi, le développement d'un système multifonctionnel de production de biodiesel et de biogaz en utilisant la biomasse issue de la culture de *Ricinus communis*, présente les meilleures performances en matière de bilan énergétique avec un EROIE de 1,3. Néanmoins, il est à noter que les technologies de prétraitement de la biomasse lignocellulosique sont encore intensives en matière de la demande énergétique en raison de l'utilisation de quantité importante de NaOH et de vapeur avec des contributions à la consommation globale de 43% et 35%, respectivement (Khoshnevisan et al., 2017).

En outre, des analyses du cycle de vie des biodiesels de deuxième génération dérivés de l'huile de *Jatropha curcas* et de *Cynara cardunculus*, indiquent des taux de retour énergétique EROIE de 0,23 (Portugal-Pereira et al., 2016) et 1,53 respectivement (Dufour et al., 2013).

Toutefois, l'utilisation des voies alternatives pour la conversion tant de la biomasse résiduelle que de l'huile de *Jatropha curcas* en diesel vert, par l'intégration de la cogénération (CHP), la gazéification, la synthèse de diesel par la synthèse de Fisher-Tropsch et l'hydrotraitement de l'huile végétale, indique une amélioration significative des performances environnementales en matière de la demande cumulative en énergie, comparativement au diesel conventionnel avec un EROIE de 1,62 (Portugal-Pereira et al., 2016).

La demande cumulative en énergie du biodiesel microalgal présente un EROEI autour de 0,68, ce qui montre que le système de production est déficient de point de vue énergétique. Par

ailleurs, d'après la contribution des sous-systèmes indiqués sur la figure 5.6 (section 3 plus haut), la production de la biomasse algale est le principal contributeur à la consommation énergétique, ce qui montre que l'effort d'amélioration devrait se porter sur l'optimisation du système de culture particulièrement l'agitation de la culture.

L'efficacité énergétique du cycle de vie est de 1,46 MJ/MJ de biodiesel produit, ce qui indique que le système de production de biodiesel consomme plus d'énergie fossile qu'il n'en produit en équivalent de biodiesel. De surcroît, une comparaison avec d'autres voies de production de biocarburants comme la liquéfaction hydrothermique (HTL), prétraitement par hydrolyse hydrothermique (HTP), et l'extraction humide des lipides (WLE), indique que les performances du cycle de vie du biodiesel sont du même ordre de grandeur, avec des intensités énergétiques qui se situent dans un intervalle allant de 2,95 à 3,75 MJ/MJ de biodiesel (Mu et al., 2017). Les études citées pour la comparaison suivant les voies de transformation se basent sur le recyclage de l'énergie et des nutriments afin de réduire les impacts environnementaux, améliorant ainsi les performances du système de production tout au long de son cycle de vie. Cependant, les biens d'équipement et d'infrastructure ne sont pas inclus dans l'inventaire du cycle de vie.

5.3. Comparaison de performances des biodiesels et du gazole

Les impacts environnementaux du biodiesel issu de l'huile de *Moringa oleifera* présentent un gain en matière d'économie en émissions de GES et de la demande cumulative en énergie fossile relativement au diesel fossile. Par ailleurs, le biodiesel de *moringa oleifera* montre une réduction approximative de 70 % et 50 % de PRG et DCE, respectivement (figure 5.7A).

Le biodiesel issu de l'huile de *Ricinus communis* montre des impacts environnementaux inférieurs à ceux du diesel fossile en matière d'émissions de GES et DCE avec une contribution de 60 % et 50 % environ, respectivement. Néanmoins, le biodiesel de ricin montre des performances nettement inférieures au diesel fossile en matière d'impacts d'ERNRm, PA et PE (figure 5.8A). Ceci est dû au fait que le système de production du biodiesel de l'huile de moringa et de ricin nécessite l'utilisation d'engrais chimiques et de pesticides durant la phase de culture.

Toutefois, l'application de l'allocation énergétique, prenant en compte uniquement la fraction de la biomasse utilisée pour la production du biodiesel, conduit à une amélioration des performances du biodiesel relativement au gazole pour la majorité de catégorie d'impact (figures 5.7B, 5.8B)

Notons, à cet égard, que la Directive Européenne sur les Energies renouvelables de 2009 (RED, 2009) a établi des critères de soutenabilité des biocarburants liquides et, qui prévoit la réduction des émissions de GES relativement au diesel fossile ainsi que la Demande Cumulative en Energie DCE qui doit présenter une valeur positive. Toutefois, selon le RED (2009), la réduction des émissions en GES doit-être au moins de 50 %.

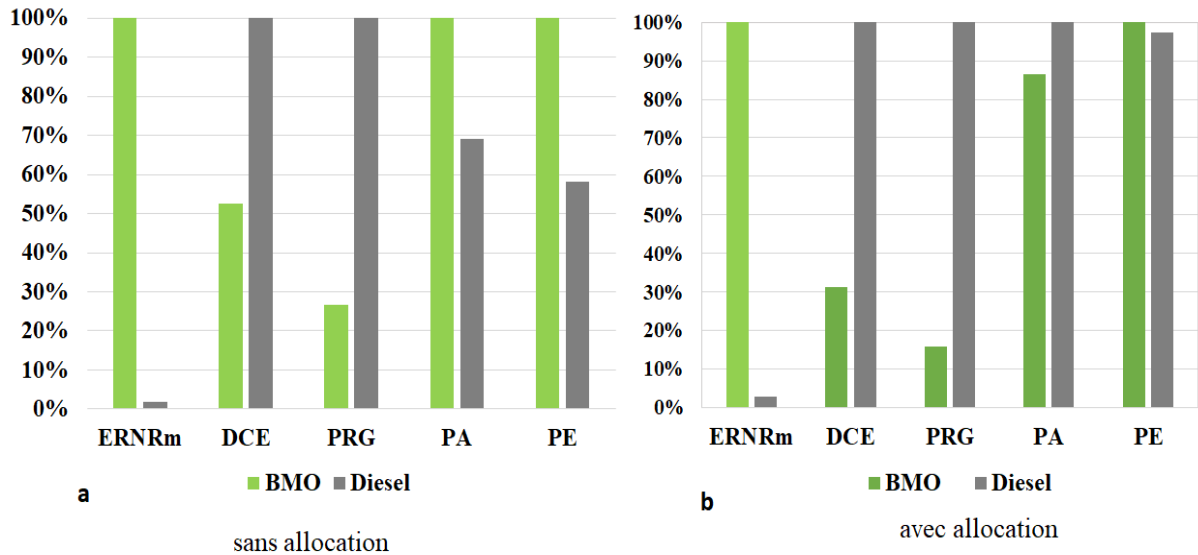


Figure 5. 7: Impacts environnementaux potentiels du biodiesel de *M. oleifera* comparés à ceux du gazole

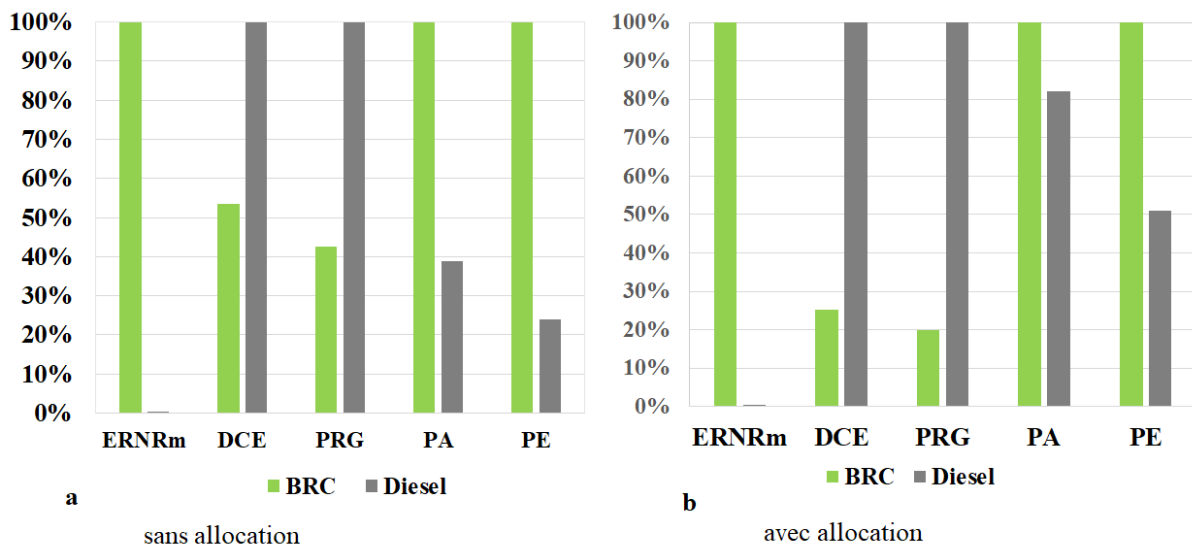


Figure 5. 8: Impacts environnementaux potentiels du biodiesel de *R. communis* comparés à ceux du gazole

La comparaison des performances du cycle de vie du biodiesel issu des microalgues et du gazole est basée sur la même teneur en énergie. La figure 5.9 ci-dessous montre que le biodiesel microalgal présente des impacts moindres en matière de bilan carbone (le potentiel de

réchauffement global) avec une réduction de plus de 70 %, en accord avec les recommandations de la Directive Européenne (RED, 2009). Cependant, le DCE du biodiesel microalgale reste encore déficient en matière de la consommation d'énergie fossile d'une marge de 10 % approximativement. Cette déficience est due principalement aux processus d'arrière-plan pour la production de la biomasse durant la phase de la culture.

