

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



**Département de génie chimique**  
Mémoire de Master en génie chimique

**Thème :**

**Analyse du cycle de vie du biodiesel issu de  
l'huile de *Ricinus communis*, L.**

**HAROUN Missipsa**

Soutenu le 14 Juin 2015 devant le jury :

Présidente	Mme DERRICHE Ratiba	Professeure ENP
Directeur	Mr AHMED-ZAID 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

Ecole Nationale Polytechnique : 10, Avenue Hassen Badi 16200 El-Harrach, Alger.

## ملخص

تتمثل أنواع الوقود المستخدمة غالبا في قطاع النقل من البنزين، المازوت والكيروسان. كل هذه الوقود تحتوي على مواد هيدروكربونية التي تؤدي إلى انبعاث كميات كبيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون الذي بدوره يترك أثارا سلبية على البيئة. المشاكل المتعلقة بتغير المناخ، تذبذب أسعار النفط والشك الذي يخيم حول امدادات النفط المستقبلية خلقت اهتماما عميقا من أجل البحث عن أنواع بديلة من الوقود.

هذا العمل يقيم الآثار المتعلقة بالمحيط والخاصة بإنتاج وقود حيوي انطلاقا من زيت الخروع، وذلك باستعمال تحليل دورة الحياة كأداة للتقييم مع الاستعانة ببرنامج سيما برو 7.1.8. بالنسبة للآثار التي أخذت بعين الاعتبار فهي كالاتي: استهلاك الطاقة غير متجددة، التشبع الغذائي، التحمض، الاحتباس الحراري، الإنقاص من طبقة الأوزون. نتائج التقييم أثبتت أن مرحلة الفلاحة هي المسؤولة بصفة كبيرة على مختلف الآثار المترتبة على هذه الصناعة.

**كلمات مفتاحية:** تحليل دورة الحياة، المازوت الحيوي، الخروع، سيما برو.

## Résumé :

Les carburants utilisés dans le secteur des transports se composent généralement de l'essence, du gazole et du kérosène. Tous ces carburants sont des hydrocarbures qui émettent des quantités élevées de CO<sub>2</sub> avec un impact environnemental important. Les problèmes concernant le changement climatique, les prix de l'énergie et l'incertitude régnant autour de l'approvisionnement future en pétrole ont créé un vif intérêt pour les carburants alternatifs.

Ce travail évalue les impacts environnementaux de la chaîne de production du biodiesel issu de l'huile du ricin en utilisant comme outil d'évaluation l'analyse du cycle de vie à l'aide du logiciel Simapro 7.1.8. Les catégories d'impact prises en compte sont : la consommation de l'énergie fossile, l'eutrophication, l'acidification, le changement climatique et la réduction de la couche d'ozone. Les résultats de l'évaluation d'impact de cycle de vie ont montré que l'étape qui contribue le plus à la majorité des catégories d'impact étudiées est la phase agricole.

**Mots clés :** Analyse de cycle de vie, Biodiesel, *Ricinus communis L.*, SimaPro.

## Abstract :

The fuels used in the transport sector are generally made up of gasoline, diesel oil, jet fuel and fuel oil. All these fuels are known to emit large amounts of CO<sub>2</sub> which has a detrimental impact on the environment. The issues relating to climate change, soaring energy prices and the uncertainty of future oil supplies have created a strong interest in alternative transportation fuels.

This work evaluates the environmental impacts of the chain of production of biodiesel from castor bean oil using Simapro 7.1.8 software as tool for the life cycle assessment. The categories of impact taken into account include the consumption of fossil energy, eutrophication, acidification, climate change and the reduction of the ozone layer. The results show that the major impacts are due to castor cultivation (on-farm stage).

**Keywords :** Life Cycle Assessment, Biodiesel, *Ricinus communis L.*, 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 Mr AHMED-ZAID Toudert, 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 Mr AMOURI Mohammed (Chargé de recherche au CDER) pour sa générosité et la disponibilité dont il a su faire preuve malgré ses charges académiques et professionnelles.*

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

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Mme MEFTI Afia (Maître conférence de classe A) et Mme HADDOUM Saliha (Maître assistante de classe A) 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.*

# *Dédicace*

*Je tiens à dédier cet humble travail :*

*A mes parents envers lesquels je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance pour tous les efforts fournis afin de mettre à ma disposition tous les moyens nécessaires pour mener mes études dans les meilleures conditions. Merci pour le soutien financier et moral. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon attachement, mon amour et mon affection. MAMAN, PAPA, je vous offre ce modeste travail en témoignage de tous les sacrifices et l'immense tendresse dont vous avez toujours su me combler. Si je suis ici aujourd'hui, c'est uniquement grâce à vous ! Je vous serai éternellement reconnaissant.*

*A mon frère TAHAR, mes sœurs ZAHRA et CILIA ainsi que ma belle-sœur SIHEM en témoignage de ma profonde gratitude pour votre accompagnement et soutien sans faille.*

*A mon adorable petit neveu AXEL.*

*A ma grand-mère, mes tantes, cousins et cousines.*

*A mes amis AMAR, SOFIANE, AMAR, NACER, NASSIM, GHANIA, NAMIRA, NAIMA, ROZA, SADIA, SAIDA... La liste est encore longue.*

*A mes camarades de promotion pour ces trois années passées ensemble dans les meilleurs moments et les pires.*

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

# Sommaire

Introduction générale .....	2
I. Principes de l'ACV .....	5
I.1. Introduction .....	5
I.2. Définition de l'ACV .....	5
I.3. Définition de l'objectif et du champ de l'étude .....	6
I.4. Inventaire des émissions et des extractions .....	7
I.5. L'évaluation de l'impact environnemental .....	8
I.6. Interprétation .....	10
I.7. Les limites de l'ACV .....	11
II. Biodiesel .....	13
II.1. Introduction .....	13
II.2. Définition du biodiesel .....	13
II.3. La transestérification .....	14
II.4. Les paramètres affectant la réaction de transestérification .....	17
II.4.1. Les conditions de la réaction .....	17
II.4.2. Les caractéristiques de l'huile .....	18
II.5. Spécifications du biodiesel .....	19
II.6. Production de biodiesel à partir d'huile de l'espèce <i>Ricinus communis L.</i> .....	20
II.6.1. Extraction de l'huile par compression .....	20
II.6.2. Conversion de l'huile en biodiesel .....	20
III. <i>Ricinus communis L.</i> .....	24
III.1. Introduction .....	24
III.2. Origine .....	24
III.3. Description générale .....	24
III.4. Propriétés et composition .....	26
III.5. Caractères généraux du ricin .....	27
III.5.1. Ecologie .....	27
III.5.2. Plantation .....	28
III.5.3. Croissance .....	28

III.5.4. Entretien .....	28
III.5.5. Récolte .....	29
III.6. Quelques caractéristiques de l'huile du ricin .....	29
III.7. Utilisations de l'huile du ricin .....	30
IV. Analyse de cycle de vie.....	33
IV.1. Introduction .....	33
IV.2. Définition des objectifs et du champ de l'ACV .....	34
IV.2.1. Définition de l'objectif de l'étude .....	34
IV.2.2. Définition de la portée de l'étude .....	34
IV.3. Inventaire de cycle de vie .....	37
IV.4. Evaluation de l'impact du cycle de vie .....	41
IV.4.1. Caractérisation intermédiaire .....	41
IV.4.2. Caractérisation des dommages .....	43
IV.5. Interprétation des résultats .....	46
IV.5.1. L'étape prépondérante .....	46
IV.5.2. Les principaux contributeurs .....	47
IV.6. Etude de l'effet du rajout d'une extraction par solvant au procédé de production .....	48
Conclusion générale .....	52
Recommandations .....	54
Bibliographie .....	56

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Phases de l'analyse du cycle de vie.....	06
<b>Figure I.2</b> : La procédure de calcul de l'inventaire.....	08
<b>Figure I.3</b> : Les étapes obligatoires de l'EICV.....	09
<b>Figure I.4</b> : Les différentes catégories d'impact intermédiaires et dommages.....	10
<b>Figure II.1</b> : Le réaction globale de la transestérification.....	14
<b>Figure II.2</b> : Les réactions successives de la transestérification.....	15
<b>Figure II.3</b> : La réaction de la transestérification moyennant un catalyseur basique.....	16
<b>Figure II.4</b> : La réaction de la transestérification moyennant un catalyseur acide.....	17
<b>Figure II.5</b> : les principales étapes de la production du biodiesel à partir des graines du ricin.....	21
<b>Figure III.1</b> : La plante du ricin.....	25
<b>Figure III.2</b> : Les feuilles de la plante du ricin.....	25
<b>Figure III.3</b> : les fleurs de la plante du ricin.....	26
<b>Figure III.4</b> : Les graines du ricin.....	27
<b>Figure IV.1</b> : Les différents processus élémentaires de production du biodiesel à partir de l'espèce <i>Ricinus communis L.</i> .....	35
<b>Figure IV.2</b> : Arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile du ricin.....	40
<b>Figure IV.3</b> : Profil environnemental.....	43
<b>Figure IV.4</b> : Contribution des étapes de production sur les différentes catégories de dommages.....	44

<b>Figure IV.5 :</b> Contribution des différents intrants sur le changement climatique.....	44
<b>Figure IV.6 :</b> Contribution des différents intrants sur l'utilisation des ressources.....	45
<b>Figure IV.7 :</b> Contribution des différents intrants sur la santé humaine.....	45
<b>Figure IV.8 :</b> Contribution des différents intrants sur la qualité des écosystèmes.....	46
<b>Figure IV.9 :</b> Arborescence des processus élémentaires de la production du biodiesel à partir de l'huile du ricin après intégration de l'extraction par solvant.....	49

# Liste des tableaux

<b>Tableau II.1</b> : Les différentes spécifications du biodiesel.....	19
<b>Tableau II.2</b> : Les propriétés du Biodiesel obtenu à partir de l'huile du ricin.....	22
<b>Tableau III.1</b> : La composition de l'huile du ricin en glycérides.....	27
<b>Tableau III.2</b> : Les propriétés de l'huile obtenue à partir de l'huile du ricin.....	30
<b>Tableau IV.1</b> : Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de la culture du ricin.....	38
<b>Tableau IV.2</b> : Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de l'extraction de l'huile des graines du ricin.....	39
<b>Tableau IV.3</b> : Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de la conversion de l'huile du ricin en biodiesel.....	39
<b>Tableau IV.4</b> : Caractérisation intermédiaire.....	42
<b>Tableau IV.5</b> : Caractérisation des dommages.....	43

# Abréviations

**PNUE** : Programme des nations unies pour l'environnement

**SIWI** : Stockholm international water institute

**ACV** : Analyse du cycle de vie

**ICV** : Inventaire du cycle de vie

**LCIA** : Life cycle impact assessment

**ÉICV** : Evaluation de l'impact du cycle de vie

**ISO** : International standardization organization

**ASTM** : American Society for Testing and Material Standard

**B100** : Biodiesel pur

**TAG** : Triglycéride

**DAG** : Dygléciride

**MAG** : Monoglycéride

**FFA** : Free Fatty Acid

# **Introduction**

## **générale**

## [Introduction générale]

---

Les effets sur la planète du développement de la société moderne sont devenus aujourd'hui un problème à l'échelle mondiale. Les termes tels que la "la destruction de la couche d'ozone", " les pluies acides" et "le réchauffement terrestre" occupent une place prépondérante dans les recherches scientifiques, les revues de presses ou encore les conversations quotidiennes. A cet effet, des actions dirigées sont mises au point pour éviter ces effets négatifs en utilisant des outils et des méthodologies afin d'identifier leurs causes dans le but de les empêcher et/ou leurs résister avec des mesures et des solutions applicables.

La production de biocarburants à partir de différents types de biomasse, particulièrement certaines cultures spéciales, a été explorée pendant longtemps. Pendant ces dernières années, l'attention portée sur ces produits a remarquablement augmenté en raison de la hausse du prix du pétrole, de la volonté de recherche de sources alternatives d'énergie et l'espoir de réduire les impacts environnementaux dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques.

Ainsi, le biodiesel est aujourd'hui considéré comme carburant alternatif au diesel pétrolier en raison de leurs contenus énergétiques comparables. Jusqu'à une date récente, bon nombre d'experts caressaient l'idée que le biodiesel était la solution au changement climatique car il émettait de faibles quantités de gaz à effet de serre en plus de son origine renouvelable et de sa nature biodégradable. Aujourd'hui, la situation semble bien plus complexe. En effet, une étude menée en 2009 par le PNUE nous apprend que la production et l'utilisation du biodiesel à partir de l'huile de palme peut conduire à d'importantes augmentations des émissions de gaz à effet de serre. L'essor du biodiesel n'équivaut donc pas forcément à la diminution des gaz à effet de serre, l'agriculture étant actuellement l'une des activités économiques qui génère le plus de gaz à effet de serre. 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 CO<sub>2</sub>. Selon le (SIWI), en 2050, la quantité d'eau supplémentaire nécessaire pour la production de bioénergie pourrait être équivalente à la quantité requise par le secteur agricole pour nourrir le monde correctement. Or, dans de nombreuses régions du monde, l'eau manque déjà cruellement. Une augmentation de la production du biodiesel implique d'avantage de sol ce qui entraîne un phénomène de réaffectation des terres qui peut engendrer une crise

## [Introduction générale]

---

alimentaire. Par conséquent, il est clair que la promotion du biodiesel dans le transport, doit s'accompagner de mesures fermes pour une utilisation efficace et rationnelle de l'énergie et il est plus judicieux de valoriser le potentiel des cultures non alimentaires.

