

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 des diplômes

D'Ingénieur d'Etat et de Master en G.Chimique

Thème :

Analyse du cycle de vie d'un biodiesel de première génération à partir du tournesol

Dirigé par :

- Pr. AHMED ZAID Toudert
- Dr. MEFTI Afia

Réalisé par :

- Mr. BENATTIA Mohamed Amine
- Mr. AMARA Walid

Promotion : Juin 2013

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

Remerciements

Ce travail a été réalisé au département de Génie Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, sous la direction du Professeur T.AHMED ZAID et du Docteur A. MEFTI.

Nous leur exprimons toute notre gratitude pour nous avoir orientés et soutenus tout au long de ce travail.

Nous tenons à remercier le Professeur E. BENYOUSSEF, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

Nous sommes très reconnaissants en vers Mme S.HADDOUM, Docteur à l'ENP, ainsi qu'au Professeur A. SELATNIA, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous exprimons notre reconnaissance à Mr M.AMOURI pour nous avoir consacré du temps et pour son précieux aide.

Nous remercions l'ensemble du personnel de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger pour avoir fait de cette école une seconde maison : Aâmi Salah ainsi que l'ensemble du personnel des bibliothèques, du centre de calcul et de l'administration.

Enfin, un grand merci à nos familles et ami(e)s qui nous ont toujours encouragés et soutenus.

Dédicaces

À ma maman, source de sagesse et meilleur exemple pouvant être suivi pour achever un travail. Sans ton support ma mère je n'aurais jamais pu réussir ce travail !

À mon adorable Père, source de patience.

Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne.

À mes frères : Seif et Walid.

À toutes ma famille.

À tous mes amis et camarades.

À ma fiancée Hana pour son amour et son soutien ainsi qu'à toute sa famille, en particulier le petit Kouki.

Je dédie ce travail

...MOHAMED AMINE...

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma famille et plus particulièrement à mes parents, sans qui je ne serai jamais arrivée là où je suis aujourd'hui.

A ma grand mère qui ma soutenu ;

A ma petite sœur qui ma supporté ;

Je dédie ce travail particulièrement a un grand homme qui était mon ami et mon conseillé, mon grand père que dieu ai son âme.

A mes oncles, tantes, cousins et cousines.

Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation.

A mes amis et camarades.

Je dédie ce travail

...WALID...

الخلاصة : تتمثل هذه الأطروحة في عملية التنمية المستدامة مع تحديد الدعامة البيئية في القرار أو إختيار التكنولوجيات . طريقة تقييم دورة الحياة، على نحو متزايد لا غنى عنه، هو في تصميم هذا العمل. و قد تم تطبيق ذلك في مجال محاصيل الطاقة. في الواقع، نظر الإنخفاض من الوقود الأحفوري، و زيادة إنبعاثات الغازات الدفيئة. تحليل دورة الحياة كان جيد مع مساعدة برنامج (سيما برو 7.1.8) من أجل تقييم الأثار المحتملة لإنتاج وقود الديزل الحيوي من عباد الشمس. الكلمات المفتاحية : تحليل دورة الحياة، وقود الديزل الحيوي، عباد الشمس، سيما برو.

Résumé : Ce mémoire s'inscrit dans la démarche du développement durable avec la mise en évidence du pilier environnemental dans la prise de décision ou encore dans le choix de technologies. La méthode de l'Analyse du Cycle de Vie, de plus en plus incontournable, est au cœur de ce travail. Elle a été appliquée au domaine des cultures énergétiques. En effet, au vu de la diminution des ressources fossiles et de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Cette analyse du cycle de vie a été ainsi réalisé a l'aide d'un logiciel (Sima Pro 7.1.8) dans le but d'évaluer les impacts éventuels de la production de Biodiesel à partir du TOURNESOL.

Mots clés : Analyse de cycle de vie, Biodiesel, Tournesol, Sima Pro.

Abstract : This thesis is in the process of sustainable development with the identification of the environmental pillar in the decision or in the choice of technologies. The method of Life Cycle Assessment, increasingly indispensable, is at the heart of this work. It has been applied to the field of energy crops. Indeed, given the decline of fossil fuels and increasing greenhouse gas emissions. This analysis of the life cycle was well done with the help of software (Sima Pro 7.1.8) in order to assess the potential impacts of the production of biodiesel from SUNFLOWER.

Key words : Analysis of the life cycle, Biodiesel, Sunflower, Sima Pro.

Table des figures

Figure I.1	: Étapes comprises dans l'Analyse du Cycle de vie.....	16
Figure I.2	: Cadre de l'Analyse du Cycle de Vie.....	18
Figure I.3	: Schéma de collecte de données.....	21
Figure I.4	: Cascade d'effets partielle du SO_2	29
Figure I.5	: Catégorie d'impact et mécanisme environnemental.....	33
Figure II.1	: La distribution des sources MEAG dans le monde.....	47
Figure II.2	: Les huiles végétales, la source majeure de la production du biodiesel (La production globale du biodiesel par source).....	48
Figure II.3	: Réaction générale de la transestérification.....	51
Figure II.4	: Réaction de transestérification des triglycérides avec l'alcool.....	52
Figure II.5	: Réactions successives de la transestérification.....	53
Figure II.6	: Mécanisme de la réaction de transestérification d'huile végétale par le méthanol catalysée par une base.....	54
Figure III.1	: Réduction des émissions en polluants pour B100 et B20.....	65
Figure III.2	: La consommation en pétrole de quelque pays dans le monde.....	67
Figure IV.1	: Tournesol.....	71
Figure IV.1	: Quelques stades repères du tournesol.....	72
Figure IV.3	: Préparation du sol.....	75
Figure IV.4	: Stratégie de sarclage.....	78
Figure IV.5	: Maladies.....	81
Figure IV-6	: Composition de la graine de tournesol.....	84
Figure V.1	: Les différents processus de production du biodiesel de Tournesol.....	91
Figure V.2	: Arborescence de processus élémentaire pour l'analyse du cycle de vie du biodiesel de Tournesol.....	94
Figure V.3	: Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (kg CO_2eq).....	97
Figure V.4	: Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (%)......	97
Figure V.5	: Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique (MJ).....	99
Figure V.6	: Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique (%)......	99
Figure V.7	: Contribution des étapes de Production pour les Différentes Catégories d'impact intermédiaires.....	100
Figure V.8	: Contribution des étapes de production sur les différentes catégories de dommages.....	102

Figure V.9	: Contribution des différents intrants sur la santé humaine.....	103
Figure V.10	: Contribution des différents intrants sur la qualité des écosystèmes....	103
Figure V.11	: Contribution des différents intrants sur le changement climatique.....	104
Figure V.12	: Contribution des différents intrants sur l'utilisation des ressources.....	104

Liste des tableaux

Tableau I.1	: Catégories d'impact couramment utilisées en évaluation d'impact de cycle de vie	25
Tableau I.2	: Principaux contributeurs recensés aux catégories d'impact	31
Tableau I.3	: Catégories prises en compte par la méthode Impact 2002+ groupées par dommage	37
Tableau II.1	: La composition en acide gras du biodiesel préparé à partir de graisses animales (% du poids total)	48
Tableau II.2	: Comparaison des rendements en huile entre les microalgues et les cultures communes pour la production du biodiesel.....	49
Tableau II.3	: Rendements des Microalgues.....	50
Tableau II.4	: Les propriétés physico-physiques des huiles végétales alimentaires...	51
Tableau II.5	: Standards ASTM D6751 du Biodiesel (USA).....	57
Tableau II.6	: Standards du Biodiesel EN 14214 (Europe).....	58
Tableau III.1	: La biodégradabilité du pétrole et les biocarburants.....	64
Tableau III.2	: Coefficient énergétiques des intrants agricoles.....	64
Tableau III.3	: Différentes substances toxiques rencontrées dans les espèces oléagineuses non alimentaires.....	68
Tableau IV.1	: Sols.....	73
Tableau IV.2	: Préparation du sol.....	75
Tableau IV.3	: Semis.....	76
Tableau IV.4	: Comparaison Sarclouse à soc et sarclouse étoile dans le tournesol.....	78
Tableau IV.5	: Humidité du grain et récolte.....	80
Tableau IV.6	: Composition nutritive de la graine de tournesol	83
Tableau V.1	: Inventaire du cycle de vie de la production de 880 L de biodiesel du Tournesol conduite en sec.....	93
Tableau V.2	: Les émissions en CO ₂ en kg CO ₂ eq	96
Tableau V.3	: Résultats du bilan énergétique (MJ).....	98
Tableau V.4	: Caractérisation intermédiaire	100
Tableau V.5	: Etude de dommage	102

Abréviations

ACV	: Analyse du Cycle de Vie
AEAG	: Alkyl Esters d'Acides Gras
ASTM	: American Society of Test and Materials
B100	: Biodiesel a 100%
EROI	: Energy Return on Investment
GES	: Gaz à Effet de Serre
IC	: Indice de Cétane
ID	: Ignition Delay (délai d'auto-inflammation)
ISO	: Indice de Stabilité Oxydative
Mb/j	: Million de baril par jour
TAG	: Triglycéride
ILCD	: International Reference Life Cycle Data System
SETAC	: Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale
SPOLD	: Society for the Promotion of Life Cycle Development
COv	: Composé organique volatil
NOx	: Oxydes d'azote
PAN	: Nitrate de peroxyacétyle
CFC	: Chloro Fluoro Carbures
WCO	: Waste cooking oil

Table des matières

Table des figures.....	5
Liste des tableaux.....	7
Introduction Générale.....	12
Chapitre I : Méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie.....	15
I.1 Introduction.....	16
I.2 Définition.....	16
I.3 Historique.....	17
I.4 Harmonisation et étapes d'une ACV.....	18
I.4.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude.....	19
I.4.2 Inventaire du cycle de vie.....	20
I.4.2.1 Qualité des données.....	21
I.4.2.2 Les allocations.....	21
I.4.3 Évaluation de l'impact.....	22
I.4.3.1 Sélection des catégories d'impact.....	23
I.4.3.2 Classification des résultats de l'inventaire.....	29
I.4.3.3 Sélection des catégories d'impact.....	32
I.4.3.4 Étapes optionnelles de l'évaluation de l'impact.....	35
I.4.4 Méthodes courantes d'évaluation de l'impact.....	36
I.4.4.1 Impact 2002+.....	36
I.4.5 ACV attributive et conséquentielle.....	39
I.5 Limitations de l'Analyse du Cycle de Vie.....	39
I.6 Conclusion.....	40
Chapitre II : Biodiesel.....	41
II.1 Introduction.....	42
II.2 Historique et Définition.....	42
II.2.1 Historique.....	42
II.2.2 Définition.....	44
II.2.2.1 1ère génération.....	44
II.2.2.2 2ème génération.....	45
II.2.2.3 3ème génération.....	45
II.3 Les sources du Biodiesel.....	46
II.3.1 Les huiles végétales et graisses animales comme source de biodiesel.....	47
II.3.2 Les huiles usagées.....	48
II.3.3 Les microalgues.....	49
II.3.4 Les lipides d'origine microbienne.....	50
II.3.5 Biodiesel à partir de résidus agricoles.....	50
II.4 Les huiles végétales naturelles (pures) comme carburants.....	50
II.5 Transésterification des huiles végétales.....	51
II.5.1 Réaction de transestérification des huiles.....	52
II.5.1.1 Historique.....	52

II.5.1.2 Mécanisme de la réaction.....	52
II.5.1.3 Paramètres importants de la réaction de transestérification des huiles....	54
II.5.1.3.1 Les types de catalyseurs.....	54
II.6 Les caractéristiques techniques du Biodiesel (MEAG).....	57
II.7 Avantages et inconvénients du Biodiesel.....	58
II.7.1 Disponibilité et renouvellement de biodiesel.....	59
II.7.2 L'efficacité de combustion plus élevée de biodiesel.....	59
II.7.3 Une diminution des émissions par l'utilisation du biodiesel.....	59
II.8 Conclusion.....	60
Chapitre III : Impact d'une Filière de Biodiesel.....	61
III.1 Introduction.....	62
III.2 Aspects écologiques.....	62
III.2.1 Protection du sol contre l'Erosion.....	62
III.2.1.1 Erosion hydrique.....	62
III.2.1.2 Erosion éolienne.....	62
III.2.2 Amélioration de la fertilité du sol.....	62
III.2.3 Séquestration de carbone.....	63
III.2.4 Fixation d'azote.....	63
III.2.5 Biodiesel et la biodiversité.....	63
III.2.6 Biodégradabilité du Biodiesel.....	64
III.2.7 Bilan énergétique.....	64
III.2.8 Réduction des émissions des GES.....	65
III.3 Les impacts socio-économiques.....	65
III.3.1 Le développement rural.....	65
III.3.2 Disponibilité des terres.....	66
III.3.3 Ressources en eau.....	66
III.3.4 Sécurité énergétique.....	66
III.3.5 Toxicité.....	67
III.4 Conclusion.....	68
Chapitre IV : Le Tournesol.....	69
IV.1 Introduction.....	70
IV.2 Description générale, culture et utilisation.....	70
IV.3 Centre d'origine de l'espèce.....	71
IV.4 Classification classique.....	71
IV.5 Caractères généraux de la plante.....	72
IV.5.1 Sol et Climat.....	73
IV.5.1.1 Sols.....	73
IV.5.1.2 Erosion.....	73
IV.5.1.3 Climat.....	73
IV.5.2 Variétés.....	74
IV.5.3 Exigences.....	74
IV.5.3.1 Température.....	74
IV.5.3.2 Sol.....	74
IV.5.3.3 Eau.....	74
IV.5.4 Préparation du sol.....	74
IV.5.4.1 Labour.....	75
IV.5.4.2 Reprise du labour.....	75
IV.5.4.3 Façons superficielles.....	76

IV.5.4.4 Fumure de fond.....	76
IV.5.5 Semis.....	76
IV.5.6 Le cycle du tournesol.....	76
IV.5.7 Roulage.....	77
IV.5.8 Désherbage.....	77
IV.5.9 Fertilité.....	79
IV.5.9.1 Binage.....	79
IV.5.10 Rotation.....	79
IV.5.11 Récolte.....	79
IV.5.12 Battage.....	80
IV.6 Contrôle des maladies et ravageur.....	80
IV.7 La résistance à la sécheresse.....	83
IV.8 Composition de la graine de tournesol.....	83
IV.9 Huile de tournesol.....	83
IV.10 Caractéristiques de l'huile de tournesol.....	85
IV.10.1 Caractéristiques chimiques.....	85
IV.10.2 Caractéristiques physiques.....	85
IV.10.3 Usage alimentaire.....	85
IV.10.4 Usage non alimentaire.....	86
IV.10.4.1 Utilisation de l'huile de tournesol dans les moteurs diesel.....	86
IV.11 Conclusion.....	87
Chapitre V : Analyse du Cycle de Vie	88
V.1 Introduction.....	89
V.2 Unité fonctionnelle et hypothèse retenue.....	89
V.2.1 Choix de l'espèce.....	89
V.2.2 Les conditions de production (hypothèses adoptées)	90
V.3 Définition et modélisation du système de production.....	90
V.4 Limite du système.....	92
V.5 Inventaire.....	92
V.6 Résultats et discussion.....	95
V.6.1 Bilan de CO ₂ en kg CO ₂ eq.....	95
V.6.2 Bilan énergétique.....	97
V.6.3 Etude d'impact.....	99
V.6.3.1 Caractérisation intermédiaire.....	99
V.6.3.2 Caractérisation des dommages.....	101
V.7 Conclusion.....	105
Conclusion générale.....	106
Recommandations.....	108
Bibliographie.....	111

Introduction générale

Les énergies d'origine fossile assurant actuellement plus de 80% de la demande mondiale, il s'agit principalement du pétrole, du charbon, du gaz naturel qui n'est malheureusement pas renouvelables.

Cette dépendance ne cesse de susciter l'inquiétude sur le devenir de l'humanité.

Depuis quelques années une prise de conscience s'est installée quant aux conséquences irréversibles que peut causer l'utilisation excessive de cette énergie.

Les effets sur l'environnement, le climat contribuent actuellement à un réchauffement évident dû essentiellement aux émissions de gaz à effet de serre (G.E.S) conduisant à des dysfonctionnements des écosystèmes de la biosphère (augmentation de la température, sécheresse, inondations...),

Ces phénomènes peuvent être également à l'origine d'accidents (transport, centrales nucléaires.....).

Tous ces facteurs montrent à quel point il est nécessaire de chercher d'autres solutions énergétiques alternatives et durables.

Il est bien évident que les biocarburants ne pourront pas substituer totalement les carburants d'origine fossile, néanmoins, ils peuvent jouer un rôle important dans l'auto-suffisance des régions et zones désenclavées et isolées et dans des applications amplement justifiées (secteurs prioritaires tels que l'agriculture, la santé et la protection civile (ambulances...)).

Le secteur des transports qui nécessite des besoins très importants ne sera pas couvert entièrement par les biocarburants. Il est évident pour nous que la substitution des carburants fossiles dans le secteur des transports doit être totalement repensée pour s'adapter aux contraintes futures.

Le biodiesel est présenté aujourd'hui comme un carburant alternatif surtout pour le secteur des transports eu égard à ses caractéristiques comparables à celles du carburant conventionnel. Son utilisation en mélange avec le diesel pétrolier permet d'économiser des ressources non renouvelables tout en apportant des avantages environnementaux.

Parmi ces avantages, c'est un carburant renouvelable, non toxique, biodégradable et avec une excellente lubricité et un bilan de carbone théoriquement nul.

La disponibilité de la matière première, associée aux incitations des pouvoirs publics fait que les coûts assurent au biodiesel une compétitivité par rapport au pétro - diesel.

Néanmoins, il y a lieu de signaler que de nombreuses études montrent que l'utilisation massive des biocarburants pour répondre aux besoins du secteur des transports est une option dépassée et ce pour de nombreuses raisons, surfaces à cultiver non disponibles en quantité,

concurrences avec les cultures alimentaires avec des pressions sur les surfaces arables à vocation agricole, etc.

Il est à espérer que l'utilisation du biodiesel sera préférentiellement orientée vers des secteurs prioritaires, il sera alors possible de développer, à l'échelle locale des cultures destinées à la production du biodiesel pour développer une agriculture moderne, mécanisée et prospère.

Le travail envisagé dans ce mémoire comportera cinq chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à la méthodologie d'analyse du cycle de vie.
- Le deuxième chapitre nous donne un aperçu sur le biodiesel, ses caractéristiques, et les principales sources de matières premières nécessaires à sa fabrication.
- Le troisième chapitre sera consacré à l'étude d'impact d'une filière biodiesel.
- Le quatrième chapitre traitera de la plante tournesol utilisé comme ingrédient de base dans la fabrication du biodiesel.
- Le cinquième chapitre sera consacré à une analyse du cycle de vie du biodiesel produit à partir du *Tournesol* permettant de proposer une modélisation d'une filière de production de biodiesel qui doit toujours prendre en compte des considérations technico-économiques, sociales et environnementales dans une perspective de développement durable.

Le choix du tournesol, culture alimentaire par excellence est surtout motivé par la disponibilité des données d'entrée pour simuler une filière de bioénergie et pour nous initier à la technique de l'analyse du cycle de vie et à la maîtrise du logiciel Sima pro.

Chapitre I

Méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie

*La méthode, c'est le chemin
Une fois qu'on l'a parcouru
Marcel Granet*

1.1 Introduction

Le passage de la société vers un développement durable demande d'avoir une vision plus globale sur les processus économiques, notamment lorsque les solutions environnementales mises de l'avant impliquent un simple transfert de pollution.

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

1.2 Définition

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode standardisée par les normes ISO 14040 [INT, 06a] et 14044 [INT, 06b]. Elle traite des aspects et des impacts environnementaux potentiels tout au long du cycle de vie d'un produit. Ce cycle démarre à l'acquisition des matières premières et se termine par la fin de vie en passant par les étapes de production, d'utilisation, de transport et de fin de vie comme présenté à la Figure I-1. Le terme « produit » peut définir à la fois un produit au sens physique mais également un procédé ou un service [CUR, 06 ; INT, 06a]. Cette méthode peut être assimilée à une approche du berceau à la tombe [ROS, 05].

La méthode de l'ACV permet de mettre en évidence l'impact environnemental d'étapes qui ne sont généralement pas prises en compte dans les études traditionnelles, à savoir l'extraction des matières premières, le transport ou encore la fin de vie. Elle ne se limite pas uniquement à l'étape d'utilisation des produits finis. Cela permet une vision plus précise des transferts de pollution entre les diverses étapes du cycle ainsi que l'impact global d'un produit, d'un procédé ou d'un service [ROS, 05 ; CUR, 06].

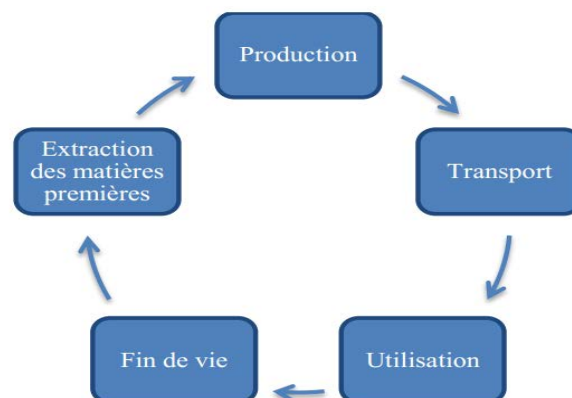


Figure I-1 : Étapes comprises dans l'Analyse du Cycle de vie [CUR, 06 ; INT, 06a].

Les normes ISO donnent les lignes directrices à suivre pour réaliser une ACV. Un guide de référence, le International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook, contenant une série de documents techniques a également été créé par le Centre de Recherche Commun de la Commission Européenne, en collaboration avec la DG Environnement. Ce guide explique plus en détail comment analyser le cycle de vie des produits et fait partie du programme de promotion de la consommation et de la production durables de la Commission Européenne [EUR, 10]. Quatre étapes, contenant chacune des éléments obligatoires, participent successivement, à la réalisation de l'Analyse du Cycle de Vie. Il s'agit de la description des objectifs et du champ de l'étude, de la réalisation de l'inventaire, de l'évaluation de l'impact et finalement de l'interprétation des résultats [ROU, 05 ; INT, 06a]. Ces différentes étapes vont être explicitées en détails dans le volet « 4. *Harmonisation et étapes d'une ACV* ».

La méthode de l'Analyse du Cycle de Vie a, au départ, été conçue pour permettre la distinction d'un point de vue environnemental entre divers produits, services ou procédés. Au fil des années, diverses applications de cette méthode ont vu le jour comme son utilisation pour le développement et l'amélioration d'un produit, le développement d'une stratégie interne ainsi qu'un support politique, l'utilisation comme outil de marketing ou encore pour la préparation de politique dans les domaines de l'éco-labelling ou de la gestion des déchets [AST et al., 97 ; ROU, 05].

1.3 Historique

La première étude d'Analyse du Cycle de Vie connue a été réalisée par Coca-Cola en 1969 pour déterminer l'intérêt ou non de fabriquer des cannettes métalliques d'un point de vue environnemental [BAU et al., 04a ; CUR, 06]. Le début des études ACV date donc de la fin des années 1960 et du début des années 1970 où les préoccupations étaient relatives à la consommation d'énergie et de matières premières ainsi que du traitement des déchets. Les premières études ACV étaient dès lors en relation avec ces thématiques [AST et al., 97 ; BAU et al., 04a].

Au cours des années 1970 et 1980, le recours à l'Analyse du Cycle de Vie est resté limité en raison de la méconnaissance de la méthode. Son utilisation est restée confinée aux producteurs d'emballage ainsi qu'aux politiciens responsables de la gestion des déchets. À cause de la crise énergétique de 1973, l'énergie était le point d'intérêt principal de ces études [AST et al., 97 ; BAU et al., 04a].

L'environnement et les conséquences des actions de l'homme sur ce dernier vont connaître un intérêt grandissant dans les années 1980 suite à des catastrophes chimiques comme l'accident de Bhopal en 1984 ou encore l'explosion nucléaire à Tchernobyl en 1986. Dès lors, la méthode de l'ACV restée relativement dans l'ombre jusqu'alors va susciter un regain d'intérêt, surtout pour le domaine de l'emballage [BAU et al., 04a]. Cependant, l'ACV aboutissant à des résultats différents pour les mêmes produits est soumise à controverse et entraîne de nombreux débats [AST et al., 97 ; BAU et al., 04a].

Dans les années 1990, la méthode de l'Analyse du Cycle de Vie va connaître une époque d'harmonisation où les différentes expériences et les acquis obtenus durant les deux dernières décennies vont être mis en commun. La Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale (SETAC) prend en main l'organisation de conférences et de groupes de travail pour l'amélioration de la méthode. Une société est également créée en 1992 (SPOLD : Society for the Promotion of Life Cycle Development) pour le développement de bases de données publiques et accessibles. Un code de conduite est publié en 1993 afin d'obtenir une harmonisation dans les étapes nécessaires à une telle étude. Des normes ISO sont ensuite développées afin de montrer le chemin pour réaliser une ACV [BAU et al., 04a]. Loin de résoudre tous les problèmes, mais donnant des pistes d'amélioration, les normes européennes ont été créées en 1998 et remises à jour en 2006. La norme ISO 14040 [INT, 06a] définit les principes et le cadre de l'Analyse du Cycle de Vie, tandis que la norme 14044 [INT, 06b] regroupe le contenu technique nécessaire au bon déroulement d'une ACV. Ces normes restent malgré tout peu précises sur la manière dont doit se dérouler une ACV. Afin de guider au mieux le praticien et donc d'assurer une plus grande cohérence entre les résultats obtenus pour une même étude, la Commission Européenne a développé le manuel ILCD décrivant en détail la méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie [EUR, 10] ou encore donnant des recommandations quant à l'application des méthodes d'évaluation de l'impact [EUR, 11].

1.4 Harmonisation et étapes d'une ACV

Les travaux d'harmonisation ayant abouti à la norme ISO 14040 [INT, 06a] ont structuré la réalisation d'une ACV en 4 étapes ou phases obligatoires : la phase de définition des objectifs et du champ de l'étude, la phase d'inventaire, la phase d'évaluation de l'impact et la phase d'interprétation des résultats (cf. Figure I-2). Toutes ces étapes sont interdépendantes. Le processus est itératif : des modifications peuvent être réalisées au cours du temps afin d'obtenir une cohérence entre les différentes étapes. Les détails de la réalisation de ces différentes étapes sont présentés dans le guide ILCD de la Commission Européenne [EUR, 10].

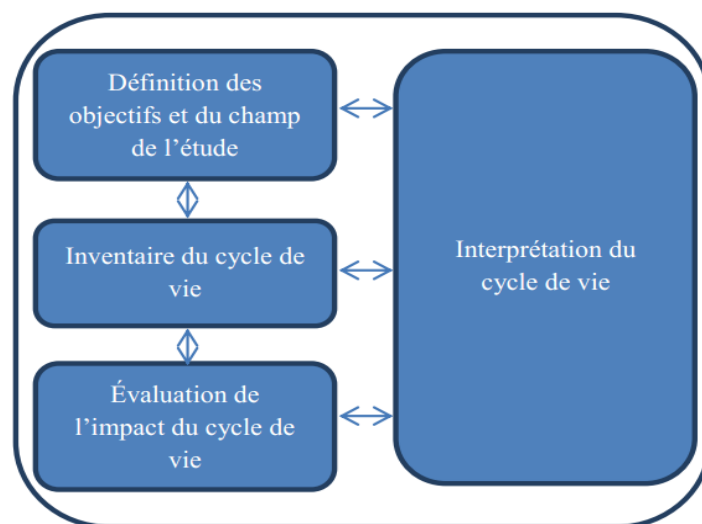


Figure I-2 : Cadre de l'Analyse du Cycle de Vie [INT, 06a].

1.4.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude

La norme ISO 14040 [INT, 06b] établit que les objectifs et le champ de l'étude doivent être clairement définis et cohérents avec l'application envisagée des résultats de l'étude. Cette étape est essentielle pour la suite de la réalisation, définissant le cadre appliqué.

Les objectifs doivent indiquer l'application envisagée suite à l'ACV, les raisons conduisant à réaliser l'étude ainsi que le public concerné. Le but de l'étude doit donc être défini de manière précise et ne pas se limiter à vouloir connaître les forces ou les faiblesses d'un produit. La précision est nécessaire pour effectuer les bons choix méthodologiques par la suite. Le but peut être exprimé par une question comme par exemple : « Quelles sont les possibilités d'amélioration dans le cycle de vie du produit étudié? », « Quelles sont les activités du cycle de vie qui contribuent le plus à l'impact environnemental du produit étudié ? », etc. [BAU et al., 04a ; CUR, 06 ; INT, 06b]. Lors de l'étape de définition des objectifs de l'étude, le guide ILCD distingue les contextes de décision qui doivent être différenciés d'une étude à l'autre. Les types d'ACV sont discriminés en fonction de l'application qui est attribuée aux résultats, à savoir la prise de décision suite aux résultats ou non. Trois situations apparaissent :

- La situation A : elle concerne la prise de décision qui engendre de faibles modifications ; il s'agit généralement de questions relatives à des produits.
- La situation B : elle concerne la prise de décision à des niveaux stratégiques engendrant des conséquences à grande échelle, entraînant des modifications de capacité de production.
- La situation C : il s'agit d'une étude purement descriptive sans prise en compte des conséquences potentielles sur d'autres secteurs de l'économie.

Les deux premières situations (A et B) utilisent l'approche conséquentielle tandis que l'approche attributive est employée pour la situation C [EUR, 10].

Le champ de l'étude doit décrire clairement des éléments tels que le système de produits à étudier, la fonction, l'unité fonctionnelle, les frontières, les règles d'allocation, la méthodologie, etc. Ces éléments sont repris successivement ci-dessous.

Le système étudié doit mentionner les différentes étapes pour la réalisation d'un produit depuis le berceau jusqu'à la tombe. Il doit rassembler les différentes étapes décrites à la Figure I-1. En fonction des études et de la situation envisagée (A, B ou C), les étapes prises en compte peuvent varier. Il s'agit dès lors de définir les frontières du système. Ces dernières déterminent les processus élémentaires qui sont pris en compte dans l'étude. Un processus élémentaire définit une étape du cycle de vie pour laquelle les données d'entrant et de sortant sont quantifiées, comme présenté à la Figure I-3. Le système étudié regroupe donc un ensemble de procédés élémentaires. Ce choix doit se faire en respect des objectifs de l'étude et les critères d'exclusion ou d'inclusion des étapes doivent être mentionnés. Les frontières

doivent être définies selon différentes dimensions à savoir spatiale, temporelle, et technique [BAU et al., 04a ; INT, 06b].

Le champ de l'étude doit mentionner spécifiquement les caractéristiques de performance, à savoir les fonctions, du système étudié. Ce paramètre constitue également une condition pour la comparaison de deux analyses du cycle de vie. Les systèmes étudiés doivent permettre la même performance, c'est-à-dire réaliser la même fonction et être basés sur la même unité fonctionnelle. Une unité fonctionnelle est définie comme l'unité de référence à laquelle les flux inclus dans les procédés doivent être reliés. Elle permet de normaliser les calculs ainsi que les bilans de matière et d'énergie réalisés [BAU et al., 04a ; INT, 06b].

À la suite de cette étape et de l'inventaire du cycle de vie, l'évaluation environnementale va avoir lieu. Pour ce faire, le choix d'une méthode devra être réalisé, ce qui doit déjà être mentionné à ce stade de l'étude. Les normes ISO ne spécifient pas de méthode d'évaluation d'impact universelle mais demande une justification de son utilisation ainsi que sa reconnaissance par le monde scientifique. Le guide de la Commission européenne fournit, quant à lui, des recommandations quant à l'utilisation des méthodes d'évaluation des impacts en fonction des catégories envisagées [EUR, 11].

1.4.2 Inventaire du cycle de vie

Suite à la définition des objectifs et du champ de l'étude, les frontières du système sont connues ainsi que les données à collecter. Il s'agit de l'étape qui consomme le plus de temps car elle demande la collecte de tous les flux pertinents d'un point de vue environnemental, intervenant dans le système étudié, préalablement découpé en processus élémentaires. La Figure I-3 présente un schéma de cette étape. L'inventaire consiste donc en la réalisation des bilans de matière et d'énergie de tous les flux entrant et sortant pour chaque processus élémentaire.

Les modèles utilisés pour réaliser l'inventaire sont statiques et linéaires, ne prenant pas en compte le temps comme variable. La modélisation de l'inventaire regroupe comme étapes tout d'abord la construction d'un schéma de procédé en accord avec les frontières du système, ensuite la collecte de toutes les données pour chaque activité comprise dans le système et finalement le calcul des charges environnementales en relation avec l'unité fonctionnelle [BEN, 09].

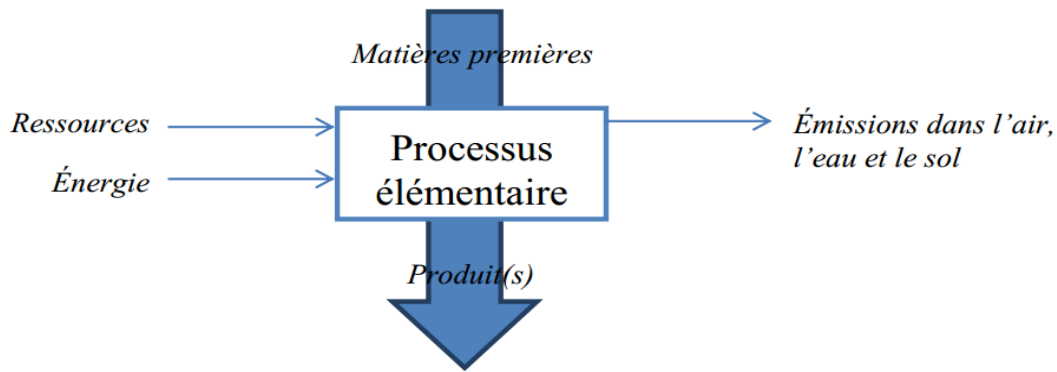


Figure I-3 : Schéma de collecte de données [BEN, 09].