En outre, le biodiesel issu de microalgues présente des performances nettement faibles vis-à-vis du potentiel d'acidification et d'eutrophisation comparativement au gazole. Ceci est dû au fait que le système de production du biodiesel nécessite l'utilisation des nutriments pour la croissance de la biomasse algale avec des processus d'arrière-plan de la production des engrais chimiques particulièrement énergivores.

Les études du cycle de vie du biodiesel microalgale rapportées dans la littérature à l'égard du potentiel d'eutrophisation et d'acidification du biodiesel produit par la voie d'extraction humide comparativement au gazole montre que les résultats obtenus présentent une amélioration pour ces deux catégories d'impact potentiel (Collet et al., 2014). Toutefois, ces impacts potentiels pourraient être encore atténués si l'on substitue les fertilisants chimiques par des eaux usées comme source de nutriments et si l'on intègre l'électricité renouvelables en tant que source d'énergie pour satisfaire la demande énergétique du système de culture de la biomasse algale.

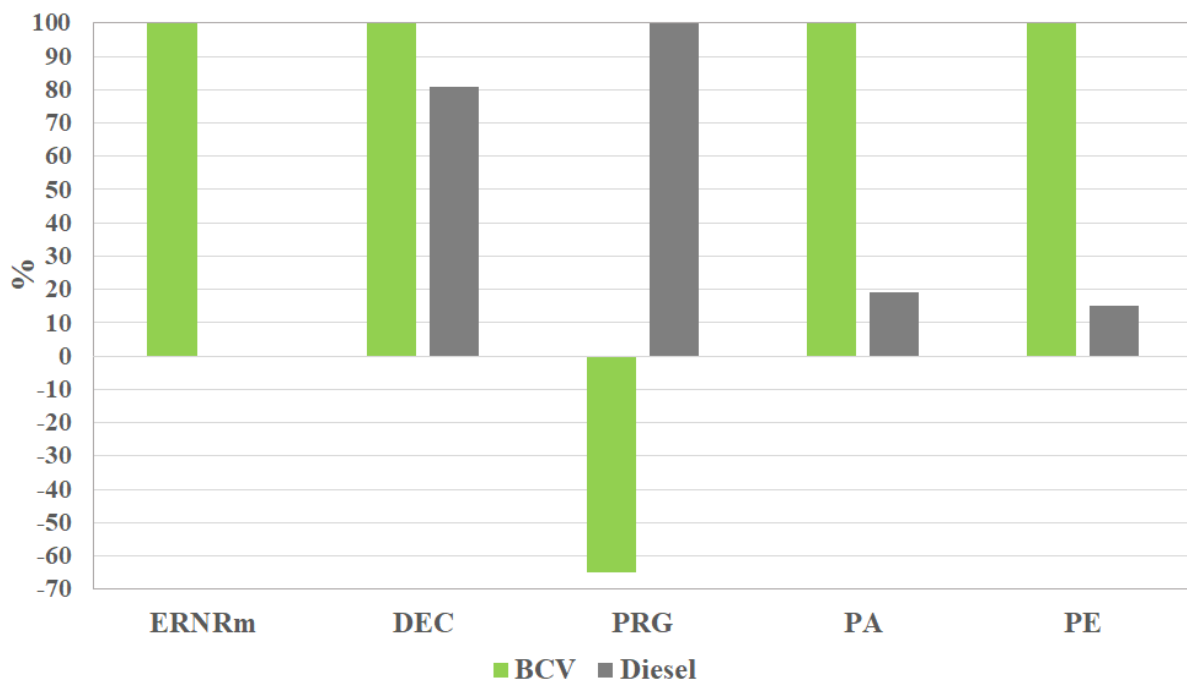


Figure 5. 9: Impacts environnementaux du biodiesel de *C. Vulgaris* comparés à ceux du gazole

5.4. Comparaison de performances environnementales du biodiesel selon la source

La figure 5.10 ci-dessous dresse une comparaison des performances du biodiesel selon la source de la matière première, du point de vue de l'épuisement des ressources naturelles (Matériaux et Energie ; **ERNRm**, **DCE**), du potentiel de réchauffement global (**PRG**), du potentiel d'acidification (**PA**) et du potentiel d'eutrophisation (**PE**).

D'une manière générale, il est à remarquer que le biodiesel obtenu de l'huile de moringa présente les impacts environnementaux les plus faibles pour l'ensemble des catégories d'impacts sous investigations, à l'exception du potentiel de réduction des émissions de CO₂eq du biodiesel issu de l'huile de la chlorelle.

En matière de consommation énergétique, le biodiesel microalgal est le plus grand consommateur en énergie comparativement aux biodiesels issus de l'huile de moringa et de ricin. Ceci est dû principalement aux différents processus énergétiquement intensifs en l'occurrence la production et la récolte de la biomasse algale.

Le biodiesel microalgal présente un impact nettement positif pour la catégorie du réchauffement global. Par conséquent, le biodiesel microalgal présente un grand potentiel pour la séquestration de CO₂ fossile.

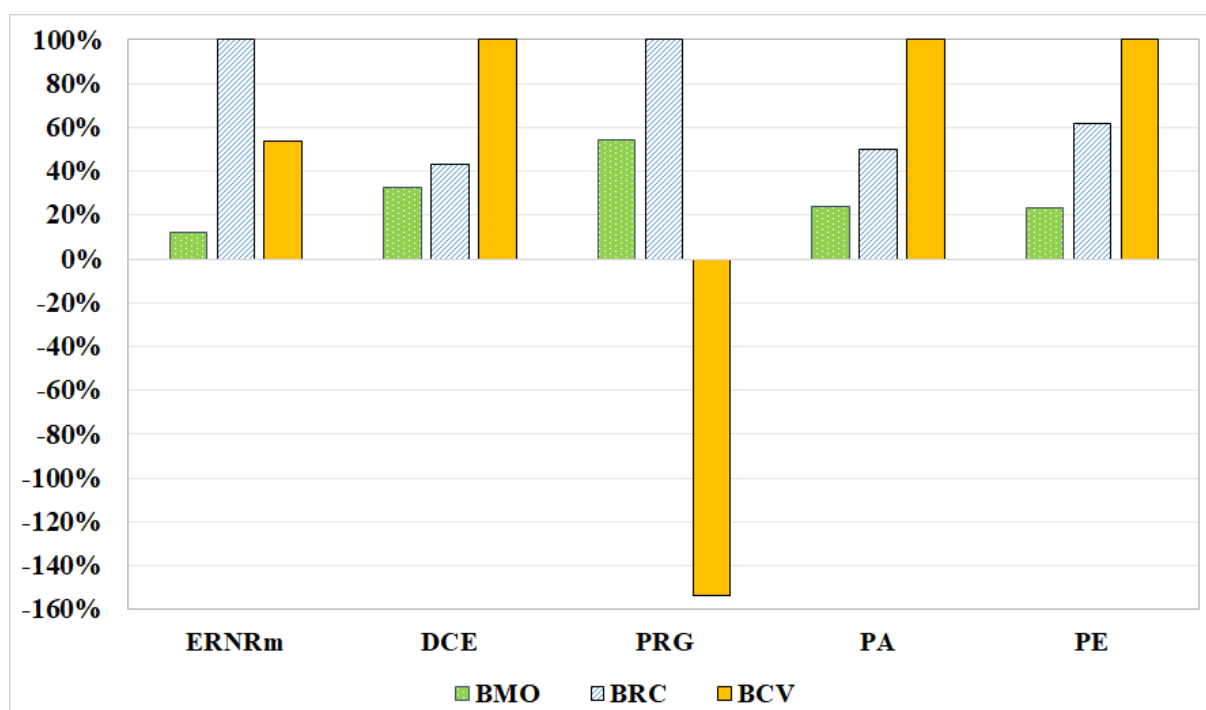


Figure 5. 10: Comparaison des performances environnementales du biodiesel selon le type de matière première

5.5 Discussion générale

Les variations dans l'évaluation du cycle de vie des biocarburants d'origine de la biomasse algale sont dues principalement au choix du modèle du système suivi par les incertitudes élevées rapportées pour les performances des processus de production de la biomasse durant les phases de culture, de récolte et d'extraction de l'huile. Elles sont également fonction des approches adoptées pour la gestion des coproduits (Laurens, 2017). En fait, il est souvent difficile de tenter une comparaison entre les études qui rapportent les évaluations de la soutenabilité de la biomasse algale comme matière première pour la production de biocarburants vue les différences constatées dans l'agrégation des données, dans les limites du système du cycle de vie, les hypothèses techniques du cycle de vie, les catégories d'impacts potentiels considérés dans l'étude, l'utilisation des données expérimentales, des données modélisées ou supposées (Handler et al., 2012).

Dans le cas de notre étude, une comparaison de PRG et DCE avec des études plus récentes a été tentée, prenant en compte les grandes disparités des systèmes de production de biocarburants issus de la biomasse algale. Les résultats obtenus dans cette étude sont comparés sur la base d'une approche « *du berceau à l'usine* ». Le PRG et l'efficacité énergétique sont rapportés en gCO₂eq/MJ et MJ/MJ de l'énergie produite par le système.

