

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



Département de génie chimique

MEMOIRE DE MASTER

Thème :

**Analyse de cycle de vie du biodiesel issu
de l'huile de Cynara Cardunculus, L.**

Présenté par : MANSOURI Aboubaker

Soutenu le 14 Juin 2015 devant le jury :

Présidente	Mme DERRICHE Ratiba	Professeure ENP
Directeur	Mr AHMED ZAïD Toudert	Professeur ENP
Co-directeur	Mr AMOURI Mohammed	Chargé de recherche au CDER
Examinatrices	Mme HADDOUM Saliha	Maitre assistante classe A
	Mme MEFTI Afia	Maitre conférence classe A

Promotion : Juin 2015

الملخص:

تشكل الانبعاثات الناجمة عن حرق الوقود لمختلف الاستعمالات و في شتى ميادين هاجسا يهدد البيئة، زد على ذلك المستقبل الغامض للمحروقات، كل هذا خلق أرضية خصبة للبحث عن حلول و أنواع بديلة من الوقود. يتمثل هذه الأطروحة في عمل يهدف إلى دراسة إمكانية تحقيق مشروع إنتاج وقود حيوي انطلاقا من زيت نباتي (زيت الخرشف) مع مراعاة أسس التنمية المستدامة. الأطروحة قائمة على تحليل دورة حياة الوقود الحيوي بالاستناد على برنامج سيما برو لدراسة و تقييم الآثار و النتائج المحتملة خاصة المتعلقة بالجانب البيئي. **كلمات مفتاحية :** تحليل دورة حياة، الوقود الحيوي، الخرشف، سيما برو.

Résumé

Les émissions dues à l'utilisation plus en plus croissante de carburants représentent une vraie menace pour l'environnement. D'un autre côté, l'avenir incertain des carburants fossiles crée la nécessité de trouver d'autres carburants alternatifs plus respectueux de l'environnement.

L'objet de ce travail consiste à évaluer les impacts environnementaux de la chaîne de production du biodiesel issu de l'huile de cardon, une espèce pouvant être développée en Algérie. La méthodologie est basée sur l'analyse du cycle de vie du biocarburant à l'aide du logiciel Simapro 7.1.8.

Mots clés : Analyse de cycle de vie, Biodiesel, *cynara cardunculus L.*, SimaPro.

Abstract

Emissions from fuel's combustion are continuously rising and represent a major threat for the environment. In addition, the uncertain future of fossil fuels creates the need to find alternative and environmentally friendly energy sources.

This work aims to evaluate the environmental impacts of the biodiesel production chain from thistle oil taking into account the requirements of sustainable development. The method is based on life cycle analysis of the biofuel using SimaPro Software.

Key words : Life cycle assessment, Biodiesel, *cynara cardunculus*, SimaPro.

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur T. AHMED ZAYED, Directeur de mémoire, qui s'est toujours montré à l'écoute et disponible tout au long de ma démarche, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur M. AMOURI pour sa générosité et la disponibilité dont il a su faire preuve malgré ses charges académiques et professionnelles.

Je suis reconnaissant envers la professeure R. DERRICHE pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements aux docteurs A. MEFTI et S. HADDOUN pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Enfin, Je tiens à remercier vivement toutes les personnes auprès desquelles j'ai trouvé l'appui nécessaire pour l'élaboration du présent travail.

Dédicaces

Que ce travail témoigne de mes respects :

À ma mère, mon éternelle amour, la lumière de mes jours, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour vous exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance. Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et t'accorder la santé.

À mon père, aucune dédicace ne peut exprimer l'amour, et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut vos efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon cursus et ma formation.

A mon frère ZAKARIA, ma sœur RAHIL la plus belle femme au monde ainsi que ma tante SORAYA en témoignage de ma profonde gratitude pour votre encouragement et soutien

A mes grand-mères, mes tantes, cousins et cousines.

A toute la famille MANSOURI et BENDIB.

A mes amis ABDOU, RIYAD, MINOU, DJALIL, OMAR, HADI, OUSSAMA, MOHAMMED, MAHER, YOUNESS ... La liste est encore longue.

A BOUCHRA.

A mes formateurs, mes professeurs de l'Ecole Nationale Polytechnique d'ALGER ainsi que ceux de l'Ecole Préparatoire aux sciences et techniques d'ANNABA.

BAYKER

Sommaire

Remerciements	3
Dédicaces	4
Liste des figures.....	7
Liste des tableaux	9
Abréviations	10
Introduction générale.....	11
I. Méthodologie de l'analyse de cycle de vie	15
I.1. Introduction.....	15
I.2. Définition de l'ACV.....	15
I.3. Les différentes phases de l'ACV.....	17
I.3.1. Définition des objectifs et du champ de l'ACV	17
I.3.2. Inventaire des émissions et des extractions.....	18
I.3.3. Evaluation de l'impact de cycle de vie.....	20
I.3.4. L'interprétation.....	21
I.4. Les limites de l'ACV.....	22
II. Biodiesel	24
II.1. Introduction.....	24
II.2. Définition du biodiesel	24
II.2.1. La première génération de biodiesel	24
II.2.2. La deuxième génération de biodiesel.....	25
II.2.3. La troisième génération de biodiesel	25
II.3. La transestérification	25
II.4. Les caractéristiques techniques du Biodiesel.....	27
II.5. Production de biodiesel à partir d'huile de l'espèce <i>Cynara Cardunculus</i>	28
II.5.1. Préparation des matières premières	28
II.5.2. Extraction de l'huile.....	29
II.5.3. Conversion de l'huile en biodiesel.....	29
II.6. Limites de la production de biodiesel	29
II.6.1. Limites environnementales	29
II.6.2 Limites humaines et économiques	30
III. <i>Cynara Cardunculus</i>	32
III.1. Introduction	32
III.2. Origine.....	32
III.3. Description générale.....	32
III.4. Propriétés et composition	33
III.5. Caractères généraux du cardon.....	33

III.5.1. Ecologie.....	33
III.5.2. Plantation.....	34
III.5.3. Entretien	34
III.5.4. Récolte.....	35
III.6. Quelques caractéristiques de l’huile du cardon	35
III.7. Utilisation de l’huile du cardon	36
IV. Analyse de cycle de vie.....	38
IV.1. Introduction.....	38
IV.2. Définition des objectifs et du champ de l’ACV	39
IV.2.1. Définition de l'objectif de l'étude	39
IV.2.2. Définition de la portée de l'étude.....	39
IV.3. Inventaire de cycle de vie.....	42
IV.3.1. Activité agricole	42
IV.3.2. Extraction de l’huile	43
IV.3.3. Conversion de l’huile du cardon	43
V.4. Evaluation de l’impact de cycle de vie.....	45
V.4.1. Caractérisation intermédiaire.....	45
V.4.2. Caractérisation des dommages	46
IV.5. Interprétation des résultats	49
IV.5.1. L’étape prépondérante.....	49
IV.5.2. Les principaux contributeurs.....	49
IV.6 Etude de l’effet du rajout d’une extraction chimique au procédé de production	50
Conclusion générale	54
Bibliographie	56

Liste des figures

Figure I.1 : Les étapes du cycle de vie d'un produit	16
Figure I.2 : Phases de l'analyse du cycle de vie.....	17
Figure I.3 : Exemple d'un ensemble de processus unitaires dans un système	18
Figure I.4 : Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions sur les sujet à protéger d'après la norme ISO 14042.....	20
Figure I.5 : Structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie.....	21
Figure II.1 : Les réactions successives de la transestérification.....	26
Figure II.2 : Mécanisme de la réaction de transestérification d'huile végétale par le méthanol catalysée par une base.....	27
Figure III.1 : <i>Cynara cardunculus</i>	33
Figure III.2 : Les graines de <i>Cynara cardunculus</i>	33
Figure IV.1 : Les différents processus élémentaires de production du biodiesel à partir de l'espèce <i>Cynara cardunculus</i>	40
Figure IV.2 : Arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile de cardon.....	44
Figure IV.3 : Contribution des étapes de Production pour les Différentes Catégories d'impact intermédiaires.....	46
Figure IV.4 : Contribution des étapes de production sur les différentes catégories de dommages.....	47
Figure IV.5 : Contribution des différents intrants sur le changement climatique.....	47
Figure IV.6 : Contribution des différents intrants sur la santé humaine.....	48
Figure IV.7 : Contribution des différents intrants sur la qualité des écosystèmes.	48
Figure IV.8 : Contribution des différents intrants sur l'utilisation des ressources.....	48

Figure IV.9 : Arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile de cardon dans le cas de l'extraction chimique.....51

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Les différentes spécifications du biodiesel.....	28
Tableau II.2 : les propriétés du Biodiesel obtenu à partir de l'huile de <i>Cynara cardunculu</i>	29
Tableau III.1 : Propriétés de l'huile du cardon.....	35
Tableau IV.1 : Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de la culture du cardon.....	42
Tableau IV.2 : Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de l'extraction de l'huile des graines du cardon.....	43
Tableau IV.3 : Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de la conversion de l'huile du cardon en biodiesel.....	43
Tableau IV.4 : Caractérisation intermédiaire.....	45
Tableau IV.5 : Caractérisation des dommages.....	46
Tableau IV.6 : démonstration de l'effet de rajout de l'extraction chimique.....	52

Abréviations

ACV : Analyse du Cycle de Vie

ISO : International Standardization Organisation

LCI : Life Cycle Inventory

LCIA : Life Cycle Impact Assessment

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

COv : Composé organique volatil

NOx : Oxydes d'azote

SOx : Oxydes de soufre

GES : Gaz à Effet de Serre

B100 : Biodiesel pur

TAG : Triglycéride

DAG : Diglycéride

MAG : Monoglycéride

PNUE : Pour des Nations Unies pour l'Environnement

Introduction générale

La civilisation moderne dépend de plus en plus des énergies fossiles. Plus de 80 % de la demande énergétique mondiale est couverte par le pétrole, le charbon, le gaz naturel et récemment le gaz de schiste, ceci suscite une inquiétude grandissante tant sur le plan économique qu'environnemental, car ces ressources sont non-renouvelables.

Il y a une nécessité de se tourner vers d'autres sources alternatives plus respectueuses de l'environnement et aussi pour diminuer cette dépendance à l'égard des énergies fossiles.

Ainsi, de nombreuses études ont porté sur la comparaison entre les biocarburants et les carburants pétroliers équivalents (essence et diesel) afin d'évaluer le potentiel de réduction des émissions des gaz à effet de serre associées à l'usage des biocarburants.

Le biodiesel, avec ses caractéristiques techniques voisines de celle du gazole, présente des avantages certains : il est biodégradable et d'origine renouvelable, non toxique, et a un pouvoir lubrifiant supérieur à celui du carburant pétrolier, ce qui peut donc prolonger la vie du moteur. Par ailleurs, la production de biodiesel est une source de création d'emplois.

Néanmoins, il est important de noter que ce même biodiesel présente quelques inconvénients. En effet, son utilisation massive pourra accélérer la déforestation et engendrer une diminution des surfaces agricoles cultivées destinées aux besoins alimentaires des populations. En outre, la mise à contribution des huiles alimentaires dans la fabrication de biocarburants influence sérieusement les prix des denrées alimentaires.

Pour la production des biocarburants, il est nécessaire d'assurer une balance entre la culture agricole destinée à cette production et les besoins alimentaires de la population. Par ailleurs, il sera plus judicieux de valoriser le potentiel de cultures non alimentaires.

La présente étude a pour objectif de réaliser une analyse de cycle de vie des filières biodiesel à partir de l'espèce *Cynara cardunculus L.* Nous concentrerons notre travail plus précisément sur les bilans énergétiques et carboniques. Ce travail comptera quatre chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à la méthodologie de l'ACV.
- Au cours du deuxième chapitre nous nous intéresserons à la filière de production du biodiesel.
- Ensuite, dans le troisième chapitre nous donnerons un aperçu sur le carbon en présentant ses caractéristiques.