L'objectif de cette étude est d'analyser les impacts du biodiesel produit à partir de l'huile de l'espèce *Ricinus communis L.* selon les caractéristiques de production en Algérie à l'aide d'un outil d'analyse du cycle de vie, SimaPro 7.1.8. Ce travail sera axé plus précisément sur les bilans énergétiques et carboniques. Il comptera quatre chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré aux principes de l'analyse du cycle de vie.
- Le deuxième chapitre sera consacré à la filière de production du biodiesel.
- Le troisième chapitre sera dédié à la présentation de l'espèce *Ricinus communis L.*
- Le quatrième chapitre sera réservé à l'analyse du cycle de vie du biodiesel produit à partir de l'espèce *Ricinus communis L.* à l'aide du logiciel SimaPro 7.1.8 afin d'évaluer les impacts environnementaux liés à la production du biodiesel à partir de cette espèce.

**Chapitre I :**  
**Principes de l'analyse**  
**de cycle de vie**

## I. Principes de l'ACV :

### I.1. Introduction :

La préoccupation générale de la nature non renouvelable des combustibles fossiles et la pollution que leur utilisation entraîne est devenu la force motrice de la recherche de nouvelles sources de carburants de remplacement, notamment d'origine agricole. Cependant, les biocarburants ne sont pas entièrement respectueux de l'environnement. Actuellement, il existe différents outils développés qui permettent d'évaluer l'impact environnemental causé par la production et l'utilisation de carburants d'origine renouvelable et non renouvelable. L'un des outils disponibles est l'analyse du cycle de vie.

### I.2. Définition de l'ACV :

L'analyse de cycle de vie est un outil d'analyse permettant d'estimer l'impact environnemental d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie.

L'ACV s'articule autour de plusieurs principes. Tout d'abord, il s'agit d'une approche basée sur le cycle de vie. Il est nécessaire d'intégrer l'ensemble des étapes de la vie d'un produit. On distingue généralement les phases suivantes : l'extraction des matières premières, la fabrication du produit, sa distribution, son utilisation, sa fin de vie et enfin toutes les étapes de transport qui ont lieu au cours du cycle de vie du produit.

Le second principe de l'ACV est qu'il s'agit d'une approche environnementale qui s'intéresse uniquement aux impacts environnementaux d'un produit sans se soucier des impacts sociaux ou économiques.

Il existe actuellement deux normes qui régissent l'ACV :

- La norme ISO 14 040 : définit les principes et le cadre de l'ACV :
  - La définition de l'objectif et le champ de l'analyse.
  - L'inventaire des émissions et d'extraction (ICV).
  - L'évaluation de l'impact du cycle de vie (LCIA).
  - L'interprétation. [01]
- La norme ISO 14044 : précise les lignes directrices et les exigences relatives à l'ACV.

## [Chapitre I : Principes de l'analyse de cycle de vie]

La figure I.1 montre que l'ACV est un processus itératif et que ces phases ne constituent pas seulement une succession de séquence.

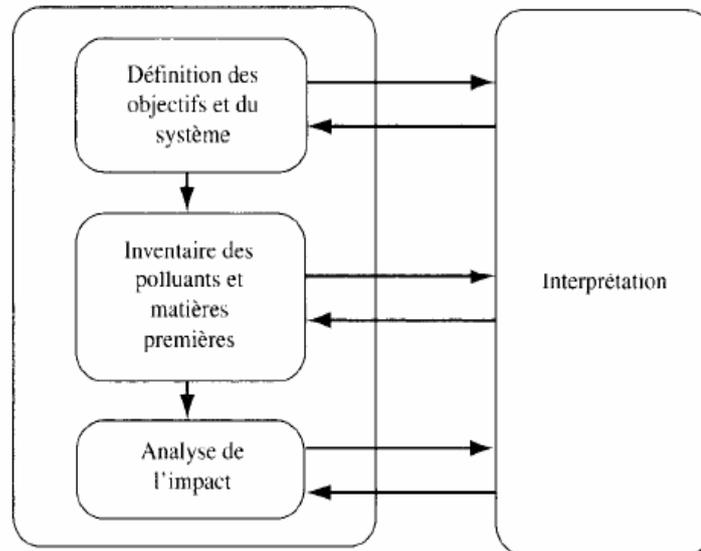


Figure I.1 : Phases de l'analyse du cycle de vie. [03]

### I.3. Définition de l'objectif et du champ de l'étude :

Il s'agit de la phase pendant laquelle sont définis notamment l'objectif et le périmètre de l'étude. La définition du champ de l'étude doit définir les éléments suivants :

- Les fonctions du produit étudié.
- L'unité fonctionnelle : s'il s'agit d'une étude comparative. Elle représente la quantification de la fonction précédemment définie.
- Le système de produit : Il comprend tous les processus élémentaires constituant le cycle de vie du produit à l'étude.
- Les frontières du système : Cette étape consiste à choisir quel niveau de détail va être considéré pour le système à l'étude.
- Le choix des catégories d'impact, de la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie. En choisissant la méthode d'EICV, les catégories d'impacts considérés lors de la troisième étape de l'ACV sont fixées.

## [Chapitre I : Principes de l'analyse de cycle de vie]

---

- Les hypothèses : Toutes les hypothèses posées et les simplifications réalisées lors de l'étude doivent être clairement énoncées et justifiées.
- La qualité des données : Cette spécification va permettre de se rendre compte de la fiabilité des résultats.
- Les destinataires de l'étude (industriel, grand public, autre).[13]

### **I.4. Inventaire des émissions et des extractions :**

C'est la phase la plus importante de la réalisation d'une ACV. Il s'agit de collecter toutes les informations relatives aux flux entrants et sortants sur le cycle de vie du produit. Les flux entrants sont par exemple les matières premières utilisées, l'énergie consommée, etc. Les flux sortants concernent les émissions dans l'air, l'eau, le sol, ou encore la production de matières recyclées. Elle détermine également l'utilisation des sols nécessaires pour la réalisation de la fonction du système. [17]

La collecte de données est une tâche fastidieuse. Afin d'améliorer les recherches, des bases de données existent. Les données recueillies directement auprès de l'entreprise ou du client sont des données primaires et constituent la meilleure information. Les informations prises dans les bases de données constituent des données secondaires et plus approximatives.

Préalablement aux calculs d'inventaire, les données doivent être vérifiées et validées. Elles doivent être ensuite rattachées aux processus élémentaires puis à l'unité fonctionnelle. La procédure de calcul utilisée pour compléter l'inventaire est présentée dans la figure I.2.

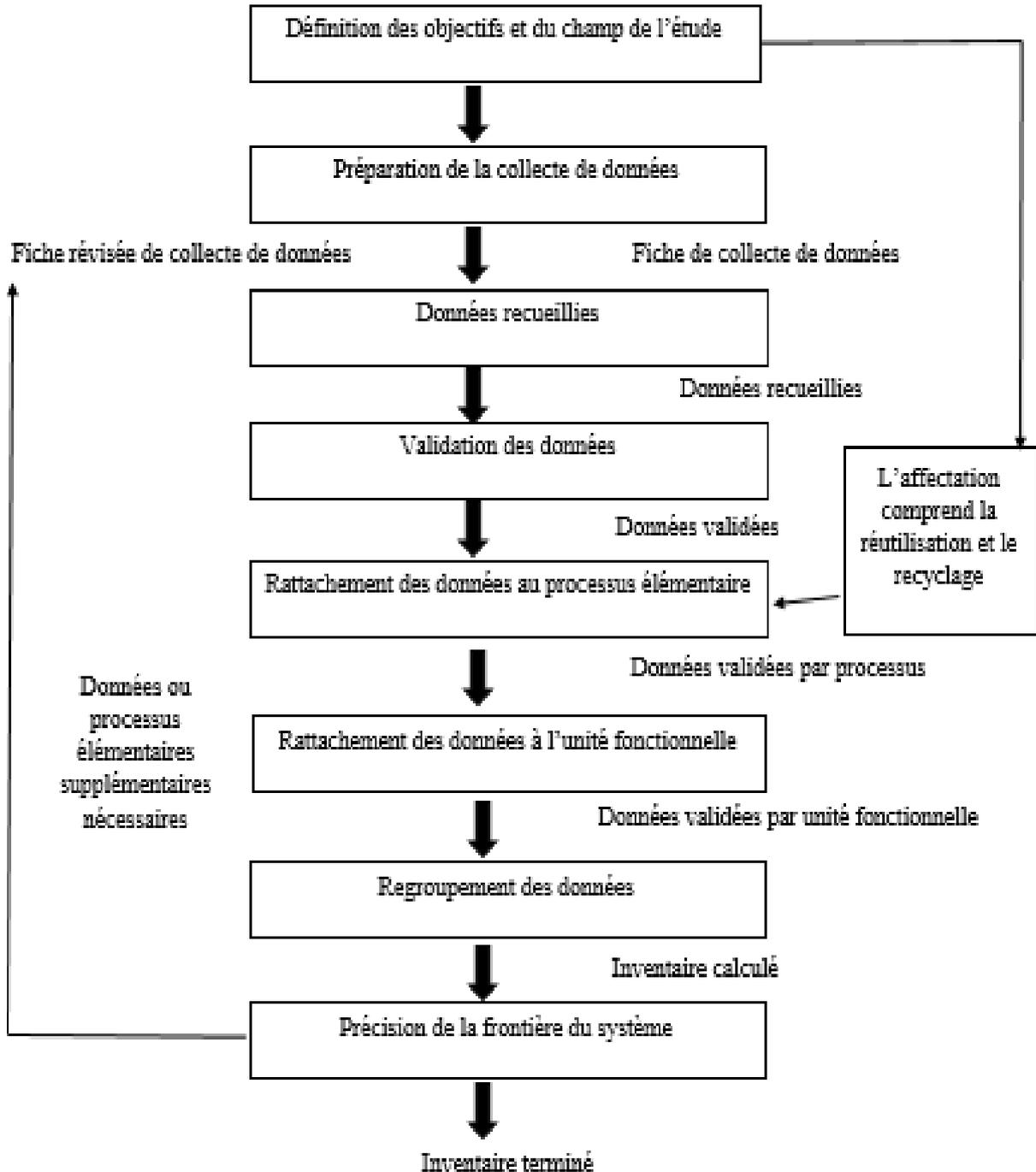


Figure I.2 : La procédure de calcul de l'inventaire [20]

### I.5. L'évaluation de l'impact environnemental :

Une fois l'inventaire terminé, l'étape suivante consiste à évaluer les impacts associés à chacun des flux répertoriés au cours de l'inventaire.

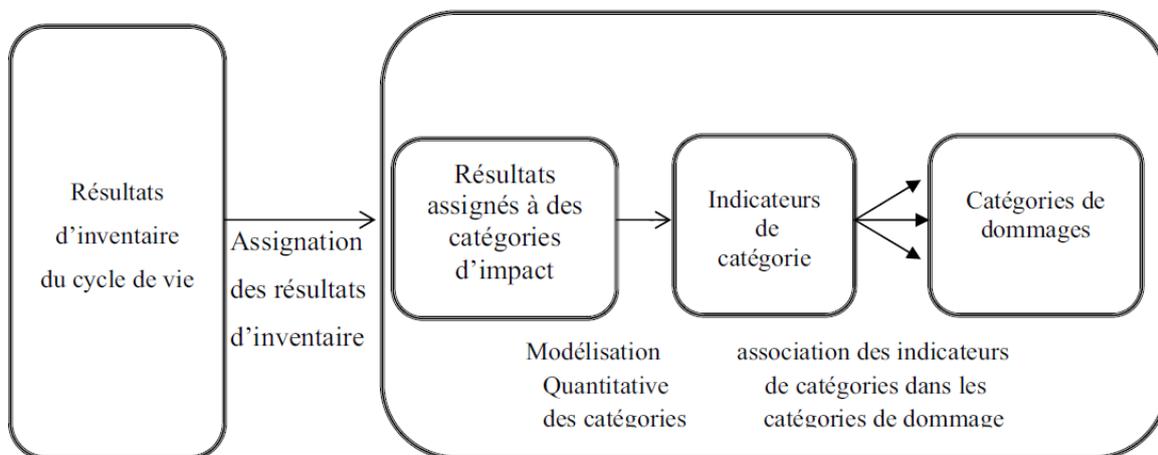
L'évaluation des impacts de cycle de vie consiste à modéliser les différents mécanismes environnementaux décrivant le parcours d'une substance de son émission jusqu'à

## [Chapitre I : Principes de l'analyse de cycle de vie]

son impact final. C'est ce que l'on appelle la chaîne de cause à effet. Les résultats bruts de l'inventaire du cycle de vie ne sont pas directement comparables, car leurs unités diffèrent (kg CO<sub>2</sub>, kg CH<sub>4</sub>). L'ÉICV va alors permettre de comparer ces résultats en les regroupant dans des catégories d'impacts qui ont chacune leur propre unité. Afin de pouvoir relier les résultats de l'ICV aux dommages finaux provoqués par les émissions de polluants, différentes étapes doivent être réalisées.

