

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



**Département de génie chimique**

**Projet de Fin d'Etudes**

En vue de l'obtention du diplôme  
**d'Ingénieur d'Etat**

**Thème :**

**Analyse du cycle de vie du biodiesel  
issu d'une huile non alimentaire**

**Rédigé par :**

- Mr. HAROUN Missipsa

- Mr. MANSOURI Aboubaker

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.

**الخلاصة :** يميز دورة حياة الوقود الحيوي تشكل إنبعاثات ناجمة عن صناعة الكتلة الحيوية، النقل و استغلال المواد الأولية و مختلف المنتوجات، تحويل الزيوت إلى وقود حيوي و استعمال هذه الأخيرة لتشغيل المركبات. هذه الإنبعاثات تؤثر على المحيط و تسبب خاصة الاحتباس الحراري، التحمض، التشبع الغذائي و بالتالي تدمير طبقة الأوزون. في هذا العمل، مكننا تحليل دورة الحياة من دراسة و تقييم مختلف الآثار الناتجة عن صناعة الوقود الحيوي انطلاقا من زيت الخروع و زيت الخرشف، هذا التحليل تحقق بمساعدة برنامج سيما برو 7.1.8

**كلمات مفتاحية :** تحليل دورة الحياة، مازوت حيوي، خروع، خرشف، سيما برو.

**Résumé :** Durant le cycle de vie des biocarburants, des émissions se produisent lors de la production de la biomasse, le transport et la production de matières premières et produits, la conversion des matières en biocarburants et l'utilisation du carburant dans les véhicules. Ces émissions peuvent avoir différents effets sur l'environnement tels que l'effet de serre, l'acidification, l'eutrophisation et la destruction de la couche d'ozone entre autres. Dans ce travail, l'analyse du cycle de vie a permis d'évaluer les impacts de la filière de la production du biodiesel à partir de l'huile du cardon et celle du ricin. L'analyse de cycle de vie a été réalisée à l'aide du logiciel SimaPro 7.1.8.

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

**Abstract:** During the life cycle of biofuels, emissions occur during biomass production, the transportation and the production of raw materials and products, the conversion of materials into biofuels and also during their final use. These emissions can have different effects on the environment such as the greenhouse effect, acidification, eutrophication and destruction of the ozone layer. In the present work, the life cycle analysis was used to assess the impacts of the process of biodiesel production from cardoon and castor plants. The life cycle analysis was performed using the software SimaPro 7.1.8.

**Keywords:** Life cycle analysis, Biodiesel, *Cynara cardunculus*, *Ricinus communis L.*, SimaPro.

# Remerciements :

*Tout d'abord et bien plus qu'un habituel souci de formalité, nous adressons nos remerciements aux personnes qui nous ont aidés dans la réalisation de ce mémoire.*

*En premier lieu, nous tenons à montrer notre reconnaissance et gratitude envers le professeur AHMED-ZAID Toudert en tant que promoteur et directeur de mémoire pour l'aide, l'orientation et la guidance qu'il nous a apportées ainsi que pour sa disponibilité et ses conseils qui ont contribué à alimenter nos réflexions.*

*Nos vifs remerciements vont aussi à Mr AMOURI Mohammed chargé de recherche au CDER pour nous avoir fourni les outils nécessaires, en l'occurrence logiciel et documents, à la réussite de ce projet de fin d'étude.*

*Nous tenons à remercier la professeure DERRICHE Ratiba pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury.*

*Nous sommes très reconnaissants envers Mme HADDOUM Saliha maître assistante de classe A et Mme MEFTI Afia maître conférence de classe A pour avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Enfin, nous remercions toute personne ayant porté un regard critique sur notre mémoire et contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce 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.*

*Missi.*

# Dédicace :

*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 BOUCHRA.*

*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, ... La liste est encore longue.*

*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

Introduction générale .....	2
I. Méthodologie de l'analyse du cycle de vie .....	5
I.1. Introduction .....	5
I.2. Définition de l'ACV .....	5
I.3. Historique de l'ACV .....	8
I.4. Les différentes phases de l'ACV .....	9
I.4.1. Définition des objectifs et du champ de l'ACV .....	9
I.4.1.1. Définition de l'objectif de l'étude .....	9
I.4.1.2. Définition du champ de l'étude .....	10
I.4.2. Inventaire des émissions et des extractions .....	11
I.4.2.1. Collecte de données .....	12
I.4.2.2. Redéfinition du système .....	12
I.4.2.3. Les règles d'attribution .....	12
I.4.3. Evaluation de l'impact du cycle de vie .....	13
I.4.3.1. Etapes obligatoires de l'évaluation de l'impact du cycle de vie .....	14
I.4.3.2. Etapes optionnelles de l'évaluation de l'impact du cycle de vie .....	20
I.4.3.3. Les méthodes d'évaluation d'impact : .....	21
I.4.4. L'interprétation .....	23
I.4.5. Les limites de l'ACV .....	25
II. Biodiesel .....	26
II.1. Introduction .....	26
II.2. Définition du biodiesel .....	26
II.3. La transestérification .....	26
II.4. Les caractéristiques techniques du Biodiesel.....	28
II.5. Production du biodiesel à partir d'huile de l'espèce <i>Cynara cardunculus</i> .....	29
II.5.1. Préparation des matières premières .....	29
II.5.2. Extraction de l'huile .....	30
II.5.3. Conversion de l'huile en biodiesel .....	30
II.6. Production du biodiesel à partir d'huile de l'espèce <i>Ricinus communis L</i> .....	30
II.6.1. Extraction de l'huile par compression .....	30
II.6.2. Conversion de l'huile en biodiesel .....	31
III. <i>Cynara cardunculus</i> et <i>Ricinus communis L</i> . .....	34

III.1. Introduction .....	34
III.2. <i>Cynara cardunculus</i> .....	34
III.2.1. Origine .....	34
III.2.2. Description générale .....	34
III.2.3. Propriétés et composition .....	35
III.2.4. Caractères généraux du cardon .....	35
III.2.4.1. Ecologie .....	35
III.2.4.2. Plantation .....	36
III.2.4.3. Entretien .....	36
III.2.4.4. Récolte .....	37
III.2.5. Quelques caractéristiques de l'huile du cardon .....	37
III.2.6. Utilisation de l'huile du cardon .....	37
III.3. <i>Ricinus communis L.</i> .....	38
III.3.1. Origine .....	38
III.3.2. Description générale .....	38
III.3.3. Propriétés et composition .....	39
III.3.4. Caractères généraux du ricin .....	40
III.3.4.1. Ecologie .....	40
III.3.4.2. Plantation .....	40
III.3.4.3. Croissance .....	40
III.3.4.4. Entretien .....	41
III.3.4.5. Récolte .....	41
III.3.5. Quelques caractéristiques de l'huile du ricin .....	42
III.3.6. Utilisations de l'huile du ricin .....	42
IV. Analyse du cycle de vie .....	45
IV.1. Introduction .....	45
IV.2. Définition des objectifs et du champ de l'ACV .....	46
IV.2.1. Définition de l'objectif de l'étude .....	46
IV.2.1.1. Application envisagée .....	46
IV.2.1.2. Le public ciblé .....	46
IV.2.2. Définition de la portée de l'étude .....	46
IV.2.2.1. Définition de la fonction du produit .....	46
IV.2.2.2. Définition de l'unité fonctionnelle .....	46
IV.2.2.3. Définition et modélisation du système étudié .....	46
IV.2.2.4. Définition des limites du système .....	49

IV.2.2.5. Catégories d'impact prises en compte .....	49
IV.2.2.6. Les exigences de qualité des données utilisées .....	50
IV.2.2.7. Les hypothèses adoptées .....	50
IV.3. Inventaire du cycle de vie .....	51
IV.3.1. Le cardon .....	51
IV.3.1.1. Activité agricole .....	51
IV.3.1.2. Extraction de l'huile .....	51
IV.3.1.3. Conversion de l'huile du cardon .....	52
IV.3.2. Le ricin .....	54
IV.3.2.1. Activité agricole .....	54
IV.3.2.2. Extraction de l'huile .....	54
IV.3.2.3. Conversion de l'huile du ricin .....	55
IV.4. Etude de l'impact .....	57
IV.4.1. Bilan carbone .....	57
IV.4.1.1. Ricin .....	57
IV.4.1.2. Cardon .....	59
IV.4.2. Bilan énergétique .....	62
IV.4.2.1. Ricin .....	62
IV.4.2.2. Cardon .....	64
IV.5. Interprétation: .....	66
IV.5.1. comparaison du bilan carbonique et énergétique du biodiesel issu des deux espèces étudiées avec le diesel pétrolier .....	66
IV.5.2. comparaison de la contribution des phases des systèmes étudiés dans les catégories d'impact : changement climatique et consommation des énergies primaires..	68
IV.5.2.1. Changement climatique .....	68
IV.5.2.2. Consommation des énergies primaires .....	69
Conclusion Générale .....	71
Recommandations .....	73
Bibliographie .....	76

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b>	: Les étapes du cycle de vie d'un produit.....	06
<b>Figure I.2</b>	: Phases de l'analyse du cycle de vie.....	07
<b>Figure I.3</b>	: Historique et évolution de l'ACV.....	08
<b>Figure I.4</b>	: Exemple d'un ensemble de processus unitaires dans un système.....	11
<b>Figure I.5</b>	: Eléments de la phase de l'EICV.....	14
<b>Figure I.6</b>	: Structure générale du cadre de l'analyse d'impact du cycle de vie.....	17
<b>Figure I.7</b>	: Cascade d'effets partiels du SO <sub>2</sub> .....	17
<b>Figure I.8</b>	: Notion d'impact en ACV : distinction midpoint / endpoint.....	19
<b>Figure II.1</b>	: Les réactions successives de la transestérification.....	27
<b>Figure II.2</b>	: Mécanisme de la réaction de transestérification d'huile végétale par le méthanol catalysée par une base.....	28
<b>Figure III.1</b>	: <i>Cynara cardunculus</i> .....	35
<b>Figure III.2</b>	: La forme de la feuille de l'espèce <i>Ricinus communis L.</i> .....	38
<b>Figure III.3</b>	: Les graines de l'espèce <i>Ricinus communis L.</i> .....	39
<b>Figure IV.1</b>	: Les différents processus élémentaires de production du biodiesel à partir de l'espèce <i>Cynara cardunculus</i> .....	47
<b>Figure IV.2</b>	: Les différents processus élémentaires de production du biodiesel à partir de l'espèce <i>Ricinus communis L.</i> .....	48
<b>Figure IV.3</b>	: Arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile du cardon.....	53
<b>Figure IV.4</b>	: Arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile du ricin.....	56
<b>Figure IV.5</b>	: Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (kg eq de CO <sub>2</sub> ) (ricin).....	59

<b>Figure IV.6</b> : Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (%) (ricin).....	59
<b>Figure IV.7</b> : Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (kg eq de CO <sub>2</sub> ) (carbon).....	62
<b>Figure IV.8</b> : Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (%).....	62
<b>Figure IV.9</b> : Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique du ricin (MJ).....	64
<b>Figure IV.10</b> : Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique du ricin (%).....	64
<b>Figure IV.11</b> : Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique du carbon (MJ).....	66
<b>Figure IV.12</b> : Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique du carbon (%).....	66
<b>Figure IV.13</b> : Comparaison de la consommation de l'énergie entre les filières étudiées et la filière fossile (MJ/ton).....	67
<b>Figure IV.14</b> : Comparaison des émissions de GES entre les filières étudiées et la filière fossile (Kg eq en CO <sub>2</sub> /ton).....	68

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b>	: Catégories d'impact couramment utilisées en évaluation d'impact de cycle de vie.....	15
<b>Tableau I.2</b>	: Principaux contributeurs aux catégories d'impact.....	16
<b>Tableau I.3</b>	: Les catégories d'impact prises en considération par les principales méthodes d'évaluation d'impact.....	21
<b>Tableau I.4</b>	: Les catégories d'impact prises en considération par la méthode Impact 2002+.....	22
<b>Tableau I.5</b>	: Facteurs et unités de dommages.....	23
<b>Tableau II.1</b>	: Les différentes spécifications du biodiesel.....	29
<b>Tableau II.2</b>	: les propriétés du Biodiesel obtenu à partir de l'huile de cardon.....	30
<b>Tableau II.3</b>	: Les propriétés du Biodiesel obtenu à partir de l'huile du ricin.....	32
<b>Tableau III.1</b>	: Propriétés de l'huile du cardon.....	37
<b>Tableau III.2</b>	: Propriétés de l'huile du ricin.....	42
<b>Tableau IV.1</b>	: Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de la culture du cardon.....	51
<b>Tableau IV.2</b>	: Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de l'extraction de l'huile des graines du cardon.....	51
<b>Tableau IV.3</b>	: Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de la conversion de l'huile du cardon en biodiesel.....	52
<b>Tableau IV.4</b>	: Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de la culture du ricin.....	54
<b>Tableau IV.5</b>	: Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de l'extraction de l'huile des graines du ricin.....	54

<b>Tableau IV.6</b> : Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de la conversion de l'huile du ricin en biodiesel.....	55
<b>Tableau IV.7</b> : Les émissions en kg eq de CO <sub>2</sub> (ricin).....	58
<b>Tableau IV.8</b> : Les émissions en kg eq de CO <sub>2</sub> (cardon).....	61
<b>Tableau IV.9</b> : Résultats du bilan énergétique (MJ) (ricin).....	63
<b>Tableau IV.10</b> : Résultats du bilan énergétique (MJ) (cardon).....	65
<b>Tableau IV.11</b> : Comparaison des émissions de GES et consommations d'énergie entre les filières étudiées et la filière fossile.....	67
<b>Tableau IV.12</b> : Niveaux d'émissions et étapes contributrices pour les deux filières cardon et ricin.....	68
<b>Tableau IV.13</b> : Consommation d'énergie et étapes contributrices pour les deux filières cardon et ricin.....	69

# Abréviations

<b>ACV</b>	: Analyse du cycle de vie
<b>ISO</b>	: International Standardization Organisation
<b>LCI</b>	: Life cycle inventory
<b>LCIA</b>	: Life cycle impact assessment
<b>SETAC</b>	: Society of Environmental Toxicology and Chemistry
<b>EICV</b>	: Evaluation de l'impacts du cycle de vie
<b>CFC</b>	: Chloro fluoro carbures
<b>HCFC</b>	: Hydrochlorofluorocarbures
<b>COv</b>	: Composé organique volatil
<b>NOx</b>	: Oxydes d'azote
<b>SOx</b>	: Oxydes de soufre
<b>HAP</b>	: Hydrocarbures aromatiques polycyclique
<b>GES</b>	: Gaz à effet de serre
<b>B100</b>	: Biodiesel pur
<b>TAG</b>	: Triglycéride
<b>DAG</b>	: Diglycéride
<b>MAG</b>	: Monoglycéride
<b>ASTM</b>	: American Society of Test and Materials
<b>PNUE</b>	: Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

# **Introduction générale**

### **Introduction générale :**

La tendance actuelle est l'utilisation des énergies renouvelables comme énergies de substitutions aux énergies fossiles qui engendrent des conséquences négatives sur le plan environnemental comme : la dégradation de l'environnement et le réchauffement climatique.

Dans ce contexte, les biocarburants connaissent un intérêt croissant ces dernières années et constituent l'une des solutions alternatives envisagées dans le but de pouvoir combiner la diminution de la dépendance aux énergies fossiles et la réduction des impacts sur l'environnement notamment en termes de rejets de gaz à effet de serre.

Ainsi, de nombreuses études se sont portées sur la comparaison des biocarburants aux carburants pétroliers équivalents (essence et diesel) afin d'évaluer le potentiel de réduction des émissions des gaz à effet de serre associé à l'usage des biocarburants.

Il est admis que les carburants d'origine pétroliers en matière de transport occuperont pour longtemps encore la première place (98% des énergies de transport sont issues du pétrole), Un véritable défi pour les filières qui veulent prendre la relève des carburants pétroliers. Cette considération explique l'intérêt croissant que portent tous les pays aux biocarburants. Néanmoins, il est important de noter les différences d'échelles entre notre consommation d'énergie et la contribution que l'on peut raisonnablement attendre des biocarburants. Le pétrole va-t-il alors manquer et les biocarburants peuvent-ils le suppléer ?

Au jour d'aujourd'hui, Le biodiesel est considéré comme un carburant alternatif au carburant conventionnel du fait de leurs caractéristiques voisines. Il présente certains avantages non négligeables : il est d'origine de sources renouvelables, biodégradable, disponible et présente une efficacité à la combustion plus élevée. Par ailleurs, la production du biodiesel est source de création d'emplois.

Néanmoins, il y a lieu de préciser que ce même biodiesel présente quelques inconvénients. En effet, sa production pourra accélérer la déforestation. En outre, la mise à contribution des huiles alimentaires dans la fabrication de biocarburants influence sérieusement les prix des denrées alimentaires.

La production de biocarburants implique le développement de cultures agricoles spécifiquement destinées à la production des biocarburant (colza, céréales, betterave sucrière,

## [Introduction générale]

---

etc.). Si les biocarburants sont largement utilisés, des effets catastrophiques sur l'innocuité de l'alimentation de la population peuvent être notés.

Par conséquent, il est clair que la promotion des biocarburants 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 de cultures non alimentaires.

La présente étude a pour objectif de réaliser une analyse de cycle de vie des filières biodiesel à partir des espèces *Cynara cardunculus* et *Ricinus communis*. 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 chapitre 3 nous donnerons un aperçu sur les deux espèces ricin et cardon en présentant leurs caractéristiques.
- Le cinquième chapitre sera réservé à l'ACV du biodiesel produit à partir des espèces *Cynara cardunculus* et *Ricinus communis L.* à l'aide du logiciel Simapro qui permettra d'évaluer les impacts environnementaux liés à la production du biodiesel à partir de ces deux espèces.