Selon (Handler et al., 2012), les résultats issus de l'analyse du cycle de vie sont souvent difficilement comparables, là où des choix différents sont faits pour les limites du système et les impacts environnementaux à prendre en considération

Dans des études précédentes, les impacts liés à l'infrastructure pour la construction des bassins de cultures sont généralement considérés négligeables (Handler et al., 2012). Par ailleurs, la plupart des études ne prennent pas en considération les émissions de CO₂eq liées à la construction de l'unité de transformation dans les limites du système utilisés pour l'évaluation du système de production des biocarburants basés sur la biomasse algale (Quinn and Davis, 2015). Dans une étude récente, (Canter et al., 2014) a démontré la contribution élevée de l'infrastructure aux différentes catégories d'impact. Ainsi, l'acier utilisé pour la construction des réacteurs de fermentation alcoolique et des digesteurs contribue à toutes les catégories d'impacts considérées pour le système de production. De plus, les membranes en polyéthylène utilisées pour la couverture des bassins de culture contribuent aussi à l'impact sur la demande cumulative en énergie (DCE) durant la phase de la culture de la biomasse algale.

La demande en azote pour la croissance de la biomasse microalgale est l'un des principaux éléments qui contribue significativement à l'empreinte énergétique tout au long du cycle de vie du système de production du biodiesel algal. Dans ce contexte, les études récentes proposent d'utiliser des sources alternatives pour l'approvisionnement en éléments nutritifs pour la culture des microalgues en l'occurrence des eaux usées (Mu et al., 2014). Néanmoins, l'utilisation des eaux usées pour la culture devrait prendre en compte d'autres considérations pouvant affecter l'intégration des technologies de récolte comme c'est le cas pour l'utilisation de la filtration membranaire.

Conclusion générale

Le présent travail avait pour objectif l'étude d'un système de production de biodiesel en utilisant différentes sources de matières premières oléagineuses à savoir : l'huile de *Moringa oleifera*, l'huile de *Ricinus communis* et l'huile de *Chlorella vulgaris*. L'analyse du cycle de vie, en tant qu'outil d'aide à la décision, est utilisée pour l'évaluation des différents impacts environnementaux des trois systèmes de production.

La caractérisation environnementale des systèmes de production de biodiesel à partir de l'huile de *moringa oleifera*, *Ricinus communis* et *Chlorella vulgaris*, a été entreprise selon l'approche du cycle de vie tout au long de la chaîne de la production du biodiesel. Par ailleurs, la contribution spécifique de chaque sous-système aux impacts environnementaux de catégories d'impacts intermédiaires (*Mid-point*) a été déterminée. Cette caractérisation comprend les catégories d'impact en matière de consommation des ressources abiotiques que ce soit minéral ou énergie fossile (**ERNRm, DCE**), la contribution au réchauffement climatique (**PRG**), le potentiel de l'acidification (**AP**) et le potentiel d'eutrophisation (**EP**). En outre, la contribution des processus spécifiques se trouvant derrière chaque catégorie d'impact du cycle de vie du biodiesel est aussi identifiée (processus « d'arrière-plan »).

La caractérisation environnementale du système de production du biodiesel issu de l'huile de *Moringa oleifera* montre que les phases de la culture, la transestérification de l'huile et l'extraction de l'huile, respectivement, sont les sous-systèmes ayant des contributions aux catégories d'impact les plus significatives. En outre, les processus qui contribuent significativement aux différentes catégories d'impact sont l'utilisation des pesticides pour l'ERNRm, l'utilisation de la chaleur, du méthanol et le transport pour les catégories d'impacts DCE, PRG et AP. L'utilisation des engrais NPK contribue aussi pour les catégories d'impact DCE, PRG, AP et EP.

La caractérisation environnementale du système de production du biodiesel issu de l'huile de *Ricinus communis* montre la prédominance du sous-système de la production de graines pour toutes les catégories d'impact suivi par le sous-système de la transestérification de l'huile en biodiesel. Les processus contribuant aux catégories d'impact sont l'utilisation des pesticides, la chaleur, l'utilisation des engrais NPK, du méthanol et le transport des graines vers le site de conversion.

La caractérisation environnementale du système de production du biodiesel issu de l'huile de *Chlorella vulgaris* montre la prédominance du sous-système culture et récolte de la biomasse algale pour les catégories d'impact ERNe, PA et PE, suivi par le sous-système de prétraitement et fermentation de la biomasse algale avec des contributions à toutes les catégories d'impact. Toutefois, le sous-système de la digestion anaérobique/CHP contribue essentiellement aux catégories d'impact ERNm, PE et PA. Il est à noter que le sous-système culture et récolte de la biomasse algale présente un impact positif pour la catégorie d'impact PRG du fait que la biomasse algale séquestre du CO₂ lors de sa croissance.

D'une manière générale, les impacts des différentes étapes du cycle de vie du système de production du biodiesel algal pourraient être classés par l'ordre suivant : le processus de production de l'électricité, la production de l'acier nécessaire pour les réacteurs et les biodigesteur du sous-système de la culture, prétraitement et fermentation et digestion anaérobique, la production de l'urée pour le sous-système de la culture. Le transport pourrait aussi contribuer significativement aux impacts environnementaux dans le cas où la distance de transport des intrants est longue.

Durant cette étude du cycle de vie de la production du biodiesel issu des huiles de moringa et de ricin, et de la chlorelle, la consommation et la production énergétique du système sont estimées par le calcul de l'indice EROEI dans le but d'évaluer l'efficacité énergétique du système de production tout au long de son cycle de vie.

Les émissions en CO₂eq sont les principales catégories d'impact considérées pour l'analyse d'impact du cycle de vie des biocarburants vus leur effet sur le potentiel du réchauffement global. A cet égard, les émissions en CO₂eq tout au long du cycle de vie sont évaluées pour le biodiesel de l'huile de *Moringa oleifera*, *Ricinus communis* et de *Chlorella vulgaris*. Le biodiesel de l'huile de *Moringa oleifera* présente une valeur de 21,28 gCO₂eq/MJ de biodiesel. Par contre, le biodiesel de l'huile de *Ricinus communis* présente une valeur plus élevée, de 35,89 gCO₂eq/MJ de biodiesel. En revanche, le biodiesel issu de l'huile de *Chlorella vulgaris* présente une valeur de - 61.80 gCO₂eq/MJ en raison de la séquestration du CO₂ durant la phase de la croissance de la biomasse algale et le recyclage de du CO₂ issu de l'unité de conversion de la biomasse.

La Demande Cumulative en Energie, (DCE), tout au long du cycle vie du système de production du biodiesel selon les différentes sources d'huile, a été déterminée. Le bilan énergétique est estimé par l'indice EROIE, en se basant sur le pouvoir calorifique inférieur, pour l'évaluation

de l'efficacité énergétique du système de production et par conséquent celle de la soutenabilité potentielle du système de production du point de vue énergétique.

A cet égard, les productions de biodiesels issus de l'huile de moringa, de ricin et de chlorelle, nécessitent respectivement des consommations d'énergie de 0,46 MJ, 0,56 MJ et 1,46 MJ par MJ de biodiesel produit indiquant ainsi une efficacité énergétique positive.

Dans ce contexte, et prenant en compte les hypothèses retenues pour les limites du système de production pour les deux sources de biodiesel issu de l'huile de moringa et de ricin, la production nette en énergie du système de production tout au long du cycle de vie, exprimé en indice EROEI, est de 2,16, 1,77, 0,68 respectivement pour le biodiesel de *M. oleifera*, *R. communis* et *C. vulgaris*.

Les impacts environnementaux du biodiesel issu de l'huile de moringa, de ricin et de chlorelle présentent un gain en matière d'émissions de GES et de demande cumulative en énergie fossile comparativement au diesel fossile. Ainsi, les biodiesels issus des trois sources montrent une réduction approximative des émissions de CO₂eq de 70, 60 et 75% pour le biodiesel issu de l'huile de moringa, de ricin et de chlorelle, respectivement. De plus, la demande cumulative en énergie montre une économie en énergie par rapport au diesel fossile d'environ de 50 % pour le biodiesel de moringa et de ricin. Le biodiesel issu de la chlorelle ne présente qu'une réduction de 10 % en raison de son bilan énergétique négatif.

Comparativement au diesel conventionnel, le biodiesel présente ainsi des performances positives en matière d'émissions CO₂eq et la demande cumulative en énergie. Cependant, le biodiesel présente des impacts environnementaux plus importants que le diesel conventionnel en matière du potentiel d'acidification et d'eutrophisation vu que la production du biodiesel nécessite l'utilisation de fertilisants chimiques et de pesticides durant la phase de culture.

La comparaison des performances du biodiesel selon la source de la matière première montre que, d'une manière générale, le biodiesel obtenu de l'huile de moringa présente les impacts environnementaux les plus faibles pour l'ensemble des catégories d'impacts sous investigation à l'exception du potentiel de réduction des émissions de CO₂eq du biodiesel issu de l'huile de la chlorelle. Par ailleurs, le biodiesel microalgale présente un impact nettement positif pour la catégorie du réchauffement global. Par conséquent, le biodiesel microalgale présente un grand potentiel pour la séquestration du CO₂ fossile.

En outre, en matière de consommation énergétique, le biodiesel microalgale est énergétiquement intensif comparativement au biodiesel issu de l'huile de moringa et de ricin. Ceci est dû principalement aux différents processus énergétiquement intensifs en l'occurrence ceux liés à la production et la récolte de la biomasse algale.