Introduction générale

- Le quatrième chapitre sera réservé à l'ACV du biodiesel produit à partir du *Cynara cardunculus* L. à l'aide du logiciel SimaPro qui permettra d'évaluer les impacts environnementaux liés à la production du biodiesel à partir de cette espèce.

Chapitre I :

Méthodologie de l'analyse de cycle de vie

I. Méthodologie de l'analyse de cycle de vie

I.1. Introduction

La durabilité est le principe clé pour une meilleure gestion de ressources naturelles. Elle implique l'efficacité opérationnelle et la réduction effective des impacts environnementaux et socio-économiques où toutes ces considérations sont interdépendantes

La méthodologie d'analyse du cycle de vie est devenue un outil incontournable pour la conception de produits plus respectueux de l'environnement (dont l'empreinte sera réduite par rapport à un produit similaire, présentant les mêmes fonctionnalités). Elle est devenue un outil de communication pour les entreprises engagées dans la démarche de développement durable, l'analyse du cycle de vie est actuellement en plein essor, favorisée entre autre par le développement de la normalisation internationale.

I.2. Définition de l'ACV

L'analyse de cycle de vie permet de quantifier et d'analyser de manière objective et de façon systématique et scientifique, les impacts d'un produit (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service voire d'un procédé), depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de fabrication, de distribution et d'utilisation comme le montre la figure I.1. L'ACV est connue sous le nom «la méthodologie du berceau à la tombe». [01]

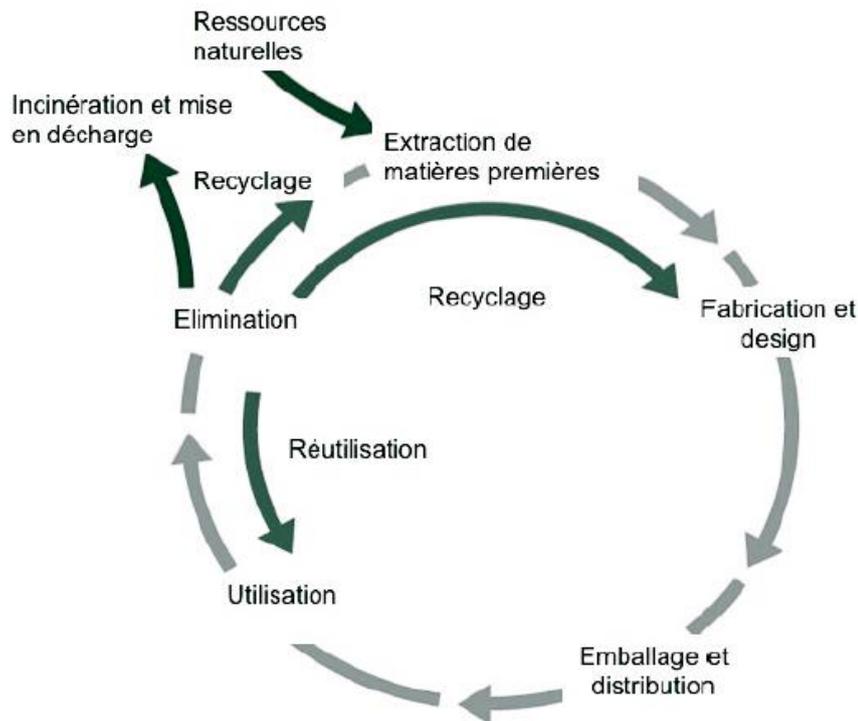


Figure I.1 : Les étapes du cycle de vie d'un produit. [02]

Le cadre méthodologique de l'ACV selon la norme ISO 14040 se compose de quatre phases :

- La définition de l'objectif et du champ de l'analyse.
- L'analyse de l'inventaire des émissions de polluants et d'extraction des matières premières (LCI).
- L'évaluation de l'impact du cycle de vie (LCIA).
- L'interprétation. [01]

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

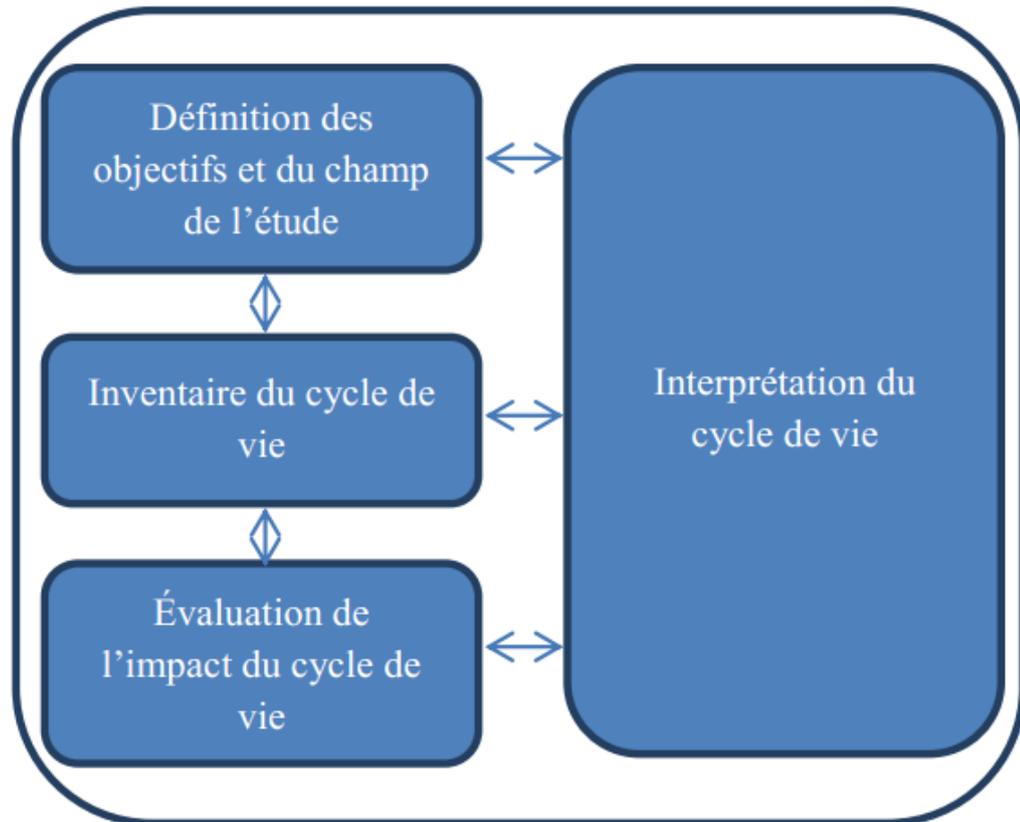


Figure I.2 : Phases de l'analyse du cycle de vie. [03]

I.3. Les différentes phases de l'ACV

I.3.1. Définition des objectifs et du champ de l'ACV

La définition des objectifs et du système est la première phase de l'ACV, cette phase consiste à préciser le système et délimiter ses frontières. Elle est impérative car elle débute par une description de l'étude permettant de poser le problème, de définir le type d'application de l'ACV effectuée, le public visé, les acteurs et le champ de l'étude.

I.3.1.1 Champ de l'étude

La définition du champ de l'étude d'une ACV doit décrire clairement les éléments suivants :

Le système de produit à étudier, les fonctions du ou des systèmes dans le cas d'études comparatives, l'unité fonctionnelle, la frontière du système, les règles d'affectation, la méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et les types d'impact, l'interprétation à utiliser, les exigences portant sur les données, les hypothèses, le choix de valeurs et les éléments facultatifs, les limitations, les exigences de qualité des données, le type de revue critique, le cas échéant, le type et le format du rapport spécifié pour l'étude.[03]

I.3.1.2 Unité fonctionnelle

C'est une unité de grandeur définie en cohérence avec les objectifs de l'étude, son rôle est d'offrir une référence à laquelle tous les flux de l'inventaire sont rapportés. En d'autre terme c'est la performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse de cycle de vie. [03]

I.3.1.3 Définition du système

Un système est plus que la somme de tous ses éléments, il doit être considéré dans sa totalité, sa complexité et sa dynamique [04]

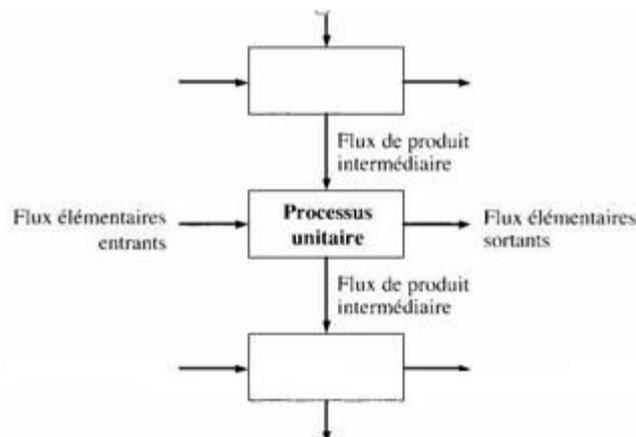


Figure I.3 : Exemple d'un ensemble de processus unitaires dans un système. [05]

I.3.1.4 Limites du système

La frontière du système est l'ensemble de critères qui spécifient les processus élémentaires faisant partie du système de produits.

I.3.2. Inventaire des émissions et des extractions

C'est la description quantitative des flux de matière, d'énergie et de polluants qui traversent les limites du système. Il regroupe, donc, les quantités de substances polluantes émises ainsi que les ressources extraites au cours du cycle de vie du produit ou du service analysé.

I.3.2.1. Collecte de données

Afin de pouvoir relier les processus unitaires aux flux élémentaires entrants et sortants, nous utilisons les facteurs d'émission et d'extraction qui fournissent la quantité de chaque substance émise ou extraite par unité d'intrant utilisé. Les données communiquant les quantités des intrants utilisés et des extrants obtenus ainsi que les valeurs des facteurs

d'émission et d'extraction peuvent provenir des partenaires industriels, de sites spécifiques, des organisations statistiques ou peuvent être trouvées dans la littérature.

Cependant, l'obtention de données d'inventaires de qualité avec une grande fiabilité et surtout régulièrement mises à jour n'est pas une chose évidente car elles doivent répondre à certaines exigences de qualité et doivent appartenir à un certain domaine de validité géographique et temporel.

En 1997, Coulon a analysé l'influence de la variation des données sur les résultats finaux. De plus, il existe des outils qui facilitent cette tâche, l'un d'eux est l'utilisation d'indicateurs de qualité de données qui, néanmoins, augmente considérablement l'effort dans la collecte et le traitement des données [06].

I.3.2.2. Les règles d'attribution

Lors de l'application de l'ACV aux systèmes complexes, il est possible de ne pas pouvoir traiter tous les charges environnementales et toutes les utilisations de matières premières. Les processus appartenant à ces systèmes aboutissent le plus souvent à des coproduits en plus du produit étudié. Dans ces cas, il est nécessaire de distribuer les entrées et les sorties du système entre tous les produits. La norme ISO 14044 (2006) [07] décrit l'attribution comme étant la distribution des flux d'entrée ou de sortie d'un processus ou d'un système de produit entre le système de produit à l'étude et un ou plusieurs systèmes de coproduits différents ". Les procédures d'allocation ont conduit à de nombreuses controverses qui peuvent influencer les résultats de l'ACV [08]. Ce problème peut être résolu de différentes manières. La norme ISO 14044 définit une hiérarchie de méthodes d'affectation.

Premièrement, elle préconise d'éviter l'allocation dans la mesure du possible et cela en :

- Divisant le processus global en plusieurs sous-processus de manière à ce que chaque processus est propre à l'un des coproduits obtenus et qu'il n'y ait pas d'interactions entre les différents sous-processus.
- Procédant à une expansion des frontières du système. Le but de repousser les limites du système est d'inclure les fonctions supplémentaires des coproduits dans un système équivalent.

Deuxièmement, la norme ISO 14044 recommande, lorsqu'il n'est pas possible d'éviter l'allocation, la répartition des matières premières et des émissions entre les différents coproduits en fonction des relations physiques ou autres arrangements qui existent entre eux.

