

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département d'Electronique

Ecole Doctorale des Energies Renouvelables



Option : Bioénergie

Thème

*Evaluation du Potentiel des Espèces Végétales Régionales
Pour la Production du Biodiesel*

AMOURI Mohammed

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en Energies
Renouvelables, option *Bioénergie*

Soutenu le 07 Mars 2012 devant le Jury:

	Nom	Prénom	Etablissement
Président	Mr.HADDADI	Mourad	Professeur ENP
Rapporteur	Mr.AHMED ZAÏD	Toudert	Professeur ENP
Examineurs	Mlle. AZIZA	Majda Amina	Directeur de Recherche CDER
	Mme. MEFTI	Afia	Maître de Conférences ENP
Invité	Mr. LOUNI	Sofian	Maître-Assistant UKMO
	Mr. ZANNDUCHE	Ouahid	Chargé de Recherche, INRF

Année universitaire : 2011 – 2012

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui m'ont soutenu tout au long de mon cursus universitaire.

A mes chers frères et sœurs en particulier mon frère Karim pour son inestimable soutien pour que je continue mes études.

A tous les membres de ma famille chacun par son nom.

Je le dédie également à mes chers amis ; Nacer, Mahfoud, Elhachmi, Salim et Maned. Et collègues en particulier M^{lle} Koli, M^{me} Amirouche, Amina, Wahid, Halim, Amine, Mostapha et Fatima Zohra.

A tous le corps enseignants, administratifs de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP).

M. AMOURI

REMERCIEMENTS

Mes vifs remerciements sont d'abord adressés à mon directeur de mémoire M^e **Toudert AHMED ZAID**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) pour avoir dirigé ce présent travail. Je le remercie pour tous ses aides, apports, remarques, ses conseils et ses orientations pour finaliser ce mémoire.

Je tiens à remercier vivement M^e **Mourad HADDADI**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) pour avoir accepté d'être le président de jury.

Je tiens à remercier vivement Mlle **Amina Majda AZIZA**, Directeur de recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) pour ses précieux conseils et orientations ainsi que d'avoir accepté d'être examinateur de ce mémoire.

Je tiens à remercier aussi Mme **Afia MEFTI**, Maitre de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) pour avoir accepté d'être examinateur de ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier M^e **Sofiane LOUNI**, Maître-assistant à l'université de OUARGLA (UKMO) pour avoir accepté d'être membre de jury.

Je tiens aussi à remercier M^e **Ouahid ZANNDOUCH**, Attaché de recherche à l'Institut National de la Recherche Forestière(INRF) pour ses aides et ses apports pendant notre recherche. Je le remercie pour avoir accepté d'être membre de jury.

Je tiens aussi à remercier M^e **Djilali AGOUNI** de l'Institut Technique d'Arboriculture Fruitière(ITAF) pour ses aides et ses apports pendant notre recherche.

Je tiens à remercier Me **Said AMRAR**, le directeur de l'Institut Technique des Cultures Maraichères et Industrielles (ITCMI) de Staouéli de nous faciliter la tâche afin de finaliser ce travail ainsi que tous les collègues de l'institut pour leurs encouragements.

Ainsi à nos collègues étudiants de l'Ecole Doctorale des Energies Renouvelables promotion 2009 pour leurs aides soit pour leurs encouragements et en particulier ceux de l'option Bioénergie ; Amina SAIDI, Bachira ABADA, Nacer MOUDOUD, Amina ALOUACH et Ferial MELAINE

A tout ce beau monde, qui de près ou de loin, a contribué à la réalisation de ce travail

ملخص

يعتبر الديزل الحيوي كوقود بديل للديزل الأحفوري وذلك لمزاياه العديدة المتمثلة في اعتباره ذو مصدر متجدد، قابل للتحلل البيولوجي، غير سام، ذو مزايا تشحيمية جيدة و أيضا يساهم في التقليل من انبعاثات غاز CO₂ إن الهدف من هذه الدراسة هو القيام بإعداد جرد لمختلف الأنواع النباتية البديلة ذات المردود الزيتي العالي من الناحية الكمية و الكيفية و ذلك لإستغلالها كمادة أولية لإنتاج الديزل الحيوي، و قد تم إختيار هذه الأنواع النباتية حسب ثلاثة معايير و المتمثلة في التأقلم الجيد مع البيئة الزراعية، الإمكان الوراثي والخصائص التقنية للوقود المصنوع من هذه الأنواع النباتية. و تم القيام بتقييم دورة الحياة لمعرفة التأثيرات المحتملة لإنتاج الوقود الحيوي على البيئة إنطلاقا من زيت *Moringa Oleifera*.

الكلمات المفتاحية

الديزل الحيوي، الأنواع النباتية البديلة، تقييم دورة الحياة، *Moringa Oleifera*

RESUME

Le Biodiesel, est présenté aujourd'hui comme un carburant alternatif grâce à ses caractéristiques techniques comparables à celles du gazole. Le biodiesel est un biocarburant d'origine renouvelable, non toxique, biodégradable, avec une excellente lubricité et un bilan de carbone théoriquement nul.

Cette étude a pour objectif de dresser un inventaire des espèces végétales oléagineuses à fort potentiel en huile susceptible de représenter une source de matière première fiable, du point de vue quantitatif et qualitatif pour la production de biodiesel. Le choix des espèces retenues a été fait selon trois types de critères à savoir les performances agro-écologiques, le potentiel génétique et les caractéristiques techniques du biodiesel élaboré à partir de ces espèces.

Une analyse de cycle de vie a été ainsi réalisée dans le but d'évaluer les impacts éventuels de la production du Biodiesel à partir de *Moringa Oleifera*.

Mots clés : Biodiesel, Biocarburant, Espèces Végétales oléagineuse, analyse de cycle de vie, *Moringa Oleifera*.

Abstract

Currently, Biodiesel has become an attractive option for the replacement of petroleum diesel because of its interesting physical and chemical properties comparatively to conventional diesel. Biodiesel is renewable, biodegradable, and non-toxic and has superior lubricity to petrodiesel with a neutral carbon balance.

Our main objective in this study is the establishment of an inventory of oilseed species that have a high oil potential content in order to be a reliable alternative source, quantitatively and qualitatively, for biodiesel production. The choice of the selected species was carried out taking into account three types of criteria: the agro-ecological performances, the genetic potential and the physico-chemical characteristics of biodiesel produced from these oilseed alternative species.

A life cycle analysis was carried out aiming the evaluation of the possible environmental impacts issued of the production of *Moringa Oleifera* Biodiesel.

Keywords : Biodiesel, Petroleum diesel, alternative oilseed species, feedstock, life cycle analysis, *Moringa Oleifera*.

LISTE DES FIGURES

Fig.1.1 : La croissance de la consommation mondiale du diesel et les futures prévisions	2
Fig.1.2 : La distribution des sources FAME autour du monde	3
Fig.1.3 : La production globale du biodiesel par source	4
Fig.1.4 : transésterification des triglycérides en utilisant un méthanol et un catalyseur	12
Fig.2.1 : Distribution générale des coûts pour la production du biodiesel.....	17
Fig.2.2 : Evolution de la consommation mondiale des huiles végétales.....	18
Fig.2.3 : Un cycle fermé pour la production de l'énergie à partir de biomasse	19
Fig.2.4 : La production de la biomasse des espèces a C ₄ et C ₃ en irrigué et non irrigué.....	20
Fig.2.5 : structure chimique des Triglycérides	24
Fig.2.6 : Réaction de saponification des acides gras libre AGL	26
Fig.2.7 : Degré de saturation triglycérique	30
Fig.2.8 : Exemples représentatifs de steryl glucosides, tocophérols, phospholipides, et hydrocarbures rencontrés dans le biodiesel	31
Fig.2.9 : Les différentes possibilités d'utilisation du glycérol	33
Fig.3.1 : Réduction des émissions en polluants pour B100 et B20.....	36
Fig.3.2 : La consommation en pétrole de quelque pays dans le monde	38
Fig.4.1 : Phase de l'analyse du cycle de vie	41
Fig.4.2 : Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions sur les sujets à protéger d'après la norme ISO 14042.....	43
Fig.4.3 : structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie	44
Fig.5.1 : Carte pluviométrique pour l'Algérie du Nord	81
Fig. 5.2 : La carte des étages bioclimatiques en Algérie	81
Fig. 5.3 : Carte synthèse de sensibilité à la désertification (2000-2005).....	81
Fig. 5.4 : Indice de Cétane du biodiesel de différentes espèces	89
Fig. 5.5 : le point de trouble (PT) du biodiesel de différentes espèces	89
Fig. 5.6 : Le Point d' Ecoulement (PEc) du biodiesel de différentes espèces	89
Fig. 5.7 : la viscosité cinématiques du biodiesel de différentes espèces	90

Fig. 5.8 : Le Point d'Eclair (PE) du biodiesel de différentes espèces	90
Fig. 5.9 : La Densité du biodiesel de différentes espèces	90
Fig. 6.1 : Les différents processus de production du biodiesel de <i>Moringa oleifera</i>	93
Fig. 6.2 : Arborescence de processus élémentaire simplifié pour LCA du biodiesel de <i>Moringa oleifera</i>	96
Fig. 6.3 : contribution des processus élémentaire aux changements climatiques (kg CO ₂ eq) 98	
Fig. 6.4 : contribution des processus élémentaire aux changements climatiques (%)	99
Fig. 6.5 : Contribution des processus élémentaire au bilan énergétique (MJ)	101
Fig. 6.6 : Contribution des processus élémentaire au bilan énergétique (%)	101
Fig. 6.7 : Contribution des étapes de Production sur les Différentes Catégories d'impact intermédiaires	102
Fig. 6.8 : Contribution des Etapes de Production sur les Différentes Catégories de Dommage	105
Fig. 6.9 : contribution des différents intrants sur la santé humaine	105
Fig. 6.10 : contribution des différents intrants sur la qualité des écosystèmes	106
Fig. 6.11 : contribution des différents intrants sur le changement climatique	106
Fig. 6.12 : contribution des différents intrants sur l'utilisation des ressources	106

LISTE DES TABLEAUX

Tab.1.1 : Principales sources des huiles non-alimentaires pour la production du biodiesel	5
Tab.1.2 : La composition en acide gras du biodiesel préparé à partir des graisses animale (% du poids total)	6
Tab.1.3 : Comparaison des rendements en huile entre les microalgues et les cultures Commune pour la production du biodiesel	7
Tab.1.4 : Accumulation des lipides par différentes microalgues	8
Tab.1.5 : Rendements des Microalgues	8
Tab.1.6 : Accumulation des lipides par les différentes levures et moisissures (Mucor).....	10
Tab.1.7 : Les propriétés physico-chimiques des huiles végétales alimentaires	11
Tab.1.8 : Standard du Biodiesel ASTM D6751 (USA)	13
Tab.1.9 : Standards du Biodiesel EN 14214 (Europe).....	14
Tab.2.1 : Quelques caractéristiques physiologiques selon la voie photosynthétique	20
Tab.2.2 : Productivité de quelques espèces oléagineuses	22
Tab.2.3 : Propriétés du carburant en fonction de la composition du carburant en AG	24
Tab.2.4 : Structure chimique des acides gras courants dans les huiles végétales	24
Tab.2.5 : Exemples de production du biodiesel à partir de matière première à teneur élevée en AGL	26
Tab.2.6 : Effet de la structure des AEAG sur les propriétés du biodiesel	27
Tab.2.7 : Propriétés des AEAG	27
Tab.2.8 : Profil des acides gras (%) du biodiesel à partir des sources alternatives	28
Tab.2.9 : Composition chimique de quelques tourteaux d'extraction	29
Tab.3.1 : la biodégradabilité du pétrole et les biocarburants	35
Tab.3.2 : Coefficient Energétiques des Intrants Agricoles	36
Tab.3.3 : Différentes substances toxiques rencontrées dans les espèces oléagineuses non alimentaires	39
Tab. 5.1 : Composition en Acide gras de l'huile de <i>L. leucocephala</i>	47
Tab. 5.2 : Composition en Acide gras de l'huile de <i>J. curcas</i>	50

Tab. 5.3 : Comparaison des propriétés du diesel, huile pure et Biodiesel du <i>J. curcas</i>	50
Tab.5.4 : Caractéristique de l'huile de <i>C. Cardunculus</i>	53
Tab. 5.5 : les propriétés de Biodiesel élaboré a partir de l'huile de <i>C. cardunculus</i>	53
Tab. 5.6 : La composition en Acide gras de <i>Moringa oleifera</i>	55
Tab. 5.7 : Les propriétés des MEAG de <i>M. oleifera</i>	55
Tab. 5.8 : les propriétés de l'huile de <i>Ricinus communis</i> L	58
Tab. 5.9 : Les propriétés des MEAG de <i>R. commmunis</i>	58
Tab. 5.10 : Caractéristiques écologiques de <i>Brassica carinata</i>	59
Tab. 5.11 : La composition chimique de l'huile de <i>Brassica carinata</i>	60
Tab. 5.12 : Les propriétés techniques du biodiesel de <i>Brassica carinata</i>	60
Tab. 5.13 : La composition en ester de cire de l'huile de Jojoba	63
Tab. 5.14 : Les propriétés physico-chimiques de l'huile de Jojoba	64
Tab. 5.15 La composition de l'huile du tabac	66
Tab. 5.16 : Les propriétés du biodiesel élaboré à partir du tabac	66
Tab. 5.17 : La composition de l'huile de <i>Salicornia bigelovii</i>	69
Tab. 5.18 : Propriétés du Biodiesel de <i>Salicornia bigelovii</i>	69
Tab. 5.19 : La composition chimique de l'huile de <i>E. Lathyris</i>	71
Tab. 5.20 : Les propriétés physico-chimiques d'huile <i>E. Lathyris</i>	71
Tab. 5.21 : Propriétés du biodiesel <i>E. Lathyris</i>	72
Tab. 5.22 : Caractéristiques écologiques du <i>Citrullus colocynthis</i>	73
Tab. 5.23 : La composition en acide gras de l'huile de de <i>C. Colocynthis</i>	74
Tab. 5.23 : Les propriétés physico-chimiques d'huile <i>Citrullus colocynthis</i>	74
Tab. 5.24 : Propriétés du biodiesel obtenu à partir de <i>Citrullus colocynthis</i>	75
Tab. 5.25 : Caractéristiques écologiques du <i>Prunus amygdalus var. amara</i>	76
Tab. 5.26 : La composition de l'huile du <i>Prunus amygdalus var. amara</i>	77
Tab. 5.27 : Propriétés de l'huile de <i>Prunus amygdalus var. amara</i>	77
Tab. 5.28 : Les propriétés du biodiesel de <i>Prunus amygdalus var. amara</i>	78

Tab. 5.29 : les cultures énergétiques potentielles pour la production du biodiesel selon les conditions climatiques locales	80
Tab. 5.30 : Les Exigences Ecologiques des Espèces Sélectionnées	82
Tab. 5.31 : Les potentialités génétique des espèces sélectionnées	85
Tab. 5.32 : Les caractéristiques du biodiesel élaboré à partir de différentes espèces comparativement aux normes internationales (EN14214, ASTM 6751)	88
Tab. 6.1 : Inventaire du cycle de vie de la production de 1000 L de biodiesel de <i>Moringa oleifera</i> conduite en sec	95
Tab. 6.2 : les émissions en CO2 en kg CO2eq	98
Tab. 6.3 : Résultats du bilan énergétique (MJ).....	100
Tab. 6.4 : Caractérisation intermédiaire	101
Tab. 6.5 : Etude de dommages	104

ABRÉVIATION

ACV	: Analyse de Cycle de Vie
AEAG	: Alkyl Esters d'Acides Gras
AG	: Acide Gras
AGL	: Acide Gras Libre
ASTM	: American Society of Test and Materials
B10	: Biodiesel a 100%
B20	: Biodiesel a 100%
B100	: Biodiesel a 100%
C	: Carbone
CAM	: Acide Crassulacéen
COS	: Carbone Organique du Sol
C₃	: Produit photosynthétique d'un acide organique à 3 carbones
C₄	: Produit photosynthétique d'un acide organique à 4 carbones
C₅	: Produit photosynthétique d'un acide organique à 5 carbones
DAG	: Diglycéride
EROI	: Energy Return on Investment
GES	: Gaz à Effet de Serre
H/C	: Hydrogène / Carbone
IC	: Indice de Cétane
ID	: Ignition Delay (délai d'auto-inflammation)
II	: Indice d'Iode
ISO	: Indice de Stabilité Oxydative
MAG	: Mono-Glycéride
MEA	: Méthyl Esters d'Acide Gras
G	
Mb/j	: Million de baril par jour
Min	: Minimum
N	: Azote
PE	: Point d'Eclair
PF	: Point de Fusion
PGA	: Acide Phosphoglycérique
PT	: Point de Trouble
TAG	: Triglycéride
TLF	: Température Limite de Filtrabilité
WCO	: Waste Cooking Oil
SG	: Stéryl Glucoside
ΔH°	: Pouvoir Calorifique
U	: Viscosité

Sommaire

Remerciement

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre 1: Biodiesel

1.1	Introduction au concept du biodiesel, historique et définition.....	1
1.2	La nécessité d'introduction du biodiesel comme carburant renouvelable	2
1.3	les sources du Biodiesel	3
1.3.1	Les huiles végétales comme source de biodiesel.....	3
1.3.1.1.	Les huiles alimentaires	4
1.3.1.2.	Les huiles non alimentaires	4
1.3.2.	Les graisses animales.....	6
1.3.3.	Les huiles usagées	6
1.3.4.	Les microalgues	7
1.3.5.	Les lipides d'origine microbienne	9
1.3.5.1.	Les sources fongiques	10
1.3.5.2.	Les sources bactériennes	10
1.3.6.	Le biodiesel à partir des résidus agricoles	10
1.4	.Les huiles végétales naturelles (pures) comme carburants	11
1.5	. Transésterification des huiles végétales e	12
1.6	.les caractéristiques techniques du Biodiesel (FAME)	12
1.7	. Avantages et inconvénients du Biodiesel.....	15

Conclusion

Chapitre 2 : Les Espèces végétales Alternatives Pour la Production du Biodiesel

Introduction	16
2.1. Nécessité d'une matière première alternative.....	16
2.1.1. Cout de la biomasse (huile)	16
2.1.2. Compétition entre l'alimentation et la production du biodiesel	17
2.2 Caractéristiques photosynthétiques	18

2.3 Rendements en huiles	21
2.4 Compositions chimiques des huiles végétales alternatives	23
2.4.1 Caractéristiques générales	23
2.4.2 types d'acides gras.....	25
2.4.2.1 Acides gras libres (FFA)	25
2.4.2.2 Influence des Caractéristiques des AG Sur Les Propriétés du Biodiesel	26
2.4.3 Composants mineurs	29
2.5. Coproduits	30
2.5.1. Tourteau d'extraction	30
2.5.2. Glycérol	32