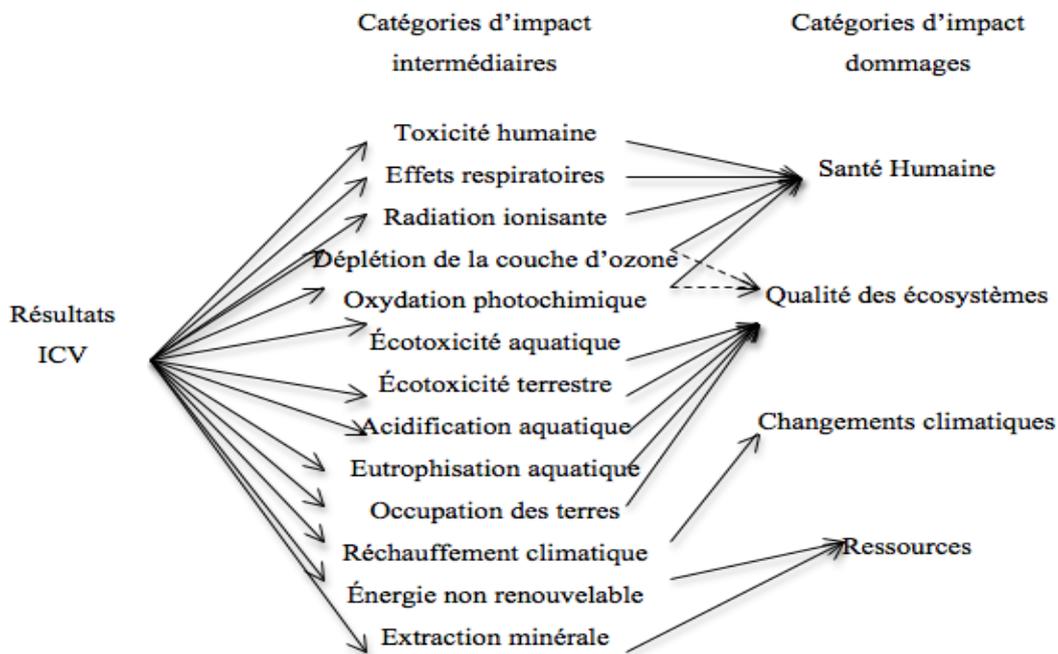
Selon ISO, l'ÉICV présente des éléments obligatoires et des éléments optionnels [24]. Les étapes obligatoires peuvent se décomposer en trois étapes comme le montre la figure I.3 :

- La classification : détermine quelles émissions contribuent à quels impacts environnementaux (effet de serre, toxicité humaine, écotoxicité, diminution des ressources etc.).
- La caractérisation intermédiaire : pondère les émissions à l'intérieur de chacune des catégories d'impact à l'aide d'indicateurs de catégories.
- La caractérisation des dommages regroupe les catégories d'impact dans des catégories de dommages (dommages sur la santé humaine, les écosystèmes, les équilibres climatiques).



**Figure I.3 :** Les étapes obligatoires de l'ÉICV.[30]

Les différentes catégories d'impact utilisées en EICV sont illustrées à la Figure I-4.



**Figure I.4 :** Les différentes catégories d'impact intermédiaires et dommages. [03]

Une étape supplémentaire de normalisation peut être effectuée pour mettre en évidence la contribution du produit étudié à l'effet mondial global dans une catégorie d'impact environnemental donnée. L'EICV peut finalement être complétée par la pondération sociale des impacts ou des dommages qui évaluent l'importance relative des impacts intermédiaires ou des différents dommages.

### **I.6. Interprétation :**

Cette phase vise à interpréter les résultats des différentes étapes de l'ACV. Les points sensibles sont alors identifiés et la qualité et la robustesse des résultats sont testées par l'intermédiaire des analyses de sensibilité et d'incertitude. L'incidence des limites de l'ACV et des hypothèses effectuées est analysée de manière critique.

L'interprétation peut donner lieu à des recommandations concernant l'utilisation du produit ou des pistes de re-conception visant à réduire les impacts environnementaux potentiels du produit étudié. Au cours de l'interprétation, il est parfois possible de distinguer la phase du cycle de vie qui a le plus d'impact ou encore de déterminer l'origine des impacts environnementaux les plus significatifs. [32]

### I.7. Les limites de l'ACV :

Bien que l'analyse du cycle de vie soit une méthode globale permettant d'évaluer les impacts d'un produit sur l'environnement, certaines limitations sont à prendre en compte [33]. Les principales limites de l'ACV sont :

- **La disponibilité et la qualité des données :**

Plusieurs problèmes sont rencontrés :

- Les données sont confidentielles et difficilement accessibles.
- Les données sont trop agrégées dans les bases de données existantes et sont difficilement exploitables.
- Les incertitudes sur les données ne sont pas précisées.

Les principales répercussions de la non disponibilité des données sont le nombre important d'hypothèses, des simplifications parfois mal justifiables et des incertitudes dans les données.

- **Les lacunes méthodologiques persistantes**

Les principales lacunes dans l'évaluation des impacts sont :

- La nécessité d'intégrer des paramètres spatio-temporels dans les bilans matière-énergie.
- L'amélioration de la pertinence des indicateurs d'impact.
- La qualité des études sont trop peu évaluées. Il est alors difficile de se lancer dans une boucle d'amélioration continue.

# **Chapitre II :**

## **Biodiesel**

## **II. Biodiesel**

### **II.1. Introduction :**

Confrontés au réchauffement climatique et spectateurs des derniers soubresauts de la production du pétrole bon marché, 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 des biocarburants compte parmi les enjeux économiques, politiques et éthiques les plus controversés du moment.

On s'intéresse plus particulièrement aux plantes contenant des huiles et qui ne menacent pas les approvisionnements alimentaires comme le ricin.

### **II.2. Définition du biodiesel :**

L'ASTM décrit le biodiesel comme des mono alkyls d'esters d'acides gras avec de longues chaînes dérivés à partir des lipides renouvelables tels que les huiles végétales ou les graisses animales. Le biodiesel est un carburant liquide, de qualité semblable au gas-oil, pouvant être employé dans des moteurs à allumage non commandé (moteurs diesel) ou dans des chaudières. Le biodiesel le plus utilisé est celui obtenu par le biais de la transestérification des huiles végétales ou de graisses animales à l'aide du méthanol et de l'éthanol du fait de leurs coûts relativement bas ainsi que leurs avantages chimiques et physiques.

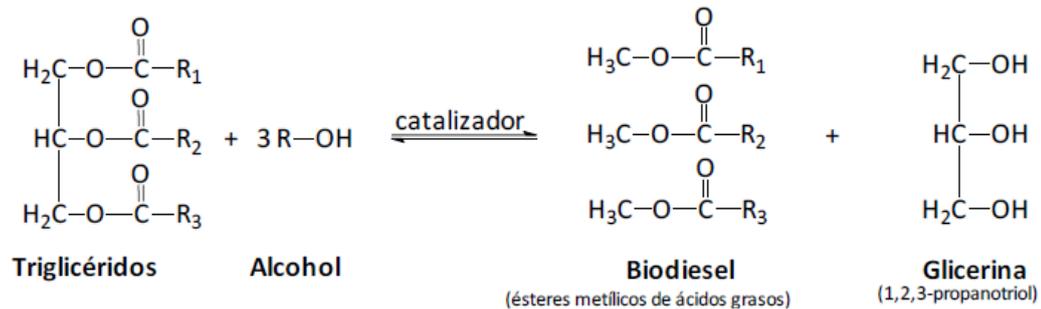
Le terme bio fait référence à sa nature renouvelable et biodégradable contrairement au diesel traditionnel, d'autre part, le terme diesel fait référence à son utilisation dans des moteurs de ce type.

Il peut être utilisé pur (biodiesel B100) ou mélangé avec du diesel pétrolier dans différentes proportions (par exemple 5% biodiesel B5). Il peut être également employé dans des chaudières ou des fours de chauffage conçus pour fonctionner avec des huiles de pétrole.

[40]

### II.3. La transestérification :

Lors de la réaction de la transestérification d'une huile végétale ou d'une graisse animale, les TAG réagissent avec de l'alcool (du méthanol ou de l'éthanol), produisant des esters (biodiesel) et de la glycérine (figure II.1) qui peut être utilisée dans plusieurs applications comme la fabrication du savon entre autres. [43]



**Figure II.1** : Le réaction globale de la transestérification. [48]

Le processus global implique une séquence de trois réactions réversibles consécutives. Les triglycérides sont convertis consécutivement en DAG, MAG et glycérine [44]. Dans chaque réaction une mole d'alkyl ester est libérée (figure II.2).

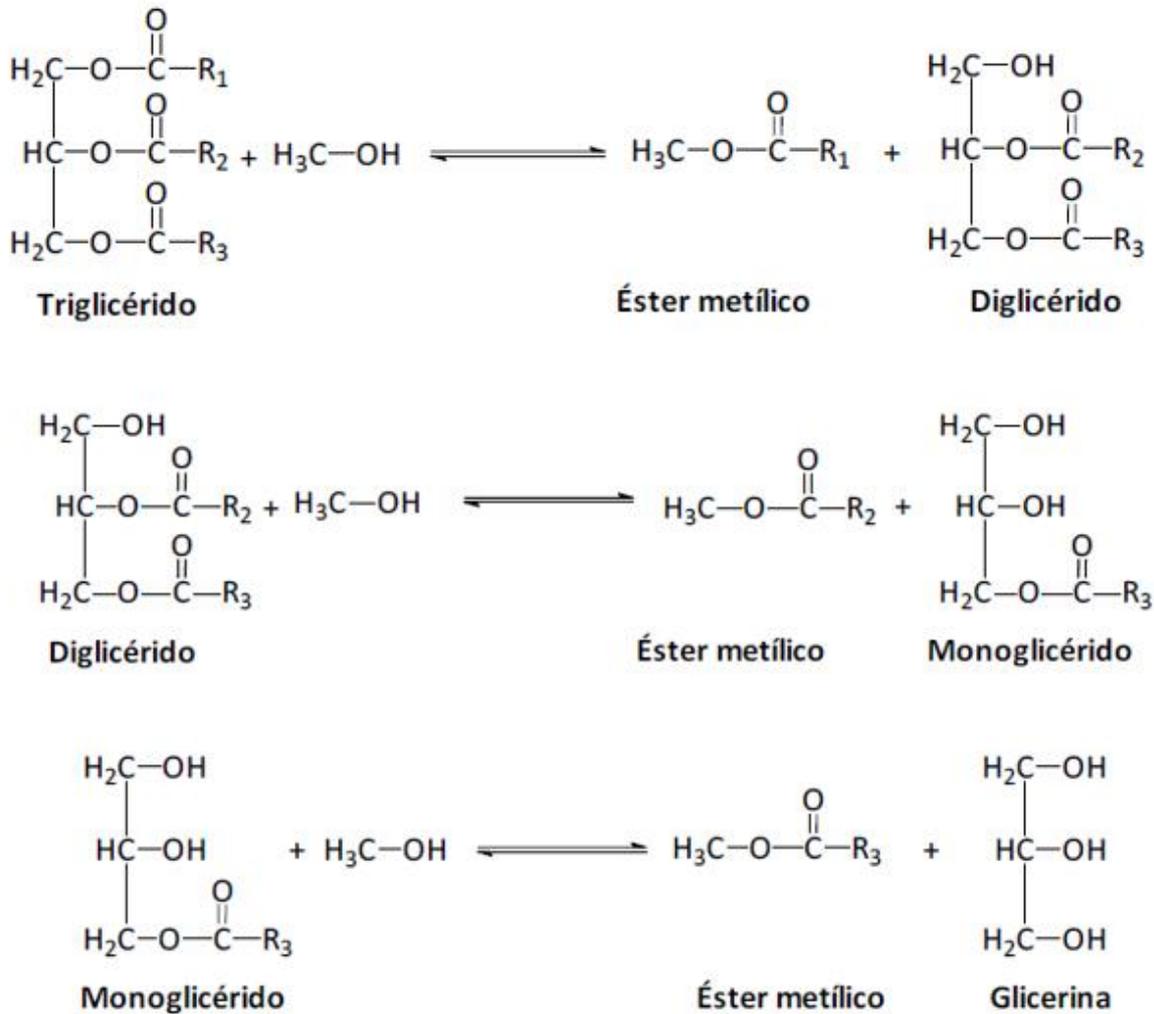


Figure II.2 : Les réactions successives de la transestérification. [47]

La réaction étant réversible, il est recommandé d'utiliser un excès d'alcool afin de déplacer l'équilibre dans le sens de la production d'ester selon le principe de Le Chatelier. La réaction stœchiométrique nécessite 1 mole de triglycéride et 3 moles d'alcool. Cet excès d'alcool permet également la séparation des alkyl esters de la glycérine dans la phase formée.

Pendant la réaction une émulsion se forme généralement. Cette émulsion est provoquée en partie par la formation des diglycérides et monoglycérides intermédiaires qui contiennent des groupements polaires d'hydroxydes ainsi que des chaînes d'hydrocarbure non polaires.

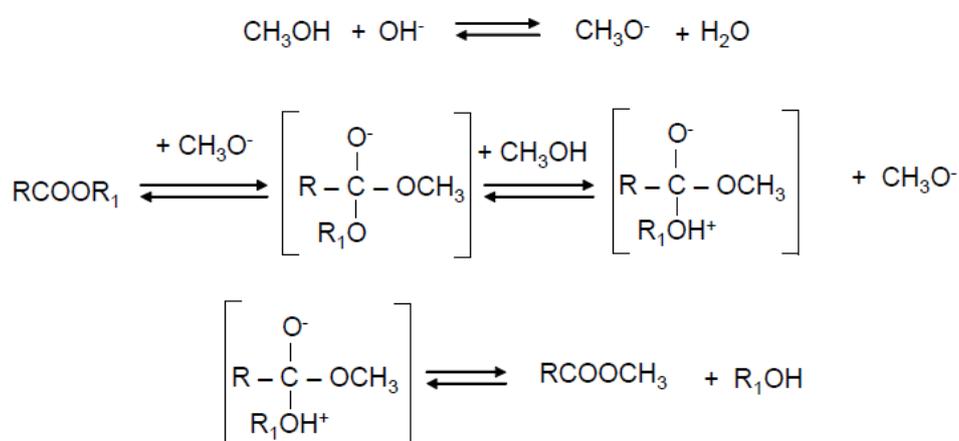
Les propriétés physiques des huiles végétales varient largement du fait de la différence des acides gras libres présents dans les triglycérides. Ces différences sont associées à leur différent degré d'insaturation. Un taux élevé d'acides gras insaturés dans les esters améliore le fonctionnement du biodiesel à de basses températures, mais diminue sa stabilité à l'oxydation.