Certains éléments peuvent être décrits plus en détail comme la qualité des données ou encore l'utilisation d'allocation lorsque plusieurs coproduits entrent en jeu dans le système étudié.

1.4.2.1 Qualité des données

Un élément essentiel pour obtenir des résultats fiables est de travailler avec des données de qualité. Plusieurs critères entrent en ligne de compte pour évaluer la qualité des données [BAU et al., 04b ; EUR, 11]. Il peut s'agir de la pertinence (temps, géographie, technologie, complétude, représentativité), de la fiabilité (précision) ou encore de la reproductibilité.

1.4.2.2 Les allocations

Dans un système étudié, un procédé peut aboutir non seulement au produit voulu mais également à d'autres coproduits à prendre en compte. Il s'agit donc de résoudre le problème des allocations, c'est-à-dire, in fine, la répartition de l'impact environnemental. Trois types de scénarios imposent ce genre de problème. Tout d'abord, il peut s'agir de procédés engendrant de nombreux coproduits entre lesquels il faut répartir les différentes émissions et consommations. Une deuxième possibilité concerne la modélisation de traitement de déchets où plusieurs produits entrent dans le procédé et auxquels il faut associer les fardeaux obtenus suite à leur traitement. Le dernier cas est relatif au recyclage en boucle ouverte où un produit est recyclé en un autre produit [BAU et al., 04b ; EUR, 10].

Un niveau de détail plus important permet parfois d'éviter ce problème mais il impose une plus grande investigation des données. Deux autres chemins pour résoudre ce souci sont le partitionnement ou l'expansion du système [BAU et al., 04b ; EUR, 10].

Le partitionnement consiste en la division des émissions et des ressources consommées entre les différents produits. Cela s'applique plus facilement à une analyse de type attributive, c'est-à-dire analysant une situation donnée, figée dans le temps. Pour une analyse conséquentielle (situation A ou B), c'est-à-dire évaluant l'impact de toute décision sur l'économie globale, l'expansion du système est plus adéquate. Cette dernière consiste à dire que le fait d'obtenir un coproduit permet d'éviter de le produire de la manière traditionnelle et

donc de créditer le système de ce gain environnemental en utilisant des données moyennes ou spécifiques du marché en fonction de la situation étudiée [BAU et al., 04b ; EUR, 10].

Les normes ISO ne reconnaissent pas de dépendance entre le type d'allocation et le but poursuivi par l'ACV (attributive ou conséquentielle) [INT, 06a ; INT, 06b]. En effet, les règles reprises dans les normes proposent par ordre de priorité :

- l'augmentation du niveau de détail du modèle ;
- l'expansion du système ;
- la répartition des fardeaux environnementaux en fonction de relations de causalité physiques;
- lorsqu'une relation physique ne peut être trouvée, la répartition peut se baser sur d'autres relations telles que la valeur économique des produits.

Le guide de l'Union Européenne émet des recommandations quant à l'utilisation de l'expansion du système ou des allocations en fonction de la situation étudiée [EUR, 10].

1.4.3 Évaluation de l'impact

Au terme de l'inventaire du cycle de vie, le praticien de l'ACV dispose d'une quantification de l'ensemble des flux, émissions et consommations, du système étudié. Le rôle essentiel de l'évaluation de l'impact du cycle de vie est de traduire ces flux, dont le nombre peut atteindre plusieurs centaines, en un nombre restreint d'indicateurs, afin d'en faciliter la compréhension et l'analyse.

La norme ISO 14044/2006 définit, au cours de cette phase, différentes étapes successives, dont la définition bénéficie d'un large consensus au sein de la communauté scientifique [AFN, 06 ; MAR, 06 ; JER et al., 01 ; ALL et al., 97 ; HEL, 99 ; PEN et al., 04 ; ROS, 98 ; KHA, 99 ; UNI, 03]. Trois de ces étapes sont considérées comme obligatoires :

- La sélection des catégories d'impact : il s'agit de choisir, en accord avec l'objectif et le champ de l'étude définis, les catégories, et éventuellement sous-catégories, d'impact considérées, les indicateurs d'impact associés et les modèles de caractérisation de ces indicateurs ; les détails de cette étape seront exposés à la section I.4.3.1,
- la classification : lors de cette étape, les différents résultats de l'inventaire de cycle de vie sont assignés aux catégories d'impact définis précédemment ; cette étape sera abordée plus précisément à la section I.4.3.2, et
- la caractérisation : le résultat de chacun des indicateurs est calculé en accord avec le modèle de caractérisation choisi et les flux d'inventaire retenus ; les enjeux relatifs à cette étape seront présentés à la section I.4.3.3.

Puis, ce travail peut être complété par, essentiellement, trois étapes considérées comme optionnelles, dont la pertinence dépend en partie de l'objectif de l'étude : la normalisation, le regroupement et la pondération des résultats. La section I.4.3.4 traitera de ces options.

1.4.3.1 Sélection des catégories d'impact

1. Critères de sélection

Afin d'établir une sélection de catégories et d'indicateurs d'impact pertinente, il est nécessaire, ce qui n'implique toutefois pas qu'il soit suffisant, de respecter trois critères principaux [AFN, 06 ; ALL et al., 97 ; ROS, 89 ; KHA, 99].

- la complétude: l'ensemble des problèmes environnementaux d'intérêt vis-à-vis de l'objectif défini de l'étude d'ACV doit être pris en compte,
- la non-redondance: les catégories, entre elles, ainsi que les indicateurs, entre eux, se doivent, dans la mesure où l'objectif de l'étude ne le requiert pas, d'être indépendants, afin d'éviter les doubles comptages ; le respect de ce critère peut alors conduire à l'adoption de sous-catégories afin de préserver la lisibilité des résultats, qui pourrait pâtir d'un nombre trop conséquent de catégories [HEL, 99],

Exemples :

– *l'utilisation conjointe de catégories 'Acidification' et 'Acidification des eaux' est redondante, celle de 'Acidification des eaux' et 'Acidification des sols' ne l'est pas,*

– *de la même façon, les catégories 'Impacts sur la santé humaine' et 'Effets cancérigènes' sont redondantes, mais une catégorie d'impact 'Santé humaine' au sein de laquelle sont par exemple regroupées les sous-catégories 'Effets cancérigènes', 'Effets respiratoires' et 'Effets des radiations ionisantes' ne constitue pas un système redondant.*

– la validité: le mécanisme environnemental¹ auquel se réfère un indicateur au sein de sa catégorie doit être distinctement identifiable, et les modèles de caractérisation sélectionnés doivent être acceptés et reconnus tant scientifiquement que techniquement, et si possible à l'échelle internationale.

2. Description des catégories, indicateurs et modèles de caractérisation

Au-delà de l'utilisation de dénominations explicites quant à la désignation des catégories et indicateurs choisis, un certain nombre de caractéristiques devra être décrit lors de l'établissement de la liste de catégories et d'indicateurs d'impact, ainsi que du modèle de caractérisation associé à chaque indicateur [AFN, 06] :

¹ **Mécanisme environnemental** : ensemble de processus chimiques, biologiques et physiques pour une catégorie d'impact donnée, reliant les résultats de l'inventaire du cycle de vie aux indicateurs de catégorie d'impact et aux impacts finaux par catégorie

- l'impact final par catégorie² : l'aspect de l'environnement affecté par la catégorie d'impact décrit doit être identifié. Ceci a induit à distinguer principalement trois domaines de protection: l'environnement naturel, la santé humaine et les ressources [AFN, 06 ; MAR, 06 ; HEL, 99 ; PEN et al., 04] ; en 1999, Udo de Haes et al. proposent, dans le cadre du SETAC un quatrième domaine, l'environnement artificiel, au sein duquel sont considérés des composantes telles que les cultures agricoles ou les monuments historiques [HEL, 99],
- la définition de la catégorie d'impact et de l'indicateur de catégorie, notamment en termes de mécanisme environnemental (voir section I.4.3.3.a) décrit pour la catégorie d'impact,
- l'identification des flux de l'inventaire de cycle de vie attribués à chaque catégorie d'impact et chaque indicateur, et
- l'identification du modèle et des facteurs de caractérisation choisis.

Au terme de cette première étape de sélection des catégories d'impact, celles-ci doivent être clairement définies et l'impact final par catégorie identifié. L'identification des flux d'inventaire attribués à chaque catégorie ainsi que la définition de l'indicateur de catégorie, du modèle et des facteurs de caractérisation ne se fait qu'aux termes des étapes de classification (voir section I.4.3.2) et de caractérisation (voir section I.4.3.3). Néanmoins, l'ensemble doit être renseigné lors de la description des différentes catégories d'impact, élément nécessaire à la bonne communication d'une étude d'ACV.

3. Définition des catégories d'impact

Sans toutefois constituer une norme absolue, il existe au sein des guides de bonnes pratiques et des méthodes fonctionnelles existantes un relatif consensus autour des catégories d'impact couramment utilisées en évaluation d'impact du cycle de vie [UNI, 96 ; ALL et al., 97 ; MAR, 06 ; JER et al., 01 ; HEL, 99 ; PEN et al., 04 ; ROS, 98 ; KHA, 02 ; UNI, 03 ; GOE et al., 01 ; JOL et al., 03 ; BRE et al., 04 ; BEN, 99a]. Il est donc intéressant d'identifier celles-ci, de les définir et d'y associer leur impact final par catégorie sous la forme des domaines de protection, selon la liste précédemment définie (voir section b précédente).

Le Tableau I.1 synthétise les catégories d'impact courantes et, le cas échéant, les sous-catégories associées, ainsi que les domaines de protection concernés. Chacune de ces catégories et les enjeux qui y sont liés sont définis plus précisément dans les sections suivantes.

² **Impact final par catégorie** : attribut ou aspect de l'environnement naturel, de la santé humaine ou des ressources, permettant d'identifier un point environnemental à problème.

Tableau I.1 - Catégories d'impact couramment utilisées en évaluation d'impact de cycle de vie [UNI, 03].

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				
	Bruit		X	X	
	Impact visuel				X
Impact des radiations ionisantes	-	X	X	X	

Épuisement des ressources abiotiques

Les ressources abiotiques sont les ressources naturelles qui ne constituent pas un milieu vivant. Cette catégorie d'impact couvre les consommations de telles ressources. On peut en distinguer trois types, auxquels peuvent alors correspondre autant de sous-catégories :

– *les dépôts*: un dépôt est une ressource dont le temps de régénération se situe au-delà de l'échelle humaine,

Exemples de dépôts : les ressources fossiles, les minerais, etc.

– **les fonds** : un fonds est une ressource dont le temps de régénération est du même ordre de grandeur qu'une vie humaine.

Exemples de fonds : les eaux des nappes phréatiques, le sable, le sol, etc.

– **les écoulements** : un écoulement est une ressource qui est considérée comme se régénérant constamment.

Exemples d'écoulements : le vent, le rayonnement solaire, l'eau des rivières, etc.

Épuisement des ressources biotiques

Les ressources biotiques sont les ressources naturelles vivantes ou issues du vivant. Cette catégorie d'impact couvre les consommations de telles ressources.

Exemples de ressources biotiques : l'éléphant d'Asie, le peuplier, la forêt tropicale, etc.

Remarque : la catégorie d'impact 'Consommation énergétique', transversale à celles de l'épuisement des ressources abiotiques et biotiques, est également couramment utilisée. Elle se limite alors généralement aux ressources fossiles (dépôts abiotiques), et aux sources dites d'énergie renouvelable (fonds et écoulements abiotiques et biotiques). Le domaine de protection associé est celui des ressources naturelles.

Utilisation des sols

Cette catégorie d'impact couvre les conséquences de l'utilisation du sol faite par l'homme. Ces conséquences pouvant prendre plusieurs formes, il est généralement défini plusieurs sous-catégories, telles que la compétition pour les sols, la perte de biodiversité ou la dégradation des fonctions de subsistance du vivant.

Si la première de ces sous-catégories traduit l'utilisation des sols en termes d'occupation de surface, considérant celle-ci comme une ressource, les deux suivantes apprécient les impacts de l'utilisation des sols sur les espèces vivantes (biodiversité) et sur les écosystèmes dans leur ensemble (fonctions de subsistance du vivant). Toutefois, si ces deux dernières sous-catégories sont proposées dans la bibliographie, il faut noter qu'elles sont extrêmement proches : chaque espèce vivante est part intégrante d'un écosystème et porter atteinte au premier est donc modifier le second, et à l'inverse, toute perturbation d'un mécanisme d'un écosystème, tel que le cycle de l'eau, aura bien souvent des répercussions sur la biodiversité [JER et al., 01 ; HEL et al., 99 ; PEN et al., 04].

Changement climatique

Cette catégorie d'impact couvre les effets des émissions anthropiques de gaz à effet de serre sur le fonctionnement du climat. En effet, l'effet de serre, qui désigne le processus naturel de maintien de la température à la surface de la Terre, dû à un bilan radiatif du système Terre-atmosphère globalement positif, est la conséquence de la présence de certains

gaz dans la troposphère, c'est-à-dire la plus basse couche de l'atmosphère. Suivant la concentration de ces gaz, parmi lesquels sont notamment comptés la vapeur d'eau H₂O, le dioxyde de carbone CO₂, le méthane CH₄ ou le protoxyde d'azote N₂O, l'intensité du phénomène d'effet de serre varie [TRE et al., 07].

Par conséquent, un niveau trop important d'émissions anthropiques de tels gaz conduit à un réchauffement de la surface de la Terre, qui lui-même possède de nombreuses conséquences [HEG et al., 07]. En parallèle, la modification de la concentration de certains de ces gaz dans l'atmosphère peut avoir un effet propre ; c'est le cas notamment du dioxyde de carbone CO₂, qui modifie certains comportements des végétaux.

Diminution d'ozone stratosphérique

Cette catégorie d'impact couvre les effets des émissions anthropiques sur la couche d'ozone O₃ stratosphérique. La principale conséquence d'une diminution de cette couche d'ozone est l'augmentation de la part d'ultraviolets B, ou UV-B, venant du Soleil et atteignant la surface de la Terre, ce qui provoque des impacts, tels que des cancers de la peau, pouvant être importants sur les êtres vivants.

Note : cette catégorie couvre notamment le phénomène plus connu sous le nom de "trou de la couche d'ozone", identifié au cours des années 1970.

Toxicité humaine

Cette catégorie d'impact couvre les effets des substances toxiques sur la santé humaine. Ces substances peuvent être présentes aussi bien dans l'environnement que sur un lieu de travail.

Écotoxicité

Cette catégorie d'impact couvre les effets des substances toxiques sur les espèces naturelles autres que l'homme, et sur les écosystèmes. Compte tenu de l'importance de la gamme d'impacts mesurables au sein de cette catégorie, celle-ci peut être divisée suivant de grands types d'écosystèmes : terrestre, aquatique ou sédimentaire, d'eau douce ou marin.

Formation de photo-oxydants

Cette catégorie d'impact prend en compte la formation dans la troposphère de certains composés réactifs chimiques appelés photo-oxydants, dont fait notamment partie l'ozone O₃, par action du soleil sur certains polluants primaires.

De façon plus détaillée, les photo-oxydants peuvent apparaître dans la troposphère sous l'action des ultraviolets, par oxydation photochimique des composés organiques volatils, ou COv, et de monoxyde de carbone CO, en présence d'oxydes d'azote, ou NOx. L'ozone O₃ et, dans une moindre mesure, le nitrate de peroxyacétyl, ou PAN, sont considérés comme les principaux composés photo-oxydants.

La totalité des effets que peut potentiellement avoir ce type de polluants est relativement mal connue, cependant, à titre d'exemple, son constituant principal, l'ozone O₃, possède des effets sur la santé humaine d'irritation des yeux, des voies respiratoires et des muqueuses. Ces problèmes peuvent fortement s'aggraver auprès d'individus souffrant de problèmes respiratoires.

Cette catégorie d'impact est également connue sous le nom de 'Formation de smog' ou 'Smog d'été'.

Acidification

Cette catégorie d'impact couvre les effets des polluants acidifiants. En effet, des composés chimiques tels que le dioxyde de soufre SO₂ ou les oxydes d'azote NO_x, vont réagir avec l'humidité de l'air ambiant pour former des acides.

La forme la plus connue que peut prendre ce type de pollution est la retombée de ces composés sous forme de pluies acides. Celles-ci ont un effet sur l'ensemble des domaines de protection préalablement définis ; en effet, elles peuvent avoir un effet direct sur les êtres vivants, ou indirect via l'altération des écosystèmes, sous la forme d'acidification des eaux ou de destruction de végétation, mais également corroder les métaux ou dégrader les édifices en pierre.

Eutrophisation

Cette catégorie d'impact couvre les effets dus à de trop hauts niveaux de nutriments dans les écosystèmes. Il peut alors être distingué deux sous-catégories, relatives au type d'écosystèmes : aquatique ou terrestre.

Remarque : le terme d'«eutrophisation terrestre», s'il est pratique, n'est pas exact ; en effet, le terme «eutrophisation» se réfère, par définition, au milieu aquatique.

La première conséquence de l'eutrophisation, dans son sens premier, c'est-à-dire affectant un milieu aquatique, est le développement conséquent d'algues, généralement au détriment de certaines variétés moins résistantes. Puis, ce développement de matière organique peut limiter fortement l'oxygène dissout dans l'eau ou bloquer l'accès à la lumière pour les espèces vivant plus en profondeur.

Les conséquences exactes de l'eutrophisation pour les milieux terrestres sont moins bien connues. Cependant, on peut relever parmi celles-ci, à l'instar de l'eutrophisation aquatique, que l'élévation du niveau de nutriments dans les sols peut occasionner des bouleversements dans la dominance des espèces.

Nuisances

Cette catégorie d'impact couvre les impacts sur les être vivants des odeurs, du bruit et de l'impact visuel.

Impact des radiations ionisantes

Cette catégorie d'impact couvre les effets des rejets de substances radioactives ainsi que des expositions directes aux radiations.

1.4.3.2 Classification des résultats de l'inventaire

1. Attribution des résultats de l'inventaire aux catégories d'impact

Chaque composé comptabilisé lors de l'inventaire du cycle de vie possède une cascade d'effets. Cette cascade représente l'ensemble des effets sur l'environnement qu'un composé peut avoir, en distinguant les effets successifs des effets parallèles. Un exemple partiel d'une telle cascade, relatif au dioxyde de soufre SO_2 , est présenté à la Figure I-4 [CHE et al., 99].

En effet, et la Figure I-4 en est un exemple, chaque substance peut contribuer à plusieurs impacts, et ceci de trois façons [ROS, 98] :

- en parallèle: une substance peut contribuer à plusieurs impacts selon des mécanismes différents ; les effets parallèles ainsi définis s'excluent alors généralement entre eux, mais il existe certains cas, tels que lors d'un effet de catalyse, où cette règle ne s'applique pas,

Exemple : sur la Figure I-4, la molécule de SO_2 émise peut, soit par contact avec l'humidité de l'air, former de l'acide sulfurique, qui sera une cause d'acidification via les pluies, soit par inhalation, contribuer à la toxicité humaine. Dans ce cas, la molécule de SO_2 ne pouvant pas à la fois être inhalée et réagir pour former de l'acide, les effets décrits sont exclusifs.

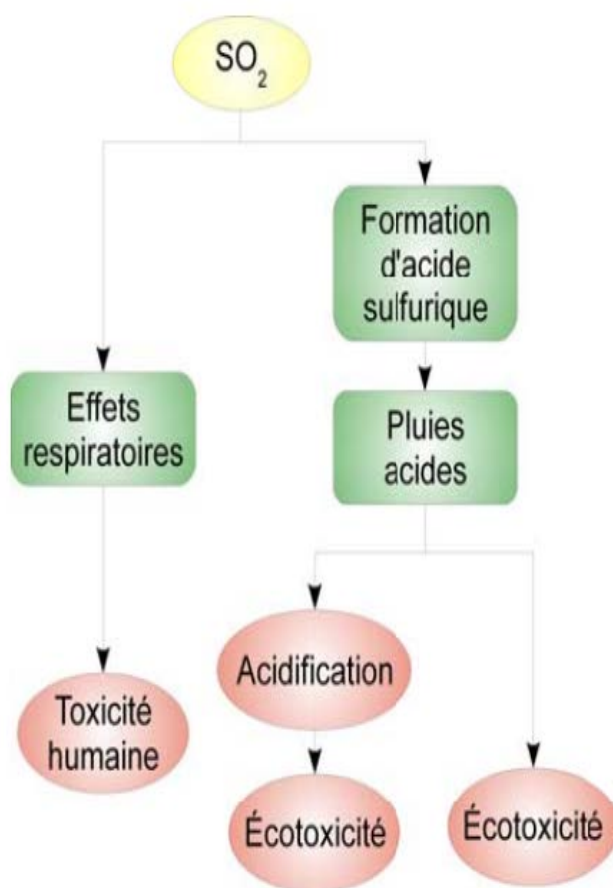


Figure I-4 : Cascade d'effets partielle du SO_2 [CHE et al., 99]

- En série, directement: les impacts dus à une même molécule de la substance considérée peuvent apparaître l'un après l'autre, et

Exemple : une pollution par des éléments tels que le mercure Hg, le plomb Pb ou le cadmium Cd peut posséder un effet relevant tout d'abord d'écotoxicité, via un

empoisonnement des sols et de bétail, puis de toxicité humaine, à travers la chaîne alimentaire.

- En série, indirectement: les impacts dus à la substance considérée peuvent apparaître l'un après l'autre mais sans que la molécule initiale soit impliquée dans le deuxième effet.

Exemple : le méthane peut contribuer à la formation de photo-oxydants, ce qui constitue un premier impact [CHE et al., 99]. L'ozone ainsi formé possédant un impact sur l'effet de serre, le méthane a eu un effet indirect, en plus de son effet direct, sur l'effet de serre.

Suivant la cascade d'effets, un double comptage des substances est possible lors de la classification des résultats de l'inventaire ; c'est notamment le cas des chaînes d'effets parallèles. Cependant, ce double comptage n'est pas recommandé dans le cas d'effets en série [ALL et al., 97].

Note : la chaîne d'effet est définie comme une branche, de la substance à l'impact, d'une cascade d'effets.

2. Principaux contributeurs aux catégories d'impact

Sur la base de la liste de catégories d'impact définie à la section I.4.3.1.c, il est intéressant de déterminer les principaux contributeurs à ces catégories pris en compte dans les guides de bonnes pratiques et les méthodes fonctionnelles existantes [JER et al., 01 ; MAR, 06 ; ROS, 98 ; KHA, 02 ; UNI, 96 ; GOE et al., 0 ; HUM et al., 05 ; BEN, 99a ; BEN, 99b ; BRE et al., 04]. Les substances ou espèces chimiques ainsi identifiées constituent autant de flux de l'inventaire du cycle de vie à considérer pour une bonne évaluation des impacts. Néanmoins il est à noter que la notion de principal contributeur n'est pas uniquement relative au potentiel d'effet des substances mais également aux quantités généralement émises.

La synthèse de cette revue est donnée dans le Tableau I.2.

Tableau I.2 - Principaux contributeurs recensés aux catégories d'impact [BRE et al., 04].

Catégories d'impact	Principales substances ou espèces chimiques recensées
Épuisement des ressources abiotiques	Ressources minérales et fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole)
Changement climatique	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CFC ⁴ , HCFC ⁵
Diminution d'ozone stratosphérique	CFC, HCFC, Halon ⁶
Toxicité humaine	Nombreux composés chimiques (dont notamment NO _x ⁷ , SO _x ⁸ , NH ₃ , CO, HAP ⁹ , COV ¹⁰ , métaux lourds), pesticides, particules
Écotoxicité	
Formation de photo-oxydants	COV, NO _x
Acidification	SO _x , NO _x , NH ₃ , HCl, HF
Eutrophisation	Composés azotés (dont NO _x , NH ₄ ⁺) et phosphorés (dont PO ₄ ³⁻)
Impact des radiations ionisantes	Ensemble des isotopes radioactifs

Afin de conserver une homogénéité entre les différentes sources étudiées, les sous-catégories d'impact définies dans le Tableau I.1 (section I.4.3.1.c) ont été supprimées pour cette synthèse. Ceci n'a pas d'effet sur les espèces recensées dans le tableau I.2 ; seuls Brentrup et al. notent que dans le cadre de la distinction de la sous-catégorie 'Eutrophisation terrestre', l'azote est un nutriment limitant des sols important, ce qui permet de ne considérer que les composés azotés [BRE et al., 04].

De plus, l'ensemble des catégories de la section I.4.3.1.c n'est pas représenté dans le Tableau I.2 ; les catégories d'impact n'apparaissant pas dans le Tableau I.2 sont :

³ **CFC** : ChloroFluoroCarbures, sous-famille des haloalcanes, c'est-à-dire les alcanes dont un ou plusieurs atomes d'hydrogène ont été substitués par des atomes d'halogène. Pour les CFC, la totalité des atomes d'hydrogène de l'alcane initial ont été remplacés par des atomes de chlore et de fluor.

⁴ **HCFC** : HydroChloroFluoroCarbures, sous-famille des haloalcanes. Pour les HCFC, les halogènes impliqués sont le chlore et le fluor mais ceux-ci ne se substituent pas à la totalité des atomes d'hydrogène.

⁵ **Halon** : Sous-famille des haloalcanes pour laquelle au moins un des halogènes impliqués est un atome de brome.

⁶ **NO_x** : Oxydes d'azote.

⁷ **SO_x** : Oxydes de soufre.

⁸ **HAP** : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, c'est-à-dire possédant au moins deux cycles aromatiques.

⁹ **Cov** : Composés organiques volatils, c'est-à-dire pouvant être rencontrés aisément dans l'atmosphère sous forme gazeuse. Il est à noter que les listes exactes des composés regroupés sous la dénomination de COV peut varier selon les pays.

- 'Épuisement des ressources biotiques' : cette catégorie d'impact n'a été, jusqu'à présent, que peu considérée dans les guides et méthodes existants, à défaut de méthodes de caractérisation satisfaisantes,
- 'Utilisation des sols' : cette catégorie d'impact est quelque peu à part quant à la classification des résultats de l'inventaire. Il ne s'agit pas de considérer des substances consommées ou émises mais d'évaluer l'impact impliqué par une certaine occupation de terrain ; ceci implique, généralement, de distinguer cette occupation par grandes catégories d'utilisation : zone urbaine, zone industrielle ou commerciale, zone routière, terres arables en culture conventionnelle, intégrée ou biologique, prairies en gestion conventionnelle, intégrée ou biologique, etc [GOE et al., 03 ; HUM et al., 05 ; BEN, 99a ; BEN, 99b ; BRE et al., 04],
- 'Nuisances' : parmi les sous-catégories possibles de cette catégorie d'impact, seule celle relative aux odeurs a été considérée plus en détails, et ce uniquement dans un guide et une méthode d'évaluation [JER et al., 01 ; BEN, 99a ; BEN, 99b].

1.4.3.3 Sélection des catégories d'impact

1. Mécanisme environnemental et niveau d'effet des indicateurs

La section I.4.3.2.a a défini ce que représente, pour chaque substance de l'inventaire de cycle de vie, le concept de cascade d'effets, qui lie cette substance à une ou plusieurs catégories d'impact. Cette notion est complémentaire de celle de mécanisme environnemental.

Chaque catégorie d'impact, ou sous-catégorie le cas échéant, possède son mécanisme environnemental, qui lie celle-ci aux impacts finaux par catégorie, ou domaines de protection, impliqués. En ce sens, l'ensemble des chaînes d'effets dans lesquelles apparaît la catégorie d'impact considérée est une part intégrante du mécanisme environnemental associé.

L'ensemble des concepts relatifs aux catégories d'impact et de leur mécanisme environnemental est représenté sur la Figure I-5, issue de la norme 14044/2006 [AFN, 06].

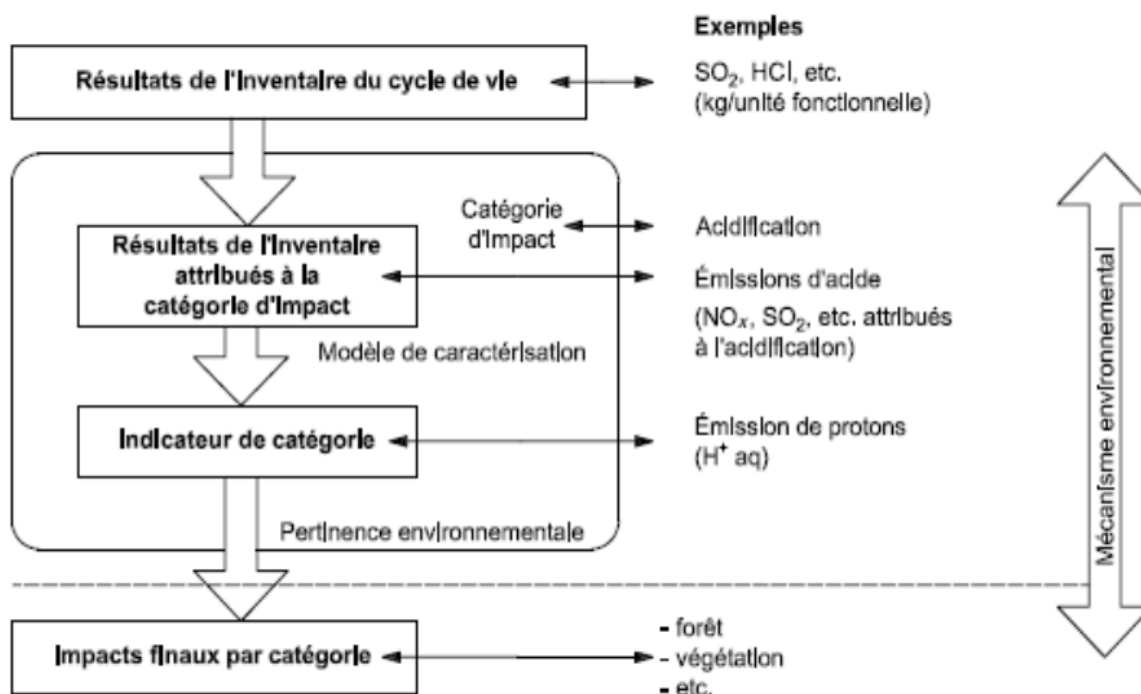


Figure I-5 : Catégorie d'impact et mécanisme environnemental [AFN, 06].

Si l'indicateur de catégorie, à partir des résultats de l'inventaire et via le modèle de caractérisation, doit représenter l'impact du système sur les domaines de protection, celui-ci peut être choisi plutôt en amont ou en aval du mécanisme environnemental. Un choix d'indicateur en aval du mécanisme environnemental sera très pertinent d'un point de vue environnemental mais sera généralement soumis à des incertitudes, parfois importantes, dans sa modélisation. Un choix d'indicateur en amont présentera les caractéristiques inverses.

Exemple pour la catégorie d'impact 'Acidification' : la Figure I-5 présente une possibilité d'indicateur pour cette catégorie, l'émission de protons. Celui-ci ne fournit pas de renseignements quant aux effets réels de l'acidification sur l'environnement mais il traduit le potentiel d'acidification des différentes substances en termes de protons H^+ . Ce type d'indicateur est dit au niveau moyen du mécanisme environnemental.

Un indicateur aval pourrait être la différence de pH, des eaux ou des sols, due aux émissions du système.

Exemple pour la catégorie d'impact 'Changement climatique' : un indicateur traduisant le forçage radiatif infrarouge induit par les émissions de gaz à effet de serre, généralement exprimé en W/m^2 , se situe plutôt en amont du mécanisme environnemental. Le modèle de caractérisation généralement utilisé est celui fourni par les études de l'IPCC qui bénéficient d'un large consensus [FOR, 07] ; cet indicateur n'exprime pas exactement le forçage radiatif des substances en W/m^2 mais utilise cette caractéristique afin de donner un équivalent en masse pour chacune des substances en fonction d'une référence choisie, le dioxyde de carbone CO_2 .

Cependant, il pourrait être choisi un autre indicateur de catégorie, plus en aval du mécanisme environnemental, tel que l'élévation du niveau de la mer due aux émissions de gaz

à effet de serre à un horizon temporel fixé ; cet indicateur, quoique plus pertinent d'un point de vue environnemental, présenterait néanmoins de plus fortes incertitudes que celui du forçage radiatif infrarouge.

Udo de Haes et al. proposent trois classes de niveaux d'effet des indicateurs [HEL et al., 99] :

– le niveau amont: l'indicateur choisi quantifie les émissions ou les consommations ; son apport est d'agréger l'ensemble des substances identifiées comme contribuant à la catégorie considérée selon une unité commune, généralement en masse équivalente d'une substance représentative,

Exemples : masse de CO₂ équivalent pour la catégorie 'Changement climatique' [JER et al., 01 ; ROS, 98 ; HUM et al., 05 ; BRE et al., 04 ; MAR, 06], de SO₂ équivalent pour la catégorie 'Acidification' [JER et al., 01 ; ROS, 98 ; HUM et al., 05 ; BRE et al., 04], ou d'antimoine Sb équivalent pour la catégorie 'Épuisement des ressources abiotiques' [JER et al., 01].

– le niveau moyen: l'indicateur choisi exprime un paramètre caractéristique de la catégorie d'impact considérée, et

Exemples : l'émission de protons H⁺, pour la catégorie 'Acidification' [MAR, 06], ou le volume d'air affecté pour la sous-catégorie 'Odeurs' de la catégorie 'Nuisances' [JER et al., 01].