# **Chapitre I :**

## **Méthodologie de l'Analyse de cycle de vie**

## **I. Méthodologie de l'analyse du cycle de vie :**

### **I.1. Introduction :**

Les méfaits du progrès de la civilisation industrielle constituent aujourd'hui une réalité prouvée. Cette activité humaine a une responsabilité majeure dans la dégradation de l'environnement et peut remettre en cause l'approvisionnement en ressources naturelles des générations futures. Ainsi, ces défis nécessitent de trouver des solutions sans limiter le développement économique et sociale.

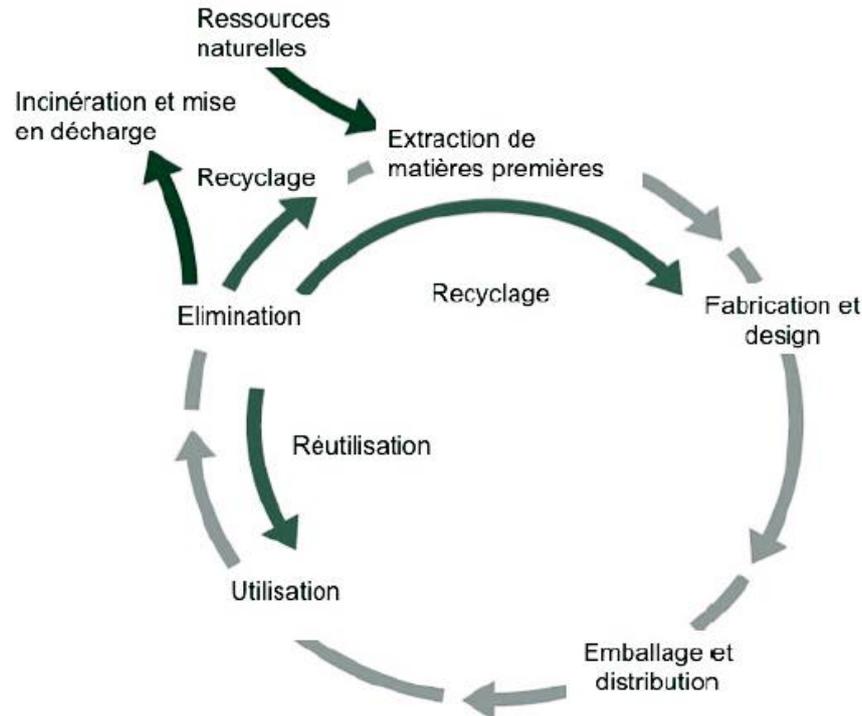
Aujourd'hui, le développement durable est devenu une question de politique globale. Dans cette perspective, le sommet de Rio en 1992, le sommet du Millénaire tenu à New York en 2000, le sommet de la terre organisé à Johannesburg en 2002 et le protocole de Kyoto en 2005 entre autres ont abouti à des conventions et des traités visant à mieux contrôler les impacts de l'activité humaine sur l'environnement qui est désormais un enjeu central.

Cependant, les engagements pour le développement durable doivent être soutenus par l'existence d'outils capables d'analyser les impacts environnementaux, économiques et sociaux. Ainsi, des initiatives politiques nouvelles, des programmes ou des projets économiques et environnementaux nouveaux peuvent être évalués en tenant compte des trois piliers du développement durable : l'économie, l'environnement et la société.

Il existe des outils qui tiennent compte de façon transparente de tous les aspects du développement durable, alors que d'autres ne prennent en considération que l'un d'eux. À ce titre, il n'est pas étonnant de constater la prolifération des efforts à travers le monde afin concevoir de nouveaux dispositifs visant à réduire l'impact de l'activité humaine sur l'environnement. C'est dans ce contexte que l'outil ACV a été créé et qu'il est devenu rapidement incontournable dans l'évaluation environnementale des produits.

### **I.2. Définition de l'ACV :**

L'ACV 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 de «la méthodologie du berceau à la tombe». [01]



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

L'analyse du cycle de vie peut à la fois être considérée comme une « méthodologie », un « outil », une « méthode » ou un « instrument technique ». Les notions sont voisines mais le choix des mots par les auteurs ne paraît pas neutre.

Les travaux de référence sur l'ACV issus de la littérature spécialisée utilisent le terme « outil » pour parler de l'ACV comme outil d'aide à la décision. Les scientifiques qui travaillent dans des domaines plus techniques utilisent plus fréquemment les termes de « méthodologie » ou de « méthode » pour définir l'ACV comme un « ensemble de règles appliquées ». Le terme « instrument technique » est également soutenu par les normes internationales (ISO, 2006a ; 2006b) qui présentent l'ACV en tant qu'instrument scientifique et technique qui sert à fournir des informations sur les impacts environnementaux des produits.

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

- La définition de l'objectif et le 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).

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

- 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

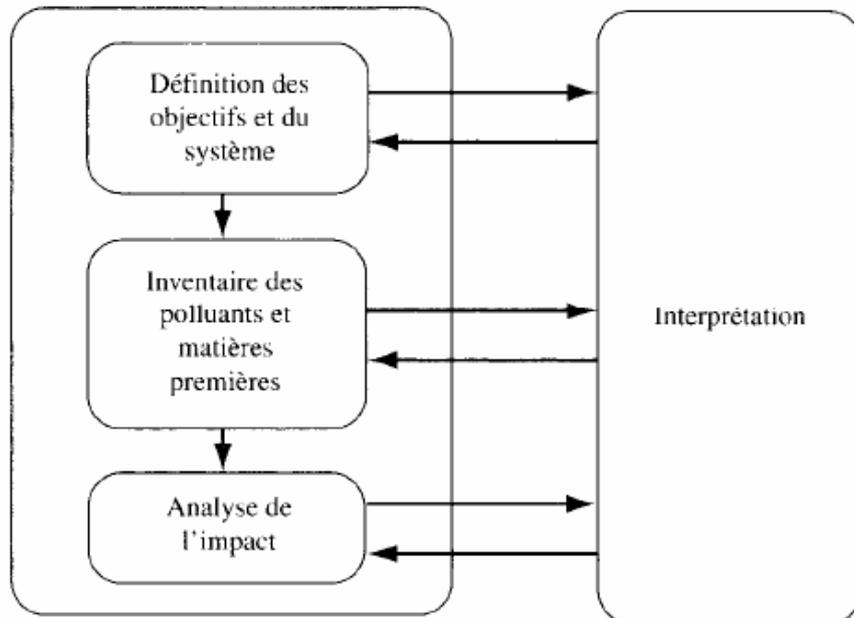


Figure I.2 : Phases de l'analyse du cycle de vie. [03]

Selon son importance, nous pouvons distinguer différentes applications de l'ACV :

- Comparer divers produits d'un point de vue environnemental.
  - Améliorer les produits déjà existants ou participer à la conception de nouveaux produits.
  - Fournir de l'information aux responsables de la prise de décision tant aux privés qu'aux gouvernements.
  - Elaborer des stratégies de marketing en améliorant la position de marché de certains produits en mettant en avant les avantages environnementaux associés à leurs produits.
- [04]

Il existe deux approches distinctes pour une ACV :

**L'approche attributionnelle** : Elle vise à attribuer à un produit les impacts qui lui sont imputables. Elle ne tient compte que des flux physiques échangés au cours du cycle de vie. Elle permet d'obtenir un point de vue global utile pour l'identification des points d'amélioration.

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

**L'approche conséquentielle** : Elle vise à étudier les conséquences d'un changement et permet de décrire les impacts d'une prise de décision dans le système économique dans son ensemble. [03]

## I.3. Historique de l'ACV :

Les premières études associées à cette méthodologie ont commencé dans les années 60, la première étant l'étude élaborée par l'Institut de recherche Midwest engagée par Coca-Cola en 1969 pour déterminer l'intérêt ou non de fabriquer des cannettes métalliques.

Le progrès dans le développement de cette méthodologie a été rapide dans les années 70 en raison des deux chocs pétroliers qui ont stimulé la recherche de nouveaux processus visant à réduire la consommation d'énergie et de matériaux. Cependant, lorsque cette situation a été surmontée, la société a cessé d'être menacée par le manque de ressources et ces études ont perdu l'énergie et la notoriété.

Les premiers bilans écologiques ont été réalisés en 1984 pour les matériaux d'emballage [02]. À partir de là, l'ACV a connu des développements plus poussés avec une préoccupation marquante sur sa normalisation. Cette évolution est marquée par trois niveaux de développement historique illustrés dans la figure I.3.

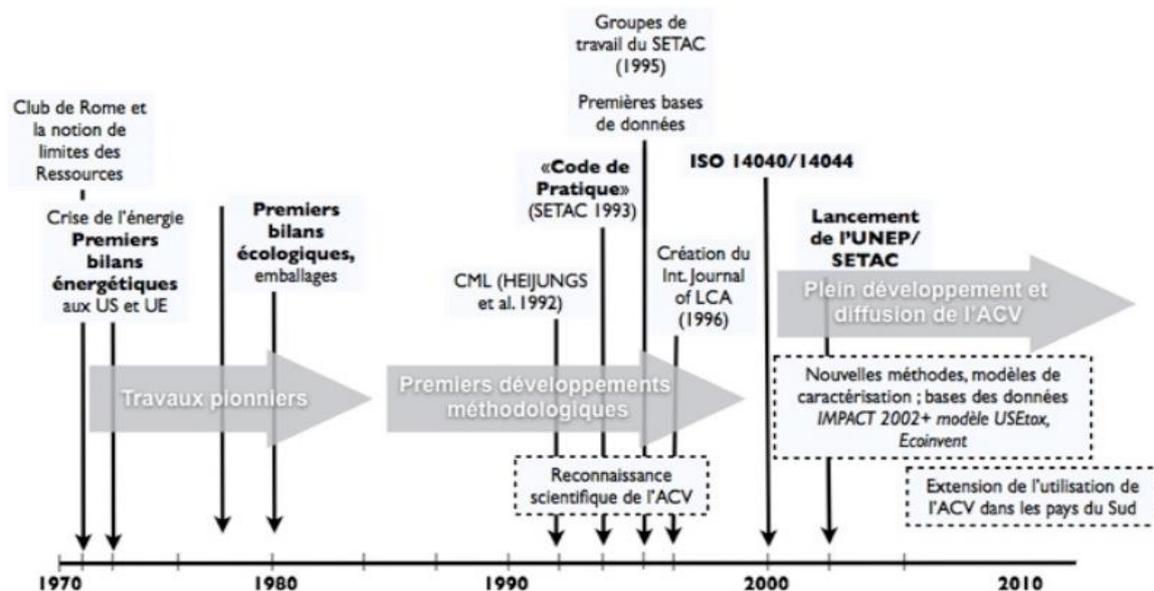


Figure I.3 : Historique et évolution de l'ACV. Adapté de [05]

Dans les années 1990, le processus de normalisation de l'ACV s'est déclenché grâce aux efforts de la SETAC [06]. En 1990, par exemple, la SETAC a organisé un groupe de travail à Louvain en Belgique dans le but d'harmoniser la méthodologie. En 1992, elle a organisé le premier séminaire sur la compréhension de l'ACV en Floride aux USA où

## **[Chapitre I : Méthodologie de l'analyse du cycle de vie]**

---

Heijungs et ses collègues ont publié le premier guide néerlandais qui a développé une méthode d'évaluation de l'impact de l'ACV. En 1993, la SETAC a publié le premier code de conduite qui inclut la définition des terminologies et certaines règles pour la mise en pratique de l'ACV [07].

Dans les années suivantes, la SETAC a organisé différents séminaires de discussion de nouveaux défis. En 1994, elle a organisé un séminaire à Leyde en Hollande dans lequel les difficultés de répartition des intrants et des extrants entre coproduits ont été examinées [08]. Ils ont également créé des groupes de travail qui ont élaboré plusieurs rapports sur les méthodes d'évaluation d'impact [09] et la définition des limites du système [10].

L'Organisation Internationale de Normalisation ISO [11] a décidé de créer des groupes de travail en 1994 dans le but de normaliser les procédures et la terminologie ce qui a abouti à la publication des normes ISO traitant de l'ACV. La première norme est appelée ACV, ISO 14040 de l'édition 1997. Elle a été révisée à plusieurs reprises, avec les dernières normes publiées ISO 14040 : 2006 à ISO 14044: 2006 [06].

Les premiers logiciels de calcul sont aussi apparus à partir des années 1990 et les bases de données à partir de 1995.

A son tour, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement [12], avec le partenariat de la SETAC a créé l'initiative pour le cycle de vie (life cycle initiative). Les objectifs de ce programme est l'amélioration des bases de données des indicateurs d'impact qui existent aujourd'hui ainsi que la diffusion de cet outil.

### **I.4. Les différentes phases de l'ACV :**

#### **I.4.1. Définition des objectifs et du champ de l'ACV :**

Cette première étape affecte de manière significative les autres éléments de l'ACV, elle doit définir clairement l'objectif et le champ de l'étude lesquels doivent prendre en compte les aspects énumérés ci-dessous dans l'ordre suivant [13] :

##### **I.4.1.1. Définition de l'objectif de l'étude :**

A ce stade, Le but de l'ACV doit indiquer exactement l'application prévue (les différentes applications possibles sont décrites à la section I.2), les raisons de l'étude et le destinataire c'est-à-dire le public à qui les résultats de l'étude seront communiqués. En effet, en définissant l'objectif, les exigences citées ci-dessus doivent être prises en compte.

Ceci est très important car une étude interne d'une entreprise qui a l'intention de

fournir des données dans le but de la recherche d'une amélioration ou d'optimisation de sa production peut être structuré très différemment par rapport à une étude qui a l'intention de faire des comparaisons publiques entre deux produits et qui sera divulgué au public pour intérêt commercial. Les raisons de la mise en œuvre de l'étude doivent être clairement expliquées. L'acteur essaie-t-il de prouver quelque chose ? A-t-il l'intention de seulement fournir des informations?, Etc. [14]

### **I.4.1.2. Définition du champ de l'étude :**

En définissant le champ d'une étude de l'ACV, la fonction du produit, l'unité fonctionnelle, le système et ses frontières doivent être décrits avec une grande précision.

Le champ d'étude doit être suffisamment bien défini pour garantir que l'ampleur, la profondeur et le niveau de détails de l'étude sont compatibles avec l'objectif initialement défini et suffisants pour l'atteindre.

#### ➤ **Définition de la fonction et unité fonctionnelle :**

La fonction du produit étudié doit être clairement définie car il est essentiel de comparer des produits sur la base d'une fonction commune. L'unité fonctionnelle est déterminée à partir des fonctions exécutées par le produit. La norme ISO désigne par l'unité fonctionnelle " la performance quantifiée d'un système de produit destinée à être utilisée comme une unité de référence " et doit refléter la quantité de produit nécessaire pour faire fonctionner le système [15].

Le but principal d'une unité fonctionnelle est de fournir une base à partir de laquelle sont normalisées toutes les entrées et sorties du système. Cette référence est nécessaire pour assurer la comparabilité des résultats de l'ACV. Pour une définition correcte de l'unité fonctionnelle, des aspects tels que l'efficacité, la durabilité, la qualité et le niveau de performance des produits doivent être pris en compte.

#### ➤ **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 [16]. Bien définir le système revient à déterminer l'ensemble des processus unitaires requis à l'accomplissement de sa fonction. Les processus unitaires sont associés entre eux par des flux intermédiaires et reliés à l'environnement par des flux élémentaires (figure I.4).

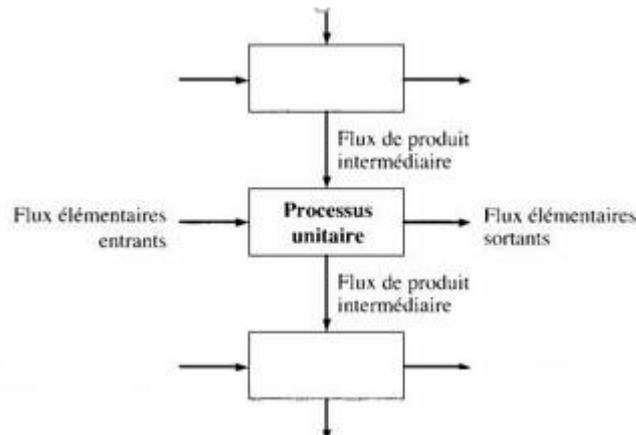


Figure I.4 : Exemple d'un ensemble de processus unitaires dans un système. [17]

### ➤ Définition des limites du système :

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

Plusieurs facteurs déterminent les limites du système tels que l'application envisagée de l'étude, les hypothèses émises, les critères d'exclusion, la qualité des données, le public et des contraintes économiques.

### I.4.2. Inventaire des émissions et des extractions :

L'inventaire du cycle de vie (ICV) est la deuxième phase de l'ACV. Il quantifie les flux de matière et d'énergie entrant et sortant du système étudié. C'est-à-dire que tous les processus du système sont pris en compte (production ou extraction des matières premières, usinage, transport, distribution, usage et fin de vie, etc.). Chacun d'entre eux comprend des centaines des données quantitatives (productivité, consommation d'électricité, de carburants, distances parcourues, types de transports utilisés, quantités de matières consommées, émissions, etc.) [18].

L'ICV constitue le composant central d'une ACV. Cette étape est probablement la tâche qui nécessite le plus grand investissement en matière de temps et de ressources du fait de sa forte demande de données. La phase de l'analyse de l'inventaire est l'étape la plus objective parce qu'elle montre les résultats sans aucun jugement de valeur.

L'inventaire de cycle de vie comprend les étapes suivantes :

### **I.4.2.1. 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 [19].

D'autre part, La SETAC a créé un groupe de travail pour améliorer la méthodologie d'inventaire de cycle de vie. Il recommande ainsi l'utilisation de données représentant la moyenne dans le cas d'une ACV attributive, tandis que pour une ACV conséquentielle préconise l'utilisation de données marginales.

### **I.4.2.2. Redéfinition du système :**

Les limites du système sont définies dans le cadre du champ de l'étude. Cependant, après la collecte initiale des données, celles-ci peuvent être redéfinies à la suite de l'exclusion de quelques sous-systèmes ou de stades du cycle de vie du produit pour manque de données associées ou l'inclusion de nouveaux procédés unitaires.