## [Chapitre II : Biodiesel]

Par ailleurs, l'utilisation d'alcool ayant de plus longues chaînes, ramifiés ou pas, pour la production du biodiesel, donne des alkyl esters avec des points de congélation inférieurs à ceux des esters méthyliques. Cette amélioration des propriétés dans le froid faciliterait l'utilisation du biodiesel comme carburant dans les climats froids sans se soucier de sa probable solidification. Néanmoins, le prix élevé des alcools à longue chaîne fait que l'obtention du biodiesel avec ces derniers n'est pas rentable, raison pour laquelle il est préférable d'avoir recourt à l'addition d'additifs commerciaux économiques.

La transestérification de l'huile engendre une grande diminution de la valeur de la viscosité, une amélioration de la fluidité dans les climats froids et une augmentation du nombre du cétane.

La vitesse de la réaction est plus grande lors de l'utilisation des catalyseurs alcalins que lors de l'utilisation des catalyseurs acides. Ceci est dû à la différence des mécanismes réactionnels de la réaction. En utilisant un catalyseur alcalin, la réaction se produit quand l'alcool est activé par la base en formant un groupement  $\text{CH}_3\text{O}^-$  qui est la véritable espèce catalytique (figure II.3).



**Figure II.3 :** La réaction de la transestérification moyennant un catalyseur basique. [48]

Dans le cas de la catalyse acide, où l'acide sulfurique est généralement employé, ce sont les triglycérides, qui une fois activés, réagissent avec le méthanol (figure II.4).

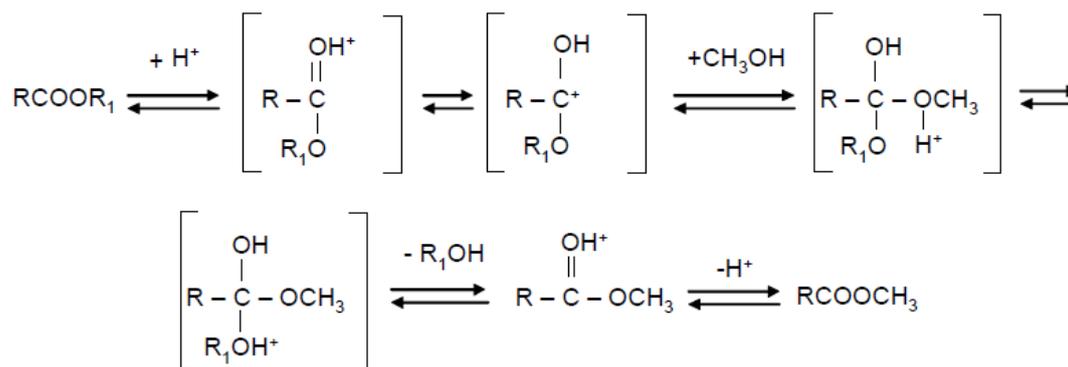


Figure II.4 : La réaction de la transestérification moyennant un catalyseur acide. [49]

## II.4. Les paramètres affectant la réaction de la transestérification :

Les paramètres qui affectent la réaction de la transestérification peuvent être divisés en deux catégories :

- Les conditions de la réaction.
- Les caractéristiques de l'huile.

### II.4.1. Les conditions de la réaction :

#### II.4.1.1. La température de la réaction :

Bien qu'en augmentant la température le rendement augmente et le temps de la réaction diminue, il est recommandé que la température n'excède pas le point d'ébullition de l'alcool, car celui-ci se vaporise et forme des bulles qui limitent la réaction à l'interface alcool/huile/biodiesel. Ainsi la température de transestérification dépend à la fois de l'huile et de l'alcool utilisés, par exemple : la température de l'estérification de l'huile du ricin avec du méthanol varie entre 20 et 35°C et entre 45°C et 60°C pour l'huile de soja.

#### II.4.1.2. Le type d'alcool :

Le méthanol est l'alcool le plus utilisé bien que d'autres alcools puissent être employés comme : éthanol, n-propanol, isopropanol, butanol, Isobutanol, pentanol et isopentanol. Le choix de l'alcool dépend des coûts, de sa performance dans l'étape de séparation et de ses origines renouvelables. Lorsque l'alcool utilisé est le méthanol, une émulsion se forme pendant la réaction qui disparaît ensuite en formant deux phases liquides. Cette émulsion persiste lors de l'utilisation de l'éthanol, gênant ainsi la séparation et la purification des phases.

#### II.4.1.3. Le type du catalyseur :

Le choix du type du catalyseur dépend de la nature de l'huile utilisée (teneur en acide gras et humidité) et de son prix. Si l'huile a une teneur élevée en acides gras et une

humidité élevée, il est recommandé d'employer des catalyseurs acides, car les catalyseurs alcalins favorisent la réaction de la saponification. Néanmoins, les catalyseurs alcalins sont les plus utilisés dans l'industrie car ils requièrent des rapports molaires alcool/huile bas et des températures basses, des temps de réaction courts et corrodent moins l'équipement.

### **II.4.1.4. La concentration du catalyseur :**

Une concentration élevée favorise la formation des sels et l'émulsification du mélange.

### **II.4.1.5. Le temps de réaction :**

Le rendement de la réaction augmente avec l'augmentation du temps de la réaction. Ainsi il a été rapporté que la conversion augmente de 87.81% à 88.90%, en passant de 50 à 90 minutes dans le cas d'une transestérification de l'huile du ricin (concentration massique du catalyseur : 0,5%, rapport molaire alcool/huile : 3/1, température : 63°C). Par ailleurs, la transestérification de l'huile en utilisant du méthanol nécessite moins de temps de réaction qu'en utilisant de l'éthanol pour atteindre le même rendement.

### **II.4.2. Les caractéristiques de l'huile :**

L'humidité et la teneur en acide gras sont des paramètres déterminant de la viabilité du processus de la transestérification de l'huile végétale. Pour que la réaction soit réalisée dans les meilleures conditions, les acides gras ne doivent pas dépasser une valeur de 3% selon la FFA (Free Fatty Acid). En effet, plus l'acidité de l'huile augmente plus la conversion diminue. La présence d'humidité diminue le rendement de la réaction car l'eau réagit avec les catalyseurs et forme des savons. [48]

## [Chapitre II : Biodiesel]

### II.5. Spécifications du biodiesel :

Le tableau II.1 présente les différentes spécifications qui régissent la qualité du biodiesel.

**Tableau II.1** : Les différentes spécifications du biodiesel. [46]

Propriété	Unité	Limites		Méthode d'essai
		minimu	maximum	
				(Voir La Clause 2)
Densité à 15 °C	Kg/ml	860	900	OIN 12185 D'EN D'OIN 3675
Viscosité à 40 °C	mm/s	3.50	5.00	OIN 3104 D'EN
Point trouble	°C	101	-	OIN 2719 D'EN OIN 3679 <sup>1</sup>
Contenu de soufre	mg/kg	—	10.0	OIN 20884 D'EN D'OIN 20846
Résidu de carbone	% (m/m)	-	0.30	OIN 10370 D'EN
Indice de cétane	-	51.0	-	OIN 5165 D'EN
Teneur en cendres	% (m/m)	-	0.02	OIN 3987
Teneur en eau	mg/kg	-	500	OIN 12937 D'EN
Contamination totale	mg/kg	-	24	En 12662
Corrosion de cuivre de bande	estimation	classe 1		OIN 2160 D'EN
Stabilité d'oxydation.	heures	6.0	-	en 14112 du prEN 15751
Indice d'acidité	magnésiu	-	0.50	En 14104
Ester méthylique acide de Linotenic	% (m/m)	-	12.0	En 14103
esters méthyliques polyinsaturés	% (m/m)	-	1	1
Contenu de méthanol	% (m/m)	-	0.20	En 14110
Contenu de	% (m/m)	-	0.80	En 14105
Contenu de diglycéride	% (m/m)	-	0.20	En 14105
Contenu de triglycéride	% (m/m)	-	0.20	En 14105
Glycérol libre	% (m/m)	-	0.02	EN 14106 D'EN 14105
Glycerd total	% (m/m)	-	0.25	En 14105
Métaux du groupe I	mg/kg		5.0	EN 14538 D'EN 14109 D'EN 14108
Métaux du groupe II	mg/kg		5.0	En 14538
Contenu de phosphore	magnésiu	-	4.0	En 14107

### **II.6. Production du biodiesel à partir de l'huile de l'espèce *Ricinus communis L.* :**

#### **II.6.1. Extraction de l'huile par compression :**

Les graines sont soumises à un nettoyage. Elles sont ensuite portées à une température de 60°C. Ce préchauffage permet de diminuer la viscosité de l'huile et de briser les parois cellulaires des graines pour permettre l'échappement de l'huile. Les graines entrent dans une presse hydraulique ou elles subissent une compression. L'huile sortant est envoyée au réservoir de stockage.

#### **II.6.2. Conversion de l'huile en biodiesel :**

L'huile dégommée est mélangée avec le catalyseur acide ( $H_2SO_4$ ) dans un rapport molaire de 7,5 / 1. Le mélange est porté ensuite à une température de 80°C avant d'être envoyé dans un réacteur de transestérification. Une charge d'éthanol à 78°C est ajoutée au mélange précédent dans un rapport molaire de 11,6 / 1.

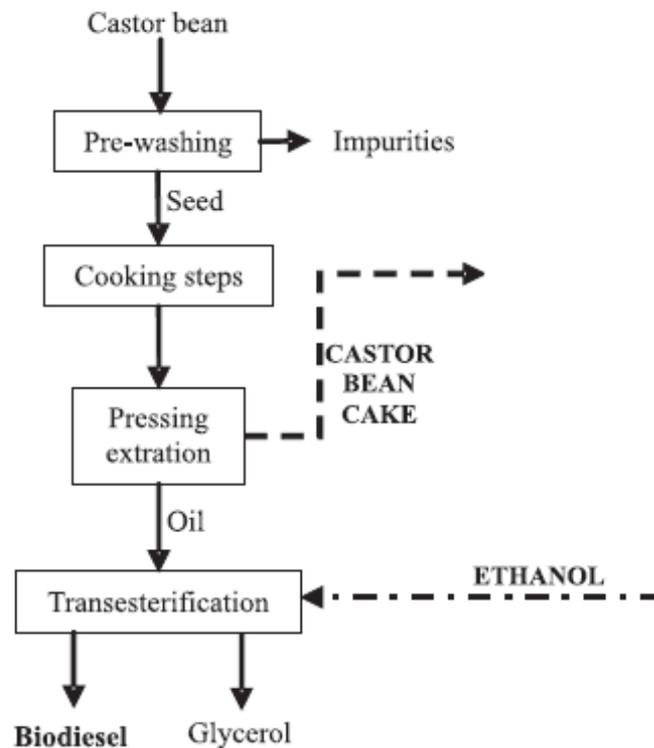
Le courant de sortie du réacteur contenant le biodiesel, la glycérine comme coproduit, de l'éthanol en excès, le catalyseur et l'huile n'ayant pas réagi est envoyé ensuite à une unité de distillation conçue pour recycler l'éthanol qui n'a pas réagi pour le réutiliser. La pureté de l'éthanol récupéré doit dépasser 94%. Une pureté inférieure à 94% est susceptible d'affecter la réaction de transestérification. La colonne de distillation fonctionne à une température de 210°C et une pression de 1 atm.

Le produit de fond de l'unité de distillation est refroidi à 70 °C et envoyé dans un réacteur de conversion qui est simultanément alimenté par un courant d'hydroxyde de sodium à une température de 40 °C. Dans ce réacteur tout le catalyseur ( $H_2SO_4$ ) réagit avec du NaOH pour produire du sulfate de sodium ( $Na_2SO_4$ ) et de l'eau. Le produit de ce réacteur contenant le biodiesel, la glycérine, l'huile n'ayant pas réagi, du sulfate de sodium et de l'eau est envoyé dans un décanteur continu où les deux phases lourde et légère sont séparées.

La phase légère (biodiesel) est chauffée à 60°C et lavée dans l'unité d'extraction liquide-liquide avec de l'eau pour éliminer la glycérine restante. Le produit de fond de l'unité d'extraction liquide-liquide (glycérine et eau) est mélangé avec la phase lourde provenant du décanteur continu et envoyé au stockage. Le produit du haut de la colonne d'extraction

## [Chapitre II : Biodiesel]

liquide-liquide (biodiesel + huile) passe à travers une vanne de détente où la pression est ramenée à 800 Pa. Ce flux entre ensuite dans une autre unité de distillation, où le biodiesel (B100) est séparé de l'huile n'ayant pas réagi. Le biodiesel est refroidi à la température ambiante et transféré vers l'unité de stockage [51]. La figure II.5 donne les principales étapes de la production du biodiesel à partir des graines du ricin.



**Figure II.5 :** les principales étapes de la production du biodiesel à partir des graines du ricin. [62]

Le tableau II.2 donne quelques propriétés du biodiesel obtenu à partir du ricin.