– le niveau aval: l'indicateur choisi traduit l'effet réel de la catégorie d'impact considérée sur les domaines de protection associés.

Exemples : diminution de l'espérance de vie humaine [JER et al., 01 ; GOE et al., 01 ; HUM et al., 05], ou quantification des espèces vivantes menacées ou disparues [51, 57], dues à un ensemble de catégories d'impact.

Ce choix du niveau d'effet des indicateurs d'impact au sein des mécanismes environnementaux est à réaliser en fonction de l'objectif de l'étude d'ACV réalisée mais également des connaissances scientifiques disponibles. Ainsi, l'ensemble des indicateurs d'impact sélectionnés lors d'une étude d'ACV peut ne pas être homogène de ce point de vue. Une attention particulière doit être portée à ces possibles différences entre indicateurs lors de l'interprétation du cycle de vie.

2. Principe général de la caractérisation

Chaque catégorie d'impact, ou sous-catégorie le cas échéant, possède sa propre méthode de caractérisation. Cette dénomination désigne le lien existant entre l'indicateur de catégorie, le modèle de caractérisation et les facteurs de caractérisation [JER et al., 01 ; PEN et al., 04].

En effet, et de façon générale, le modèle de caractérisation fournit les facteurs de caractérisation, qui permettent d'écrire l'indicateur de catégorie sous la forme donnée par l'équation (1) [JER et al., 01 ; PEN et al., 04 ; KHA, 99 ; KHA, 02 ; BRE et al., 04].

$$I_i = \sum_j FC_{i,j} \cdot R_j$$

avec : I_i , indicateur d'impact de la catégorie i

$FC_{i,j}$, facteur de caractérisation associée au flux d'inventaire j pour la catégorie i

(1)

R_j , résultats de l'inventaire de cycle de vie pour le flux d'inventaire j

Il est à noter que dans l'équation (1), les résultats d'inventaire concernent aussi bien les émissions du cycle de vie que les consommations.

Toute la difficulté de l'étape de caractérisation tient en une modélisation correcte, et donc en la détermination de facteurs de caractérisation pertinents.

3. Modélisation de la caractérisation

Le modèle de caractérisation, propre à une catégorie d'impact donnée, doit tenir compte, pour chaque résultat de l'inventaire, de l'effet potentiel de la substance, mais également de son devenir, vis-à-vis du, ou des, domaines de protection concernés [HEL et al., 99 ; PEN et al., 04 ; KHA, 99]. La notion de devenir couvre ici l'ensemble des processus relatifs à l'émission, au transport et à la transformation de la substance considérée, et est donc intrinsèquement liée à son caractère persistant ; quant au potentiel d'effet de la substance, il s'exprimera de façon différente le long de ce parcours.

Ainsi il apparaît que la prise en compte des dimensions spatiale et temporelle est un point essentiel à l'obtention d'un modèle de caractérisation pertinent. En effet, l'un des objets de la caractérisation étant notamment d'agréger de nombreux flux d'inventaire au sein d'un même indicateur, l'enjeu de la caractérisation est de réaliser cette opération en perdant un minimum d'informations sur ces flux, qui expriment des émissions ou des consommations localisées et dont l'échelle de temps peut être très variable d'un flux à l'autre.

1.4.3.4 Étapes optionnelles de l'évaluation de l'impact

Au terme des étapes de sélection, classification et caractérisation, le praticien de l'ACV dispose d'un profil d'évaluation de l'impact du cycle de vie. Celui-ci a permis de traduire les nombreux flux issus de l'inventaire du cycle de vie selon quelques catégories d'impact, et constitue un bon compromis entre lisibilité des résultats d'une part, et subjectivité et spécificité de l'analyse d'autre part. Ces deux caractéristiques ne sont en effet généralement pas compatibles, l'augmentation de la lisibilité nécessitant très souvent des choix de méthodes ou de références particulières.

Cependant, il peut être souhaité, selon le champ et les objectifs de l'étude, d'augmenter encore la lisibilité de ce profil ; c'est ce que permettent les étapes optionnelles de l'évaluation de l'impact du cycle de vie. Selon la norme ISO 14040/2006, il existe principalement trois étapes facultatives de la phase de l'évaluation de l'impact du cycle de vie [AFN, 06b] ; une

quatrième, liée à l'évaluation des incertitudes affectant les résultats d'impacts, peut y être associée.

Les trois étapes considérées sont :

- la normalisation: il s'agit de définir une référence, pour les différentes catégories d'impact considérées, par rapport à laquelle l'importance de l'impact du cycle de vie étudié sera mesurée,
- le regroupement: il s'agit ici d'effectuer un tri des catégories d'impact, et
- la pondération: l'importance accordée aux catégories d'impact est donnée quantitativement, ce qui peut permettre notamment une agrégation des résultats (voir section c).

1.4.4 Méthodes courantes d'évaluation de l'impact

Des méthodes scientifiquement reconnues ont été développées au fil des années afin de faciliter l'utilisation de la méthode ACV. Ces méthodes ne sont pas figées et ils existent des divergences entre elles. En effet, le passage de l'inventaire à l'impact appelé caractérisation, comme expliqué précédemment n'est pas évident pour chacune des catégories et cela peut mener à des variations de résultats. Il est donc important de savoir pourquoi telle ou telle méthode a été employée ainsi que les limitations et les faiblesses de ces dernières.

Deux méthodes européennes récentes vont être décrites et utilisées dans le travail. Il s'agit d'Impact 2002+ développé par O. Jolliet et S. Humbert ainsi que ReCiPe 2008 qui apparaît comme la mise à jour des deux méthodologies européennes les plus usitées, à savoir CML 2001 et Eco-Indicator 99. La méthode ReCiPe 2008 est la méthode d'évaluation de l'impact recommandée pour la plupart des catégories d'impact par le guide de la Commission

Européenne [EUR, 11]. Le passage d'une méthode à l'autre pour le calcul des résultats de notre travail fera l'objet d'une analyse de sensibilité, permettant d'évaluer la robustesse des résultats.

1.4.4.1 Impact 2002+ [HUM et al., 05]

Cette méthode a pour principal objectif de comparer plusieurs produits, au sens large, sur base d'impacts environnementaux potentiels associés à leur cycle de vie respectif. Le développement d'une telle méthode n'est pas possible sans une définition claire du terme environnement. La définition retenue pour cette méthode est la suivante : « l'environnement consiste en un ensemble de paramètres biologiques, physiques et chimiques influencés par l'homme qui sont essentiels au fonctionnement de l'homme et de la nature ». Ces conditions incluent la santé humaine, la qualité de l'écosystème, le changement climatique et une quantité suffisante de ressources.

Cette méthode propose une manière d'implémenter une approche combinée des facteurs médians appelés « midpoint » et des dommages appelés « endpoint » en regroupant les

différents résultats obtenus lors de l'inventaire à travers 14 catégories médianes et 4 catégories de dommages.

Les 14 catégories médianes et les 4 catégories de dommage envisagées par la méthode sont reprises dans le Tableau I-3.

Tableau I-3 - Catégories prises en compte par la méthode Impact 2002+ groupées par dommage [HUM et al., 05].

Santé humaine	Qualité de l'écosystème	Changement climatique	Ressources
Toxicité humaine	Écotoxicité aquatique	Réchauffement climatique	Extraction de ressources minérales
Effets respiratoires	Écotoxicité terrestre		Consommations des énergies non-renouvelables
Radiations ionisantes	Acidification aquatique		
Épuisement de la couche d'ozone	Acidification/eutrophisation terrestre		
Oxydation photochimique	Eutrophisation aquatique		
	Occupation du sol		

Les scores de chaque catégorie médiane sont exprimés en $\text{kg}_{\text{éq}}$ d'une substance de référence qui relie la quantité d'une substance de référence équivalente à l'impact du polluant considéré. Les scores obtenus sont liés aux catégories de dommages « Santé humaine », « Qualité de l'écosystème », « Changement climatique » et « Ressources ». Les scores de chacune des catégories de dommage sont exprimés respectivement en DALY, $\text{PDF.m}^2.\text{an}$, $\text{kg}_{\text{éq}} \text{CO}_2$ et MJ.

Les catégories médianes entrant dans la catégorie « Santé humaine » sont la toxicité humaine, les effets respiratoires, les radiations ionisantes, l'épuisement de la couche d'ozone et l'oxydation photochimique. Le dommage moyen sur la santé humaine est généralement dominé par les effets respiratoires causés par les substances inorganiques émises dans l'air.

L'unité utilisée pour la catégorie « Santé humaine » est le DALY qui est l'acronyme de « Disability Adjusted Life Years ». Celle-ci caractérise la sévérité du dommage en comptant à la fois la mortalité en « Years of Life Lost (YLL) » due à une mort prématurée et la morbidité représentant le temps de vie vécu avec une qualité plus basse due par exemple à une maladie exprimée en « Years Lived with Disability (YLD) ». Le DALY présente le résultat de la somme de ces deux valeurs. Un produit atteignant le score de 3 DALY's implique la perte de trois ans de vie pour toute la population et non par personne.

La catégorie « Qualité de l'écosystème » regroupe les catégories écotoxicité aquatique, écotoxicité terrestre, acidification/eutrophisation terrestre et l'occupation du sol. Théoriquement, les catégories acidification aquatique et eutrophisation aquatique contribuent également aux impacts de la qualité de l'écosystème. Le lien entre les scores médians et les dommages n'ont pas encore été développés et ne permettent pas d'inclure ces deux catégories

dans la qualité de l'écosystème. Le dommage moyen sur la qualité de l'écosystème est généralement dominé par l'écotoxicité terrestre et l'occupation du sol.

L'unité pour cette catégorie de dommage est le PDF.m².an signifiant « Potentially Disappeared Fraction of species per m² per year ». Elle permet de déterminer l'impact sur l'écosystème et représente la fraction d'espèces disparues sur un m² de la surface de la terre pendant un an.

Le changement climatique est identique à la catégorie de dommage réchauffement climatique. L'unité de référence pour cette catégorie est le kg_{éq} CO₂ dont le dommage moyen est largement dominé par les émissions de dioxyde de carbone.

Les catégories médianes entrant dans la catégorie « Ressources » sont la consommation d'énergie non-renouvelable et l'extraction des ressources minérales. Le dommage sur cette catégorie est largement dominé par la consommation des énergies non-renouvelables à savoir les combustibles fossiles.

Cette catégorie de dommage est exprimée en surplus d'énergie qu'il faudra fournir pour extraire des ressources de moins en moins disponibles et concentrées, exprimée en MJ.

À la suite des résultats obtenus pour les différentes catégories de dommages ou catégories médianes, la normalisation peut s'appliquer. Le but est d'analyser la contribution respective de chaque impact sur le dommage global de la catégorie analysée. Cette approche peut faciliter l'interprétation en comparant les différentes catégories sur le même graphique avec les mêmes unités. La normalisation est effectuée en divisant l'impact des catégories de dommages par les facteurs respectifs de normalisation. L'unité utilisée pour les résultats de cette étape est le point ou le pers.an. Un point représente l'impact moyen dans une catégorie spécifique causé par une personne pendant un an en Europe. En première approximation, pour la santé humaine, il représente aussi l'impact moyen sur une personne pendant un an. Il est calculé comme le total annuel du dommage dû aux émissions et extractions en Europe, divisé par le total de la population européenne.

L'étape de pondération qui consiste à comparer les catégories de dommage entre elles n'est pas prévue par la méthode. Les auteurs suggèrent de considérer les quatre catégories de dommages séparément dans l'interprétation des résultats obtenus. En effet, cette dernière étape est basée sur des choix de valeurs qui peuvent amener à des résultats différents d'une personne à l'autre. Cette étape est d'ailleurs interdite par les normes ISO lorsque les résultats de l'étude doivent être divulgués au public.

Certains impacts ne sont pas quantifiés par cette méthode ; il s'agit des impacts locaux tels que le bruit, l'odeur, les vibrations, les élévations de température, les déchets ultimes, les déchets nucléaires, les risques d'accidents majeurs, les effets particuliers sur la santé tels que des dégâts sur le système nerveux, la prise en compte de certaines substances toxiques ou encore des impacts liés à l'utilisation de métaux précieux. Cette liste n'est pas exhaustive. En

pratique, cela signifie que bien qu'ils puissent être ajoutés de manière ponctuelle au niveau de l'inventaire de l'étude, ils ne font pas partie des catégories de dommage.

1.4.5 ACV attributive et conséquentielle

Il existe deux types d'Analyse du Cycle de vie, déjà mentionnées lors du paragraphe « 1.4.2.2 Les allocations ». Il s'agit de l'analyse attributive dont le but est de réaliser une photographie du système étudié avec une réalisation la plus exhaustive possible des bilans de matière et d'énergie, ce qui se rapporte à la situation C ou l'approche conséquentielle qui envisage les effets d'une prise de décision au sein d'un système, relative aux situations A et B. Le type d'analyse conduit devrait être spécifié également dans les objectifs et le champ de l'étude mais n'est pas demandé par les normes ISO [BEN, 09].

Ces deux types d'analyse ont la même validité scientifique mais poursuivent des objectifs différents. Le premier type d'analyse tente de répondre à la question : « Comment sont les choses d'un point de vue environnemental si l'on regarde une fenêtre de temps définie ? » tandis que l'analyse conséquentielle a pour but de répondre à la question : « Quel sera l'impact d'une décision sur le système global ? ». Le choix à réaliser entre les deux types d'approche dépend du but de l'étude. L'approche attributive permet d'obtenir un point de vue global utile pour l'identification des points d'amélioration. L'approche conséquentielle complète la première façon de faire en mesurant les effets occasionnés par une décision sur le système global. Elle permet de comparer ces effets et d'identifier l'option la plus pertinente. Il est tout à fait possible de combiner les deux démarches en établissant tout d'abord une vue globale du procédé et d'ensuite réaliser des modifications menant à des améliorations et de les comparer entre elles via une approche conséquentielle [CUR, 06 ; BEN, 09].

1.5 Limitations de l'Analyse du Cycle de Vie

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

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

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

La faible disponibilité et uniformité des données entraînent l'utilisation d'hypothèses et de modélisation pour combler ce manque. Des simplifications parfois non justifiables doivent être appliquées ce qui entraîne des incertitudes ainsi qu'une non-possibilité de transfert des résultats d'une étude à l'autre. La qualité des données étant le paramètre essentiel pour obtenir

une étude du cycle de vie pertinente, des développements sont nécessaires afin de pouvoir accéder plus librement à l'information permettant la réalisation de l'inventaire du cycle de vie [ROS, 05].

La méthode de l'Analyse du Cycle de Vie, malgré les progrès importants réalisés au fil des années, connaît encore des zones d'ombre comme par exemple la difficulté d'intégrer les paramètres géographiques et temporels dans les bilans de matière et d'énergie ainsi que la pertinence justifiable de certains indicateurs d'impact [ROS, 05].

Des développements concernant la prise en compte des catégories d'impact telles que l'utilisation des sols, l'utilisation de l'eau, la toxicité, ou encore la pollution à l'intérieur des bâtiments sont en cours tout comme le besoin d'une différenciation au niveau spatial pour les impacts [FIN et al., 09].

1.6 Conclusion

Le Biodiesel, dérivé des huiles ou des graisses animales, est recommandé pour être exploité comme un substitut pour le petrodiesel. Principalement, parce que ceci est un carburant renouvelable, respectueux à l'environnement en réduisant les émissions des GES et il est aisément biodégradable.

Le biodiesel, un carburant alternatif, pourrait être produit à partir des ressources renouvelables à savoir les huiles végétale (alimentaire ou non alimentaire), les graisses animales, les huiles recyclées, ainsi que les huiles unicellulaires (Microalgues, levures, bactéries) qui présentent des sources potentielles prometteuses, sans oublier la valorisation des déchets agricoles. Il pourrait être envisagé comme l'une des solutions prometteuse pour assurer la sécurité énergétique dans un cadre de diversification des ressources énergétiques tout en réduisant les émissions des GES.

Le biodiesel peut être produit par des méthodes chimiques (pyrolyse et micro-emulsification, gazéification, et transésterification) ou biochimiques (enzyme lipase). Certains scientifiques ont également démontré le potentiel d'employer des micro-ondes ou le fluide supercritique pour la dérivation du biodiesel.

La contribution du biodiesel aussi minime soit-elle, sa part en matière d'approvisionnement énergétique global sera importante dans les prochaines décennies. Dans les conditions appropriées, la part du biodiesel croissant dans le bouquet énergétique peut contribuer à répondre et aux besoins énergétiques globaux importants et aux réductions des émissions de GES. Il pourrait contribuer à la sécurité énergétique en particulier dans les pays en voie de développement tout en favorisant un développement rural durable.

Par la nécessité d'assurer une source fiable de matière première pour la production du biodiesel, on se tourne de plus en plus actuellement vers des huiles non alimentaires. Il existe de nombreuses espèces végétales qui ne demandent qu'à être développées. C'est l'objet principal de notre travail.

Chapitre II

Biodiesel

*On aime la
nature et les hydrocarbures
Alain Souchon, Sans queue ni tête, 1993*

II.1 Introduction

La raréfaction des carburants fossiles conventionnels, l'augmentation des émissions polluantes et l'accroissement des prix sont des facteurs qui vont rendre les sources énergétiques d'origine biomasse de plus en plus attractives. Les experts estiment que les réserves actuelles en pétrole et gaz ne pourraient satisfaire la demande énergétique que pour quelques décennies seulement. Pour répondre à une demande qui ne cesse d'augmenter et face à la diminution des réserves pétrolière, les carburants comme le biodiesel sont envisagés comme une technologie alternative viable pour les moteurs diesel.

II.2 Historique et Définition

II.2.1 Historique

Le processus de fabrication de carburant à partir de biomasse utilisé dans les années 1800 est essentiellement le même que celui utilisé aujourd'hui. L'histoire du biodiesel est plus politique et économique que technologique. Les compagnies pétrolières ont été obligées de raffiner le pétrole brut pour fournir de l'essence qu'elles se sont retrouvées avec un excédent de distillat, qui est un excellent carburant pour les moteurs diesel et beaucoup moins cher que les huiles végétales. D'autre part, l'épuisement des ressources a toujours été une préoccupation à l'égard du pétrole, et les agriculteurs ont toujours cherché de nouveaux marchés pour leurs produits. Par conséquent, le travail s'est poursuivi sur l'utilisation des huiles végétales comme carburant.

La Production de biodiesel à partir d'huiles végétales n'est pas un nouveau procédé. La conversion d'huiles végétales ou de graisses animales en des esters monoalkyliques ou biodiesel est connu comme transestérification. La transestérification de triglycérides dans les huiles n'est pas un nouveau processus. Duffy et Patrick ont mené la transestérification dès 1853. La vie pour le moteur diesel a commencé en 1893, lorsque le célèbre inventeur allemand Docteur Rudolph Diesel a publié un document intitulé «La théorie et la construction d'un moteur thermique rationnel». Le document décrit un moteur révolutionnaire dans lequel l'air serait comprimé par un piston à une pression très élevée, provoquant ainsi une température élevée. Dr. Diesel a conçu le moteur diesel à l'origine pour fonctionner à l'huile végétale.

Dr. Diesel a fait ses études à l'Université technique de Munich en Allemagne. En 1878, il a présenté un travail de Sadi Carnot, qui a théorisé que le moteur peut atteindre une efficacité beaucoup plus élevée que les moteurs à vapeur. Diesel a cherché à appliquer la théorie de Carnot au moteur à combustion interne. L'efficacité du cycle de Carnot augmente avec le taux de compression, le rapport du volume de gaz en pleine expansion de son volume à pleine compression. Nicklaus Otto a inventé un moteur à combustion interne en 1876 qui était le prédécesseur du moteur à essence moderne. Une flamme ou une étincelle a été utilisé pour enflammer le mélange air-carburant au moment opportun. Toutefois, l'air devient plus chaud car il est comprimé, et si le taux de compression est trop élevé, la chaleur de compression va enflammer le carburant prématurément. Les faibles ratios de compression

nécessaires pour éviter l'inflammation prématurée du mélange air-carburant a limité l'efficacité du moteur Otto. Dr. Diesel voulait construire un moteur à taux de compression le plus élevé possible. Il a présenté le carburant seulement lorsque la combustion a été voulue et a permis au carburant de s'enflammer tout seul dans l'air chaud comprimé. Le moteur diesel a atteint un rendement plus élevé que celui du moteur Otto et beaucoup plus élevée que celle de la machine à vapeur. Le Diesel a reçu un brevet en 1893 et a démontré un moteur réalisable en 1897. Aujourd'hui, les moteurs diesel sont classés comme "moteurs à allumage par compression", et les moteurs Otto sont classés comme «moteurs à allumage commandé».

Dr. Diesel a utilisé l'huile d'arachide pour alimenter un de ses moteurs à l'Exposition universelle de Paris de 1900 [NIT et al, 65]. En raison des températures élevées créées, le moteur était en mesure d'exécuter une variété d'huiles végétales dont le chanvre et l'huile d'arachide. À l'Exposition mondiale de 1911 à Paris, le Dr Diesel a provisionné son moteur à l'huile d'arachide et a déclaré "le moteur diesel peut être alimenté avec des huiles végétales et contribuera considérablement au développement de l'agriculture des pays qui l'utilisent». Une des premières utilisations de l'huile végétale transestérifiée a alimenté les véhicules lourds en Afrique du Sud avant la Seconde Guerre mondiale. Le nom de «biodiesel» a été donné à l'huile végétale transestérifiée pour décrire son utilisation comme gazole [DEM, 02]. Les huiles végétales ont été utilisées dans les moteurs diesel jusqu'aux années 1920. Durant les années 1920, les fabricants de moteurs diesel ont modifié leurs moteurs à utiliser la plus faible viscosité du pétrodiesel, plutôt que de l'huile végétale.

L'utilisation des huiles végétales comme carburant alternatif renouvelable, en concurrence avec le pétrole a été proposé au début des années 1980. Les avantages d'huiles végétales comme gazole sont sa portabilité, disponibilité, renouvelable, le contenu de chaleur plus élevée, faible teneur en soufre, teneur en aromatiques inférieure, et la biodégradabilité. Les problèmes d'approvisionnement en énergie des années 1970 ont eu un regain d'intérêt pour le biodiesel, mais la production commerciale n'a commencé qu'à la fin des années 1990.

Dr. Diesel croit que les moteurs fonctionnant sur les huiles végétales ont un potentiel et que ces huiles pourraient un jour être aussi importantes que les carburants à base de pétrole. Depuis les années 1980, les usines de biodiesel se sont ouvertes dans beaucoup de pays européens et quelques villes ont exécuté des bus sur le biodiesel, ou les mélanges de petro et des biodiesels. Plus récemment, Renault et Peugeot ont approuvé l'utilisation de biodiesel dans certains de leurs moteurs de camion. Des préoccupations économiques environnementales et domestiques récentes ont incité une réapparition dans l'utilisation de biodiesel dans le monde entier. En 1991, la Communauté européenne (CE) a proposé une déduction fiscale de 90 % pour l'utilisation de biocarburants, y compris le biodiesel. Les usines de biodiesel sont maintenant construites par plusieurs sociétés en Europe; chacune de ces usines produira en plus 1.5 millions de gallons de carburant par an. L'Union européenne a représenté presque 89 % de toute la production de biodiesel dans le monde entier en 2005.

II.2.2 Définition

Le Biodiesel (grec, bio, vie + diesel de Rudolf Diesel) se réfère à un diesel équivalent, le carburant transformé issus de sources biologiques. Le biodiesel est le nom d'une variété de carburants oxygénés à base d'ester de sources biologiques renouvelables. Il peut être fabriqué à partir d'huiles et de graisses organiques transformées.

Chimiquement, le biodiesel est défini comme les esters monoalkyliques d'acides gras à longue chaîne dérivés de biolipides renouvelables. Le biodiesel est typiquement produit par la réaction d'une huile végétale ou de graisse animale avec du méthanol ou de l'éthanol en présence d'un catalyseur pour donner les esters méthyliques ou éthyliques (biodiesel) et de la glycérine [DEM, 02]. Les acides gras des esters éthyliques ou biodiesels sont fabriqués à partir d'huiles et de graisses naturelles. En règle générale, le méthanol est préférable pour la transestérification, car il est moins cher que l'éthanol [GRA et al., 98].

En termes généraux, le biodiesel peut être défini comme un carburant renouvelable domestique pour les moteurs diesel dérivé d'huiles naturelles comme l'huile de soja qui répond aux spécifications de la norme ASTM D 6751. En termes techniques (ASTM D 6751) le biodiesel est un carburant du moteur diesel composé de monoalkylesters d'acides gras à longue chaîne dérivée d'huiles végétales ou de graisses animales, désignées B100 et répondant aux exigences de la norme ASTM D 6751. Le biodiesel possède un certain nombre de caractéristiques prometteuses, notamment la réduction des émissions de gaz d'échappement [DUN, 01]. Chimiquement, le biodiesel est mentionné comme les esters monoalkyliques, en particulier (m) éthylique, d'acides gras à longue chaîne provenant de sources lipidiques renouvelables via un procédé de transestérification.

On distingue différents types de biodiesels :

II.2.2.1 1ère génération

Les biodiesels de la 1ère génération se partagent principalement en deux filières, selon les deux grands types de moteurs à explosion : la filière de l'huile pour les moteurs Diesel à allumage par compression, fonctionnant au gazole, et la filière de l'alcool pour les moteurs à allumage commandé, qui fonctionnent à l'essence.

▪ *Avantages et inconvénients des biodiesels de la 1^{ère} génération*

Les biodiesels de 1^{ère} génération ont l'avantage que leur technique de production est bien maîtrisée et mature. Ils constituent la seule alternative aux carburants liquides d'origine pétroliers et directement compatibles avec les moteurs utilisés actuellement.

Mais ils sont limités par les points suivants:

- ✓ Une concurrence potentielle et une tension remarquable sur les ressources liées à des besoins en surfaces agricoles assez élevés.

- ✓ Les bilans énergétique et environnemental de ces carburants sont modestes (surtout pour les gaz à effet de serre). Cela est encore plus visible pour la filière de l'alcool.
- ✓ Le bilan en termes d'émission de gaz à effet de serre apparaît moins favorable avec la prise en compte des conditions de production et de distribution.
- ✓ des interférences probables avec les écosystèmes naturels et les systèmes alimentaires mondiaux [GAB, 08].

II.2.2.2 2ème génération

Les biodiesels de deuxième génération sont obtenus à partir de biomasse sans concurrence avec l'utilisation alimentaire : paille de céréales, miscanthus, bois et résidus forestiers et cultures dédiées.

1. La filière biochimique :

Il s'agit de la production d'éthanol cellulosique par fermentation. Cette voie s'effectue en 3 grandes étapes. Des trois constituants majeurs de la biomasse lignocellulosique (cellulose, hémicelluloses et lignine) seule la cellulose est aujourd'hui transformable en éthanol. Une première étape consiste donc à extraire la cellulose puis à la transformer en glucose par hydrolyse à l'aide d'enzymes (Les enzymes produites dans des réacteurs à partir de microorganismes (par exemple le champignon *trichoderma reesei*) sont capables de dégrader naturellement la cellulose en glucose). Le glucose est ensuite fermenté par des levures en éthanol. Enfin l'éthanol est purifié par distillation et déshydratation. On cite le projet Futurol qui a pour objectif de mettre sur le marché un procédé industriel français de production d'éthanol cellulosique pour 2015 [BUR, 08].

2. La filière thermochimique :

L'une des voies est la production de carburant diesel de synthèse BtL (Biomass to Liquid). Pour la voie thermochimique, la biomasse est d'abord conditionnée par pyrolyse ou torréfaction. Ensuite elle est gazéifiée à plus de 1000°C en présence de vapeur d'eau ou d'oxygène. On obtient ainsi le gaz de synthèse, constitué de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂). L'étape suivante est la synthèse Fischer-Tropsch, transformation chimique catalytique du gaz de synthèse en paraffines linéaires qui, hydrocraquées et isomérisées, produiront un gazole de synthèse.

II.2.2.3 3ème génération

Il s'agit des agrocarburants à partir de micro-algues ou les Algo-carburants. Les microalgues peuvent fournir différents types d'énergies renouvelables. Il s'agit notamment du méthane produit par la digestion anaérobie des algues [SPO et al., 06], du biodiesel dérivé de l'huile des micro-algues [ROE et al., 94; GAV et al., 05] ainsi que de la production d'hydrogène par photobiologie [GHI et al., 00; KAR et al., 06].

L'idée d'utiliser les micro-algues comme sources de carburant n'est pas nouvelle [CHI, 80 ; NAG et al., 90] mais elle commence à être prise en compte sérieusement en raison de l'escalade des prix du pétrole et du réchauffement de la planète qui est associé à la consommation des combustibles fossiles [GAV et al., 05].

II.3 Les sources du Biodiesel

Il y a plus de 350 récoltes pétrolifères identifiées, parmi lesquels seulement le soja, la palme, le tournesol, le carthame, l'huile de coton, on considère la graine de colza et des huiles d'arachide comme des carburants alternatifs potentiels pour des moteurs diesel [GOE et al., 82 ; PRY et al., 82]. La consommation mondiale d'huile de soja est la plus haute en 2003 (27.9 millions de tonnes métriques).

L'huile végétale est l'un des carburants renouvelables. Les huiles végétales sont devenues plus attrayantes récemment en raison de leurs avantages pour l'environnement et le fait que ceux-ci sont fabriqués à partir de ressources renouvelables. Les huiles végétales sont une source d'énergie renouvelable et d'énergie potentiellement inépuisable avec un contenu énergétique proche du gazole.

Une variété de biolipides peut être utilisée pour produire le biodiesel. Ce sont:

- (a) vierge charge d'huile végétale, les huiles de colza et de soja sont les plus couramment utilisées, mais d'autres cultures comme la moutarde, l'huile de palme, le tournesol, le chanvre et même des algues montre la promesse;
- (b) l'huile végétale usée;
- (c) les graisses animales y compris le suif, saindoux et graisse jaune et ;
- (d) les huiles non comestibles telles que le jatropha, huile de neem, huile de ricin, huile de pin, etc.



Figure II-1 : La distribution des sources MEAG dans le monde [LIN et al., 11].

II.3.1 Les huiles végétales et graisses animales comme source de biodiesel

Chimiquement parlant, les huiles végétales et les graisses animales sont des molécules de triglycéride dans lesquelles trois groupes acides gras sont des esters attachés à une molécule de glycérol [GUN et al., 01]. Les graisses et les huiles sont essentiellement des substances hydrophobes insolubles dans l'eau dans les royaumes des plantes et des animaux qui sont constitués d'une mole de glycérol et trois moles d'acides gras et sont communément appelés triglycérides [SON, 79].

Chimiquement, les graisses et les huiles sont des esters carboxyliques issus de la seule glycérine et sont connus sous forme de triglycérides. Les triglycérides proviennent de beaucoup d'acides carboxyliques différents. Les molécules de triglycéride diffèrent dans la nature de la chaîne d'alkyl attachée au glycérol. Les dimensions des acides divers varient de la graisse à la graisse; chaque graisse a sa composition caractéristique. Bien que considéré comme des esters de glycérol et d'un mélange variable des acides gras, ces huiles contiennent des acides gras libres et diglycérides.

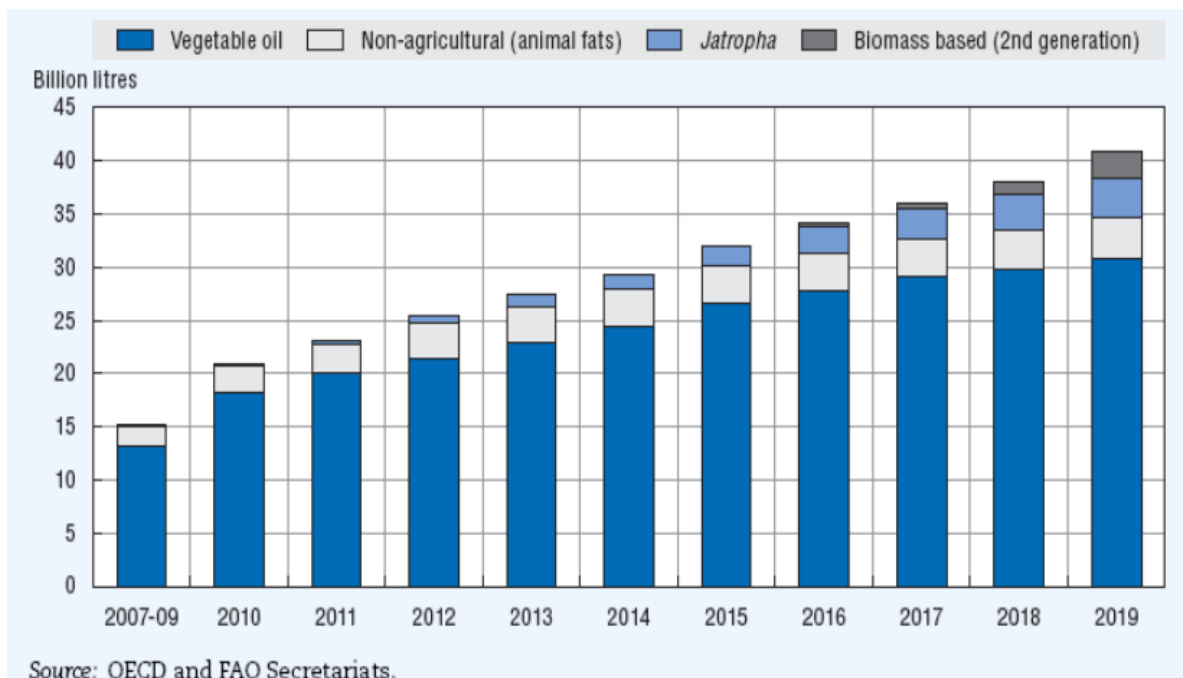


Figure II-2 : Les huiles végétales, la source majeure de la production du biodiesel (La production globale du biodiesel par source) [OEC, 10].