Le développement du biodiesel d'origine algale constitue donc une alternative soutenable à long terme tout en nécessitant un développement technologique entre autres : les technologies de culture, de récolte ainsi que les voies de transformation de la biomasse algale. En outre, l'utilisation des sources d'énergies renouvelables en l'occurrence de la bioélectricité par valorisation de la biomasse résiduelle ou l'exploitation d'autres sources telle que l'électricité photovoltaïque ou thermique solaire sont des voies potentiellement intéressantes. De surcroît, l'intégration d'une stratégie de recyclage des ressources naturelles par l'utilisation des eaux usées, où le recyclage des nutriments, l'eau, le CO₂ issus du traitement de la biomasse, constitue des leviers potentiels pour l'amélioration des systèmes de production dans un cadre de développement durable.

La soutenabilité environnementale des biocarburants issus de microalgues devrait être clairement démontrée relativement aux carburants fossiles. Bien que les émissions des GES et la demande énergétique soient les deux paramètres clés dans les systèmes de production des biocarburants, d'autres paramètres tels que l'empreinte hydrique, l'acidification et l'eutrophisation, devraient être pris en compte et évalués en détail afin de caractériser au mieux les biocarburants issus de la conversion de la biomasse algale. L'évaluation du cycle de la biomasse algale devrait porter aussi sur les questions les plus importantes de la chaîne d'approvisionnement. En outre, l'évaluation des sources alternatives de production d'électricité renouvelable comme la concentration solaire, est nécessaire afin d'améliorer le bilan énergétique et par conséquent la réduction des émissions CO₂.

Recommandations et perspectives

A la lumière de nos travaux basés sur l'utilisation de l'analyse du cycle de vie, en tant qu'outil d'aide à la décision pour l'évaluation de la chaîne de valeur d'une filière de biodiesel, nous pouvons suggérer quelques pistes pour la poursuite de ce travail.

De notre point de vue, les efforts de développement de filières de production de biodiesel doivent être concentrés sur l'amélioration des performances de la phase de production de la biomasse afin de réduire la consommation énergétique par l'utilisation d'alternatives aux engrais chimiques et pesticides, et par l'application de bonnes pratiques agricoles.

Le développement des technologies de conversion de la biomasse de différentes générations est un atout crucial qui devrait privilégier le développement des technologies propres, socialement acceptables, tout en étant viable sur le plan économique. En outre, l'utilisation de l'analyse du cycle de vie est primordiale pour la comparaison entre différentes technologies alternatives dans le but de choisir la plus adéquate pour la production de biocarburants.

Le développement d'une filière de production de biocarburants, entre autres le biodiesel, doit s'inscrire dans une vision plus large pour la valorisation de la biomasse produite par le système de production à travers une diversification des produits énergétiques et chimiques dans le cadre de l'application du concept de développement de bioraffineries. L'application de ce concept permettrait d'améliorer la rentabilité économique ainsi que la réduction des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie du système de production.

L'utilisation de sources alternatives d'énergie est indispensable pour répondre aux besoins du système de production, comme le solaire photovoltaïque et thermique pour la production de l'électricité et de la chaleur. La valorisation de la biomasse résiduelle via la méthanisation pour la production de la chaleur et d'électricité permettra également de s'affranchir des sources d'énergies fossiles.

La valorisation de la biomasse résiduelle permettrait aussi la production des produits à haute valeur ajoutée comme les biofertilisants, contribuant ainsi à réduire le recours aux engrais chimiques et donc de réduire significativement les impacts environnementaux du cycle de vie.

Le développement d'une filière de production basée sur l'utilisation de la biomasse algale nécessite une évaluation des ressources dans l'objectif de fiabiliser le système de production et de réduire les impacts sur l'écosystème. Cette évaluation devrait se faire dans le cadre d'une stratégie de préservation des ressources naturelles (ressources hydriques et éléments nutritifs).

En outre, la valorisation de la biomasse résiduelle comme le tourteau d'extraction, glycérol) présente de plusieurs applications industrielles, constituant ainsi des alternatives économiques très prometteuses pour le développement d'autres types de filières autres que les biocarburants. En outre, le glycérol pourrait être utilisé pour la production de biohydrogène.

L'analyse du cycle de vie des systèmes de production de biocarburants devrait intégrer les services écosystèmes ainsi que leur valeur ajoutée suite à leur intégration dans les autres secteurs économiques à savoir les secteurs agricole et industriel, et celui du transport. Les bienfaits socio-économiques issus de la réduction de l'impact du changement climatique sont aussi à prendre en considération quand une comparaison est faite entre les carburants fossiles et les biocarburants de différentes générations.

Les études sur l'analyse du cycle de vie des biocarburants en général et le biodiesel issu de la biomasse algale n'ont pas atteint un niveau de maturité en ce qui concerne les résultats relatifs aux impacts environnementaux pour qu'elle puisse contribuer d'une manière effective dans le processus de prise de décision vue le manque de données à l'échelle industrielle. Nonobstant toutes ces limites, l'analyse du cycle de vie reste un outil très utile et qui participe activement en parallèle au développement des technologies de production et de conversion de la biomasse algale ainsi qu'à l'évaluation des voies de production dans le cadre du développement de filières intégrées privilégiant le concept de bioraffinerie.

La combinaison de l'analyse du cycle de vie avec d'autres outils d'aide à la décision à l'instar des systèmes d'information géographique et les méthodes d'analyse multicritère est, à cet égard, fondamentale. Ceci, permettrait d'avoir une approche plus globale prenant en compte les trois dimensions de développement durable pour la promotion de filières de production de biodiesel soutenable en matière de disponibilité et d'accessibilité de la biomasse pour la promotion de filières de production de biodiesel à l'échelle industrielle.

Le déploiement de la production des biocarburants devrait faire intervenir de multiples secteurs et opérateurs économiques en liaison avec les communautés locales dans l'objectif d'installer des filières de production intégrées basées sur la diversification des produits énergétiques à même de fournir des coproduits à hautes valeurs ajoutées tels que les produits pharmaceutiques et des produits pour l'alimentation animale et humaine.

Références bibliographiques

- Adebayo, A.G., Akintoye, H.A., Shokalu, A.O., Olatunji, M.T., 2017. Soil chemical properties and growth response of *Moringa oleifera* to different sources and rates of organic and NPK fertilizers. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* 6, 281–287. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0175-5>
- AIE, 2015. Mobilizing Sustainable Bioenergy Supply Chains Bioenergy (No. IEA Bioenergy ExCo: 2015:04). AIE bioenergy.
- Alaswad, A., Dassisti, M., Prescott, T., Olabi, A.G., 2015. Technologies and developments of third generation biofuel production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51, 1446–1460. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.058>
- Albers, S.C., Berklund, A.M., Graff, G.D., 2016. The rise and fall of innovation in biofuels. *Nat. Biotechnol.* 2016 348.
- Andersen, R.A., 2005. *Algal Culturing Techniques*. Academic Press.
- Anuar, M.R., Abdullah, A.Z., 2016. Challenges in biodiesel industry with regards to feedstock, environmental, social and sustainability issues: A critical review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 58, 208–223. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.296>
- Aransiola, E.F., Ojumu, T. V, Oyekola, O.O., Madzimbamuto, T.F., Ikhu-Omoregbe, D.I.O., 2014. A review of current technology for biodiesel production: State of the art. *Biomass Bioenergy* 61, 276–297. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.014>
- Atabani, A.E., Silitonga, A.S., Ong, H.C., Mahlia, T.M.I., Masjuki, H.H., Badruddin, I.A., Fayaz, H., 2013. Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18, 211–245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.013>
- Atadashi, I.M., Aroua, M.K., Abdul Aziz, A.R., Sulaiman, N.M.N., 2012. Production of biodiesel using high free fatty acid feedstocks. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 3275–3285. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.063>
- Azapagic, A., 1999. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chem. Eng. J.* 73, 1–21. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(99\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(99)00042-X)
- Babazadeh, R., 2017. Optimal design and planning of biodiesel supply chain considering non-edible feedstock. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 75, 1089–1100. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.088>
- Balaji, G., Cheralathan, M., 2013. Potential of Various Sources for Biodiesel Production. *Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff.* 35, 831–839. <https://doi.org/10.1080/15567036.2011.594856>
- Banković-Ilić, I.B., Stamenković, O.S., Veljković, V.B., 2012. Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 3621–3647. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.002>
- Barry, A., Wolfe, A., English, C., Ruddick, C., Lambert, D., 2016. National Algal Biofuels Technology Review (No. DOE/EE--1409, 1259407). <https://doi.org/10.2172/1259407>
- Bart, J.C.J., Palmeri, N., Cavallaro, S., 2010a. 6 - Emerging new energy crops for biodiesel production, in: Bart, J.C.J., Palmeri, N., Cavallaro, S. (Eds.), *Biodiesel Science and Technology*, Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, pp. 226–284.
- Bart, J.C.J., Palmeri, N., Cavallaro, S., 2010b. 11 - Industrial process technology for biodiesel production, in: Bart, J.C.J., Palmeri, N., Cavallaro, S. (Eds.), *Biodiesel Science and Technology*, Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, pp. 462–513.
- Batani, H., Karimi, K., 2016. Biodiesel production from castor plant integrating ethanol production via a biorefinery approach. *Chem. Eng. Res. Des.* 107, 4–12. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2015.08.014>
- Batani, H., Karimi, K., Zamani, A., Benakashani, F., 2014. Castor plant for biodiesel, biogas, and ethanol production with a biorefinery processing perspective. *Appl. Energy* 136, 14–22. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.09.005>
- Bautista, L.F., Vicente, G., Garre, V., 2012. 8 - Biodiesel from microbial oil, in: *Advances in Biodiesel Production*, Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, pp. 179–203.