Conclusion

Chapitre 3 : Impacts d'une Filière Biodiesel

Introduction	33
3.1. Aspects écologiques	33
3.1.1. Protection du sol contre l'Erosion	33
3.1.1.1. Erosion hydrique	33
3.1.1.2. D Erosion éolienne	33
3.1.2. Amélioration de la fertilité du sol.....	33
3.1.3.Séquestration de carbone	34
3.1.4.Fixation d'azote	34
3.1.5. Biodiesel et la biodiversité	35
3.1.6. Biodégradabilité du Biodiesel	35
3.1.7. Le bilan énergétique	35
3.1.8. Réduction des émissions des GES	36
3.2. Les impacts socio-économiques	37
3.2.1. Le développement rural	37
3.2.2. Disponibilité des terres	37
3.2.3. Ressources en eau.....	37
3.2.4. Sécurité énergétique	38
3.2.5. Toxicité.....	38

Conclusion

Chapitre 4 : Principe Général de L'Analyse du Cycle de Vie

Introduction	40
4.1. Définition	40
4.2. Définition des objectifs et du système	41
4.3. Inventaire des émissions et des extractions	41
4.3.1. Bilan énergétique	42
4.3.2. Bilan CO2	42
4.4. Analyse de l'impact environnementale	43
4.5. Interprétation	44
Conclusion	

Chapitre 5 : Inventaire des Espèces Végétales Alternatives

5.1. <i>Leucena leucocephala</i>	45
5.2. <i>Jatropha curcas</i>	48
5.3. <i>Cynara cardunculus</i>	51
5.4. <i>Moringa oleifera</i>	54
5.5. <i>Ricinus communis</i>	56
5.6. <i>Brassica carinata</i>	59
5.7. <i>Simmondsia chinensis</i>	61
5.8. <i>Nicotiana tabacum</i>	65
5.9. <i>Salicornia bigelovii</i>	67
5.10. <i>Euphorbia lathyris</i>	70
5.11. <i>Citrullus colocynthis</i>	73
5.12. <i>Prunus amygdalus var. amara</i>	76
5.13. Discussion générale	79
5.13.1. Les Performances Ecologiques des Espèces Sélectionnées	79
5.13.2. Rendements en huiles (Potentiel Génotypique)	84
5.13.3. Caractéristiques du biodiesel élaboré à partir des différentes espèces ciblées	86

Conclusion

Chapitre 6 : Analyse du Cycle de Vie

Introduction	91
6.1. Unité fonctionnelle et hypothèse retenue	92
6.1.1. Le choix de l'espèce	92
6.1.2. Les conditions de production.....	92
6.2. Définition et modélisation du système de production	92
6.3. Limites du système	94
6.4. Inventaire	94
6.5. Résultat et discussion	97
6.5.1. Bilan de CO2 en kg CO2eq	97
6.5.2. Bilan énergétique.....	99
6.5.3. Etude d'impact.....	102
6.5.3.1. Caractérisation intermédiaire.....	102
6.5.3.2. Caractérisation des dommages	103

Conclusion

Conclusion Générale

Recommandations

Introduction

INTRODUCTION GENERALE

La dépendance de la civilisation moderne aux énergies fossiles, où plus de 80 % de la demande énergétique mondiale est couverte par le pétrole, le charbon et le gaz naturel, ainsi que le non renouvellement de celles-ci, ne cessent depuis plusieurs décennies de susciter des inquiétudes sur le devenir de l'humanité.

D'autre part, il y a une prise de conscience croissante que l'utilisation excessive des combustibles fossiles pourrait causer des dommages irréversibles à l'environnement et au climat, contribuant au réchauffement global dû aux émissions des gaz à effet de serre (GES), ce qui conduiraient à des perturbations des écosystèmes constituant la biosphère (les pluies acides, l'augmentation de la température globale de la planète, phénomènes de sécheresse et d'inondation...etc.). Il y a également des soucis particuliers concernant les dégâts qui pourraient être occasionnés par des accidents de transport et les risques des centrales nucléaires.

Tous les facteurs mentionnés ci-dessus montrent la nécessité de chercher d'autres solutions énergétiques alternatives et durables. Les énergies renouvelables offrent certes, à l'humanité, une possibilité pour mettre notre civilisation sur la voie d'un développement durable. Mais les solutions avancées çà et là ne parviennent pas, pour le moment, à dégager de piste rationnelle et définitive tant les enjeux sont énormes et les disparités encore plus exacerbées par des crises et des conflits qui tirent justement, pour la plupart, leur origine dans l'accès aux sources d'énergie.

Dans la présente étude, nous allons essayer de montrer comment les biocarburants - issus de la biomasse- pourraient contribuer à promouvoir une indépendance des régions isolées et de maintenir une activité agricole durable à même de sédentariser les populations de ces régions le plus souvent déshéritées.

La question des besoins en carburants dans le secteur du transport ne sera pas abordée ici. Il est clair pour nous que l'activité du transport est un secteur tout aussi important pour le développement d'une nation, il est également clair, pour nous, que les solutions sont à rechercher ailleurs que dans une supposée substitution des carburants fossiles par des carburants issus de la biomasse. Le secteur du transport dans son état actuel, doit être totalement repensé pour s'adapter aux contraintes futures.

Le Biodiesel, est présenté aujourd'hui comme un carburant alternatif pour le transport grâce à ses caractéristiques techniques comparables au Diesel conventionnel. Le biodiesel est un biocarburant d'origine renouvelable, non toxique, biodégradable, avec une excellente lubricité et un bilan de carbone théoriquement nul. La disponibilité de la matière première, les coûts, les coproduits, associée aux incitations des autorités publiques déterminent la compétitivité du biodiesel comme un substitut direct au pétrole diesel [1]. De nombreuses études montrent au contraire que l'utilisation massive de biocarburants pour répondre aux besoins du secteur des transports est une option aux antipodes du développement durable ne serait-ce qu'en raison des surfaces agricoles qu'il faudra mobiliser – lorsqu'elles existent – au détriment de celles réservées aux cultures vivrières pour les besoins des populations.

Si au contraire, l'usage du biodiesel est réservé exclusivement aux besoins de fonctionnement des engins agricoles, il devient possible de développer, à l'échelle locale, des cultures destinées à la production de biodiesel à même de répondre aux impératifs d'une activité agricole mécanisée, moderne et prospère.

Cette étude a pour objectif central d'établir un inventaire des espèces végétales oléagineuses à fort potentiel en huile susceptible de représenter une source de matière première fiable, du point de vue quantitatif et qualitatif pour la production de biodiesel. Il s'agit donc pour nous dans cette première étape, d'identifier les plantes oléagineuses présentant un intérêt écologique, économique et social à l'échelle régionale pour les populations locales.

Afin de garantir le caractère durable de la filière retenue pour la production de biodiesel, une série de critères a été dressée en vue de faire le choix le plus approprié de ou des espèces végétales à cultiver en tenant compte des contraintes locales (pluviométrie, nature des sols, etc.).

Le présent mémoire comporte six chapitres. Dans le premier, nous donnons un aperçu sur le biodiesel, ses caractéristiques et les principales sources de matières premières nécessaires à sa fabrication.

Le deuxième chapitre porte sur l'inventaire des espèces végétales à fort potentiel en huiles pour la production du biodiesel. Dans cette deuxième partie, nous présentons un ensemble de critères qui doivent être pris en considération afin d'avoir une approche globale et rationnelle pour promouvoir telle ou telle espèce dans une filière biodiesel compatible avec un développement régional durable. Sont considérées à la fois les espèces locales et les espèces exotiques susceptibles de s'adapter aux conditions edapho-climatiques régionales.

Dans le troisième chapitre, nous évoquerons les impacts environnementaux et socio-économiques du Biodiesel. Et le quatrième chapitre sera consacré à l'analyse du cycle de vie.

Dans le cinquième chapitre, nous optons pour quelques espèces qui nous semblent les plus prometteuses compte tenu des critères que nous avons retenus et présentons quelques éléments pour la mise en œuvre d'un avant-projet de production de biodiesel aux fins de consolider une activité agricole régionale intégrée.

Le sixième chapitre est consacré à une analyse du cycle de vie du biodiesel produit à partir de l'huile de *Moringa oleifera* dans le but de modéliser une filière de production de biodiesel qui doit prendre en compte des considérations technico-économiques, sociales et environnementales dans une perspective de développement durable.

Chapitre I

Biodiesel

1. Introduction au concept du biodiesel, historique et définition

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. [2]

Historique

La production du biodiesel à partir des huiles végétales par la transésterification n'est pas un procédé nouveau. **Duffy** et **Patrick** l'ont déjà expérimenté en 1853. Les mono alkyl d'esters, produit par la conversion des huiles végétales ou des graisses animales, sont communément connues sous le nom du Biodiesel. Dr. Diesel, invente le moteur diesel en 1893, et a publié un article intitulé « la théorie et la construction d'un moteur a cycle de chaleur rationnel », ce moteur a été conçue pour fonctionner avec des huiles végétales. En 1900, à l'exposition de Paris un moteur Diesel alimenté par l'huile d'arachide a été exposé. En 1911, dans la même exposition, Dr. Diesel déclarait que le moteur diesel, alimenté par de l'huile végétale, pourrait aider considérablement le développement de l'agriculture. La première utilisation de l'huile transésterifiée a vu le jour avant la seconde guerre mondiale pour alimenter les moteurs d'engins lourds en Afrique du Sud [2].

Dès les années 1980, des unités de production de biodiesel ont été installées dans différents pays européens et certaines villes en ont fait fonctionner les bus à l'état pur ou en mélange avec le petrodiesel. Actuellement l'union européenne contribue à presque 89% de la production mondiale de biodiesel dans le monde [2]. Le nom de « biodiesel » a été introduit aux Etats Unis en 1992 par The National Soy Diesel Development Board (actuellement biodiesel board) [3].

Définition

Le biodiesel est définit selon ASTM international comme étant un carburant composé de mono alkyle d'esters de longue chaines d'acide gras dérivées des huiles végétales ou des graisses animales renouvelables et qui répond aux exigences du ASTM D67513[4].

2. La nécessité d'introduction du biodiesel comme carburant renouvelable

Le système énergétique global est actuellement basé principalement sur les hydrocarbures tels que le pétrole, le gaz et le charbon, qui représentent à eux seuls presque 80% des ressources énergétiques. La Biomasse traditionnelle - telle que le bois et le fumier – contribue pour 11 %, le nucléaire pour 6%, tandis que toutes les autres sources renouvelables réunies totalisent seulement 3%. [5]

Le secteur du transport est l'un des consommateurs majeurs des carburants fossiles et le principal contributeur de la pollution atmosphérique qu'on pourrait réduire par le remplacement de ces carburants minéraux avec des biocarburants d'origine renouvelable. [6]

Le biodiesel, utilisé en mélange, est un biocarburant qui pourrait contribuer à remplacer partiellement le petrodiesel sans modifications de moteur. Ce dernier a suscité beaucoup d'intérêt en raison de ses avantages environnementaux et technologiques. Ces avantages résident principalement dans son caractère renouvelable, complètement biodégradable, les gaz d'échappement sont plus propres que ceux du petrodiesel, de plus il présente une concentration faible en soufre, et un bilan carbone théoriquement nul (Fig. 1.1) [7].

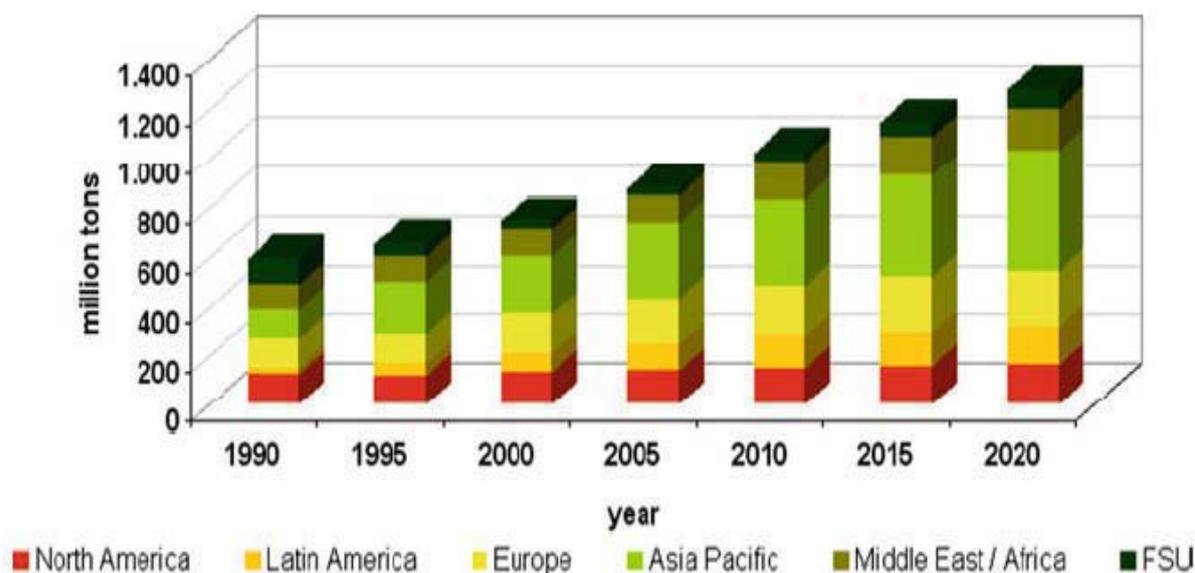


Fig. 1.1: La croissance de la consommation mondiale du diesel et les futures prévisions [8]

3. Les sources du Biodiesel

La production du biodiesel commence par le choix de la matière première qui est essentiellement d'origine végétale (huiles végétales) ou animale (graisses). Les graisses et les huiles usagées domestiques, commerciales et des process industriels pourraient aussi être exploitées comme une matière première [9]. Les microorganismes oléagineux, en particulier les microalgues constituent en outre une autre source potentielle (Fig.1.2) [10].



Fig.1.2: La distribution des sources MEAG dans le monde. [11]

3.1. Les huiles végétales comme source de biodiesel

Les carburants alternatifs au petrodiesel sont produits à partir des sources naturelles et renouvelables comme les huiles végétales et les graisses [3]. L'utilisation des huiles végétales (huile de palme, Soja, Tournesol, Arachide et huile d'Olive) comme un carburant alternatif au petrodiesel remonte à 9 décennies. Due à la diminution rapide des réserves en pétrole, ces différentes ressources connaissent un regain d'intérêt et sont de nouveau promues dans divers pays (Fig.1.3) [12].

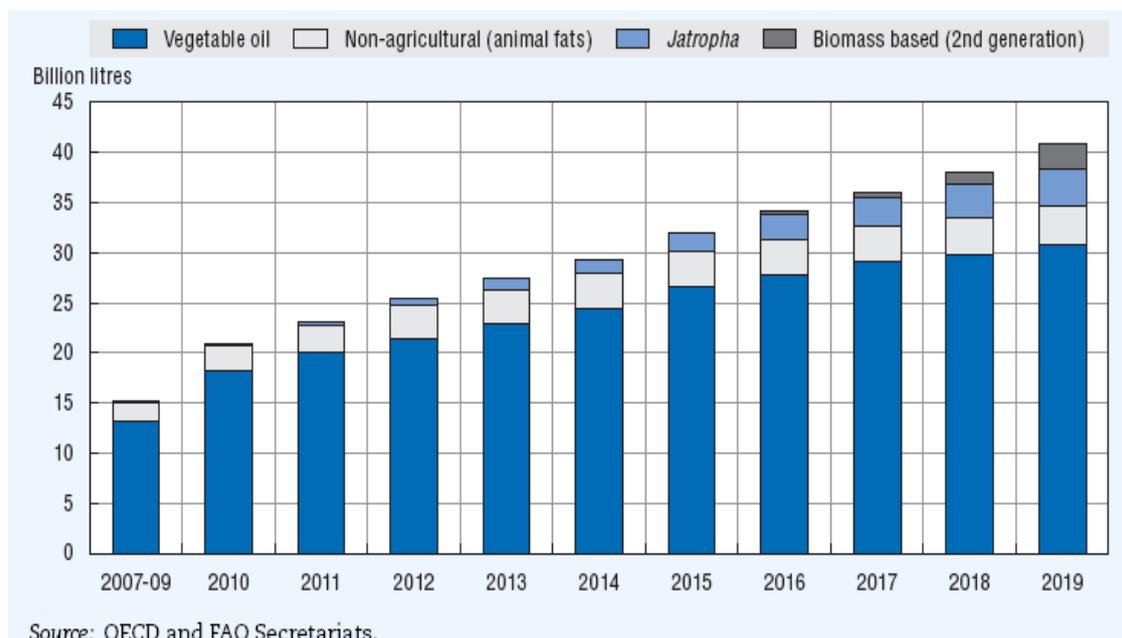


Fig.1.3: Les huiles végétales, la source majeure de la production du biodiesel (La production globale du biodiesel par source). [13]

3.1.1. Les huiles alimentaires

Les principaux types des huiles végétales alimentaires utilisés pour la production du **MEAG** sont l'huile de Colza et de Tournesol en Europe, et l'huile de Soja en Amérique du nord et du sud. Les avantages de ces matières résident dans leur faible degré de saturation et la faible teneur en acide gras libres (AGL) d'où un faible indice d'acidité. D'autre part, leurs propriétés physicochimiques sont similaires [14]. Dans le sud-est de l'Asie, les MEAG sont produits à partir de l'huile de Palme. Ce type d'huile est caractérisé par un degré de saturation et un indice d'acidité élevée ce qui conduit à un biodiesel présentant des propriétés inadéquates à basse température [15].

3.1.2. Les huiles non alimentaires

L'utilisation des huiles alimentaires et des graisses animales pour la production du biodiesel, a été remise en cause ces dernières années du fait que ce dernier empiète sur une ressource destinée pour l'alimentation humaine. Vue la forte augmentation de la demande durant

ces dernières années et l'envolée des prix qui s'en est suivi, on ne peut plus justifier l'utilisation d'huiles alimentaires pour la production du biodiesel.

Parmi les matières premières végétales non alimentaires, ils existent beaucoup d'espèces oléagineuses sous exploitées en raison de leurs toxicités (présence de certains composants toxiques dans l'huile telle que les flavonoïdes et alcaloïdes) [16].

Tab.1.1: Principales sources des huiles non alimentaires pour la production du biodiesel.

Nom scientifique	Nom commun	Type de plante	Partie de la plante exploitée	Références
<i>Ricinus communis</i>	Ricin	Arbre/arbuste	graines	[17]
<i>Jatropha curcas</i>	Jatropha	Arbre/arbuste	graines	[17]. [18]
<i>Hevea brasiliensis</i>	Hévéa	arbre	graine	[18]
<i>Madhuca indica</i>		arbre	graine	[18]
<i>Azadirachta indica</i>		Arbre	graine	[18]
<i>Pongamia pinnata</i>	Karanja	arbre	graine	[17]
<i>Sesamum indicum</i>	sesame	herbacée annuelle	graine	[18]
<i>Brassica carinata</i>	Moutarde d'Ethiopie	herbacée annuelle	graine	[19]
<i>Eruca sativa</i>		herbacée annuelle	graine	[6]
<i>Aluerrites moluccana</i>	candlenut	Herbacé annuelle		[20]
<i>Calophyllum inophyllum</i>		arbre		[20]
<i>Salvadora oleoides</i>		arbre		[17]
<i>Cyperus esculentus</i>		Herbacé pérenne		[18]
<i>Cynara cardunculus</i>	Cardon	Herbacé pérenne	graine	[18]
<i>Simmondsia chinensis</i>	Jojoba	arbuste	graine	[18]
<i>Moringa oleifera</i>	Moringa	arbre	graine	[18]

3.2. Les graisses animales

Une autre source pour la production du biodiesel est représentée par les graisses animales. Ces dernières incluent le tallow, le lard (graisse blanche du porc), graisses des poulets et les graisses jaunes. Comparées aux huiles végétales, ces graisses offraient souvent un avantage économique à cause de leurs prix relativement faibles. Les méthyl d'ester de graisse animale (biodiesel) présentent en outre plusieurs avantages parmi lesquels un indice de cétane élevé, une faible corrosivité, sans oublier le caractère renouvelable de ces ressources. Les graisses animales sont caractérisées par une faible teneur en AGL et en eau. Par contre les quantités disponibles sont très limitées. [21]

Tab.1.2 : La composition en acide gras du biodiesel préparé à partir de graisses animales (% du poids total) [12]

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	-	-	-	-	-

3.3. 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 [17].