Tableau II.1 - La composition en acide gras du biodiesel préparé à partir de graisses animales (% du poids total) [BAR et al., 05].

source	14 :0	16 :0	16 :1	18 :0	18 :1	18 :2	18 :3	20 :0	20 :1	22 :0	24 :0	autre
huile de saumon	6.8	14.9	6.1	3.2	15.6	2.1	11.5	-	-	-	-	39.8
lard		26.4		12.1	44.7	12.7	1.0	-	-	-	-	3.1
Suif de bœuf	3.1	23.8	4.7	12.7	47.2	2.6	0.8	-	-	-	-	5.1
Graisse de poulet	0.7	20.9	5.4	5.6	40.9	20.5	-	-	-	-	-	6.0
Graisse jaune	2.4	23.2	3.8	13.0	44.3	7.0	0.7	-	-	-	-	-

II.3.2 Les huiles usagées

Les huiles alimentaires usagées pourraient être recyclées en les convertissant en savon par saponification ou bien les réutiliser comme lubrifiants ou comme fluides hydrauliques. Néanmoins, la production du biodiesel semblerait l'alternative la plus attractive pour le traitement des huiles usagées. Certes celles-ci ne résolvent pas le problème énergétique du fait que seul un faible pourcentage de la demande en diesel pourrait être couvert, mais cela

diminue la dépendance en énergie fossile tout en réduisant un problème écologique [NAG, 08].

Dans le but de réduire le coût de production, les huiles usagées pourraient être une meilleure source de matière première vu que son coût est faible comparé à celui des huiles végétales. La quantité des WCO générée par chaque pays est immense [BAL, 11].

II.3.3 Les microalgues

Des huiles microbiennes, également appelées les huiles unicellulaires, sont produites par quelques micro-organismes oléagineux, tels que la levure, les mycètes, les bactéries, et les microalgues [YL, 06]. La production de l'huile microbienne a beaucoup d'avantages : un cycle de vie court, moins de travail requis, ne dépend ni de la région, ni de la saison ou du climat [WAN et al., 97].

L'huile des microalgues est considérée comme une source de matière première majeure. Elle peut être produite rapidement pour satisfaire la demande. La densité énergétique est également élevée dans les algues comparées aux autres sources [CHI, 09]. Les algues sont un choix économique pour la production du biodiesel, en raison de sa disponibilité et de son faible coût [SHA, 08]. Les microalgues pourraient accumuler des acides gras jusqu'à 80% de leur matière sèche (MS), permettant d'envisager des rendements à l'hectare supérieurs d'un facteur de 30 comparées aux espèces oléagineuses terrestres. Un des éléments marquants qui caractérise les microalgues est leur rendement photosynthétique très élevé [CAD et al., 08].

Tableau II.2 - Comparaison des rendements en huile entre les microalgues et les cultures communes pour la production du biodiesel [KUK et al., 11].

Plante		Microalgues	Soja	Colza	Jatropha	Palmier
Rendement en huile	m ³ /Km ² /an	>15000	35-45	100-130	160	580
	Litre/ha	+ 36900 (a)	446	1190	1892	5950
		58700 (b)				
Rendement en énergie	Gj/Km ² /an	>500,000	1165-1500	3330-4330	5330	19315

(a) Teneur en huile de **70%** par poids de biomasse

(b) Teneur en huile de **30%** par poids de biomasse

Tableau II.3 - Rendements des Microalgues [ROS et al., 09].

Type de plante/système de production des Microalgues	Productivité annuelle mg/dm/ha
Plante C3	8-10
Plante C4	10-30
Les étangs ouverts raceway (roue de palette)	20
Réacteur tubulaire (mélange par l'air et CO ₂)	60
Réacteur tubulaire	80
Ecrans plats (inten.mixing.short light-dark periods)	100

II.3.4 Les lipides d'origine microbienne

Ces dernières années, l'exploration des huiles d'origine microbienne qui pourraient devenir une source potentielle en huile pour la production du biodiesel a suscité beaucoup d'intérêt. Cette huile pourrait être produite par les levures, les champignons, les bactéries et les Actinomycètes. Il a été démontré que de telles huiles constitueraient une matière première au même titre que les huiles végétales et les graisses animales. La production de l'huile microbienne présente plusieurs avantages par rapport aux autres sources à savoir un cycle de vie court, une moindre exigence en input, une indépendance par rapport aux conditions climatiques. Cependant, ce domaine n'en est encore qu'à ses débuts et plus de recherche est nécessaire pour améliorer la production et son efficacité [LIC, 10].

II.3.5 Biodiesel à partir de résidus agricoles

En considérant les résidus solides, le tabac (*Nicotiana tabacum*) offre un résidu issu de la production des feuilles du tabac. Le taux récolte/résidu est d'environ 1,2 d'où 0.833 Kg de graines est disponible comme résidu pour chaque kg de feuille produit [GOE et al., 09].

Comme l'huile des graines de tabac est une huile non comestible, elle n'est pas exploitée commercialement dans le secteur de l'industrie agro-alimentaire et peut offrir un débouché pour la filière biodiesel. Les graines du Cotton sont exploitées pour la production d'une huile commerciale dans quelques pays mais, dans la majorité des pays, ces graines constituent un résidu solide à cause de la présence de Gossypol qui est un agent toxique [UST, 05].

II.4 Les huiles végétales naturelles (pures) comme carburants

Les huiles végétales, constituées essentiellement de triglycérides, ont la structure chimique donnée par la Figure 1.4 et contiennent 98% de triglycérides et une faible quantité de mono et di-glycéride [BAL et al., 08]. Beaucoup de chercheurs ont conclu que les huiles végétales pourraient être employées en tant que carburant de substitution pour les moteurs diesel [SIN et al., 10]. De fait, Elles occupent une position prépondérante dans le développement des carburants alternatifs.

Cependant plusieurs problèmes associés à leurs utilisations directes dans les moteurs Diesel se sont posés, en particulier pour les chambres de combustion à injection direct [ENW et al., 09]. Ces problèmes sont dus à la masse moléculaire élevée des triglycérides, qui peuvent être résolus par modification chimique de ces huiles. Après modification, le produit obtenu (biodiesel) présente des caractéristiques comparables à celles du Petrodiesel [BAB, 03].

Tableau II.4 - Les propriétés physico-physiques des huiles végétales alimentaires [LAU et al., 10].

Propriété	Tournesol	Colza	Soja	palmier
Viscosité cinématique (mm ² /s; 40°C)	58	34	65	40
Densité (kg/m ³)	918	927	-	918
Indice acidité (mg KOH/g)	0.2	0.5	0.2	5.3
Teneur en eau (mg/Kg)	-	< 0.01	-	2.1
Point d'éclair (°C)	220	100	230	267
Degré d'insaturation	10	-	15	47
Indice d'iode (g de I ₂ /100 g d'huile)	-	105	-	52.4
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	40	-	40	-
Indice de cétane	37.1	39	37.9	42.0

II.5 Transésterification des huiles végétales

Nommée aussi alcoolyse, c'est la réaction entre un ester et un alcool conduisant à un ester différent [SCH et al., 87].

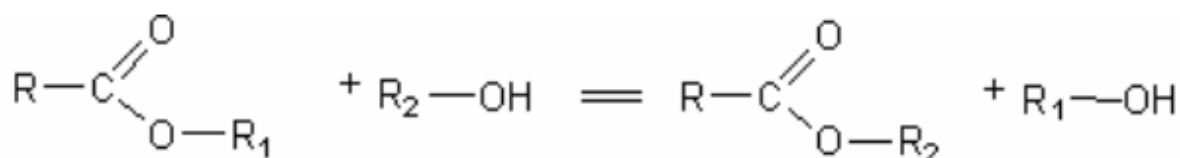


Figure II-3 : Réaction générale de la transestérification [SCH et al., 87].

Dans notre cas, il s'agit de la réaction entre le triglycéride contenu dans une huile végétale avec un alcool (Dans notre projet il s'agit du méthanol) pour former le glycérol et un mélange de monoesters utilisés comme biocarburant [MA et al., 99].

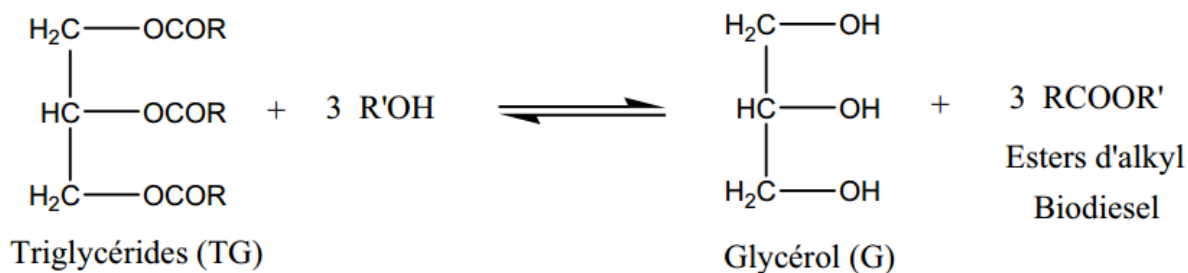


Figure II-4 : Réaction de transestérification des triglycérides avec l'alcool [MA et al., 99].

Elle est catalysée aussi bien par les acides que par les bases [ALL et al., 83]. Elle est favorisée par une augmentation de température, un excès d'alcool ou lorsque les conditions opératoires permettent la décantation du glycérol. Les détails de la réaction de transestérification et les procédés de production du biodiesel sont présentés dans la partie suivante.

II.5.1 Réaction de transestérification des huiles

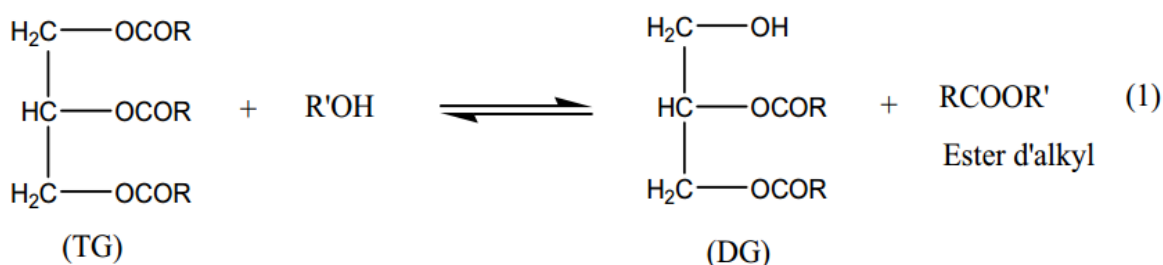
II.5.1.1 Historique

La transestérification des triglycérides n'est pas un processus nouveau. Elle date dès 1853 lorsque Patrick et Duffy ont mené cette réaction beaucoup d'années avant que le premier moteur Diesel soit fonctionnel [DEM, 08].

Cette réaction a été l'objet de recherches intensives grâce aux utilisations diverses de ces produits comprenant la synthèse des polyesters ou PET dans l'industrie des polymères [MEY, 99], la synthèse des intermédiaires pour l'industrie pharmaceutique [BAR et al., 02], le durcissement des résines dans l'industrie de peinture et dans la production du biodiesel en tant que alternatif du diesel.

II.5.1.2 Mécanisme de la réaction

La réaction de transestérification se fait en trois étapes successives :



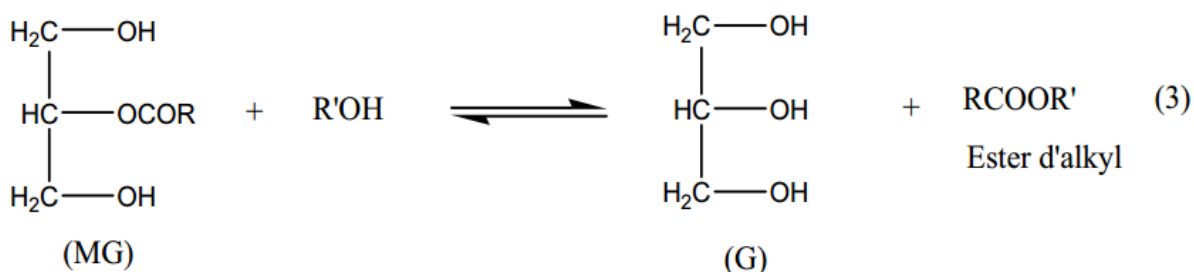
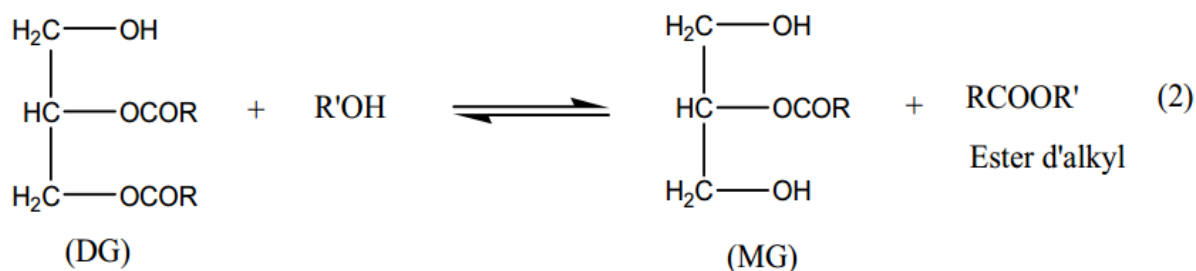
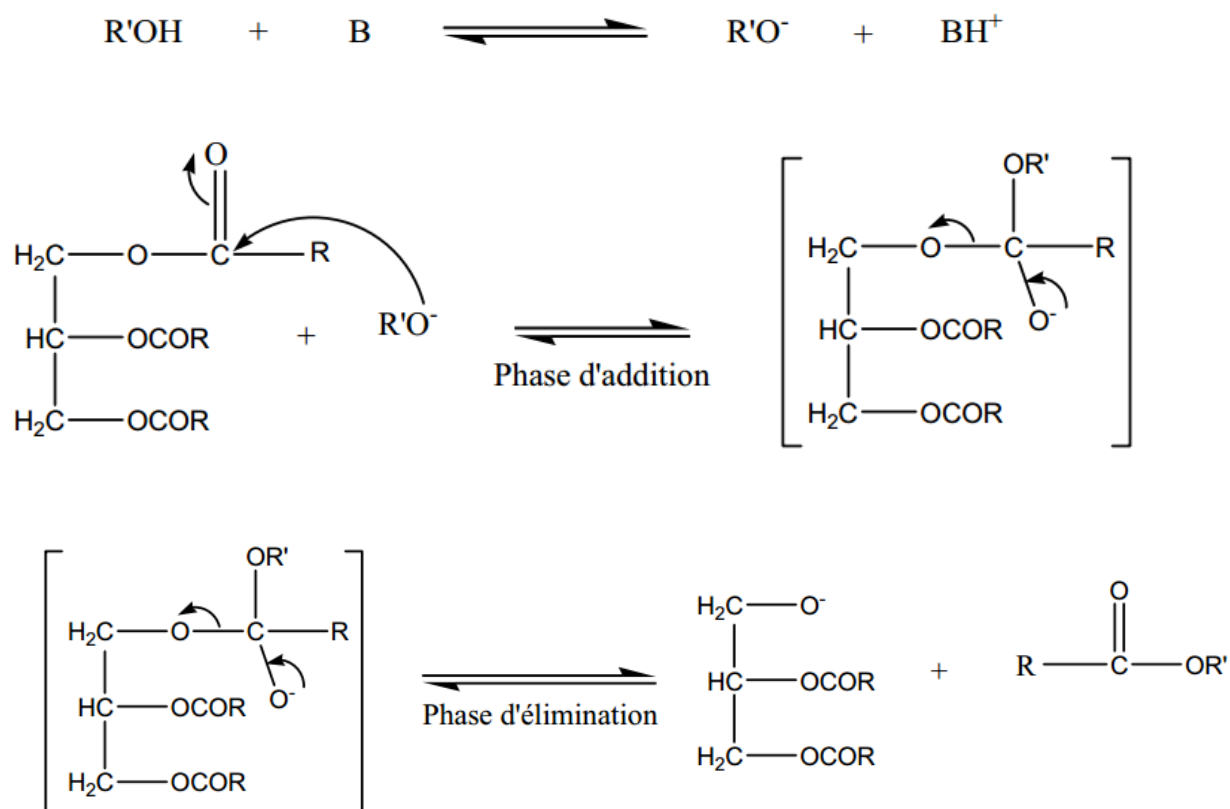


Figure II-5 : Réactions successives de la transestérification [FRE et al., 84].

La réaction de transestérification est chimiquement équilibrée. Les étapes (1) et (2) sont rapides car les fonctions esters primaires sont transestérifiées en premier, l'étape (3) est plus lente [FRE et al., 84 ; FRE et al., 86].

En catalyse basique, le mécanisme est le suivant [POR, 60] :



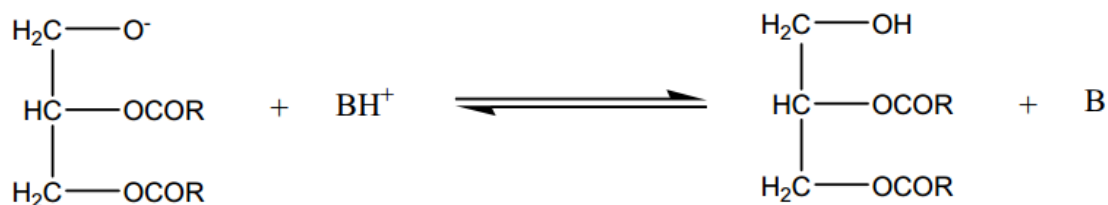


Figure II-6 : Mécanisme de la réaction de transestérification d'huile végétale par le méthanol catalysée par une base [POR, 60].

Il consiste d'abord en une attaque nucléophile du carbonyle (du triglycéride) par l'anion alcoolate pour former un carbanion intermédiaire (phase d'addition). Puis, 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. Avec le NaOH, le KOH, le K_2CO_3 ou d'autres catalyseurs similaires, l'alcoxyde formé est souvent identifié comme l'espèce catalytique [SRI et al., 74].

La troisième réaction (mono donne l'ester) semble être l'étape déterminante de la réaction car les monoglycérides sont des intermédiaires plus stables que les diglycérides [MA, 99 ; DEM, 09].

II.5.1.3 Paramètres importants de la réaction de transestérification des huiles

La transestérification des huiles végétales a été largement étudiée en milieu homogène par Bradshaw [BRA, 44], Freedman [FRE et al., 84], Schwab [SCH et al., 87] et Hanna [MA et al., 98] ... Ces études expliquent que cette réaction est influencée fortement par la nature du catalyseur (acide ou basique), la nature de l'alcool et de l'huile, le rapport molaire alcool/triglycérides, la température, la présence des acides libres et d'eau, la vitesse de l'agitation et le temps de la réaction. Cependant, beaucoup de recherches s'orientent actuellement vers la catalyse en milieu hétérogène.

II.5.1.3.1 Les types de catalyseurs

Il est admis que, dans le cas de la réaction de transestérification, la catalyse basique est beaucoup plus rapide que la catalyse acide. Ainsi, les temps de réaction varient de 3 à 48 heures avec un catalyseur acide, les réactions sont pour la plupart complètes au bout d'une heure avec un catalyseur basique [FRE et al., 84]. Cependant, dans le cas de la catalyse acide, une température élevée, permet d'accélérer la vitesse de réaction [FRE et al., 86].

1. Les catalyseurs basiques

Les travaux, au départ, ont été effectués en présence d'une catalyse basique. Les catalyseurs les plus utilisés furent NaOH, KOH et NaOMe dans des proportions voisines de 0,5 à 1 % de la masse totale et Na_2CO_3 [FRE et al., 84]. Les rendements obtenus sont de l'ordre de 95 à 99 % après une heure de réaction aux températures de reflux de l'alcool.

Selon Freedman, NaOMe est un catalyseur plus efficace que NaOH. L'étude comparative entre NaOMe et NaOH fait apparaître que 0,5 % de NaOMe donne les mêmes rendements que 1 % de NaOH lorsque le rapport molaire alcool/huile est de 3/1 et des rendements nettement supérieurs quand le rapport est de 6/1 [FRE et al., 84]. La principale cause de la supériorité du NaOMe sur le NaOH c'est qu'il génère moins d'eau. En effet, l'eau pourra hydrolyser ou saponifier les esters formés diminuant par la suite le rendement de la réaction.

Foon et al (2004) ont trouvé aussi que NaOH et NaOMe offrent tous les deux une bonne activité catalytique dans la méthanolyse de l'huile de palme (99 % de conversion) à 60°C pour un rapport molaire alcool/ huile de 10/1. Mais ils ont remarqué que pour une même concentration en catalyseur (0.125/kg), le début de la réaction évolue plus rapidement avec NaOMe qu'avec NaOH. De plus, dans le cas du NaOMe, ils obtiennent les mêmes rendements même avec un rapport de 6/1 [FOO et al., 04].

Vicente et al (2004) ont comparé des catalyseurs basiques homogènes (NaOH, KOH, NaOMe et KOMe) dans la méthanolyse de l'huile de tournesol. La pureté du biodiesel obtenu est de 100% pour tous les catalyseurs. Cependant seulement le méthoxyde offre un rendement de près de 100% en biodiesel. Selon Vicente, les pertes de rendement sont dues à la réaction de saponification des triglycérides et à la dissolution des esters méthyliques dans le glycérol [VIN et al., 04].

En 2006, Meneghetti et al. confirment les résultats de Vicente dans une étude qui a comparé la méthanolyse et l'éthanololyse de l'huile de ricin [MEN et al., 06].

Ma et al, en 1998, ont montré que NaOH est plus efficace que NaMeO [MA et al., 98]. Cela est en contradiction avec le rapport précédent de Freedman et al et de Hartman 1956 [HAR et al., 56]. Ma et al attribuent ces résultats à la différence dans le système de réaction utilisé. Kusy a comparé NaOEt à NaOMe en utilisant l'éthanol anhydre comme alcool dans la réaction. NaOMe apparaît comme étant plus actif car il permet d'augmenter le taux de conversion en esters de plus de 15 points [KUS, 82].

D'autres catalyseurs basiques ont été étudiés par Hartman comme K_2CO_3 , CaO, BaO et SrO ; 10 % K_2CO_3 (désactivée) donne apparemment d'aussi bons résultats que 0,5 % de NaOMe [HAR et al., 56].

2. Les catalyseurs acides

Les catalyseurs acides les plus utilisés sont les acides minéraux HCl, H₂SO₄, H₃PO₄ et les acides sulfoniques : l'acide para toluène sulfoniques [FRE et al., 84].

Freedman a remarqué que la transestérification en catalyse acide est 4000 fois plus lente qu'en catalyse basique [FRE et al., 84] et que les temps de réaction sont beaucoup plus longs. Ainsi pour une conversion supérieure à 99 %, la méthanolyse de l'huile de soja (à 65°C) en présence de 1% molaire de H₂SO₄, est complète après 50 heures de réaction ; la butanololyse (à 117°C) et l'éthanololyse (à 78°C), avec les mêmes quantités de catalyseur et d'alcool,

s'effectuent après 3 à 18 heures respectivement [FRE et al., 86]. Il a remarqué que la réaction est plus rapide quand la chaîne de l'alcool est plus longue. Le fait que la butanolyse soit plus rapide que l'éthanololyse et la méthanololyse résulte non seulement d'une température plus élevée mais d'une plus grande solubilité du butanol dans l'huile en début de réaction. Il est évidemment préférable de prendre une stoechiométrie alcool/triglycérides supérieure à trois.

Malgré que la catalyse basique soit beaucoup plus rapide que la catalyse acide, cependant beaucoup d'études notent que le choix du catalyseur peut être judicieux si l'huile végétale ou la matière grasse utilisée contient une forte proportion d'acides libres. Ces derniers peuvent détruire le catalyseur basique en réagissant avec pour former des savons ; tandis qu'un catalyseur acide peut en même temps réaliser la transestérification des triglycérides et l'estérification des acides libres présents en augmentant ainsi la conversion [KEI, 43]. Meneghetti et al [MEN et al., 06]. Des conditions plus sévères de température et de pression seront appelées alors pour accélérer la vitesse de la réaction [ALL, 43]. Les catalyseurs acides sont rarement utilisés du fait de leur moindre réactivité et des risques élevés de corrosion des installations industrielles.

3. Les enzymes

La réaction de transestérification des huiles végétales par catalyse enzymatique a connu un grand essor ces dernières années. En effet, les enzymes possèdent plusieurs avantages :

Elles sont biodégradables, sélectives [SHI et al., 07], ce qui permet d'augmenter les rendements de la réaction tout en diminuant la production des sous-produits de la réaction. Les conditions de la réaction sont relativement douces (température et pression basses) ce qui diminue le prix en terme d'énergie et d'équipements et tend vers des coûts de gaspillage plus faibles. Dans le cas de la catalyse enzymatique on n'a ni le problème des acides libres ni la sensibilité à l'eau ; on peut bien travailler dans un milieu aqueux ou non aqueux. Notons bien que l'enzyme peut être immobilisée sur un support, [SHI et al., 07].

Mais la catalyse enzymatique est dotée de certains inconvénients : en effet, l'enzyme est trop chère (par exemple la lipase est plus cher qu'un catalyseur basique) et possède une activité instable. La réaction est trop lente [SHI et al., 07] et est donc limitée industriellement car elle dure entre 4-16 h pour atteindre une conversion de 95 %.

Cependant, des études sont effectuées dans le but de recycler l'enzyme vu son prix élevé. On citera en particuliers les recherches faites sur l'immobilisation de l'enzyme sur un support. L'activité de l'enzyme est inhibée par le méthanol et le glycérol présents dans le milieu réactionnel. D'où l'idée de rajouter un solvant, le tert-butanol afin d'éliminer à fur et à mesure le glycérol qui vient s'adsorber sur l'enzyme. Le méthanol est ajouté par étape au milieu réactionnel. Cela réduit les effets inhibiteurs augmentant de ce fait la rentabilité du processus.

La production enzymatique est possible en utilisant la lipase intra et extracellulaire.

II.6 Les caractéristiques techniques du Biodiesel (MEAG)

L'introduction et la commercialisation du biodiesel dans plusieurs pays dans le monde sont accompagnés par le développement des normes pour contrôler la bonne qualité du produit et assurer la confiance du consommateur. Les normes les plus citées sont ASTM D6751 et la norme européenne EN 14214 [GER et al., 05].

Tableau II.5 - Standards ASTM D6751 du Biodiesel (USA) [BAB, 03].

Propriété	Méthode de test	Limite	Unité
Point d'éclair	D 93	130.0 min	°C
Densité	-	870 – 900	kg/m ³
Eau et résidus	D 2709	0.050 max	% volume
Viscosité cinématique (40°C)	D 445	1.9– 6.0	mm ² / s
Cendre sulfaté	D 874	0.020 max	% mass
soufre	D 5453	0.0015 max or 0.05 max	% mass
Test de corrosion à la lame de cuivre	D 130	No. 3 max	-
Indice de cétane	D 613	47 min	
Point de trouble	D 4530	-3 à 12	° C
Résidu en carbone	D 664	0.050 max	% mass
Indice d'acidité	D 6584	0.80 max	mg KOH/g
Glycérol	D 6584	0.020 max	% mass
Glycérol total	D 4951	0.240 max	% mass
Teneur en phosphore	D 4951	0.001 max	% mass
Température de distillation	D 1160	360 max	°C

Tableau II.6 - Standards du Biodiesel EN 14214 (Europe) [BAB, 03].

propriété	Méthode de test	limite		unité
		min	max	
Teneur en ester (MEAG)	EN 14103	96.5	-	%
Densité (15°C)	EN ISO 3675 EN ISO 12185	860	900	Kg/m ³
Viscosité cinématique (40°C)	EN ISO 3104 ISO 3105	3.5	5.0	mm ² /s
Point d'éclair	EN ISO 3679	120	-	°C
Teneur soufre	EN ISO 20846 EN ISO 20884	-	10.0	%
Résidus en carbone 10% disti.Resi.	EN ISO 10370	-	0.30	%
Indice de cétane	EN ISO 5165	51	-	-
Cendre sulfate	ISO 3987	-	0.02	-
Teneur en eau	EN ISO 12937	-	500	mg/kg
Contamination totale	EN 12662	-	24	Mg/kg
Corrosion à la lame de cuivre	EN ISO 2160	-	1	-
Stabilité oxydative	EN 14112	6.0	-	-
Indice d'acidité	EN 14104	-	0.50	hr
Indice d'iode	EN 14111	-	120	mg KOH/g
Teneur en acide linoléique	EN 14103	-	12	gI ₂ /100g
Teneur en MEAG avec 4% de double liaison	-	-	1	%
Teneur en méthanol	EN 14110	-	0.20	%
Teneur en Monoglycerides	EN 14105	-	0.80	%
Teneur en Diglyceride	EN 14105	-	0.20	%
Teneur en triglycéride	EN 14105	-	0.20	%
Glycérine libre	EN 14105, EN 14106	-	0.02	%
Glycérine total	EN 14105	-	0.25	%
Métaux alcalinNa+K	EN 14108, EN 14109	-	5.0	%
Métaux alcalin terreaux (Ca +Mg)	prEN 14538	-	5.0	Mg/kg
Teneur en phosphore	EN 14107	-	10.0	Mg/kg

II.7 Avantages et inconvénients du Biodiesel

Les avantages du biodiesel comme gazole sont la portabilité liquide de nature, la disponibilité, renouvelable, l'efficacité de combustion plus élevée, faible teneur en soufre et le contenu aromatique [MA et al., 99 ; KNO et al., 06] indice de cétane supérieur et de la biodégradabilité supérieure [MUD et al., 99 ; SPE et al., 00 ; ZHA et al., 03]. Les Principaux avantages du biodiesel donnés dans la littérature comprennent l'origine nationale, réduisant la

dépendance au pétrole importé, la biodégradabilité, un point d'éclair élevé et un pouvoir lubrifiant inhérent à l'état pur [MIT et al., 04 ; KNO et al., 05].

II.7.1 Disponibilité et renouvellement de biodiesel

Le biodiesel est le seul carburant de remplacement ainsi que la faible concentration de biodiesel-diesel mélange peut fonctionner sur des moteurs conventionnels non modifiés. Il peut être stocké n'importe où, où le gazole de pétrole est stocké. Le biodiesel peut être fabriqué à partir de produits dans le pays, les cultures oléagineuses renouvelables telles que le soja, le colza et le tournesol. Les risques de manutention, le transport et le stockage de biodiesel sont beaucoup plus faibles que ceux-là, associés avec du pétrodiesel. Le biodiesel est sûr à manipuler et à transporter car il est aussi biodégradable que le sucre et a un point d'éclair élevé par rapport au gazole de pétrole. Le biodiesel peut être utilisé seul ou mélangé dans un rapport quelconque avec le gazole de pétrole. Le mélange le plus courant est un mélange de 20% de biodiesel et 80% de diesel, ou B20 dans des études scientifiques récentes, mais en Europe, la réglementation actuelle prévoit un maximum de 5,75% de biodiesel.

II.7.2 L'efficacité de combustion plus élevée de biodiesel

La teneur en oxygène du biodiesel permet d'améliorer le processus de combustion et diminue son potentiel d'oxydation. Le contenu d'oxygène structurel d'un carburant améliore l'efficacité de combustion en raison de l'augmentation de l'homogénéité d'oxygène avec le carburant pendant la combustion. Ainsi l'efficacité de combustion de biodiesel est plus haute que le pétrodiesel aussi bien que l'efficacité de combustion de méthanol/éthanol est plus haute que celle d'essence. Une inspection visuelle des types d'injecteurs n'indiquerait aucune différence entre les carburants biodiesel lors d'essais sur le pétrodiesel. Le biodiesel contient 11% d'oxygène en poids et ne contient pas de soufre. L'utilisation de biodiesel peut prolonger la durée de vie des moteurs diesel parce qu'il est plus lubrifiant que le gazole de pétrole. Le biodiesel a obtenu de meilleures propriétés lubrifiantes que pétrodiesel.

Les valeurs de chauffage plus élevés (HHVs) de biodiesels sont relativement élevés. Les HHVs de biodiesels (39-41 MJ / kg) sont légèrement inférieures à celle de l'essence (46 MJ / kg), pétrodiesel (43 MJ / kg) ou le pétrole (42 MJ / kg), mais supérieur à celui du charbon (32-37 MJ / kg).

II.7.3 Une diminution des émissions par l'utilisation du biodiesel

La combustion de biodiesel seul, fournit une réduction de 90 % du total des hydrocarbures non brûlés (HC), et une réduction de 75-90% des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Le biodiesel prévoit en outre des réductions significatives de particules et de monoxyde de carbone que le gazole de pétrole. Le biodiesel offre une légère augmentation ou diminution des oxydes d'azote selon la famille de moteur et des procédures de test.

En revanche les inconvénients techniques du biodiesel incluent des problèmes :

(1) de comportement du carburant au froid ;

(2) la densité d'énergie réduite ;

(3) la dégradation du carburant durant le stockage pendant des périodes prolongées [KAH, 08].