Enfin, lorsqu'une relation physique ne peut pas être déterminée, la répartition peut se baser sur d'autres relations telles que la valeur économique des produits. Selon Weidema et ses collègues [9], l'allocation basée sur les relations économiques ne s'applique que dans l'ACV attributive.

I.3.3. Evaluation de l'impact de cycle de vie

L'évaluation de l'impact de cycle de vie sert à évaluer l'ordre de grandeur des impacts générés par les résultats de l'inventaire de cycle de vie.

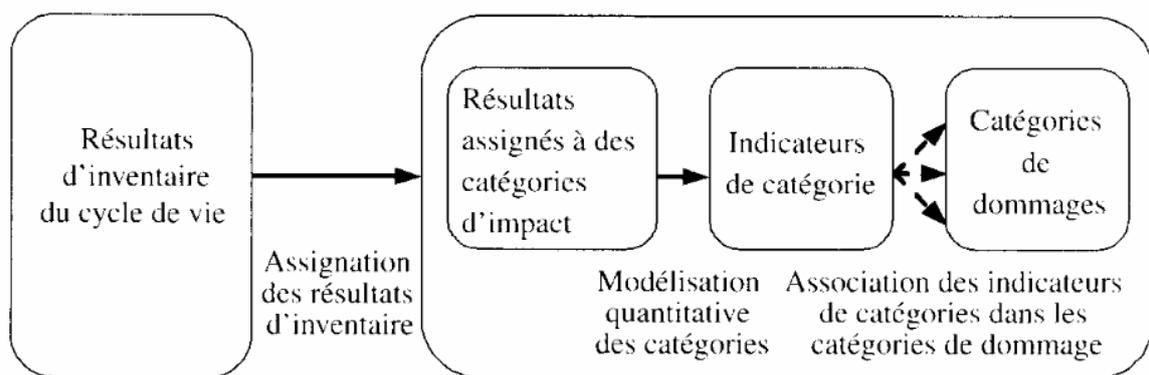


Figure I.4 : Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions sur les sujets à protéger d'après la norme ISO 14042 [03]

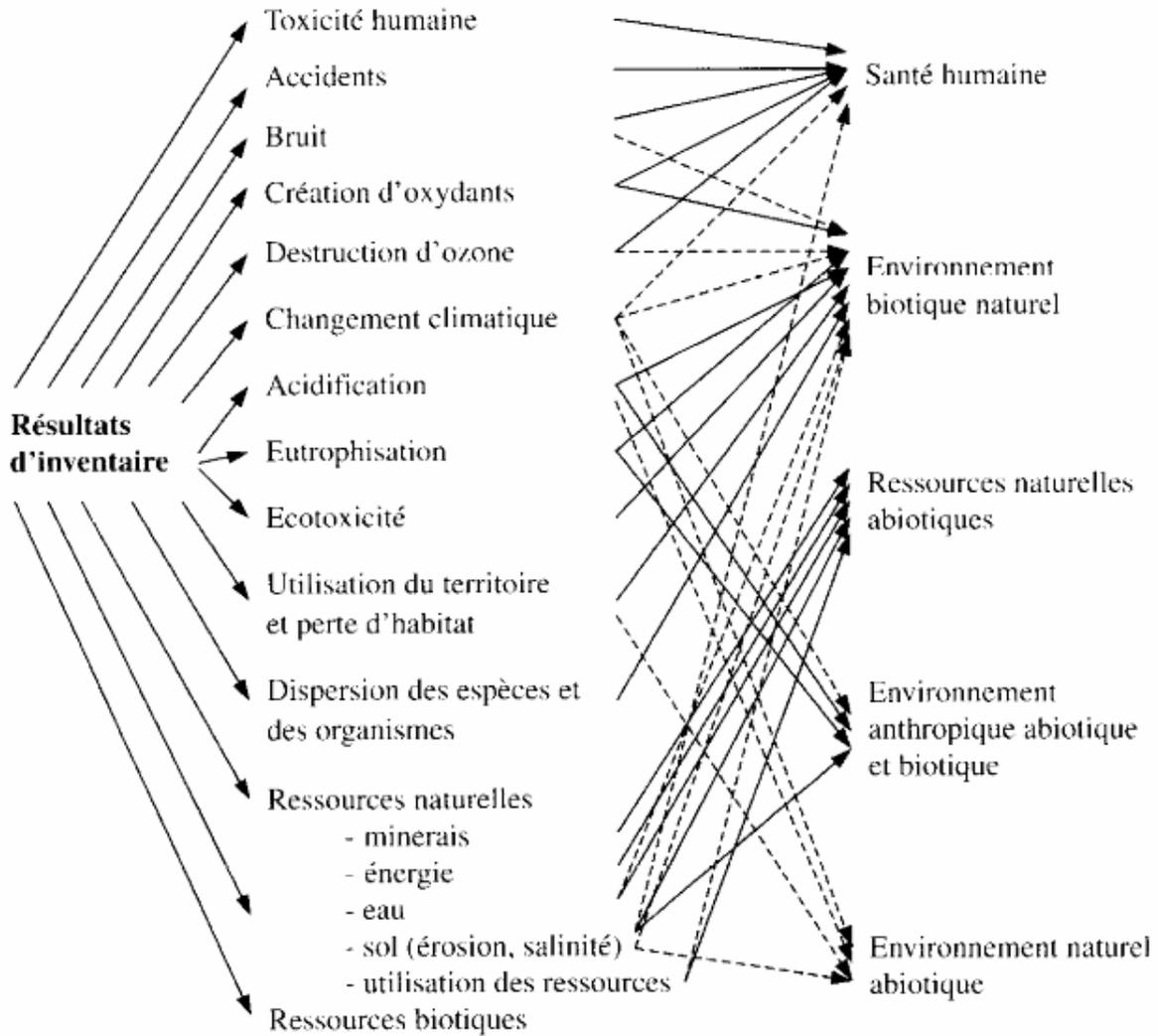


Figure I.5 : Structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie. [03]

1.3.4. L'interprétation

Cette étape permet aussi bien d'interpréter les résultats obtenus dans chacune des phases précédentes que d'évaluer les incertitudes. Les points clés et les options d'amélioration du produit étudié sont identifiés. Des études de propagation des incertitudes et des études de sensibilité sont effectuées pour dégager les paramètres les plus influents. L'incidence des limites de l'ACV et des hypothèses effectuées est analysée de manière critique. Cette dernière phase d'interprétation peut être complétée par la mise en relation des aspects environnementaux et des aspects économiques ou sociaux.

1.4. Les limites de l'ACV

Les principaux points faibles de la méthode n'ont pas changé depuis sa création ; ils concernent toujours la qualité et la disponibilité des données ainsi que la nécessité de poursuivre le développement des méthodes d'évaluation des impacts.

Pour les données à proprement parler, plusieurs problèmes peuvent se présenter lors de la réalisation de l'inventaire :

- Accessibilité des données : confidentialité, pas d'accès à des données expérimentales, etc.
- Peu de données informatisées uniformes ;
- Incertitude des données rarement connue.

La faible disponibilité et uniformité des données entraînent l'utilisation d'hypothèses et de modélisation pour combler ce manque. Des simplifications parfois non justifiables doivent être appliquées ce qui entraîne des incertitudes ainsi qu'une non-possibilité de transfert des résultats d'une étude à l'autre. La qualité des données étant le paramètre essentiel pour obtenir une étude du cycle de vie pertinente, des développements sont nécessaires afin de pouvoir accéder plus librement à l'information permettant la réalisation de l'inventaire du cycle de vie. [10]

Chapitre II : Biodiesel

II. Biodiesel

II.1. Introduction

Le biodiesel connaît un intérêt croissant ces dernières années. Cet engouement repose essentiellement sur son potentiel en terme ; de réduction de la consommation d'énergie non renouvelable, notamment le pétrole, et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour le secteur des transports.

On s'intéresse plus particulièrement aux plantes contenant des huiles et qui ne menacent pas les approvisionnements alimentaires (*Jatropha curcas*, *Cynara cardunculus*, microalgues, etc.).

II.2. Définition du biodiesel

Le biodiesel est un carburant biodégradable provenant de sources renouvelables. Il peut être obtenu par différents procédés tels que le craquage, l'estérification ou la transestérification. Il existe des dizaines d'espèces de plantes à partir desquelles on peut produire du biodiesel comme : le colza, le ricin, le tournesol et le soja entre autre. [11]

En terme général, le biodiesel est un carburant composé d'esters d'acides gras à longue chaîne dérivés d'huiles végétales ou de graisses animales.

Le biodiesel remplace tout ou bien une partie du gas-oil dans les moteurs automobiles diesel (camions, tracteurs, camionnettes, voitures, etc.) ou fixes (producteurs d'électricité, chaleur, etc.). Il peut être utilisé pur ou en mélange avec le diesel pétrolier à diverses proportions. Le mélange de 10% de biodiesel avec le diesel pétrolier est appelé B10 et ainsi de suite. Le biodiesel pur étant appelé B100.

On distingue trois générations de biodiesel :

II.2.1. La première génération de biodiesel

Le biodiesel de première génération est produit à partir d'amidon ou d'huile végétale provenant de graines de blé, de colza ou de tournesol...etc.

II.2.2. La deuxième génération de biodiesel

La production de la seconde génération du biodiesel peut être réalisée à partir d'une variété importante de cultures non alimentaires.

II.2.3. La troisième génération de biodiesel

Le biodiesel de troisième génération est principalement produit par des micro-algues. On distingue deux façons de les cultiver. D'une part avec des procédés dit « intensifs » où les micro-algues croissent dans des photo-bioréacteurs fermés où l'on contrôle les paramètres physico-chimiques et d'autre part, les procédés dit « extensifs » dans des bassins en extérieur. Le milieu de culture circule grâce à des roues à aubes. Les éléments nutritifs sont apportés de manière à garantir, dans les conditions standards, une croissance optimale des algues. Un bullage assure l'apport en CO₂. Ces systèmes, de part leur caractère ouvert, sont très sensibles à la contamination.

II.3. La transestérification

La transestérification est la technique classique de production de biodiesel. Elle constitue un procédé dans lequel les huiles végétales, les graisses animales ou les huiles à base de micro-algues sont mélangées à froid à un alcool (éthanol ou méthanol) en présence d'un catalyseur (généralement hydroxyde de sodium ou de potassium). Il s'agit de la réaction d'un ester sur un alcool pour donner un autre ester.

Etant donné que la réaction de transestérification est réversible, un excès d'alcool (éthanol, méthanol) est nécessaire pour déplacer l'équilibre de la réaction dans le sens de la production de l'ester, selon le principe de Le Chatelier.

La transformation des huiles ou des graisses en esters éthyliques ou méthyliques permet de réduire la masse moléculaire à un tiers de celle de l'huile, de réduire la viscosité, la densité et d'augmenter la volatilité. Les propriétés physiques des esters éthyliques et méthyliques obtenus lors de la réaction de transestérification sont alors proches de celles du diesel.