### **I.4.2.3. Les règles d'attribution :**

Lors de l'application de l'ACV aux systèmes complexes, il est possible de ne pas pouvoir traiter toutes 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 sorties du système entre tous les produits. La norme ISO 14044 (2006) [20] décrit l'attribution comme étant la distribution des flux d'entrée ou de sortie d'un processus ou d'un système de

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

---

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 [21]. 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, de répartir les matières premières et les émissions entre les différents coproduits en fonction des relations physiques ou autres arrangements qui existent entre eux.

En fin, 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 [22], l'allocation basée sur les relations économiques ne s'applique que dans l'ACV attributive.

### **I.4.3. Evaluation de l'impact du cycle de vie :**

L'intérêt majeur de l'évaluation de l'impact de cycle de vie est d'évaluer l'ordre de grandeur des impacts générés par les résultats de l'inventaire du cycle de vie. Les techniques d'évaluation d'impact permettent de convertir les résultats de l'inventaire dont le nombre peut atteindre plusieurs centaines de données à une liste très limitée d'indicateurs afin d'en faciliter l'interprétation.

Le processus s'effectue en plusieurs étapes. Toutefois, il a un prix : contre l'objectivité des données d'inventaire, chaque nouvelle étape intègre une certaine subjectivité. La norme ISO 14040 [23] distingue deux éléments à ce stade : Les éléments obligatoires, comprenant la définition des catégories d'impact, la classification et la caractérisation des impacts et les éléments facultatifs comprenant la normalisation, le regroupement et la pondération. La figure I.5 montre un schéma des éléments constituant cette phase.

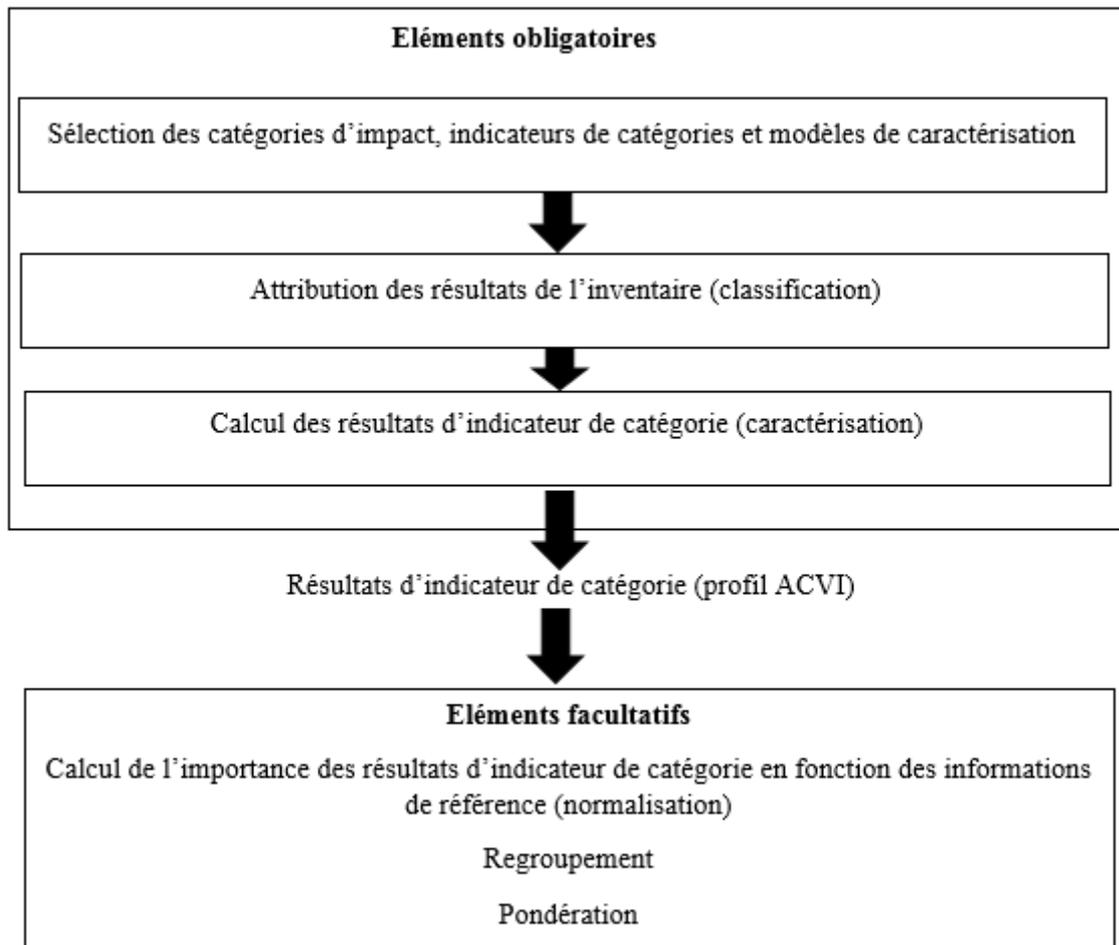


Figure I.5 : Eléments de la phase de l'EICV. [24]

### I.4.3.1. Etapes obligatoires de l'évaluation d'impact du cycle de vie :

#### a. Définition des catégories d'impact :

Dans un premier temps, le praticien de l'ACV doit définir les catégories d'impact auxquels les résultats de l'inventaire seront attribués. Elles doivent être conformes à l'objectif et au champ de l'étude, compréhensibles pour le public ciblé et internationalement acceptées. Le tableau I.1 donne un aperçu sur les différentes catégories d'impact couramment utilisées. Cette liste n'est pas figée, elle peut être réduite ou enrichie.

## **[Chapitre I : Méthodologie de l'analyse du cycle de vie]**

**Tableau I.1 :** Catégories d'impact couramment utilisées en évaluation d'impact de cycle de vie. [25]

Catégories	Sous-catégories possibles	Domaines de protection			
		Ressources naturelles	Santé humaine	Environnement naturel	Environnement artificiel
Épuisement des ressources abiotiques	Consommation des dépôts	X			
	Consommation des fonds Consommation des écoulements				
Épuisement des ressources biotiques	-	X		X	
Utilisation des sols	Compétition des sols	X			X
	Perte de biodiversité			X	
	Dégradation des fonctions de subsistance du vivant		X	X	X
Changement climatique	-		X	X	X
Diminution d'ozone stratosphérique	-	X	X	X	X
Toxicité humaine	-		X		
Écotoxicité	Aquatique d'eau douce	X		X	
	Aquatique marine				
	Terrestre				
	Sédimentaire d'eau douce				
	Sédimentaire marine				
Formation de photo-oxydants	-	X	X	X	X
Acidification	-	X	X	X	X
Eutrophisation	Aquatique	X		X	X
	Terrestre				
Nuisances	Odeurs		X		
	Bruit			X	
	Impact visuel				X
Impact des radiations ionisantes	-	X	X	X	

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

Les principales substances chimiques contribuant à ces catégories sont indiquées dans le tableau I.2.

**Tableau I.2** : Principaux contributeurs aux catégories d'impact. [26]

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

### **b. Classification :**

Lors de cette étape, le praticien de l'ACV doit classer chaque résultat de l'inventaire du cycle de vie dans les catégories d'impact précédemment définies comme le montre la figure I.6 (à noter qu'une émission peut contribuer à plusieurs catégories différentes simultanément, la figure I.7 en témoigne). Les impacts peuvent avoir différentes échelles géographiques : locale, régionale ou globale.

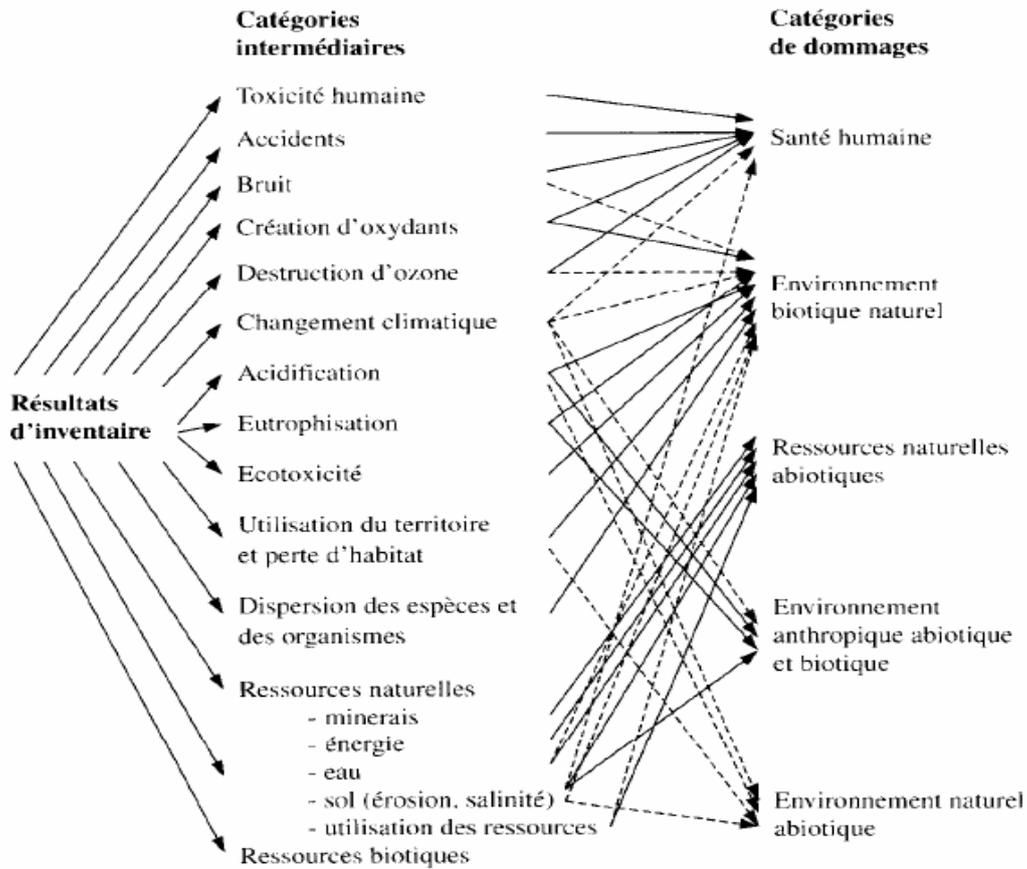


Figure I.6 : Structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie. [03]

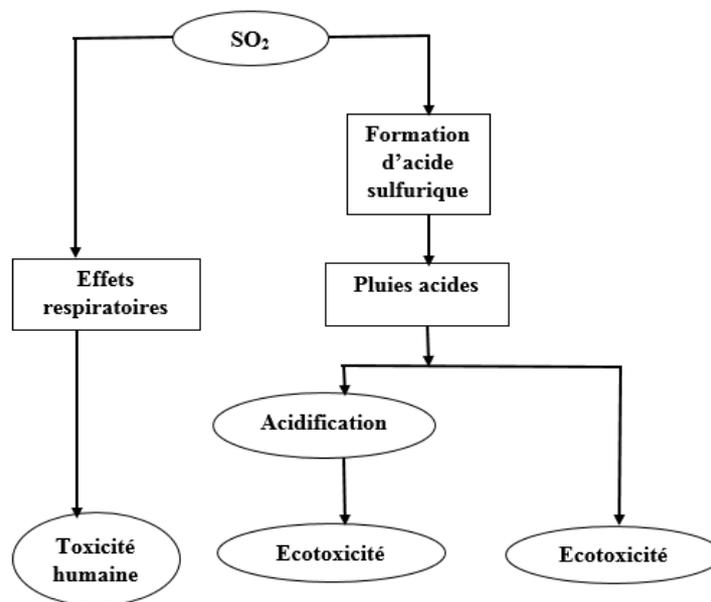


Figure I.7 : Cascade d'effets partiels du  $\text{SO}_2$ . [27]

### c. Caractérisation :

Le but de la caractérisation est d'évaluer le degré de contribution de chaque émission ou extraction dans les catégories d'impact précédemment sélectionnées. Une façon de caractériser les données de l'inventaire est de convertir toutes les substances participant à un impact en une mesure commune permettant de ressortir un indicateur de catégorie en utilisant des facteurs de caractérisation. Selon la norme ISO 14042 [28], un indicateur de catégorie est une représentation quantifiable d'une catégorie d'impact. Les résultats sont obtenus en unité relatives à une substance de référence : par exemple en kg équivalent CO<sub>2</sub> pour le changement climatique ou kg équivalent SO<sub>2</sub> pour l'acidification.

Les résultats de la caractérisation est un profil environnemental du système constitué de l'ensemble des indicateurs de catégories obtenus pour toutes les catégories d'impact considérées.

Nous pouvons distinguer deux types de catégories d'impact : catégories intermédiaires (midpoint) et catégories dommages (endpoint).

#### ➤ **Caractérisation intermédiaires (midpoint) :**

Cette méthode fait appel à des facteurs de caractérisation orientés problèmes et se situent n'importe où sur la chaîne de cause à effet comme le montre la figure I.8. Ces facteurs permettent de pondérer l'apport des substances émises et des matières premières extraites, inventoriées dans l'étape précédente, dans une catégorie d'impact définie. Le résultat final de la méthode, appelé score d'impact midpoint, est obtenu en multipliant les masses émises ou extraites par des facteurs de caractérisation ensuite en les sommant pour chaque catégorie d'impact.

$$SL_i = \sum_s FI_{s,i} \times M_s. \text{ Tel que :}$$

$SL_i$  : le score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie  $i$ .

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

$M_s$  : la masse émise ou extraite de la substance " $s$ ".

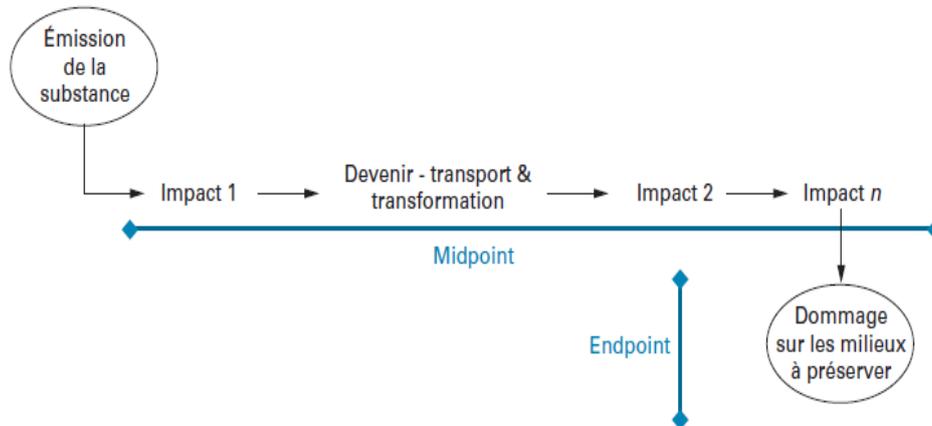


Figure I.8 : Notion d'impact en ACV : distinction midpoint / endpoint. [29]

### ➤ Caractérisation des dommages (endpoint) :

Les méthodes orientées dommages ont pour principale vocation de regrouper les impacts intermédiaires en fonction des dommages sur un sujet à protéger. L'avantage de cette méthode est la compréhension facile des résultats de l'étude par le public.

Le résultat final de la méthode est obtenu de la manière suivante :

$$SD_d = \sum_i FD_{i,d} \times SI_i. \text{ Tel que :}$$

$SD_d$  : le score de caractérisation de dommage pour la catégorie d.

$FD_{i,d}$  : le facteur de caractérisation de dommages reliant la catégorie intermédiaire i à la catégorie de dommages d .

Les résultats pouvant être obtenus sont :

- Les dommages sur la santé humaine mesurés en années de vie perdues
- Les dommages sur la qualité des écosystèmes mesurés en pourcentage d'espèce disparue sur un  $m^2$  durant une année.
- Les dommages sur les ressources représentent l'énergie additionnelle devant être utilisée dans le futur à cause de la baisse des quantités de ressources disponibles.

Cependant, Les méthodes orientées problèmes sont souvent préférées en raison des durées importantes et du fait de la difficulté de la connaissance de toute la voie d'impact.

### I.4.3.2. Etapes optionnelles de l'évaluation d'impact du cycle de vie :

#### a. Normalisation :

La normalisation permet de comprendre l'importance relative de chaque résultat obtenu pour chaque catégorie d'impact par rapport à une valeur de référence. Les valeurs de référence peuvent représenter, par exemple, l'impact des émissions ou extractions totales actuelles locales, régionales, continentales ou mondiales. Le score normalisé s'obtient de la manière suivante :

$$N_c = \frac{S_c}{VN_c}$$

Tel que :

c : la catégorie d'impact.

S : le score de caractérisation de la catégorie.

$VN_c$  : valeur de normalisation et se calcule à partir des émissions ou extractions totales multipliées par leurs facteurs de caractérisation respectifs.

Cette étape permet de mieux comprendre l'amplitude relative de chaque résultat d'indicateur du produit étudié.

#### b. Regroupement :

Le regroupement vise à faire un tri sur une base nominale (par caractéristiques telles que les émissions et ressources ou par une échelle spatiale mondiale, régionale et locale) ou un classement par rapport à une hiérarchie donnée (priorité élevée, moyenne et basse). Cela se fait assez rarement.

#### c. Pondération :

L'objectif est de donner des facteurs de pondération à toutes les catégories afin de les agréger en un score unique. Bien que la pondération rende la compréhension du résultat de l'ACV plus facile pour le public, beaucoup d'informations disparaissent.

Les méthodes les plus couramment utilisées sont :

- L'évaluation sociale des dommages en menant des enquêtes auprès de la population sur le poids relatif qu'elle attribue à chacun des impacts.
- Le dépassement d'un seuil.

Cette étape est déconseillée dans certains cas car elle est la phase la plus subjective de l'ACV.

## **[Chapitre I : Méthodologie de l'analyse du cycle de vie]**

### **I.4.3.3. Les méthodes d'évaluation d'impact :**

La phase d'évaluation des impacts environnementaux fait appel à des méthodes spécifiques. Ces méthodes permettent le passage de la phase de l'inventaire du cycle de vie en caractérisant les flux de l'inventaire en indicateur d'impact. Le tableau I.3 présente les méthodes les plus utilisées actuellement ainsi que leurs caractéristiques.