## [Chapitre II : Biodiesel]

---

Tableau II.2 : Les propriétés du Biodiesel obtenu à partir de l'huile de ricin [61]

Propriétés	Unités	B100
Densité	Kg.m <sup>3</sup>	926.8
Viscosité Cinématique	mm <sup>2</sup> /s	15.98
Point éclair	°C	190.7
Valeur calorifique	kJ/kg	37900.8
Corrosion de la bande du cuivre		1 b
Résidu de carbone	% massique	0.037
Point de trouble	°C	-23
Point d'écoulement	°C	-45

# **Chapitre III :**

***Ricinus communis L.***

### **III. *Ricinus communis* L. :**

#### **III.1. Introduction :**

Comme l'industrie du biodiesel grandit, la garantie d'un approvisionnement en matières premières rentable et diversifié constitue un véritable casse-tête. En effet, il est nécessaire de diversifier les sources et les méthodes utilisées pour produire le biodiesel dans le but d'assurer une sécurité alimentaire, une sécurité énergétique, un développement durable et une diminution du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Les producteurs du biodiesel sont à la recherche de matières premières alternatives qui sont des cultures non alimentaires. Aujourd'hui, de grands espoirs reposent sur l'espèce *Ricinus communis* L.. Ces propriétés soutiennent la pertinence de cette plante pour la production d'une huile végétale à grande échelle nécessaire pour une industrie du biodiesel durable.

Le rendement peut atteindre 350-650 kilogrammes de Biodiesel par hectare. Il est important de signaler que ces chiffres sont obtenus dans le où la culture du ricin n'est soumise à aucune forme de commercialisation (engrais, irrigation).

Ce chapitre donnera un aperçu général de l'espèce *Ricinus communis* L. en vue de son utilisation en tant que matière première pour la production du biodiesel.

#### **III.2. Origine :**

Le ricin est d'origine d'Afrique de l'est bien qu'il soit présent actuellement dans toutes les régions chaudes du monde. En effet, l'utilisation du ricin remonte à 4000 ans avant J-C où des graines de ricin ont été trouvées dans les tombeaux des pharaons qui s'en servaient dans le but de s'éclairer en le brûlant dans des lampes. Il fut également utilisé par nos grands-mères pour ses vertus thérapeutiques. [57]

#### **III.3. Description générale :**

Le ricin fait partie de la famille des Euphorbiacées. Il est du genre *Ricinus* qui ne comporte qu'une seule espèce (*Ricinus communis* L.). Le ricin se retrouve sur tous les continents, à l'état plus ou moins sauvage. C'est toutefois dans les régions tropicales ou subtropicales que la plante trouve les conditions les plus favorables à son développement. Dans les zones tropicales, aucun arrêt de végétation n'est observé et le ricin se comporte comme une véritable plante pérenne pouvant vivre trois à huit ans. Néanmoins, le ricin est souvent cultivé comme plante annuelle. [58]

## [Chapitre III : *Ricinus communis*]

---

La plante du ricin se présente sous forme d'une plante arborescente pouvant atteindre 8-10 mètres de hauteur dans les conditions adéquates de lumière, température et d'humidité dans sa région d'origine et ne dépassant pas 2 m dans les régions tempérées (figure III.1).



**Figure III.1** : La plante du ricin. [62]

La plante ne porte que peu de feuilles mais elles sont de grande dimension. Ses larges feuilles palmées et lobées peuvent atteindre 50 centimètres (figure III.2). Il existe diverses variétés de cultivars avec des feuilles de différentes couleurs comme noir violacé, rouge-foncé métallisé, marron, vert clair avec des veines blanches ou tout simplement vert.



**Figure III.2** : Les feuilles de la plante du ricin. [62]

La plante se présente de la façon suivante : une tige principale qui se termine par une inflorescence. Des ramifications secondaires, puis tertiaires, peuvent se développer et

porteront chacune une inflorescence à leur extrémité. Les fruits se dessèchent naturellement à maturité. Ils sont constitués de trois loges contenant chacune une graine.

Les fleurs apparaissent la majeure partie de l'année en grappes terminales denses avec des fleurs femelles près du sommet et des fleurs masculines en bas de la plante. Chaque fleur femelle comporte un petit ovaire épineux qui développe à l'intérieur de la graine une capsule et une structure rouge lumineuse avec des plumes. Chaque fleur masculine se compose d'un groupe de plusieurs étamines qui perdent le pollen en présence du vent (figure III.3).



Figure III.3 : les fleurs de la plante du ricin. [62]

### III.4. Propriétés et composition :

Les graines, présentées sur la figure III.4, contiennent 42 à 56 % d'huile. Les pellicules des graines constituent 20 à 40 % du poids des graines. Les téguments se composent principalement de la ricine qui est un agent toxique (3 %), un alcaloïde toxique (0,03 à 0,15 %) et la ricinine. L'huile de ricin est constituée majoritairement d'acides gras. Le tableau III.1 présente les glycérides contenues dans l'huile de ricin. [60]



Figure III.4 : Les graines du ricin. [62]

Tableau III.1 : La composition de l'huile du ricin en glycérides.[53]

Glycéride	Quantité (%)
Acide ricinoléique	80 - 85
Acide oléique (C18 :1)	7
Acide linoléique (C18 :2)	3
Acide palmitique (C16 :0)	2
Acide stéarique (C18 :0)	1

### III.5. Caractères généraux du ricin :

#### III.5.1. Ecologie :

La plante est cultivée dans les régions tropicales, subtropicales et tempérées. En Inde, elle est cultivée jusqu'à une altitude de 2500 m mais dans les régions où un gel se produit pendant la phase de la germination elle ne doit pas dépasser 500 m. Elle se développe dans les régions tropicales et subtropicales comme une plante vivace et dans le climat tempéré comme une culture annuelle. Une température modérée de 20-26°C pendant la période de la croissance est favorable pour obtenir de plus grands rendements. Une basse température (moins que 15°C) du sol favorise l'apparition de jeunes plantes et rend la graine plus exposée à être attaquée par les maladies fongiques et les insectes. Le système racinaire du ricin étant très profond il est assez résistant à la sécheresse. Une précipitation de 500-600 millimètres

pendant la période de la croissance entraîne un rendement meilleur. La plante peut résister à de très longues périodes de sécheresse ainsi qu'à de forte pluie. Le ricin préfère des journées claires, ensoleillées avec peu d'humidité.

Le ricin peut être développé sur une large gamme de type de sols pourvu qu'ils soient assez profonds et bien drainés avec un penchant pour les limons sableux et argileux. Ils doivent être légèrement acides avec un pH variant de 5.0 à 6.5. Les sols excessivement fertiles ne sont pas souhaitables car ils favorisent une croissance végétative excessive aux dépens du rendement des graines. Le ricin ne devrait pas être planté dans un sol exposé à l'érosion. [6]

### **III.5.2. Plantation :**

La préparation du sol est semblable au coton, au maïs et au soja. Un labourage profond (20 à 30 centimètres) encourage le développement et une pénétration plus profonde de la racine. Les semis doivent être plantés dans des rangées de 0.96 à 1.01 m avec une densité de semis de 11.2 à 15.7 kg/ha soit 25000 à 30000 plantes/ha pour permettre aux moissonneuses de ne pas endommager la végétation lors de la récolte des graines. La récolte manuelle nécessite des rangées plus étroites. Les semis devraient être plantés quand le sol est chaud (une moyenne de 10 jours de 15.6°C) vers le mois d'Avril ou Mai à une profondeur de 5 centimètres.

Les semis doivent être traités avec un fongicide avant la plantation. C'est particulièrement important là où il y a un risque de basses températures et une haute humidité juste après la plantation. [53]

### **III.5.3. Croissance :**

La phase de la croissance exige au moins 140 jours pour obtenir des rendements satisfaisants de graines de ricin. Dans les régions arides et semi arides, la phase de la croissance peut aller jusqu'à 170 jours.

L'apparition des jeunes plantes peut prendre 10 à 21 jours après l'ensemencement. La floraison débute 40 à 70 jours après la plantation. La maturation des fruits à l'intérieur d'une infrutescence est inégale, où les fruits situés dans la partie inférieure mûrissent avant ceux situés dans la partie supérieure. [59]

### **III.5.4. Entretien :**

Les meilleurs rendements des graines du ricin sont obtenus sous irrigation où une basse humidité règne. La lutte contre les mauvaises herbes est nécessaire où le premier désherbage s'effectue environ 6 semaines après la plantation.

## [Chapitre III : *Ricinus communis*]

---

Des quantités adéquates d'azote, de phosphore, et de potassium doivent être disponibles pour produire des rendements élevés de graines de ricin. Ces quantités devraient être déterminées par des essais sur le sol. Si le sol est déficient en azote, une quantité de 90 à 135 kg/ha d'azote est nécessaire pour un rendement maximum. Si le phosphore est nécessaire, son application devrait être faite avant la phase de la plantation. Le potassium peut être appliqué au même temps que la plantation. Un minimum de 37 à 56 kg/ha de phosphore et de 15 à 19 kg/ha de potassium est nécessaire pour la culture du ricin. [60]

### **III.5.5. Récolte :**

Les graines du ricin ne sont prêtes pour être récoltées qu'une fois toutes les capsules sont sèches et les feuilles sont tombées des plantes. Les graines du ricin étant fragiles, l'ajustement de la vitesse du cylindre de la moissonneuse est très important. Les mauvaises herbes peuvent causer des problèmes lors de la récolte des graines du ricin. Ils peuvent obstruer les machines ou causer l'éclatement des graines du ricin.

Après la récolte, les tiges doivent être cassées mécaniquement, ces tiges se détériorent rapidement et fournissent de la matière organique. Les coques du ricin qui sont dispersées à travers le champ pendant la récolte servent d'engrais. Idéalement, les graines du ricin doivent être stockées à une humidité de moins de 6%. [59]

### **III.6. Quelques caractéristiques de l'huile du ricin :**

Le tableau III.2 donne quelques propriétés de l'huile du ricin.

## [Chapitre III : *Ricinus communis*]

Tableau III.2 : Les propriétés de l'huile obtenue à partir de l'huile de ricin [63]

Propriétés chimiques	
Indice d'iode	82 - 90
Indice de saponification	177 - 187
Matières non saponifiables	0,2 % - 0,3 %
Propriétés physiques	
Température de fusion	-12 °C à -18 °C
Température d'ébullition	> 350 °C
Solubilité	Pratiquement insoluble dans l'eau Soluble dans méthanol et hexane bouillant
Masse volumique	$d_{25}^{25}$ 0,945 – 0,965
Température d'auto inflammation	448 °C
Point éclair	229 °C
Viscosité dynamique	935 – 1033 mPa.s (20 °C)
Propriétés optiques	
Indice de réfraction	$n_D^{40}$ 1,466 – 1,473

### III.7. Utilisations de l'huile du ricin :

La structure chimique de l'huile de ricin est d'un grand intérêt en raison de la large gamme de réactions qu'elle offre à l'industrie et des nombreux produits chimiques qui peuvent en être tirés. Ces dérivés peuvent être utilisés dans plusieurs applications industrielles au même titre que les produits pétrochimiques correspondant. Mieux encore, nous pouvons dire que ces dérivés sont nettement meilleurs car ils sont obtenus à partir de sources renouvelables, biodégradables et respectueux de l'environnement. L'huile de ricin figure dans une large mesure de fabrication de lubrifiant des moteurs à grande vitesse ainsi que ceux des

### [Chapitre III : *Ricinus communis*]

---

avons. Elle est employée dans la fabrication des savons, du papier transparent, des vernis et des plastifiants. Elle est également utilisée pour des buts médicaux et des fins d'éclairage.

Aujourd'hui, l'huile du ricin constitue une matière de base potentielle pour la production du biodiesel. En effet, Cette huile a une teneur en cendres d'environ 0.02% et un pourcentage en soufre inférieur à 0.04%. L'indice de cétane du biodiesel issu de l'huile du ricin appartient à la gamme recommandée par l'ASTM pour les moteurs diesel. Le biodiesel issu de l'huile du ricin a des propriétés très intéressantes (points de troubles et de congélation très bas) ce qui fait de lui un carburant approprié dans les températures extrêmes d'hiver. L'huile de ricin est la seule qui est soluble dans l'alcool et ne requière pas la chaleur et l'énergie que les autres huiles végétales exigent lors de leur conversion en biodiesel. [53]

**Chapitre IV :**  
**Analyse de cycle de**  
**vie**

### IV. Analyse de cycle de vie

#### IV.1. Introduction

Le biodiesel n'est pas aussi vert que ça. En effet, jusqu'à une date récente, 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'équivaut pas forcément 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 CO<sub>2</sub>.

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 ou du biodiesel issu d'une plante au détriment du biodiesel lui-même issu d'une autre plante.

L'objectif principal de cette analyse du cycle de vie est d'évaluer les impacts environnementaux d'une filière de production du biodiesel produit à partir de la culture de l'espèce *Ricinus L.* 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 de l'huile de l'espèce *Ricinus communis 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 seulement 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.