- Réaction de transestérification

La réaction de transestérification se fait en trois étapes successives comme le montre la figure II.1 :

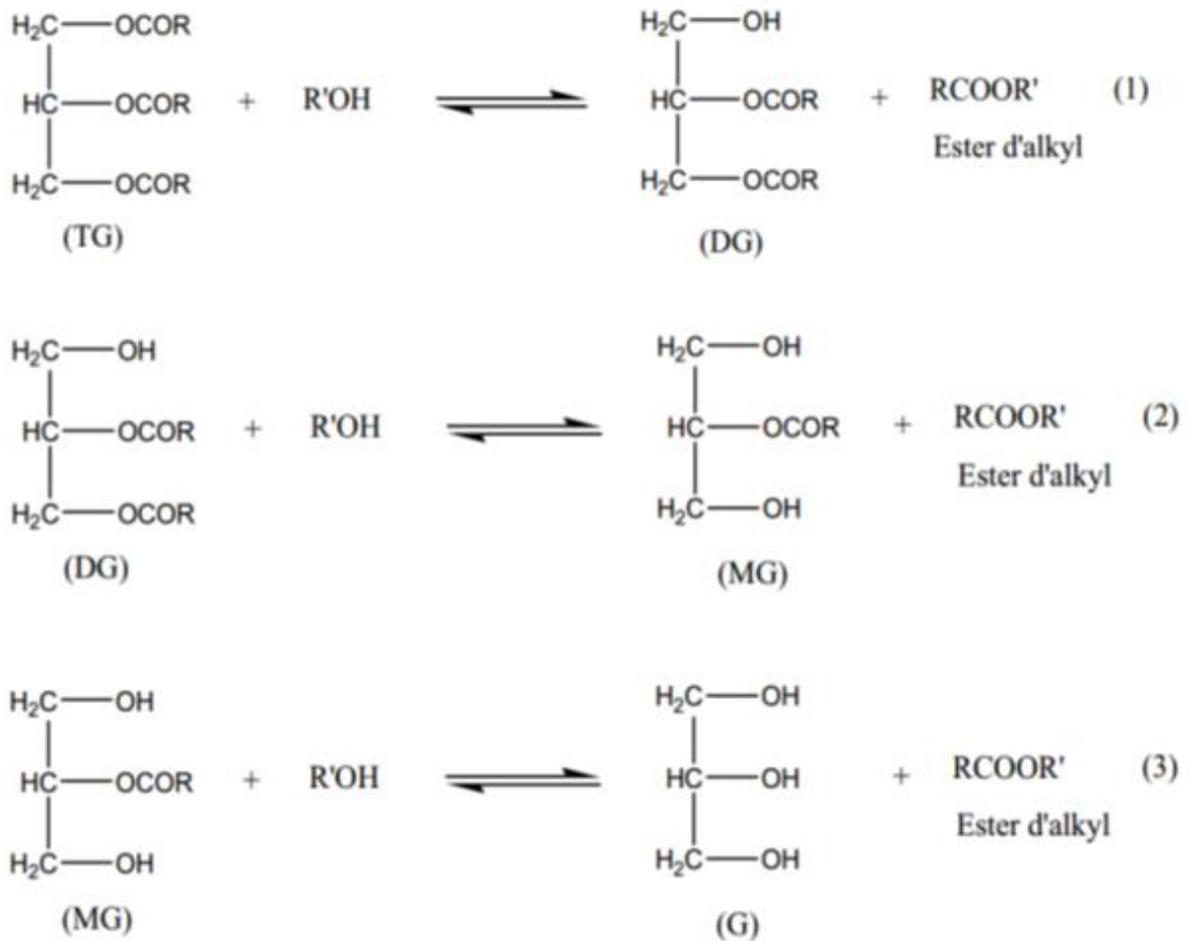


Figure II.1 : Les réactions successives de la transestérification. [12]

En catalyse basique, le mécanisme réactionnel est comme présenté sur la figure II.2 :

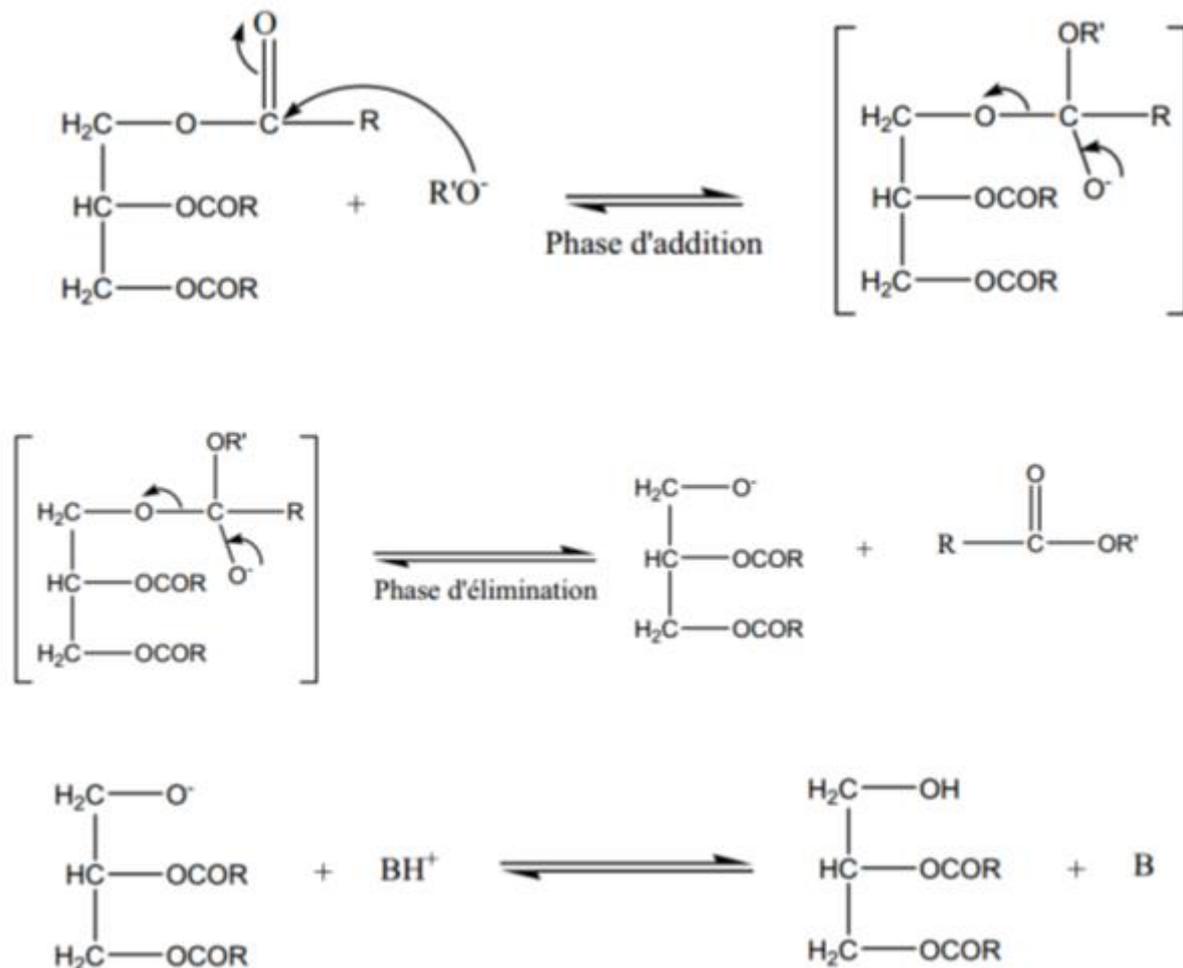


Figure II.2 : Mécanisme de la réaction de transestérification d'huile végétale par le méthanol catalysée par une base. [13]

Il consiste d'abord en une attaque nucléophile du carbonyle du TAG par l'anion alcoolate pour former un carbo-anion intermédiaire (phase d'addition) suivie d'un départ nucléophile lors du rabattement du doublet de l'oxygène (phase d'élimination). L'alcoolate est régénéré dès l'apparition d'une fonction alcoolate du glycérol. [14]

L'étape (3) de la réaction de la transestérification semble être l'étape déterminante de la réaction car les MAG sont des intermédiaires plus stables que les DAG. [15]

II.4. Les caractéristiques techniques du Biodiesel

Avec ses avantages importants, les distributeurs et les utilisateurs de biodiesel devraient également être au courant des spécifications qui régissent la qualité du biodiesel. Le tableau II.1 énumère ces différentes spécifications :

Tableau II.1 : Les différentes spécifications du biodiesel. [16]

	Méthode	Limites	Unités
eau et sédiment	ASTM D2709	0.05 max	% volume
Viscosité Cinématique à 40° C	ASTM D445	1.9-6.0	mm ² /s
Cendre Sulfatée	ASTM D874	0.02 max	% mass
Soufre			
Catégorie de S 15	ASTM D5453	0.0015 max	% mass
Catégorie de S 500	ASTM D5453	0.05 max	% mass
Corrosion de la bande de cuivre	ASTM D1 30	No 3 max	
Teneur en alcool			
Contenu en méthanol	EN 141 IO	0.20 max	% volume
Point éclair	D93	130 min	°C
Indice de cétane	ASTM D613	47 min.	
Point trouble	ASTM D2500	dépend du client	°C
Résidu De carbone	ASTM D4530	0.05 max	% mass
Indice d'acide	ASTM D664	0.50 max	mg KOH/g
Glycérine libre	ASTM D6584	0.02	% mass
Glycérine Totale	ASTM D6584	0.24	% mass
Phosphore	ASTM D495I	10 max	ppm
Point final de distillation sous vide	ASTM D1160	360 °C max	°C
Stabilité à l'oxydation	EN 14112	3 min	hours
Filtration « Cold Soak »	Annexe de D67Ī	360 max	seconds
Calcium et magnésium (combinés)	EN 14538	5 max	ppm
Sodium et Potassium (combinés)	EN14538	5 max	ppm

II.5. Production de biodiesel à partir d'huile de l'espèce *Cynara cardunculus*

II.5.1. Préparation des matières premières

Les fleurs du cardon sont soumises à un séchage dans une étuve thermo-ventilé à une température de 35°C. Ensuite, ces fleurs seront ouvertes manuellement et les graines obtenues seront sélectionnées en tenant compte de leur état de développement et de conservation. Les graines sont ensuite séchées dans un four pendant 2 h à une température de 35°C, puis broyées. [17]

II.5.2. Extraction de l'huile

Les graines sont soumises à un nettoyage et puis à un tri par taille et finissent par entrer dans une presse. L'huile sortant passe à travers un filtre simple dans un récipient où elle est pompée vers le réservoir de stockage. [17]

II.5.3. Conversion de l'huile en biodiesel

La conversion se fait à l'aide d'une réaction de transestérification dans un four à 65°C, avec une huile préalablement chauffée. Le catalyseur utilisé est l'hydroxyde de potassium (1% de la masse de l'huile). Le solvant choisi est le méthanol dans un rapport molaire de 6:1. À la fin, le mélange est séparé en deux phases par centrifugation, la phase supérieure étant le biodiesel. [18]

Tab II.2 : les propriétés du Biodiesel obtenu à partir de l'huile de *Cynara cardunculus*. [19]

Propriété	Valeur
Viscosité à 40 °C (mm ² /s)	3.56
Point de trouble (°C)	-1
Point d'écoulement (°C)	-3
Point d'éclair (°C)	175
Indice de cétane	51

II.6. Limites de la production de biodiesel

II.6.1. Limites environnementales

Un hectare de cardon cultivé produit 1000 kg de biodiesel. D'après des relevés de l'INSEE, la consommation mondiale de diesel est de l'ordre de 4 milliards de tonnes en 2010. Ainsi, si l'on voulait totalement remplacer le diesel par le biodiesel, il faudrait cultiver plusieurs milliards d'hectares alors que la surface cultivable de la Terre est de seulement 1,5 milliards d'hectares. Il est donc improbable que le biodiesel puisse remplacer un jour les carburants d'origine fossile.

Pour augmenter sa production de biodiesel, certains pays défrichent des forêts entières pour y cultiver les oléagineux. Au Brésil, par exemple, la forêt amazonienne a vu disparaître une surface égale à la Suisse. Ceci a un impact non négligeable sur le réchauffement climatique et la biodiversité. [20]

De plus, les cultures pour le biodiesel n'étant pas destinées à l'alimentation, on peut se permettre une utilisation intensive d'engrais et de pesticides pour obtenir un meilleur rendement. Ce qui a pour conséquence une pollution accrue des sols et de l'eau.

II.6.2 Limites humaines et économiques

Poussés par des subventions particulièrement incitatives de l'État sur les biocarburants, de plus en plus d'agriculteurs privilégient la production de colza, blé, tournesol...etc, destinée au biodiesel au détriment de la culture alimentaire. Ce qui réduit l'offre de nourriture pour la consommation à échelle du globe et contribue au renchérissement des matières premières agricoles. Ce qui a pour conséquence de rendre la situation des pauvres encore plus précaire. [20]

Chapitre III :

Cynara Cardunculus L.