**Tableau I.3 :** Les catégories d'impact prises en considération par les principales méthodes d'évaluation d'impact. [30]

<b>Méthodes</b>	<b>Guide hollandais</b>	<b>Eco-facteurs 97</b>	<b>TRACI</b>	<b>Impact 2002+</b>	<b>LIME</b>
<b>Niveau d'évaluation</b>	Md-point	Md-point	Md-point	Midpoint Endpoint	Midpoint Endpoint
<b>Normalisation et Pondération</b>	Normalisation	Pondération	Normalisation	Normalisation Pondération	Normalisation Pondération
<b>Changement climatique</b>	X	X	X	X	X
<b>Destruction d'ozone stratosphérique</b>	X		X	X	X
<b>Toxicité humaine</b>	X	X	X	X	X
<b>Formation de photo-oxydants</b>	X	X		X	
<b>Acidification</b>	X	X	X	X	X
<b>Eutrophisation</b>	X	X	X	X	X
<b>Ecotoxicité</b>	X	X	X	X	X
<b>Consommation d'énergie fossile</b>	X	X		X	X
<b>Utilisation des ressources en eau</b>		X	X	X	X
<b>Santé humaine</b>				X	X
<b>Consommation de ressources</b>				X	X
<b>Qualité des écosystèmes</b>				X	X

Nous allons nous intéresser dans ce travail à la méthode Impact 2002+. C'est une méthode développée à l'origine à l'institut fédéral suisse de technologie. Elle propose une mise en œuvre d'une combinaison de catégories intermédiaires avec les catégories dommages. Elle regroupe 14 impacts intermédiaires comme le montre le tableau I.4

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

Tableau I.4 : Les catégories d'impact prises en considération par la méthode Impact 2002+. [03]

Catégorie d'impact	Substance de référence
<b>Toxicité Humaine (substances cancérigènes et non cancérigènes)</b>	Kg chlorure de vinyle équivalent dans l'air
<b>Effets respiratoires</b>	Kg PM <sub>2,5</sub> équivalent dans l'air
<b>Destruction de la couche d'ozone</b>	Kg CFC-11 équivalent dans l'air
<b>Radiations ionisantes</b>	Bq carbone-14 équivalent dans l'air
<b>Formation de photo-oxydants</b>	Kg éthylène équivalent dans l'air
<b>Ecotoxicité terrestre</b>	Kg triéthylène glycol équivalent dans l'eau
<b>Acidification terrestre</b>	Kg de SO <sub>2</sub> équivalent dans l'air
<b>Acidification aquatique</b>	Kg de SO <sub>2</sub> équivalent dans l'air
<b>Eutrophisation</b>	Kg de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> équivalent dans l'eau
<b>Occupation des sols</b>	m <sup>2</sup> de terre équivalent
<b>Changement climatique</b>	Kg de CO <sub>2</sub> équivalent dans l'air
<b>Extraction de minerais</b>	MJ d'énergie supplémentaire ou kg Fe équivalent
<b>Energie non renouvelable</b>	MJ totaux d'énergie non renouvelable

Ensuite la méthode IMPACT 2002+ vise à faire le lien entre les méthodologies midpoint et endpoint en répartissant les impacts intermédiaires dans quatre catégories de dommages comme présenté dans le tableau I.5 :

## **[Chapitre I : Méthodologie de l'analyse du cycle de vie]**

**Tableau I.5 :** Facteurs et unités de dommages. [31]

Catégories intermédiaires	Facteurs de dommages Unité de dommages		Catégories de dommages
Toxicité humaine (cancérogène)	$2,80.10^{-6}$	(DALY / kg chlorure de vinyle)	Santé Humaine
Toxicité humaine (non cancérogène)	$2,80.10^{-6}$	(DALY / kg chlorure de vinyle)	
Effets respiratoires inorganiques	$7.10^{-4}$	(DALY / kg PM <sub>2,5</sub> )	
Radiations ionisantes	$2,10.10^{-10}$	(DALY / Bq Carbone-14)	
Destruction de la couche d'ozone	$1,05.10^{-3}$	(DALY / kg CFC-11)	
Effets respiratoires organiques	$2,13.10^{-6}$	(DALY/kg éthylène)	
Ecotoxicité aquatique	$5,02.10^{-5}$	(PDF.m <sup>2</sup> .an / kg triéthylène glycol)	Qualité des écosystèmes
Ecotoxicité terrestre	$7,91.10^{-3}$	(PDF.m <sup>2</sup> .an / kg triéthylène glycol)	
Acidification / eutrophisation terrestre	1,04	(PDF m <sup>2</sup> .an / kg SO <sub>2</sub> éq dans l'air)	
Acidification aquatique	/	/	
Eutrophisation aquatique	/	/	
Occupation des sols	1,09	(PDF.m <sup>2</sup> .an / m <sup>2</sup> terre arable organique)	
Changement climatique	1	(kg CO <sub>2</sub> / kg CO <sub>2</sub> )	Changement climatique
Extraction de minerai	1	(MJ primaire / MJ primaire) (MJ / kg Fe éq)	Ressources
Energie non renouvelable	1	(MJ primaire / MJ surplus) (MJ / kg pétrole brut)	

Les scores d'impacts non normalisés et non pondérés des quatre catégories de dommages sont ensuite sommés afin d'obtenir une valeur unique : l'Eco-score global. Ceci dans le but d'obtenir un indicateur de la magnitude des impacts environnementaux générés par le produit étudié. Il s'exprime en éco-point (Pt), unité virtuelle correspondant à la somme de toutes les unités des catégories de dommages.

### **1.4.4. L'interprétation :**

La phase de l'interprétation consiste à analyser les résultats obtenus lors des précédentes étapes, d'émettre des conclusions par rapport aux objectifs et au champ de l'étude

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

---

fixés et de fournir des recommandations. Dans le cas où l'étude sert à comparer deux ou plusieurs produits, c'est lors de cette phase qu'une comparaison sera effectuée. Les limites de l'étude réalisée sont aussi mises en évidence. Idéalement, l'interprétation se fait de façon interactive avec les trois autres phases de l'ACV. L'interprétation peut donner lieu à des pistes de re-conception visant à réduire les impacts potentiels du produit étudié.

Pour ce faire la procédure suivante est proposée [32] :

### **a. L'identification des impacts les plus significatifs :**

Distinguer le stade du cycle de vie le plus impactant et donc les étapes sur lesquelles il faut intervenir pour réduire judicieusement l'impact du produit. Ceci nous amène à dégager les priorités d'action.

### **b. La vérification :**

Son rôle est de renforcer la confiance et la fiabilité des résultats de l'étude. Elle implique les contrôles de complétude, de sensibilité et de cohérence.

- Contrôle de complétude : Devant le manque ou la difficulté d'accès aux données dans la plupart des ACV, le praticien de cet outil a souvent recours à des approximations. Ces choix doivent être justifiés et leurs impacts doivent être vérifiés.
- Contrôle de sensibilité : Il a comme tâche la détermination de l'influence d'un changement dans les hypothèses, les données sources et la méthodologie sur les résultats finaux. Les intrants ayant un impact majeur doivent alors être regardés de près pour assurer que ces valeurs sont aussi précises que possibles.
- Contrôle de cohérence : L'objectif de ce contrôle est de s'assurer que les hypothèses, les méthodes, les données et les résultats sont conformes à l'objectif et au champ de l'étude initialement formulés.

### **c. Les conclusions et les recommandations :**

Pour tirer des conclusions de l'étude réalisée, il faut suivre la démarche suivante :

- Tirer des conclusions préliminaires.
- Si les conclusions sont cohérentes, les communiquer en tant que conclusions complètes.
- Sinon, revenir à l'une des trois premières étapes, selon le cas.

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

---

Les recommandations doivent se baser sur les conclusions finales de l'étude et représenter une conséquence logique et raisonnable des conclusions.

### **1.5. 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, elle présente plusieurs limites auxquelles il faut faire attention lors de la réalisation de ce type d'étude.

Premièrement, la phase d'inventaire peut être très longue. En effet, cet outil nécessite un investissement important du temps et des ressources du fait de la très grande quantité de données nécessaires. De plus, ces données sont la plupart du temps confidentielles donc difficiles à obtenir. Face au manque de données, le praticien de l'ACV fait appel à des données génériques manquant de précision, à des hypothèses permettant d'approcher les données dont il a besoin ou encore à des simplifications parfois mal justifiées. Ceci génère un nombre important d'incertitudes.

D'autre part, plusieurs choix méthodologiques demeurent assez subjectifs. Les résultats peuvent ainsi changer selon la méthode d'évaluation d'impact du cycle de vie ou de caractérisation choisie. Dans le cadre d'une comparaison, le classement entre plusieurs produits peut varier d'une méthode à l'autre.

De plus, l'ACV ne permet pas de réaliser une analyse dynamique, les résultats trouvés sont stationnaires. L'ACV donne un traitement linéaire des données et des résultats, c'est-à-dire une multiplication de la production fois deux engendre un double impact. Cependant, les procédés industriels, par exemple, suivent rarement cette linéarité.

Enfin, l'analyse de cycle de vie ne tient compte que des impacts environnementaux du produit mis à l'étude par conséquent les recommandations émergeant de l'interprétation des résultats peuvent être en conflit avec d'autres intérêts liés au produit tel que des considérations économiques ou sociales. Ainsi, les aspects économiques et sociaux doivent être pris en considération lors d'une ACV. [33]

# **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 de 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, *Ricinus communis L.*, 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 autres. [40]

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.

### II.3. La transestérification :

La transestérification est la technique classique de production du biodiesel. Elle constitue un procédé dans lequel les huiles végétales, les graisses animales ou les huiles à base de microalgues 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.

## [Chapitre II : Biodiesel]

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, de réduire 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.

- **Mécanisme de la réaction :**

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

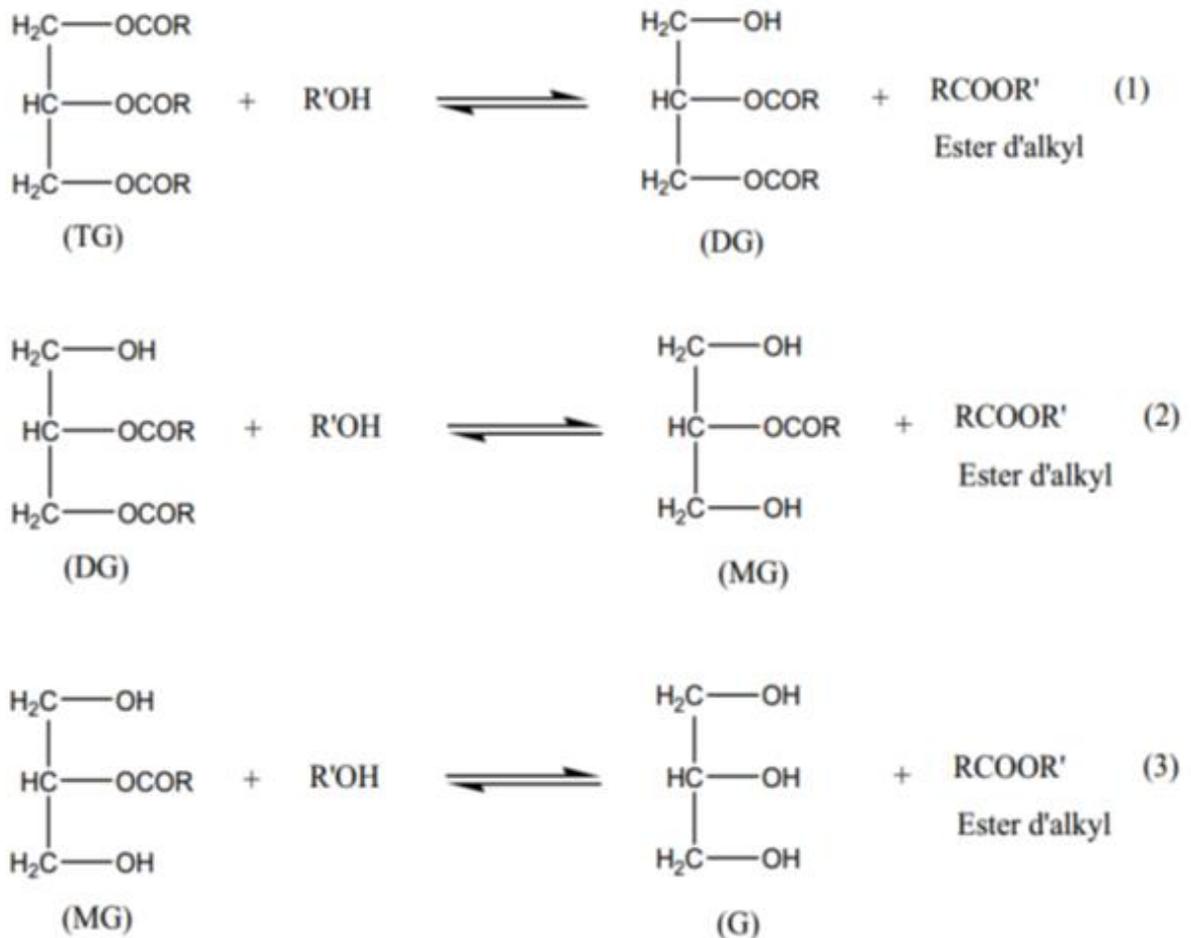
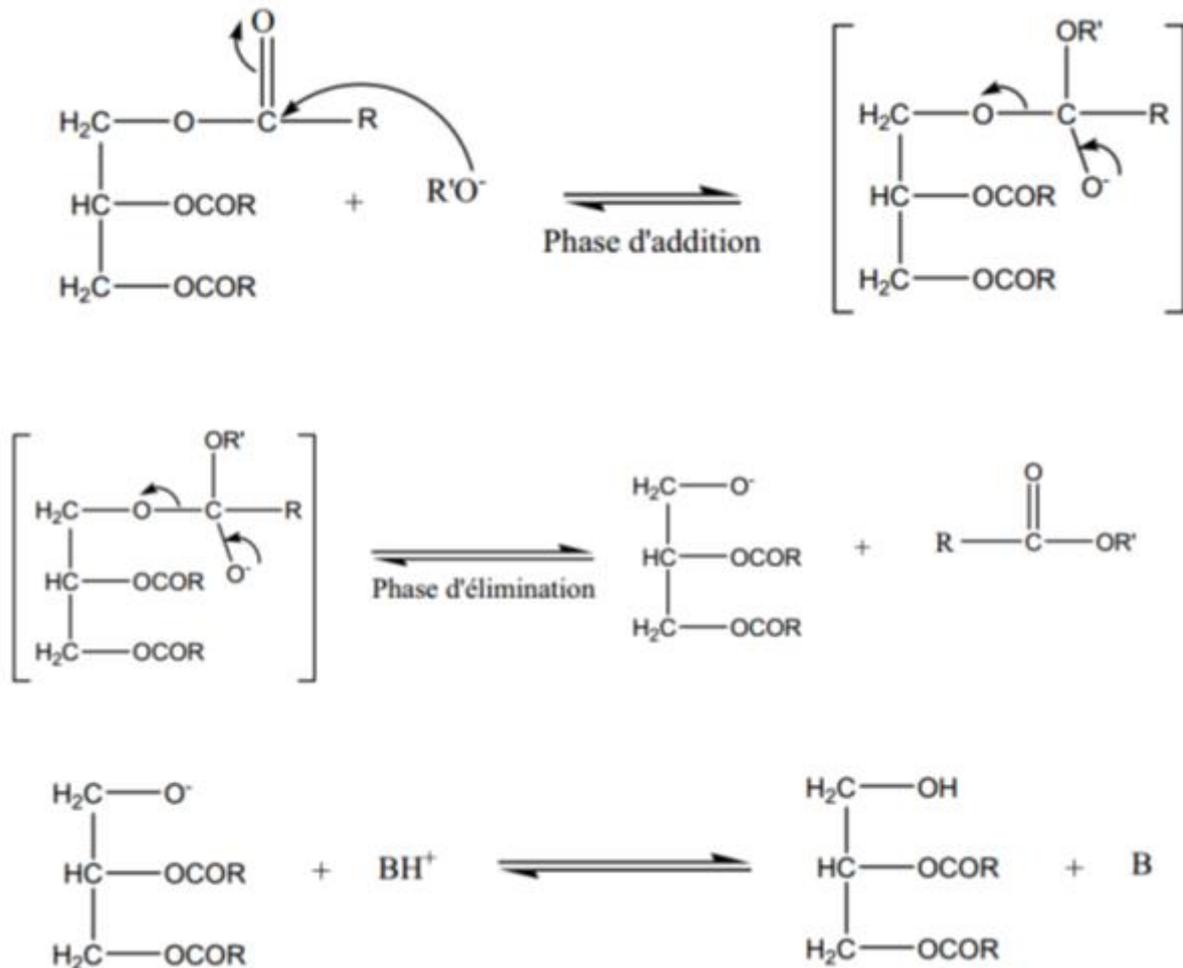


Figure II.1 : Les réactions successives de la transestérification. [41]

## [Chapitre II : Biodiesel]

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. [42]

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. [43]

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. [44]

### II.4. Les caractéristiques techniques du Biodiesel

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

## [Chapitre II : Biodiesel]

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

	Méthode	Limites	Unités
eau et sédiment	ASTM D2709	0.05 max	% volume
Viscosité Cinématique à 40° C	ASTM D445	1.9-6.0	mm <sup>2</sup> /s
Cendre Sulfatée	ASTM D874	0.02 max	% mass
<b>Soufre</b>			
Catégorie de S 15	ASTM D5453	0.0015 max	% mass
Catégorie de S 500	ASTM D5453	0.05 max	% mass
Corrosion de la bande du cuivre	ASTM DI 30	No 3 max	
<b>Teneur en alcool</b>			
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
Nombre 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 DII60	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)	ENI4538	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. [47]

### II.5.2. Extraction de l'huile :

Les graines sont soumises à un nettoyage puis à un tri par taille.