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. [22]

3.4. 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 [23]. 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. [24]

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. [25] Les algues sont un choix économique pour la production du biodiesel, en raison de sa disponibilité et de son faible coût [26]. 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 [27].

Tab.1.3: Comparaison des rendements en huile entre les microalgues et les cultures communes pour la production du biodiesel [29].

Plante		Microalgues	Soja	Colza	Jatropha	Palmier
Rendement en huile	m ³ /Km ² /an	>15000	35-45	100-130	160	580
	Litre/ha [28]	+ 36900 (a)	446	1190	1892	5950
		58700 (b)				
Rendement en energie	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

Tab.1.4: Accumulation des lipides par différentes microalgues

espèce	Teneur en huile (% MS)	Référence
<i>Chlorella vulgaris</i>	40	[30]
<i>Chlorella emersonii</i>	63	
<i>Chlorella protothecoides</i>	23	
<i>C. sorokiniana</i>	22	
<i>C. minutissima</i>	57	
<i>N. laevis</i>	69	
<i>N. oleabundans</i>	54	
<i>Botruococcus braunii</i>	25-75	[28]
<i>Chlorella sp</i>	28-32	
<i>Cylindrotheca</i>	16-37	
<i>Nitzschia sp</i>	45-47	
<i>Nannochloropsis sp</i>	31-68	
<i>Schizochytrium sp</i>	50-77	

Tab.1.5: Rendements des Microalgues [31]

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 CO2)	60
Réacteur tubulaire	80
Ecrans plats (inten.mixing.short light-dark periods)	100

3.5. 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. [28]

3.5.1. Les sources fongiques

Plusieurs espèces de levures comme *Cryptococcus albidus*, *Lipomyces lipofera*, *Lipomyces starkeyi*, *Rhodospiridium toruloides*, *Rhodotorula glutinis*, *Trichosporon pullulan* et *Yarrowia lipolytica*, pourraient accumuler des huiles sous certaines conditions de culture. La teneur en huile varie entre 5.9 % et 37%. Les lipides fongiques (levurières) se composent principalement de l'acide myristique, palmitique, stéarique, oléique, linoléique et linoléique. Les lipides fongiques pourraient être exploités pour la production de biodiesel. Le rapport C/N, la source de l'azote, la température, le pH, la concentration en oligoéléments et les sels minéraux, sont les différents paramètres qui influencent l'accumulation des lipides fongiques. [28]

Comme alternative à la conversion anaérobie des eaux d'assainissement en méthane (CH₄) et en dioxyde de carbone (CO₂), la partie carbonique de celles-ci pourraient être convertie en lipides par des micro-organismes aérobies qui pourraient servir de matière première pour la production de biodiesel. [32]

Tab.1.6 : Accumulation des lipides par les différentes levures et moisissures (Mucor) [28]

Espèce	Rendement en lipide (g/l)
<i>M. rouxii</i>	1.0
<i>C. ehinulata</i>	8.0
<i>M. mucedo</i>	12.0
<i>M. ranmamianna</i>	31.3
<i>M. isabellina</i>	18.1
<i>R. toruloides</i>	13.8
<i>L. starkeji</i>	9.99
<i>C. curvatus</i>	37.1
<i>R. glutinis</i>	7.19
<i>T. fermentans</i>	5.32

3.5.2. Les sources bactériennes

Comme les champignons, les bactéries pourraient aussi accumuler des huiles sous certaines conditions. Elles peuvent produire des acides gras poly insaturés dont quelques-uns sont ramifiés. Une nouvelle technique microbiologique de production de biodiesel en utilisant une *E. coli* dont le métabolisme est modifié, a été développée. [28].

3.6. 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. [33]

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. [34].

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 [35]. Beaucoup de chercheurs ont conclu que les huiles végétales pourraient être employées en tant que carburant de substitution pour les moteurs diesel. [3]. 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. [36]. 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 [37].

Tab.1.7: Les propriétés physico-physiques des huiles végétales alimentaires [14]

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'éclaire (°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 [12]	37.1	39	37.9	42.0

5. Transésterification des huiles végétales

L'une des méthodes pour la réduction de la viscosité des huiles végétales est la transestérification. La transestérification est un processus chimique qui consiste à mettre en réaction les huiles végétales avec de l'alcool en présence d'un catalyseur comme le montre la Figure 1.4 [38]

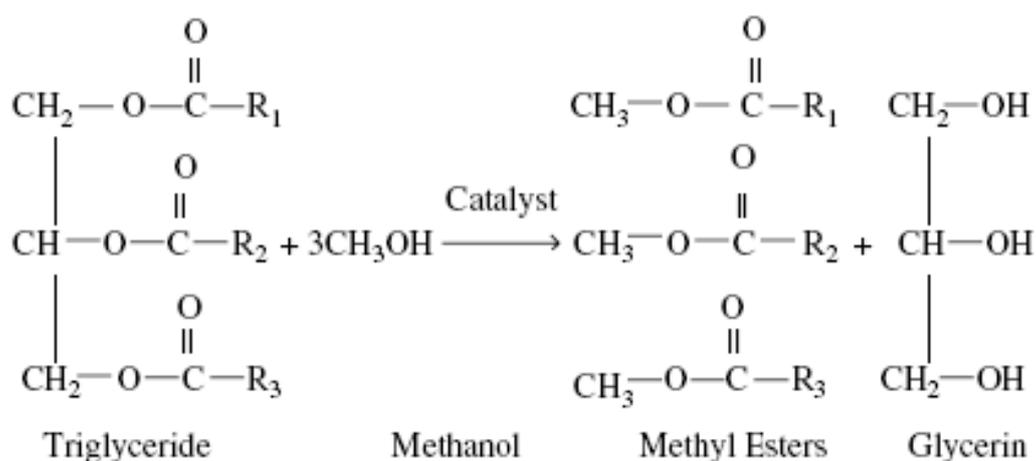


Fig.1.4 : transésterification des triglycérides en utilisant un méthanol et un catalyseur

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. [39].

Tab.1.8 : Standards ASTM D6751 du Biodiesel (USA) [37]

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

Tab.1.9: Standards du Biodiesel EN 14214 (Europe) [37]

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

7. Avantages et inconvénients du Biodiesel

Le biodiesel est une énergie alternative aux carburants fossile. Elle est efficace, propre et renouvelable. Parmi les nombreux avantages de biodiesel comme carburant inclure ce qui suit : un usage sûr dans tous les moteurs diesel conventionnel, offre la même performance et longévité conventionnels du moteur que le petrodiesel, inflammable et non-toxique, réduit les émissions, les vapeurs nocives et les odeurs [6]. Le biodiesel est meilleur que le carburant diesel en termes de teneur en soufre, point d'inflammabilité, contenu aromatique et biodégradabilité. [40].

En revanche les inconvénients techniques du biodiesel/des mélanges diesel fossiles 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. [40]

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

Espèces Végétales Alternatives Pour la Production du Biodiesel

Introduction

Il existe des espèces alternatives non alimentaires présentant des caractéristiques souhaitables et prometteuses pour la production du biodiesel. Les espèces envisageables sont celles qui peuvent s'adapter aux conditions édapho-climatiques (pluviométrie, type de sol, latitude...etc.), qui sont disponibles à l'échelle régionale, qui possèdent une teneur élevée en huile et une composition en acides gras convenable, et qui sont compatibles avec les techniques culturales et les infrastructures existantes. Ces espèces doivent en outre nécessiter de faibles intrants agricoles (eau, fertilisants, pesticides), et avoir une capacité à croître sur des terres marginales et/ou comme culture dérobée de manière à ne pas utiliser des terres à vocation agricole. Le biodiesel élaboré à partir de telles espèces répondant à tous ces critères est le plus indiqué, sur un plan purement éthique, pour substituer en partie le petrodiesel. [41]

1. Nécessité d'une matière première alternative

1.1. Coût de la biomasse (huile)

Si le biodiesel dont on vante partout les multiples avantages n'est pas systématiquement adopté, c'est en raison de son prix de revient. Ce n'est qu'à partir des années 2008, avec l'envolée des prix du pétrole, que le biodiesel est devenu compétitif. Il y a lieu de noter que 60 à 85% du cout du biodiesel revient au coût de la matière première [42]. La figure 5 ci-dessous donne la répartition des coûts pour la production du biodiesel.

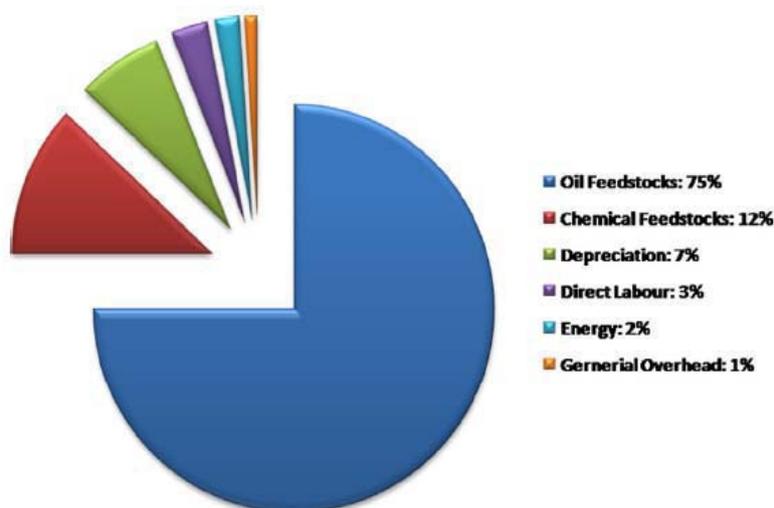


Fig.2.1: Distribution générale des coûts pour la production du biodiesel [43].

1.2. Compétition entre l'alimentation et la production du biodiesel

L'utilisation des huiles alimentaires et des graisses animales pour la production du biodiesel, est très controversée en raison de la concurrence avec le secteur alimentaire. Vu la forte augmentation de la demande durant ces dernières années, il n'est plus possible de justifier l'utilisation de ces huiles pour la production du biodiesel [44].

L'utilisation des huiles végétales pour la production du biodiesel a conduit à une augmentation des prix des denrées alimentaires. Par ailleurs, l'extension de la production de biodiesel conduirait inéluctablement à une diminution de la disponibilité des terres arables pour les cultures à vocation alimentaire [43].

Le facteur le plus influant est l'attractivité des huiles végétales alimentaires en tant que source de biodiesel. Cependant, la Fig.2.2 montre que les éléments, qui contrôlent la demande alimentaire et industrielle pour les huiles végétales, semblent avoir établi un équilibre provisoire à environ 80% (nourriture) contre: 20% (pour les utilisations industrielles). En outre, la multiplication des efforts pour développer des variétés commerciales pour la production des graines oléagineuses industrielles comme le *lesquerella*, le *cuphea* et les diverses innovations biotechnologiques non-alimentaires devraient aider à stabiliser cette situation. [45]

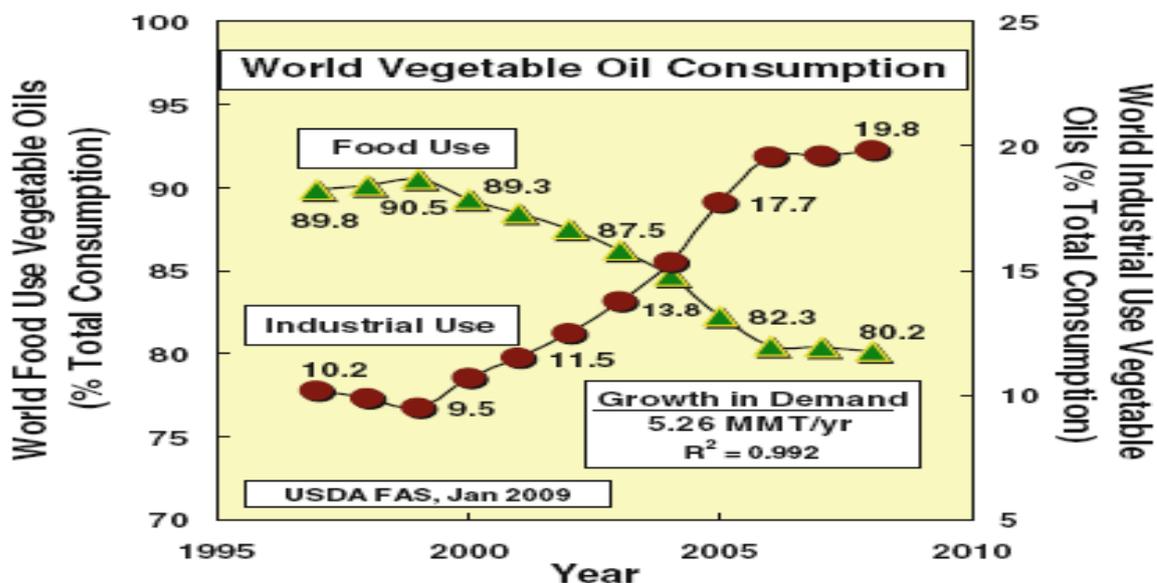


Fig.2.2 : Evolution de la consommation mondiale des huiles végétales [45].

2. Caractéristiques photosynthétiques

Le processus fondamental de l'accumulation de la biomasse dans le contexte de la bioénergie est basé sur la photosynthèse. La plante verte est le seul organisme capable de convertir l'énergie solaire, grâce à la Chlorophylle, en énergie chimique sous forme de composés organiques à l'aide de l'anhydride carbonique et de l'eau (Fig.2.3). En plus du carbone, l'hydrogène et l'oxygène, les plantes incorporent également l'azote et le soufre à la matière organique en présence de la lumière [05].

L'efficacité de la photosynthèse, exprimée comme le rapport entre l'énergie chimique fixée par les plantes et l'énergie contenue dans les rayons lumineux reçus par les plantes, est plus ou moins de 1 %. Une petite augmentation de cette efficacité aurait des effets spectaculaires en raison de la balance du processus impliqué [05].

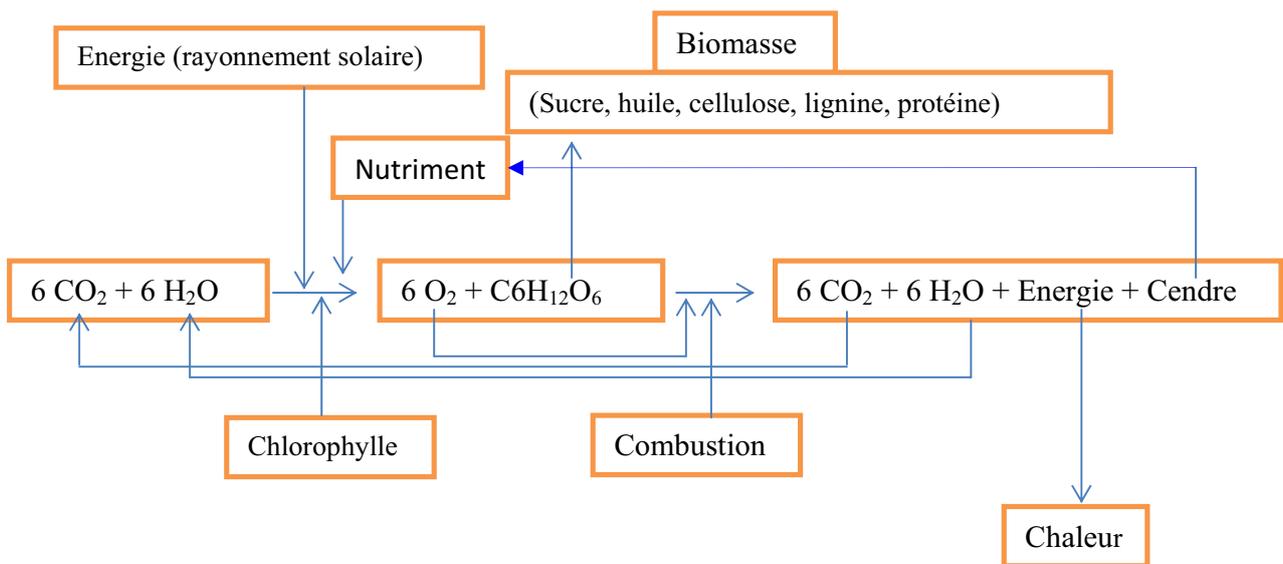


Fig.2.3: Un cycle fermé pour la production de l'énergie à partir de la biomasse [05]

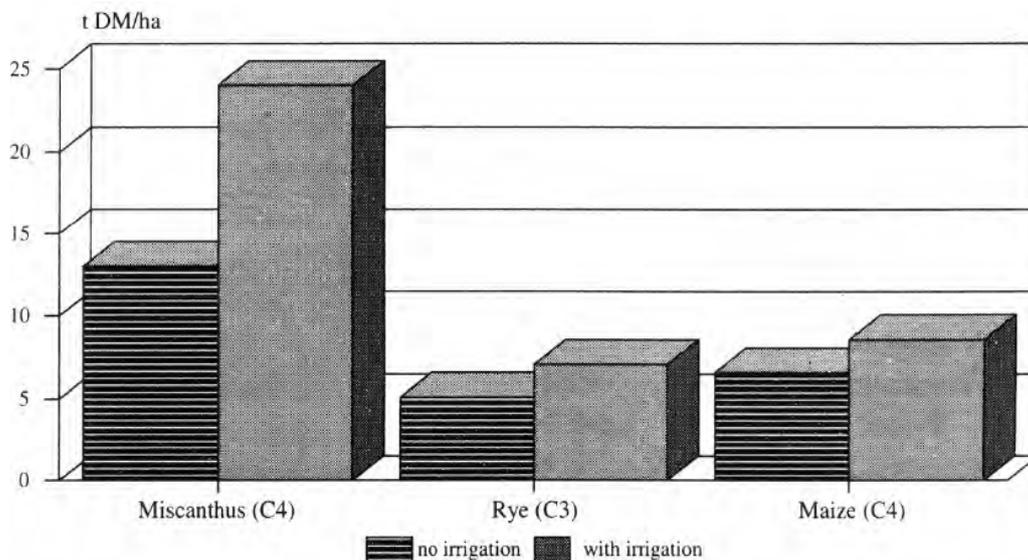


Fig.2.4 : La production de la biomasse des espèces a C₄ et C₃ en irrigué et non irrigué. [05]

Les deux voies photosynthétiques majeures sont la voie C₃ et C₄. Une 3^e voie moins commune est la voie CAM. Pour la voie C₃ le premier produit photosynthétique est un acide organique à 3 carbone (3-PGA acide 3- phosphoglycérique) cependant une acides à 4 carbone est produit pour la voie C₄ (malate et aspartate).Généralement la voie C₃ est adaptée à des conditions de faibles températures (15- 20°C) avec un taux d'échange de CO₂ faible par rapport aux espèces C₄ qui sont plus adaptées aux conditions de haute températures (30- 35°C) et par conséquent un taux d'échange en CO₂ élevée . Les plantes C₄ ont un rendement photosynthétique maximum de 70-100 mg de CO₂/dm²/h à un rayonnement de saturation total 1.0 – 1.4 cal/cm²/min. [46]

Il y a un autre groupe d'espèce de type CAM qui est adaptée à des conditions xérophytiques. Ces espèces ont un métabolisme d'acide crassulacéen. Les espèces en C₅ ont la capacité de capter l'énergie lumineuse et la fixation de CO₂ se fait pendant la nuit ce qui améliore l'efficacité de l'utilisation de l'eau [46]. La Fig.2.4 montre l'efficacité en eau selon la voie photosynthétique ainsi que le Tab.2.1 donne les quelques caractéristiques physiologiques selon la voie photosynthétique.