- Benhassaini, H., Bendahmane, M., Benchalgo, N., 2007. The chemical composition of fruits of *Pistacia atlantica* desf. subsp. *atlantica* from Algeria. *Chem. Nat. Compd.* 43, 121. <https://doi.org/10.1007/s10600-007-0059-4>
- Bennett, M.C., Turn, S.Q., Chan, W.Y., 2014. A methodology to assess open pond, phototrophic, algae production potential: A Hawaii case study. *Biomass Bioenergy* 66, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.016>
- Bhuiya, M.M.K., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., Ashwath, N., Azad, A.K., 2016. Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel—Part: 1 selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 55, 1109–1128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.163>
- Bilad, M.R., Arafat, H.A., Vankelecom, I.F.J., 2014. Membrane technology in microalgae cultivation and harvesting: A review. *Biotechnol. Adv.* 32, 1283–1300. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.07.008>
- Biswas, W., Rosano, M., 2009. Life Cycle Assessment of Biodiesel Production From *Moringa oleifera* oilseeds, in: 6th Australian Conference on Life Cycle Assessment Sustainability Tools for a New Climate. Presented at the 6th Australian Conference on Life Cycle Assessment, Australian Life Cycle Assessment Society.
- Brigham, R.D., 1993. Castor: Return of an Old Crop. p. 380-383. In: J. Janick and J.E. Simon (eds.), *New crops*. Wiley, New York.
- Bueno, A.V., Pereira, M.P.B., de Oliveira Pontes, J.V., de Luna, F.M.T., Cavalcante, C.L., 2017. Performance and emissions characteristics of castor oil biodiesel fuel blends. *Appl. Therm. Eng.* 125, 559–566. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.06.114>
- Canter, C.E., Davis, R., Urgan-Demirtas, M., Frank, E.D., 2014. Infrastructure associated emissions for renewable diesel production from microalgae. *Algal Res.* 5, 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.01.001>
- Castanheira, É.G., Grisoli, R., Coelho, S., Anderi da Silva, G., Freire, F., 2015. Life-cycle assessment of soybean-based biodiesel in Europe: comparing grain, oil and biodiesel import from Brazil. *J. Clean. Prod.* 102, 188–201. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.036>
- Chisti, Y., 2016. Large-Scale Production of Algal Biomass: Raceway Ponds, in: Bux, F., Chisti, Y. (Eds.), *Algae Biotechnology, Green Energy and Technology*. Springer International Publishing, pp. 21–40.
- Chisti, Y., 2013. Constraints to commercialization of algal fuels. *J. Biotechnol.* 167, 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2013.07.020>
- Chisti, Y., 2012. Raceways-based production of algal crude oil, in: *Microalgal Biotechnology: Potential and Production*. De Gruyter, Berlin, Boston.
- Chopra, J., Dineshkumar, R., Bhaumik, M., Dhanarajan, G., Kumar, R., Sen, R., 2016. Integrated in situ transesterification for improved biodiesel production from oleaginous yeast: a value proposition for possible industrial implication 6, 70364–70373. <https://doi.org/10.1039/C6RA14003C>
- Choudri, B.S., Baawain, M., 2015. Bioenergy from Biofuel Residues and Wastes. *Water Environ. Res.* 87, 1414–1444. <https://doi.org/10.2175/106143015X14338845155985>
- Collet, P., Hélias, A., Lardon, L., Steyer, J.-P., Bernard, O., 2015. Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels. *Appl. Energy* 154, 1089–1102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.056>
- Collet, P., Lardon, L., Hélias, A., Bricout, S., Lombaert-Valot, I., Perrier, B., Lépine, O., Steyer, J.-P., Bernard, O., 2014. Biodiesel from microalgae – Life cycle assessment and recommendations for potential improvements. *Renew. Energy* 71, 525–533. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.009>
- Council, N.R., 2006. *Lost Crops of Africa*. National Academies Press, Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/11763>
- Czyrnek-Delêtre, M.M., Smyth, B.M., Murphy, J.D., 2017. Beyond carbon and energy: The challenge in setting guidelines for life cycle assessment of biofuel systems. *Renew. Energy* 105, 436–448. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.043>
- Daud, N.M., Sheikh Abdullah, S.R., Abu Hasan, H., Yaakob, Z., 2015. Production of biodiesel and its wastewater treatment technologies: A review. *Process Saf. Environ. Prot.* 94, 487–508. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2014.10.009>

- Davis, R., Kinchin, C., Markham, J., Tan, E., Laurens, L., Sexton, D., Knorr, D., Schoen, P., Lukas, J., 2014. Process Design and Economics for the Conversion of Algal Biomass to Biofuels: Algal Biomass Fractionation to Lipid- and Carbohydrate-Derived Fuel Products (No. NREL/TP-5100-62368). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO.
- Davis, R., Markham, J., Kinchin, C., Grundl, N., Tan, E.C.D., Humbird, D., 2016. Process Design and Economics for the Production of Algal Biomass: Algal Biomass Production in Open Pond Systems and Processing Through Dewatering for Downstream Conversion (No. NREL/TP--5100-64772). NREL (National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States)).
- Davis, R.E., Fishman, D.B., Frank, E.D., Johnson, M.C., Jones, S.B., Kinchin, C.M., Skaggs, R.L., Venteris, E.R., Wigmosta, M.S., 2014. Integrated Evaluation of Cost, Emissions, and Resource Potential for Algal Biofuels at the National Scale. *Environ. Sci. Technol.* 48, 6035–6042. <https://doi.org/10.1021/es4055719>
- de Godos, I., Mendoza, J.L., Acien, F.G., Molina, E., Banks, C.J., Heaven, S., Rogalla, F., 2014. Evaluation of carbon dioxide mass transfer in raceway reactors for microalgae culture using flue gases. *Bioresour. Technol.* 153, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.087>
- De Meyer, A., Cattrysse, D., Rasinmäki, J., Van Orshoven, J., 2014. Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 31, 657–670. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.036>
- D.L., V., Guna, V., D., M., M., A., Reddy, N., 2017. Ricinus communis plant residues as a source for natural cellulose fibers potentially exploitable in polymer composites. *Ind. Crops Prod.* 100, 126–131. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2017.02.019>
- Dong, T., Knoshaug, E.P., Davis, R., Laurens, L.M.L., Van Wychen, S., Pienkos, P.T., Nagle, N., 2016a. Combined algal processing: A novel integrated biorefinery process to produce algal biofuels and bioproducts. *Algal Res.* 19, 316–323. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.12.021>
- Dong, T., Knoshaug, E.P., Pienkos, P.T., Laurens, L.M.L., 2016b. Lipid recovery from wet oleaginous microbial biomass for biofuel production: A critical review. *Appl. Energy* 177, 879–895. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.002>
- Drapcho, C., Nghiem, J., Walker, T., 2008. *Biofuels Engineering Process Technology*. McGraw Hill Professional.
- Dufour, J., Arsuaga, J., Moreno, J., Torrealba, H., Camacho, J., 2013. Comparative Life Cycle Assessment of Biodiesel Production from Cardoon (*Cynara cardunculus*) and Rapeseed Oil Obtained under Spanish Conditions. *Energy Fuels* 27, 5280–5286. <https://doi.org/10.1021/ef400951f>
- Dutta, S., Neto, F., Coelho, M.C., 2016. Microalgae biofuels: A comparative study on techno-economic analysis & life-cycle assessment. *Algal Res.* 20, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.09.018>
- Efroymsen, R.A., Dale, V.H., Kline, K.L., McBride, A.C., Bielicki, J.M., Smith, R.L., Parish, E.S., Schweizer, P.E., Shaw, D.M., 2012. Environmental Indicators of Biofuel Sustainability: What About Context? *Environ. Manage.* 51, 291–306. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9907-5>
- Fernandes, D.M., Sousa, R.M.F., de Oliveira, A., Morais, S.A.L., Richter, E.M., Muñoz, R.A.A., 2015. *Moringa oleifera*: A potential source for production of biodiesel and antioxidant additives. *Fuel* 146, 75–80. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2014.12.081>
- Fernández, J., Curt, M.D., Aguado, P.L., 2006. Industrial applications of *Cynara cardunculus* L. for energy and other uses. *Ind. Crops Prod.*, 2005 Annual Meeting of the Association for the Advancement of Industrial Crops: The International Conference on Industrial Crops and Rural Development 24, 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.06.010>
- Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S., 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. *J. Environ. Manage.* 91, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Fiorese, G., Guariso, G., 2010. A GIS-based approach to evaluate biomass potential from energy crops at regional scale. *Environ. Model. Softw.* 25, 702–711. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.11.008>
- Firrisa, M.T., Duren, I. van, Voinov, A., 2014. Energy efficiency for rapeseed biodiesel production in different farming systems. *Energy Effic.* 7, 79–95. <https://doi.org/10.1007/s12053-013-9201-2>