Les graines entrent dans une presse. L'huile sortant passe à travers un filtre simple dans un récipient où elle est pompée vers le réservoir de stockage. [47]

### 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 la soude (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. [49]

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

**Tableau II.2** : les propriétés du Biodiesel obtenu à partir de l'huile de cardons. [50]

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

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

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

Les graines sont soumises à un nettoyage puis à un tri par taille ensuite elles subissent un préchauffage par mise en contact avec de l'air chaud jusqu'à atteindre une température d'environ 60 ° C. Ce préchauffage permet de diminuer la viscosité de l'huile et de briser les parois cellulaires pour permettre son échappement.

Les graines entrent dans une presse hydraulique. L'huile sortant passe à travers un filtre simple dans un récipient où elle est pompée vers le réservoir de stockage.

Les substances non saponifiables (gomme) et les phosphatides présentes dans l'huile doivent être enlevées en mélangeant l'huile avec de l'eau chaude suivie d'une élimination continue de la gomme hydratée à l'aide d'une centrifugeuse.

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

Le processus commence à la fin de l'unité de dégommeage d'huile du ricin. L'huile obtenue 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  $80^{\circ}C$  avant d'être envoyé dans un réacteur de transestérification. Une charge d'éthanol à  $78^{\circ}C$  est ajoutée au mélange précédent dans un rapport molaire de 11,6:/1.

La réaction de la transestérification s'effectue à une température de  $80^{\circ}C$  et à une pression de 1 atm avec comme constante cinétique : 1,0348 l / mol.min. Un rendement de 97,25% en biodiesel est atteint au bout d'une heure de réaction.

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 récupérer l'éthanol qui n'a pas réagi et l'injecter dans l'alimentation en éthanol de sorte que cela réduise la charge d'éthanol frais. La pureté du distillat (éthanol récupéré) doit dépasser 94%, autrement la réaction de la transestérification est affectée. La colonne de distillation fonctionne à une température de  $210^{\circ}C$  et une pression de 1 atm.

Le produit de fond de l'unité de distillation est refroidi à  $70^{\circ}C$  et envoyé dans un réacteur de conversion qui est simultanément alimenté par un courant d'hydroxyde de sodium à une température de  $40^{\circ}C$ . 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  $60^{\circ}C$  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. [51]

Le biodiesel 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 est séparé de l'huile n'ayant pas réagi. La quantité d'huile non convertie, l'éthanol, le catalyseur, l'eau est inférieure à 1% dans le biodiesel finalement obtenu. Ce dernier est refroidi à la température ambiante et

## [Chapitre II : Biodiesel]

---

pompé vers l'unité de stockage. Le tableau II.3 donne quelques propriétés du biodiesel obtenu à partir du ricin.

**Tableau II.3** : Les propriétés du Biodiesel obtenu à partir de l'huile de ricin. [50]

Densité (kg/m <sup>3</sup> )	926.8
Viscosité cinématique a T °C (mm <sup>2</sup> /s)	15.98
Point d'éclair (°C)	190.7
Point de trouble (°C)	-23
Point d'écoulement (°C)	-45

# **Chapitre III :**

*Cynara cardunculus*

**et**

*Ricinus communis*

### **III. *Cynara cardunculus* et *Ricinus communis* L.:**

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

L'instabilité des prix et la baisse des réserves de pétrole ainsi que 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 ces deux plantes et leurs potentiels en vue de leur utilisation en tant que matière première pour la production du biodiesel.

#### **III.2. *Cynara cardunculus* :**

##### **III.2.1. 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. [53]

##### **III.2.2. Description générale :**

Les feuilles de la rosette sont pétiolées et très larges (Plus de 50cm x 35cm) du 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. [53]



Figure III.1 : *Cynara cardunculus*. [54]

### III.2.3. 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. [50]

### III.2.4. Caractères généraux du cardon :

#### III.2.4.1. 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.

## [Chapitre III : *Cynara cardunculus* et *Ricinus communis* L.]

---

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. [53]

### **III.2.4.2. 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. [53]

### **III.2.4.3. 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 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. [53]

## [Chapitre III : *Cynara cardunculus* et *Ricinus communis* L.]

### III.2.4.4. 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 la 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. [53]

### III.2.5. 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. [55]

Caractéristiques	valeur
Densité (g/mL)	0.916
Viscosité (mm <sup>2</sup> /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.2.6. Utilisation de l'huile du cardon :

L'huile est facilement extraite par application d'une pression à (20-25 °C). Les composants de l'huile 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. [53]

### III.3. *Ricinus communis* L.:

#### III.3.1. Origine :

Le ricin est une plante utilitaire connue depuis des milliers d'années, l'homme la cultivait depuis toujours pour bien différentes raisons. Ainsi, les pharaons s'en servaient déjà dans l'alimentation des lampes pour s'éclairer comme l'indiquent les graines de ricin retrouvées dans des tombeaux égyptiens datant de 4000 ans avant J-C. Il a été également utilisé pour ses vertus thérapeutiques. En effet, il fut l'un de ces remèdes de grands-mères utilisés pour tous : de la constipation aux brûlures d'estomac, en passant par les accouchements difficiles. [56]

#### III.3.2. Description générale :

Le ricin (*Ricinus communis* L.) est un arbuste non rustique sempervirent (à feuillage persistant) souvent cultivé comme plante annuelle. Il est d'origine tropicale (ouest de l'Afrique et moyen Orient) et fait partie de la famille des Euphorbiacées. Il se présente sous forme d'une plante herbacée ou arborescente atteignant 8 à 10 m de hauteur dans sa région d'origine et ne dépassant pas 2 m dans les régions tempérées [57]. Ses feuilles portées par de longues tiges sont palmatilobées (5 à 12 lobes) comme le montre la figure III.2.



Figure III.2 : La forme de la feuille de l'espèce *Ricinus communis* L. [57]

Les fleurs sont regroupées en grappes de sorte que les fleurs femelles se trouvent près du sommet tandis que les fleurs mâles se trouvent en bas de la plante. La graine est luisante, marbrée de rouge ou de brun, elle présente une ligne saillante sur la face ventrale comme l'indique la figure III.3.



**Figure III.3 :** Les graines de l'espèce *Ricinus communis* L. [58]

Le ricin montre une variation considérable, notamment par la taille de la plante, sa longévité, la forme et la taille du fruit et de la graine ainsi que les dessins et la couleur du tégument.

Les principaux objectifs de la sélection moderne du ricin sont : un rendement élevé en graines, une forte teneur en huile et en acide ricinoléique, une récolte facile et la résistance aux maladies et aux ravageurs.

Il existe de nombreux cultivars : *Halo* et *Lynn* sont des cultivars nains que l'on trouve aux Etats-Unis qui sont aujourd'hui essentiellement utilisés comme parents mâles dans la production d'hybrides. Parmi d'autres cultivars bien connus, on trouve : *Conneret Kansasaux* Etats-Unis, *Rica* et *Vends* en France ainsi que la série d'hybrides *GCH* en Inde.

### **III.3.3. Propriétés et composition :**

Le rendement moyen des graines de ricin varie de l'ordre de 1000 à 3000 kg/ha. Les graines sont riches en huile et en protéines : 40 à 60 % d'huile, 15 à 20 % de protéines et 5% d'eau. Elles contiennent aussi une glycoprotéine très dangereuse : la ricine. On trouve également dans d'autres parties de la plante un alcaloïde toxique, la ricinine et des allergènes.

L'huile n'est pas siccative, elle est visqueuse, presque incolore, transparente et se caractérise par une odeur et un goût bien particuliers. Elle est constituée majoritairement de triacylglycérol dont l'acide gras en C<sub>18</sub> (insaturé et hydroxylé) est l'acide ricinoléique (90%). Elle contient aussi d'autres acides gras comme : l'acide palmitique (2%), l'acide stéarique (1%), l'acide oléique (7%) et l'acide linoléique (3%).

En conditions favorables, le ricin a un taux élevé de photosynthèse qui a été attribué à la forte teneur en chlorophylle des feuilles. [59]

### III.3.4. Caractères généraux du ricin :

#### III.3.4.1. Ecologie :

La plante pousse dans toutes les régions tempérées, chaudes et tropicales. Elle est cultivée entre le 40°S et le 52°N à l'équateur entre 300 et 1500 m d'altitude.

Les températures du sol idéales pour la germination sont de 10 à 18 °C. Le ricin nécessite des températures moyennes de 20 à 26 °C. Des températures inférieures à 15 °C ou supérieures à 38 °C sont nuisibles au ricin. Il est sensible aux dégâts du gel.

Il préfère des journées claires, ensoleillées avec peu d'humidité et peut supporter à la fois des climats secs et arides et des pluies diluviennes. Le semis doit s'effectuer de façon à garantir à la plante 400 à 500 mm de précipitations jusqu'au moment de la principale floraison. Le ricin tolère le stress hydrique grâce à son profond système racinaire.

Il se développe sur presque tous les types de sols pourvu qu'ils soient bien drainés et fertiles avec une préférence pour les limons sableux ou argileux profonds dont le pH est compris entre 5 et 6,5. En revanche, les sols très fertiles à forte teneur en azote sont déconseillés car ils sont à l'origine d'une croissance végétative excessive. [62]

#### III.3.4.2. Plantation :

La préparation du champ commence par un labour assez profond de façon à briser les couches de terre compactes. Le ricin a besoin d'une couche arable humide pour sa germination et sa première croissance. Le buttage est recommandé uniquement en zones sèches. 2 à 3 graines par trou à 3-8 cm de profondeur avec un espacement entre les lignes de 1 m soit environ 25 000 à 30 000 plantes/ha. La plantation se fait vers le mois d'Avril ou Mai. Le ricin est multiplié par graines. [53]

#### III.3.4.3. Croissance :

Les plantules du ricin lèvent entre 10 à 20 jours après le semis. Les bourgeons apicaux meurent systématiquement après une poussée de croissance. La formation successive de branches et d'inflorescences se poursuit tout au long de la vie de la plante. La floraison débute tôt dans la vie du ricin. Les premières fleurs peuvent s'ouvrir 40 à 70 jours après le semis. Le pollen est surtout émis le matin et la pollinisation s'effectue par le vent. Il peut arriver qu'une plante ait des infrutescences à plusieurs stades de développement. 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. La période allant de la levée à la maturation varie entre 140 à 170 jours. [59]

### III.3.4.4. Entretien :

La lutte contre les mauvaises herbes est essentielle. Deux désherbages suffisent, le premier désherbage s'effectue environ 6 semaines après le semis. Il doit se faire en douceur et il est souvent associé à un éclaircissage, un buttage et un écimage.

Les champs sont souvent sensibles à l'érosion du fait que le système racinaire du ricin ne stabilise pas le sol, il convient alors d'appliquer des techniques de conservation du sol. L'irrigation du ricin améliore nettement le rendement.

L'épandage d'engrais organiques (le compost, le fumier de ferme, les tourteaux d'arachide ou de ricin) et inorganiques est utile. [61]

### III.3.4.5. Récolte :

Le cycle de culture des types annuels de ricin varie entre 4-9 mois. Les types à capsules indéhiscentes sont récoltés une fois que celles-ci sont bien sèches. En revanche, chez les types à capsules déhiscentes, elles sont ramassées avant de sécher et encore vertes. La récolte peut se faire toutes les 2 semaines.

La récolte mécanique consiste essentiellement à ramasser les fruits sur des plantes sur pied. Des machines adéquates à une culture à grande échelle ont été mises au point.

Les inflorescences sont empilées jusqu'à ce que les capsules noircissent ensuite elles sont étalées au soleil pour sécher. La plupart des graines tombent en l'espace de 4-6 jours. Les fruits non ouverts sont soumis au battage. En raison de la chaleur et la lumière qui réduisent la teneur en huile ainsi que sa qualité, les graines du ricin ne peuvent être entreposées à l'air libre que pendant de courtes périodes. Elles doivent être manipulées avec précaution sinon le tégument s'abîme facilement. Les graines peuvent être entreposées pendant 2 à 3 ans dans tout récipient sans préjudice pour le contenu ou pour la qualité de l'huile. [61]

### III.3.5. Quelques caractéristiques de l'huile de ricin :

Le tableau III.2 donne un petit aperçu des propriétés caractérisant l'huile du ricin.

**Tableau III.2 :** Propriétés de l'huile du 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.3.6. Utilisations de l'huile de ricin :

Le but de cultiver du ricin est de produire de l'huile pour plusieurs fins. De nos jours, presque toute la quantité d'huile produite est utilisée dans l'industrie pour des buts techniques tandis que des quantités beaucoup plus petites sont destinées aux utilisations médicinales et d'énergie. L'huile du ricin est employée comme lubrifiant du fait que sa viscosité et son adhérence demeurent fortes à des températures élevées. Elle ne corrode pas le caoutchouc, ainsi elle est employée comme additif dans la production du caoutchouc. Dans l'industrie de

### [Chapitre III : *Cynara cardunculus* et *Ricinus communis* L.]

---

plastiques, elle est employée comme plastifiant. Elle est également utilisée comme dissolvant pour certaines couleurs dans les produits cosmétiques, les encres et dans l'industrie textile. Son adhérence fait d'elle un additif intéressant aux peintures. En raison d'une double liaison sur le neuvième atome de carbone et d'un groupe d'hydroxyle sur le douzième carbone, l'acide ricinoléique (présent dans l'huile de ricin à 90%) est plus réactif que d'autres acides gras.

L'huile de ricin a quelques caractéristiques qui pourraient faire d'elle le candidat approprié pour la production du biodiesel mais sa viscosité constitue un inconvénient majeur. En effet, l'huile de ricin sous sa forme brute d'huile végétale est environ 100 fois plus visqueuse que le diesel pétrolier. Cependant, la transestérification de cette huile réduit sa viscosité de manière significative. Les recherches sont toujours en cours en vue de déterminer si la viscosité finale du biodiesel obtenu à partir de l'huile de ricin est dans les limites acceptables pour l'usage dans des moteurs diesel. Le biodiesel obtenu à partir de l'huile du ricin a un coût inférieur comparé à celui obtenu à partir d'autres huiles en raison de sa solubilité dans l'alcool qui fait que sa transestérification ne nécessite pas la chaleur et l'énergie exigée par d'autres huiles végétales lors de leur conversion en carburant. [53]

# **Chapitre IV :**

## **Analyse de cycle de vie**

### IV. Analyse de cycle de vie :

#### IV.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 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, 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 du 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 du 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 performances environnementales (bilan CO<sub>2</sub>) et énergétiques (bilan énergétique) d'une filière de production

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

---

du biodiesel produit à partir des cultures des espèces *Cynara cardunculus* et *Ricinus communis 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 d'huile des espèces *Cynara cardunculus* et *Ricinus communis L.* et comparer ces deux produits avec le diesel pétrolier d'un point de vue environnemental.

##### **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 :**

#### **IV.2.2.3.1. Production du biodiesel à partir de l'espèce *Cynara Cardunculus* :**

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

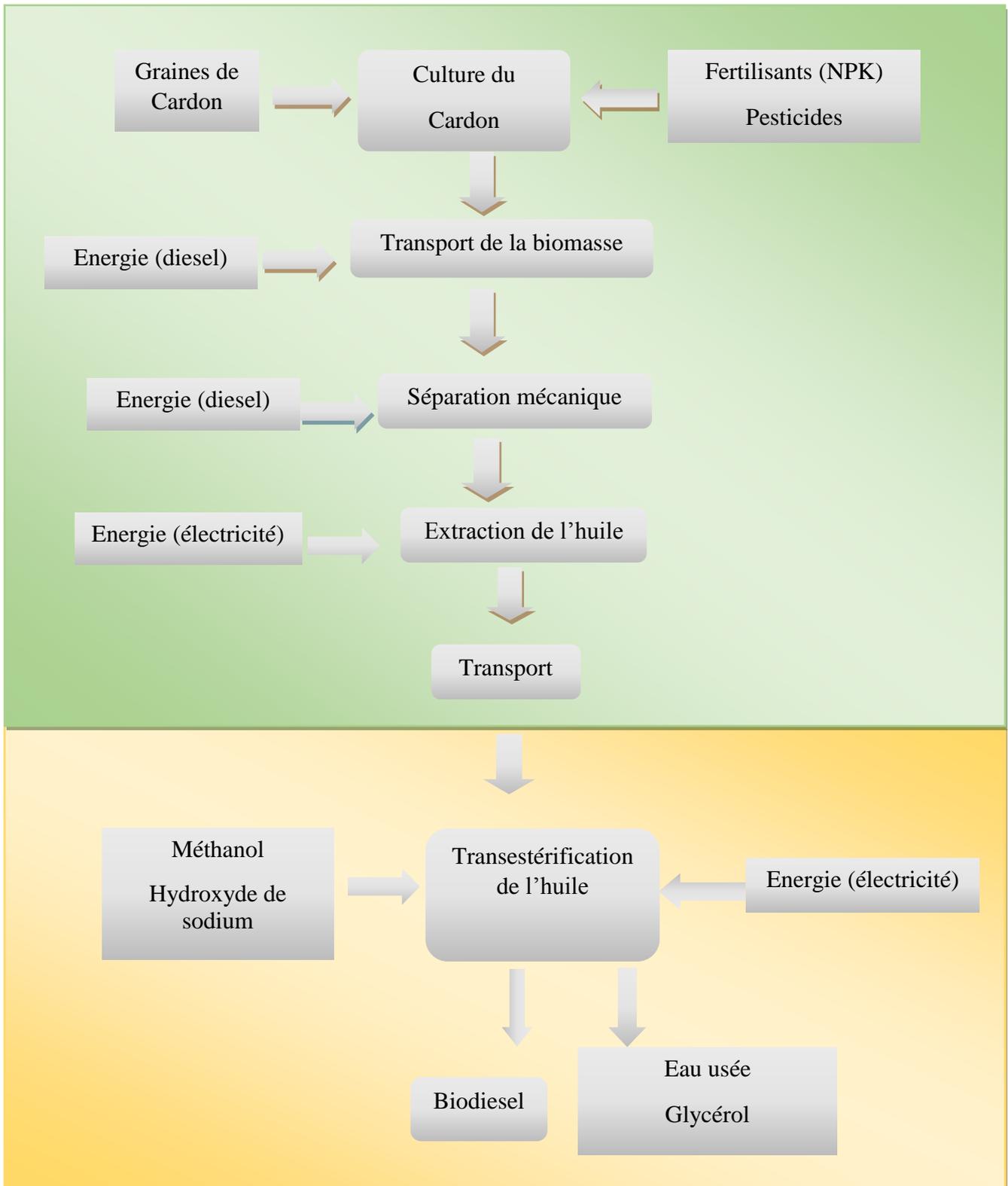


Figure IV-1 : Les différents processus élémentaires de production du biodiesel à partir de l'espèce *Cynara cardunculus*.