Tab.2.1 : Quelques caractéristiques physiologiques selon la voie photosynthétique. [05]

Caractéristique photosynthétique	Groupe des espèces				
	1	2	3	4	5
La voie photosynthétique	C ₃	C ₃	C ₄	C ₄	CAM
Intensité de rayonnement photosynthétique max. (Cal/cm ² /min)	0.2–0.6	0.3–0.8	1.0–1.4	1.0–1.4	0.6–1.4
Taux d'échange de CO ₂ max. net à la saturation lumineuse (mg/dm ² /h)	20–30	40–50	70–100	70–100	20–50
Température de la photosynthèse Température optimale (°C)	15–20	5–30	25–30	10–35	30–35
Température maximale (°C)	15–45	20–30	10–35	25–35	10–45
Taux de croissance max de la culture (g/m ² /jour)	20–30	30–40	30–60	40–60	20–30
Coefficient de transpiration ou efficacité de l'eau (g/g)	400–800	300–700	150–300	150–350	50–200
Espèces	Moutarde, pomme de terre, avoine, colza, betterave à sucre, blé, tournesol, olivier, orge, lentille, lin	Arachide, riz, soja, sésame, tabac, tournesol, récin, carthame, <i>Arundo donax</i> .	Sorgho, maïs, canne à sucre	millet, sorgho, maïs, <i>mischanthus</i> , <i>spartina</i> , <i>panicum virgatum</i> .	Sisal, ananas

3. Rendements en huiles

La teneur en huile et le rendement par hectare sont les paramètres les plus importants à considérer pour une source du biodiesel [03]. Le rendement en huile des cultures est toujours le facteur clé afin de pouvoir décider la convenance de la matière première pour la production du biodiesel. Les rendements élevés en huile sont les plus désirables dans l'industrie du biodiesel afin de réduire les coûts de production. [47]

Si des espèces exotiques pouvant être acclimatées sont à considérer, elles doivent présenter d'autres avantages supplémentaires tels que [42]:

- L'aptitude de se développer dans des zones hostiles (arides ou semi-arides) comme c'est le cas pour *Kosteletzkya, virginica* or *J. curcas*, mais les rendements sont effectivement faibles.
- Offrir des coproduits d'importance économique comme les graine de caféier, d'hévéa, ou de tabac.
- Offrir un profil d'acides gras homogène tel que celui de l'huile de *R. communis*.
- Culture adaptée à la mécanisation de la culture surtout pour la récolte comme le cas de *B. carinata*
- Si possible offrir de multiples produits comme c'est le cas de *M. oleifera*.

Le tableau 11 ci-dessous donne les chiffres de productivité de certaines espèces oléagineuses non alimentaires.

Tab.2.2 : Productivité de quelques espèces oléagineuses. [05]

Espèce	Rendement en graine t/ha	Teneur en huile (%)	Rendement en huile t/ha
<i>Crambe abyssinica</i>	2.0 - 3.5	30 - 45	0.74
<i>Brassica carinata</i>	1.1 -3.0	23 - 40	0.26 -1.2
<i>B. rapa</i> ssp. <i>oleifera</i>	1.0 – 2.5	38-48	0.38-1.2
<i>B. nigra</i>	0.5 -2.0	24-38	0.12 -0.76
<i>B. juncea</i>	1.5 -3.3	30 -40	0.72
<i>Ricinus communis</i>	1.2	50	0.6
<i>Cocos nucifera</i>	4.17	36	1.5
<i>Coriandrum sativum</i>	2.0 -3.0	18 - 22	0.4 - 0.7
<i>Camelina sativa</i>	2.25	33-48	0.88
<i>Simmondsia chinensis</i>	2.1	48- 56	1.01 -1.18
<i>Euphorbia lathyris</i>	1.5	48	0.72
<i>Euphorbia lagasca</i>	0.6	46	0.28
<i>Moringa oleifera</i> [48]	3-6	33- 41 [49]	900- 2000 l/ha
<i>Salvadora oleoides ; indica</i>	-	40–50 [17]	-
<i>Jatropha curcas</i> [50]	0.1 à 15	40–60	1.9- 2.5
<i>Pongamia pinnata</i>	-	32.6 à 44 [51]	0.225-2.250 [41]
<i>Madhuca indica</i>	5–200 kg/arbre	50 (35%)	1.75 -70 kg huile /arbre
<i>Calophyllum inophyllum</i>	-	50-73	4.68
<i>Azadirachta indica</i>	26.7	10 [48]- 30 [51]	2.67 [52]
<i>Cynara cardunculus</i>	2-3 t/ha	25 [48]	0.50 - 0.75

4. Composition chimique des huiles végétales alternatives

4.1. Caractéristiques générales

La plupart des lipides de réserve des graines oléagineuses se composent de Triacylglycérols qui sont synthétisés pendant le remplissage de la graine. La composition chimique de l'huile est un critère important pour la détermination de la convenance de l'huile en tant que matière première pour la production de biodiesel, car la composition de l'huile détermine les propriétés du biodiesel qui en est issu (Tab.2.3). Ces huiles contiennent de l'acide oléique, linoléique, stéarique, et palmitique en proportions variables. Ces acides se déclinent en deux catégories : saturés et non saturés [45].

D'un point de vue chimique, les huiles obtenues à partir de différentes sources ont des compositions en acide gras différentes. Les acides gras diffèrent par la longueur de la chaîne de carbone et par le nombre de doubles liaisons qu'ils contiennent. Les graisses et les huiles sont insolubles dans l'eau, et sont formées d'une mole de Glycérol associées à trois moles d'acide gras comme le montre la Fig.2.5 [48].

La composition des huiles végétales en acides gras (AG) dépend à a fois de la nature du sol, de la teneur en humidité de la graine et de la méthode d'extraction de l'huile. La composition en AG détermine les propriétés importantes du biocarburant telles que l'indice de cétane, la stabilité à l'oxydation, la densité, et la courbe de distillation [06].

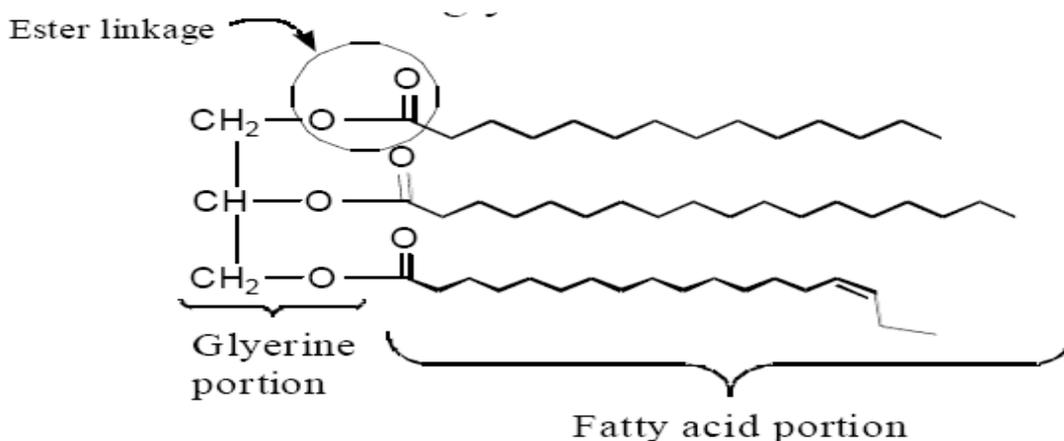


Fig.2.5 : Structure chimique d'une molécule de Triacylglycérol[06].

Tab.2.3 : Propriétés du carburant en fonction de la composition du carburant en AG [25].

	sature	Mono-insaturé	polyinsaturé
Acide gras	12:0, 14:0, 16:0 18:0, 20:0, 22:0	16 :1,18 :1,20 :1	18 :2,18 :3
Indice de cétane	élevé	moyen	faible
Point de trouble	élevé	moyen	faible
Stabilité oxydative	élevé	moyen	faible

Comme on le voit d'après le tableau précédent, les insaturations sont favorables pour l'obtention de bonnes caractéristiques à froid (point de trouble) mais ont un effet négatif sur l'auto inflammation et la stabilité à l'oxydation du carburant.

Tab.2.4 : Structure chimique des acides gras courants dans les huiles végétales [12].

Nomenclature d'usage des AG	Nomenclature chimique des AG	Structure	Formule
Laurique	Dodécanoïque	12:0	$C_{12}H_{24}O_2$
Myristique	Tétradécanoïque	14:0	$C_{14}H_{28}O_2$
Palmitique	Hexadécanoïque	16:0	$C_{16}H_{32}O_2$
Stéarique	Octadécanoïque	18:0	$C_{18}H_{36}O_2$
Arachidique	Eicosanoïque	20:0	$C_{20}H_{40}O_2$
Béhénique	Docosanoïque	22:0	$C_{22}H_{44}O_2$
Lignocérique	Tétracosanoïque	24:0	$C_{24}H_{48}O_2$
Oléique	Cis-9-octadécanoïque	18 :1	$C_{18}H_{34}O_2$
Linoléique	cis-9-,cis-12-octadécanoïque	18 :2	$C_{18}H_{32}O_2$
Linoléique	cis-9, cis-12, cis-15-octadécanoïque	18 :3	$C_{18}H_{30}O_2$
Erucique	Cis-13- docosanoïque	22 :1	$C_{22}H_{42}O_2$

4.2. Types d'acides gras

Les propriétés les plus importantes du biodiesel sont conditionnées directement par la composition des ester d'AG et la présence de composants mineurs ou de contaminants. Ces propriétés sont le comportement à froid, la stabilité oxydative, la viscosité cinématique, les émissions, l'indice de cétane et le pouvoir calorifique. Dans le contexte du biodiesel, les composants mineurs sont définis comme des éléments naturels trouvés dans les huiles végétales et les graisses animales qui incluent le Tocophérol, les phospholipides, le stérol glucoside (stéroïde), la chlorophylle, les vitamines liposolubles et les hydrocarbures. Les contaminants sont des produits indésirables comme les acides gras libres, le savon, TAG, DAG, MAG, les traces d'alcool, de catalyseur, le glycérol, l'eau et les métaux [41].

4.2.1. Acides gras libres (AGL)

La qualité de la matière première conditionne le type de catalyseur et le procédé de production des Esters d'acides gras (EAG) afin de respecter les normes telles que l'ASTM D6751 ou EN 14214. Si la matière première renferme un taux significatif de AGL (>3 % en poids), un catalyseur alcalin homogène comme le KOH et NaOH ou un Méthoxine aboutit à des réactions secondaires (Fig.2.6), dans laquelle le catalyseur réagit avec les AGL pour former un savon (sel de sodium d'acide gras) et de l'eau (ou le méthanol dans le cas du Méthoxide de sodium). Ceci conduit à une inhibition (quenching) irréversible du catalyseur, et à l'obtention d'un mélange indésirable d'AGL, de TAG non réagis, de savon, DAG, MAG, Biodiesel, glycérol, eau et/ou méthanol. Une transésterification alcaline ne peut aboutir ou sera inhibée si la teneur en AGL dépasse 3 % du poids [41].

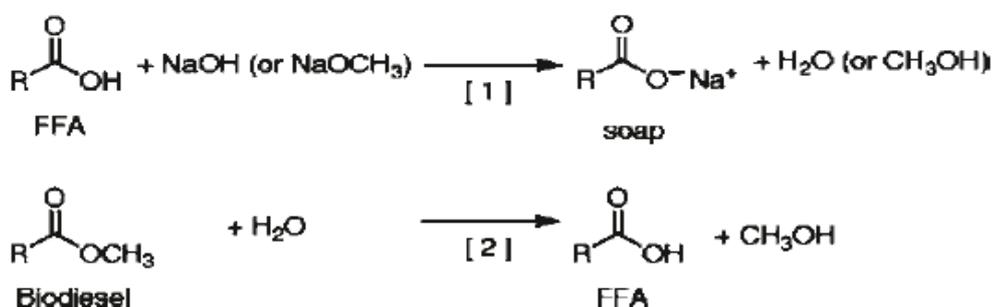


Fig.2.6 : Réaction de saponification des acides gras libre AGL en présence d'un catalyseur alcalin (réaction [1]) et hydrolyse du biodiesel (réaction [2]) en AGL et méthanol [41].

Tab.2.5 : Exemples de production du biodiésel à partir de matière première à teneur élevée en AGL. [41]

Source	AGL (%)	Method de Prétraitement	Catalyseur de transésterification	R	Rendement (%)
<i>Pongamia pinnata</i>	Jusqu'à 20	H ₂ SO ₄	KOH	Me	97
<i>Moringa oleifera</i>	2.9	H ₂ SO ₄	NaOCH ₃	Me	n.r.
<i>Jatropha curcas</i>	14	H ₂ SO ₄	KOH	Me	99+
<i>Madhuca indica</i>	20	Aucune	<i>Pseudomonas cepacia</i>	Et	96+
<i>Nicotiana tabacum</i>	35	H ₂ SO ₄	KOH	Me	91
<i>Calophyllum inophyllum</i>	22	H ₂ SO ₄	KOH	Me	85
<i>Zanthoxylum bungeanum</i>	45.5	Aucune	H ₂ SO ₄	Me	98
<i>Hevea brasiliensis</i>	17	H ₂ SO ₄	NaOH	Me	n.r.
<i>Heterotrophic microalgal</i>	8.97	Aucune	H ₂ SO ₄	Me	n.r.

4.2.2. Influences des caractéristiques des acides gras sur les propriétés du biodiesel

Comme mentionné plus haut, les propriétés du biodiésel sont directement influencées par la structure moléculaire des AG. La longueur de chaîne, le degré d'insaturation, la configuration de la double liaison, et le type de la fonction ester sont les facteurs déterminant pour les propriétés du biodiesel (Tab.2.6) [41].

Tab.2.6: Effet de la structure des alkyl esters d'acides gras sur les propriétés du biodiesel [41].

Propriété structurale	PF	ISO	ν	ΔH°	IC	Lub
Longueur de la chaîne	↑ ^a	↑	↑	↑	↑	↓
Nombre de double liaison ^(b)	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Double liaison a configuration <i>Cis</i>	↓	↓	↓	- ^c	? ^d	? ^d
Taille du groupe ester	↓	- ^c	↑	↑	- ^c	- ^c

↑^a valeur numérique élevée, ↓ valeur numérique faible.

Pour PF, ν et Lub: ↓ indique une amélioration de la propriété.

Pour ISO, ΔH° et IC: ↓ indique un impact négatif sur la propriété.

b- En comparaison avec les isomères *Trans* correspondants.

c- Négligeable ou pas d'impact.

d- non reporté dans la bibliographie

Tab.2.7 : Propriétés des AEAG. [41]

FAAE	PF	ΔH° (MJ/mol; MJ/kg)	$\nu(40^\circ\text{C})(\text{mm}^2/\text{s})$	ISO 110 °C (h)	IC	Lub (60 °C) (μm)
C12:0 ME	5	8.14/37.97	2.43	>40	67	416
C12:0 EE	-2	-	2.63	>40	-	-
C14:0 ME	19	10.67/39.45	3.30	>40	-	353
C14:0 EE	12		3.52	>40	-	357
C16:0 ME	31	10.67/39.45	4.38	>40	86	246
C16:0 EE	19		4.57		93	-
C16:1 ME	-34	10.55/39.30	3.67	2.1	51	-
C16:1 EE	-37	-	-	-	-	-
C18:0 ME	39	11.96/40.07	5.85	>40	101	322
C18:0 EE	32		5.92	>40	97	-
C18:0 BE	28	11.89/40.09	7.59		92	-
C18:1 ME	-20	-	4.51	2.5	59	290
C18:1 EE	-20	-	4.78	3.5	68	-
C18:1 BE	-26	11.69/39.70	5.69		62	303
C18:2 ME	-35	-	3.65	1.0	38	236
C18:2 EE	-	-	4.25	1.1	40	-
C18:3 ME	-	11.51/39.34	3.14	0.2	23	183
C18:3 EE	-52	-	3.42	0.2	27	-

Tab.2.8 : Profil des acides gras (%) du biodiésel à partir des sources alternatives [12].