II.8 Conclusion

En conclusion, il est aujourd'hui bien démontré que l'usage des biodiesels en substitution aux carburants conventionnels permet de réduire les émissions de GES et les consommations d'énergies non renouvelables, tout en offrant des possibilités de développement des activités agricoles. Il s'agit des principaux arguments en faveur de leur usage à grande échelle : utilisés purs, ils peuvent induire un gain en termes de rejet de GES pouvant aller jusqu'à 80-90 % pour les filières les plus efficaces. Ce gain est d'ailleurs du même ordre de grandeur en termes de consommation d'énergie fossile. Dans le contexte actuel qui veut que les biodiesels soient le plus souvent utilisés en mélange à des teneurs relativement faibles, le bénéfice global, en termes d'effet de serre, peut apparaître faible : gain en termes d'émissions inférieur à 5 % pour des taux d'incorporation des biodiesels dans les biodiesels traditionnels de 5 à 10 %. Mais, si ces chiffres paraissent faibles en première approche, il est important de souligner qu'ils peuvent être obtenus dans un secteur dont la croissance est très difficile à maîtriser et pour lequel les solutions offrant le même bénéfice dans un temps relativement court sont peu nombreuses. Les biodiesels ne représentent pas La SOLUTION au problème d'émissions de gaz à effet de serre du secteur transport, mais un ELEMENT DE SOLUTION qui, combiné à d'autres (évolution des technologies moteur, évolution des comportements, etc.), peut apporter un début de réponse.

Chapitre III

Impact d'une Filière de Biodiesel

*Afin qu'une lampe continue de brûler,
il faut y ajouter de l'huile.
Mère Teresa, 1979*

III.1 Introduction

La filière biodiesel projetée doit avoir des impacts et des retombées bénéfiques. En particulier, la filière pourrait faire partie intégrante de projets de reboisement (impact écologique) pour lutter contre l'érosion des sols. De surcroît, les déchets et résidus de graines devraient être valorisés comme fertilisants pour des terres peu fertiles en régions déshéritées. La filière devrait créer de débouchés pour la population locale en termes d'activités agricoles et industrielle (extraction de l'huile) (impact social).

D'autres impacts sont également attendus : politique (autosuffisance énergétique), économique (économies sur les carburants conventionnels) pour ne citer que ceux-là.

III.2 Aspects écologiques

III.2.1 Protection du sol contre l'Erosion

III.2.1.1 Erosion hydrique

Le mulching par des résidus des cultures a de nombreux effets bénéfiques sur la qualité du sol. Ces résidus protègent le sol contre l'impact des gouttes des pluies et la litière formée par les résidus réduit les pertes indirectes du sol en limitant la dégradation de la structure du sol et donc une réduction de l'érosion hydrique en nappe du sol [LIC, 10]. *J. curcas* [LIC, 10], *Moringa oleifera* [UME et al., 08], *S. chinensis* [ELB, 10] *Euphorbia lathyris* [PAR et al., 05] pourraient être cultivées dans des régions à faible pluviométrie, sur des terres marginales de faible fertilité ce qui assurerait une protection du sol contre l'érosion.

III.2.1.2 Erosion éolienne

L'érosion éolienne et les tempêtes de sable ont pu également être réduites considérablement par la reconstruction d'écosystème de terres dégradées marginales, en particulier dans des régions sèches. D'après certaines recherches, une plantation de *Caragana intermediade* de 5 ans pourrait assurer une couverture de 80%, ce qui mène à réduire les pertes des eaux de surface de 75%, et une réduction d'érosion du sol de 65-70% [CHE, 06].

III.2.2 Amélioration de la fertilité du sol

La fonction écologique de la conservation SOL-EAU pourrait résulter de la protection de la surface du sol, et de l'amélioration de la structure du sol suite au développement du système racinaire et à l'accumulation de la matière organique. [CHE, 06]. L'agroforesterie a une importante incidence sur les propriétés physicochimiques du sol, les cycles biogéochimiques des éléments minéraux et sur le stockage du carbone et de l'azote dans le sol à long terme. Ces processus sont contrôlés par plusieurs paramètres édapho-climatiques, la nature de la litière et l'activité biologique du sol [RAM, 10].

En revanche, le défrichage des terres pour la plantation de Palmier à huile (*Elaeis guineensis*) est l'une des causes de déboisement [HOO et al., 06]. La qualité du sol des forêts tropicales peut être endommagée irréversiblement par la destruction de l'activité biologique du sol et le lessivage des éléments minéraux due aux précipitations torrentielles et aux inondations [MCC, 13].

III.2.3 Séquestration de carbone

L'argument principal derrière les politiques en faveur des biocarburants est basé sur l'idée que ceux-ci n'augmentent pas la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. En fait, la quantité de CO₂ émise par le biodiesel pendant la phase de combustion est supposée identique à celle absorbée par la photosynthèse durant la croissance de la plante, ce qui conduit à un bilan neutre de carbone [RUS, 08].

Par exemple, chaque hectare de *R. communis* et de *J. curcas* [ARI et al., 09] contribue à l'absorption de 10 t de CO₂ chacun ce qui est 4 fois plus que la moyenne des autres plantes oléagineuses [RAT et al., 10].

La séquestration du carbone organique du sol (SOC) est influencée par le mode de conduite des cultures, avec une incidence sur la quantité et la qualité des résidus restitués au sol et sur son taux de décomposition. Les cultures ont des exigences différentes en ce qui concerne les intrants énergétiques pendant la plantation, les labours, la fertilisation, l'application des pesticides et la récolte [RAT et al., 10]. Le potentiel de séquestration de CO₂ par les espèces pérennes à graine est 300 à 1100 kg/ha/an contre 0 à 450 kg/ha/an pour les espèces annuelles [LIC, 10].

III.2.4 Fixation d'azote

Autant pour les systèmes de production pour l'alimentation autant que pour les cultures bioénergétiques, la nutrition azotée des cultures est une pratique agronomique-clé pour améliorer la productivité et les revenus économiques [LIC, 10]. Ainsi, *L. leucocephala* est capable de fixer une quantité d'azote pouvant atteindre 500 kg/ha/an [ELB, 10].

III.2.5 Biodiesel et la biodiversité

Le biodiesel a un effet significatif sur l'environnement dans le Sud-est d'Asie causée principalement par le changement de l'utilisation des terres pour cultiver des espèces oléagineuses (*J. curcas*, le palmier à huile). Les augmentations des surfaces de plantation du palmier (*Elaeis guineensis*) peuvent mener à la disparition des forêts tropicales, particulièrement dans Sud-Est d'Asie [JAY et al., 09]. Une protection de la faune et de la biodiversité serait également remise en cause [ELB, 98].

III.2.6 Biodégradabilité du Biodiesel

Le biodiesel est non toxique et se dégrade 4 fois plus rapidement que le petrodiesel. La présence de l'oxygène dans sa structure chimique améliore le processus de la dégradation conduisant à une diminution du niveau de la biodégradation [DEM, 07].

Tableau III.1 - La biodégradabilité du pétrole et les biocarburants [DEM, 07].

Carburant	Dégradation dans 28 jours (%)
Essence (91 octane)	28
Carburant lourd	11
Huile raffinée de colza	78
Huile raffinée de tournesol	76
FAME de colza	88
FAME de tournesol	90

III.2.7 Bilan énergétique

Afin d'estimer la séquestration de GES permis par le biodiesel, la première étape consiste à calculer le retour sur l'investissement d'énergie (Energy Return on Investement EROI (énergie output / indirecte + direct énergie input), ratio qui doit être supérieur à un. [RUS, 08]).

Cependant quelques études montrent que la production du biodiesel à partir d'une matière biologique est associée à un bilan énergétique négatif, autrement dit la production exige plus d'énergie que ne procure le carburant, ce qui est équivalent comme un gaspillage énergétique. Cette approche est basée sur une analyse économique qui prend en considération les dépenses énergétiques pour la production du biodiesel. Ceci inclut l'énergie de conversion de la matière première mais aussi, celle employée pour la construction de l'infrastructure pour la production, la culture (irrigation, fertilisation, pesticide), le travail et le transport du carburant. Le bilan énergétique du biodiesel à partir du soja et du tournesol est de -27% et -118% respectivement [VER, 08].

Tableau III.2 - Coefficient énergétiques des intrants agricoles [EKK et al., 03].

Intrant		Coefficient énergétique
Energie directe	Diesel	47.82 MJ/Kg
	Electricité	11.39 MJ/KWh
Les fertilisants	Urée	59.07 MJ/Kg
	Sulfate d'ammonium	17.41 MJ/Kg
	Triphosphate (TSP)	43.83 MJ/Kg
Potasse	40% de K ₂ O	12.99 MJ/Kg
Pesticide	Matière active	274.46 MJ/Kg

III.2.8 Réduction des émissions des GES

L'utilisation du Biodiesel dans un moteur diesel conventionnel réduit sensiblement les émissions des hydrocarbures non brûlés, de dioxyde de carbone, des sulfates, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des hydrocarbures aromatiques polycycliques nitrates (HAPN) et des particules (PM). Ces réductions augmentent à mesure que la quantité de biodiesel mélangée dans le carburant diesel augmente. Les meilleures réductions des émissions sont obtenues avec B100. Le biodiesel ordonné (biodiesel 100%) réduit des émissions de CO₂ de plus de 75% au-dessus du diesel de pétrole. En utilisant un mélange à 20% le biodiesel on réduit des émissions de CO₂ de 15% [BAL, 05].

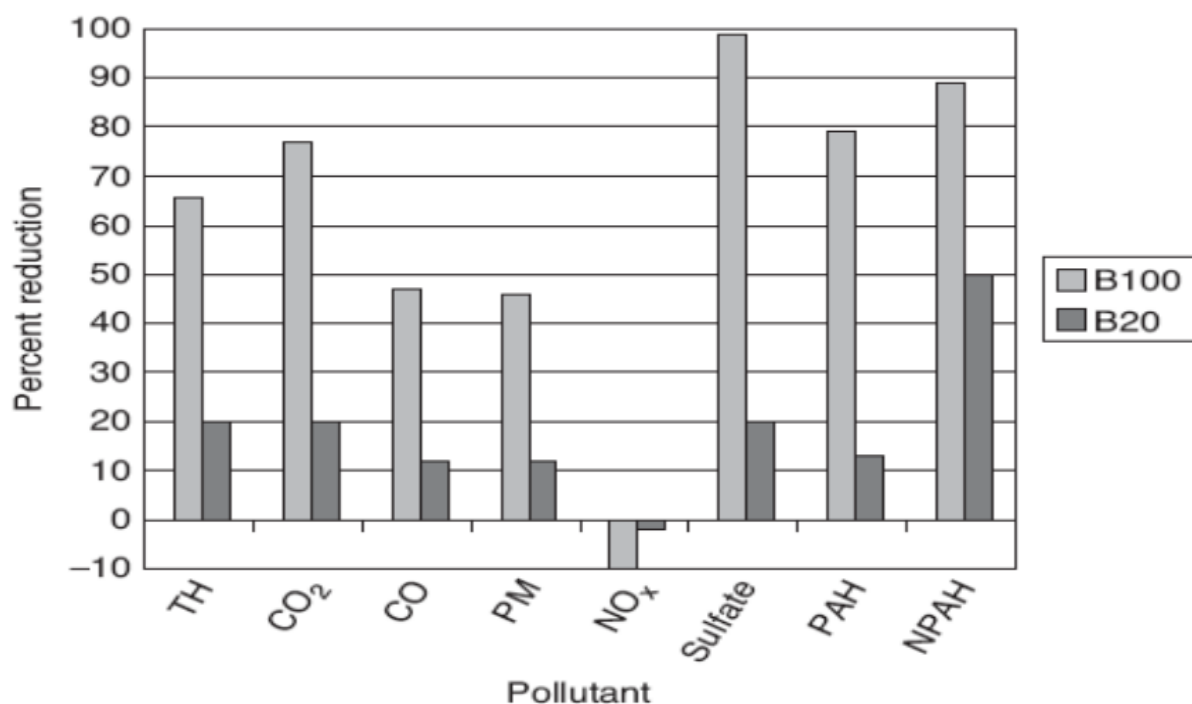


Figure III -1 : Réduction des émissions en polluants pour B100 et B20 [CAY et al., 08].

III.3 Les impacts socio-économiques

III.3.1 Le développement rural

Un des arguments les plus importants des promoteurs des biocarburants est qu'une politique à grande échelle bénéficierait considérablement au secteur rural. La combinaison des incitations aux fermes énergétiques, à la Détaxation et aux engagements de biocarburant peut apporter une opportunité au secteur rural. En outre, il est possible de prédire l'augmentation à l'avenir des prix des matières premières en raison de la demande croissante [RUS, 08]. Ces dernières contribuent à l'amélioration des structures économiques régionales, et aussi à la création de l'emploi rural [ZEG et al., 11]. Comme exemple, le *Jatropha* pourrait se croître sur des terres marginales, ou se trouve souvent une population déshéritée, il est prévisible d'avoir un impact social positif par l'attraction des investissements gouvernementaux, la

stabilisation de la population rurale, l'approvisionnement en énergie et une source de revenu [MIC, 09].

III.3.2 Disponibilité des terres

La disponibilité des terres est un facteur limitant pour la production des biocarburants [HUN, 09]. La production des biocarburants à grande échelle implique des exigences en terres pour la production de la matière première. Les biocarburants liquides peuvent donc être prévus pour remplacer les combustibles fossiles pour le transport à un degré très limité. Quoique les biocarburants liquides, fournissant seulement une petite part des besoins énergétiques globaux, ont toujours le potentiel d'avoir un effet significatif sur l'agriculture globale et les marchés agricoles, en raison du volume de matières de base et les terres relatives requises pour leur production [OEC, 10].

D'après les données de production et de rendement disponibles, la production d'une tonne de biodiesel exige une surface de 2,67 ha pour le soja, 1ha pour le colza et 0,14 ha pour le palmier à huile (*E. guineensis*) [GUN, 04].

III.3.3 Ressources en eau

La pression sur l'approvisionnement en eau est en augmentation à l'échelle mondiale à cause de la croissance démographique, la concentration des populations dans les villes, les changements climatiques, les désastres naturels, la pauvreté, les guerres tout en ajoutant, les besoins en irrigation dus à l'extension de l'agriculture. L'extension des biocarburants pourrait concurrencer les autres usages de l'eau ce qui accentuerait sa pénurie. La demande en eau des biocarburants dépend des besoins d'irrigation des cultures bioénergétiques. Par ailleurs, la production de la matière première n'est pas le seul processus consommateur d'eau [PIN et al., 08].

III.3.4 Sécurité énergétique

Les analystes préviennent que la consommation globale en pétrole continuera à augmenter pour passer dans les 30 ans avenir de 85 Mb/j en 2006 à 118 Mb/j en 2030 et que le Peakoil serait atteint entre 2010 et 2020. L'instabilité politique dans les régions pétrolière, la diminution des approvisionnements et l'augmentation des prix du pétrole ont incités de nombreux pays à diversifier leurs bouquets énergétiques. Les biocarburants pourraient diminuer la dépendance en pétrole et sont considérés comme une énergie alternative propre et qui contribue à la sécurité énergétique tout en respectant l'environnement [PIN et al., 08].

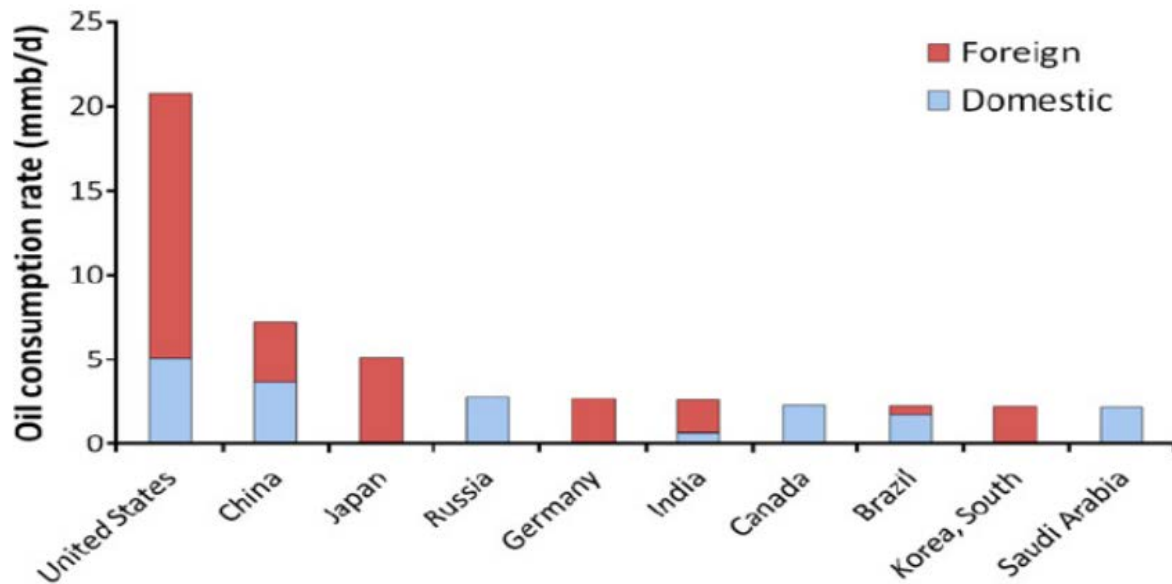


Figure III -2 : La consommation en pétrole de quelque pays dans le monde [PIN et al., 08].

III.3.5 Toxicité

Il y a des soucis justifiés en ce qui concerne la toxicité de l'espèce *Jatropha*, due à la présence d'esters de Phorbol dans le biodiesel et ses coproduits. La détoxification du biodiesel ou des coproduits et le traitement des graines ajouteront un surcoût dans la production du biodiesel. La présence de composés toxiques et des facteurs anti-nutritifs dans ces espèces ne signifie pas automatiquement leur non utilisation [RAZ, 09].

Les graines de *R. communis* contiennent aussi une toxine : la ricine. L'accumulation de celle-ci débute une journée après la pollinisation et augmente rapidement jusqu'à la maturation de la graine pour être dégradée presque totalement 6 jours après la germination. Le poids moléculaire de la ricine est 6.6 kDa c'est une glycoprotéine formée de léctines qui bloque la synthèse protéique par inactivation des fonctions du ribosome. La dose létale pour l'homme est estimée à 1-20 mg de ricine/kg du poids vif (9 graines). Un autre alcaloïde (ricinine) se rencontre dans les feuilles de *R. communis*. Il provoque des convulsions [MAS et al., 10].

Tableau III.3 - Différentes substances toxiques rencontrées dans les espèces oléagineuses non alimentaires

Espèce	Métabolite secondaire
<i>Jatropha curcas</i>	Curcine, latex (ester de Phorbol) [MAS et al., 10].
<i>Recinus commmunis</i>	Récine, récinine [MAS et al., 10].
<i>Azadirachta indica</i>	Azadirachtine [SAT et al., 10]
<i>Leucena leucocephala</i>	Acide aminé de mimosine [NAG, 08].
<i>Calophyllum inophyllum</i>	Saponine [KUM, 11].

III.4 Conclusion

Le monde continue toujours à chercher l'énergie pour satisfaire ses besoins sans rendre compte des considérations due aux conséquences des impacts environnementaux et socioéconomiques. Les approches actuelles de l'énergie sont non renouvelables et non durables. La maîtrise d'une filière de production du biodiésel pourrait conduire à des conséquences positives sur l'environnement par la reconstruction d'un écosystème par le reboisement et l'amélioration de la fertilité organique et minérale du sol à court et à long terme tout en prenant en compte le facteur biodiversité. Tout cela conduit à l'augmentation de la bio-capacité ainsi qu'à la diminution de l'empreinte écologique.

La minimisation des apports des fertilisants chimiques par le recyclage des résidus des cultures sous forme d'amendement organique, et l'utilisation des espèces fixatrice de l'azote atmosphérique, améliore la compatibilité environnementale, en diminuant les émissions des GES et socioéconomique de la production des biocarburants.

La toxicité des espèces énergétiques pourrait conduire à des effets négatifs sur la santé humaine. Cependant, il est possible d'exploiter ces substances naturelles (métabolites secondaires) comme des biopesticides pour la protection phytosanitaire des cultures tout en évitant le recours à des substances de synthèse nuisibles sur les écosystèmes.

En outre, l'énergie est directement liée aux problèmes sociaux les plus critiques qui affectent le développement durable : pauvreté, travail, niveaux de revenu, accès aux Services Sociaux, disparité de genre et autre. Plus de deux milliards de personnes, sont des ruraux, qui n'ont pas aucun accès aux sources d'énergie modernes. Un système de production Alimentation-Energie (Agroforesterie) pourrait être considéré l'une des meilleures approches pour améliorer la sécurité nationale en alimentation et en énergie tout en assurant une bonne efficacité d'utilisation des ressources disponibles via l'exploitation des coproduits par la gazéification et la méthanisation [BOG et al., 10].

Chapitre IV

Le Tournesol

*Pour récolter plus de roses,
il suffit de planter plus de rosiers
George Eliot*

IV.1 Introduction

Le tournesol est originaire d'Amérique du Nord. C'est au XVI^e siècle que les Espagnols le ramenèrent en Europe où son huile ne commença à être utilisée dans l'alimentation humaine qu'au XIX^e siècle, particulièrement en Russie. C'est dans ce pays que la sélection commença à être la plus active : ses chercheurs firent passer la teneur en huile de la graine de 25 % à 40 % en quelques décennies. Depuis les années 60, le tournesol a conquis bien d'autres pays dont ceux d'Europe de l'Ouest.

IV.2 Description générale, culture et utilisation

Le genre *Helianthus* fait partie de la tribu des Hélianthées à l'intérieur de la famille des Composées. Il comprend à la fois des espèces annuelles et vivaces. L'espèce cultivée, *H. annuus*, est mieux connue sous le nom de tournesol. Dans la nature, il existe des espèces sauvages qui lui sont étroitement apparentées.

L'espèce cultivée, *H. annuus*, telle que décrite par Heiser (1978) et Seiler (1997) est pour l'essentiel une plante de forte taille, mais des variétés dont la taille varie de 50 à 500 cm ont aussi été mises au point. Les tiges sont normalement non ramifiées (simples) et, comme la plupart des autres parties de la plante, elles peuvent varier de glabres à très densément pubescentes. La longueur de la tige est déterminée par le nombre d'entre-noeuds. Les premières feuilles sont toujours opposées mais, chez certaines variétés, les suivantes deviennent alternes. Les feuilles sont habituellement pétiolées et trinervées; leur forme varie de linéaire à ovée, et elles sont généralement entières ou dentelées. L'intensité de la couleur peut varier de vert pâle à vert foncé. Les capitules sont radiés, et les fleurs ligulées sont neutres ou pistillées. Ils sont généralement de grande taille et jaunes, mais leur couleur peut varier de jaune citron à orangé ou rougeâtre. L'inflorescence est un capitule, ce qui est une caractéristique de la famille des Composées. Celui-ci comprend de 300 à 1000 fleurs, mais ce chiffre pourrait être plus élevé chez les cultivars non oléagineux. Les fleurs tubuleuses situées le plus près du pourtour du disque s'ouvrent les premières, à peu près en même temps que les fleurs ligulées (ou fleurons), qui sont d'abord repliées contre les bourgeons des fleurs tubuleuses. Des cercles successifs comprenant de un à quatre rangs de fleurs tubuleuses s'ouvrent chaque jour pour une période de 5 jours ou plus [ASS, 06].

L'orientation du capitule est variable. Il en va de même de sa forme, qui peut être concave, convexe ou plate. L'akène, ou fruit du tournesol, se compose d'une graine, parfois appelée amande, et d'un péricarpe non adhérent, aussi appelé coque ou écale. À défaut de fécondation, les akènes demeurent vides, sans graine. Leur taille peut varier, la longueur allant de 7 à 25 mm et la largeur, de 4 à 13 mm. Quant à leur forme, elle peut être linéaire, ovale ou presque ronde. En Amérique du Nord, le tournesol a surtout été cultivé à l'origine pour l'ensilage et, dans une mesure moindre, comme source de grains à picorer pour la volaille. Ce n'est qu'après sa réintroduction à partir de Russie qu'on s'y est intéressé comme culture oléagineuse potentielle. Sa bonne résistance à la sécheresse et sa sensibilité aux maladies en particulier à la sclérotiniose, fait que les régions les plus sèches se prêtent bien à sa culture. Le

tournesol est d'abord cultivé pour ses graines, qui représentent l'une des plus importantes sources d'huile alimentaire au monde. Plusieurs facteurs expliquent que l'huile de tournesol soit considérée comme une huile de première qualité : couleur pâle, forte teneur en acides gras non saturés, absence d'acide linoléique et de gras trans, saveur neutre, forte résistance à l'oxydation et point de fumée élevé [ASS, 06].

IV.3 Centre d'origine de l'espèce



Figure IV-1 : Tournesol [ASS, 06].

L'*Helianthus annuus* L. est originaire d'Amérique du Nord. Les espèces sauvages voisines et les autres espèces du genre *Helianthus* sont répandues partout dans les plaines centrales du Canada, du nord au sud. Heiser (1954) en dénombre 67 espèces, mais on peut se demander si elles sont toutes distinctes, car le phénomène d'hybridation a été attesté. Selon les données archéologiques, il semble que cette plante ait été domestiquée dans la partie centrale des États-Unis. Le genre compte des espèces annuelles et vivaces, et il y a une polyploïdie dans ce dernier groupe [ASS, 06].

IV.4 Classification classique

- ✓ **Règne :** *Plantae*.
- ✓ **Classe :** *Magnoliopsida*.
- ✓ **Ordre :** *Asterales*.
- ✓ **Famille :** *Asteraceae*.
- ✓ **Genre :** *Helianthus*.
- ✓ **Nom scientifique :** *Helianthus annuus*.

Le genre *Helianthus* comporte d'autres espèces sauvages vivaces, dont :

H. niveus ssp. *Canascens*, *H. Paradox*, *H. Petiolaris*, *H. Decapetus*, *H. Neglectus*, *H. Hirsutus*, *H. debilis*, *H. rigidus*, *H. praecox*, *H. giganteus*, *H. Argophyllu*, *H. Maximiliani*, *H. Bolanderi*, *H. grosseserratus* [ASS, 06].

IV.5 Caractères généraux de la plante

Un stade est atteint lorsque 50 % des plantes sont à ce stade.
Les codes "lettres" ou "chiffres" sont équivalents.













Germination-levée		Phase végétative		Phase bouton floral	
	Stade A1 (1.0) Apparition des hypocotyles en crosse.		Stade A2 (1.1) Emergence des cotylédons et premières feuilles visibles.		Stade B3-B4 (2.3-2.4) La seconde paire de feuilles opposées apparaît et a environ 4 cm de long ; les pétioles sont visibles du dessus.
		Stade E1 (3.1) Apparition du bouton floral étroitement inséré au milieu des jeunes feuilles : STADE BOUTON ÉTOILÉ.		Stade E1 (3.1) Apparition du bouton floral étroitement inséré au milieu des jeunes feuilles : STADE BOUTON ÉTOILÉ.	
Phase bouton floral		Floraison			
	Stade E2 (3.2) Le bouton se détache de la couronne foliaire, les bractées sont nettement distinguables des feuilles. Son diamètre varie de 0,5 à 2 cm.		Stade E4 (3.4) Le bouton est nettement dégagé des feuilles, son diamètre varie de 5 à 8 cm, il demeure horizontal. Une partie des bractées se déploie.		Stade F1 (4.1) Le bouton floral s'incline ; les fleurs ligulées sont perpendiculaires au plateau.
		Stade F3.2 (4.3) Les trois cercles de fleurons les plus externes ont leurs anthères visibles et dégagées et leurs stigmates déployés. Les trois cercles suivants ont leurs anthères visibles et dégagées.			
Maturation					
	Stade M0 (5.0) Chute des fleurs ligulées. Le dos du capitule est encore vert.		Stade M2 (5.2) Le dos du capitule est jaune. Les bractées sont aux 3/4 brunes. L'humidité de la graine avoisine 20-25 %.		Stade M3 (5.3) Le dos du capitule est marbré de brun. Les bractées sont brunes. La tige se dessèche. L'humidité de la graine avoisine 15 %.
		Stade M4 (5.4) Tous les organes de la plante sont bruns foncés. L'humidité de la graine avoisine 10 %.			

Figure IV-2 : Quelques stades repères du tournesol [CET, 02].

C'est une plante à grand développement végétatif, aux larges feuilles. Sa hauteur varie de 2 à 4 mètres. Le système racinaire est de type pivotant avec une racine principale et un fort réseau de racines secondaires. L'inflorescence est un grand capitule (diamètre de 15 à 40 cm) très large, à fleurs ligulées, jaune d'or. Le nombre de fleurs contenues par le réceptacle est de l'ordre de 1500 [INA ,03].

C'est une plante entomophile (dont les principaux pollinisateurs sont les abeilles et bourdons), auto fertile. Les fruits sont des akènes à péricarpe membraneux, de couleur blanchâtre à noirâtre, souvent striés. Le péricarpe (coque ou écale), non soudé à la graine, représente de 18 à 40% du poids du fruit. Il entoure une amande contenant 55 à 70% d'huile. Au centre du capitule les fleurs ne donnent généralement pas de fruit, formant la « **tache stérile** » [INA ,03].

IV.5.1 Sol et Climat

IV.5.1.1 Sols

Tableau IV.1 - Sols [AGR, 07].

Favorables	Acceptables	Défavorables
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Moyennement riches à très fertiles (sauf sols à forte capacité de fourniture d'azote). ▪ Bien drainés. ▪ Mi-lourds, bien aérés. ▪ Profond (important système racinaire). ▪ Légèrement acide à neutre 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lourds, bien drainé 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Riche en humus. Compactés. ▪ Humidité stagnante. ▪ Sols à forte capacité de fourniture d'azote.

IV.5.1.2 Erosion

La période à risque se situe entre le semis et le stade 8 feuilles environ. Par la suite, le sol est parfaitement couvert [AGR, 07].

IV.5.1.3 Climat

- Plutôt continental (généralement excédent d'eau sauf déficit parfois en juillet-août).
- Besoins thermiques (en base 6°C) :
 - ✓ 1570°C pour variétés précoces;
 - ✓ 1640°C pour variétés mi-précoces;
 - ✓ 1700°C pour variétés normales.
- Altitude : jusqu'à 600 m (exceptionnellement 700m).
- Les sites à tendance humide en août et septembre (fortes rosées, brouillard) sont à éviter [AGR, 07].

IV.5.2 Variétés

- Les variétés cultivées actuellement pour la production d'huile sont toutes des hybrides.
- Seules les variétés les plus précoces sont adaptées à nos conditions.
- Les paramètres importants sont :
 - ✓ la productivité;
 - ✓ la richesse en huile;
 - ✓ la résistance génétique au mildiou.
- Les variétés "oléiques" (huile pour la friture) réclament un climat favorable pour atteindre la qualité requise.
- Les variétés "oléiques" doivent être cultivées en isolement géographique (200-250 mètres minimum d'un champ de tournesols de variété normale) [AGR, 07].

IV.5.3 Exigences

IV.5.3.1 Température

Le tournesol exige un climat doux et tempéré .la germination se fait rapidement si la température du sol est comprise entre 8 et 10°C [AMR, 06].

IV.5.3.2 Sol

Il s'adapte à tous les types de sol, préférant cependant les sols argilo-sableux, frais et profonds. La culture de tournesol réussit bien dans les bonnes terres à blé. Le système racinaire du tournesol est sensible aux sols tassés [AMR, 06].

IV.5.3.3 Eau

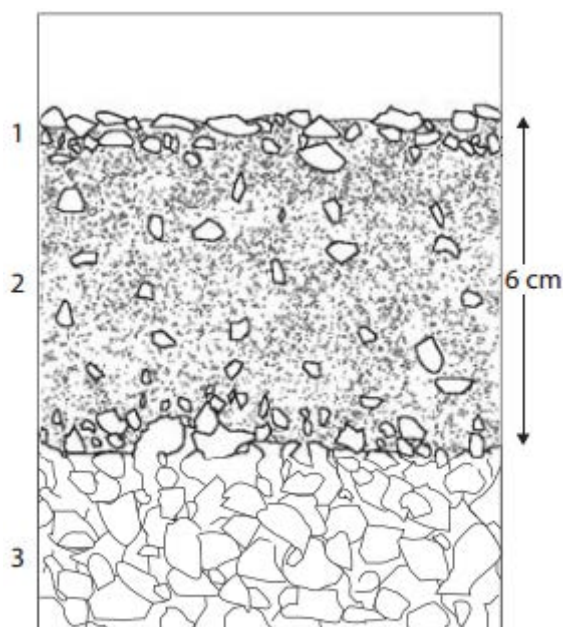
Le tournesol résiste bien à la sécheresse, à condition d'éviter le stress hydrique au moment de la floraison (stade critique).il faut éviter les excès d'eau avant floraison, car ils favorisent le développement végétatif au détriment de la production du grain [AMR, 06].

IV.5.4 Préparation du sol

- Exigences comparables à celles du maïs ou de la betterave.
- Veiller au maintien d'un bon état structural, sans couches compactées.

Tableau IV.2 - Préparation du sol [AGR, 07].

Type de sol	lourd	limoneux à sablonneux (battant)	Moyen, facile à travailler
Labour	automne	printemps, peu avant le semis	indifférent
Lit de semence	légèrement mottu en surface, terre fine sur 5-6 cm		



1. une couche de surface comportant de petites mottes pour éviter la formation de croûte.

2. une terre fine dans laquelle sera placée la semence.

3. un sol meuble ou suffisamment fissuré pour permettre la croissance régulière du pivot en profondeur.

Figure IV-3 : Préparation du sol [AGR, 07].

IV.5.4.1 Labour

Généralement réalisée en automne, cette opération consiste à retourner la terre à une profondeur comprise entre 25 et 30 cm, avec des charrues à disques ou à socs permettant :

- l'augmentation des réserves hydriques en profondeur du sol.
- l'amélioration de la fertilité naturelle du sol par la restitution et l'enfouissement des résidus de récoltes.
- le contrôle des adventices (lutte culturale).
- la diminution de l'évaporation du sol.