IV.2.2.3.2. Production du biodiesel à partir de l'espèce *Ricinus Communis L.* :

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

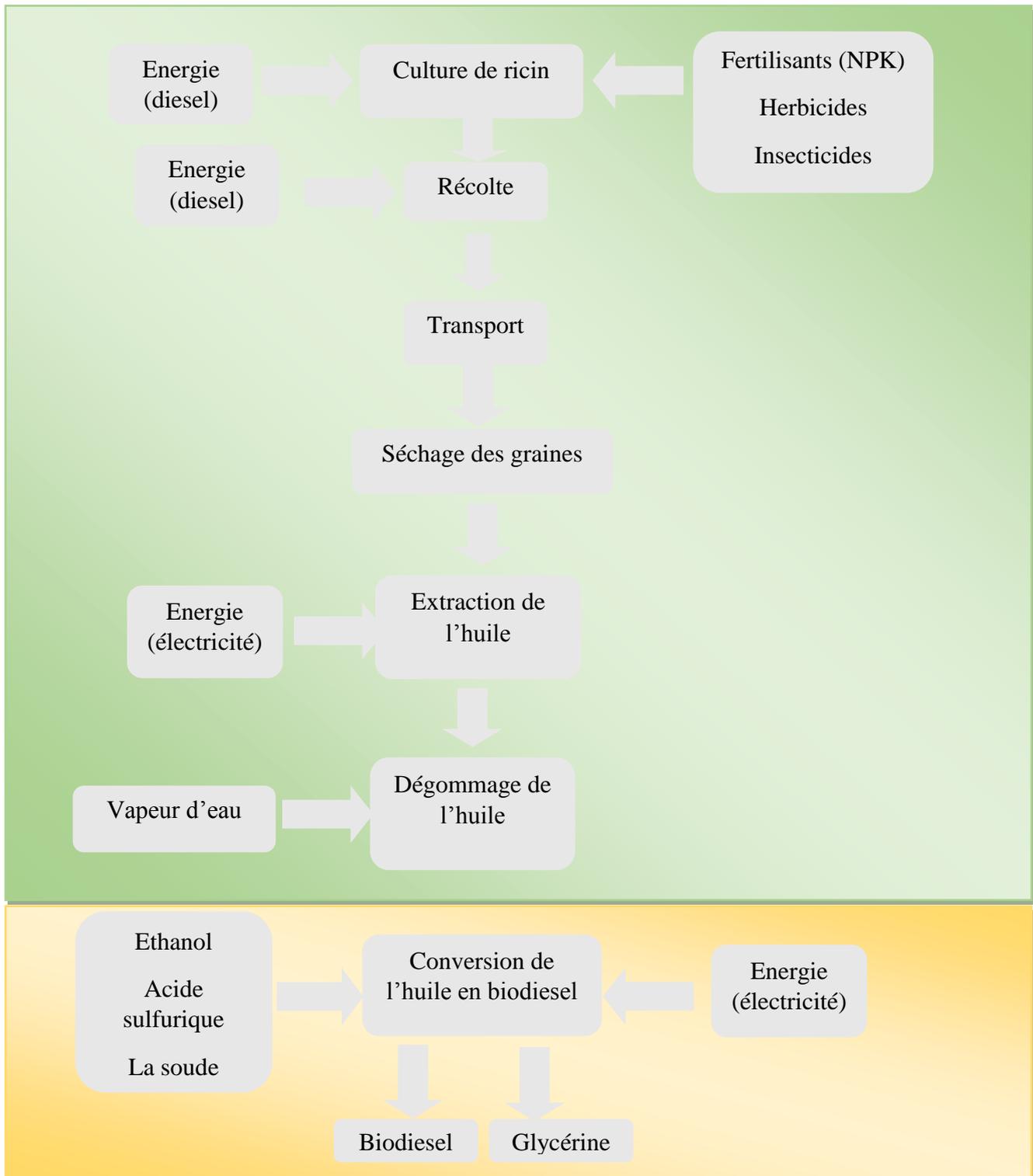


Figure IV-2 : Les différents processus élémentaires de production du biodiesel à partir de l'espèce *Ricinus communis L.*

### **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%). [64]

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

Pour l'évaluation des différents impacts on considère les deux catégories d'impact suivantes : changement climatique et 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 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 pour le ricin et de 2 tonnes pour le cardon. [50]
- Les cultures du ricin et cardon sont conduites dans des systèmes de production non irrigués.
- Les travaux du sol sont mécanisés.
- La teneur de la graine en huile est de 50% pour le ricin et de 25% pour le cardon. [53]
- La production d'un litre de biodiesel nécessite un litre d'huile de ricin ou 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.

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

### IV.3. Inventaire du cycle de vie :

#### IV.3.1. Le cardon :

##### IV.3.1.1. 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	[48]
	Herbicides		Kg	1.9	
	Fertilisant (NPK)	N	Kg	13.5	
		P		26.8	
K		40.15			
Energie	Travail du sol	Labour	L	48	[25]
		Reprise		6.5	
		Bêchage		6.5	
		semis		6.5	
	Récolte (diesel)		Kg	37.91	[48]
Transport	Carburant (diesel)		Kg	19.457	[48]
Séquestration de CO <sub>2</sub>			Kg	2895.2	[48]

**Remarque :** N'ayant pas trouvé de données concernant les inputs en matière de carburants utilisés dans le travail du sol pour le cardon, nous supposons qu'elles sont similaires à celles du tournesol et nous travaillons avec cette supposition.

##### IV.3.1.2. Extraction de l'huile :

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

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

	Extraction		181.03	[48]
--	------------	--	--------	------

### IV.3.1.3. 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
<b>Chimique</b>	L'hydroxyde de potassium	Kg	3.32	[48]
	Méthanol	Kg	62.36	
<b>Energie</b>	Electricité	MJ	55.7	[48]
	Vapeur d'eau	Kg	107.47	

La figure IV.3 montre l'arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile du cardon.



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

### IV.3.2. Le ricin :

#### IV.3.2.1. Activité agricole :

Les données présentes dans le tableau IV.4 sont rapportées à 1 ha.

**Tableau IV.4 :** Inventaire des flux de matière et d'énergie entrant lors de la culture du ricin.

Type d'input	Nomenclature		Unité	Quantité	Références
Chimique	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				
Energie	Travail du sol	Labour	MJ	1852.8	[65]
		Hersage		131.6	[69]
		Désherbage		4.4	[65]
		Semis		17.6	
	Récolte			123.2	
	Séchage			759.3	
Transport	Carburant (diesel)		L	19.4	[66]
Séquestration de CO <sub>2</sub>			Kg	10000	[51]
Fixation d'azote (N)			kg	15	

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

Les données présentes dans le tableau IV.5 sont rapportées à 1 tonne d'huile du ricin.

**Tableau IV.5 :** 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
Energie	Presse	MJ	1.32	[51]
	Vapeur d'eau	Kg	420	

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

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

Les données présentes dans le tableau IV.6 sont rapportées à 1 tonne de biodiesel produit.

**Tableau IV.6 :** 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.4 montre l'arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile du ricin.

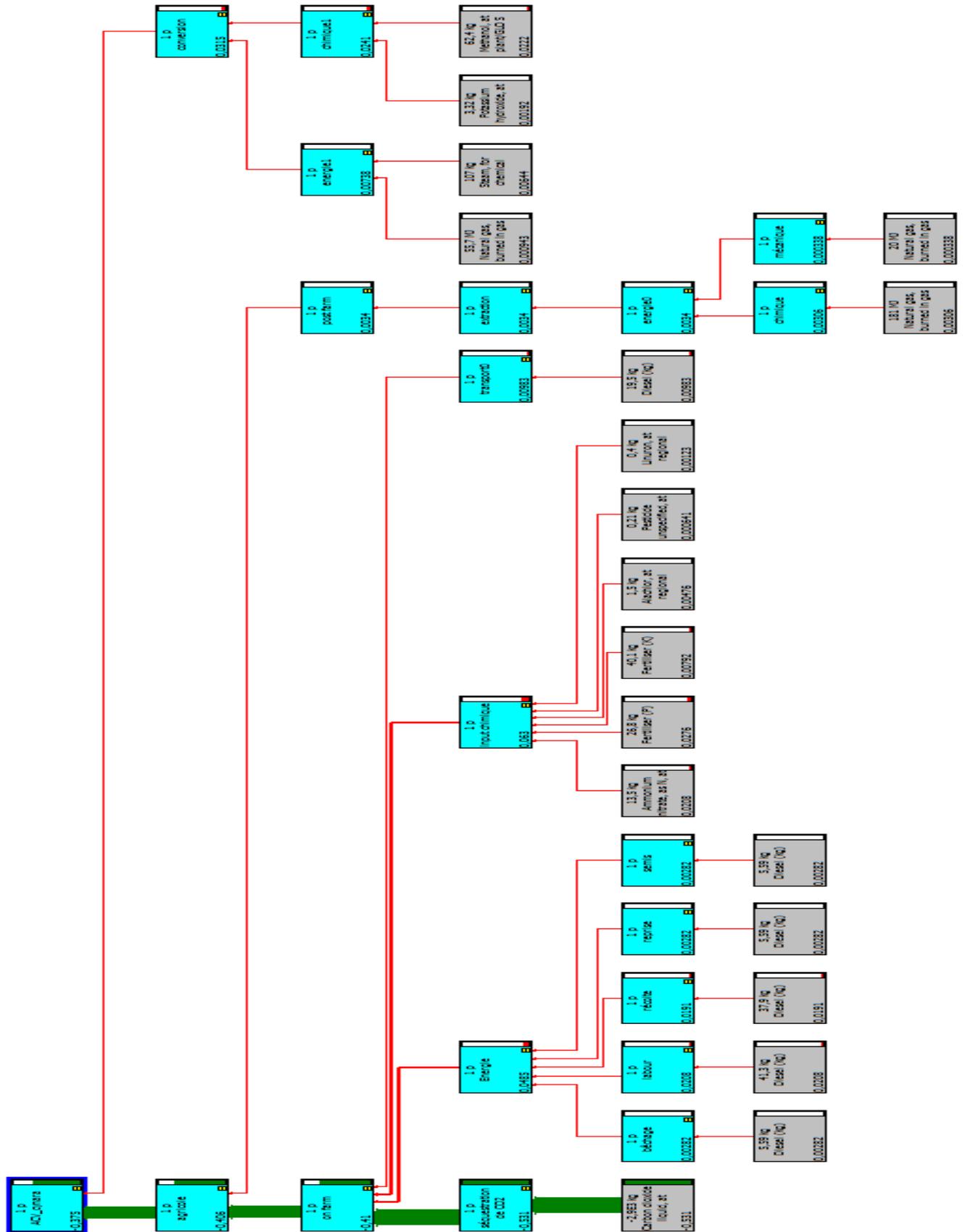


Figure IV-4 : Arborescence des processus élémentaires du procédé de production du biodiesel issu de l'huile de ricin

### **IV.4. Etude de l'impact :**

#### **IV.4.1. Bilan carbone :**

##### **IV.4.1.1. Ricin :**

La production d'une tonne de biodiesel à partir des graines du ricin engendre des émissions de 1455,48 kg eq de CO<sub>2</sub>. (Voir le tableau IV.7)

Le Tableau IV.7 montre que l'étape principale qui contribue le plus au score du changement climatique est la phase de la conversion de l'huile en biodiesel avec une contribution de 55.54 % contre 44.46 % pour l'étape agricole.

Durant l'étape de transformation de l'huile en biodiesel, on peut clairement identifier la substance qui représente la plus grande contribution aux émissions totales de CO<sub>2</sub> à savoir l'éthanol avec un pourcentage de 54.65 %.

Durant l'étape de la production des graines du ricin, l'utilisation d'engrais domine nettement la part des émissions de CO<sub>2</sub> avec 29.27 % dont 16,97 % pour l'urée et 10,41% pour le triple superphosphate.

La séquestration du CO<sub>2</sub> par le ricin est de l'ordre de 6376 kg par tonne de biodiesel produit. L'écobilan de la production d'une tonne du biodiesel issu de l'huile de ricin est de - 4927,73 kg eq en CO<sub>2</sub>. Il s'agit donc d'un bilan carbone largement positif ce qui constitue un critère de durabilité très satisfaisant.

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

Tableau IV.7 : Les émissions en kg eq de CO<sub>2</sub>. (ricin)

<b>INTRANT</b>	<b>CO<sub>2</sub> en kg eq</b>	<b>%</b>
<b>Production de la graine de du ricin</b>		44,46
<b>Urée</b>	246,99	16,970
<b>Triple superphosphate</b>	151,56	10,413
<b>Insecticide (Furadan)</b>	120,83	8,302
<b>Diesel</b>	43,95	3,020
<b>K<sub>2</sub>O</b>	27,4	1,883
<b>Herbicide (Trifluraline)</b>	15,95	1,096
<b>Désherbage</b>	0,05	0,003
<b>Hersage</b>	1,57	0,108
<b>Labour</b>	22,3	1,532
<b>Récolte</b>	1,59	0,109
<b>Séchage</b>	9,15	0,629
<b>Semis</b>	0,22	0,015
<b>Vapeur</b>	5,43	0,373
<b>Gaz naturel</b>	0,08	0,005
<b>Conversion de l'huile de ricin en biodiesel</b>		55,54
<b>Ethanol</b>	795,41	54,649
<b>Acide sulfurique</b>	2,29	0,157
<b>Gaz naturel</b>	10,74	0,738
<b>Total</b>	1455,48	100
<b>Séquestration CO<sub>2</sub></b>	-6376,91	
<b>Fixation de N</b>	-6,3	
<b>Bilan</b>	-4927,73	

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

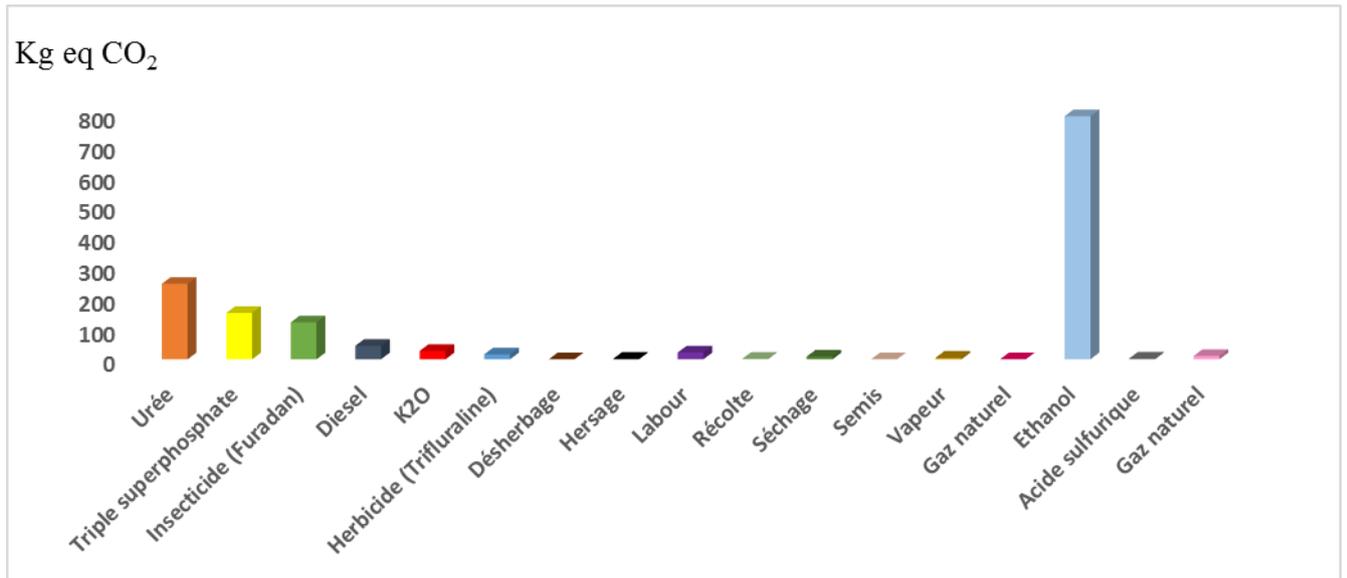


Figure IV.5 : Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (kg eq de CO<sub>2</sub>) (ricin)

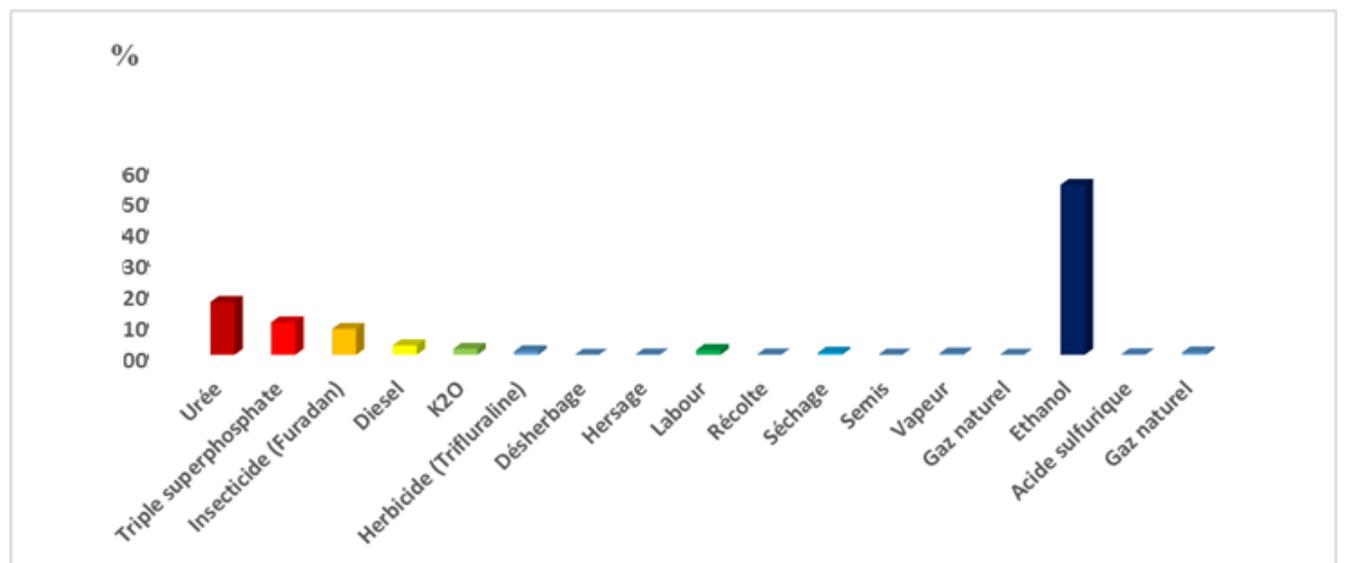


Figure IV.6 : Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (%) (ricin)

### IV.4.1.2. Carbon :

La production d'une tonne de biodiesel à partir des graines de cardon engendre des émissions de 396,83 kg eq de CO<sub>2</sub>.