Source	14:0	16:0	16:1	18:0	18:1	18:2	18:3	20:0	20:1	22:0	22:1	autre
<i>Jatropha curcas</i>	1.4	11.3	-	17.0	12.8	47.3	-	4.7				5.5
<i>Pongamia pinnata</i>	-	10.6	-	6.8	49.4	19.0	-	4.1	2.4	5.3	-	2.4
<i>Madhuca indica</i>	1.0	17.8	-	14.0	46.3	17.9	-	3.0	-	-	-	-
<i>Melia azedarach</i>	-	10.1	-	3.5	21.8	64.1	0.4	0.2	0.3	-	-	-
<i>Moringa oleifera</i>	-	6.5	-	6.0	72.2	1.1	4.0	2.0	7.1	-	-	-
<i>Nicotiana tabacum</i>	0.1	11.0	-	3.3	14.5	69.5	0.7	-	-	-	-	0.9
<i>Balinite aegytiaca</i>	-	13.7	-	11.0	43.7	31.5	-	-	-	-	-	-
<i>Terminia catappa</i>	-	35.0	-	5.0	32.0	28.0	-	-	-	-	-	-
<i>Heavia brisilensis</i>	-	10.2	-	8.7	24.6	39.6	16.3	-	-	-	-	-
<i>Asclepias syca</i>	-	5.9	6.8	2.3	34.8	48.7	1.2	0.2	-	-	-	-
<i>Brassica carinata</i>	-	5.3	-	-	10.0	24.6	16.5	-	-	-	43.3	-
<i>Calophyllum inophyllum</i>	-	12.0	-	13.0	34.1	38.3	0.3	-	-	-	-	-
<i>Cynara cardunculus</i>	-	14.0	-	3.0	25.0	56.0	-	-	-	-	-	0.2
<i>Camelina sativa</i>	-	5.4	-	2.6	14.3	14.3	38.4	0.3	16.8	1.4	2.9	
<i>Sesamum indicum</i>	-	11.0	-	7.0	43.0	35.0	-	-	-	-	-	4.0
<i>Scleacrya bierrea</i>	-	14.2	0.2	8.8	67.3	5.9	-	-	-	-	-	0.1

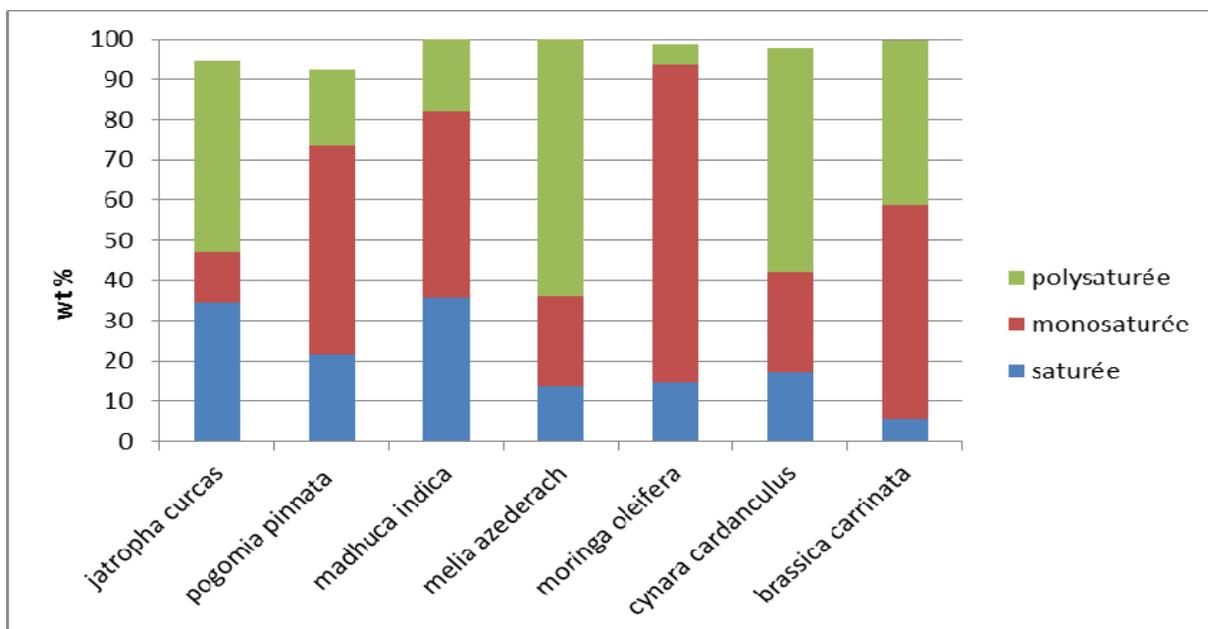


Fig.2.7: Degré de saturation triglycérique

4.3. Composés mineurs

Les composés mineurs du biodiésel sont représentés par les Tocophérols, les phospholipides, les steryl glucosides, la chlorophylle, les lypovitamines et les hydrocarbures. La quantité de ces composants dépend de la matière première à partir de laquelle le biodiesel est élaboré, le procédé de purification, le degré de prétraitement (raffinage, décoloration, désodorisation, dégommeage etc.). Certains de ces composants peuvent avoir des effets bénéfiques en tant qu'agents antioxydants, par contre d'autres rendent le produit sensible à la photo-oxydation. [41]

La présence des steryl glucosides dans le biodiésel est problématique à cause de son influence négative sur les caractéristiques à froid. Ces produits ont tendance à former des dépôts dans le biodiesel ce qui conduit à un colmatage des filtres du circuit d'alimentation. Plusieurs SG ont un point de fusion PF qui dépasse 240 °C et sont insolubles dans le biodiesel. [41]

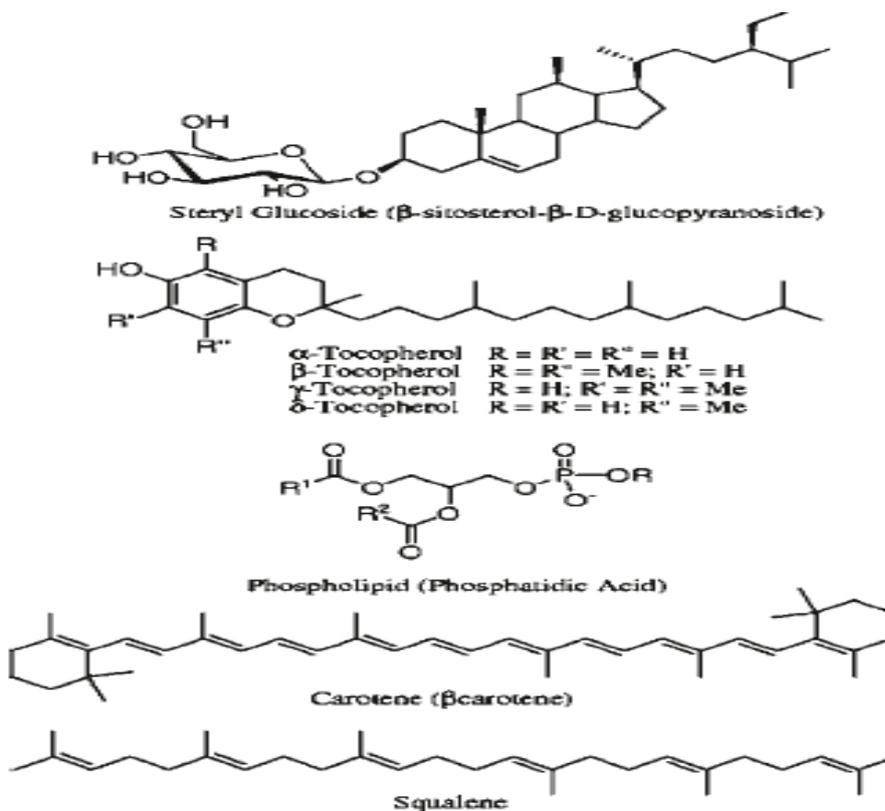


Fig.2.8: Exemples représentatifs de steryl glucosides, tocophérols, phospholipides, et hydrocarbures rencontrés dans le biodiesel. [41]

5. Coproduits

5.1. Tourteau d'extraction

Le tourteau d'extraction de *J. Curcas* contient des composants toxiques comme la Curcine et le Phorbol d'ester ce qui le rend impropre à l'alimentation de bétail. Cependant, des applications potentielles comme un fertilisant ou la production de biogaz sont envisageables pour de tels substrats organiques. Etant une source riche en azote, le tourteau de *J. Curcas* présente une source excellente de nutriments pour les végétaux et contribue à l'amélioration de la fertilité du sol et par conséquent à celle du rendement des cultures [53].

Tab.2.9: Composition chimique de quelques tourteaux d'extraction

Espèce	Caractéristique		Utilisation	Réf
<i>Recinus communis</i>	Haute teneur protéinique. Riche en ricine, ricinine et composés allergéniques dérivés.		-Engrais organique, ration animale après détoxification (coût élevé) - Papier et tissus grossiers	[54]
<i>Jatropha curcas</i> [55]	Protéine	19%	- Engrais organique, ration animale après détoxification. - Biogaz	
	Carbohydate	17%		
	Fibre	16%		
<i>Moringa oleifera</i>	Matière azote	40.3%	- Alimentation de bétail ou engrais - Biogaz - Compost	[56]
	Matière grasse	10.8%		
	Sucre et amidon	14.2%		
	Cellulose brute	4.14%		
	Cendres	3.80%		
<i>Cynara cardunculus</i>	matière protéique	20 %	Aliment de bétail Fertilisant organique	[05]

5.2. Glycérol

Le glycérol est un coproduit inévitable issu de la réaction de transésterification pour la production du biodiesel, il forme 10 % en poids des Triglycérides [57]. Le glycérol est utilisé dans l'industrie savonnaire et cosmétique afin de réduire le coût total du biodiesel. La production de glycérol à grande échelle, peut néanmoins conduire à une saturation du marché, auquel cas, ce sous-produit devra être plutôt considéré comme déchet, avec des impacts économiques et énergétiques défavorables (coûts de traitements-élimination du déchet) [58].

En effet, des méthodes chimiques et biotechnologiques sont employées pour obtenir des produits à haute valeur ajoutée comme la conversion du glycérol en 1,3-propanediol pour la fabrication des polymères [57].

Il existe de plusieurs utilisations potentielles du glycérol en excès. La plus simple est la combustion directe pour la production de l'électricité (16MJ/Kg) ainsi que son utilisation comme substrat pour la digestion anaérobie en vue de produire du biogaz ou encore sa conversion en huile par les microalgues (Fig.2.9) [59].

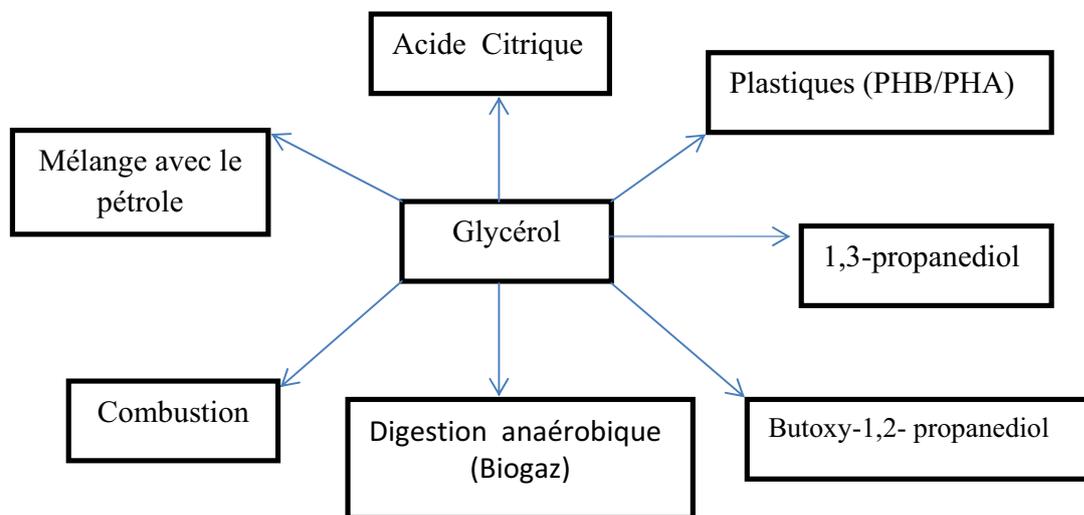


Fig.2.9 : Les différentes possibilités d'utilisation du glycérol [59].

CONCLUSION

Dans ce 2^e chapitre nous avons évoqué les différentes caractéristiques que présenteraient les espèces alternatives non alimentaires destinées à la production du biodiesel en vue de contribuer à réduire la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles. D'autres critères sont également pris en considération pour le choix d'une espèce tout en examinant les différentes opportunités à saisir pour promouvoir des coproduits et sous-produit à haute valeur ajoutée de manière à rendre la filière économiquement plus attractive.

Les principales caractéristiques évoquées tiennent compte :

- 1- des caractéristiques physiologiques selon le type de la photosynthèse (le potentiel génotypique (C3, C4, C5) ;
- 2- De l'espèce retenue qui doit être disponible localement ou à défaut présenter une forte adaptabilité aux conditions édapho-climatiques locales. (résistance à la sécheresse, salinité, calcaire et autre);
- 3- des rendements en huile qui doivent être uniformes et constants du point de vue quantitatif et qualitatif;
- 4- du bilan énergétique (le taux input/output), ce bilan étant surtout influencé par l'utilisation des engrais et des pesticides ;
- 5- La nécessité de privilégier les espèces à faibles intrants agricoles (fertilisation, irrigation, pesticides)
- 6- de l'amélioration de la fertilité et la protection des sols contre l'érosion (priorité pour les espèces pérennes légumineuses fixatrices d'azote)
- 7- et enfin de la possibilité d'exploiter des coproduits à haute valeur ajoutée et, le développement d'autres industries liées à l'utilisation de coproduits du biodiesel (production de biopesticides, et de fertilisants organiques ou du biogaz)

Chapitre III

Impact d'une Filière de Biodiesel

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.

1. Aspects écologiques

1.1. Protection du sol contre l'Erosion

1.1.1. 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 [28]. *J. curcas* [28], *Moringa oleifera* [48], *S. chinensis* [05] *Euphorbia lathyris* [53] pourraient être cultivées dans des régions à faible pluviométrie, sur des terres marginales de faible fertilité ce qui assure une protection du sol contre l'érosion.

1.1.2. 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 intermedia* 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% [60]

1.2. 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 par l'amélioration de la structure du sol suite au développement du système racinaire et l'accumulation de la matière organique. [60]. L'agroforesterie a une importante incidence sur les propriétés physicochimiques du sol, les cycles biogéochimiques des éléments minéraux et sur le stockage du C et N 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. [55]

En revanche, le défrichement des terres pour l'implantation de Palmier à huile (*Elaeis guineensis*) est l'une des causes de déboisement [61]. La qualité du sol des forêts tropicales peut être endommagée irréversiblement par la destruction de l'activité biologique du sol, lessivage des éléments minéraux due aux précipitations torrentielles et aux inondations [62].

1.3. Séquestration de carbone

L'argument principal derrière les politiques qui sont 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 identique que celle absorbée par la photosynthèse durant la croissance de la plante, ce qui conduit à un bilan neutre de carbone [63].

Par exemple, chaque hectare de *R. communis* et de *J. curcas* [64] contribue à l'absorption de 10 t de CO₂ chacune ce qui est 4 fois plus que la moyenne par rapport aux autres plantes oléagineuses. [65].

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 [65]. 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 [28].

1.4. 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 [28]. Ainsi, *L. leucocephala* est capable de fixer une quantité d'azote pouvant atteindre 500 kg/ha/an [05].

1.5. 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 [66]. Une protection de la faune et de la biodiversité serait également réalisée. [46]

1.6. Biodégradabilité du Biodiesel

Le biodiesel est non toxique et se dégrade 4 fois plus rapidement que le petrodiesel. La présence de l'oxygène dans son structure chimique améliore le processus de la dégradation conduisant à une diminution du niveau de la biodégradation [67].

Tab.3.1: La biodégradabilité du pétrole et les biocarburants [67].

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

1.7. Le bilan énergétique

Afin d'estimer la séquestration en GES permis par le biodiesel, la première étape consiste à calculer le retour sur l'investissement d'énergie (Energy Return on Investment EROI (énergie output / indirecte + direct énergie input), ratio qui doit être supérieur à un. [63]).

Cependant quelques études montrent que la production du biodiésel 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 considéré comme un gaspillage énergétique. Cette approche est basée sur une analyse économique qui prend en considération les dépenses énergétiques pour la production du biodiésel. 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 le tournesol est de -27% et -118% respectivement [68].

Tab.3.2 : Coefficient énergétiques des intrants agricoles [69].

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

1.8. 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, des hydrocarbures aromatiques polycycliques nitrates et des particules. Ces réductions augmentent à mesure que la quantité de biodiesel mélangée dans le carburant diesel augmente. Les meilleures réductions des émissions sont vues 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 de 20% le biodiesel réduit des émissions de CO₂ de 15% [70].

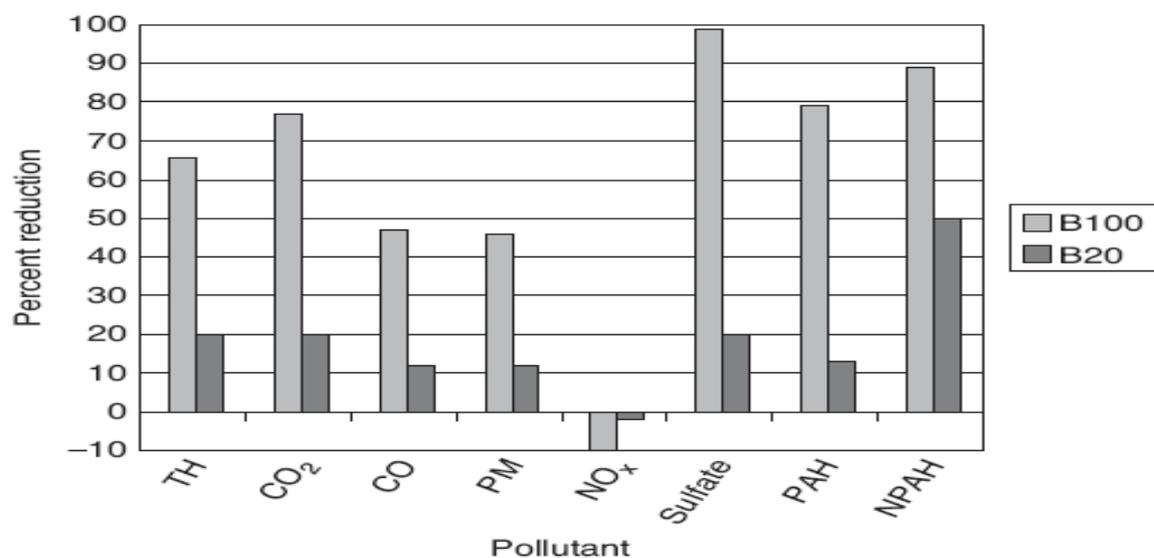


Fig.3.1: Réduction des émissions en polluants pour B100 et B20 [71].

2. Les impacts socio-économiques

2.1. Le développement rural

Un des arguments les plus importants des promoteurs des biocarburants est qu'une politique à grande échelle bénéficierait considérablement le 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 le prix des matières premières en raison de la demande croissante [63]. Ainsi que ces dernières contribuent à l'amélioration des structures économiques régionales, et aussi à la création de l'emploi rural [72]. Comme exemple, le *Jatropha* pourrait se croître sur des terres marginales, ou une pauvre population est souvent trouvée, il est prévisible d'avoir un impact social positive par l'attraction des investissements gouvernementale, la stabilisation de la population rurale, l'approvisionnement en énergie et une source de revenue [73].

2.2. Disponibilité des terres

La disponibilité des terres est un facteur limitant pour la production des biocarburants [74]. 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 à déplacer 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. [13]

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*) [75].

2.3. 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 naturelles, la pauvreté, les guerres tout en ajoutant, les besoin en irrigation due à l'extension de l'agriculture. L'extension des biocarburants pourrait concurrencer les autres usages de l'eau ce qui accentue sa pénurie. La demande en

eau des biocarburants dépend des besoins d'irrigation des cultures bioénergétiques. Ainsi que la production de la matière première n'est pas le seul processus consommateur de l'eau [76].

2.4. Sécurité énergétique

Les analystes préviennent que la consommation globale en pétrole continuera à augmenter pour passer dans les 30 ans à venir de 85 mb/j en 2006 à 118 mb/j en 2030 et que le Peakoil est atteint en 2010 et 2020. L'instabilité politique dans les régions pétrolifère, 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 s'est considéré comme une énergie alternative propre et qui contribue à la sécurité énergétique tout en respectant l'environnement [76].