En conditions sèches, sur sols légers et peu profonds, le chisel peut remplacer la charrue à socs, travaillant ainsi le sol moyennement [AMR, 06].

IV.5.4.2 Reprise du labour

Cette opération succède au labour pour compléter la préparation du sol, en diminuant le volume des mottes laissées par le labour. Les outils utilisés sont le pulvérisateur (cover-crop) ou

le cultivateur à dent. Ce dernier est préconisé en sols secs et sur sols peu profonds, afin de limiter l'émiettement excessif du sol et l'érosion [AMR, 06].

IV.5.4.3 Façons superficielles

Réalisées souvent avec une herse, elles contribuent à affiner le lit de semences [AMR, 06].

IV.5.4.4 Fumure de fond

Bien que rustique, le tournesol réussit mieux dans les sols ayant reçu une bonne fumure. Les doses de 46 unités de phosphore (TSP 46 %), correspondant à 1 ql/ha et de 100 unités de potasse (sulfate de potassium 50%), correspondant à 2 ql/ha sont apportées au labour [AMR, 06].

IV.5.5 Semis

Tableau IV.3 – Semis [AGR, 07].

Ecartement Interligne	▪ 45-60 cm (mauvaise exploitation du sol au-delà de 60 cm).
Densité de semis	▪ 50-70'000 graines/ha selon les conditions de semis et les risques de limaces.
Peuplement	▪ 50-60'000 plantes/ha régulièrement réparties. ▪ Attention au réglage du sélecteur de doubles.
Epoque	▪ 2ème quinzaine d'avril à début mai
Température du sol	▪ > 8°C à 5 cm.
Profondeur	▪ Régulière à 2-3 cm.
Semoir	▪ Monograine indispensable (préférer le type pneumatique plus précis en répartition et profondeur).
Surface minimum	▪ 1 ha si parcelle isolée (limite l'impact des oiseaux).

- Le tournesol résiste assez bien aux froids printaniers (gèle à -2°C au stade cotylédonaire et -8°C au stade première paire de feuilles).
- Plus le semis est précoce, plus la plante :
 - résiste aux irrégularités d'approvisionnement en eau de l'été;
 - est trapue et donc plus résistante à l'averse.
- Les semis tardifs sont plus propres et facile à désherber que les semis précoces (démarrage rapide de la culture).

IV.5.6 Le cycle du tournesol

Les fleurs du tournesol sont réunies dans un capitule. La corolle qui entoure celui-ci est constituée par quelques dizaines de fleurs ligulées, décoratives mais stériles. Le reste du

capitule est formé d'environ 2 000 fleurs tubulées, appelées “fleurons” et disposées suivant une hélice parfaite. Ces fleurons comportent à la fois les éléments mâles et femelles.

Cependant, le pollen qui féconde les fleurs vient en majorité d'autres plantes de tournesol après avoir été transporté par les abeilles et les bourdons en quête du nectar, situé à la base des fleurons. Le rôle du vent dans la fécondation est secondaire [PRO, 07].

Les graines de tournesol sont des akènes de forme allongée et légèrement aplatie.

Pour les curieux : le tournesol (*Helianthus annuus* L.) appartient à la famille des composées.

La disposition des fleurons sur le capitule a des propriétés géométriques bien particulières... 13 spirales partent de son centre dans une direction, 21 dans l'autre. On retrouverait même le Nombre d'Or dans cette disposition

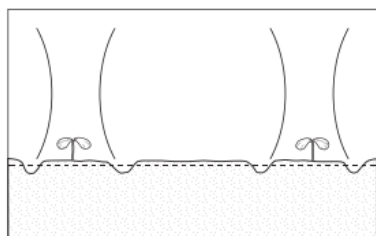
Les fleurs de la périphérie font le décor, celles du centre donneront des graines. On appelait autrefois le tournesol “Grand soleil” [PRO, 07].

IV.5.7 Roulage

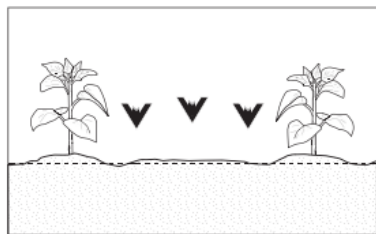
Après le semis, effectuer un roulage sur le sol sec, au croskill en terre lourde et au rouleau lisse en terre légère. Cette opération est déconseillée en conditions de sol assez humides [AMR, 06].

IV.5.8 Désherbage

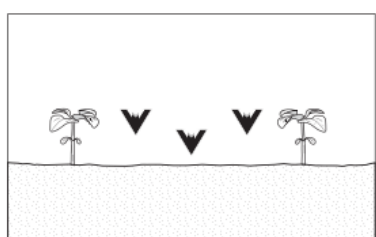
- Le tournesol est très sensible à la concurrence des mauvaises herbes, principalement en début de végétation.
- Faire 1-2 faux semis.
- La herse étrille peut être utilisée avec précaution en prélevée si le semis à 5 cm de profondeur.
- Le désherbage mécanique améliore la structure du sol et favoriser le développement de la jeune culture.
- Un semis de trèfle blanc au dernier sarclage limite l'enherbement en cas de peuplement lacunaire [AGR, 07].

**1^{er} sarclage (déchaussage)**

- Dès que le rang de tournesol est visible.
- Protéger les jeunes plantules des projections de terre.
- Déchausser légèrement (accentue le réchauffement du sol).

**2^{ème} sarclage (léger buttage)**

- Au stade 5-6 paires de feuilles (jusqu'à la limite du passage du tracteur).
- Rechausser les plantes.
- Etouffe les mauvaises herbes restant sur le rang.
- Augmente la résistance à la verse.
- Favorise l'émission de racelles.

**Sarclage supplémentaire**

- Sur des parcelles sales, un sarclage supplémentaire peut être nécessaire :
 - insérer le sarclage supplémentaire au stade 1-2 feuilles.

Figure IV-4 : Stratégie de sarclage [AGR, 07].

Tableau IV.4 - Comparaison Sarcleuse à soc et sarcleuse étoile dans le tournesol [AGR, 07].

	Sarcleuse à soc	Sarcleuse étoile
Fonctionnement	Coupe et recouvre.	Arrache, recouvre.
Ameublissement	Sur 3 à 5 cm de profondeur.	Jusqu'à 5 cm de profondeur.
Adaptation au sol	Bonne si fixée sur parallélogrammes.	Bonne.
Pierres	Fait glisser les pierres de côté. Assez tolérante.	Rebondit sur les pierres.
Déchaussement	Difficile à impossible.	Facile.
Buttage	Effet de buttage selon la forme des socs et la vitesse de travail.	Bon effet de buttage en fonction de l'inclinaison des étoiles.
Stades adventices	Fil blanc à 8 feuilles.	Fil blanc à 4 feuilles.
Graminées	Efficace jusqu'au stade 4 feuilles, ensuite diminution de l'efficacité.	Moins efficace sur les graminées.
Dicotylédones	Efficace jusqu'au stade 8 feuilles.	Efficace jusqu'au stade 4 feuilles.
Vivaces	Bon effet (coupe les racines et retarde la repousse).	Peu d'effet sur les vivaces (les racines sont dérangées mais pas coupées).

Dégâts à la culture	Disques de protection conseillés au premier sarclage.	Pas besoin de disques de protection au premier passage (inclinaison des étoiles).
Capacité de travail	50-80 ares/heure.	80 à 140 ares/heure.
Poids de la machine	Léger.	Lourd.
Effet sur la minéralisation	Moyen.	Elevé.
Investissement	Moins élevé.	Plus élevé.

IV.5.9 Fertilité

Pour le tournesol, la dose recommandée d'azote est de 80 kg/ha. L'azote est mieux absorbé lorsque la plus grande partie d'engrais azoté est épandue en bandes latérales avant que les plants atteignent une hauteur de 30 cm. Il faut déterminer les besoins en phosphore et en potasse d'après les résultats d'une analyse de sol [ASS, 06].

IV.5.9.1 Binage

Il est conseillé de réaliser deux à trois binages, exécutés avec une bineuse, dès que les lignes sont visibles.

A partir du début de la floraison, le développement des plantes est suffisant pour étouffer les mauvaises herbes, ce qui permet d'avoir un terrain propre après la récolte [AMR, 06].

IV.5.10 Rotation

Dans certaines rotations des cultures, les repousses de tournesol peuvent poser problème. Le tournesol est sensible à l'atrazine ainsi qu'à la rémanence d'autres herbicides, comme les sulfonilurées (inhibiteurs de l'acétolactate synthase ou ALS) [ASS, 06].

IV.5.11 Récolte

La récolte peut intervenir environ 130 jours après le semis (mi-septembre) [AGR, 07].

Condition de prise en charge :

- humidité du grain: 6%;
- impuretés : 2%

Tableau IV.5 - Humidité du grain et récolte [AGR, 07].

Au-dessus de 20%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manutention difficile, en particulier avec des vis sans fin (quand la graine à 20% d'eau, le capitule en a 80%!). ▪ Risque d'échauffement. ▪ Risque de perte de qualité.
Au-dessus de 13%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Feuilles médianes, supérieures et la tige encore vertes. ▪ Dos du capitule jaune. ▪ Récolte difficile. ▪ Forte proportion d'impuretés. ▪ Frais de séchage élevés.
A 12-13%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frais de séchage élevés. ▪ Peu de pertes au champ.

IV.5.12 Battage

✦ **Adapter la moissonneuse-batteuse**

- Bec cueilleur "spécial tournesol" assurant un minimum de pertes. peigne classique adapté avec plateau de séparation et retrait des doigts.
- Il est conseillé de supprimer un peigne de rabatteur sur deux et de recouvrir d'une latte ou d'une bande de caoutchouc les peignes restants. Il existe également des rabatteurs conçus spécialement pour le tournesol. Pertes plus importantes qu'avec le bec cueilleur [AGR, 07].

✦ **Bien régler la moissonneuse**

- **La vitesse du batteur** doit être proche de la vitesse minimale permise par la machine (9-12 m/s), soit 300-500 tours/min suivant le diamètre du batteur.
- **L'écartement batteur/contre-batteur** doit être réglé près du maximum (25-30 mm identique à l'avant et à l'arrière). Si le réglage est bon, le capitule ressort entier ou en 2-3 morceaux bien égrainés.
- **Ventilation** : ~10% inférieure à celle du blé [AGR, 07].

✦ **Remarques**

- En séchant, la graine dégage de l'hydrogène -> risques d'explosion.
- Ne pas sécher à température supérieure à 60°C.
- Une humidité trop élevée des graines entraîne des risques d'acidification par développement de moisissures [AGR, 07].

IV.6 Contrôle des maladies et ravageur

Le tournesol est sensible à plusieurs maladies, la plus courante est la pourriture blanche ou appelée aussi la sclérotinoïse (*Sclerotinia sclerotiorum*) ; viennent après, le mildiou du tournesol (*Plasmopara helianthi*), le phonopsis (*Phomopsis helianthi*), et le phoma (*Phoma macdonaldii*) [AMR, 06].

Mildiou <i>Plasmopara helianthi halstedii</i>	Phomopsis <i>Diaporthe helianthi</i>	Phoma <i>Phoma macdonaldi</i>	Sclerotiniose <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>
<p>Aspect général</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mort des plantules. • Nanisme des plantes, feuillages crispé vert pâle. <p>Sur feuilles</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tache anguleuse, vert pâle à jaune, le long des nervures à partir du pétiole. • Feutrage blanc à la face inférieure. <p>Sur capitule</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capitule dressé face au ciel. 	<p>Sur feuilles</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tache brun-rouge, triangulaire, du bord du limbe vers le pétiole et la tige. <p>Sur tige</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nécrose profonde brun-rouge frangée, encerclant la tige à la base du pétiole. • Plante cassée. • Nécrose se raye à l'ongle. <p>Sur capitule</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nécrose sèche brun-rouge, arrondie ou triangulaire, depuis une bractée ou une feuille capitulaire. • Dessèchement du capitule. 	<p>Sur feuilles</p> <ul style="list-style-type: none"> • A la face supérieure, suite de petites lésions brun-noir sur la nervure centrale. • Sénescence prématurée du feuillage. <p>Sur collet et tige</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nécrose superficielle brune-noire contour net, arrondie à l'aiselle d'une feuille ou d'un cotylédon. • Nécrose ne se raye pas à l'ongle. <p>Sur capitule</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nécrose sèche noire, arrondie depuis une bractée ou une feuille capitulaire. • Taches noires confluentes. 	<p>Sur collet et tige</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tache de pourriture blanche et humide. • Flétrissement et mort de la plante. • Formation de sclérotés. <p>Sur feuille</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pourriture gris-beige à l'extrémité des feuilles. • Destruction du bouton floral. <p>Sur capitule</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pourriture blanc-neige entre les graines et au dos du capitule. • Destruction des tissus, seules restent les fibres. • Présence de sclérotés. • Egrainage.
En appuyant avec le pouce sur la partie de la tige atteinte			
<p>Différentiation (entre Phomopsis, Phoma et Sclerotiniose)</p> <p style="text-align: center;">---</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mou. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ferme. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tissus écrasés.
<p>Facteurs favorisant la maladie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Semence infectée. • Sol infecté. Les spores persistent 8-10 ans dans le sol. • Repousses de tournesol infectées. • Levées par temps humide. 	<ul style="list-style-type: none"> • Résidus de récolte. • Humidité et chaleur lors de la formation du bouton floral. • Présence simultanée de phoma. 	<ul style="list-style-type: none"> • Levée lente en conditions humides. • Pluies fréquentes. • Présence simultanée de phomopsis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rotation chargée en colza, tournesol et légumineuses. • Humidité élevée lors de la formation du bouton floral. • Feuillage crispé par les pucerons.
<p>Mesures préventives</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variétés résistantes. • Min. 3-4 ans d'interruption entre 2 tournesols. • Eliminer les plantes malades. • Eliminer les repousses de tournesol. • Semence provenant d'une région non infestée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Choix variétal. • Broyer et enfouir les résidus de récolte. • Eviter les fortes densités de semis. • Lutte contre les adventices. • Eviter les excès d'azote. • Irrigation à proscrire sur parcelle infectée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Broyer et enfouir les résidus de récolte. • Lutte contre les adventices. 	<ul style="list-style-type: none"> • Choix variétal. • Eviter les fortes densités de semis. • Lutte contre les adventices. • Limiter la fumure azotée. • Irrigation: fortes doses espacées plutôt qu'apports fréquents.

Figure IV-5 : Maladies [AGR, 07].

	Pourriture grise <i>Botrytis cinerea</i>	Verticilliose <i>Verticillium sp.</i>	Septoriose <i>Septoria helianthi</i>
Symptômes, description	<p>Sur feuille et bouton floral</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pourriture grise. <p>Sur capitule</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pourriture gris-beige, sur la face fleurie ou tache brune, arrondie au dos du capitule. • Tissus pourris, spongieux. 	<p>Sur feuille sur un même côté de la plante</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tache brun foncé, entourée de jaune clair, allongée, entre les nervures. • Dessèchement des feuilles. <p>Sur tige</p> <ul style="list-style-type: none"> • Longues stries sombres sur un même côté de la tige. • Moelle recouverte de microsclérotés noirs. 	<p>Sur feuille</p> <ul style="list-style-type: none"> • Infection des étages foliaires depuis la base. • Tache anguleuses, brun sombre (2-20 mm), entre les nervures. • Nécrose totale du limbe et dessèchement des feuilles.
Facteurs favorisant la maladie	<ul style="list-style-type: none"> • Humidité • Manque d'aération • Infection de sclérotiniose 	<ul style="list-style-type: none"> • Résidus de récolte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Semence infectée. • Résidus de récolte au sol. • Humidité.
Mesures préventives	<ul style="list-style-type: none"> • Eviter les peuplements élevés 	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminer les résidus de récolte infectés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Semences saines.

Maladie (Suite)

IV.7 La résistance à la sécheresse

Le tournesol est connu pour être une plante capable de se contenter de peu d'eau. Mais cette culture, étant le plus souvent cultivée sans irrigation, peut tout de même souffrir en cas de fortes chaleurs. La résistance à la sécheresse intéresse les sélectionneurs car elle constitue un critère de stabilité du rendement même si ce critère est encore plus important en Espagne et en Turquie [ASS, 06].

Afin de mieux évaluer le comportement de leurs variétés, certaines entreprises mènent des essais en conditions stressantes. Des études de l'INRA (Institut National de Recherche Agronomique) ont montré qu'un développement important de l'appareil végétatif favorisait les pertes d'eaux. Aussi, les plantes courtes sont connues pour utiliser l'eau de façon plus efficace [ASS, 06].

IV.8 Composition de la graine de tournesol

La graine de tournesol est constituée par des éléments nutritifs très variés tel que : la matière grasse avec 44%, des protéines 18% et Eau 9% ...etc. Ces éléments donnent à la graine de tournesol une importance sur le plan nutritif et économique [ASS, 06].

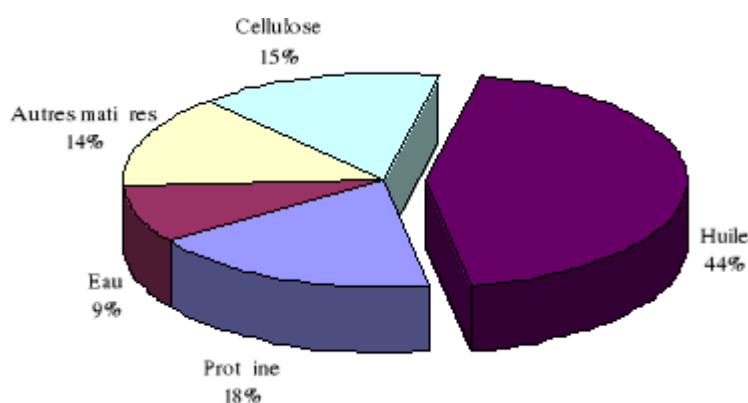


Figure IV-6 : Composition de la graine de tournesol [ASS, 06].

IV.9 Huile de tournesol

Extraite des graines de tournesol, cette huile jaune pâle à la saveur délicate convient aussi bien pour les sautés, la confection de vinaigrettes et la préparation de mayonnaises que pour les fritures douces. Souvent utilisée pour la confection de margarines, cette huile est fortement recommandée par les diététiciens en raison de la forte proportion d'acides gras essentiels qu'elle contient. De plus, son contenu élevé en gras poly insaturés et faible en gras saturés en fait un choix santé [ASS, 06].

L'huile étant le principal débouché du tournesol, la teneur en huile a toujours été un critère surveillé de près. Au début du siècle, la graine de tournesol contenait environ 35 % d'huile. Ce taux atteignait 40 % pour les populations cultivées au milieu du siècle. Aujourd'hui les variétés améliorées ont des teneurs en huile comprises entre 45 et 50 % [ASS, 06].

Avec 9.5 millions de tonnes produites en 2001, la production mondiale d'huiles végétales a plus que doublé depuis vingt ans. L'huile de tournesol a enregistré une forte progression en dix ans, puisque sa production a pratiquement doublé à l'échelle de la planète. Elle est passée de 7,4 millions de tonnes en 1996/97 à 8,7 millions de tonnes en 2001/02 et 9.07 millions de tonnes en 2004/2005 et reste la 4^{ème} huile produite au monde [ASS, 06].

➤ **Remarque :**

Les graines de tournesol ont une image saine auprès des consommateurs.

L'image saine est bien méritée. Une bonne source de plusieurs aliments principaux tels que la fibre, la vitamine E, l'acide folique et le zinc [ASS, 06].

Tableau IV.6 - Composition nutritive de la graine de tournesol (45 grammes) [ASS, 06].

Eléments	Quantité	Eléments (Suite)	Quantité (Suite)
Calories	160	Vitamine A	< 3 IU
Calories de MG	129	Vitamine C	< 0.2 mg
Total MG	14 g	Calcium	33 mg
MG saturée	2 g	Fer	1.9 mg
MG Poly insaturée	9 g	Vitamine E	11.34 mg
MG Mono insaturé	3 g	Thiamine	.65 mg
Cholestérol	0 mg	Riboflavine	.07 mg
Sodium	< 2 mg	Ni acine	1.3 mg
Total Carbohydrates	5 g	Acide folique	64.5 mcg
Fibre	4 g	Magnésium	104 mg
Sucre	1 g	Zinc	1.4
Protéine	6 g	Cuivre	.4 mg

L'huile de tournesol saine et normale est produite à partir de graines de tournesol. L'huile de tournesol est légère dans le goût et l'aspect. Elle fournit plus de vitamine E que n'importe quelle autre huile végétale. C'est une combinaison de mono insaturée et les graisses poly insaturées avec de gros niveaux saturés bas. La polyvalence de cette huile saine est identifiée par des cuisiniers internationaux. De l'huile de tournesol est évaluée pour son goût léger. L'huile de tournesol satisfait les besoins des fabricants, du consommateur et de nourriture d'une huile végétale saine et élevée du rendement non transgénique [ASS, 06].

IV.10 Caractéristiques de l'huile de tournesol

IV.10.1 Caractéristiques chimiques

- L'huile de tournesol est un mélange composé de 95% de triglycérides ($C_xH_yO_z$) et de 5% d'acides gras libres, de stérols, de cires, de diverses impuretés.
- C'est une huile di-insaturée (dite semi-secative), caractérisée par un indice d'iode de 132 et d'acidité de 0,05.
- Il n'y a pas de polluants dangereux comme le benzène, le plomb, ni aucun métaux lourds [ASS, 06].

IV.10.2 Caractéristiques physiques

Densité à 20 °C 0,92 ; Viscosité (CST) à 20 °C 55-61, Point de fusion -16° ;

Point de trouble - 5° ; Point éclair 316°, PCI (Kcal/ Kg) 9032 ; Indice de cétane 30.

- ✦ L'indice de cétane (mesure de l'aptitude à l'auto-inflammation) est très faible dans le cas de l'huile de tournesol (48-50 pour le gasoil).
- ✦ L'huile de pression à froid s'oxyde lors d'un stockage prolongé, et voit donc son indice de cétane augmenter, ce qui reste un avantage.
- ✦ Elle ne subit pas de raffinage, de dégommeage, de neutralisation, ni de décoloration.
- ✦ La miscibilité est excellente avec le gasoil, et on peut à tout moment s'approvisionner avec ce dernier [ASS, 06].

IV.10.3 Usage alimentaire

Alimentation humaine : L'huile est extraite des graines, dont la teneur dans les variétés améliorées varie de 45 à 50 %. L'huile de tournesol est appréciée pour son équilibre en acides gras : elle contient 12 % seulement d'acides gras saturés et beaucoup d'acides gras mono ou polyinsaturés, acide oléique, acide palmitique et surtout acide linoléique, qui est un acide gras essentiel. D'après les nutritionnistes, cette huile a d'excellentes qualités diététiques, par exemple pour combattre le diabète. C'est également une bonne source de vitamine E [ASS, 06].

Alimentation animale : La plante entière récoltée avant maturité est utilisée comme fourrage. De plus, les résidus de trituration, appelés tourteaux, sont riches en protéines, dont un acide aminé très recherché dans l'alimentation du bétail, la méthionine. Les graines entières sont appréciées pour nourrir les volailles [ASS, 06].

Elle est également cultivée comme plante ornementale pour ses capitules spectaculaires. Il en existe plusieurs cultivars, notamment 'Nanus flore pleno' de 60 à 80 cm de haut seulement à fleurs doubles jaune orangé [ASS, 06].

IV.10.4 Usage non alimentaire

IV.10.4.1 Utilisation de l'huile de tournesol dans les moteurs diesel

L'huile de tournesol comme l'huile de colza peut être utilisée directement en biocarburant dans les moteurs diesel, ou après estérification en ester méthylique.

Toutes les huiles 1^{ère} pression à froid, huiles végétales industrielles et huiles de friture usagées à condition d'être filtrées à 5 microns. (Avec un filtre à café, par exemple).

Proportion d'huile végétale pouvant être mélangée au gasoil, sans risque pour le moteur [ASS, 06] :

★ *Moteurs diesel à injection indirecte (ceux qui ont besoin d'un préchauffage) :*

- ✓ jusqu'à 30% d'huile sans modification du moteur.
- ✓ jusqu'à 50% d'huile avec une pompe à injection en ligne, type BOSCH. Les pompes rotatives (Luca, Cav, Roto, Delphi) sont moins résistantes.
- ✓ jusqu'à 100% d'huile en augmentant le tarage des injecteurs à 180 bars, en ajoutant une résistance électrique en sortie de réservoir (pour fluidifier l'huile quand elle est trop froide), et une pompe de pré gavage en amont de la pompe à injection pour la "soulager".

★ *Moteurs diesel à injection directe, ancienne et nouvelle génération :*

- ✓ jusqu'à 30% d'huile sans modification du moteur.
- ✓ jusqu'à 100% d'huile avec un système de bicarburation : on ajoute un second réservoir, de petite capacité, qui permet de démarrer au gasoil. Quand le moteur est chaud, on permute sur le réservoir d'huile. Avant d'arrêter le moteur, on repasse sur le réservoir de gasoil pour "rincer" les injecteurs, ce qui facilitera le démarrage une fois le moteur refroidi. S'il fait très froid, une résistance électrique peut s'avérer nécessaire pour le réservoir d'huile.

Remarque :

Les seuls problèmes que posent les huiles végétales sont dus à leur viscosité plus grande que celle du gasoil. Quand l'huile est chauffée, sa viscosité diminue. Il suffit donc de chauffer suffisamment l'huile pour qu'elle se comporte comme.

IV.11 Conclusion

Économe en eau, en produits phytosanitaires et en azote, la culture du tournesol est une culture de printemps rustique, facile et peu coûteuse à produire. Dotée, d'atouts agronomiques majeurs, elle optimise la rentabilité des céréales en restructurant le sol, en interrompant le cycle des maladies et en limitant le développement des adventices du blé. Le tournesol contribue ainsi à l'équilibre des rotations. En favorisant la biodiversité, le tournesol participe grandement à l'attrait des paysages. Il reste une pièce maîtresse d'une agriculture raisonnée, alliant performance et respect de l'environnement.

Chapitre V

Analyse du Cycle de Vie

C'est l'histoire de la vie

Le cycle éternel

Le Roi Lion, L'histoire de la vie, 1994

V.1 Introduction

Actuellement, un carburant aussi alternatif que renouvelable pourrait jouer un rôle capital et pour l'environnement et pour l'économie. Le biodiesel, outre le fait d'être un carburant propre avec lequel la plupart des émissions polluantes sont réduites, est également un liquide non toxique, biodégradable et doté d'un indice de cétane favorable, ce qui en fait une alternative plausible au diesel conventionnel. Ce dernier pourrait contribuer à alléger la lourde dépendance vis-à-vis des énergies fossiles, de même qu'il permettrait de booster les économies dans les secteurs ruraux par la génération des activités créatrices de richesses.

Néanmoins, la mise en place d'une filière de production du biodiesel doit prendre en compte des considérations techniques, économiques, sociales, et environnementales dans une perspective de développement durable. Pour atteindre ces objectifs une analyse de cycle de vie (ACV), largement utilisée depuis les années 2000 pour examiner les performances énergétiques et environnementales d'une filière, est un outil d'aide à la décision très important. Cet outil nous permet aussi d'évoquer des aspects environnementaux de durabilité tels que la consommation de l'eau, la biodiversité, l'érosion des terres et autre.

L'objectif principal de cette analyse du cycle de vie est d'évaluer les performances environnementales d'une filière de production du biodiesel produit à partir d'une culture du *Tournesol* sous les conditions locales. Cette analyse nous permettrait d'identifier les points faibles de notre système de production afin de les améliorer tout en se focalisant sur l'évaluation du bilan énergétique et le bilan du CO₂.

V.2 Unité fonctionnelle et hypothèse retenue

La fonction de notre système est la production d'une biodiesel à partir de l'huile de *Tournesol* sous conditions non irriguées. L'unité fonctionnelle retenue est 880 litres de biodiesel produite par hectare. D'après les données disponibles localement [KAH, 08] ou dans la littérature [CET, 02] nous avons retenus les hypothèses suivantes :

V.2.1 Choix de l'espèce

On a choisi l'espèce *Tournesol* pour les motifs suivants :

- Le *Tournesol* est connu pour être une plante capable de se contenter de peu d'eau. Mais cette culture, étant le plus souvent cultivée sans irrigation, peut tout de même souffrir en cas de fortes chaleurs. La résistance à la sécheresse intéresse les sélectionneurs car elle constitue un critère de stabilité du rendement.
- La graine de *Tournesol* est constituée par des éléments nutritifs très variés tel que : la matière grasse avec 44%, des protéines 18% et Eau 9% ...etc. Ces éléments donnent à la graine de *Tournesol* une importance sur le plan nutritif et économique.

- La plantation de cette plante pourrait augmenter significativement le couvert végétale ce qui conduit à une grande séquestration de CO₂ par rapport à d'autres espèces ainsi qu'une réhabilitation de nos ressources forestières.
- L'exploitation de l'huile de cette espèce comme une source de biodiesel pourrait éviter une concurrence préjudiciable pour la sécurité alimentaire.
- Cette espèce présente des performances écologiques (tolérance à plusieurs stress abiotique tels que la salinité, le stress thermique et hydrique), un grand potentiel génétique (des rendements élevés par hectare) et un biodiesel de qualité.

V.2.2 Les conditions de production (hypothèses adoptées)

La production d'une tonne de biodiesel du *Tournesol* par hectare (non irrigué) ;

La culture de *Tournesol* est conduite dans un système de production non irrigué ;

Les travaux du sol et de plantation de *Tournesol* sont non mécanisés ;

La teneur de la graine en huile est de 44% ;

La production de 880 L de biodiesel nécessite 880 L de l'huile de *Tournesol* et 100 L de méthanol, d'où une production en graine de 2000 kg est nécessaire pour assurer d'avoir cette production.

V.3 Définition et modélisation du système de production

Dans le système de production du biodiesel nous avons deux étapes:

- ✓ La 1^{ère} étape est la production de la matière première (huile de *Tournesol*)
- ✓ La 2^{ème} étape est la conversion de l'huile extraite en biodiesel.

La Figure V-1 regroupe les différentes étapes et processus par fonction à partir d'un champ jusqu'à l'obtention du biodiesel

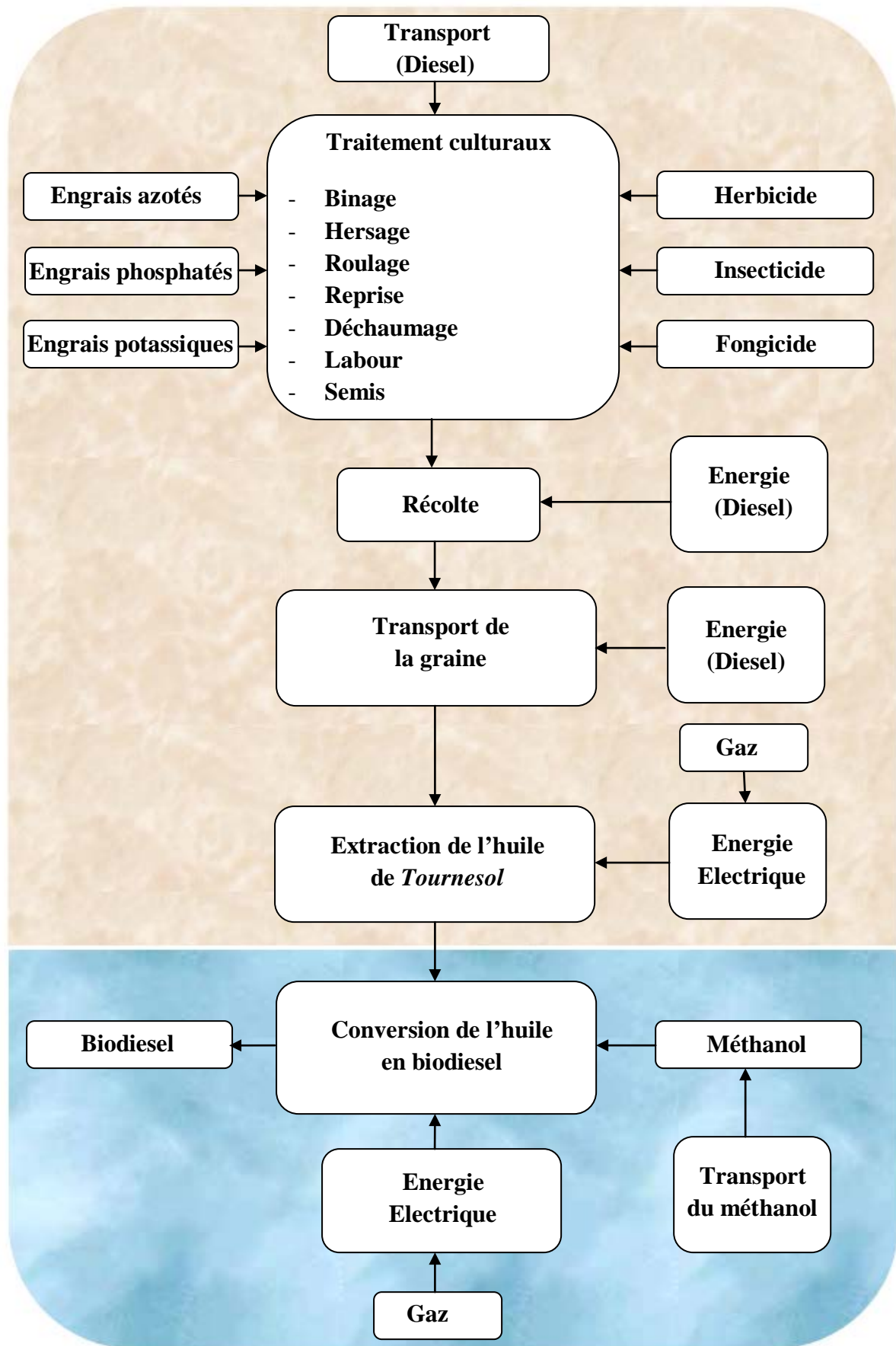


Figure V-1 : Les différents processus de production du biodiesel de Tournesol

V.4 Limite du système

L'analyse du cycle de vie couvre l'ensemble de la chaîne de production de biodiesel à partir de l'huile de *Tournesol* et ce, pour toute la filière étudiée. Les éléments pris en compte dans les limites du système sont:

- La chaîne d'approvisionnement énergétique pour assurer le fonctionnement à chaque étape du processus de production.
- L'extraction, le transport et l'utilisation des matières premières nécessaires lors des différentes étapes de production du biodiesel.