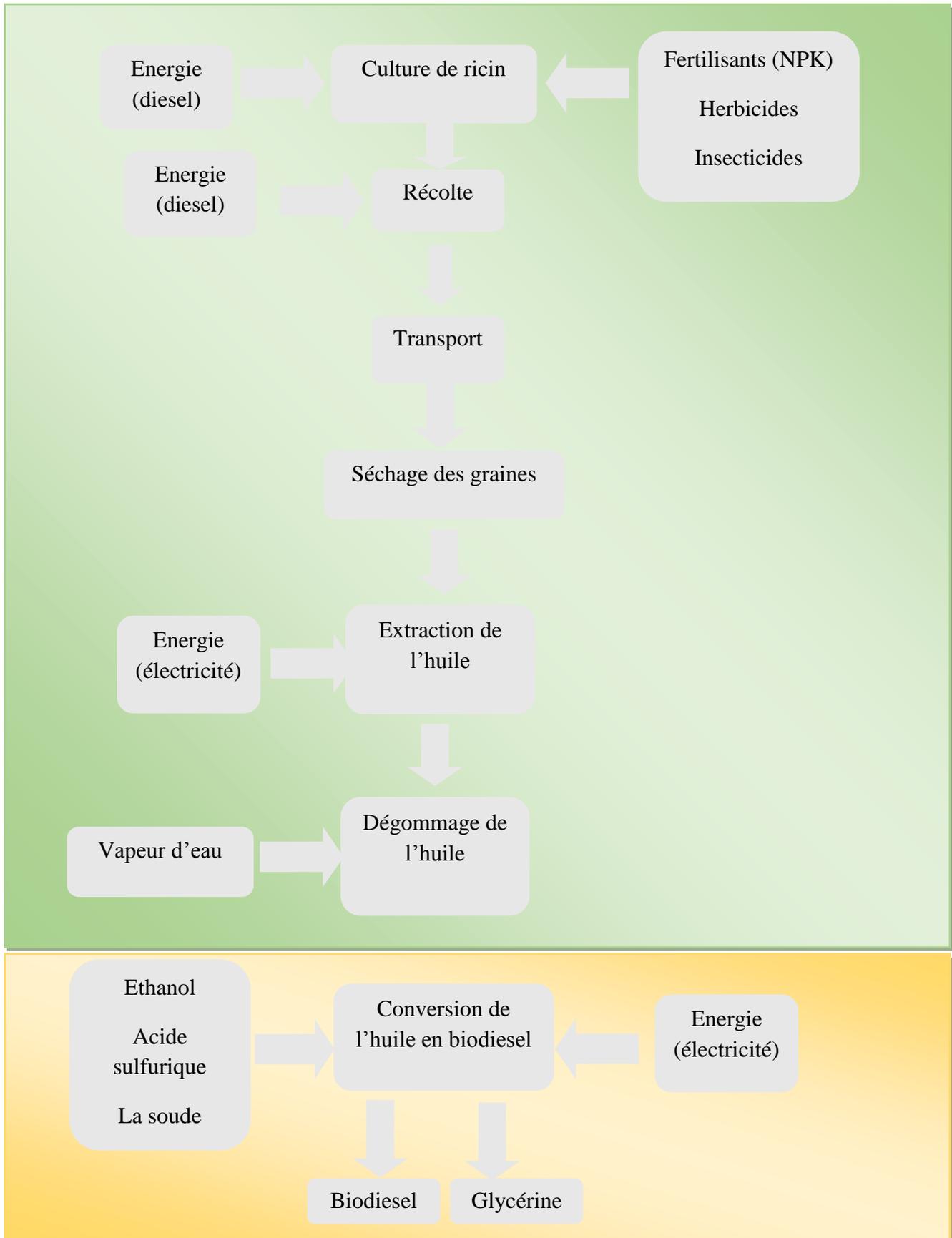
##### **IV.2.2.2. Définition de l'unité fonctionnelle :**

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

##### **IV.2.2.3. Définition et modélisation du système étudié :**

La figure suivante regroupe les différents processus élémentaires du système de production du biodiesel à partir du ricin.

## [Chapitre IV : Analyse de cycle de vie]



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

### **IV.2.2.4. Définition des limites du système :**

Les limites du système déterminent quels sont les processus unitaires qui seront inclus dans l'ACV et quel niveau de détail 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 en 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%). [65]

### **IV.2.2.5. Catégories d'impact prises en compte :**

Pour l'évaluation des différents impacts, on considère les catégories d'impact suivantes : le changement climatique, la diminution d'ozone stratosphérique, l'acidification, l'eutrophisation et l'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, pourvue qu'elles soient récentes, de préférence dans des zones ayant des caractéristiques comparables à celles caractérisant notre pays. Dans le cas où malgré cela la donnée n'est toujours pas trouvée et que le processus en question est secondaire et ne génère pas beaucoup de charges environnementales, on préfère supprimer carrément ce

## [Chapitre IV : Analyse de cycle de vie]

---

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 d'une tonne. [50]
- La culture du ricin est conduite dans un système de production non irrigué.
- Les travaux du sol sont mécanisés.
- La teneur de la graine en huile est de 50% pour le ricin. [53]
- La production d'un litre de biodiesel nécessite un litre d'huile de ricin.
- 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.3.2. Le ricin :**

##### **IV.3.2.1. Activité agricole :**

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

## [Chapitre IV : Analyse de cycle de vie]

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

Type d'input	Nomenclature		Unité	Quantité	Références
<b>Chimique</b>	Herbicide (Trifluraline)		Kg	4.08	[51]
	Insecticide (Furadan)		Kg	9.72	
	Fertilisant (NPK)	N Azote urée	Kg	55	
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (superphosphate triple 45%)		75	
		K <sub>2</sub> O		55	
<b>Energie</b>	Travail du sol	Labour	MJ	1852.8	[66]
		Hersage		131.6	[70]
		Désherbage		4.4	[66]
		Semis		17.6	
	Récolte			123.2	
	Séchage			759.3	
	<b>Transport</b>	Carburant (diesel)		L	19.4
<b>Séquestration de CO<sub>2</sub></b>			Kg	10000	[51]
<b>Fixation d'azote (N)</b>			kg	15	

## [Chapitre IV : Analyse de cycle de vie]

### IV.3.2.2.Extraction de l'huile :

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

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

Type d'input	Nomenclature	Unité	Quantité	Références
Chimique	Hexane	Kg	264	[51]
Energie	Presse	MJ	1.32	
	Vapeur d'eau	Kg	420	

### IV.3.2.3. Conversion de l'huile de ricin :

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

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

Type d'input	Nomenclature	Unité	Quantité	Références
Chimique	Acide sulfurique H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kg	17	[51]
	Ethanol	Kg	706.5	
Energie		MJ	181.4	[25]

**Remarque :** N'ayant pas trouvé de donnée concernant l'input en matière d'énergie dans la phase de la conversion de l'huile pour le ricin, nous supposons qu'elle est similaire à celle du tournesol et nous travaillons avec cette supposition.

La figure IV.2 montre Arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile du ricin.



### **IV.4. Evaluation de l'impact du cycle de vie :**

#### **IV.4.1. Caractérisation intermédiaire :**

A ce stade, seuls les résultats des catégories suivantes seront étudiés :

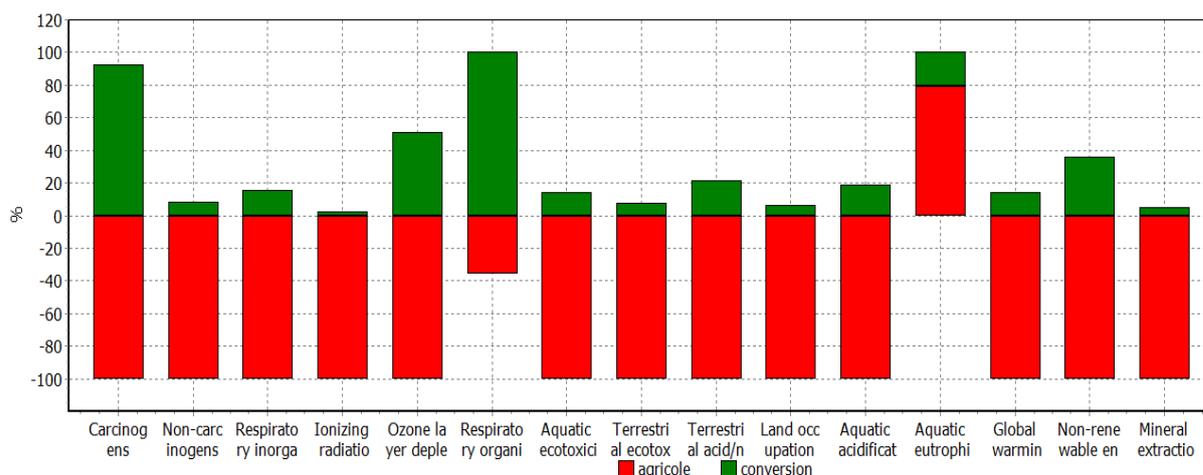
- Le changement climatique
- La consommation d'énergie non renouvelable
- La réduction de la couche d'ozone
- L'acidification
- L'eutrophisation

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 du ricin dans chacune des catégories d'impact intermédiaires est présentée dans le tableau IV.4 et la figure IV.3.

## [Chapitre IV : Analyse de cycle de vie]

**Tableau IV.4 : Caractérisation intermédiaire**

Catégorie d'impact	Unité	Total	agricole	conversion
<b>Carcinogènes</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	-5,49475	-70,6196	65,12485
<b>Non-carcinogènes</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	-50,6161	-55,1453	4,529157
<b>Effets respiratoires inorganiques</b>	kg PM <sub>2.5</sub> eq	-2,28031	-2,69574	0,415434
<b>Radiation ionisante</b>	Bq C-14 eq	-192982	-196872	3889,953
<b>Épuisement de couche d'ozone</b>	kg CFC-11 eq	-2,7E-05	-5,5E-05	2,8E-05
<b>Effets respiratoires organiques</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0,976702	-0,54971	1,526416
<b>Écotoxicité aquatique</b>	kg TEG water	-141353	-164291	22938,25
<b>Écotoxicité terrestre</b>	kg TEG soil	-58733,1	-63695,6	4962,542
<b>Acidification terrestre</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	-37,0474	-46,961	9,913679
<b>Occupation du sol</b>	m <sup>2</sup> org.arable	-25,062	-26,7731	1,711052
<b>Acidification aquatique</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	-12,5517	-15,3877	2,835994
<b>Eutrophication aquatique</b>	kg PO <sub>4</sub> P-lim	3,748228	2,961679	0,78655
<b>Réchauffement globale</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	-4962,58	-5771,02	808,4341
<b>Énergie non-renouvelable</b>	MJ primary	-61974,3	-96539,1	34564,81
<b>Extraction minérale</b>	MJ surplus	-188,61	-198,856	10,24561



**Figure IV.3 :** Profil environnemental.

### IV.4.2. Caractérisation des dommages :

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

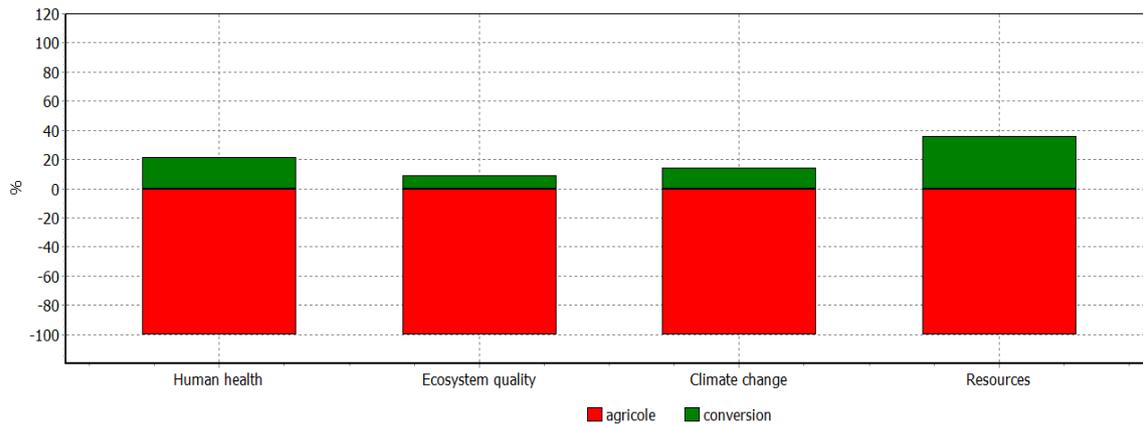
- Le changement climatique
- Les utilisations des ressources
- La santé humaine
- Les impacts sur la qualité des écosystèmes

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

**Tableau IV.5 :** Caractérisation des dommages.

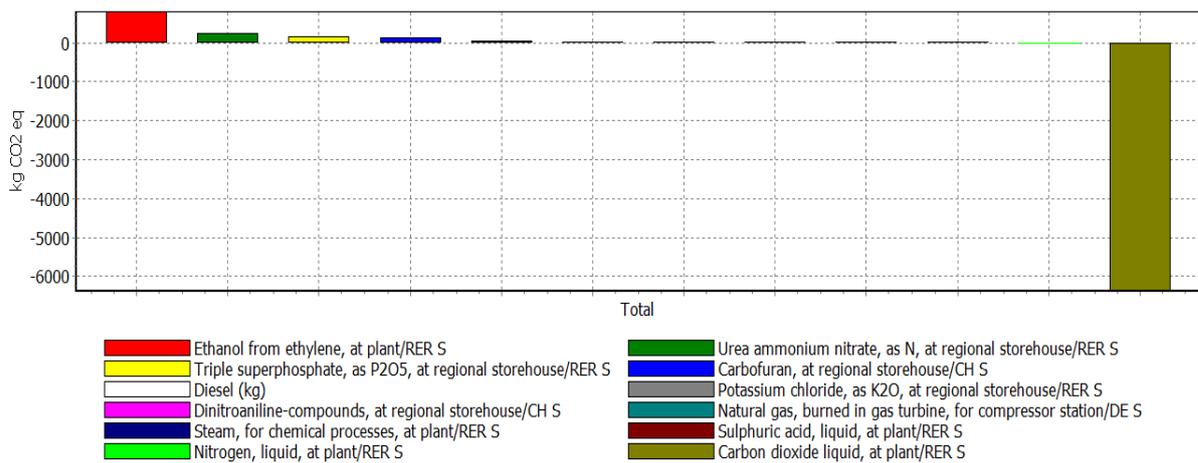
Catégorie de dommages	Unité	Total	agricole	conversion
Santé humaine	DALY	-0,00179	-0,00228	0,00049
Qualité d'écosystème	PDF*m <sup>2</sup> *yr	-537,522	-590,102	52,58048
Changement de climat	kg CO <sub>2</sub> eq	-4962,58	-5771,02	808,4341
Ressources	MJ primaire	-62162,9	-96738	34575,05