- Fokaides, P.A., Christoforou, E., 2016. 3 - Life cycle sustainability assessment of biofuels, in: Handbook of Biofuels Production (Second Edition). Woodhead Publishing, pp. 41–60.
- Garza, E.L., 2015. Chapter 9 - Life-Cycle Assessment: The Energy Return on Invested of Biodiesel, in: Dahiya, A. (Ed.), Bioenergy. Academic Press, Boston, pp. 161–178. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407909-0.00009-2>
- George H. Hargreaves, Zohrab A. Samani, 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Appl. Eng. Agric. 1, 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A.Y., van der Meer, T.H., 2009. The water footprint of bioenergy. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 106, 10219–23. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812619106>
- Glenn, E.P., Anday, T., Chaturvedi, R., Martinez-Garcia, R., Pearlstein, S., Soliz, D., Nelson, S.G., Felger, R.S., 2013. Three halophytes for saline-water agriculture: An oilseed, a forage and a grain crop. Environ. Exp. Bot., Sustainable cultivation and exploitation of halophyte crops in a salinizing world 92, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.05.002>
- Gnansounou, E., Kenthorai Raman, J., 2016. Life cycle assessment of algae biodiesel and its co-products. Appl. Energy 161, 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.043>
- Goldman, J., Porcella, D., Middlebrooks, J., Toerien, D., 1971. The Effect of Carbon on Algal Growth-Its Relationship to Eutrophication. Y Rep.
- González-Chávez, M.C.A., Ruíz Olivares, A., Carrillo-González, R., Ríos Leal, E., 2015. Crude oil and bioproducts of castor bean (*Ricinus communis* L.) plants established naturally on metal mine tailings. Int. J. Environ. Sci. Technol. 12, 2263–2272. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0622-z>
- Guccione, A., Biondi, N., Sampietro, G., Rodolfi, L., Bassi, N., Tredici, M.R., 2014. Chlorella for protein and biofuels: from strain selection to outdoor cultivation in a Green Wall Panel photobioreactor. Biotechnol. Biofuels 7, 84. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-84>
- Guinée, J.B., Lindeijer, E. (Eds.), 2002. Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards, Eco-efficiency in industry and science. Kluwer, Dordrecht.
- Han, Y.-Z., Hong, L., Wang, X.-Q., Liu, J.-Z., Jiao, J., Luo, M., Fu, Y.-J., 2016. Biodiesel production from Pistacia chinensis seed oil via transesterification using recyclable magnetic cellulose-based catalyst. Ind. Crops Prod. 89, 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.05.015>
- Handler, R.M., Canter, C.E., Kalnes, T.N., Lupton, F.S., Kholiqov, O., Shonnard, D.R., Blowers, P., 2012. Evaluation of environmental impacts from microalgae cultivation in open-air raceway ponds: Analysis of the prior literature and investigation of wide variance in predicted impacts. Algal Res. 1, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2012.02.003>
- Hellweg, S., Canals, L.M. i, 2014. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. Science 344, 1109–1113. <https://doi.org/10.1126/science.1248361>
- Hiloidhari, M., Baruah, D.C., Singh, A., Katak, S., Medhi, K., Kumari, S., Ramachandra, T.V., Jenkins, B.M., Thakur, I.S., 2017. Emerging role of Geographical Information System (GIS), Life Cycle Assessment (LCA) and spatial LCA (GIS-LCA) in sustainable bioenergy planning. Bioresour. Technol., Special Issue on International Conference on Current Trends in Biotechnology & post ICCB-2016 conference on Strategies for Environmental Protection and Management (ICSEPM-2016) 242, 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.079>
- Ho, S.-H., Huang, S.-W., Chen, C.-Y., Hasunuma, T., Kondo, A., Chang, J.-S., 2013. Bioethanol production using carbohydrate-rich microalgae biomass as feedstock. Bioresour. Technol., Biorefineries 135, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.015>
- Huntley, M.E., Johnson, Z.I., Brown, S.L., Sills, D.L., Gerber, L., Archibald, I., Machesky, S.C., Granados, J., Beal, C., Greene, C.H., 2015. Demonstrated large-scale production of marine microalgae for fuels and feed. Algal Res. 10, 249–265. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.04.016>
- Ijaz, M., Bahtti, K.H., Anwar, Z., Dogar, U.F., Irshad, M., 2016. Production, optimization and quality assessment of biodiesel from *Ricinus communis* L. oil. J. Radiat. Res. Appl. Sci. 9, 180–184. <https://doi.org/10.1016/J.JRRAS.2015.12.005>
- ISSF, 2012. Stainless Steel in Biogas Production - ISSF: International Stainless Steel Forum. International Stainless Steel Forum.

- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., Rosenbaum, R., 2003. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 8, 324. <https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., 2010. *Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan*, 2° Ed. Lavoisier, France.
- Judd, S.J., Al Momani, F.A.O., Znad, H., Al Ketife, A.M.D., 2017. The cost benefit of algal technology for combined CO₂ mitigation and nutrient abatement. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 71, 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.068>
- Kadam, K.L., 1997. Power plant flue gas as a source of CO₂ for microalgae cultivation: Economic impact of different process options. *Energy Convers. Manag., Proceedings of the Third International Conference on Carbon Dioxide Removal* 38, Supple, S505–S510. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00318-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00318-4)
- Kalaivani, K., Ravikumar, G., Balasubramanian, N., 2014. Environmental impact studies of biodiesel production from *Jatropha curcas* in india by life cycle assessment. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 33, 1340–1349. <https://doi.org/10.1002/ep.11913>
- Karmakar, A., Karmakar, S., Mukherjee, S., 2010. Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresour. Technol.* 101, 7201–7210. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.04.079>
- Kendall, A., Yuan, J., 2013. Comparing life cycle assessments of different biofuel options. *Curr. Opin. Chem. Biol., Next generation therapeutics • Energy* 17, 439–443. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.02.020>
- Kettab, A., 2001. Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision. *Desalination* 136, 25–33. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00161-8)
- khan, T.M.Y., Atabani, A.E., Badruddin, I.A., Badarudin, A., Khayoon, M.S., Triwahyono, S., 2014. Recent scenario and technologies to utilize non-edible oils for biodiesel production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37, 840–851. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.064>
- Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Tabatabaei, M., Ghanavati, H., Mohtasebi, S.S., Rahimi, V., Shafiei, M., Angelidaki, I., Karimi, K., 2017. Life cycle assessment of castor-based biorefinery: a well to wheel LCA. *Int. J. Life Cycle Assess.* 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1383-y>
- Kitani, O., 1999. *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, V. 5 Energy and Biomass Engineering. the American Society of Agricultural Engineers, USA.
- Kılıç, M., Uzun, B.B., Pütün, E., Pütün, A.E., 2013. Optimization of biodiesel production from castor oil using factorial design. *Fuel Process. Technol.* 111, 105–110. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2012.05.032>
- Klöpffer, W., Grahl, B., 2014. *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice*. Wiley-VCH.
- Kolyaei, M., Zahedi, G., Nasef, M.M., Azarpour, A., 2016. Optimization of biodiesel production from waste cooking oil using ion-exchange resins. *Int. J. Green Energy* 13, 28–33. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.909354>
- Koutroubas, S.D., Papakosta, D.K., Doitsinis, A., 1999. Adaptation and yielding ability of castor plant (*Ricinus communis* L.) genotypes in a Mediterranean climate. *Eur. J. Agron.* 11, 227–237. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(99\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00034-9)
- Kralisch, D., Staffel, C., Ott, D., Bensaid, S., Saracco, G., Bellantoni, P., Loeb, P., 2013. Process design accompanying life cycle management and risk analysis as a decision support tool for sustainable biodiesel production 15, 463–477. <https://doi.org/10.1039/C2GC36410G>
- Kumar, A., Sharma, S., 2011. Potential non-edible oil resources as biodiesel feedstock: An Indian perspective. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 1791–1800. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.020>
- Kumar, K., Mishra, S.K., Shrivastav, A., Park, M.S., Yang, J.-W., 2015. Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51, 875–885. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.033>
- Labalette, F., Estragnat, A., Messéan, A., 1996. Development of castor bean production in France. p. 340-342. In: J. Janick (ed.), *Progress in new crops*. ASHS Press, Alexandria.
- Lal, R., Stewart, B.A., 2009. *Soil Quality and Biofuel Production*. CRC Press, United States of America.
- Lammers, P.J., Huesemann, M., Boeing, W., Anderson, D.B., Arnold, R.G., Bai, X., Bhole, M., Brhanavan, Y., Brown, L., Brown, J., Brown, J.K., Chisholm, S., Meghan Downes, C.,