Néanmoins, il y a lieu de relever que :

- Les infrastructures ne sont pas prises en considération à ce stade (Il s'agit de l'occupation des sols, les bâtiments...).

V.5 Inventaire

Il s'agit de recenser et de quantifier les différents flux existants dans le système par un inventaire exhaustif.

Deux méthodes de calcul de l'inventaire prévalent actuellement : l'approche processus et l'approche input/output (I/O). Si le principe de calcul de l'inventaire est simple, le recueil de données d'inventaire nécessite un travail de bénédictin ! Heureusement, il est aujourd'hui possible de disposer de bases de données regroupant des informations pour un grand nombre de processus, le processus spécifiques à l'application considérée restant à modéliser en détail et en étroite collaboration avec les industries concernées.

Les données ci-dessous Tableau V.1 sont tirées de la littérature [AMR, 06] et adaptées aux conditions locales de production. 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.

Tableau V.1 - Inventaire du cycle de vie de la production de 880 L de biodiesel du Tournesol conduite en sec

Type d'input	Nomenclature		Unité	Quantité
Production de 2000 kg de graine de <i>halianthus annuus</i>				
Chimique	Herbicide (Trifluraline) dinitroaniline		Kg	1.2
	Insecticide (Imbda-cyhalothrine) pyréthrinolde		Kg	0.5
	Fongicide (mancozèbe)		Kg	2.5
	Fertilisant (NPK) [www Calpa].	Azote urée 46%	Kg	80
		Phosphate (TSP 48%)		62.60
Potasse (Sulfate de potasse 50%)		80		
Energie	Travail du sol	Labour	L	48
		Reprise		6.5
		Roulage		6.5
		Hersage		6.5
		Binage		6.5
		Déchaumage		6.5
		Semis		6.5
		Récolte		30
Transport Total	Carburant		Tkm	32.52
	séquestration de CO2		Kg	-2200
Conversion de 2000 kg de graine <i>halianthus annuus</i> en 880 L de biodiesel				
Energie [SPI et al., 13].	Extraction de l'huile		kWh	118
	Conversion de l'huile en biodiesel		kWh	85.3
Transport (Diesel)	Carburant		Kg	210

V.6 Résultats et discussion

V.6.1 Bilan de CO₂ en kg CO₂ eq

Pour produire 880 litres de biodiesel à partir des graines de *Tournesol* conduit en sec ;

Il en résulte des émissions de CO₂ de 820 kg CO₂ eq. Ces émissions sont dues aux intrants agricoles y compris les engrais (azotés, phosphatés, potassiques) ainsi que leur transport.

Le Tableau V.2 : montre que le facteur principal qui contribue aux scores de changement climatique c'est à dire émission de CO₂ est l'étape de production des graines du *Tournesol* avec une contribution de 71.9 % contre 28.1 % pour l'étape de conversion de l'huile en biodiesel.

Le facteur engrais domine nettement les émissions de CO₂ lors de l'étape de production de la graine de *Tournesol* avec une part de 61.4 % en particulier azotés qui représente 31.6 %, suivit de l'engrais phosphatés avec 15.4 %.

Le second facteur est le transport (de la graine et du méthanol) qui contribue en moyenne pour 13.2 % des émissions totales.

Durant l'étape de transformation de l'huile en biodiesel, on peut clairement identifier le facteur qui représenté une forte contribution au score de changement climatique dont une contribution de 8.82 % des émissions totales de CO₂.

La séquestration de CO₂ par le *Tournesol* est de 2200 kg/ha [BEZ et al., 09]. L'écobilan de l'impact sur le changement climatique due a la production de 880 litres de biodiesel est de 820 kg de CO₂ eq.

Donc, il s'agit d'un bilan CO₂ largement positif ce qui constitue un critère de durabilité très satisfaisant.

Tableau V.2 - Les émissions en CO₂ en kg CO₂eq

INTRANT	CO₂ en kg eq	%
Production de la graine de <i>Tournesol</i>		
fongicide	6.48	0.79
herbicide	4.67	0.57
insecticide	9.67	1.18
engrais azoté	259.12	31.60
engrais phosphaté	126.28	15.40
engrais potassique	118.08	14.40
reprise	2.95	0.36
hersage	2.95	0.36
semis	2.95	0.36
roulage	2.95	0.36
récolte	13.70	1.67
labour	21.81	2.66
déchaumage	2.95	0.36
binage	2.95	0.36
Transport des inputs	11.64	1.42
Conversion de l'huile de <i>Tournesol</i> en biodiesel		
Extraction de l'huile	25.66	3.13
Conversion du biodiesel	18.53	2.26
méthanol	72.32	8.82
Transport de la graine	108.24	13.2
Transport du méthanol	5.41	0.66
total	820	-
Séquestration CO ₂	-2200	-
bilan	-1380	

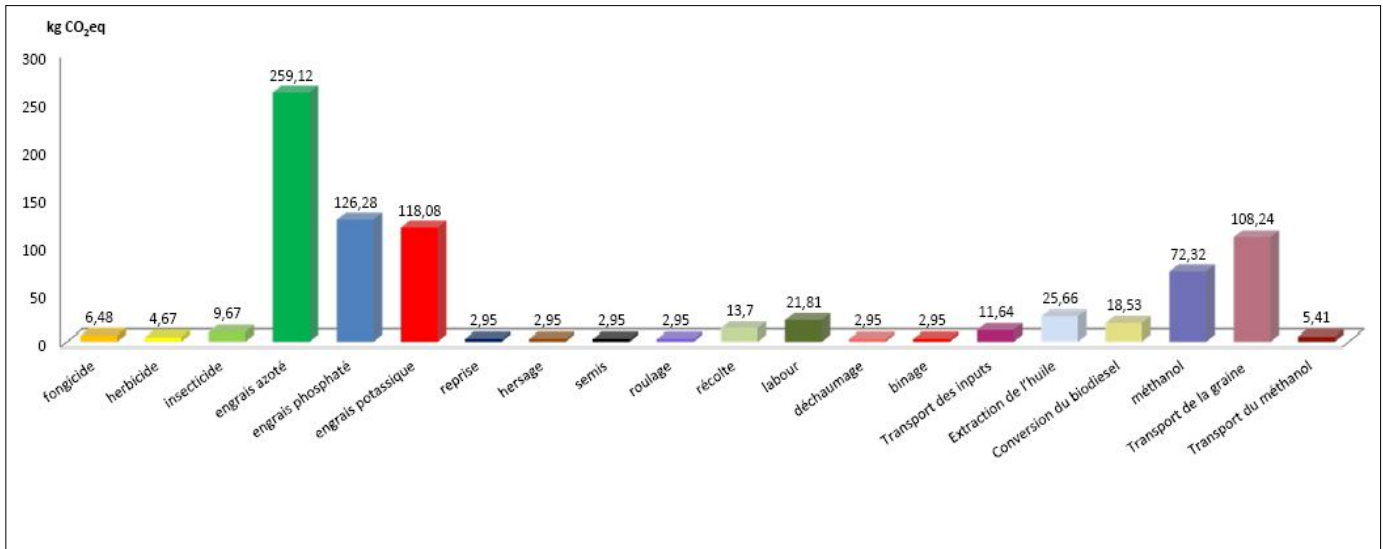


Figure V-3 : Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (kg CO₂eq)

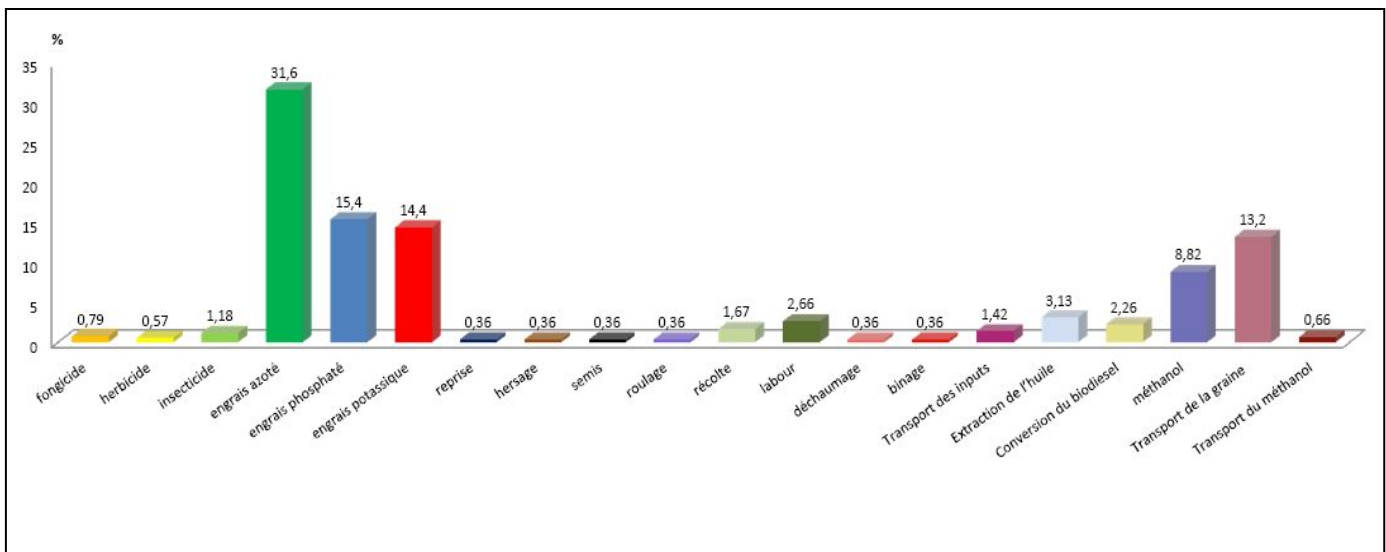


Figure V-4 : Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (%)

V.6.2 Bilan énergétique

Les résultats obtenus à l'issue de l'analyse du cycle de vie nous montrent les consommations constatées à chaque étape aussi bien lors de l'utilisation de l'énergie fossile que pour la production du biodiesel. Les Figure V-3 et Figure V-4 montrent que la consommation en énergie fossile se concentre durant la production de la matière première (huile végétale) avec une contribution de 50.1 %. L'autre part de l'énergie fossile dépensée est consommée lors de la transformation de l'huile de *Tournesol* en biodiesel avec un pourcentage voisin de 49.9%.

L'utilité de l'analyse du cycle de vie réside dans les détails fournis. Les principales constatations sont la consommation en énergie fossile due aux transports 34.5%, en particulier le transport de la graine qui contribue à 10166.10 MJ/ha, représentant 32.9% de

l'énergie totale consommé pour la production du biodiesel. La part des engrais qui sont aussi des facteurs qui contribuent fortement à la consommation d'énergie fossile avec 9671.70 MJ/ha soit 31.3%, principalement l'engrais azoté 17.9%.

La consommation énergétique d'origine fossile pour la production de 880 litres de biodiesel peut atteindre 30900 MJ /ha. Le rendement énergétique par ha des cultures énergétique pour le biodiesel est moins de 8% (**71**) par rapport à une TEP (thermie équivalent pétrole).

Si on suppose un rendement énergétiques de 39600 MJ/ha [IAN et al., 10], il en résultera un ratio (input/output) énergétique de **1.28** d'où un bilan énergétique supérieur à l'unité.

Tableau V.3 - Résultats du bilan énergétique (MJ)

conversion	Valeur (MJ)	%
Production de la graine de <i>Tournesol</i>		50.1
fongicide	240.42	0.78
herbicide	154.50	0.50
insecticide	244.11	0.79
engrais azoté	5531.10	17.9
engrais phosphaté	2101.20	6.80
engrais potassique	2042.50	6.61
reprise	278.10	0.90
hersage	278.10	0.90
semis	278.10	0.90
roulage	278.10	0.90
récolte	1282.35	4.15
labour	2048.67	6.63
déchaumage	278.10	0.90
binage	278.10	0.90
Transport des inputs	176.13	0.57
Conversion de l'huile de <i>Tournesol</i> en biodiesel		49.9
Extraction de l'huile	426.42	1.38
Conversion du biodiesel	305.91	0.99
méthanol	4017.00	13.00
Transport de la graine	10166.10	32.9
Transport du méthanol	506.76	1.64
total	30900	-
Production énergétique	39600 MJ/ha	-
bilan	8700	-
EROI	1.28	

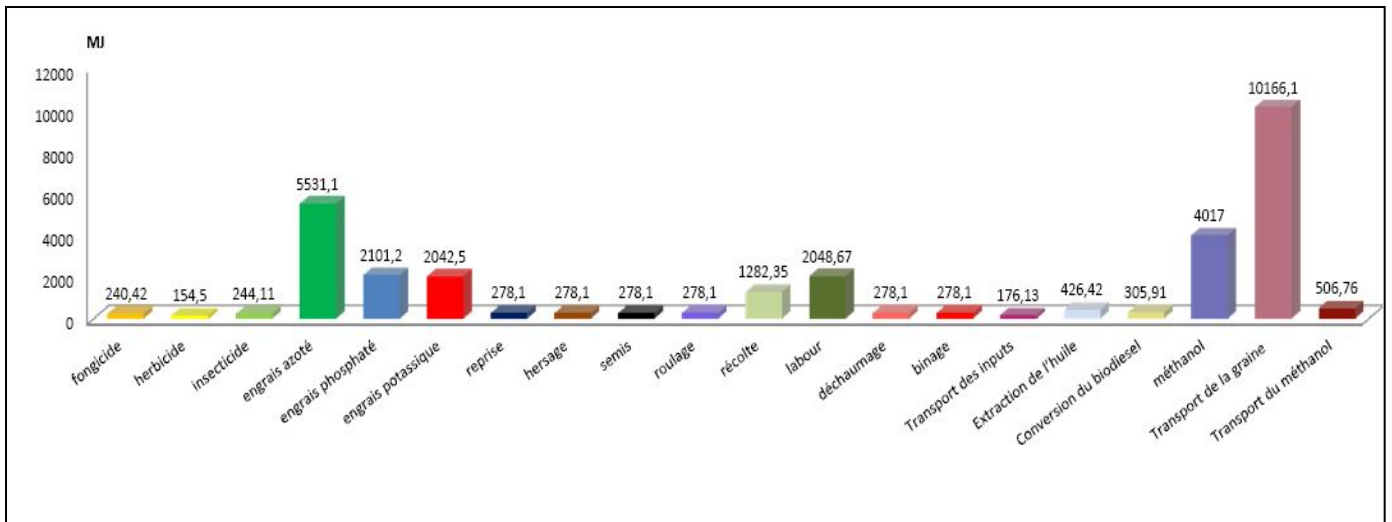


Figure V-5 : Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique (MJ)

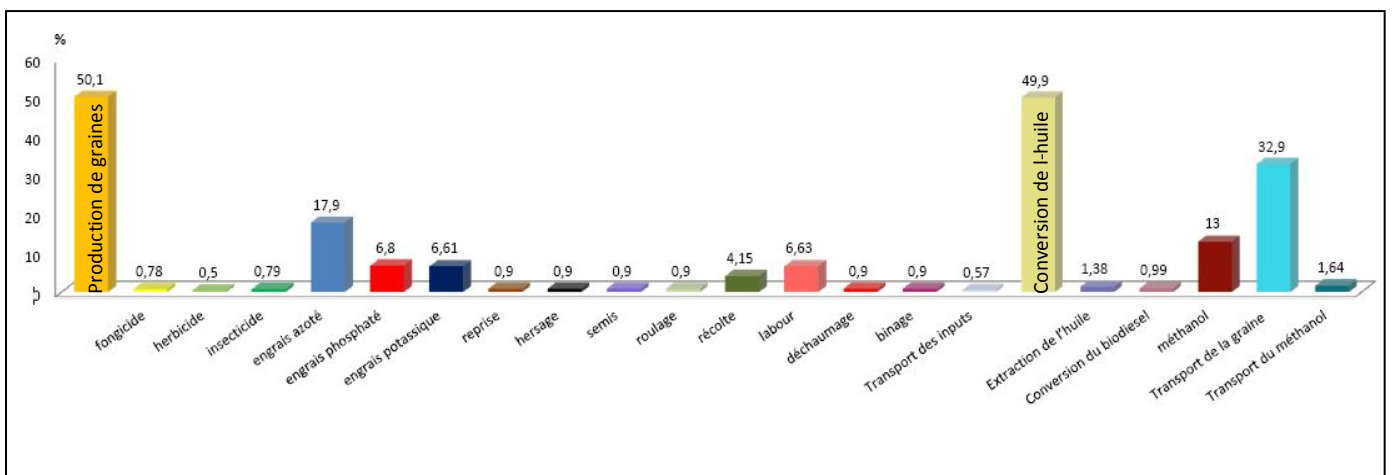


Figure V-6 : Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique (%)

V.6.3 Etude d'impact

V.6.3.1 Caractérisation intermédiaire

L'analyse de l'impact s'est effectuée au niveau intermédiaire.

A ce stade, seuls les résultats de quatre catégories sont présentés :

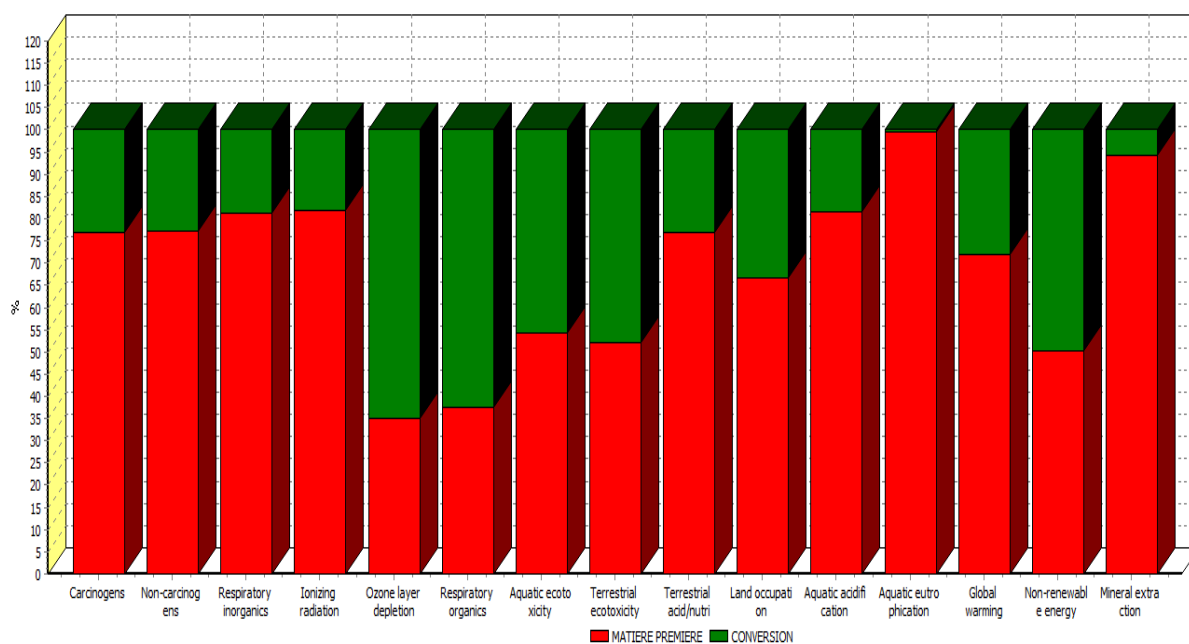
- La toxicité humaine
- L'écotoxicité
- Le changement climatique
- La consommation d'énergie non renouvelable

De même, seuls les résultats de la méthode d'analyse IMPACT 2002⁺ sont présentés ici.

La contribution de chaque étape de la production de biodiesel de *Tournesol* est mentionnée.

Tableau V.4 - Caractérisation intermédiaire

Catégorie d'impact	unité	biodiesel
Effet cancerigène	kg C2H3Cl eq	10.1
Effet Non-cancerigènes	kg C2H3Cl eq	13.6
Formation de photo-oxydants	kg PM2.5 eq	1.01
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	14600
Radiations ionisantes	Bq carbone-14	0.00168
Effet respiratoire	kg C2H4 eq	1.83
Ecotoxicité Aquatique	kg TEG	198000
Ecotoxicité terrestre	kg TEG	27900
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO2 eq	21.80
Occupation des sols	m ² org.arable	8.34
Acidification Aquatique	kg SO2 eq	6.98
Eutrophication Aquatique	kg PO4	2.62
Changement climatique	kg CO2 eq	820
Energie primaire non renouvelable	MJ	30900
Extraction de minerais	MJ surplus	20.00



Analyse de 1 p 'BIODISEL', méthode: IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+ / caractérisation

Figure V-7 : Contribution des étapes de Production pour les Différentes Catégories d'impact intermédiaires

V.6.3.2 *Caractérisation des dommages*

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

- ✓ Les impacts sur la santé humaine
- ✓ Les impacts sur la qualité des écosystèmes
- ✓ Les impacts sur la changement climatique
- ✓ Les utilisations des ressources minérales

Le Tableau V.4 met en évidence les catégories d'impact environnemental dues la production de 880 litres de biodiesel du *Tournesol*.

Les Figure V-7 et Figure V-8 montrent que l'étape de production de la matière première présente une contribution prédominante aux résultats des différentes catégories de dommages - citées auparavant.

❖ *Santé humaine*

Les principaux facteurs contribuant au score de cette catégorie de dommage sont les engrais avec un taux de 69.7 %, principalement l'engrais phosphatés avec 27.5% suivit de l'engrais azotés et potassiques avec un taux de 21.7% et 20.5 %. Les énergies fossiles ont un impact de 21.9 % de la contribution global Figure V-9.

❖ *Qualité des Ecosystèmes*

Les principaux facteurs qui contribuent au résultat de cette catégorie de dommage sont la consommation en énergie fossile due à l'utilisation du carburant (diesel) 59.9%, suivit des engrais azotés, potassiques et phosphates respectivement 12.1%, 10.5%, 9.63% Figure V-10.

❖ *Changement climatique*

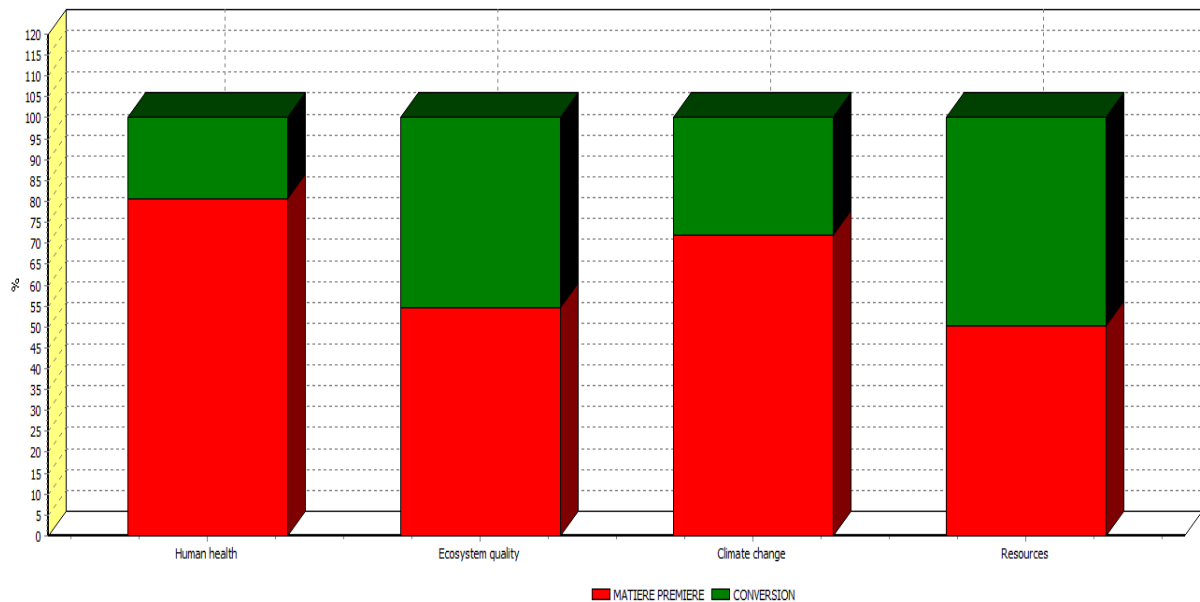
Les principaux facteurs qui contribuent au résultat de cette catégorie de dommage sont l'utilisation des engrais principalement l'engrais azoté 31.6% ainsi que celle du diesel 20.4% .le méthanol contribue avec une faible quantité 8.82% Figure V-11.

❖ *Utilisation des ressources*

Les principaux facteurs contribuant au score de cette catégorie de dommage sont l'utilisation des énergies fossiles (diesel) 50.7%, puis l'engrais azoté 17.9%. Le méthanol contribue avec 13%. V-12.

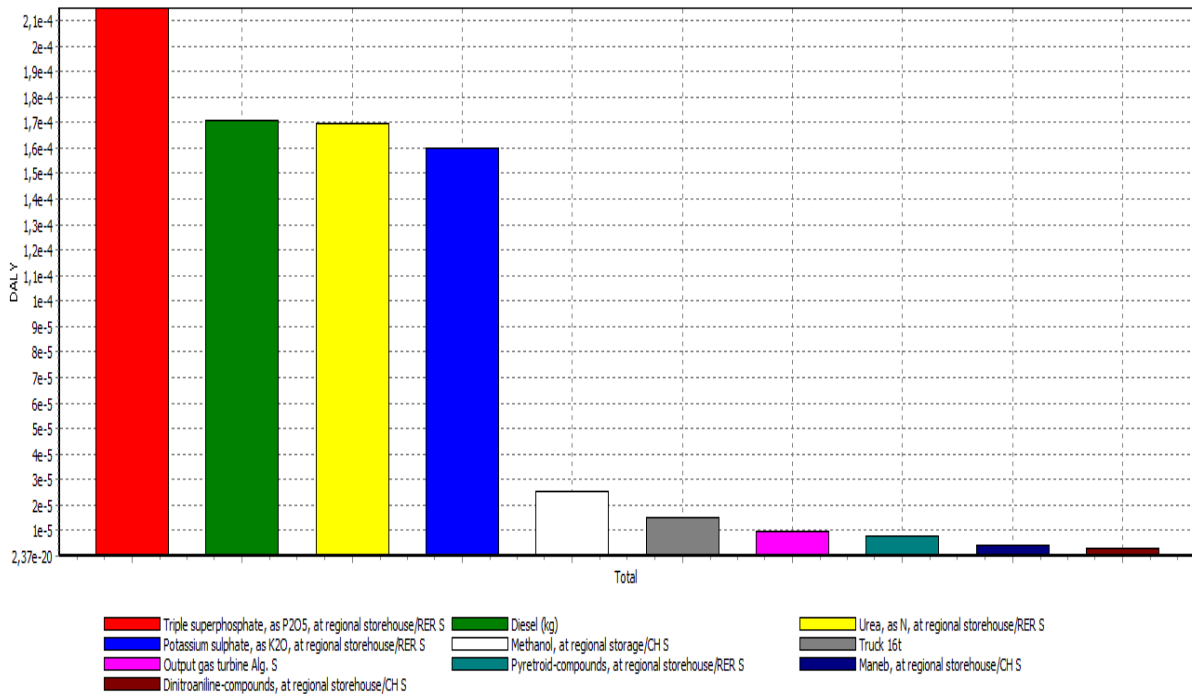
Tableau V.5 - Etude de dommage

Catégorie d'impact	unité	biodiesel
Effet cancérogène	DALY	2.82 E-5
Effet Non-cancérogènes	DALY	3.81 E-5
Formation de photo-oxydants	DALY	0.000705
Destruction de la couche d'ozone	DALY	3.07 E-6
Radiations ionisantes	DALY	1.77 E-6
Effet respiratoire	DALY	3.90 E-6
Ecotoxicité Aquatique	PDF*m2*yr	9.92
Ecotoxicité terrestre	PDF*m2*yr	221.00
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF*m2*yr	22.70
Occupation des sols	PDF*m2*yr	9.09
Acidification Aquatique	-	-
Eutrophication Aquatique	-	-
Changement climatique	kg CO2 eq	820
Energie primaire non renouvelable	MJ	30900
Extraction de minerais	MJ surplus	20.00



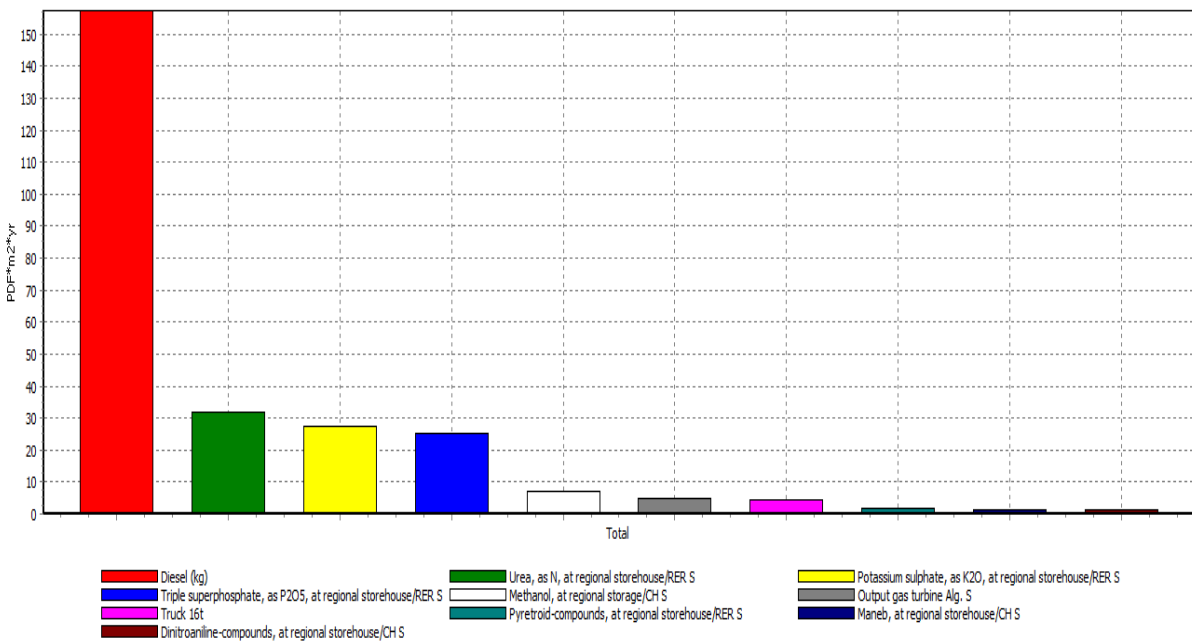
Analyse de 1 p 'BIODISEL', méthode: IMPACT 2002+ V2.05 / IMPACT 2002+ / étude de dommages

Figure V-8 : Contribution des étapes de production sur les différentes catégories de dommages



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

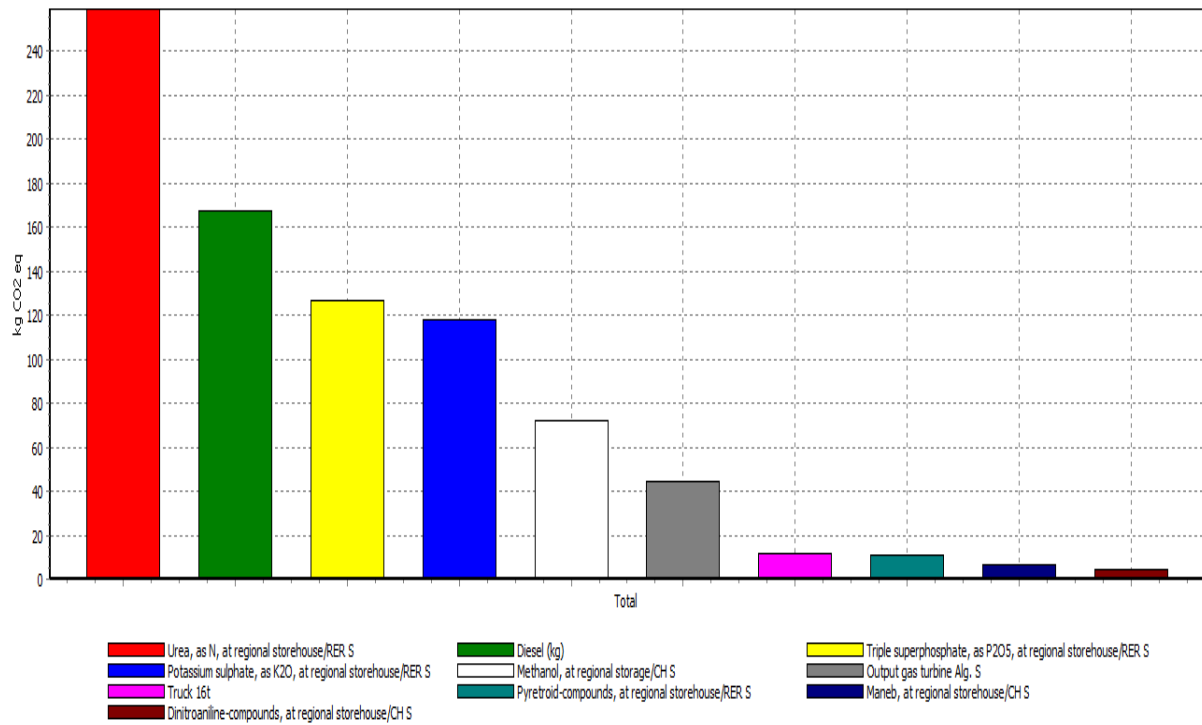
Figure V-9 : Contribution des différents intrants sur la santé humaine



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

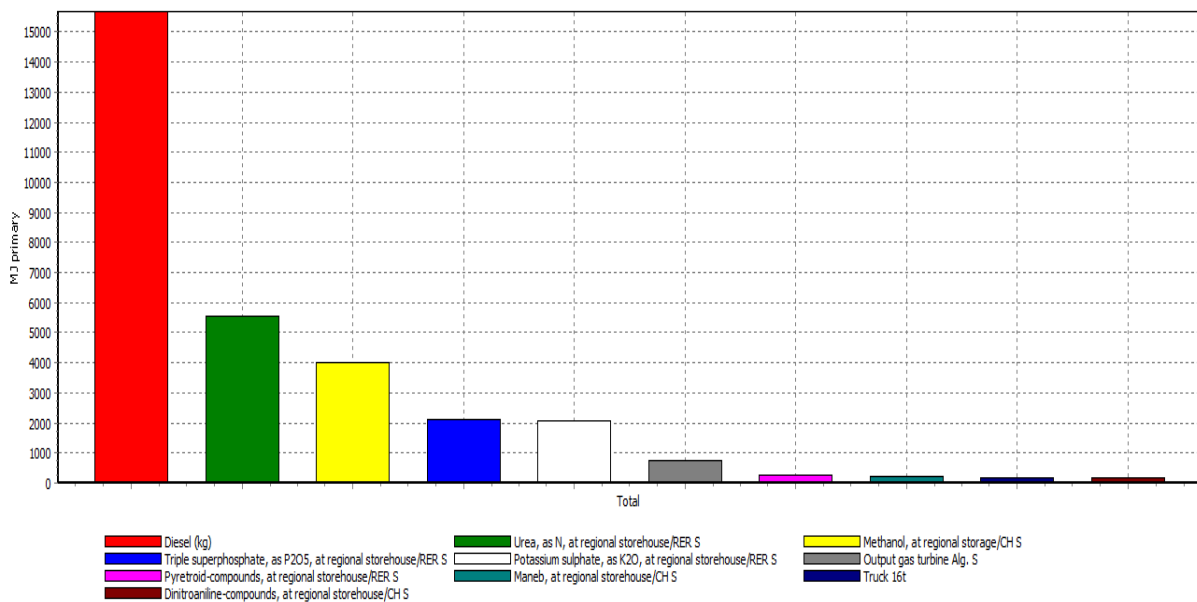
Figure V-10 : Contribution des différents intrants sur la qualité des écosystèmes

0



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

Figure V-11 : Contribution des différents intrants sur le changement climatique



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

Figure V-12 : Contribution des différents intrants sur l'utilisation des ressources

V.7 Conclusion

L'objectif de cette analyse du cycle de vie est essentiellement de définir les performances environnementales d'une filière de production de biodiesel à partir des graines de culture de *Tournesol* et dans les conditions existantes.