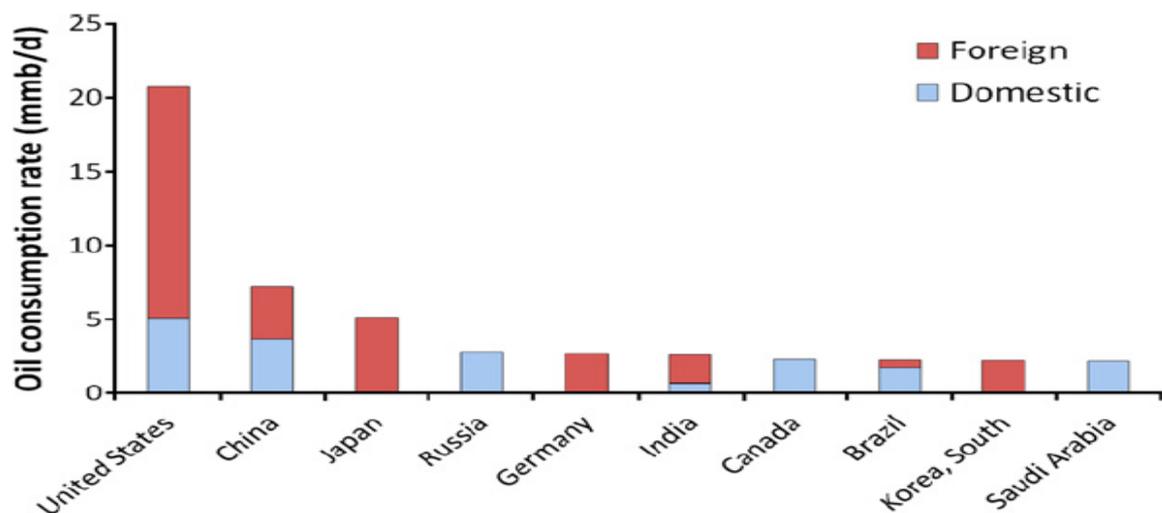


Fig.3.2: La consommation en pétrole de quelque pays dans le monde [76].

2.5. 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 [42].

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 lectines 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 [77].

Tab.3.3 : Différentes substances toxiques rencontrées dans les espèces oléagineuses non alimentaires

Espèce	Métabolite secondaire
<i>Jatropha curcas</i>	Curcine, latex (ester de Phorbol) [77]
<i>Recinus communis</i>	Ricine, ricinine [77]
<i>Azadirachta indica</i>	Azadirachtine [78].
<i>Leucena leucocephala</i>	Acide aminé de mimosine [17].
<i>Calophyllum inophyllum</i>	Saponine [79]

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 socio-économiques. 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 tenant en compte le facteur biodiversité. Tout cela conduit à l'augmentation de la bio-capacité ainsi que 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 tout en diminuant les émissions des GES et socioéconomique de la production des biocarburants.

La toxicité des espèces énergétiques pourraient conduire à des effets négatifs sur la santé humaine. Cependant, une forte possibilité 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 et l'exploitation des coproduits par la gazéification et la méthanisation [80].

Chapitre IV

***Principe d'Analyse
du Cycle de Vie
(ACV)***

Introduction

La durabilité est le principe clé pour une meilleure gestion des ressources naturelles. Elles impliquent l'efficacité opérationnelle et la réduction effective des impacts environnementale et socio-économiques où toutes ces considérations sont interdépendantes [81]. L'analyse de cycle de vie est une méthode largement admise afin de quantifier les impacts environnementaux d'un produit. L'analyse de cycle de vie (ACV) apparaît comme outil approprié à évaluer les nouvelles technologies pour la production bioénergétique. Cet outil identifie les goulots d'étranglement technologiques et soutient donc l'Eco-design efficace d'une chaîne soutenable de production.

ACV est une compilation et évaluation des inputs et outputs et des impacts potentiels sur l'environnement durant son cycle de vie. Cet outil a l'avantage d'identifier les impacts environnementaux de toutes les étapes du cycle de production [82]. Les émissions de carbone et d'azote (GES), d'autres nutriments (P, K), l'utilisation de l'eau et des terres, le bilan énergétique net, l'eutrophication potentielle, impact sur la biodiversité, l'érosion de sol et l'utilisation de pesticide sont généralement évaluées [81].

1. Définition

L'analyse du cycle de vie (ACV) évalue l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un système en relation à une fonction particulière et ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie. Elle permet d'identifier les points sur lesquels un produit peut être amélioré et elle contribue au développement de nouveaux produits. Cet outil est avant tout employé pour comparer les charges environnementales de différents produits, processus ou systèmes entre eux, ainsi que les différentes étapes du cycle de vie d'un même produit [83]. Selon la définition des normes ISO et de la SETAC, l'analyse du cycle de vie s'effectue en quatre phases:

- La définition des objectifs,
- L'inventaire des émissions et des extractions,
- L'analyse de l'impact et
- L'interprétation (**Fig.4.1**).

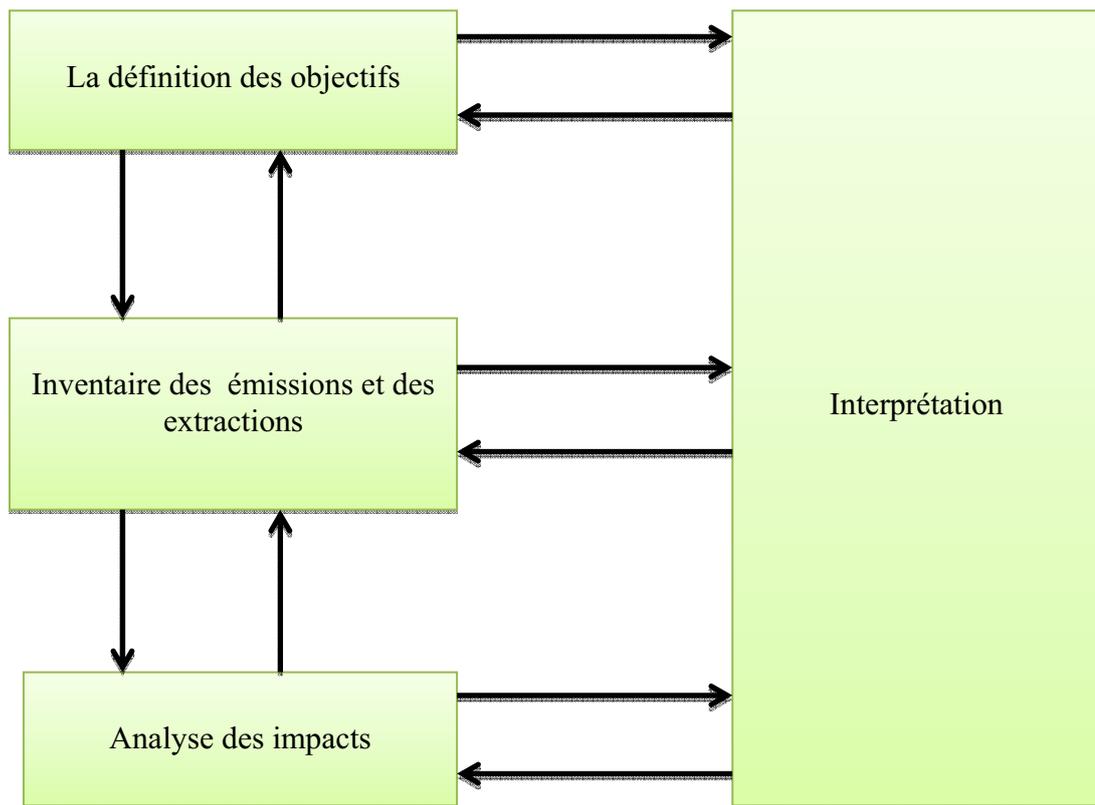


Fig.4.1 : Phase de l'analyse du cycle de vie [82].

2. La définition des objectifs et du système :

Cette étape permet de poser le **problème**, de définir les **objectifs et le champ de l'étude**. Cette phase détermine une série d'éléments cruciaux: **la fonction du système, l'unité fonctionnelle** à laquelle les émissions et les extractions seront ensuite rapportées. Elle définit également les **limites du système considéré** [83].

3. L'inventaire des émissions et des extractions

Selon la norme ISO 14041 (1998 E), cette phase consiste à collectionner les données nécessaires afin de répondre aux objectifs préétablis. Le but est de préparer un inventaire quantitatif et qualitatif de tous les processus impliqués dans le cycle de vie du produit [84]. Il quantifie les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol ainsi que les extractions des matières premières renouvelables ou non renouvelables. Elle détermine également l'utilisation des sols nécessaire pour la réalisation de la fonction du système [83].

3.1. Bilan énergétique

Lors de la conception d'un produit, le calcul de la demande en énergie non renouvelable par unité fonctionnelle constitue un outil utile et efficace pour une première identification des points responsable de la majorité des émissions et des extractions des ressources [83].

Cependant dans le cas du biodiesel, il faut prendre en considération que seule une fraction de l'énergie totale utilisée pendant la production de la matière première et l'extraction de l'huile est destinée pour la production du biodiésel vue que d'autre produits sont obtenus (Le glycérol et le tourteaux d'extraction). Par conséquent, une partie de l'énergie totale est comptabilisée lors d'une évaluation du bilan énergétique, ce qui implique l'établissement et l'adoption d'une définition standard du bilan énergétique. Le ratio énergétique des biocarburants est communément défini comme la part de l'énergie non renouvelable utilisée pour leur production sur la valeur de l'énergie du carburant et de chaque coproduit utilisé. Cet indice dépend des conditions climatiques locales, des pratiques culturelles et des techniques de production. Il doit être supérieur à l'unité pour que le carburant soit renouvelable [85].

Pour que le biodiesel soit une alternative viable aux carburants conventionnels, il doit montrer un gain énergétique net. [85]

Les process exigeant en énergie sont : [85]

- Input direct (labour, semis, fertilisation, pesticide, récolte et séchage) ;
- Input indirect (machine agricole, séchoir des graines, fertilisant et produit phytosanitaire) ;
- Process du biodiesel (transport, extraction, raffinage et estérification).

3.2. Bilan de CO₂

Le bilan CO₂ s'effectue de façon similaire au bilan énergétique. Le CO₂ est d'ailleurs fortement lié à l'énergie primaire non renouvelable, puisqu'une grande partie de ses émissions anthropogènes proviennent de la combustion des vecteurs énergétiques fossiles. En règle générale, une haute consommation énergétique implique d'importantes émissions de CO₂ sauf si l'énergie utilisée est d'origine nucléaire. De plus, la quantité de CO₂ formée par unité d'énergie ou de matériaux dépend du type de combustible utilisé. Plus le rapport H/C (hydrogène sur carbone) des molécules de combustible est petit, plus la quantité de CO₂ formée par énergie produite est grande [83].

4. L'analyse de l'impact environnemental :

Elle évalue l'impact sur l'environnement des émissions et extractions inventoriées dans la phase précédente. Elle peut se décomposer en trois étapes [83]:

- La **classification** détermine quelles émissions contribuent à quels impacts environnementaux (effet de serre, toxicité humaine, écotoxicité, diminution des ressources etc.);
- la **caractérisation intermédiaire** pondère les émissions à l'intérieur de chacune des catégories d'impact;
- la **caractérisation des dommages** regroupe les catégories d'impact dans des catégories de dommages (dommages sur la santé humaine, les écosystèmes, les équilibres climatiques. (Fig.4.3)

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

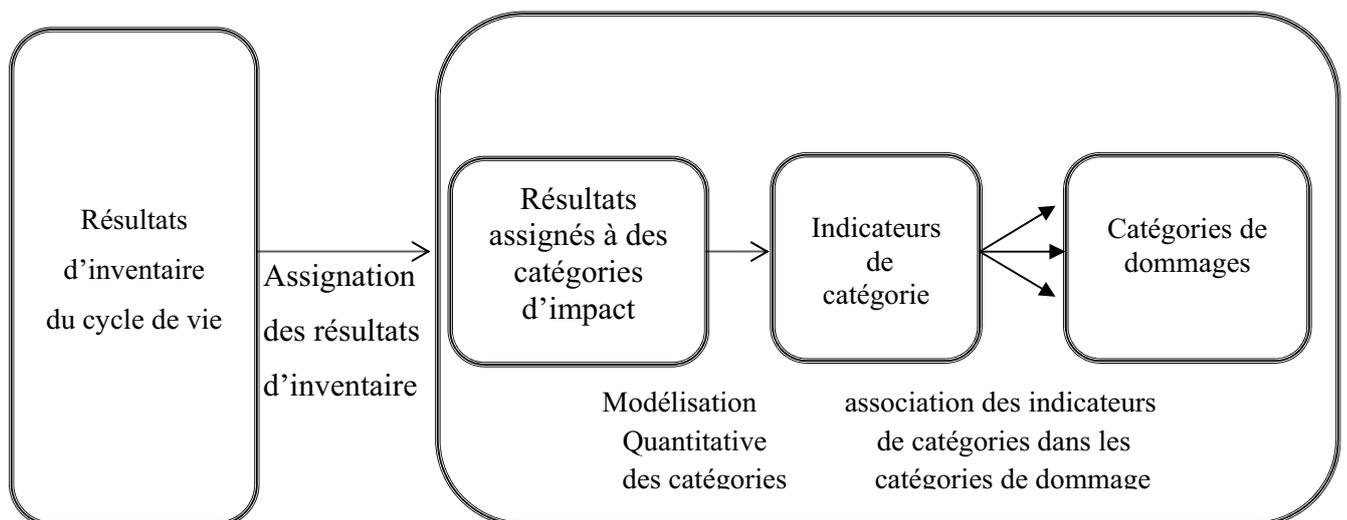


Fig.4.2 : Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions sur les sujets à protéger d'après la norme ISO 14042 [83].

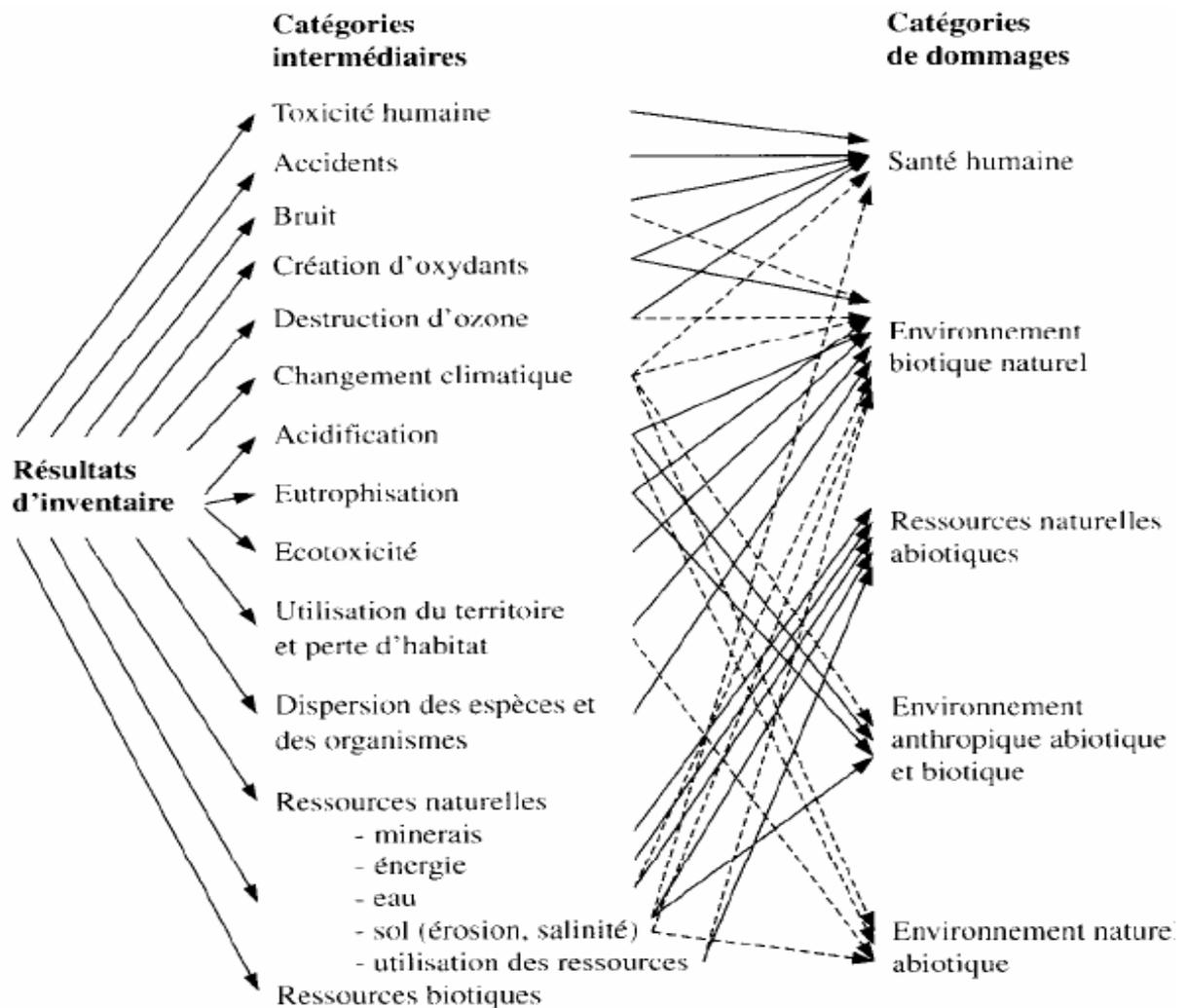


Fig.4.3 : Structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie [83].

5. Interprétation

Cette étape permet aussi bien d'interpréter les résultats obtenus dans chacune des phases précédentes que d'évaluer les incertitudes. Les points clés et les options d'amélioration du produit étudié sont identifiés. Des études de propagation des incertitudes et des études de sensibilité sont effectuées pour dégager les paramètres les plus influents. L'incidence des limites de l'ACV et des hypothèses effectuées est analysée de manière critique. Cette dernière phase d'interprétation peut être complétée par la mise en relation des aspects environnementaux et des aspects économiques ou sociaux [83].

Conclusion

L'analyse du cycle de vie est un outil très efficace pour déterminer les impacts environnementaux d'un produit. Elle présente de nombreuses potentialités du fait de l'importante quantité d'information obtenue. L'ACV apporte des informations précieuses pour l'évaluation et l'amélioration du produit et identifie les zones critiques dans lesquelles la performance environnementale d'un produit peut être améliorée.

L'ACV est ainsi un outil permettant de définir certains principes d'éco-conception c'est-à-dire de concept de produit favorable à l'environnement. L'ACV permet la comparaison de produits existants ce qui peut également apporter des idées d'amélioration des processus de production et de conception de produits.

L'ACV est alors efficace parce qu'elle permet d'identifier les goulots d'étranglement de la production, les processus de production alternatifs possibles et les meilleurs opportunités de conception ce qui constitue un outil d'aide à la décision.

Chapitre V

Inventaire des Espèces Végétales Alternatives

Leucena leucocephala

(2n = 104).

Famille : Fabaceae (légumineuse)**Genre :** *Leucena***Espèce :** *Leucena leucocephala***Origine :** Mexique et l'Amérique centrale**1. Description**

Arbuste ou arborescent qui pourrait atteindre 20 m de hauteur, avec un tronc de 10- 25 cm de diamètre. Les feuilles sont persistantes de 10- 25 cm de long. Les fleurs sont blanches et les fruits sont des gousses de 10-15 cm de long et de 1,6 cm de large et 2,5 cm d'épaisseur. Les fruits noircissent et se durcissent et peuvent renfermer 15 à 30 graines. *L. leucocephala* développe un bon système racinaire [5].