III. *Cynara Cardunculus*

III.1. Introduction

L'instabilité des prix du pétrole, la baisse des réserves de pétrole et les changements climatiques nourrissent le débat sur l'énergie et encouragent les recherches visant à faire de la biomasse une source alternative aux combustibles fossiles. Ainsi, le cardon et le ricin constituent des candidats prometteurs pour l'utilisation de leurs huiles à grande échelle en tant que matières premières pour la production du biodiesel.

Ce chapitre présente les propriétés de cette plante et son potentiel en vue de leur utilisation en tant que matière première pour la production de biodiesel.

III.2. Origine

Le cardon (*Cynara cardunculus L.*) ou artichaut sauvage, est originaire de la région méditerranéenne, où il était connu par les anciens Egyptiens, les Grecs et les Romains. C'est une plante qui croît spontanément dans les pays côtiers de la Méditerranée. On peut aussi trouver des cultivars en Californie, au Mexique et dans les pays d'Amérique du Sud (Argentine, Chili et Uruguay) ou encore en Australie. [21]

III.3. Description générale

Les feuilles de la rosette sont pétiolées et très larges (Plus de 50cm x 35cm), de couleur verte lumineuse. L'intensité du caractère épineux change d'une variété à une autre. Les feuilles sur la tige sont alternées et sessiles.

La plante peut atteindre une hauteur de plus de 2m. Les fleurs sont groupées en grandes capitules globuleuses (jusqu'à 8 cm de diamètre). Les bractées varient de formes ovales à elliptique et peuvent être soit glaucescentes ou violacées. La corolle peut être bleue, lilas ou blanchâtre. Les akènes (6-8 mm × 3 – 4mm) sont brillants et tachés en brun. Les aigrettes peuvent mesurer 25-40mm. La figure III.1 éclaircit ce qui vient d'être dit. [21]



Figure III.1 : *Cynara cardunculus L.* [22]

III.4. Propriétés et composition

Le rendement des graines est d'environ 2640 kg / ha. Les graines sont riches en huile et en protéines : 25 % d'huile, 20 % de protéines. L'acide linoléique est le composant principal (59,0%), suivi par l'acide oléique (26,7%) et l'acide palmitique (10,7%). La graine du cardon contient également du Silymarin qui est une importante caractéristique d'un point de vue nutritionnel, car elle agit comme régénérateur pour les cellules hépatiques. [19]



Figure III.2 : Les graines de *Cynara cardunculus L* [27]

III.5. Caractères généraux du cardon

III.5.1. Ecologie

Le cardon est une espèce pérenne qui appartient à la famille des Astéracées. Durant son cycle naturel, la plante pousse en automne, passe sous forme de rosette en hiver,

développe une forme florale en printemps et qui sèche en été tandis que les racines restent en vie. A partir de l'automne, les bourgeons dans les parties supérieures des racines développent une nouvelle rosette pour continuer le cycle pour plusieurs années.

Grâce à son système racinaire profond, la plante est capable d'extraire de l'eau et des nutriments à partir de zones très profondes du sol.

Le cardon est une espèce caractéristique du climat méditerranéen. Quand elle est encore une jeune plante, elle est sensible au gel. Le gel peut provoquer des déchirures dans les feuilles ce qui conduit à leur mort, mais la plante reste en vie.

Pour une bonne croissance de la plante, la précipitation pendant l'automne, l'hiver et le printemps devrait être aux environs de 400 mm ou plus. Avec des niveaux plus bas de précipitation, la production de biomasse diminue sensiblement.

Cette espèce exige de la lumière ainsi que des sols profonds en calcaire, avec une capacité de conserver la pluie d'hiver et du printemps dans le sous-sol allant de 1 à 3m. Avant la plantation du cardon, un dressage adéquat selon la fertilité du sol est recommandé. [21]

III.5.2. Plantation

La plantation d'automne devra être faite dès que les conditions le permettent pour laisser la plante développer la rosette avant le premier gel (1 –2 mois, selon la vitesse de croissance). La culture du cardon peut tolérer des températures inférieures à -5°C une fois que les jeunes plantes ont quatre feuilles. La production est basse pendant la première année mais augmente au début de la deuxième année, atteignant un niveau régulier.

La plantation en printemps est recommandée pour les régions où les premiers gels d'automne sont très tôt. Dans ce cas, la plantation peut avoir lieu dès qu'il n'y ait plus de risque de gel.

Un espacement entre les lignes de 1 m doit être respecté, bien que cette distance puisse changer selon la densité désirée, ceci implique 3 à 4 kg de graines par hectare. La densité optimale pourrait s'élever à 10.000 plantes/ha. Cette valeur peut être augmentée jusqu'à 15.000 plantes/ha si la terre est fraîche et ne manque pas d'eau, ou revue à la baisse soit 7500 plantes/ha si la réserve d'eau d'hiver est trop basse. [21]

III.5.3. Entretien

Les mauvaises herbes peuvent être contrôlées à l'aide d'herbicides (triéthylène, alachlor, linuron, etc...) ou par deux passages avec un cultivateur jusqu'à ce que les rosettes aient couvert toute la surface du sol. Cette tâche est très importante pendant la première année de l'établissement de la culture c'est-à-dire, pendant la germination et le développement

des jeunes plantes car plus les rosettes continuent leur croissance plus elles couvrent le sol rendant plus dur le développement des mauvaises herbes.

Parmi les parasites principaux qui pourraient attaquer le cardon, on peut citer : le foreur de tige (*Gortynaxantenes*), le foreur de feuille (*Apion carduorum*), ainsi que plusieurs mouches (*Agromyza, Terellia.*) et mites (*Pyrameiscardui*). Ils peuvent être traités avec des insecticides. [21]

III.5.4. Récolte

La production de biomasse du cardon dépend principalement de la disponibilité de l'eau durant la période de croissance (printemps). Pour une précipitation moyenne de 450 mm, le rendement moyen de biomasse exploitable est estimé à environ 20 t / ha / an de matière sèche. Au moment de la récolte, la teneur en humidité de la biomasse est plutôt faible (10-15 pour cent), car la récolte a lieu lorsque la biomasse est sèche.

Dans les régions méditerranéennes, les capitules sont souvent récoltés séparément des feuilles, des tiges et des branches avec une moissonneuse. [21]

III.6. Quelques caractéristiques de l'huile du cardon

Le tableau III.1 donne un petit aperçu des propriétés caractérisant l'huile du cardon.

Tableau III.1 : Propriétés de l'huile du cardon. [23]

Caractéristiques	valeur
Densité (g/mL)	0.916
Viscosité (mm ² /s at 20°C)	95
Point de fusion (°C)	-21
Chaleur latente (MJ/kg)	32.99
Indice de cétane	51
Point de flash (°C)	350
L'indice d'iode	125
Indice de saponification	194

III.7. Utilisation de l'huile du cardon

L'huile est facilement extraite par application d'une pression à (20-25 °C). Les composants d'huiles n'étant pas altérés par cette pression, elle est très utilisée en diététiques. Les caractéristiques les plus importantes sont son indice de cétane élevé et son faible point de congélation, ce qui est crucial pour une utilisation comme carburant du moteur. La biomasse sèche peut être brûlée pour produire de la chaleur et de l'électricité avec une capacité calorifique de 16,7 MJ/kg. [21]

Chapitre IV :

Analyse de cycle de

vie

IV. Analyse de cycle de vie

IV.1. Introduction

Confrontés au réchauffement climatique, la consommation de l'énergie dans le secteur des transports est définie comme une priorité pour de nombreux gouvernements. Bien plus qu'une affaire écologique, l'essor du biodiesel compte parmi les enjeux économiques, politiques et éthiques les plus controversés du moment.

Néanmoins, le biodiesel n'est pas aussi vert que ça. En effet, jusqu'à une date récente, un bon nombre d'experts caressaient l'idée que le biodiesel était la solution au changement climatique car il émettait de plus faibles quantités de gaz à effet de serre que le diesel d'origine fossile. Cependant, une étude menée en 2009 par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) nous apprend que la production et l'utilisation de biodiesel à partir d'huile de palme peut conduire en revanche à d'importantes augmentations des émissions de gaz à effet de serre ; principalement en raison des rejets de carbone dans les sols et les terres.

Ainsi, l'essor des biocarburants n'est pas forcément équivalent à la diminution des gaz à effet de serre. En effet, l'agriculture est actuellement l'une des activités économiques qui génère le plus de gaz à effet de serre. La riziculture, par exemple, émet de grandes quantités de méthane. Le labourage expose l'humus à l'air, ce qui conduit à une oxydation accélérée du carbone du sol. Les engrais chimiques dégagent quant à eux d'importantes quantités d'oxyde d'azote lors de leur épandage sur les sols et l'usage des carburants fossiles pour transporter les intrants produit aussi du CO₂.

Face à cette réalité, une analyse de cycle de vie pour examiner les performances énergétiques et environnementales d'une filière de biodiesel pourra servir d'outil d'aide à la prise de décision quant au choix du biodiesel au détriment du diesel pétrolier.

L'objectif principal de cette analyse du cycle de vie est d'évaluer les performances environnementales d'une filière de production du biodiesel produit à partir de la culture de l'espèce *Cynara cardunculus* en Algérie sous les conditions locales.

IV.2. Définition des objectifs et du champ de l'ACV

IV.2.1. Définition de l'objectif de l'étude

IV.2.1.1. Application envisagée

Obtenir le profil environnemental potentiel de la chaîne de production du biodiesel à partir d'huile de *Cynara cardunculus L.*

IV.2.1.2. Le public ciblé

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

IV.2.2. Définition de la portée de l'étude

IV.2.2.1. Définition de la fonction du produit

Le produit étudié sert de carburant pour les véhicules fonctionnant avec des moteurs diesel, sans nécessité de modification.

IV.2.2.2. Définition de l'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle choisie est 1 tonne par hectare de biodiesel produit.

IV.2.2.3. Définition et modélisation du système étudié

La figure IV-1 donne un aperçu sur les différents processus élémentaires du système de production du biodiesel à partir du cardon.