- Fulbright, S., Ge, Y., Holladay, J.E., Ketheesan, B., Khopkar, A., Koushik, A., Laur, P., Marrone, B.L., Mott, J.B., Nirmalakhandan, N., Ogden, K.L., Parsons, R.L., Polle, J., Ryan, R.D., Samocha, T., Sayre, R.T., Seger, M., Selvaratnam, T., Sui, R., Thomasson, A., Unc, A., Van Voorhies, W., Waller, P., Yao, Y., Olivares, J.A., 2017. Review of the cultivation program within the National Alliance for Advanced Biofuels and Bioproducts. *Algal Res.* 22, 166–186. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.021>
- Laurens, L.M.L., Chen-Glasser, M., McMillan, J.D., 2017. A perspective on renewable bioenergy from photosynthetic algae as feedstock for biofuels and bioproducts. *Algal Res.* 24, 261–264. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.04.002>
- Laurens, L.M.L., Nagle, N., Davis, R., Sweeney, N., Wychen, S. Van, Lowell, A., Pienkos, P.T., 2015. Acid-catalyzed algal biomass pretreatment for integrated lipid and carbohydrate-based biofuels production 17, 1145–1158. <https://doi.org/10.1039/C4GC01612B>
- Laurens, M., 2017. State of Technology Review – Algae Bioenergy | Bioenergy [WWW Document]. URL <http://www.ieabioenergy.com/publications/state-of-technology-review-algae-bioenergy/> (accessed 7.17.17).
- Lee, K.S., Park, M., Park, C.W., Kim, J.-D., 2017. Sustainable fabrication of nitrogen activated carbon from *Chlorella vulgaris* for energy storage devices. *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.* 529, 102–106. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.051>
- Lee, M., Den, W., 2016. Life cycle value analysis for sustainability evaluation of bioenergy products. *J. Clean. Prod.* 113, 541–547. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.073>
- López-Bellido, L., Wery, J., López-Bellido, R.J., 2014. Energy crops: Prospects in the context of sustainable agriculture. *Eur. J. Agron.* 60, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.07.001>
- Lundquist, T., Woertz, I., Quinn, N., Benemann, J., 2010. A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production. *Energy Biosci. Inst.* 1–178.
- Malczewski, J., 2004. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Prog. Plan.* 62, 3–65. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2003.09.002>
- Maranduba, H.L., Robra, S., Nascimento, I.A., da Cruz, R.S., Rodrigues, L.B., de Almeida Neto, J.A., 2015. Reducing the life cycle GHG emissions of microalgal biodiesel through integration with ethanol production system. *Bioresour. Technol.* 194, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.113>
- Martín, C., Moure, A., Martín, G., Carrillo, E., Domínguez, H., Parajó, J.C., 2010. Fractional characterisation of *Jatropha*, neem, moringa, trisperma, castor and candlenut seeds as potential feedstocks for biodiesel production in Cuba. *Biomass Bioenergy* 34, 533–538. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2009.12.019>
- Mateo, J.R.S.C., 2012. Multi-Criteria Analysis, in: *Multi Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry, Green Energy and Technology*. Springer, London, pp. 7–10. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2346-0_2
- Mathimani, T., Senthil Kumar, T., Chandrasekar, M., Uma, L., Prabakaran, D., 2017. Assessment of fuel properties, engine performance and emission characteristics of outdoor grown marine *Chlorella vulgaris* BDUG 91771 biodiesel. *Renew. Energy* 105, 637–646. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.12.090>
- McKone, T.E., Nazaroff, W.W., Berck, P., Auffhammer, M., Lipman, T., Torn, M.S., Masanet, E., Lobscheid, A., Santero, N., Mishra, U., Barrett, A., Bomberg, M., Fingerman, K., Scown, C., Strogon, B., Horvath, A., 2011. Grand Challenges for Life-Cycle Assessment of Biofuels. *Environ. Sci. Technol.* 45, 1751–1756. <https://doi.org/10.1021/es103579c>
- McManus, M.C., Taylor, C.M., Mohr, A., Whittaker, C., Scown, C.D., Borrion, A.L., Glithero, N.J., Yin, Y., 2015. Challenge clusters facing LCA in environmental decision-making—what we can learn from biofuels. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 1399–1414. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0930-7>
- Milledge, J.J., Heaven, S., 2013. A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 12, 165–178. <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9301-z>
- Mo, W., Soh, L., Werber, J.R., Elimelech, M., Zimmerman, J.B., 2015. Application of membrane dewatering for algal biofuel. *Algal Res.* 11, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.05.018>

- Mohr, A., Raman, S., 2013. Lessons from first generation biofuels and implications for the sustainability appraisal of second generation biofuels. *Energy Policy* 63, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.08.033>
- Morais, S., Martins, A.A., Mata, T.M., 2010. Comparison of allocation approaches in soybean biodiesel life cycle assessment. *J. Energy Inst.* 83, 48–55. <https://doi.org/10.1179/014426010X12592427712073>
- Mu, D., Min, M., Krohn, B., Mullins, K.A., Ruan, R., Hill, J., 2014. Life Cycle Environmental Impacts of Wastewater-Based Algal Biofuels. *Environ. Sci. Technol.* 48, 11696–11704. <https://doi.org/10.1021/es5027689>
- Mu, D., Ruan, R., Addy, M., Mack, S., Chen, P., Zhou, Y., 2017. Life cycle assessment and nutrient analysis of various processing pathways in algal biofuel production. *Bioresour. Technol.* 230, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.108>
- Natarajan, K., Latva-Käyrä, P., Zyadin, A., Pelkonen, P., 2016. New methodological approach for biomass resource assessment in India using GIS application and land use/land cover (LULC) maps. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 63, 256–268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.070>
- Nwokoagbara, E., Olaleye, A.K., Wang, M., 2015. Biodiesel from microalgae: The use of multi-criteria decision analysis for strain selection. *Fuel* 159, 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.074>
- Ogunniyi, D.S., 2006. Castor oil: A vital industrial raw material. *Bioresour. Technol.* 97, 1086–1091. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2005.03.028>
- Panwar, N.L., Shrirame, H.Y., Bamniya, B.R., 2010. CO₂ mitigation potential from biodiesel of castor seed oil in Indian context. *Clean Technol. Environ. Policy* 12, 579–582. <https://doi.org/10.1007/s10098-009-0269-5>
- Pate, R., Klise, G., Wu, B., 2011. Resource demand implications for US algae biofuels production scale-up. *Appl. Energy* 88, 3377–3388. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.023>
- Pate, R.C., 2013. Resource requirements for the large-scale production of algal biofuels. *Biofuels* 4, 409–435. <https://doi.org/10.4155/bfs.13.28>
- Patel, N.K., Shah, S.N., 2015. 11 - Biodiesel from Plant Oils, in: Ahuja, S. (Ed.), *Food, Energy, and Water*. Elsevier, Boston, pp. 277–307.
- Pawlowski, A., Mendoza, J.L., Guzmán, J.L., Berenguel, M., Acien, F.G., Dormido, S., 2014. Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based pH control for microalgae culture. *Bioresour. Technol.* 170, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.088>
- Peccia, J., Haznedaroglu, B., Gutierrez, J., Zimmerman, J.B., 2013. Nitrogen supply is an important driver of sustainable microalgae biofuel production. *Trends Biotechnol., Special Issue: Celebrating 30 years of biotechnology* 31, 134–138. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.01.010>
- Peña, R., Romero, R., Martínez, S.L., Ramos, M.J., Martínez, A., Natividad, R., 2009. Transesterification of Castor Oil: Effect of Catalyst and Co-Solvent. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 1186–1189. <https://doi.org/10.1021/ie8005929>
- Perimenis, A., Walimwipi, H., Zinoviev, S., Müller-Langer, F., Miertus, S., 2011a. Development of a decision support tool for the assessment of biofuels. *Energy Policy* 39, 1782–1793. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.011>
- Perimenis, A., Walimwipi, H., Zinoviev, S., Müller-Langer, F., Miertus, S., 2011b. Development of a decision support tool for the assessment of biofuels. *Energy Policy* 39, 1782–1793. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.011>
- Phan, A.N., Phan, T.M., 2008. Biodiesel production from waste cooking oils. *Fuel* 87, 3490–3496. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.07.008>
- Pires, J.C.M., 2017. COP21: The algae opportunity? *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79, 867–877. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.197>
- Pittman, J.K., Dean, A.P., Osundeko, O., 2011. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresour. Technol., Special Issue: Biofuels - II: Algal Biofuels and Microbial Fuel Cells* 102, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.035>
- Pokoo-Aikins, G., Nadim, A., El-Halwagi, M.M., Mahalec, V., 2010. Design and analysis of biodiesel production from algae grown through carbon sequestration. *Clean Technol. Environ. Policy* 12, 239–254. <https://doi.org/10.1007/s10098-009-0215-6>

- Portugal-Pereira, J., Nakatani, J., Kurisu, K., Hanaki, K., 2016. Life cycle assessment of conventional and optimised *Jatropha* biodiesel fuels. *Renew. Energy* 86, 585–593. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.046>
- Quinn, J.C., Davis, R., 2015. The potentials and challenges of algae based biofuels: A review of the techno-economic, life cycle, and resource assessment modeling. *Bioresour. Technol., Advances in biofuels and chemicals from algae* 184, 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.075>
- Quinn, J.C., Smith, T.G., Downes, C.M., Quinn, C., 2014. Microalgae to biofuels lifecycle assessment — Multiple pathway evaluation. *Algal Res., Progress and Perspectives on Microalgal Mass Culture* 4, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.11.002>
- Rajaeifar, M.A., Ghobadian, B., Safa, M., Heidari, M.D., 2014. Energy life-cycle assessment and CO₂ emissions analysis of soybean-based biodiesel: a case study. *J. Clean. Prod.* 66, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.041>
- Raman, J.K., Alves, C.M., Gnansounou, E., 2018. A review on moringa tree and vetiver grass – Potential biorefinery feedstocks. *Bioresour. Technol.* 249, 1044–1051. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.10.094>
- Ramírez-Verduzco, L.F., Rodríguez-Rodríguez, J.E., Jaramillo-Jacob, A. del R., 2012. Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition. *Fuel* 91, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.06.070>
- Ranjith Kumar, R., Hanumantha Rao, P., Arumugam, M., 2015. Lipid Extraction Methods from Microalgae: A Comprehensive Review. *Front. Energy Res.* 2. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00061>
- Rashid, U., Anwar, F., Moser, B.R., Knothe, G., 2008. Moringa oleifera oil: A possible source of biodiesel. *Bioresour. Technol.* 99, 8175–8179. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.066>
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B.P., Pennington, D.W., 2004. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environ. Int.* 30, 701–720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
- RED, 2009. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (Text with EEA relevance), 140.
- Reddy, M.P., Shah, M.T., Patolia, J.S., 2008. *Salvadora persica*, a potential species for industrial oil production in semiarid saline and alkali soils. *Ind. Crops Prod.* 28, 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.03.001>
- Ribeiro, P.R., de Castro, R.D., Fernandez, L.G., 2016. Chemical constituents of the oilseed crop *Ricinus communis* and their pharmacological activities: A review. *Ind. Crops Prod.* 91, 358–376. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.07.010>
- Rincón, L.E., Jaramillo, J.J., Cardona, C.A., 2014. Comparison of feedstocks and technologies for biodiesel production: An environmental and techno-economic evaluation. *Renew. Energy* 69, 479–487. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.058>
- Rogers, J.N., Rosenberg, J.N., Guzman, B.J., Oh, V.H., Mimbela, L.E., Ghassemi, A., Betenbaugh, M.J., Oyler, G.A., Donohue, M.D., 2014. A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. *Algal Res., Progress and Perspectives on Microalgal Mass Culture* 4, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.11.007>
- Rulli, M.C., Bellomi, D., Cazzoli, A., De Carolis, G., D’Odorico, P., 2016. The water-land-food nexus of first-generation biofuels. *Sci. Rep.* 6, 22521. <https://doi.org/10.1038/srep22521>
- Sahoo, K., Hawkins, G.L., Yao, X.A., Samples, K., Mani, S., 2016. GIS-based biomass assessment and supply logistics system for a sustainable biorefinery: A case study with cotton stalks in the Southeastern US. *Appl. Energy* 182, 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.114>
- Salian, K., Strezov, V., 2017. Biofuels From Microalgae, in: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10114-9>
- Sandin, G., Røyne, F., Berlin, J., Peters, G.M., Svanström, M., 2015. Allocation in LCAs of biorefinery products: implications for results and decision-making. *J. Clean. Prod.* 93, 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.013>