## [Chapitre IV : Analyse de cycle de vie]



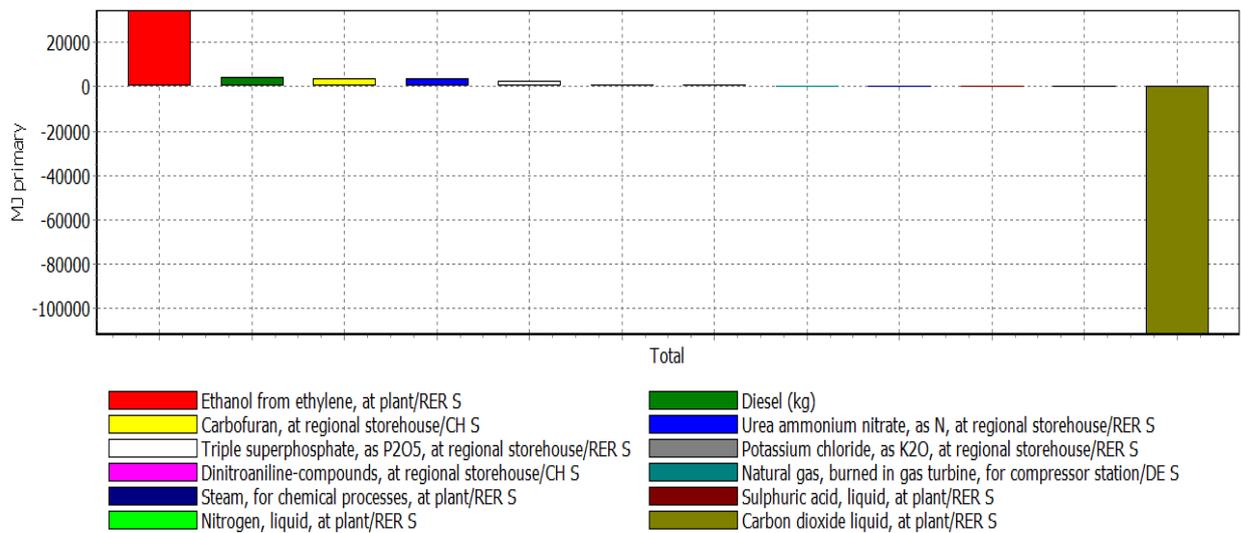
**Figure IV.4 :** Contribution des étapes de production sur les différentes catégories de dommages.

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

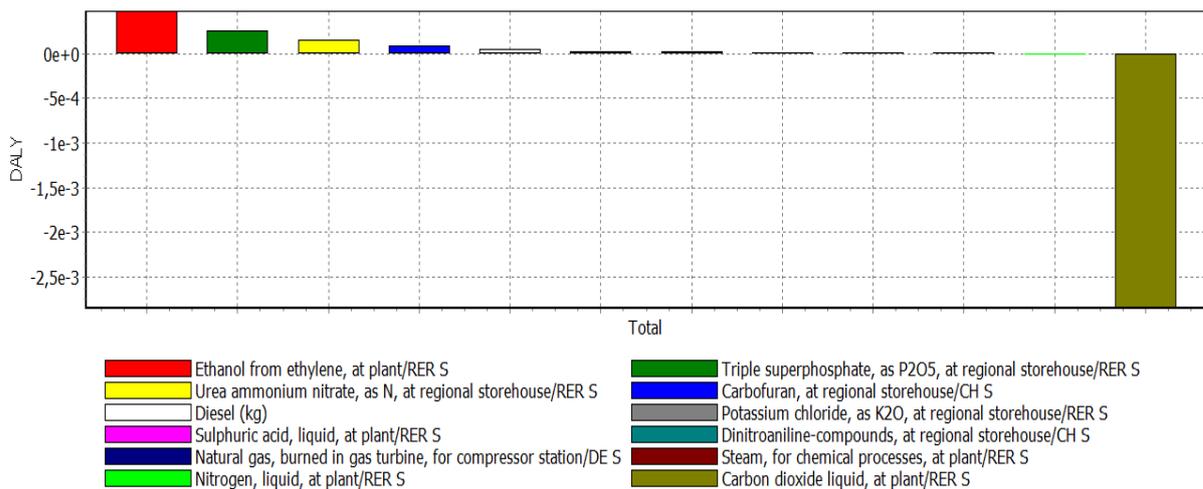


**Figure IV.5 :** Contribution des différents intrants sur le changement climatique.

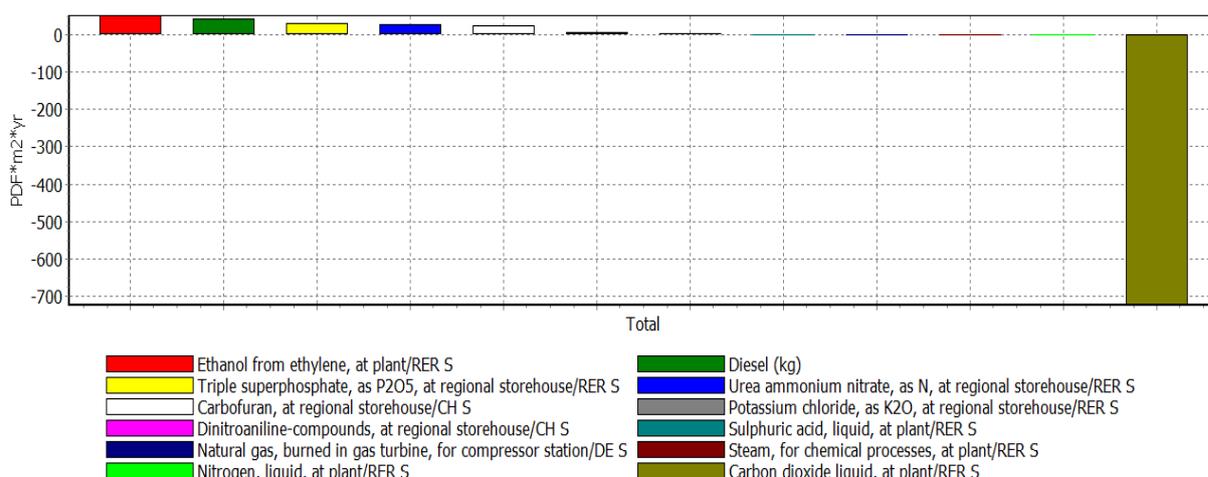
## [Chapitre IV : Analyse de cycle de vie]



**Figure IV.6 :** Contribution des différents intrants sur l'utilisation des ressources.



**Figure IV.7 :** Contribution des différents intrants sur la santé humaine



**Figure IV.8 :** Contribution des différents intrants sur la qualité des écosystèmes.

### 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 suivie de l'étape de la conversion de l'huile en biodiesel. Néanmoins, les effets qu'engendre chaque phase sont opposés. L'adéquation du sol et l'intégration des cycles biochimiques réduisent les Kg-eq de CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère grâce à la photosynthèse des plantes, donnant comme résultat une diminution du score de cette catégorie.

##### IV.5.1.2. Acidification :

Dans la catégorie d'acidification, la plus grande contribution est encore provoquée par la phase agricole. Cette contribution est négative grâce à l'azote fixé par les micros organismes présents dans le sol, ce qui réduit le score final de la catégorie. La contribution du processus de la transestérification est due au SO<sub>2</sub> généré principalement de la fabrication de l'acide sulfurique.

##### IV.5.1.3. Eutrophisation :

Le scénario dans lequel se développe la chaîne de production du ricin favorise l'eutrophisation. Les émissions d'oxyde d'azote favorisent l'enrichissement des nutriments des réserves aquatiques et des terrains agricoles. Par conséquent, l'eutrophisation augmente.

## [Chapitre IV : Analyse de cycle de vie]

---

L'intégration des cycles biochimiques dans l'ACV contribue à la diminution du précédent phénomène au moyen de la capture de l'azote atmosphérique par une partie des micro-organismes présents dans le sol. L'utilisation de fertilisants dans la phase agricole fait que cette étape a une contribution importante dans la catégorie de l'eutrophisation à cause des concentrations élevées de l'azote et du phosphore. L'accumulation de ces nutriments dans les eaux superficielles est responsable de la prolifération des algues avec l'épuisement postérieur de l'oxygène dissous et la mort de beaucoup d'organismes aérobies.

### **IV.5.1.4. 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 production des graines du ricin avec une contribution négative. En outre, la consommation de l'énergie non renouvelable qui se produit dans l'étape de transestérification est due aux matières premières impliquées ainsi que les différents traitements existant dans chaque étape

### **IV.5.1.5. Réduction de la couche d'ozone**

Dans la catégorie de la réduction de la couche d'ozone, la phase qui contribue le plus au bilan final est la phase agricole. Les CFC émis lors de la production du diesel fossile servant de carburant pour le transport des matières premières (fertilisants, pesticides...) et les travaux du sol (machines) sont compensés par le CO<sub>2</sub> séquestré et l'azote fixé. L'étape de la transestérification produit de très grandes émissions d'hydrocarbures qui réagissent avec les radicaux hydroxyles (l'oxygène et les oxydes d'azote) produisant les agents oxydants comme le formaldéhyde et le monoxyde de carbone. Durant le processus, il se forme également le dioxyde d'azote et d'une manière indirecte de l'ozone troposphérique.

## **IV.5.2. Les principaux contributeurs :**

### **IV.5.2.1. Santé humaine :**

Le facteur principal contribuant au score de cette catégorie de dommage est l'éthanol avec un taux de 44.59 %, suivi des fertilisants (40,21%) principalement l'engrais phosphatés avec 24.34%. Les énergies fossiles ont un impact de 4,25 % de la contribution global. L'insecticide Furadan a également une part non négligeable (12,96%). (Figure IV-7).

### **IV.5.2.2. Qualité des Ecosystèmes :**

Les principaux facteurs qui contribuent au résultat de cette catégorie de dommage sont l'éthanol (27,41%), la consommation en énergie fossile due à l'utilisation du carburant diesel (22,14%), suivit des engrais 34.62%. (Figure IV-8).

### **IV.5.2.3. Changement climatique :**

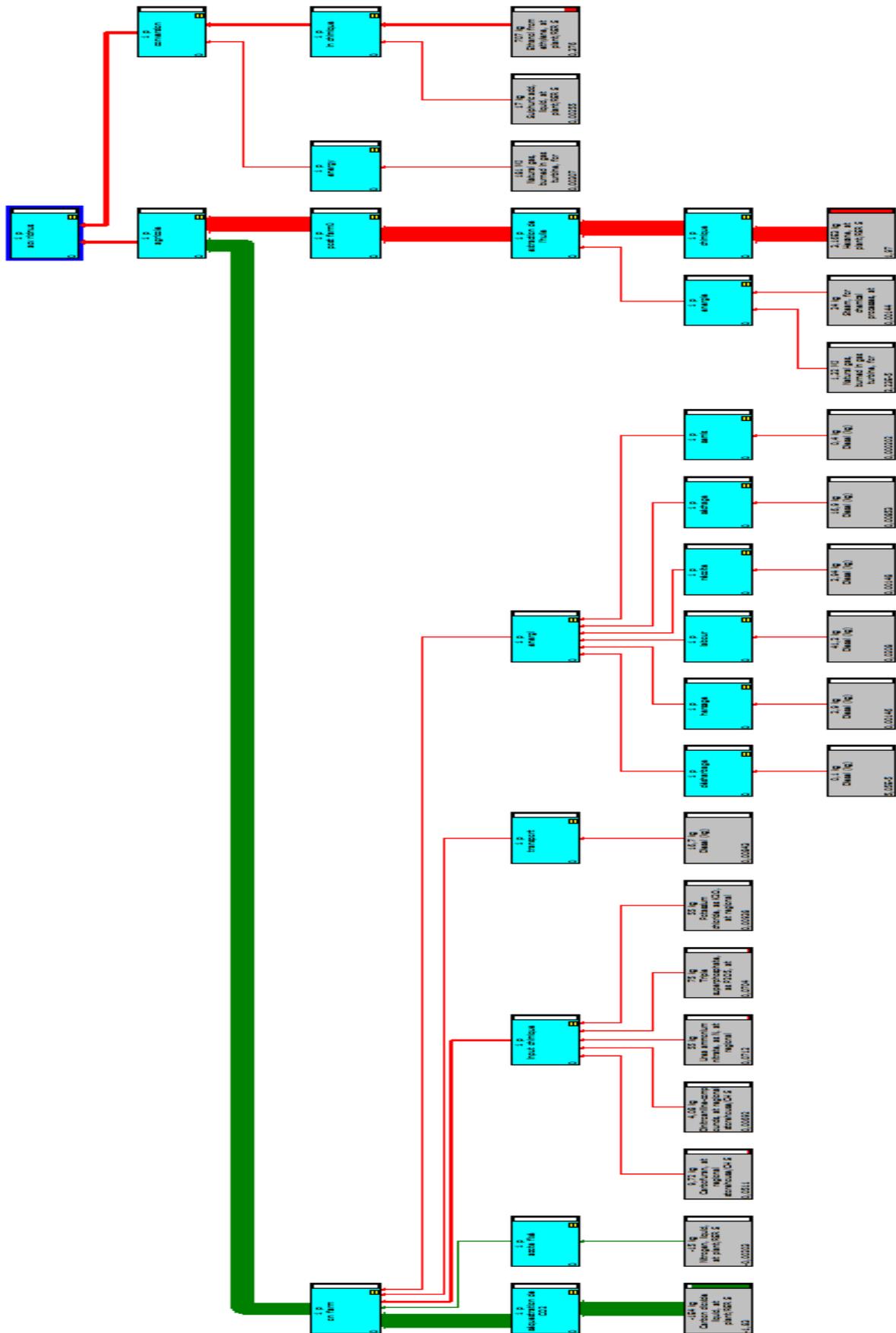
Les principaux facteurs qui contribuent au résultat de cette catégorie de dommage sont l'éthanol (55,99%) et les engrais (29.98%). (Figure IV-5).