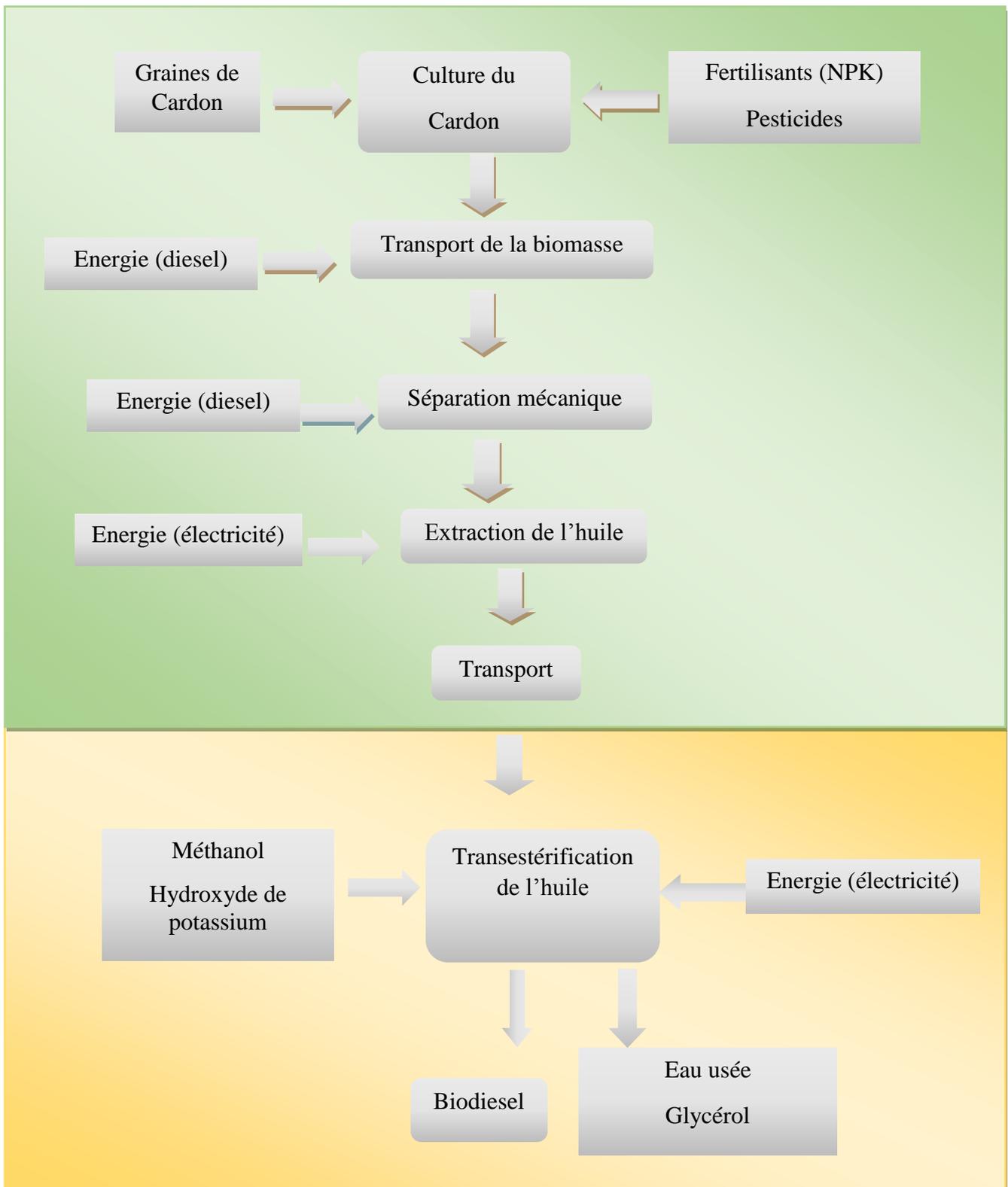


Figure IV-1 : Les différents processus élémentaires de production du biodiesel à partir de l'espèce *Cynara cardunculus L.*

IV.2.2.4. Définition des limites du système

Les limites du système déterminent les processus unitaires qui seront inclus dans l'ACV et le niveau de détail qui sera considéré.

Limites du procédé

Pour l'obtention du biodiesel, nous tiendrons compte des phases suivantes dans notre étude : la phase agricole, le processus d'extraction de l'huile, la conversion au biodiesel. L'extraction, le transport et l'utilisation des matières premières ainsi que l'approvisionnement énergétique sont des éléments pris en compte dans les limites du procédé. Il s'agit donc d'une analyse « de la plante à la pompe » ou encore « du berceau à la porte de l'usine (From cradle to Gate)

Limites géographiques

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

Étapes exclus de l'analyse

Pour cette étude, les charges environnementales relatives aux infrastructures (occupation du sol, utilisation des matériaux de construction et leurs devenir après démantèlement des installations) et à la production de machines nécessaires pour la production du biodiesel ont été exclues de l'analyse en raison de leur très faible contribution au bilan global, moins de 1%. [24]

IV.2.2.5. Catégories d'impact prises en compte

Pour l'évaluation des différents impacts on considère les catégories d'impact suivantes : épuisement des ressources abiotiques et biotiques, perte de biodiversité, changement climatique, diminution d'ozone stratosphérique, toxicité humaine, écotoxicité, formation d'oxydants photochimiques, acidification, eutrophisation, utilisation de l'énergie non renouvelable.

IV.2.2.6. Les exigences de qualité des données utilisées

Dans la mesure du possible, on utilise les données nationales recueillies dans la littérature. Dans le cas où aucune donnée n'est disponible pour un processus donné on fait appel aux informations déjà publiées, pourvu qu'elles soient récentes, de préférence dans des zones ayant des caractéristiques comparables à celles caractérisant notre pays. Dans le cas où les données ne sont toujours pas trouvées et que le processus en question est secondaire et ne

Chapitre IV : Analyse de cycle de vie

génère pas beaucoup de charges environnementales, on préfère supprimer carrément ce processus unitaire du système étudié. Nous pouvons également émettre des hypothèses et travailler sur la base de ces hypothèses.

IV.2.2.7. Les hypothèses adoptées

- Le rendement de graines par hectare est de 2 tonnes pour le cardon. [19]
- La culture du Cardon est conduite dans des systèmes de production non irrigués.
- Les travaux du sol sont mécanisés.
- La teneur de la graine en huile est de 25%. [21]
- La production d'un litre de biodiesel nécessite un litre d'huile de Cardon.
- Le transport des matériaux est supposé ne pas excéder les 100 km puisque on suggère que le développement d'une filière de production de biodiesel s'établisse à l'échelle régionale.

IV.3. Inventaire de cycle de vie

IV.3.1. Activité agricole

Les données présentes dans le tableau IV.1 sont rapportées à 1 ha.

Tableau IV.1 : Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de la culture du cardon.

Type d'input	Nomenclature		Unité	Quantité	Références
Chimique	Pesticides		Kg	0.21	[25]
	Herbicides		Kg	1.9	
	Fertilisant (NPK)	N	Kg	13.5	
		P		26.8	
K		40.15			
Energie	Travail du sol	Labour	L	48	
		Reprise		6.5	
		Bêchage		6.5	
		semis		6.5	
	Récolte (diesel)		Kg	37.91	
Transport	Carburant (diesel)		Kg	19.457	[25]
Séquestration de CO ₂			Kg	2895.2	[25]

Chapitre IV : Analyse de cycle de vie

IV.3.2. Extraction de l'huile

Les données présentes dans le tableau IV.2 sont rapportées à 1 tonne de d'huile de cardon.

Tableau IV.2 : Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de l'extraction de l'huile des graines du cardon.

Type d'intrant	Nomenclature	Unité	Quantité	Références
Energie	Séparation mécanique	MJ	19.96	[25]
	Extraction		181.03	

IV.3.3. Conversion de l'huile du cardon

Les données présentes dans le tableau IV.3 sont rapportées à 1 tonne du biodiesel produit.

Tableau IV.3 : Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de la conversion de l'huile du cardon en biodiesel.

Type d'input	Nomenclature	Unité	Quantité	Références
Chimique	L'hydroxyde de potassium	Kg	3.32	[25]
	Méthanol	Kg	62.36	
Energie	Electricité	MJ	55.7	[25]
	Vapeur d'eau	Kg	107.47	

La figure IV.2 ci-dessous montre l'arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel à partir de l'huile de cardon.

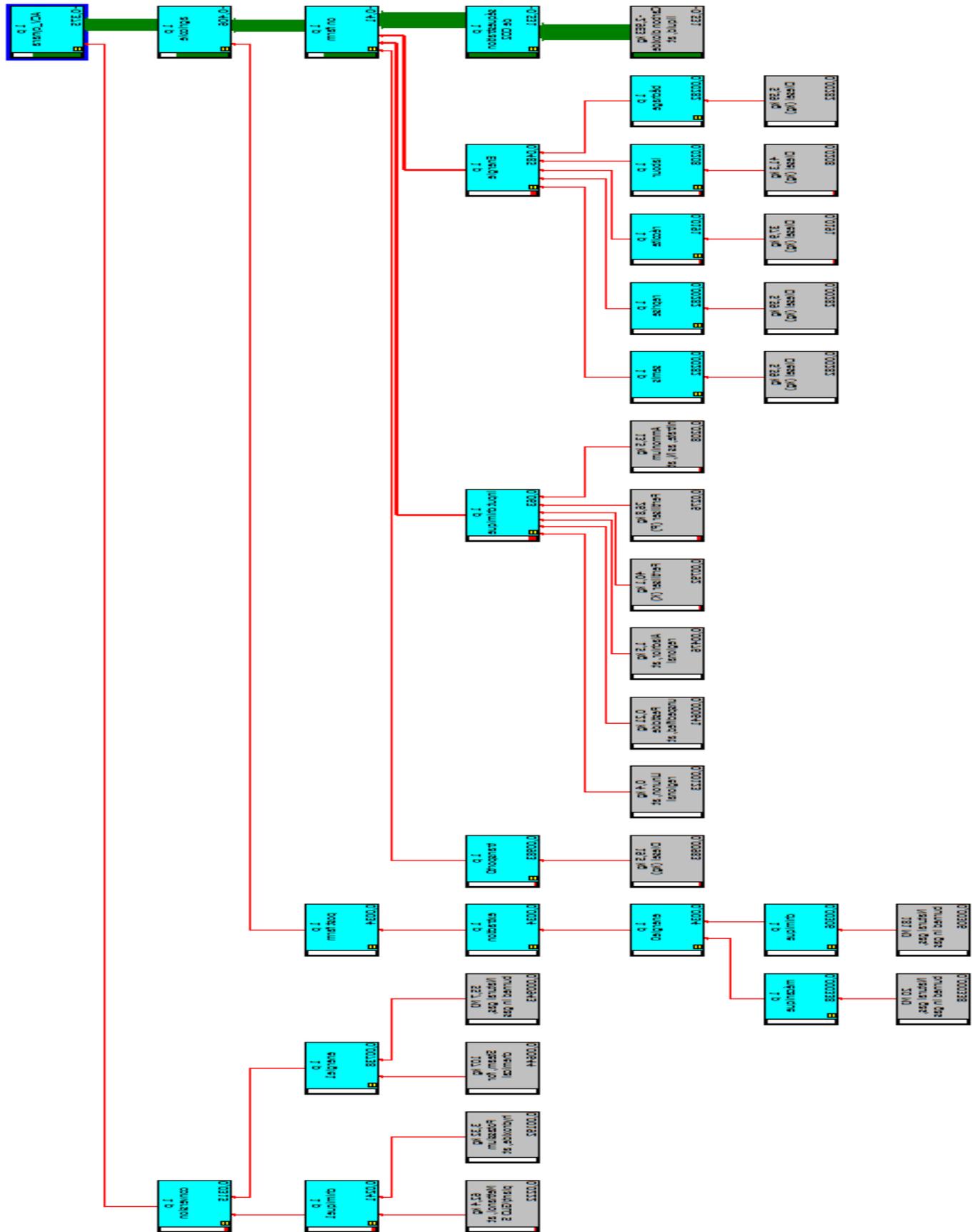


Figure IV-2 : Arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile de cardon

V.4. Evaluation de l'impact de cycle de vie

V.4.1. Caractérisation intermédiaire

A ce stade, seuls les résultats de trois catégories seront étudiés :

- Le changement climatique
- La consommation d'énergie non renouvelable
- Eutrophisation.

La méthode utilisée pour l'évaluation des impacts du cycle de vie est IMPACT 2002+. La contribution de chaque étape de la production du biodiesel à partir de l'huile de cardon dans chacune des catégories d'impact intermédiaire est présentée dans le tableau IV.4 et la figure IV.3.