Cet arbuste est cultivé pour plusieurs fins. Elle pourrait être utilisée comme une source de protéine due à sa richesse en azote, pour la restauration des sols, la lutte contre l'érosion, la conservation de l'eau, reforestation et l'amélioration de la fertilité du sol. Elle pourrait aussi être exploitée comme un fourrage. La plante peut fixer une quantité importante d'azote (500 kg/ha/an) [86]. La méthanisation de *L. leucocephala* produit, avec un taux de conversion de 60 % et une source de charbon (1 million de baril de pétrole /an sur une surface de 120 km²) [17]

2. Les Exigences Ecologiques

L. leucocephala s'adapte à plusieurs types de climat, du climat chaud a climat humide, depuis des zones tropicales sèches aux forêts humides. *L. leucocephala* préfère les zones ensoleillées sous des altitudes de 500 m à 1000 m mais, le taux de croissance est faible en haute altitude. Des précipitations allant de 650 à 1500 mm sont requises mais elle peut supporter des zones très sèches ou très humides. Elle s'adapte à plusieurs types de sol mais, un sol profond, fertile, humide, avec des argiles alcalines est préférable tout en évitant les sols mal drainés, gorgés d'eau ou acide avec une carence en calcium ou une teneur élevée en Aluminium et Manganèse (un pH inférieur à 5 peut être à l'origine d'un mauvais développement) [5].

Ses performances sont excellentes sur des sols calcaires jusqu'à un pH de 8. On la rencontre sur des sols alcalins mais sa tolérance à la salinité est faible. Son développement est faible lorsque la température moyenne annuelle est inférieure à 20°C. Elle est sensible au froid qui détruit la croissance apicale, mais une régénération rapide est assurée par les bourgeons axillaires (froid léger) ou par la partie basale (forte gelée). Les basses températures stressent la germination des graines. Les jeunes plants sont détruits par les fortes gelées. Elle est connue pour sa résistance à la sécheresse ainsi que sa capacité à s'adapter avec les différents types des Rhizobiums locaux. [5]

3. Multiplication et mode de conduite

La production des graines viables est assurée dès la première année. Ces graines sont couvertes par une enveloppe dure et cireuse qui doit être scarifiée avant la plantation ; pour assurer une bonne et rapide germination, la graine est immergée dans de l'eau à 80°C pendant 3 à 5 minutes ou dans de l'eau bouillante pendant 4 à 5 secondes. L'inoculation avec le rhizobium est recommandée pour plusieurs types de sol. La densité de plantation est fonction de la pluviométrie de la région. L'espacement est de 5-9 m de part et d'autre et un désherbage est nécessaire [86].

L. leucocephala pourrait se multiplier sexuellement (graines) ou végétativement (bouturage). Les jeunes plants sont souvent transplantés après 3- 4 mois en racines nues (sans motte) ou après un pralinage. Si l'humidité du sol est adéquate, une croissance végétative typique survient après 4 à 6 mois [86].

L. leucocephala est plus adapté aux sols fertiles profonds, bien drainés et d'un P^H neutre ou alcalin; son système racinaire profond lui permet de se régénérer rapidement après une période de stress hydrique. Les feuilles sont détruites par les gels, mais une grande taille d'arbre la protège contre les gels au sol et elle reprend sa croissance dès que les premières conditions favorables sont installées (conditions de températures en particulier) [5].

4. Rendement

La récolte pourrait s'effectuer en 9 mois après la plantation avec un intervalle de 40 à 50 jours après la première récolte. Un rendement de 75 à 95 kg de fourrage/arbre pourrait être obtenu 3 à 4 ans après la plantation. Les feuilles de *L. leucocephala* contiennent 23 % du poids de matière sèche en protéine brute et 6.13 % de matière minérale du poids sec avec un coefficient de digestibilité de 65 %. Les graines du *L. leucocephala* sont aussi riches en

protéine avec une composition de 27 à 30%. La formation des graines se produit dès la 1^{ère} ou la 2^e année après la plantation. [86]. Le rendement en graine pourrait atteindre les 3 t/ha/an [87]. La teneur de la graine en huile est de 11% et les gousses est de 3 %. [88] [89]



Les gousses mure *L. leucocephala*



Les graines de *L. leucocephala*

L'huile de *L. leucocephala* est compose principalement de trois type d'acide gras dont l'acide palmitique, oléique et linoléique avec une teneur de 14.2%, 20.1% et 53.8% respectivement. Une teneur relativement élevée en acide gras saturés (24%) influe positivement sur l'indice de cétane et sa teneur en acide gras non sature de 75.7% a une incidence favorable sur les autres propriétés à savoir le comportement à froid, la viscosité et la lubricité (Tab.5.1) [90].

Tab.5.1: Composition en Acide gras de l'huile de *L. leucocephala* [90].

Acide gras	Teneur (%)
acide Palmitique	14.2
acide Stéarique	6.1
acide Oléique	20.1
acide Linoléique	53.8
acide Linolenique	1.8
acide Arachidique	2.3
acide Lignocérique	1.7
indice d'acidité	2.5

Jatropha curcas

(2n = 22)

Famille : Euphorbiaceae**Genre :** *Jatropha***Espèce :** *Jatropha curcas***1. Description**

C'est une plante oléagineuse non alimentaire qui se développe dans les régions arides et semi-arides et les zones tropicales. Le *J. Curcas* est une espèce pérenne résistante à la sécheresse. Elle pousse sur des terres marginales et son cycle de culture est de 50 ans. La teneur en huile varie entre 30-50% du poids de la graine et entre 45 à 60% du poids de l'amande seule [44].

2. Exigences écologiques

Le *Jatropha curcas* peut être cultivé sur des terres marginales, ce qui fait de cette plante une espèce non concurrente pour la production alimentaire a prouvé que le contenu d'huile de *Jatropha* varie selon les types des espèces et les conditions climatiques, mais principalement selon l'altitude à laquelle elle est cultivée. L'étude a montré que les teneurs moyennes en huile dans les curcas L. de jatropha diminuent selon l'altitude en passant de 30,66%, 42,12 % et 43,19 % de leur poids de graine, entre 800-1000m, 600-800m et 400-600 m respectivement[91]. La dominance de la croissance végétative est favorisée par les altitudes élevées [92].

C'est une plante à croissance rapide et sa multiplication est facile. Le *J. curcas* pourrait s'adapter à une pluviométrie de 250 mm comme minimum avec un optimum entre 900 et 1200 mm [44].

Récemment le *J. curcas* est considérée comme une source potentielle prometteuse pour la production du biodiesel en Europe, Asie et l'Afrique. *J. curcas* possède plusieurs utilisations. Son latex est utilisé comme pesticide naturel [44]. Les rendements en graines sont de 4-5 t/ha avec un rendement en huile d'environ 1.5 t/ha [77].

3. Propagation et technique de multiplication

Le *J. curcas* est multiplié par bouturage ou par graine. Le bouturage est préparé par des rameaux d'un an de 25 à 30 cm. C'est une bonne pratique culturale pour les inoculer par un mycorhize fongique lors de son installation dans la pépinière. Ce traitement améliore la qualité de la symbiose plante-champignon. Dans les conditions du champ en particulier pour les sols à faible fertilité, l'enracinement est de 100% après 45 jours. Lorsque les boutures sont traitées pendant 24 h avec 10- 100 mg/l d'acide indole-3- butyrique (IBA), plus efficace que l'acide 1-naphtalénacétique (NAA), le taux de réussite est supérieur à 90%. L'installation du *J. curcas* à large échelle est possible par un semis ; les graines sont immergées dans de l'eau pendant 24h et la germination a lieu au bout de 5 à 10 jours à une température de 27-30°C avec une humidité de saturation. Les boutures et les graines sont développées dans la pépinière pendant 2 mois et transplantées durant le début de la saison humide. Pendant la saison sèche la plante entre en état de dormance en perdant ses feuilles [93].

4. Densité de Plantation et Rendement:

Il existe deux modes de plantation. Dans le premier modèle, une densité très élevée de 2500 plant/ha avec un espacement de 2x2m. La production totale en graines après 3 récoltes varie entre 2000 à 4000 kg/ha et en particulier autour de 3200 kg/ha, ce qui correspond à un rendement en huile de 1.5 t/ha avec une pluviométrie de 700 à 800 mm/an. En comparaison, le palmier à huile à un rendement de 3.7 t d'huile/ha, et un rendement de 0.38t d'huile/ha pour le Soja. Une culture intensive rend la mécanisation impossible. Pour le second modèle de production, la densité de plantation est faible (357 plant/ha) avec une distance de plantation de 7*4 m. pour ce modèle, le nombre de grappes par arbre est grand et pourrait atteindre 14 kg de graine /plant /an ou 5000 kg/ha. il semble qu'une densité de 1000 arbres /ha (5*2m) pourrait être un bon compromis pour la production et la mécanisation [93].

5. Caractéristique de l'huile et des Esters méthyliques d'acide gras de *J. curcas*

Les graines de *J. curcas* renferment une teneur en acides gras libres de 14% avec un pourcentage élevé en acide oléique (45.79 %), acide linoléique (32.27 %), palmitique (13.38 %) et acide stéarique (5.44 %). Une teneur relativement élevée en acide gras saturés (19% d'après le tab.5.2 et pouvant atteindre 34% [47] influe positivement sur l'indice de cétane qui peut atteindre 58.4. En revanche le faible comportement à froid, avec une valeur de +3°C constitue un inconvénient. La teneur relativement élevée en acide linoléique et oléique se répercute positivement sur la viscosité cinématique avec une valeur relativement faible de

4.34 mm²/s (à 40°C). Les esters méthyliques d'acides gras (MEAG) de *J. curcas* présentent un point d'éclair de 135 °C qui est conforme avec les normes en vigueur. (Tab.5.3)

Tab.5.2: Composition en Acide gras de l'huile de *J. curcas* [44].

Acide gras	Formulation	Teneur (%)
acide Laurique	12:0	0.31
acide Palmitique	16:0	13.38
acide Palmitoléique	16:1	0.88
acide Stéarique	18:0	5.44
acide Oléique	18:1	45.79
acide Linoléique	18:2	32.27
Autre	-	1.93
Acide gras libre	-	14

Tab.5.3: Comparaison des propriétés du gazole, huile pure et Biodiesel du *J. curcas* [94].

Propriétés	Gazole [44]	Huile pure de <i>J. curcas</i>	Biodiesel <i>J. curcas</i>
Densité (kg/m ³)	840	918.8	879.4
Viscosité mm/s (40°C)	4.59	35.47	4.34
Pouvoir calorifique (kJ/kg)	42390	39774	38450 [44]
Point d'éclair (0C)	75	186	135
Indice de cétane	45-55	38.1	58.4
Résidus carbonique (%)	0.1	0.44	Non disponible
Point d'écoulement (°C)	-	- 6	+3
Corrosion a la lame de cuivre	-	-	1

Cynara cardunculus

Famille: Asteraceae

Genre: *Cynara*

Espèce: *Cynara cardunculus* var. *silvestris* Lamk



1. Description

C'est une plante vivace à tige élevée de 20 à 60 cm. Les feuilles sont pinnatifides, très grandes : les basales en rosette mesurant 30 à 60 cm de long ; toutes tomenteuses en dessous et vertes, à la fin glabre en dessus ; à lobe épineux. Akènes non ailés, capitules terminaux, gros de 4 à 5 cm de diamètre, ovoïdes. Bractées de l'involucre charnue à la base, lancéolées, étalées, terminées en forte épine ; fleurs bleues. Le fruit est un akène duveteux [66].

2. Exigences écologiques

C. cardunculus est une espèce caractéristique des climats méditerranéens. Elle est sensible au froid à l'état de jeune plant. Un froid hivernal pourrait avoir un effet significatif sur les rosettes des feuilles dans la première et les années suivantes ce qui peut détruire les feuilles mais la plante reste en vie et elle se régénère après l'établissement des conditions favorables. Elle pourrait tolérer des basses températures qui peuvent atteindre les -5 °C dès que la plante est au stade de 4 feuilles. [5]

Pour un bon développement de la plante, une pluviométrie annuelle devrait être d'environ de 400 mm ou plus. Avec une faible précipitation, la production en biomasse diminue substantivement [5].

C. cardunculus est une espèce héliophile, exige un sol profond et limoneux avec une capacité de rétention en eau en hiver et en printemps dans le sous-sol (1-3 m). *C. Cardunculus*, par son rhizosphère profonde, explore l'eau et les éléments minéraux dans des zones très profondes ce qui confère à la plante une résistance aux stress hydrique et minéral [5].

3. Les rendements

La production en biomasse pourrait atteindre 20 à 30 t de MS/ha/an et un rendement en graine de 2-3 t/ha avec une composition de 25% en huile, 20% de protéine, 18.5 % de fibre et 4.1 % de cendre [95] *C. Cardunculus* consomme des quantités énormes en nutriments. Les besoins pour produire 20 t de MS/ha sont de : [5]

N	277 kg/ha
P.....	56 kg/ha
K.....	352 kg/ha

4. Caractéristique de l'huile et des MEAG de *C. Cardunculus*

Les graines de *C. Cardunculus* renferment une teneur en acides gras libre de 25% avec un pourcentage élevé en acide linoléique de 56.0, acide oléique (25.0%), palmitique (14.0%) et acide stéarique (3.0%). A cause d'une teneur élevée en acide linoléique les MEAG obtenus présentent une viscosité cinématique (à 40°C) relativement faible de 3,56 mm²/s. Le point de trouble (PT) et le point de fusion (PF) sont de -1 °C et -3 °C respectivement et un point d'éclair (PE) de 175°C. Les esters éthyliques issus de *C. Cardunculus* présentent une étroite amélioration pour PT, PF et PE de -3 °C, -6°C et 180 °C respectivement. [47]

Les tableaux ci-dessous décrivent les caractéristiques de l'huile de *C. Cardunculus* en vue d'une possible utilisation pour la production du biodiesel. La caractérisation significative est son indice de cétane élevé et un point d'écoulement faible qui serait avantageuse pour son utilisation comme un carburant.

Tab.5.4 : Caractéristique de l'huile de *C. Cardunculus* [95]

Propriété	valeur	Méthode
Densité (15°C)(kg/m ³)	921	EN ISO 3675
Viscosité (à 40°C) (mm ² /s)	32	EN ISO 3104
Teneur en esters méthyliques (%)	0	EN 14103
Teneur en Mono-glycérides (%)	0.08	EN 14105
Teneur en Diglycérides (%)	2.78	EN 14105
Teneur en Glycérol (%)	0.0	EN 14105
Acides gras libres (%)	5.84	EN ISO 660
Indice d'acide (mgKOH/g)	11.63	EN 14104
indice d'Iode (g de I ₂ /100g)	123.7	EN ISO 3961
Teneur en eau (ppm)	1178	EN ISO 12937
Indice de cétane [5]	51	

Tab.5.5: les propriétés du Biodiesel obtenu à partir de l'huile de *C. cardunculus*. [47]

Propriété	Biodiesel du <i>C. cardunculus</i>
Viscosité a 40 °C mm ² /s	3.56
Point de trouble (°C)	-1
Point d'écoulement (°C)	-3
Point d'éclair (°C)	175
Indice de cétane [5]	51

Moringa oleifera

Famille: Moringaceae

Genre: Moringa

Espèce: *Moringa oleifera*

Nom vernaculaire: horse radish tree (anglais);

Ben oil tree (anglais); acacia blanc (Fr.); ben ailé (Fr);

Reseda (Esp) ; Paraiso frances(esp).



1. Description

Moringa oleifera est originaire de l'inde, Arabie, Afrique et les caraïbes. Elle se développe dans les régions subtropicale et tropicale sèche (5 à 10 m de haut) d'une altitude de 100- 1200 m [96]. Elle tolère des précipitations allant de 250 à 1500 mm et à une gamme de température de 19 à 28°C [9] (max 48°C [96]).

2. Les exigences écologiques

Elle est caractérisée par une croissance très rapide, résistante au stress hydrique et thermique et tolère une salinité élevée [97] et elle prospère dans des sols sablonneux [9], Limon-sablonneux ou argileux, les sols légèrement acides sont préférés mais avec une mauvaise croissance sur les collines où le sol est maigre [96]. Comme il s'agit d'une légumineuse ([82], [98]) enrichissante en phosphore [96] elle pourrait améliorer la fertilité du sol. Elle tolère un pH du sol de 5.0 à 9.0 [96] et est résistante aux maladies cryptogamiques et bactériennes. Le *M. oleifera* se fructifie dès la première année. La pleine production peut être atteinte dès la 2^{me} année avec une production en graine de 3kg/arbre/an et une teneur en huile de 33 à 41 %. La production en huile s'élève de 1000- 2000 l/ha/an. [9]

3. Culture et Traitement

La multiplication est assurée par bouturage ou par semis. C'est généralement ce dernier mode de propagation qui est utilisé. L'essence rejette fortement de souche. *M. oleifera* est généralement planté en haies vives. On le taille pour provoquer une nombreuse ramification et pour faciliter la récolte [96].

4. Caractéristique de l'huile et des Esters méthyliques d'acide gras de *M. oleifera*

A la maturité, la teneur des graines sèches en huile est de 33-41 % du poids net et la composition en acide gras est dominée par l'acide oléique (70%). Du fait de sa teneur relativement élevée en acide Béhénique (7.1%), les AEAG de *M. oleifera* montrent un point de trouble et d'écoulement élevés de 18 °C et 17 °C respectivement. Cependant les AEAG possèdent un indice de cétane de 67 le plus élevé que ceux des autres biodiesels et une viscosité de 4,83 mm²/s qui respecte la norme européenne (EN14214) et américaine (ASTM D 6751) (Tab.5.5: [28], [29]).

Tab.5.6: Composition en Acides gras de *M. oleifera*

Acides gras	<i>M. oleifera</i> [98]	<i>M. oleifera</i> [99]
C16 :0	6.5	7.0
C16 :1	-	2.0
C18 :0	6.0	4.0
C18 :1	72.2	78.0
C18 :2	1.0	1.0
C18 :3	-	-
C20:0	4.0	4.0
C20 :1	2.0	-
C22 :0	7.1	4.0
Autres	1	-

Tab.5.7: Les propriétés des MEAG de *M. oleifera* [98]

Propriété	<i>M. oleifera</i>	ASTM D 6751	EN14214
Indice de cétane	67 min	47 min	51 min
Viscosité cinématique (mm ² /s ; 40°C)	4.83	1.9-6.0	3.5- 5.0
Point de trouble (°C)	18	report	-
Point d'écoulement (°C)	17	-	-
Indice de stabilité oxydative (h)	3.61	3 min	6 min
Lubrilité (HFRR ; µm)	135, 138.5	-	-

Ricinus Communis

[2n=20]

Famille : Euphorbiaceae**Genre :** *Ricinus***Espèce :** *Ricinus communis***1. Description**

Le *R. communis* est répertorié comme une plante sauvage dans l'est du nord de l'Afrique. Elle est caractérisée par une énorme diversité et pourrait atteindre 10-13 m de haut avec un diamètre de tronc de 7.5 à 15 cm. Comme une plante annuelle, le *R. communis* atteint une hauteur de 1 à 3 m [77]. *R. communis* montre un potentiel de tolérance au stress hydrique, salin et de résistance aux maladies (les nématodes [5]).