Le Tableau IV.8 montre que l'étape principale qui contribue au score du changement climatique est la phase agricole avec une contribution de 80,95 % contre 19,05 % pour l'étape de conversion de l'huile en biodiesel.

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

---

Durant l'étape de la production des graines du cardon, Les fertilisants dominant nettement les émissions de CO<sub>2</sub> avec une part de 45,3 % en particulier les nitrates d'ammonium qui représente 20,07 % suivie du phosphate avec un pourcentage de 17,49%.

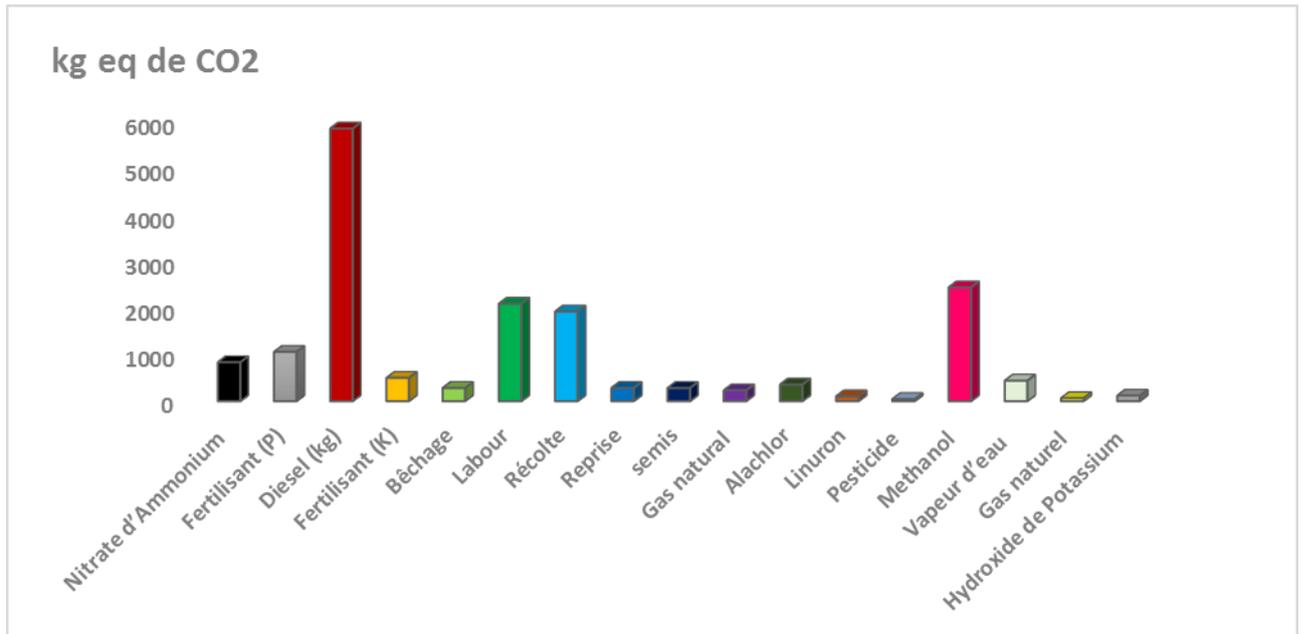
Durant l'étape de transformation de l'huile en biodiesel, on peut clairement identifier le méthanol comme étant la substance qui représente la plus grande contribution aux émissions totales de CO<sub>2</sub> avec un pourcentage de 10,51 %.

La séquestration du CO<sub>2</sub> par le cardon est de l'ordre de 1846 kg par tonne de biodiesel produit [48]. L'écobilan de la production d'une tonne de biodiesel issu de l'huile du cardon est de -1449,41 kg eq en CO<sub>2</sub>. Il s'agit donc d'un bilan carbone positif.

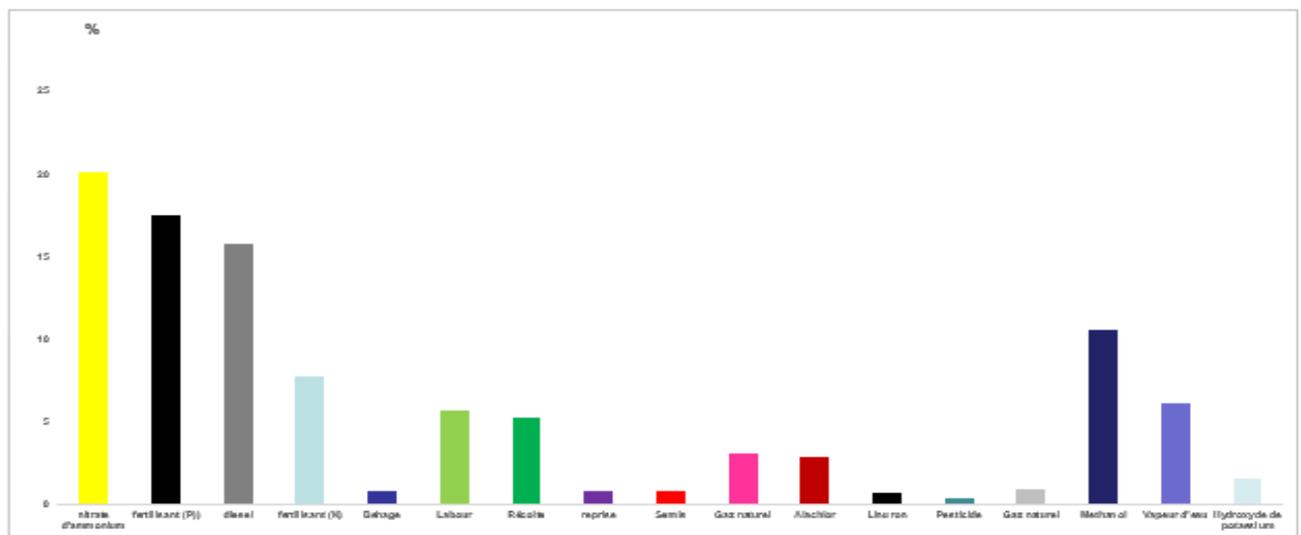
## [Chapitre IV : Analyse de cycle de vie]

Tableau IV.8 : Les émissions en kg eq de CO<sub>2</sub>. (cardon)

Processus	CO2 en kg éq	%
<b>Production de la graine de cardon</b>		80,95
<b>Nitrate d'Ammonium</b>	79,64	20.07
<b>Fertilisant (P)</b>	69,41	17.49
<b>Diesel (kg)</b>	62,51	15.75
<b>Fertilisant (K)</b>	30,7	7.74
<b>Bêchage</b>	3,03	0.76
<b>Labour</b>	22,4	5.64
<b>Récolte</b>	20,5	5.17
<b>Reprise</b>	3,03	0.76
<b>semis</b>	3,03	0.76
<b>Gas naturel</b>	11,90	3.00
<b>Alachlor</b>	11,12	2.80
<b>Linuron</b>	2,47	0.62
<b>Pesticide</b>	1,56	0.39
<b>Conversion de l'huile de Cynara en biodiesel</b>		19,05
<b>Methanol</b>	41,71	10.51
<b>Vapeur d'eau</b>	24,31	6.13
<b>Gas naturel</b>	3,30	0.83
<b>Hydroxide de Potassium</b>	6,21	1.56
<b>Total</b>	396,83	100
<b>Sequestration de CO<sub>2</sub></b>	-1846,24	
<b>Bilan</b>	-1449,41	



**Figure IV.7 :** Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (kg eq de CO<sub>2</sub>) (carbon)



**Figure IV.8 :** Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (%) (carbon)

### IV.4.2. Bilan énergétique :

#### IV.4.2.1. Ricin :

Les résultats obtenus à l'issue de l'analyse du cycle de vie nous montrent les consommations d'énergies non renouvelables constatées à chaque étape. Les figure IV-9 et figure IV-10 montrent que la consommation en énergie fossile se concentre principalement durant l'étape de la conversion de l'huile en biodiesel avec une contribution de 65,24 %. L'autre part de l'énergie fossile dépensée est consommée lors de la phase agricole avec un pourcentage voisin de 34,76%.

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

Les principales constatations sont la consommation en énergie fossile due à la production de l'éthanol (64,76%). La part des engrais qui est aussi un facteur qui contribue fortement à la consommation d'énergie primaire est de 6560,1 MJ/h soit 12,38%.

La consommation énergétique d'origine fossile pour la production d'une tonne du biodiesel à partir de l'huile du ricin est 52985,64 MJ. Si on suppose un rendement énergétique de 55000 MJ/tonne, il en résultera un ratio (input/output) énergétique de **0,85** d'où un bilan énergétique inférieur à l'unité ce qui est un critère de durabilité non satisfaisant. La phase de la conversion de l'huile en biodiesel qui contribue avec un pourcentage de 65,25% à la consommation de l'énergie primaire doit être revue et améliorée afin de minimiser le total de l'énergie dépensée.

**Tableau IV.9 : Résultats du bilan énergétique (MJ). (ricin)**

<b>INTRANT</b>	<b>Valeur en MJ</b>	<b>%</b>
<b>Production de la graine de du ricin</b>		34,67
Urée	3510,36	6,625
Triple superphosphate	2520,21	4,756
Insecticide (Furadan)	3821,04	7,211
Diesel	4127,32	7,790
K2O	529,53	0,999
Herbicide (Trifluraline)	528,68	0,998
Désherbage	5,09	0,010
Hersage	148	0,279
Labour	2100	3,963
Récolte	150	0,283
Séchage	860	1,623
Semis	20,3	0,038
Vapeur	98,77	0,186
Gaz naturel	1,53	0,003
<b>Conversion de l'huile de ricin en biodiesel</b>		65,24
Ethanol	34315,98	64,765
Acide sulfurique	38,49	0,073
Gaz naturel	210,34	0,397
<b>Total</b>	52985,64	100
<b>Production énergétique</b>	45016 [70]	
<b>Bilan</b>	-7969,64	
<b>EROI</b>	0,85	

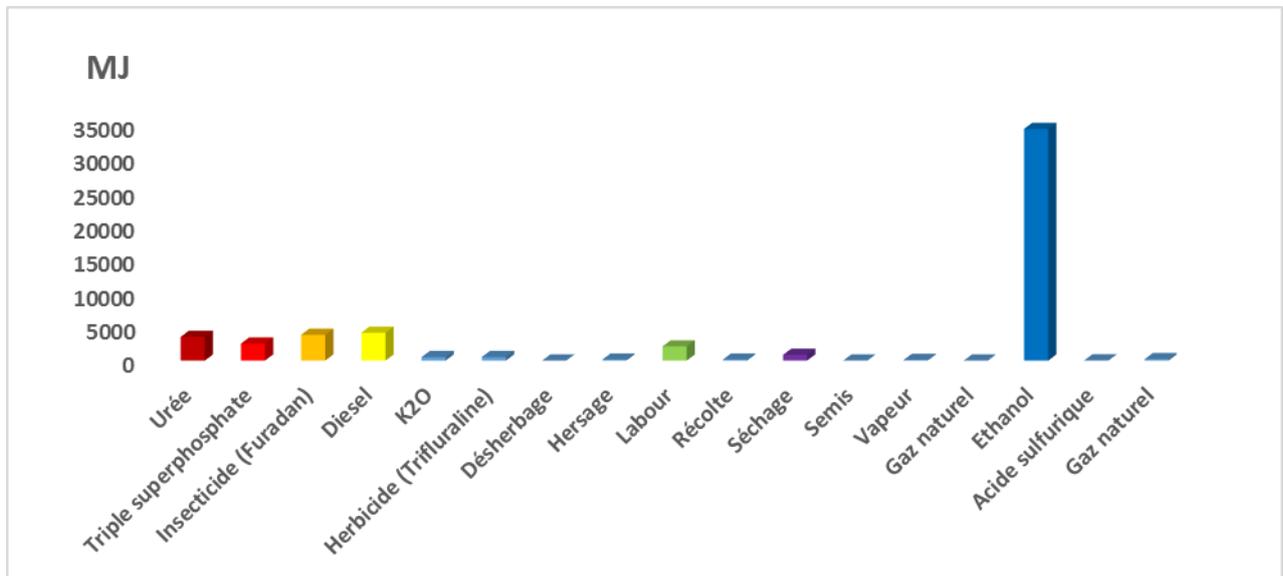


Figure IV.9 : Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique du ricin (MJ)

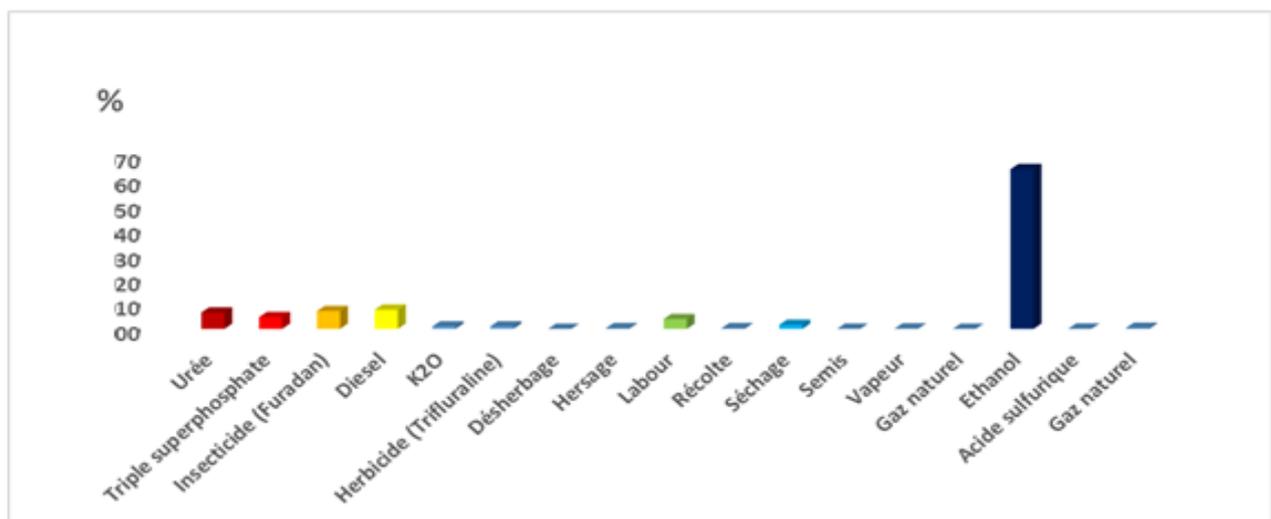


Figure IV.10 : Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique du ricin (%)

#### IV.4.2.2. Cardon :

Les figure IV-11 et figure IV-12 montrent que la consommation en énergie fossile se concentre principalement durant l'étape de la production des graines du cardon avec une contribution de 81,85 %. L'autre part de l'énergie fossile dépensée est consommée lors de la phase de la conversion de l'huile en biodiesel avec un pourcentage de 18,15%.

On constate principalement que la consommation du carburant (34,59%) a une contribution prépondérante dans la consommation en énergie fossile. La part des engrais est aussi un facteur qui contribue fortement à la consommation d'énergie primaire : 2401,11 MJ soit 14,14%.

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

La consommation énergétique d'origine fossile pour la production d'une tonne du biodiesel à partir de l'huile de cardon est 16974,41 MJ. Si on suppose un rendement énergétique de 18000 MJ/tonne, il en résultera un ratio (input/output) énergétique de **2.36** d'où un bilan énergétique supérieur à l'unité ce qui est un critère de durabilité satisfaisant.