Tableau IV.4 : Caractérisation intermédiaire

Catégorie d'impact	unité	Total	agricole	conversion
Effet Carcinogènes	kg C2H3Cl eq	-19,95	-20,87	0,92
Effet Non- Carcinogènes	kg C2H3Cl eq	-16,30	-16,51	0,22
Formation de photo-oxydants	kg PM2.5 eq	-0,65	-0,68	0,03
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	-58376,72	-59057,90	681,18
Radiations ionisantes	Bq carbone-14	0,00	0,00	0,00
Effet respiratoire	kg C2H4 eq	0,35	0,32	0,03
Ecotoxicité Aquatique	kg TEG	-25729,90	-29017,92	3288,02
Ecotoxicité terrestre	kg TEG	-13968,66	-14601,96	633,30
Acidification et eutrophication terrestre	kg SO2 eq	-8,40	-9,06	0,66
Occupation des sols	m2org.arable	-7,13	-7,24	0,11
Acidification Aquatique	kg SO2 eq	-3,44	-3,62	0,18
Eutrophication Aquatique	kg PO4	-0,04	-0,04	0,00
Changement climatique	kg CO2 eq	-1501,37	-1576,90	75,53
Energie primaire non renouvelable	MJ	-20202,07	-23279,56	3077,49
Extraction de minerais	MJ surplus	-59,27	-59,57	0,30

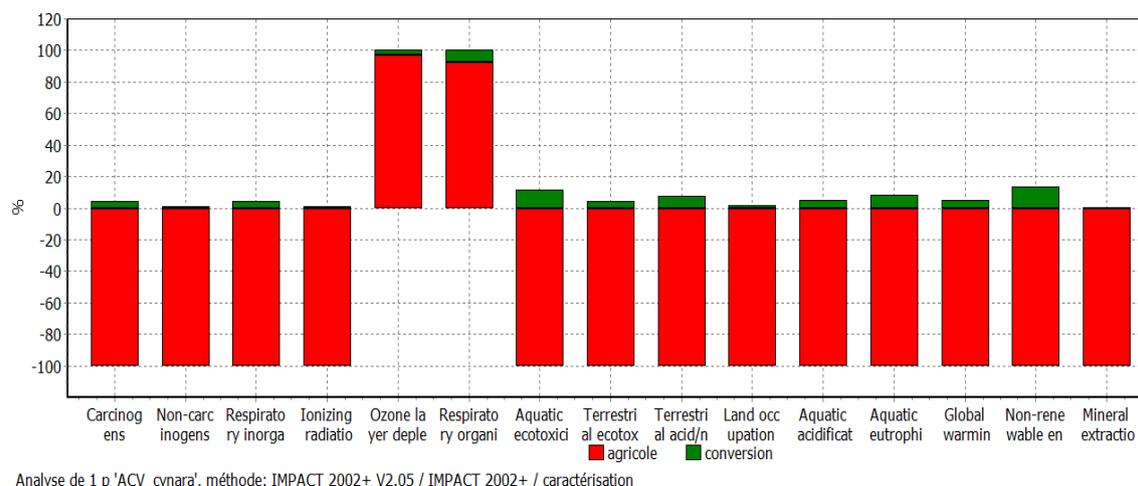


Figure IV-3 : Contribution des étapes de Production pour les Différentes Catégories d'impact intermédiaires

V.4.2. Caractérisation des dommages

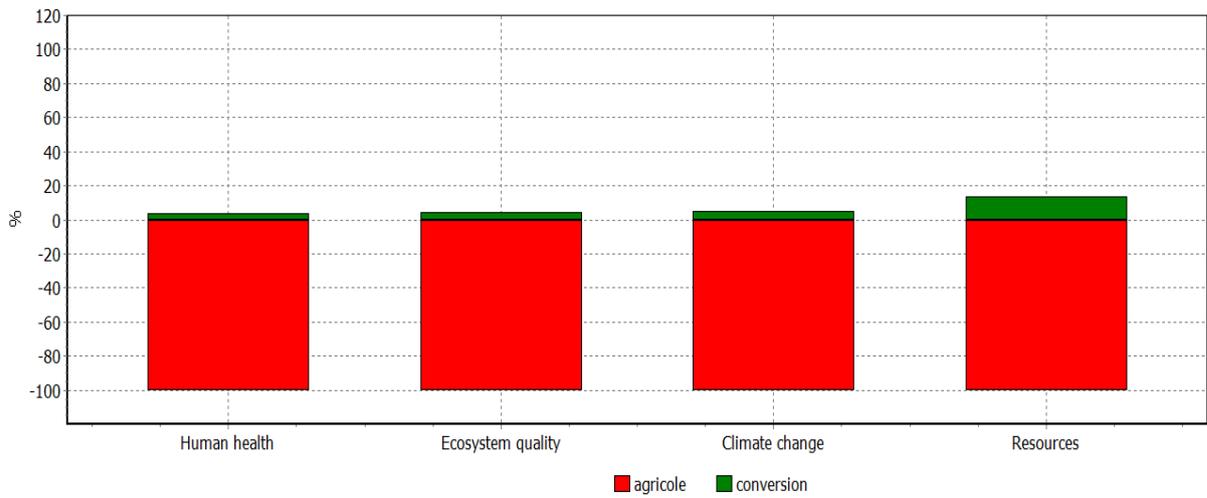
La méthode IMPACT 2002+, effectue une étape de caractérisation des dommages qui permet de niveler les impacts en 4 catégories:

- La santé humaine
- La qualité des écosystèmes
- Le changement climatique
- Les utilisations des ressources

La contribution de chaque étape de la production du biodiesel à partir de l'huile de colza dans chacune des catégories d'impact intermédiaire est présentée dans le tableau IV.5 et la figure IV.4.

Tableau IV.5 : Caractérisation des dommages.

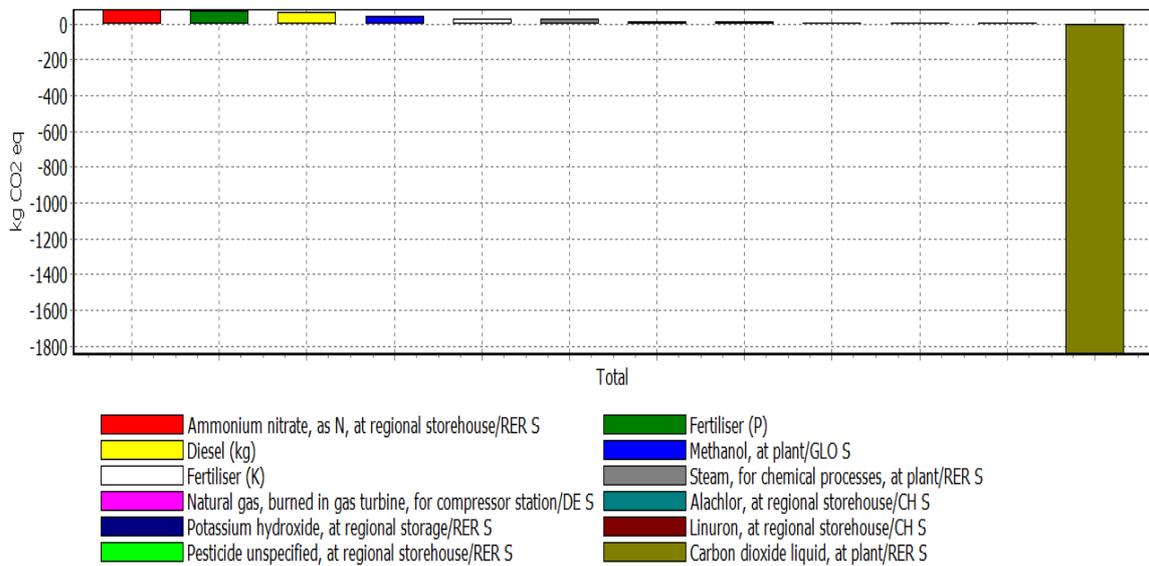
Catégorie de dommages	Unité	Total	agricole	conversion
Santé humaine	DALY	-0,00057	-0,00059	2,26.10 ⁻⁰⁵
Qualité d'écosystème	PDF*m2*yr	-128,29	-134,27	5,979464
Changement de climat	kg CO2 eq	-1501,37	-1576,9	75,52749
Ressources	MJ primary	-20261,3	-23339,1	3077,793



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

Figure IV.4 : Contribution des étapes de production sur les différentes catégories de dommages

Les contributions des différents intrants dans les différentes catégories de dommages sont présentées sur les figures suivantes :



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

Figure IV.5 : Contribution des différents intrants sur le changement climatique.

Chapitre IV : Analyse de cycle de vie

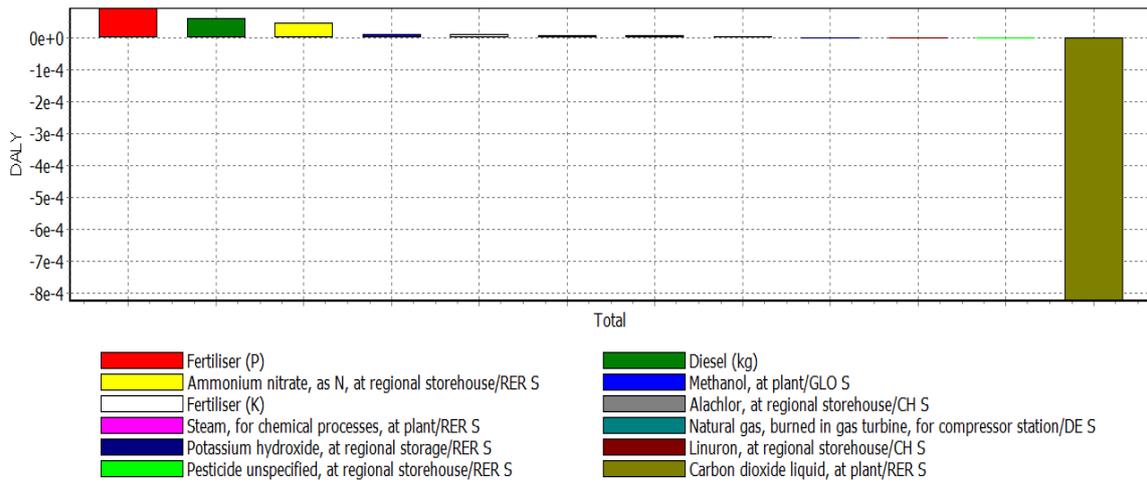


Figure IV.6 : Contribution des différents intrants sur la santé humaine

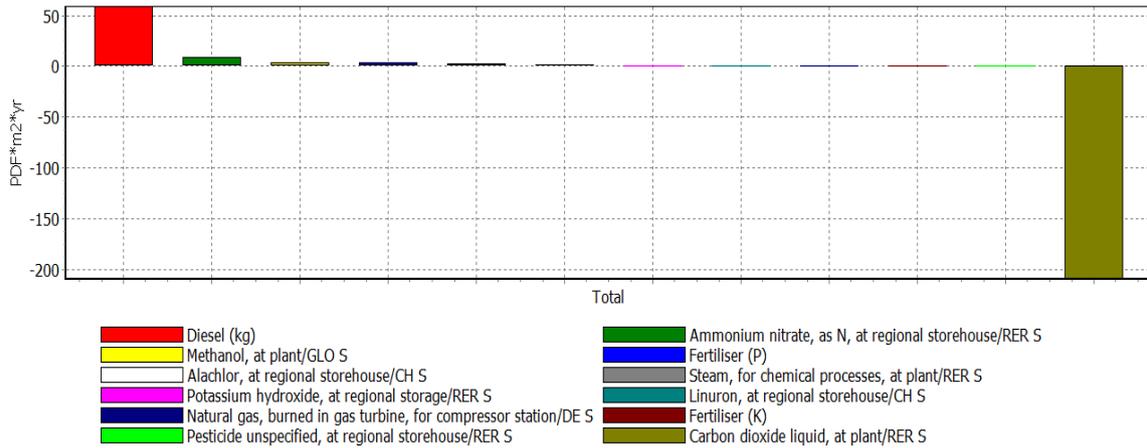


Figure IV.7 : Contribution des différents intrants sur la qualité des écosystèmes.