Cette analyse nous a permis de mettre en évidence les points faibles de notre système de production sur la base des bilans CO₂ et énergétique.

La production de 880 litres de biodiesel à partir des graines de *Tournesol* contribué à des émissions de CO₂ de 820 kg CO₂ eq et sachant que la capacité de séquestration de

CO₂ par le *Tournesol* est de 2200 kg/ha, l'écobilan de l'impact sur le changement climatique du à la production de 880 litres de biodiesel est de 820kg de CO₂ eq. Le bilan CO₂ est largement positif, ce qui est un critère de durabilité satisfaisante.

La consommation de l'énergie d'origine fossile est de 30900 MJ/ha pour 880 litres de biodiesel.

Le ratio obtenu étant de **1.28** supérieur à l'unité. En outre les principaux acteurs de la consommation énergétique sont le transport de la graine 32.9% et l'utilisation de l'engrais azotés 17.9%.

L'étape de la production de la matière première constitue fortement aux résultats des différentes catégories de dommages à savoir l'impact sur la santé humaine, la qualité de l'écosystème, le changement climatique et l'utilisation des ressources.

Il s'agit là de quelques remarques et conclusions relatives à l'analyse du cycle de vie pour la production du biodiesel à partir du *Tournesol*.

Il faut également souligner que cette approche d'analyse du cycle de vie est importante en tant qu'outil d'aide à la décision lors qu'il s'agit de comparer 2 ou plusieurs filières de production différentes.

Conclusion générale

Une analyse de cycle de vie a été réalisée dans le but d'évaluer le bilan énergétique et les impacts environnementaux d'une filière biodiesel à partir de la graine de tournesol.

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, le facteur principal qui contribue aux scores de changement climatique (émission de CO₂) est l'étape de la production des graines de tournesol avec une contribution de 71.85 % contre 28.15 % pour la conversion de l'huile en biodiesel et c'est le cas aussi pour le bilan énergétique avec une contribution de 50.10% et 49.9 % respectivement. Les 2 critères de durabilité sont largement satisfaisants avec un bilan CO₂ très positif et un bilan énergétique (**EROI 1.28**) supérieur à l'unité.

La contribution du biodiesel aussi minime soit-elle dans, sa part en matière d'approvisionnement énergétique global sera importante dans les prochaines décennies. En effet dans les conditions appropriées, la part du biodiesel croissant dans le bouquet énergétique pourrait contribuer à répondre et aux besoins énergétiques globaux importants et aux réductions des émissions de gaz à effet de serre (GES). Elle permettra ainsi d'assurer la sécurité énergétique dans des secteurs vitaux pour l'économie en particulier dans les pays en voie de développement tout en favorisant un développement rural durable.

Recommandations

Dans le cas où une filière durable de production du biodiesel en Algérie, il faut prendre en considération de nombreux facteurs pour assurer une meilleure exploitation des ressources naturelles disponibles et même d'y améliorer le potentiel.

Tous ces facteurs doivent être étudiés dans une approche intégrale basée sur le concept de développement durable en répondant aux objectifs socio-économiques et environnementaux tout en respectant les normes en vigueur afin d'obtenir un carburant de qualité et un assurant les conservation de la biodiversité par la diversification des ressources du biodiesel et en veillant à l'efficacité du système du cycle de vie.

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

La filière du biodiesel est constituée de 02 étapes :

- La production de la matière première
- Sa conversion en biodiesel

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 :

1. 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.

2. La maîtrise des techniques culturelles tout en réduisant les apports externes (fertilisants, pesticides, herbicides et énergie fossile).

Une substitution des ces apports est possible par l'exploitation des co-produits :

- Tourteaux d extractions toxiques et inappropriés pour l alimentation humaine et des débris de la taille
- L'utilisation des espèces fixatrices de l'azote
- L'utilisation des métabolites secondaires produits en abondance par les espaces 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 de gaz à effet de serre.

3. 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.

4. Le couplage d'un système de production alimentation énergie est l'une des meilleures approches pour assurer à la fois une amélioration de la sécurité alimentaire et énergétique à l'échelle locale et une réduction de la pauvreté.

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.

Nous proposons à ce titre de commencer par une opération pilote où toutes les domaines critiques seront évaluées et contrôlées des rendements réels obtenus jusqu'à les qualités du produit fini.

Une ferme pilote accompagnée par les pouvoirs publics et bénéficiant d'un programme pour le développement rural pourrait être implantée dans une région compatible avec l'ensemble des exigences de cette filière.

Bibliographie

A [AFN, 06] :

17 : AFNOR. Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices. NF EN ISO 14044/2006, La Plaine Saint-Denis, France : AFNOR, 2006, 49 p.

[AFN, 06b] :

AFNOR. Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. NFEN ISO 14040/2006, La Plaine Saint-Denis, France : AFNOR, 2006, 23p.

[AGR, 07] :

Agridea, Tournesol – Culture, 2007.

[ALL et al., 97] :

Allan Astrup Jensen, Leif Hoffman, Birgitte T. Moller, Anders Schmidt, Kim Christiansen, John Elkington, Franceska van Dijk. Life Cycle Assessment - A guide to approaches, experiences and information sources. European Environment Agency, 1997, 119 p.

[ALL, 43] :

Allen, H.D., Rock, G., US 2383579, 1943.

[ALL et al., 83] :

Allinger, N.L., Cava, M. P., De Jongh, D. C., Johnson, C. R., Lebel, N. A., Stevens, C. L., 6ème ed, 1983. 2: p. 553.

[AMR, 06] :

M. Amrani, Institut technique des grandes cultures ITGC, (Helianthus annus L) tournesol. 2006.

[ARI et al., 09] :

Mohammad arif, Dr. Zakwan ahmed:bio-diesel jatropha curcas(a promising source). Satish Serial Publishing House. 403, express tower, commercial complex, azadpur, delhi-11 0033 (india) (2009).

[ASS, 06] :

Med Assad Allah MATALLAH, Marche mondial des oléagineux, Institut National Agronomique (INA) Alger - Magistère 2006.

[AST et al., 97] :

Astrup Jensen, A., L. Hoffman, B. T. Moller, A. Schmidt, K. Christiansen, J. Elkington & F. van Dijk (1997). Life Cycle Assessment - A guide to

approaches, experiences and information sources. *European Environment Energy*: 119 p.

B [BAB, 03] :

Babu AK, D. Devaradjane: Vegetable oils and their derivatives as fuels for CI engines—an overview. SAE 2003. 2003-01-0767.

[BAL, 11] :

Mustafa Balat: Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work. *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 1479–1492.

[BAL et al., 08] :

Mustafa Balat, Havva Balat : A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel: *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 2727–2741.

[BAL, 05] :

Balat M : Current alternative engine fuels. *Energy Sources* (2005); 27:569–77.

[BAR et al., 05] :

B.K. Barnwal, M.P. Sharma: Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 9, 363–378(2005).

[BAR et al., 02] :

Barrault, J., Pouilloux, Y., Clacens, J.M., Vanhove, C., Bancquart, S., *Catal. Today*, 2002.75: p. 177-181

[BAU et al., 04a] :

Baumann, H. & A.-M. Tillman (2004a). Development of the LCA concept. *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Studentlitteratur. Lund, Sweden, Studentlitteratur AB.

[BAU et al., 04b] :

Baumann, H. & A.-M. Tillman (2004b). Goal and Scope definition. *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Studentlitteratur. Lund, Sweden, Studentlitteratur AB.

[BAU et al., 04c] :

Baumann, H. & A.-M. Tillman (2004c). Interpretation and presentation of results. *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Studentlitteratur. Lund, Sweden, Studentlitteratur AB.

[BEN, 99a] :

Bengt Steen. A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 - General system characteristics. CPM report 1999:4. Chalmers University of Technology, Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems, 1999, 66 p

[BEN, 99b] :

Bengt Steen., A systematic approach to environmental priority strategies (EPS). Version 2000 -Models and data of the default method. CPM report 1999:5. Chalmers University of Technology, Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems, 1999, 312 p.

[BEN, 09] :

Benoist, A. (2009). Eléments d'adaptation de la méthodologie analyse du cycle de vie aux carburants végétaux : cas de la première génération PhD, Ecole nationale supérieure des mines de Paris.

[BEZ et al., 09] :

Pierre Beziat, Eric Ceschia, Gerard Dedieu : Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France, 2009, Elsevier Ltd.

[BOG et al., 10] :

Anne Bogdanski, Olivier Dubois, Craig Jamieson, and Rainer Krell: Making Integrated Food-Energy Systems Work for People and Climate An Overview. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (2010).

[BRA, 44] :

Bradshaw, G.B., Meuly, W.C., U.S. Patent 2, 1944: p. 360-844.

[BRE et al., 04] :

F. Brentrup, 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.

[BUR, 08] :

Burzynski, J.P., IFP, 2008.

C [CAD et al., 08] :

J.-P. Cadoret et O. Bernard: La production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis. journal de la Société de Biologie, 202 (3), 201-211 (2008).

[CAY et al., 08] :

Caye M. Drapcho, Nghiem Phu Nhuan, Terry H. Walker: Biofuels Engineering Process Technology. by the McGraw-Hill Companies, Inc (2008).

[CET, 02] :

CETIOM. Tournesol : les techniques culturales, le contexte économique. Grignon, CETIOM. (2002).

[CHE, 06] :

Chen XY: Taking advantage of shrubs to promote the development of the energy

forestry. Journal of Beijing Forestry University (Social Sciences) (2006); 5(3):65–8.

[CHE et al., 99] :

Jacques Chevalier, Patrick Rousseaux. Classification in LCA: buiding of a coherent family of criteria. International Journal of Life Cycle Assessment, 1999, vol. 4,n°6, p 352-356.

[CHI, 80] :

Chisti, M.Y., J. Ramsay Society, 1980. 27-28: p. 24-26.

[CHI, 09] :

John Chi-Wei Lan, Amy Tsui, Shaw S. Wan and Ho-Shing Wu: Biochemical Engineering. by Nova Science Publishers, Inc. New York (2009).

[CUR, 06] :

Curran, M. A. (2006). Life cycle assessment: principles and practice. National Risk Managment Research Laboratory - Office of Research and Development - U.S. Environmental Protection Agency.

***D* [DEM, 09] :**

Demirbas, A., Energy Conversion and Management, 2009. 50: p. 14-34.

[DEM, 07] :

Ayhan Demirbas: Importance of biodiesel as transportation fuel. Energy Policy 35 (2007) 4661–4670.

[DEM, 08] :

Demirbas, A., Springer-Verlag (London), 2008.

[DEM, 02] :

Demirbas, A. 2002. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol. Convers Mgmt 43:2349–56.

[DUN, 01] :

Dunn, R. O. 2001. Alternative jet fuels from vegetable-oils. Trans ASAE 44:1151-757.

***E* [EKK et al., 03] :**

Ekko C. van Ierland, Alfons Oude Lansink: Economics of Sustainable Energy in Agriculture, Kluwer Academic Publishers (2003).

[ELB, 10] :

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

[ELB, 98] :

N. EL BASSAM: C3and C4plant species as energy sources and their potential impact on environment and climate. *Renewable Energy* 15 (1998) 205-210.

[ENW et al., 09] :

C.C. Enweremadu, M.M. Mbarawa, 2009: Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2205–2224

[EUR, 10] :

European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg., Publications Office of the European Union.

[EUR, 11] :

European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (2011). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook-Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. First edition November 2011. EUR 24571 EN. Luxemburg., Publications Office of the European Union.

***F* [FIN et al., 09] :**

Finnveden, G., M. Z. Hauschild, T. Ekvall, J. Guinée, R. Heijungs, S. Hellweg, A. Koehler, D. Pennington & S. Suh (2009). "Recent developments in Life Cycle Assessment." *Journal of Environmental Management* 91(1): 1-21.

[FOO et al., 04] :

Foon, C.S., May, C.Y., Ngan, M.A., Hock, C.C., *Journal of Oil Palm Research*, 2004. 16(2): p. 19-29.

[FOR, 07] :

Piers Forster, Venkatachalam Ramaswamy, Paulo Artaxo, Terje Berntsen, Richard Betts, David W. Fahey, James Haywood, Judith lean, Davis C. Lowe, Gunnar Myrhe, John Nganga, Ronald Prinn, Graciela Raga, Michael Schulz, Robert van Dorland. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Susan Solomon, Dahe Qin, Martin Manning, Zhenlin Chen, Melinda Marquis, Kristen Averyt, Melinda M.B. Tignor, Henry LeRoy Miller, Jr.. *The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2007, p 129-234.

[FRE et al., 84] :

Freedman, B., Pryde, E. H., Mounts, T. L., *JAOCs*, 1984. 61(10): p. 1638-1643.

[FRE et al., 86] :

Freedman, B., Butterfield, R.O., Pryde, E.H., JAOCS, 1986. 63(10): p. 1375-1380.

G [GAB, 08] :

Gabrielle, B., Journal de la Société de biologie, 2008. 3: p. 161-165.

[GAV et al., 05] :

Gavrilescua, M., Chisti, Y., Biotechnology Advances, 2005. 23: p. 471-499.

[GER et al., 05] :

Gerhard Knothe, Jon Van Gerpen, Jürgen Krahl: The Biodiesel Handbook. AOCS Press (2005)

[GHI et al., 00] :

Ghirardi, M.L., Zhang, L., Lee, J.W., Flynn, T., Seibert, M., Greenbaum, E., Melis, A., Trends in Biotechnology, 2000. 18(12): p. 506-511.

[GIA et al, 02] :

Giannelos, P.N., Zannikos, F., Stournas, S., Lois, E., Anastopoulos, G. 2002. Tobacco seed oil as an alternative diesel fuel: physical and chemical properties. Ind Crop Prod 16:1-9.

[GOE et al, 01] :

Mark Goedkoop, Renilde Spriensma. The Eco-indicator 99 - A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Report 1999/36A. PRé Consultants B.V., 2001, 132 p.

[GOE et al, 09a] :

Goedkoop, M., R. Heijungs, M. Huijbegts, A. D. Schryver, J. Struijs & R. v. Zelm (2009a). ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level R. O. e. M. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimte en Milei. Report I - Characterisation: 132.

[GOE et al, 09b] :

Goedkoop, M., R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs & R. van Zelm (2009b). ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Ruimte en Milieu.

[GOE et al., 09]

Geoffrey S. et A, Pablo: Agricultural Wastes. by Nova Science Publishers, Inc (2009).

[GOE et al., 82] :

Goering, E., Schwab, W., Daugherty, J., Pryde, H., Heakin, J., 1982. Fuel properties of eleven vegetable oils. Transactions of the ASAE 25, 1472–1483.

[GRA et al., 98] :

Graboski, M.S., McCormick, R.L. 1998. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. Prog Energy Combust Sci 24:125–164.

[GUN, 04] :

FRANK D. GUNSTONE: THE CHEMISTRY OF OILS AND FATS Sources, Composition, Properties and Uses. By Blackwell Publishing Ltd (2004).

[GUN et al., 01] :

Gunstone, F.D., Hamilton, R.J. (eds.) 2001. Oleochemicals manufacture and applications. Sheffield Academic Press/CRC Press, Sheffield, UK/Boca Raton, FL.

***H* [HAR et al., 56] :**

Hartman, L., JAOCS, 1956. 33(3): p. 129-132.

[HEG et al., 07] :

abriele C. Hegerl, Francis W. Zwiers, Pascale Braconnot, Nathan P. Gillett, Yong Luo, Jose A. Marengo Orsini, Neville Nicholls, Joyce E. Penner, Peter A. Stott. Understanding and attributing climate change. In : Susan Solomon, Dahe Qin, Martin Manning, Zhenlin Chen, Melinda Marquis, Kristen Averyt, Melinda M.B. Tignor, Henry LeRoy Miller, Jr.. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2007, p 663-746.

[HEL et al., 99] :

Helias Udo de Haes, Olivier Jolliet, Göran Finnveden, Michael Hauschild, Wolfram Krewitt, Ruedi Müller-Wenk. Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment. SETAC-Europe: Second Working Group on LCIA. International Journal of Life Cycle Assessment, 1999, vol. 4, n°2-3, p 66-74 and 168-174.

[HOO et al., 06] :

Hooijer A, Silvius M, Wosten H, Page S: PEAT-CO₂, assessment of CO₂ emissions from drained peatlands in SE Asia. Delft Hydraulics Report (2006) Q3943.

[HUM et al., 05] :

Sébastien Humbert, Manuele Margni, Olivier Jolliet. IMPACT 2002+: User Guide. Draft for version 2.1. Industrial Ecology & Life Cycle Systems Group (GECOS), Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), 2005, 36 p.

[HUN, 09] :

Colin A.G. Hunt: Carbon Sinks and Climate Change Forests in the Fight against Global Warming. *ADVANCES IN ECOLOGICAL ECONOMICS*, Edward Elgar Cheltenham, UK • Northampton, MA, USA (2009).

***J* [IAN et al., 10] :**

Ian C.J. Bart, Natale Palmerie and Stefano Cavallaro, *Biodiesels Science and Technology, From Soil to oil*, CRC Press, 2010.

[INA ,03] :

INA P-G – Département AGER – 2003.

[INT, 06a] :

International Standardization Organization (2006a). *ISO 14040 : Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*, ISO.

[INT, 06b] :

International Standardization Organization (2006b). *ISO 14044 : Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices*, ISO.

***J* [JAY et al., 09] :**

M.H. Jayed , H.H. Masjuki, R. Saidur, M.A. Kalam, M.I. Jahirul: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2452–2462.

[JER et al., 01] :

Jeroen B. Guinée, Marieke Gorrée, Reinout Heijungs, Gjalt Huppes, René Kleijn, Arjan de Koning, Lauran van Oers, Anneke Wegener Sleeswijk, Sangwon Suh, Helias A.Udo de Haes, Hans de Bruijn, Robbert van Duin, Mark A.J. Huijbregts. *Life cycle assessment – An operational guide to the ISO standards*. Centre of Environmental Science - Leiden University (CML), 2001, 702 p.

[JOL et al., 03] :

Olivier Jolliet, Manuele Margni, Raphaël Charles, Sébastien Humbert, Jérôme Payet, Gerald Rebitzer, Ralph Rosenbaum. *IMPACT 2002+ : A new life cycle impact assessment methodology*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, vol. 8, n°6, p 324-330.

***K* [KAH, 08] :**

Kahraman Bozbas: *Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 542–552.

[KAR et al., 06] :

Kargı, F., Kapdan, L.K., *Enz. Microb. Tech.*, 2006. 38(5): p. 569-582.

[KEI, 43] :

Keim, G.I., US 2383601, 1943.

[KHA, 99] :

Khalil Khalifa. Analyse du cycle de vie - Problématique de l'évaluation des impacts. Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie industriel, G5610, 1999, 12 p.

[KHA, 02] :

Khalil Khalifa. Analyse du cycle de vie - Méthodes d'évaluation des impacts. Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie industriel, G5615, 2002, 20 p.

[KNO et al., 06] :

Knothe, G., Sharp, C.A., Ryan, T.W., 2006. Exhaust emissions of biodiesel, petrodiesel, neat methyl esters, and alkanes in a new technology engine. *Energy and Fuels* 20, 403–408.

[KNO et al., 05] :

Knothe, G., Krahl, J., Van Gerpen, J. (Eds.), 2005. *The Biodiesel Handbook*. AOCS Press, Champaign, IL.

[KUK et al., 11] :

Nenad Kukulj and Tomislav Kurevija: Energy and Environmental Significance of an Alternative Fuels Utilization Produced with to Liquid Technology. IN *Survival and Sustainability Environmental Concerns in the 21st Century*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2011).

[KUM, 11] :

Ashwani Kumar, Satyawati Sharma: Potential non-edible oil resources as biodiesel feedstock: An Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1791–1800.

[KUS, 82] :

Kusy, P.F., Int. conf. on plant and vegetable oils as fuels, Fargo, ND, USA, , 1982: p. 127-137

ℒ [LAU et al., 10] :

Laura Azócar & Gustavo Ciudad & Hermann J. Heipieper & Rodrigo Navia: Biotechnological processes for biodiesel production using alternative oils. *Appl Microbiol Biotechnol* 88:621–636(2010).

[LIC, 10] :

Eric Lichtfouse: Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture. Springer Dordrecht Heidelberg London New York (2010).

[LIN et al., 11] :

Lin a, Zhou Cunshan, Saritporn Vittayapadung, Shen Xiangqian, Dong Mingdong: Opportunities and challenges for biodiesel fuel. *Applied Energy* 88

1020–1031(2011).

M [MA et al., 99] :

Ma, F., Hanna, M.A., Bioresource Technology, Biodiesel production: a review. 1999. 70: p. 1-15.

[MA et al., 98] :

Ma, F., Clements, L.D., Hanna, M.A., Trans. ASAE, 1998. 41: p. 1261-1264.

[MAR, 06] :

Mary Ann Curran. Life cycle assessment: principles and practice. Report EPA/600/R-06/060. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 2006, 80 p.

[MAS et al., 10] :

P.N. Mascia et al. (eds.): Plant Biotechnology for Sustainable Production of Energy and Co-products, Biotechnology in Agriculture and Forestry 66, DOI 10.1007/978-3-642-13440-1_8. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2010).

[MCC, 13] :

McClellan I: Indonesia's natural resources and the environment: development, politics, and ecological destruction. M.A. diss., Webster University, In Dissertations & Theses: Full Text [database on-line]; available from <http://www.proquest.com> (publication number AAT 1452305; accessed March 26, 2013): p. 45-46.

[MEN et al., 06] :

Meneghetti, S.M.P., Meneghetti, M.R., Wolf, C.R. Silva, E.C., Lima, G.E.S., Silva, L., Serra, T.M., Cauduro, F., de Oliveira, L.G., Energy & Fuels, 2006. 20: p. 2262-2265.

[MEY, 99] :

Meyer, U., Hoelderich, W.F., Appl. Catal. A, 1999. 178: p. 159-166.

[MIC, 09] :

Jean-Claude K., Michel: Advances in Botanical Research. 2009, Elsevier Ltd.

[MIT et al., 04] :

Mittelbach, M., Remschmidt, C., 2004. Biodiesels–The Comprehensive Handbook. Karl-Franzens University, Graz, Austria.

[MUD et al., 99] :

Mudge, S.M., Pereira, G., 1999. Stimulating the biodegradation of crude oil with biodiesel preliminary results. Spill Science and Technology Bulletin 5, 353–355.

N [NAG, 08] :

Ahindra Nag: Biofuels Refining and Performance. by The McGraw-Hill

Companies, (2008).

[NAG et al., 90] :

Nagel, N., Lemke, P., Applied Biochemistry and Biotechnology, 1990. 24-25: p. 355-361.

[NIT et al, 65] :

Nitschke, W.R., Wilson, C.M. 1965. Rudolph Diesel, Pioneer of the Age of Power. University of Oklahoma Press, Norman, OK.

O [OEC, 10] :

OECD-FAO: Challenges for Agricultural Research, OECD Publishing (2010).

P [PAR et al., 05] :

Parmathama, S., Parthiban, K.T., Balasubramanian, A., Venkatachalam, P. and Raghuram, P. : Cultivation and management of Jatropha plantation. Forestry Series, TNAU Coimbatore, 218 p. (2005)

[PEN et al., 04] :

D.W. Pennington, J. Potting, G. Finnveden, E. Lindeijer, O. Jolliet, T. Rydberg, G. Rebitzer. Life cycle assessment - Part 2: Current impact assessment practice. Environment International, 2004, vol. 30, n°5, p 721-739.

[PIN et al., 08] :

Lian Pin Koh, Jaboury Ghazoul: Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities. Biological Conservation 141 (2008) 2450 –2460.

[POR, 60] :

Poré, J., Oléagineux, 15ème année, 1960(3): p. 165-172.

[POT et al., 97] :

José Potting, Michael Hauschild. Spatial differentiation in Life-Cycle Assessment via the site-dependent characterisation of environmental impact from emissions. International Journal of Life Cycle Assessment, 1997, vol. 2, n°4, p 209-216.

[POT et al., 97b] :

José Potting, Michael Hauschild. The linear nature of environmental impact from emissions in Life-Cycle Assessment. International Journal of Life Cycle Assessment, 1997, vol. 2, n°3, p 171-177.

[PRO, 07]:

Prolea, Filière française des huiles et protéines végétales, 2007.

[PRY et al., 82] :

Pryor, R.W., Hanna, M.A., Schinstock, J.L., Bashford, L.L., 1982. Soybean oil fuel in a small diesel engine. Transactions of the ASAE 26, 333–338.

R [RAM, 10] :

K.G. Ramawat: Desert Plants, Biology and Biotechnology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2010).

[RAZ, 09] :

Luis F. Razon: Alternative crops for biodiesel feedstock. Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources (2009) 4, No. 056.

[RAT et al., 10] :

Rattan Lal, B.A. Stewart: Soil quality and Biofuel production. CRC Press, Taylor & Francis group. (2010).

[ROS, 05] :

Rousseaux, P. "Analyse du cycle de vie (ACV)." Techniques de l'Ingénieur G5500. (2005).

[ROS, 98] :

Patrick Rousseaux. Analyse du cycle de vie - Evaluation des impacts. Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie industriel, G5605, 1998, 13 p.

[ROE et al., 94] :

Roessler, P.G., Brown, L.M., Dunahay, T.G., Heacock, D.A., Jarvis, E.E., Schneider, J.C., Talbot, S.G., Zeiler, K.G., Enzymatic Conversion of Biomass for Fuels Production, 1994: p. 255-70.

[ROS et al., 09] :

Rosch C, Skarka J, Patyk A: Microalgae: Opportunities and Challenges of an Innovative Energy Source. In: 17th European biomass conference and exhibition, Hamburg, Germany; (2009) June 29–July 3.

[RUS, 08] :

Daniela Russi: An integrated assessment of a large-scale biodiesel production in Italy: Killing several birds with one stone? Energy Policy 36 (2008) 1169–1180.

S [SAT et al., 10] :

Vasanthakumar SathyaSelvabala, Thiruvengadaravi Kadathur Varathachary, Dinesh Kirupha Selvaraj, Vijayalakshmi Ponnusamy, Sivanesan Subramanian: Removal of free fatty acid in Azadirachta indica (Neem) seed oil using phosphoric acid modified mordenite for biodiesel production. Bioresource Technology 101 (2010) 5897–5902.

[SCH et al., 87] :

Schwab, A.W., Bagby, M.O., Freedman, B., Fuel, 1987. 66(10): p. 1372-1378.

[SHA, 08] :

A.B.M. Sharif Hossain, Aishah Salleh: Biodiesel Fuel Production from Algae as

Renewable Energy. American Journal of Biochemistry and Biotechnology 4 (3):250-254, (2008).

[SHA, 93] :

Shay, E.G. 1993. Diesel fuel from vegetable oils: status and opportunities. Biomass Bioenergy 4:227–242.

[SHI et al., 07] :

Shibasaki-Kitakawa, N., Honda, H., Kuribayashi, H., Toda, T., Fukumura, T., Yonemoto, T., Bioresource Technology, 2007. 98: p. 416-421.

[SIN et al., 10] :

S.P. Singh, Dipti Singh: Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews (2010)14 200–216.

[SON, 79] :

Sonntag, N.O.V. 1979. Reactions of fats and fattyacids. In: Swern, D. (ed.) Bailey's Industrial Oil and Fat Products, Vol. 1, 4th edn. Wiley, New York, p. 99.

[SPE et al., 00] :

Speidel, H.K., Lightner, R.L., Ahmed, I., 2000. Biodegradability of newengineered fuels compared to conventional petroleum fuels andalternative fuels in current use. Applied Biochemistry and Biotechnology 84–86, 879–897.

[SPI et al., 13] :

D. Spinelli, S. Jez, R. Pogni, R. Basosi : Environmental and life cycle analysis of a biodiesel production line from sunflower in the Province of Siena (Italy), 2013, Elsevier Ltd.

[SPO et al., 06] :

Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., Isambert, A., Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006. 101(2): p. 87-96.

[SRI et al., 74] :

Sridharan, R., Mathai, I.M., J. Scient. Ind. Res., 1974. 33: p. 178-187.

T [TRE et al., 07] :

Hervé Le Treut, Richard Somerville, Ulrich Cubasch, Yihui Ding, Cecilie Mauritzen, Abdalah Mokssit, Thomas Peterson, Michael Prather. Historical overview of climate change science. In: Susan Solomon, Dahe Qin, Martin Manning, Zhenlin Chen, Melinda Marquis, Kristen Averyt, Melinda M.B. Tignor, Henry LeRoy Miller, Jr.. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2007, p 93-128.

U [UNI, 96] :

United Nations Environment Program (UNEP) - Industry and Environment. Life cycle assessment: what it is and how to do it. ISBN : 92-807-1546-1. Paris, France : UNEP, 1996, 77 p.

[UST, 05] :

Usta N. : Use of tobacco seed oil methyl ester in a turbocharged indirect injection diesel engine, *Biomass and Bioenergy*, (2005) 28, 77-86.

[UME et al., 08] :

Umer Rashid, Farooq Anwar, Bryan R. Moser, and Gerhard Knothe: Moringaoleiferail: A possible source of biodiesel. *Bioresource Technology* 99 (2008) 8175–8179

[UNI, 03] :

United Nations Environment Program. Evaluation of environmental impacts in life cycle assessment. ISBN 92-807-2144-5. United Nations Environment Program, Division of Technology, Industry and Economics, 2003, 95 p.

V [VER, 08] :

Wilfred vermerris: Genetic improve of bioenergy crops (2008).

[VIN et al., 04] :

Vicente, G., Martinez, M., Aracil, J., *Bioresource Technology*, 2004. 92: p. 297-305.

W [WAN et al., 97] :

Li et Wang: Use food industry waste to produce microbial oil. *Science and Technology of Food Industry* 6:65–69(1997).

[www Calpa] :

Adresse URL :

<http://www.capla.info/IMG/File/11%20SEMIS%20DES%20TOURNESOLS.pdf>,
accédé le 22/03/2013.

y [YL, 06] :

Ma YL: Microbial oils and its research advance. *Chin JBioprocess Eng.* 2006(4):7–11

Z [ZEG et al., 11] :

Walter Zegada-Lizarazu, Andrea Monti: Energy crops in rotation. A review. *Biomass and bioenergy* 35 (2011) 12-2 5

[ZHA et al., 03] :

Zhang, Y., Dub, M.A., McLean, D.D., Kates, M., 2003. Biodieselproduction from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis. *Bioresource Technology* 90, 229–240.g