**Tableau IV.10 : Résultats du bilan énergétique (MJ). (cardon)**

Processus	Valeur en MJ	%
<b>Production de la graine de cardon</b>		81,85
<b>Nitrate d'Ammonium</b>	837,67	4,93
<b>Fertilisant (P)</b>	1061,65	6,25
<b>Diesel (kg)</b>	5871,03	34,59
<b>Fertilisant (K)</b>	502,12	2,96
<b>Bêchage</b>	284	1,67
<b>Labour</b>	2100	12,37
<b>Récolte</b>	1930	11,37
<b>Reprise</b>	284	1,67
<b>semis</b>	284	1,67
<b>Gas natural</b>	233,06	1,37
<b>Alachlor</b>	358,57	2,11
<b>Linuron</b>	104,75	0,62
<b>Pesticide</b>	46,06	0,27
<b>Conversion de l'huile de cardon en biodiesel</b>		18,15
<b>Methanol</b>	2451,32	14,44
<b>Vapeur d'eau</b>	442,31	2,61
<b>Gas naturel</b>	64,59	0,38
<b>Hydroxide de Potassium</b>	119,28	0,7
<b>Total</b>	16974,41	100
<b>Production énergétique</b>	40000 [48]	
<b>Bilan</b>	23025,59	
<b>EROI</b>	2,36	

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

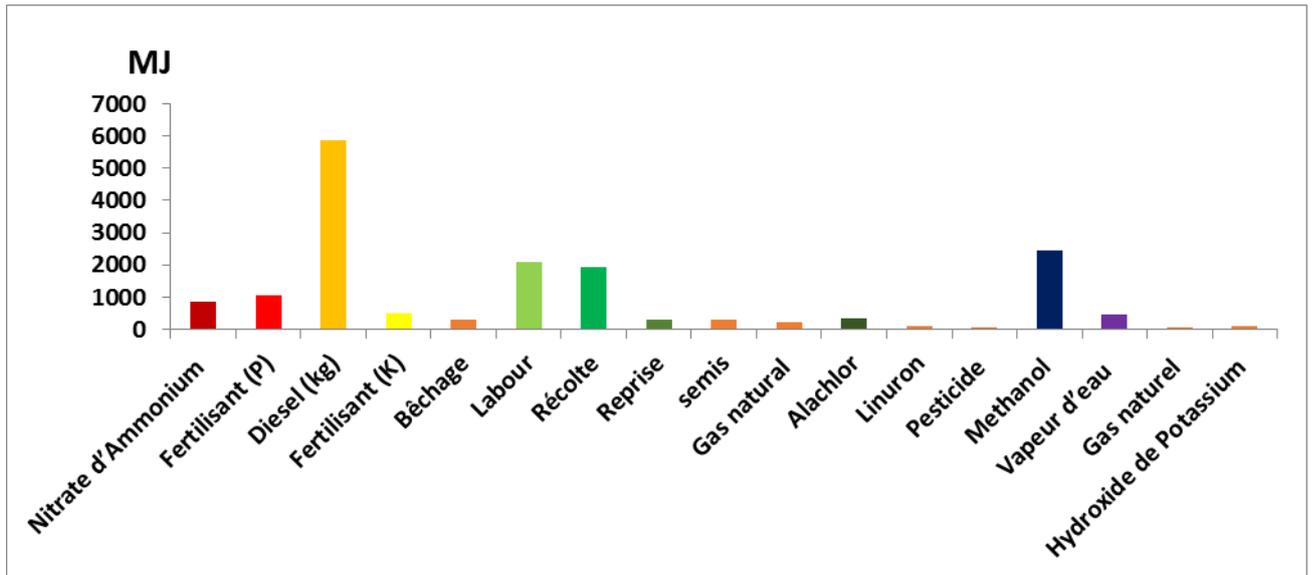


Figure IV.11 : Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique du carbon (MJ)

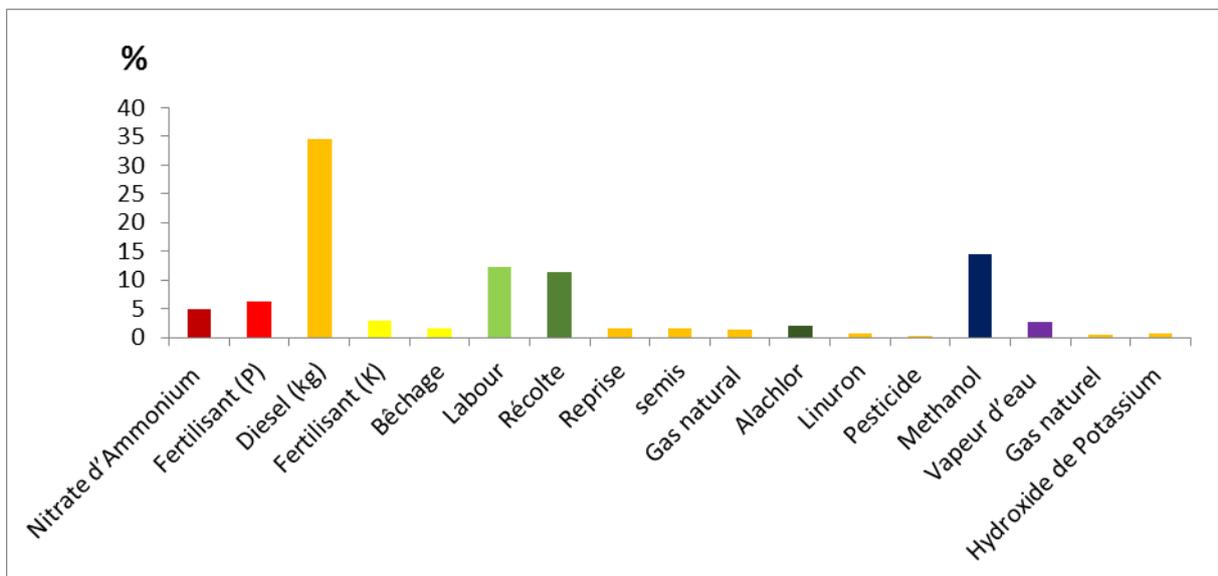


Figure IV.12 : Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique du carbon (%)

### IV.5. Interprétation :

#### IV.5.1. Comparaison du bilan carbonique et énergétique du biodiesel issu des deux espèces étudiées avec le diesel pétrolier :

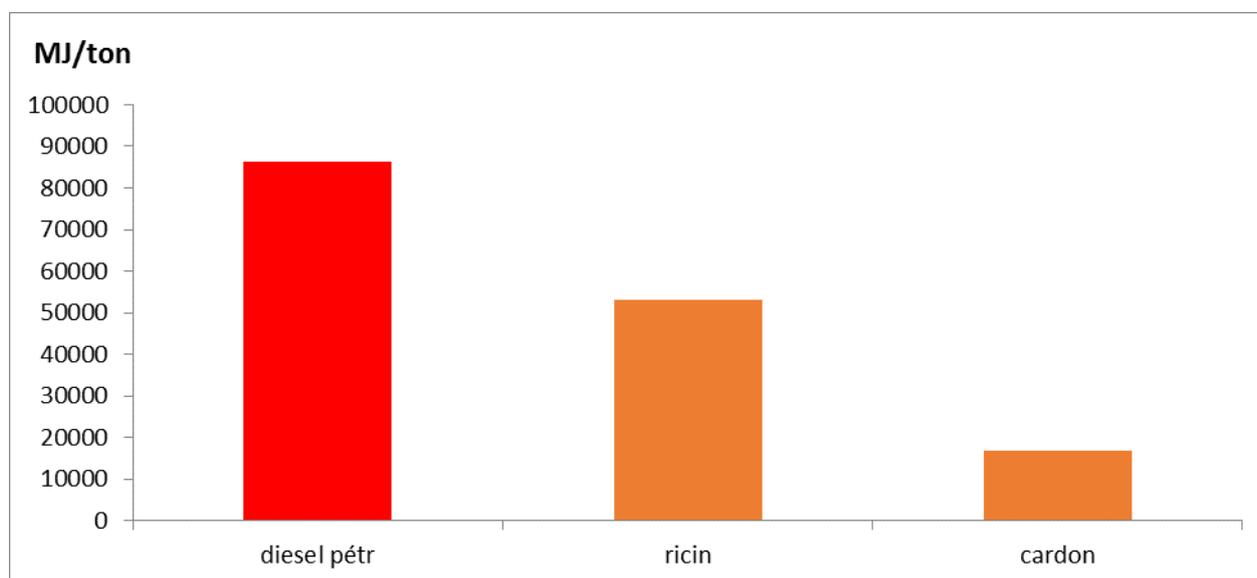
Les biocarburants permettent des réductions de consommation d'énergie non renouvelable et des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport aux carburants conventionnels pouvant aller jusqu' à 65% en moyenne pour les filières oléagineuses. Ces réductions sont présentées sur le tableau IV.11 dans le cas des filières du carbon et du ricin.

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

Le niveau exact de réduction est plus délicat à évaluer et dépend de différentes données modélisées. Les 3 paramètres pilotant ces niveaux restent le rendement à l'hectare, les apports d'engrais et émissions de N<sub>2</sub>O ainsi que l'intensité et les sources énergétiques du procédé de transformation.

**Tableau IV.11** : Comparaison des émissions de GES et consommations d'énergie entre les filières étudiées et la filière fossile

Filière étudiée	Catégorie d'impact	Consommation de L'énergie primaire non-renouvelable (MJ/ton)	Emissions (Kg éq de CO <sub>2</sub> /ton)
Diesel pétrolier		86366,59	2328,8
Biodiesel issu de l'huile de ricin		52985,64	1455,5
<b>Réduction</b>		63 %	60 %
Biodiesel issu de l'huile de cardon		16974,41	396,83
<b>Réduction</b>		80.35 %	82,95 %



**Figure IV.13** : Comparaison de la consommation de l'énergie entre les filières étudiées et la filière fossile (MJ/ton)

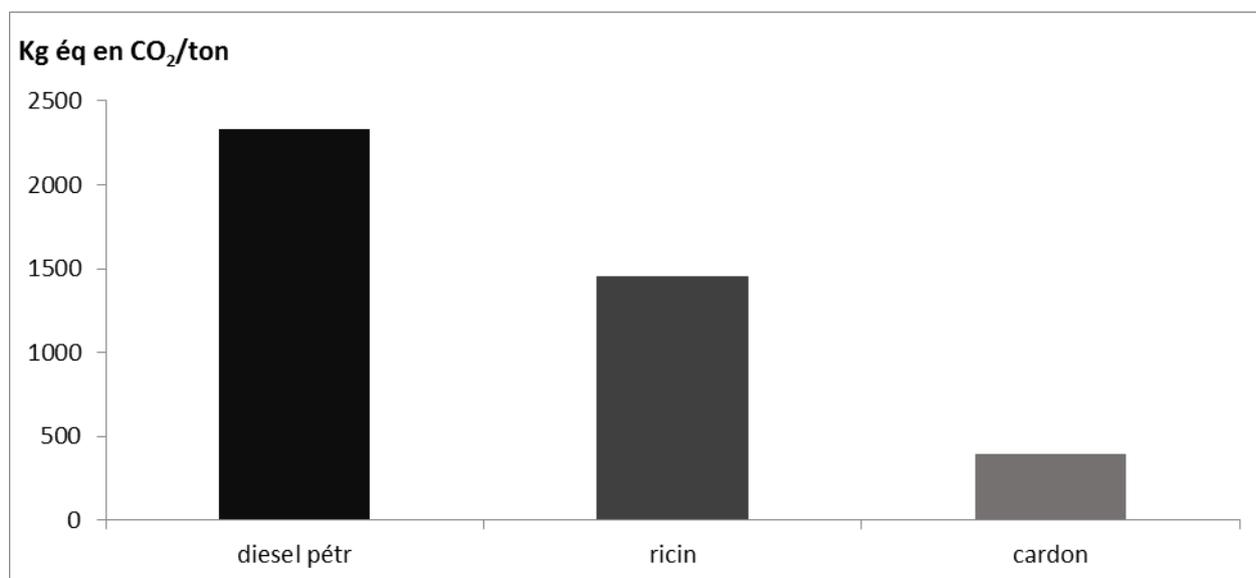


Figure IV.13 : Comparaison des émissions de GES entre les filières étudiées et la filière fossile (Kg eq en CO<sub>2</sub>/ton)

## IV.5.2. Comparaison de la contribution des phases des systèmes étudiés dans les catégories d'impact : changement climatique et consommation des énergies primaires :

### IV.5.2.1. Changement climatique :

La quantité de CO<sub>2</sub> équivalente émise a principalement lieu lors de la phase agricole pour la filière du cardon (80,87%). En revanche, c'est l'étape de la conversion de l'huile en biodiesel qui représente environ 55,54% des émissions dans le cas de la filière du ricin. Cette différence est due principalement à l'utilisation d'une grande quantité de l'éthanol dans le procédé de fabrication du biodiesel à partir de l'huile du ricin.

Tableau IV.12 : Niveaux d'émissions et étapes contributrices pour les deux filières cardon et ricin.

	cardon		ricin	
	Kg eq de CO <sub>2</sub>	% du total	Kg eq de CO <sub>2</sub>	% du total
<b>Total</b>	396,83	100	1455,48	100
<b>Phase agricole</b>	321,1	80,87	647,04	44,46
<b>conversion</b>	75,53	19,13	808,44	55,54

### IV.5.2.2. Consommation des énergies primaires :

Alors que la consommation d'énergie non renouvelable a principalement lieu lors de la phase agricole pour la filière du cardon (81,87%), c'est l'étape de la transformation industrielle qui représente environ 65% des consommations dans le cas de la filière du ricin. Les transports ont bien entendu une part variable de contribution à cet impact. Cette différence est due principalement à l'utilisation d'une grande quantité de l'éthanol dans le procédé de fabrication du biodiesel à partir de l'huile du ricin.

**Tableau IV.13** : Consommation d'énergie et étapes contributrices pour les deux filières cardon et ricin.

	cardon		ricin	
	MJ	% du total	MJ	% du total
<b>Total</b>	16974,41	100	52985,64	100
<b>Phase agricole</b>	13896,91	81,87	18400,53	34,73
<b>conversion</b>	3077,5	18,13	34585,11	65,27

# **Conclusion générale**

### **Conclusion Générale :**

Cette analyse du cycle de vie a été réalisée dans le but d'évaluer les impacts environnementaux éventuels des deux filières de la production du biodiesel à partir des huiles des deux espèces *Cynara cardunculus* et *Ricinus communis* L.

Le choix des espèces retenues 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 ces deux espèces. Elles sont non alimentaires 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. Elles doivent être en outre susceptibles d'être développées sur des terres marginales de manière à ne pas utiliser des terres à vocation agricole.

La filière du biodiesel est constituée de deux étapes essentielles à savoir la production de la matière première et sa conversion en biodiesel. D'après l'analyse du cycle de vie qui a été menée, l'étape qui contribue le plus aux scores des catégories d'impact changement climatique et consommation d'énergie primaire varie d'une espèce à une autre. Le bilan CO<sub>2</sub> est largement positif et le ratio (input/output) énergétique est supérieur à l'unité dans le cas du cardon et inférieur en ce qui concerne le ricin.

La contribution du biodiesel aussi minime soit-elle en tant que matière d'approvisionnement énergétique globale sera importante dans les prochaines décennies. En effet dans les conditions appropriées, la part du biodiesel croissante dans le bouquet énergétique pourrait contribuer à répondre aux besoins énergétiques importants et garantir la réduction des émissions des GES. Elle permettra ainsi d'assurer la sécurité énergétique en particulier dans les pays en voie de développement tout en favorisant un développement rural durable.

# **Recommendations**

### **Recommandations :**

La durabilité du biodiesel devrait être assurée par la mise en place d'un modèle de production local intégré adossé à la disponibilité d'une ressource et au réseau de distribution.

D'après l'analyse du cycle de vie, il faut s'assurer de la maîtrise du système cultural de production de la biomasse pour pouvoir améliorer la faisabilité et la durabilité de cette filière. Ces améliorations peuvent comporter les éléments suivants :

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 et particulièrement optimiser l'utilisation d'engrais azotés pour minimiser les émissions des NO<sub>x</sub> et de NH<sub>3</sub>. 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.

Toutes ces actions auraient des retombées positives sur les bilans énergétiques et sur les émissions des gaz à effet de serre.

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.

## [Recommandations]

---

L'utilisation d'un catalyseur alcalin au lieu d'un catalyseur acide dans la conversion de l'huile du ricin en biodiesel car ceci conduira à une utilisation moindre de la quantité d'éthanol et donc fera augmenter le EROI jusqu'à 2,06. Cependant, il faudra faire attention à la réaction de saponification qui diminue le rendement du biodiesel du fait de la très grande teneur en acides gras libres de l'huile du ricin.

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 biocarburants.

# **Bibliographie**

### 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.

## [Bibliographie]

---

- [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.

## [Bibliographie]

---

- [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.

## [Bibliographie]

---

- [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] American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Biodiesel Fuel (B100) Blend Stock for Distillate Fuels, Designation D6751-07 (2007).
- [47] 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. pp 52-63.
- [48] Javier Dufour, Jesús Arsuaga, Jovita Moreno and Hely Torrealba . Life cycle assessment of biodiesel production from cardoon (*Cynara cardunculus*) oil obtained under Spain conditions.
- [49] 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.

## [Bibliographie]

---

- [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] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org). « *Cynara cardunculus* ».
- [55] N. El Bassam (2010). Handbook of Bioenergy Crops. A Complete Reference to Species, Development and Applications. By Earthscan. 142p.
- [56] Dick L. Auld, Mauricio D. Zanotto, Thomas McKeon, Lohn B. Morris (2009). Handbook of plant breeding : Oil crops. Chapter 10 : Castor. Springer edition.
- [57] [www.bruno.ciccone.pagesperso-orange.fr](http://www.bruno.ciccone.pagesperso-orange.fr). « RICIN : *Ricinus communis* L ».
- [58] 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.
- [59] Amanda Mittra (2013). Encyclopedia of cultivated plants : From Acacia to Zinnia. Castor Bean.
- [60] T.K.Lim.(2012) Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants. Volume 2, fruits. Springer edition.
- [61] José M. Fernandez-Martinez, Leonardo Velasco. Technological Innovations in Major World Oil Crops, Volume 1. Springer edition.
- [62] Chauvet. M, J.S. Siemonsma (2007). Oléagineux. Ressources végétales de l'Afrique tropicale. Volume 14. Editeur : PROTA.
- [63] [www.wikipedia.fr](http://www.wikipedia.fr). « *Ricinus communis* ».
- [64] 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.

## [Bibliographie]

---

- [65] 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.
- [66] Comitre, V (1993). The question of energy and the technological standard of Brazilian agriculture. *Informações Econômicas* 12. pp 29-35.
- [67] Pellizzi, G (1992). Use of energy and labour in Italian agriculture. *Journal of Agricultural Engineering Research* 52. pp 111-119.
- [68] Pimentel, D (1980). *Handbook of energy utilization in agriculture*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- [69] Ulbanere, R.C, Ferreira, W.A (1989). Energy balance in corn production in the São Paulo State, Brazil. *Engenharia Agrícola* 4. pp 35-42.
- [70] 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).