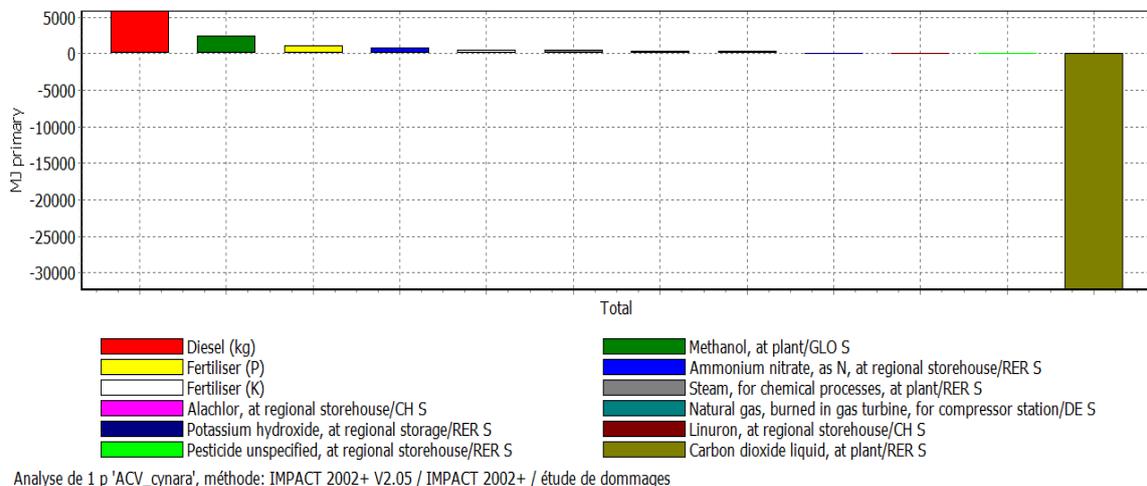


Figure IV.8 : Contribution des différents intrants sur l'utilisation des ressources.

IV.5. Interprétation des résultats

A l'aide des résultats obtenus, la contribution de chacune des étapes considérées pour la production du biodiesel dans les différentes catégories d'impact est calculée. Le profil environnemental montre que la phase agricole est l'étape prépondérante dans quasiment toutes les catégories comme le montre les figures IV.3 et IV.4.

IV.5.1. L'étape prépondérante

IV.5.1.1. Changement Climatique

Dans la catégorie du changement climatique la contribution prépondérante est l'étape agricole ou l'indicateur CO₂ éq a la plus grande valeur : Cette valeur est attribuée à des émissions liées à la combustion de combustibles fossiles, la fabrication d'engrais surtout l'azote, ainsi que les émissions associées à l'utilisation des machines agricoles.

IV.5.1.2. Consommation d'énergie non renouvelable

La catégorie d'impact de la consommation d'énergie non renouvelable indique que son plus grand participant est l'étape de la culture des graines du cardon avec une contribution négative : elle est due essentiellement à la combustion de combustibles fossiles dans les machines agricoles. En outre, la consommation de l'énergie non renouvelable qui se produit dans l'étape de transésterification est due aux matières premières impliquées ainsi que les différents traitements existant dans chaque étape.

IV.5.1.3. Eutrophisation

Dans cette catégorie d'eutrophisation, la plus grande contribution est encore provoquée par la phase agricole. Ceci est dû à l'utilisation de fertilisants dans cette phase avec des concentrations élevées de l'azote et du phosphore. L'accumulation des nutriments dans les eaux superficielles est responsable de la prolifération des algues et la mort de beaucoup d'organismes aérobies.

IV.5.2. Les principaux contributeurs

IV.5.2.1. Santé humaine

Le facteur principal contribuant au score de cette catégorie de dommage sont les fertilisants avec un taux de 59,84 % principalement l'engrais phosphatés (37,22%) et l'azote (18,45%), suivi du combustible fossile avec 25,2% de la contribution global. (Figure IV-6).

IV.5.2.2. Qualité des Ecosystèmes

Les principaux facteurs qui contribuent au résultat de cette catégorie de dommage sont les combustibles fossiles (72,45%), suivi des fertilisants avec 16.17% principalement l'azote (10,54%). (Figure IV-7).

IV.5.2.3. Changement climatique

Les principaux facteurs qui contribuent au résultat de cette catégorie de dommage sont les fertilisants (52,13%) surtout l'azote (23,10%) et les combustibles fossile (18.13%). (Figure IV-5).

IV.5.2.4. Utilisation des ressources

Les principaux facteurs contribuant au score de cette catégorie de dommage sont les combustibles fossiles (48,54%), le méthanol (20,27%) et les fertilisants (19,87%). (Figure IV-8).

IV.6 Etude de l'effet du rajout d'une extraction chimique au procédé de production

A ce moment-là, l'arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile de cardon est comme montrée sur la figure IV.9.

Tableau VI.6 : démonstration de l'effet de rajout de l'extraction chimique

Processus	Valeur en MJ	
	Sans extraction	Avec extraction
Nitrate d'Ammonium	837,67	837,67
Fertilisant (P)	1061,65	1061,65
Hexane	-	16253,52003
Diesel (kg)	5871,03	34,59
Fertilisant (K)	502,12	502,12
Bêchage	284	284
Labour	2100	2100
Récolte	1930	1930
Reprise	284	284
semis	284	284
Gas natural	233,06	233,06
Alachlor	358,57	358,57
Linuron	104,75	104,75
Pesticide	46,06	46,06
Methanol	2451,32	2451,32
Vapeur d'eau	442,31	442,31
Gas naturel	64,59	64,59
Hydroxide de Potassium	119,28	119,28
Total	16974,41	33227,91
Production énergétique	40000 [49]	40000
Bilan	-23025,59	-6772,09
EROI	2,36	1,2

Chapitre IV : Analyse de cycle de vie

Le calcul du bilan énergétique dans le cas du procédé de production avec extraction chimique a donné un total de 33227,91 MJ d'énergie dépensée contre 40000 MJ d'énergie récupérée [26]. Le bilan énergétique prend la valeur de -6772,09 MJ avec un EROI de 1,2. L'EROI étant inférieur à 2,36 obtenu lors de l'utilisation du procédé sans extraction par solvant, cette étape ne vaut pas la peine d'être ajoutée au procédé de la production du biodiesel à partir de l'huile de cardon.

Conclusion générale

Cette analyse de cycle de vie a été réalisée dans le but d'évaluer les impacts environnementaux éventuels de la filière de la production du biodiesel à partir de l'espèce *Cynara cardunculus L.*

L'ACV nous a permis de déterminer les phases prépondérantes dans les différentes catégories d'impact étudiées qui peuvent être projetées sur le profil environnemental. Ce qui nous a permis de mettre en évidence l'amélioration des facteurs principaux. Dans la chaîne de production du biodiesel à partir du cardon, l'étape qui contribue le plus à la majorité des catégories d'impact est la phase agricole suivie de la conversion de l'huile en biodiesel

Le choix de l'espèce retenue a été réalisé selon trois types de critères à savoir les performances agro-écologiques, le potentiel génétique et les caractéristiques techniques du biodiesel élaboré à partir de cette espèce. Elle est non alimentaire, ce qui est pour nous une condition principale pour la production du biodiesel qui permet ainsi d'éviter toute concurrence avec les sources oléagineuses alimentaires.

Les fertilisants, le méthanol et le diesel consommé lors de la phase agricole pour le transport des matières premières ainsi que dans les différentes activités du travail du sol sont les substances qui contribuent le plus dans toutes les catégories de dommages étudiées en l'occurrence : la santé humaine, le changement climatique, l'utilisation des ressources et la qualité des écosystèmes.

Le rajout d'une extraction chimique en plus d'une extraction mécanique ne semble pas judicieux à mettre en œuvre. En effet, malgré le fait que l'extraction chimique par solvant permet de récupérer la quantité d'huile végétale résiduelle dans le tourteau après l'extraction mécanique, la comparaison entre les deux procédés a permis de conclure que le bilan énergétique et le EROI diminue lors de l'utilisation de l'extraction chimique du fait de l'emploi d'une grande quantité d'hexane en tant que solvant. Le EROI passe ainsi de (2.36) à (1.2).

Afin de conclure sur la viabilité du biodiesel issu de l'huile de cardon, il est indispensable de compléter les résultats de l'étude des impacts environnementaux avec des études socio-économiques.

Bibliographie

- [01] International Standardization Organization (2006a). ISO 14040 : **Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre, ISO.**
- [02] Tereza BICALHO (2006). Les limites de l'ACV : étude de la soutenabilité d'un biodiesel issu d'huile de palme brésilienne. Thèse de Doctorat. Université Paris-Dauphine, Ecole Doctorale de Dauphine, pp 15 - 54.
- [03] Olivier Jolliet, Myriam Saadé, Pierre Crettaz, Shanna Shaked (2010). Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan. Presses Polytechniques Universitaires Romandes 2^{ème} édition
- [04] Le Moigne J.L (1990). La modélisation des systèmes complexes. Dunod.
- [05] ISO (1998). ISO 14 041 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Analyse de l'inventaire.
- [06] Coulon, R, V. Camobreco, H. Teulon, and J. Besnainou (1997). Data quality and uncertainty in LCI: International Journal of Life Cycle Assessment, v. 2, pp. 178 -182.
- [07] ISO (2006). ISO 14 044 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices.
- [08] Weidema, B (2001). Avoiding co-product allocation in life-cycle assessment: Journal of Industrial Ecology, v. 4, pp. 11-33.
- [09] Weidema, B, P, N. Frees, and A. M. Nielsen (1999). Marginal production technologies for life cycle inventories: International Journal of Life Cycle Assessment, v. 4, pp. 48-56.
- [10] Rousseaux, P. "Analyse du cycle de vie (ACV)." Techniques de l'Ingénieur G5500. (2005).
- [11] www.biologo.com.br, (2012). « artigos : biodiesel »
- [12] Freedman, B., Pryde, E. H., Mounts, T. L., JAOCS (1984). pp 1375-1380.
- [13] Poré, J (1960). Oléagineux, 15 : 13-19, 165-172.
- [14] Sridharan, R., Mathai, I.M., J. Scient. Ind. Res (1974). pp 178-187.
- [15] Ma, F., Hanna, M.A (1999). Bioresource Technology, Biodiesel production : a review. p. 1-15.

- [16] American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Biodiesel Fuel (B100) Blend Stock for Distillate Fuels, Designation D6751-07 (2007).
- [17] A.M.R.C. Alexandre, A.M.A. Dias, I.J. Seabra, A.A.T.G. Portugal, H.C. de Sousa, M.E.M. Braga (2012). Biodiesel obtained from supercritical carbon dioxide oil of *Cynara cardunculus* L, *The Journal of Supercritical Fluids* 68. p 52-63.
- [18] Carmen M. Torres, Sergio D. Ríos, Carles Torras, Joan Salvadó, Josep M. Mateo-Sanz, Laureano Jiménez (2013) . Sustainability analysis of biodiesel production from *Cynara Cardunculus* crop. Departament d'Enginyeria Química, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona. Catalonia Institute for Energy Research (IREC), Tarragona. Spain.
- [19] Mohammed Amouri (2012). Evaluation du potentiel des espèces végétales régionales pour la production du biodiesel. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en énergies renouvelables. Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Ecole Doctorale des Energies renouvelables.
- [20] <http://biodiesel.e-monsite.com/pages/troisieme-partie/iii-2-limites.html>
- [21] N. El Bassam (2010). Handbook of Bioenergy Crops. A Complete Reference to Species, Development and Applications. By Earthscan.
- [22] www.wikipedia.org. « *Cynara cardunculus* ».
- [23] N. El Bassam (2010). Handbook of Bioenergy Crops. A Complete Reference to Species, Development and Applications. By Earthscan. 142p.
- [24] Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas (2005). Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte, fase I. Análisis de ciclo de vida comparativo del etanol de cereales y de la gasolina. España : Ministerio de medio ambiente-CIEMAT. 114p.
- [25] Javier Dufour, Jesús Arsuaga, Jovita Moreno and Hely Torrealba . Life cycle assessment of biodiesel production from cardoon (*Cynara cardunculus*) oil obtained under Spain conditions.
- [26] Alloune. R, A. Liazid, M. Tazerout (2013). Valorisation énergétique de l'huile de ricin pour la production du biodiesel dans les zones arides et semi-arides en Algérie, Journées Internationales de Thermique (JITH 2013) Marrakesh (Maroc), du 13 au 15 novembre, 2013.

[27] <http://asso.proxiland.fr/lesjardinsdelhistoire/default.asp?a=13696>

[28] Benattia, M. H, W. Amara (2013). Analyse du cycle de vie d'un biodiesel de première génération à partir du tournesol. Projet de fin d'étude d'ingénieur. Ecole nationale polytechnique d'Alger. 25 p.