### **IV.5.2.4. Utilisation des ressources :**

Les principaux facteurs contribuant au score de cette catégorie de dommage sont l'éthanol (69,03%), les engrais (13,22%) et l'utilisation des carburants fossiles (8,30%). (Figure IV-6).

## **IV.6. Etude de l'effet du rajout d'une extraction par solvant au procédé de production :**

Dans ce cas, l'arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile de ricin devient comme montré sur la figure IV.9.



**Figure IV.9 :** Arborescence des processus élémentaires de la production du biodiesel à partir de l'huile du ricin après intégration de l'extraction par solvant.

## [Chapitre IV : Analyse de cycle de vie]

---

Cette étape permet d'extraire 5 à 6% de l'huile résiduelle présente le tourteau après l'extraction par presse. Le calcul du bilan énergétique dans le cas du procédé de production avec extraction par solvant a donné un total de 69239,17 MJ d'énergie dépensée contre 45016 MJ d'énergie récupérée [71]. Le bilan énergétique prend une valeur de -24223,17 MJ avec un EROI de 0,65. L'EROI étant inférieur à 0,85 obtenu lors de l'utilisation du procédé sans extraction par solvant, cette étape ne vaut pas la peine d'être ajoutée au procédé de production du biodiesel à partir de l'huile de ricin.

# **Conclusion générale**

### **Conclusion générale :**

L'analyse du cycle de vie de la production du biodiesel obtenu à partir de l'huile de ricin a mené aux conclusions suivantes :

A travers la quantification des flux d'entrée et de sortie dans les différentes étapes du processus, l'ACV a permis l'identification des étapes prépondérantes dans les différentes catégories d'impact étudiées qui peuvent être visualisées sur le profil environnemental. Par conséquent, les points clefs susceptibles d'être améliorés sont bien mis en évidence. Dans la chaîne de production du biodiesel à partir de l'huile de ricin 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, sa distribution et son utilisation n'étant pas incluse dans le cycle de vie étudié.

Dans la mesure où la plante a une plus grande fixation nette du carbone et d'azote dans le sol, elle peut contribuer de manière significative à la diminution de l'impact lié aux catégories du changement climatique et l'eutrophisation respectivement.

L'éthanol, les fertilisants 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 vaut pas la peine d'être envisagé. 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 (0,85) à (0,65).

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

# **Recommendations**

### **Recommandations :**

D'après cette analyse du cycle de vie, les recommandations pouvant être faites sont :

La sélection, l'adoption et le développement des cultures d'espaces arboricoles à hautes performances agronomiques qui pourront apporter une valeur ajoutée pour des applications conventionnelles et industrielles.

Effectuer des études de gestion agronomique dans des sols de types différents pour minimiser la consommation des fertilisants et des pesticides sans compromettre le rendement des cultures, particulièrement optimiser l'utilisation d'engrais azotés pour minimiser les émissions des  $\text{NO}_x$  et de  $\text{NH}_3$ . Une substitution de ces apports est possible par l'exploitation des co-produits.

Etudier l'effet de l'utilisation de la biomasse résiduelle comme Source d'énergie dans le processus d'extraction d'huile sur la consommation d'énergie et les émissions des GES.

L'utilisation des espèces fixatrices de l'azote

L'utilisation des métabolites secondaires produits en abondance par les espèces choisies comme des bio-pesticides.

L'utilisation de l'énergie fossile pourrait être substituée par l'utilisation du biodiesel pour faire fonctionner les machines agricoles.

L'utilisation effective des ressources naturelles comme l'eau et le maintien de la fertilité des terres à long termes par l'entretien des propriétés physico-chimiques et écologiques du sol.

Il s'agit là de quelques recommandations qu'il y a lieu de prendre en considération avant toute action de développement à grande échelle d'une filière de production de biodiesel.

# **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<sup>ème</sup> édition.
- [04] Cristina De La Rua Lope (2009). Desarrollo de la herramienta integrada « Análisis de ciclo de vida – Input output » para España y aplicación a tecnologías energéticas avanzadas. Thèse de Doctorat. Université polytechnique de Madrid, Ecole supérieure technique d'ingénieurs en agronomie.
- [05] VARGAS, J.R.C. (2008). « Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV). Con una bibliografía sélecta », Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, N°2, Octubre-diciembre de 2008, pp 37-70.
- [06] KLÖPFER, W. (2006), « The role of the SETAC in the Development of LCA », International Journal of Life Cycle Assessment, Vol.11, N° 1, pp. 116-122.
- [07] SETAC (1993), Guidelines for Life-Cycle Assessment. A code of practice, SETAC Europe, Brussels, 69p.
- [08] Huppés, G., and F. e. Schneider (1994). Proceedings of the European Workshop on Allocation in LCA at the Centre of Environmental Science (CML) of Leiden University. Ledien 24<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup> of February 1994.
- [09] Udo de Haes, H (1996). Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment. : Published by SETAC-Europe, Brussels.
- [10] Christiansen, K. e., 1997, Simplifying LCA: Just a Cut? Final Report of the SETAC Europe LCA Screening and Streamlining Working Gropu: Published by SETAC-Europe, Brussels.
- [11] Fava, J, R. Denison, B. Jones, M. Curran, B. Vigon, S. Selke, and B. J (1991). SETAC Workshop Report: A Technical Framework for Life-Cycle Assessment. August 18-23, 1990, Smugglers Notch, Vermont. SECTAC, Washington, DC.

- [12] UNEP (2011a). Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases. A Basis for Greener Processes and Products, United Nations Environmental Program, Division of Technology, Industry and Economics, Paris.
- [13] Olivier Jolliet, Myriam Saadé, Pierre Crettaz, Shanna Shaked (2010). Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan. Presses Polytechniques Universitaires Romandes 2<sup>ème</sup> édition.
- [14] Mariaé García Zamora (2010). Propuesta metodológica para la aplicación del análisis de ciclo de vida a la producción de etanol en Guatemala. Maestría en energía y ambiente. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de estudios de postgrado.
- [15] Muñoz, I, X. Domenech, and S. Malato (2006). Life cycle assessment as a tool for green chemistry: Application to different advanced oxidation processes for wastewater treatment: Coleccion documentos Ciemta.
- [16] Le Moigne J.L (1990). La modélisation des systèmes complexes. Dunod.
- [17] ISO (1998). ISO 14 041 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Analyse de l’inventaire.
- [18] UNEP (1996). Life Cycle Assessment. What it is and how to do it. United Nations Environmental Program, Division of Technology, Industry and Economics, Paris.
- [19] 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.
- [20] ISO (2006). ISO 14 044 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices.
- [21] Weidema, B (2001). Avoiding co-product allocation in life-cycle assessment: Journal of Industrial Ecology, v. 4, pp. 11-33.
- [22] 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.
- [23] ISO (1997). ISO 14 040 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre.
- [24] ISO (2006). ISO 14 040 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre.
- [25] 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.

- [26] Brentrup, F, J. Küsters, H. Kuhlmann, J. Lammel. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology - Part I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. *European Journal of Agronomy*, 2004, vol. 20, n°3, p 247-264.
- [27] Jacques Chevalier, Patrick Rousseaux. Classification in LCA: building of a coherent family of criteria. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1999, vol. 4, n°6, pp 352-356.
- [28] ISO (2000). ISO 14 042 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Evaluation de l’impact du cycle de vie.
- [29] Rousseaux, P, F. Querini (2012). *Analyse du cycle de vie – Evaluation des impacts. [G 5610] techniques de l’ingénieur.*
- [30] Caroline Sablayrolles (2013). *Evaluation environnementale et analyse de cycle de vie. Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques et Technologiques. Institut Nationale Polytechnique de Toulouse.*
- [31] Yannick Diby, Armel BAIDAI (2011). *Analyse de cycle de vie appliquée à un système de production d'eau potable : cas de l'unité industrielle SODECI nord-riviera. Master II Génie de l'Environnement. Institut de Formation à la Haute Expertise et de Recherche.*
- [32] ISO (2000). ISO / CD 14 043 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Interprétation du cycle de vie.
- [33] Emilie Bamard (2010). *Développement de facteurs de caractérisation pour les mélanges complexes d’hydrocarbures pour l’évaluation de l’impact écotoxicité aquatique en analyse du cycle de vie. Maitrise en sciences appliquées génie chimique. Ecole Polytechnique de Montréal.*
- [34] Antón, M. A. (2004). *Utilización del análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Tesis de Doctorado para la obtención del título de Doctor en Ingeniería Ambiental, Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.*
- [35] Zah Rainer (2007). *Evaluación del ciclo de vida de los productos energéticos : Evaluación ambiental de biocombustibles – informe final. Switzerland : EMPA.*
- [36] Quispe Trinidad Isabel (2009). *Análisis del ciclo de vida de los biocombustibles en Perú. Red Peruana de ciclo de vida – sección ingeniería industrial : Pontificia Universidad Católica del Perú.*

- [37] Curran Mary Ann (2006). Life cycle assessment: Principles and practice, National Risk Management Research Laboratory. Office of Research Development U.S Environmental Protection Agency. Cincinnati Ohio.
- [38] De Koning. A, Guinée. J, Pennington. D, Sleswijk. A, Hauschild, M.Molander. S (2002). Methods and typology report Part A: Inventory and classification of LCA characterization methods for assessing toxic releases.
- [39] Dreyer. L, Niemann. A, Hauschild. M (2003). Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99. The International Journal of Life Cycle Assessment, 8(4), pp 191-200.
- [40] [www.biologo.com.br](http://www.biologo.com.br), (2012). « artigos : biodiesel »
- [41] Freedman, B., Pryde, E. H., Mounts, T. L., JAOCS (1984). pp 1375-1380.
- [42] Poré, J (1960). Oléagineux, Edition CTA PROTA.
- [43] Sridharan, R., Mathai, I.M., J. Scient. Ind. Res (1974). pp 178-187.
- [44] Ma, F., Hanna, M.A (1999). Bioresource Technology, Biodiesel production : a review. p. 1-15.
- [45] Demirbas, A (2009). Energy Conversion and Management. pp. 14-34. ScienceDirect.
- [46] A. Sivasamy, K.Y. Cheah, P. Fornasiero, F. Kemausuor, S. Zinoviev, S. Miertus; ChemSusChem, 2 (2009). pp 278-300.
- [47] Ana Cristina Dinis Vicente Pardal (2012). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales : nuevos métodos de síntesis. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química y Química Física
- [48] G. Blanco-Brieva, J.M. Campos-Martin, M.P.d. Frutos, J.L.G. Fierro(2008). Industrial & Engineering Chemistry Research.
- [49] C.Y. Panicker, H.T. Varghese, D. Philip, H.I.S. Nogueira (2006). Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.
- [50] 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.

[51] Alvaro José Perez Cortes, Kelly Johana Dumar Oyola (2011). Análisis de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera y etanol. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico. Universidad industrial de Santander.

[52] M.M. Gui, K.T. Lee, S. Bhatia (2008). Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock.

[53] N. El Bassam (2010). Handbook of Bioenergy Crops. A Complete Reference to Species, Development and Applications. By Earthscan.

[54] Dick L. Auld, Mauricio D. Zanotto, Thomas McKeon, Lohn B. Morris (2009). Handbook of plant breeding : Oil crops. Chapter 10 : Castor. Springer edition.

[55] [www.bruno.ciccone.pagesperso-orange.fr](http://www.bruno.ciccone.pagesperso-orange.fr). « RICIN : *Ricinus communis* L ».

[56] Castor bean (*Ricinus communis*): An international botanical answer to biodiesel production and renewable energy. Total Renewable, Sustainable Solutions to the Global Energy and Water Needs. Dove biotech LTD.

[57] Amanda Mittra (2013). Encyclopedia of cultivated plants : From Acacia to Zinnia. Castor Bean.

[58] T.K.Lim. (2012) Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants. Volume 2, fruits. Springer edition.

[59] José M. Fernandez-Martinez, Leonardo Velasco. Technological Innovations in Major World Oil Crops, Volume 1. Springer edition.

[60] Chauvet. M, J.S. Siemonsma (2007). Oléagineux. Ressources végétales de l'Afrique tropicale. Volume 14. Editeur : PROTA.

[61] [www.jatrophiabiodiesel.org](http://www.jatrophiabiodiesel.org) (2007) « castor bean – a fuel source for the future ».

[62] [www.extension.org](http://www.extension.org). (2015) « Castor Bean for Biofuel Production ».

[63] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). (2014) « huile du ricin ».

[64] Walber C. Melo, Alexandre S. dos Santos, Lídia Maria M. Santa Anna and Nei Pereira Jr (2007). Acid and Enzymatic Hydrolysis of the Residue from Castor Bean (*Ricinus communis* L.) Oil Extraction for Ethanol Production: Detoxification and Biodiesel Process Integration. Brazil.

[65] 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.

[66] Campos, A.T. Ferreira, W.A.; Yamaguchi, L.C.T.; Resende, H.; Almeida, F.M (1998). Economic and energy balances of maize silage for dairy cattle. *Engenharia Rural* 9. pp 1-20.

[67] Comitre, V (1993). The question of energy and the technological standard of Brazilian agriculture. *Informações Econômicas* 12. pp 29-35.

[68] Pellizzi, G (1992). Use of energy and labour in Italian agriculture. *Journal of Agricultural Engineering Research* 52. pp 111-119.

[69] Pimentel, D (1980). *Handbook of energy utilization in agriculture*. CRC Press, Boca Ratón, FL, USA.

[70] Ulbanere, R.C, Ferreira, W.A (1989). Energy balance in corn production in the São Paulo State, Brazil. *Engenharia Agrícola* 4. pp 35-42.

[71] 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. 16<sup>ème</sup> journées internationales de thermique. Marrakech (Maroc).