- Sarin, A., 2012. Biodiesel: Production and Properties. The Royal Society of Chemistry, United Kingdom.
- Sayre, R., 2010. Microalgae: The Potential for Carbon Capture. *BioScience* 60, 722–727. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.9>
- Scholz, V., da Silva, J.N., 2008. Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. *Biomass Bioenergy* 32, 95–100. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2007.08.004>
- Shonnard, D.R., Klemetsrud, B., Sacramento-Rivero, J., Navarro-Pineda, F., Hilbert, J., Handler, R., Suppen, N., Donovan, R.P., 2015. A Review of Environmental Life Cycle Assessments of Liquid Transportation Biofuels in the Pan American Region. *Environ. Manage.* 56, 1356–1376. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0543-8>
- Sialve, B., Bernet, N., Bernard, O., 2009. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnol. Adv.* 27, 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.03.001>
- Silva, A.G., Carter, R., Meress, F.L.M., Corrêa, D.O., Vargas, J.V.C., Mariano, A.B., Ordonez, J.C., Scherer, M.D., 2015. Life cycle assessment of biomass production in microalgae compact photobioreactors. *GCB Bioenergy* 7, 184–194. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12120>
- Simoni M. Plentz Meneghetti, *, †, Mario R. Meneghetti, †, Carlos R. Wolf, ‡, Eid C. Silva, †, Gilvan E. S. Lima, †, Laelson de Lira Silva, †, Tatiana M. Serra, †, Fernanda Cauduro, ‡ and, Oliveira ‡, L.G. de, 2006. Biodiesel from Castor Oil: A Comparison of Ethanolysis versus Methanolysis. <https://doi.org/10.1021/EF060118M>
- Singh, K., Kaloni, D., Gaur, S., Kushwaha, S., Mathur, G., 2017. Current research and perspectives on microalgae-derived biodiesel. *Biofuels* 0, 1–18. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1278932>
- Subramaniam, R., Dufreche, S., Zappi, M., Bajpai, R., 2010. Microbial lipids from renewable resources: production and characterization. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 37, 1271–1287. <https://doi.org/10.1007/s10295-010-0884-5>
- Tang, M., Zhang, P., Zhang, L., Li, M., Wu, L., 2012. A Potential Bioenergy Tree: *Pistacia chinensis* Bunge. *Energy Procedia*, 2012 International Conference on Future Energy, Environment, and Materials 16, 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.119>
- Tilman, D., Socolow, R., Foley, J.A., Hill, J., Larson, E., Lynd, L., Pacala, S., Reilly, J., Searchinger, T., Somerville, C., Williams, R., 2009. Energy. Beneficial biofuels--the food, energy, and environment trilemma. *Science* 325, 270–1. <https://doi.org/10.1126/science.1177970>
- Tomes, D., Lakshmanan, P., Songstad, D., 2010. *Biofuels: Global Impact on Renewable Energy, Production Agriculture, and Technological Advancements*. Springer.
- Trivedi, J., Aila, M., Bangwal, D.P., Kaul, S., Garg, M.O., 2015. Algae based biorefinery—How to make sense? *Renew. Sustain. Energy Rev.* 47, 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.052>
- Ullah, K., Ahmad, M., Sofia, Sharma, V.K., Lu, P., Harvey, A., Zafar, M., Sultana, S., Anyanwu, C.N., 2014. Algal biomass as a global source of transport fuels: Overview and development perspectives. *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.* 24, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.06.008>
- US EPA, O., 2015. Renewable Fuel Standard (RFS2): Final Rule Additional Resources.
- Vaknin, Y., Mishal, A., 2017. The potential of the tropical “miracle tree” *Moringa oleifera* and its desert relative *Moringa peregrina* as edible seed-oil and protein crops under Mediterranean conditions. *Sci. Hortic.* 225, 431–437. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2017.07.039>
- Varanda, M.G., Pinto, G., Martins, F., 2011. Life cycle analysis of biodiesel production. *Fuel Process. Technol.* 92, 1087–1094. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.01.003>
- Venteris, E.R., McBride, R.C., Coleman, A.M., Skaggs, R.L., Wigmosta, M.S., 2014. Siting Algae Cultivation Facilities for Biofuel Production in the United States: Trade-Offs between Growth Rate, Site Constructability, Water Availability, and Infrastructure. *Environ. Sci. Technol.* 48, 3559–3566. <https://doi.org/10.1021/es4045488>
- Voet, E. van der, Lifset, R.J., Luo, L., 2010. Life-cycle assessment of biofuels, convergence and divergence. *Biofuels* 1, 435–449. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.19>

- Weissman, J.C., Goebel, R.P., 1987. Design and Analysis of Microalgal Open Pond Systems for the Purpose of Producing Fuels: A Subcontract Report (No. SERI/STR-231-2840). Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA).
- White, R.L., Ryan, R.A., 2015. Long-Term Cultivation of Algae in Open-Raceway Ponds: Lessons from the Field. *Ind. Biotechnol.* 11, 213–220. <https://doi.org/10.1089/ind.2015.0006>
- Wigmosta, M.S., Skaggs, R.J., Venteris, E.R., Wang, M.Q., 2012. Renewable Diesel from Algal Lipids: An Integrated Baseline for Cost, Emissions, and Resource Potential from a Harmonized Model.
- Wijffels, R.H., Barbosa, M.J., 2010. An outlook on microalgal biofuels. *Science* 329, 796–9. <https://doi.org/10.1126/science.1189003>
- Williams, C.L., Dahiya, A., Porter, P., 2015. Chapter 1 - Introduction to Bioenergy, in: *Bioenergy*. Academic Press, Boston, pp. 5–36.
- Xu, L., (Wim) Brillman, D.W.F., Withag, J.A.M., Brem, G., Kersten, S., 2011. Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: Energy balance analysis. *Bioresour. Technol.* 102, 5113–5122. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.066>
- Yang, J., Xu, M., Zhang, X., Hu, Q., Sommerfeld, M., Chen, Y., 2011. Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: Water footprint and nutrients balance. *Bioresour. Technol.*, Special Issue: Biofuels - II: Algal Biofuels and Microbial Fuel Cells 102, 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.017>
- Yang, L., Takase, M., Zhang, M., Zhao, T., Wu, X., 2014. Potential non-edible oil feedstock for biodiesel production in Africa: A survey. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 38, 461–477. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.002>
- Yoo, G., Park, M.S., Yang, J.-W., 2015. Chapter 12 - Chemical Pretreatment of Algal Biomass, in: Pandey, A., Negi, S., Binod, P., Larroche, C. (Eds.), *Pretreatment of Biomass*. Elsevier, Amsterdam, pp. 227–258.
- Yue, D., You, F., Snyder, S.W., 2014. Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Comput. Chem. Eng.*, Selected papers from ESCAPE-23 (European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 23), 9-12 June 2013, Lappeenranta, Finland 66, 36–56. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.11.016>
- Zaimes, G.G., Khanna, V., 2014. The role of allocation and coproducts in environmental evaluation of microalgal biofuels: How important? *Sustain. Energy Technol. Assess.* 7, 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.01.011>
- Zhihao, M., Xiaoyu, Z., Junfa, D., Xin, W., Bin, X., Jian, W., 2011. Study on Emissions of a DI Diesel Engine Fuelled with Pistacia Chinensis Bunge Seed Biodiesel-Diesel Blends. *Procedia Environ. Sci.*, 2011 2nd International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering (CESCE 2011) 11, 1078–1083. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.163>
- Živković, S.B., Veljković, M.V., Banković-Ilić, I.B., Krstić, I.M., Konstantinović, S.S., Ilić, S.B., Avramović, J.M., Stamenković, O.S., Veljković, V.B., 2017. Technological, technical, economic, environmental, social, human health risk, toxicological and policy considerations of biodiesel production and use. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79, 222–247. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.048>
- Znad, H., Al Ketife, A.M., Judd, S., AlMamani, F., Vuthaluru, H.B., 2018. Bioremediation and nutrient removal from wastewater by *Chlorella vulgaris*. *Ecol. Eng.* 110, 1–7. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2017.10.008>