2. Les exigences écologiques

R. communis se développe bien dans les zones tropicales humides et dans les régions sèches subtropicales. Une température de 20-25 °C est optimale. La teneur de la graine en huile est meilleure sous des climats chauds mais au-delà de 38 °C, la formation des graines est faible. *R. communis* est sensible au froid. Une précipitation annuelle de 750- 1000 mm est optimale. Elle pourrait se développer entre des latitudes allant de 40 °S et 52° N et une altitude de 1500 à 3000 m mais un meilleur développement est entre 300-1800 m. Son système racinaire profond lui permet de bien résister à la sécheresse. *R. communis* est sensible à la photopériode pendant la floraison. Un sol profond limono-sableux est préférable pour le *R. communis*. Un pH du sol entre 5 et 8 avec un optimum de 6 lui convient. La production d'une tonne de graine (avec capsule) nécessite 30 kg d'azote, 12 kg de Ca et 3kg de Mg. Une fertilisation azotée non équilibrée favorise le développement végétatif au détriment de la formation de la graine. La meilleure performance agronomique est atteinte avec une humidité relative de 30-60 % en particulier pendant la croissance végétative. Le *R. communis* est une plante à croissance facile, et elle est résistante à la sécheresse ce qui la rend une culture idéal pour les zones semi-arides avec un système de production semi-extensif [5].

3. Rendements

Les rendements en irrigué pourraient atteindre de 2.242 t/ha à 3.363 t/ha [77]. Les graines de *R. communis* renferment 48 à 60% d'huile [100]. Cette huile est de couleur jaune pâle visqueuse, non volatile et non siccative avec une composition de 90% en acide récinoleique. Les autres acides gras sont l'acide linoléique (4.2%), oléique (3.0%), stéarique (1%), palmitique (1%) et linoléique (0.3%) [77].

4. Utilisation

Puisque le *R. communis* n'est pas utilisée pour des applications alimentaires, et pourrait être développée productivement (à grande échelle = d'une manière extensive) sur les terres marginales, cette culture représente une opportunité unique d'augmenter la production industrielle d'huile végétale à l'échelle mondiale [100].

Le *R. communis* L. a le potentiel de devenir la première culture oléagineuse pour la production d'une huile industrielle à travers le globe. Le *R. communis* est un candidat idéal pour la production des matières premières à haute valeur ajoutée, en tant qu'huile industrielle en raison d'une teneur très élevée en huile (48-60%) dans la graine [100].

5. Caractéristiques de l'huile et des Esters méthyliques d'acides gras de *R. communis*

Le biodiesel de *R. communis* présente des points de trouble et d'écoulement très bas (Tab.5.8) ce qui le rend une bonne alternative pour les zones froides. Les mélanges B10 et B20 montrent des comportements à froid très favorables, ce qui indique une utilisation comme additif pour améliorer les propriétés du diesel (fluidité et performances environnementales). Globalement, les propriétés du biodiesel de B10, B20 et B100 se conforment aux standards (ASTM D 6751) et sont comparables à celles du petrodiesel à l'exception de la viscosité de B100 qui dépasse largement la norme. Notons que la viscosité de *R. communis* L. est la plus élevée des huiles végétales.

Tab.5.8: les propriétés de l'huile de *R. communis* L.

Propriété	Valeur	Réf
Densité (g/mL)	0.961 – 0.963	[5]
Point de fusion (°C)	18 -10	
Indice d'iode	82- 90	
Indice de saponification	176 – 190	
Viscosité cinématique 310.8 K (mm ² /s)	297.0	[101]
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	39.5	
Point d'écoulement	241.3	
Point d'éclair	533	

Tab.5.9: Les propriétés des MEAG de *R. communis*

Propriété	[102]			[103]
	B10	B20	B100	
Densité (kg/m ³)	864.3	870.3	926.8	927.9
Viscosité ciném. à T °C (mm ² /s)	4.54	4.97	15.98	13.75
Point d'éclair (°C)	85.3	88.7	190.7	120
Pouvoir calorifique (kJ/kg)	44427.6	44780.4	37900.8	
Corrosion à la lame de cuivre (3h à 50°C)	1 a	1 a	1 b	1
résidu de Carbone (%)	0.009	0.007	0.037	-
point de trouble (°C)	- 5	- 7	- 23	-
point d'écoulement °C	- 26	- 30	- 45	-
Indice de cétane	-	-	-	50

Brassica carinata**Famille:** Brassicaceae**Genre :** *Brassica***Espèce :** *Brassica carinata*

B. carinata est connue comme la moutarde d’Ethiopie, qui appartient à la famille des Brassicaceae. Elle est bien adaptée sur des terres marginales. Elle pourrait tolérer les régions arides. *B. carinata* est une espèce intéressante comme source potentielle de biodiésel due à ses performances agronomiques dans les zones où les conditions de croissance ne sont pas favorables pour le *B. napus*. *B. carinata* à l’état naturel renferme 43.6% d’acide érucique environ. Cependant, des variétés de *B. carinata* sans acide érucique sont développées. Les MEAG de *B. carinata* montrent des valeurs PT, PE, et TLF de -9°C, -6°C, -9°C respectivement. Un II de 138 et une viscosité cinématique (40°C) de 4.83 mm²/s. les caractéristiques des MEAG de *B. carinata* sont rapportées par le Tab.5.12 [47].

Tab.5.10: Caractéristiques écologiques de *B. carinata* [104]

Origine	Ethiopie
Ecologie	<ul style="list-style-type: none"> -Plante annuelle avec la possibilité d’être une culture d’été et d’hiver -Meilleure adaptabilité sous les climats tempérés semi-aride -Elle supporte les basses températures (jusqu’à -3 °C) et les hautes températures (45°C) -Résiste à la sécheresse (pluviométrie annuelle de 300 – 400 mm)
La teneur en huile (la graine)	30 -38 %
Rendement	1 à 2.5 tonne en graine

Tab.5.11: La composition chimique de l'huile de *B. carinata* [104]

Acide gras	La teneur (%)
acide Palmitique (C16:0)	3.1
acide Stéarique (C18:0)	1.0
acide Oléique (C18:1)	9.7
acide Linoléique (C18:2)	16.8
acide Linolenique (C18:3)	16.6
acide Arachidique (C20:1)	0.7
Erucique acide (C22:1)	42.5
Acidité (% de l'acide oléique)	0.98
Souffre (ppm)	30

Tab.5.12: Les propriétés techniques du biodiesel de *B. carinata* [104]

Propriété	Méthode de test	<i>Brassica carinata</i>	ASTM D6751	EN 14214	
				min	max
Indice de cétane	EN ISO 5165	52	47 min	51	
La stabilité oxydative (110 °C, h)	pr EN 14112	-	-	6.0	
La densité (kg/m ³)	UNI EN ISO 3675 et 12185	879	-	860	900
Viscosité cinématique (mm ² /s à 40°C)	UNI EN ISO 3104	4.5	1.9- 6	3.5	5.0
Point éclair (°C)	ISO/CD 3679	>120	130 min	120	
Teneur en cendre (%)	ISO 3987	< 0.01	0.02 max		0.02
La teneur en eau (mg/Kg)	prEN 12937:99	465	0.05 max		500
Teneur en soufre (mg/Kg)	EN 24260	< 10	0.0015		10.0
Corrosion a la lame de cuivre (3 h à 50°C)	EN ISO 2160	1	NO.3 max		1
La teneur en acide Linoléique (%)	prEN 14103	13.0	-		12

Simmondsia chinensis
(Jojoba)

Famille : Simmondsiaceae

Genre : Simmondsia

Espèce : *Simmondsia chinensis*



1. Description

Le jojoba (*Simmondsia chinensis*), est un arbuste indigène des déserts de Sonoran et de Mojave dans l'Arizona, Californie et du Mexique. Actuellement, elle est cultivée dans quelques pays du proche orient et de l'Amérique latine [105]. C'est une espèce unique de la famille **Simmondsiaceae**, et parfois classifiée dans la famille **Buxaceae**. [5].

La plante est à feuilles persistantes et, les feuilles sont couvertes de cire pour empêcher les pertes excessives d'eau par évapotranspiration. On observe divers types dont certains se développent comme des arbustes, d'autres se développent jusqu'à une taille de 5 m. Quelques types portent des fruits régulièrement, d'autres non. Les racines atteignent des profondeurs de plus de 10 m. Les fruits contiennent normalement une seule graine, mais jusqu'à trois sont possibles. Les graines contiennent de 47-62% cire-huile qui devient liquide à 7°C [5]. Elles sont toxiques à cause de leur teneur en cyanure [106]. *S. chinensis* est une plante pérenne qui pourrait atteindre les 100 à 200 ans [5]

2. Les exigences écologiques

Avec sa canopée végétale dense composée de feuilles persistantes *S. chinensis* pourrait apparaître incapable de survivre dans le désert mais elle est extrêmement résistante à la sécheresse. Ses feuilles contiennent un pourcentage élevé en matière sèche ce qui lui confère sa rigidité et sa résistance au flétrissement. La photosynthèse est limitée seulement à des heures fraîches ce qui limite l'évaporation [106]. Elle se développe sous des conditions de sol et d'humidité qui ne sont pas favorables pour la plupart des autres cultures. L'arbuste a été connu pour survivre à une année sans précipitations du tout. Le *S. chinensis* exige de l'eau pendant les mois d'hiver et de printemps pour la mise à fleurs et à graines. Des précipitations annuelles de 250 mm sont suffisantes pour qu'elle survive, mais 370-450 mm permettent une croissance plus rapide et luxuriante ; les précipitations ou une irrigation de 750 mm sont adéquates ; 2000 mm sont acceptables comme maximum. La plante a besoin d'une période

fraîche avec une température moyenne d'environ 15°C durant 2 mois environ pour la levée de l'état de dormance. La floraison de *S. chinensis* est constamment à températures élevées elle ne fleurit jamais. Les températures optimales sont 21-36°C, mais elle tolère les températures extrêmes du désert. Les plantes peuvent tolérer le gel à -5°C, les plantes âgées supportent de températures de - 9°C. En outre, il semble que les plantes irriguées sont moins tolérantes au gel que les non irriguées [5].

La valeur du pH du sol peut s'étendre de 5 à 8, la valeur du pH optimal est 6-7. Le jojoba n'est pas très exigeant envers la fertilité du sol [5]. Elle est tolérante à la salinité [105]. Elle a besoin d'un sol drainant, profond et léger, et ne tolérera pas les sols humides non drainés. Au début les jeunes plantes se développent plutôt lentement, due au développement de l'appareil racinaire pour assurer un bon approvisionnement en eau [5].

3. Mode de conduite

La multiplication est assurée soit par la voie sexuée (semis) soit par voie végétative (bouturage). Dans les plantations le rapport entre les pieds mâles et femelles est de 1 à 5-10. L'espacement entre ligne est de 3 m, entre pieds de 23 à 75 cm ou plus selon la pluviométrie soit une densité de 3300 pieds/ha. [107]

4. Productivité de Jojoba (*S. chinensis*) [5]

1 ^{ère} production	Après 4 – 5ans
Pleine production	Après 10 ans
Maturité du fruit	90 à 180 jours
Rendement potentiel	4.5 t/ha
Rendement normal	0.5 -15 kg/pied
Rendement moyen	1.5 kg/pied ou 2.25 t/ha (1528 kg d'huile/ha) [101]

5. La composition de l'huile de *S. chinensis*

Les esters cireux de Jojoba sont constitués principalement d'acide éicosénoïque, érucique et oléique avec cis-11-eicosen-1-ol et cis-13-docosen-1-ol comme alcool. A cause de cette composition, la méthanolyse conduit à la formation d'un mélange d'AEAG et des alcools à longue chaîne d'où une difficulté de séparation de ces produits (Tab.5.13) [47].

6. Les propriétés physico-chimiques du biodiesel de *S. chinensis*

Les propriétés physiques de ce mélange ne sont pas similaires au biodiesel élaboré des autres sources, avec une température limite de filtrabilité de 4°C, une viscosité cinématique (à 40°C) de 11,82mm²/s. Cependant la réduction des composés alcools par une épuration au laboratoire conduit à une amélioration de la TLF (-14°C). Mais la viscosité (9.0 mm²/s à 40°C) reste au-dessus de la norme. [47] L'élaboration d'un biodiesel à partir de Jojoba après un prétraitement (catalyseur acide), raffinage, bleaching, et désodorisation conduit à une réduction de la viscosité à une valeur de 6.7 qui reste toujours au-dessus de la norme. Le point de trouble, d'écoulement et le TLF sont élevés (-13°C, -14°C et -16°C respectivement). L'indice de cétane est de 69 (Tab.5.14) [108].

Tab.5.13: La composition en ester de cire de l'huile de *S. chinensis* [108]

Acide gras	nomenclature	Esters de méthyl de l'huile de jojoba
14:0	Myristique	0
16:0	Palmitique	1.2
18:0	Stearique	0
20:0	Arachidique	0
22:0	Béhénique	0.2
16:1 Δ9	Palmitoléique	0
18:1 Δ9	Oléique	10.7
18:1 Δ11	Vaccénique	0.3
20:1 Δ11	Gondoïque	59.5
22:1 Δ13	Erucique	12.3
24:1 Δ15	Nervonique	1.7
18:2 Δ9, 12	Linoléique	0.1
18:3 Δ9, 12, 15	Linoléique	0.4
20:4 Δ5, 8, 11, 14	Arachidonique	9.1
22:4 Δ7, 10, 13, 16	Docotétraseñoïque	3.7
Σ saturé		1.4
Σ mono insaturé		84.5
Σ polyinsaturé		13.3

Tab.5.14: Les propriétés physico-chimiques de l'huile de *S. chinensis* [108]

Propriété	(HJ)JO	(HJ)JO traité	JME traités
Point de trouble (°C)	8	7	-13
Point d'écoulement (°C)	5	4	-16
TLF (°C)	20	20	-14
Lubricité (µm)	151	217	165
Viscosité (mm ² /s)	25.00	21.06	6.67
IP, h	60	34	0.35
Indice d'acidité	0.68	0.06	1.37
Indice de cétane	184		69
Indice d'iode	206		108

Nicotiana tabacum

Famille: Solanaceae

Genre : Nicotiana

Espèce : *Nicotiana tabacum*



N. tabacum est une plante oléagineuse avec des fleurs roses et des capsules vertes renfermant de nombreux petits grains. Elle se développe dans plusieurs pays de par le monde. Les feuilles sont un produit commercial pour la production des cigarettes et autres produits contenu dans le tabac [47]. Le ratio récolte/résidu est d'environ 1,2 avec 0.833 kg de graines comme résidu pour chaque kg de feuille produit. Les rendements en graine de tabac sont variables selon les régions, la variété et les conditions climatiques et peuvent atteindre 600 à 2500 kg/ha. [33].

La teneur en huile des graines de tabac varie de 35 à 49 % et le tourteau d'extraction pourrait être exploité comme un aliment de bétail [109]. L'huile de tabac renferme plus de 17% de AGL et un pourcentage élevé en acides linoléique (69.5%), oléique (14.5%) et palmitique (11.0%) (Tab.5.15). Conséquence de cette teneur relativement élevée en acide linoléique, les MEAG issus de l'huile de tabac présentent une viscosité cinématique relativement faible (3,5 mm²/s) en comparaison avec d'autres biodiesels. En outre, les MEAG présentent un indice de cétane de 51 et un indice d'iode de 112 (Tab.5.16) [47].

Tab.5.15: Composition de l'huile de *N. tabacum*[110]

Acide gras	La teneur (%)
A. Caprylique (C8:0)	0.08
A. Caprique (C10:0)	0.00
A. Laurique (C12:0)	0.00
A. Myristique (C14:0)	0.12
A. Palmitique (C16:0)	8.16
A. Palmitoléique (C16:1)	0.10
A. Stéarique (C18:0)	3.56
A. Oléique (C18:1)	12.14
A. Linoléique (C18:2)	72.98
A. Linolénique (C18:3)	0.76
A. Arachidique (C20:1)	0.20
A. Eiconénoïque (C20:1)	0.12
A. Béhénique (C22:0)	0.07
A. Erucique (C22:1)	0.00
Autres	1.71

Tab.5.16: Les propriétés du biodiesel de *N. tabacum* [110]

Propriété	unité	valeur	EN 14214		Méthode de teste
			min	max	
Teneur en ester	%	98.6	96.5	-	EN 14103
Densité à 15 °C	Kg/m ³	888.5	860	900	ENISO 12185
Viscosité à 40°C	mm ² /s	4.23	3.5	5.00	EN ISO 3104
Point d'éclair	°C	165.4	120	-	EN ISO 3679
Teneur en soufre	%	8	-	10.0	EN ISO 20846
Résidu carbonique	mg/kg	0.029	-	0.30	EN ISO 10370
Indice de cétane		51.6	51.0	-	EN ISO 5165
Teneur en cendre	mg/kg	0.0004	-	0.02	ISO 3987
Teneur en eau	mg/kg	354.09	-	500	EN12937
Contamination total	mg/kg	23.95	-	24	EN12662
corrosion à la lame de cuivre	Rating	1A	Class 1		EN 2160
Stabilité oxydative	heure	0.8	6.0	-	EN 14112
Indice d'acidité	mgKOH/g	0.3	-	0.5	EN 14104
Méthyl ester d'acide linoléique	%	0.759	-	12.0	EN 14103
Méthyl ester polyinsaturé (>= 4 double liaison)	%	<0.1	-	1	EN 14103
L. Filtrabilité	°C	-5	-	-	-

Salicornia bigelovii

Famille : Chénopodiaceae

Genre : *Salicornia*

Espèce : *Salicornia bigelovii*



1. Description

Salicornia bigelovii est une espèce vasculaire annuelle de type C4 d'origine de l'Amérique que l'on rencontre sur les côtes des estuaires et les marées salants. La plante a une tige succulente érigée, les feuilles sont succulentes vertes mais elles deviennent rouge en automne. La floraison s'étale de juillet à novembre, les fleurs sont hermaphrodites. Les fruits sont succulents et contiennent une seule graine. *S. bigelovii* est une plante halophyte (tolérant la salinité) et ses vacuoles sont capables d'accumuler une concentration en sel de 6% (celle l'eau de mer n'est que de 3%) et elle tolère une immersion dans l'eau salée. La graine contient environ 30% d'huile et 30 % de protéine. L'huile de *Salicornia* renferme 72% d'acide linoléique polyinsaturé. *S. bigelovii* peut protéger les sols contre l'érosion, restituer les éléments minéraux dans le sol, séquestrer le CO₂, enlever les sels et les métaux lourds dans les unités de traitement des eaux usées et donner un carburant non fossile. [5]

Environ 60 espèces ont été répertoriées pour le genre *Salicornia*. Parmi les espèces communes, on peut citer:

Salicornia virginica (Amérique), *Salicornia europea* (Algérie [111]), *Salicornia maritime*, *Salicornia bigelovii*, *Salicornia prennis*, *Salicornia ramosissima*, *Salicornia brachiata*.

2. Les Exigences Ecologiques

Il existe 3 types de zones qui pourraient être exploitées pour développer à large échelle des fermes pour les espèces halophytes et qui sont :

- Les déserts côtiers (irrigation par eau de mer) ;
- Les déserts internes (irrigation par les eaux de surface ou souterraines) ;
- Les zones arides salées où les installations des systèmes d'irrigation préexistante (irrigation par les eaux de drainage récupérées). [5]

Cependant les sols sablonneux et sablo-limoneux conviennent au développement de *S. bigelovii*. Les sols lourds avec une grande capacité de rétention seront préférés de façon à réduire les quantités d'eau d'irrigation. *S. bigelovii* a une tolérance à la salinité remarquable qui pourrait atteindre une concentration de 50.000 ppm (5% de sel) sans pourrissement. Bien que l'accumulation des sels puisse s'avérer nocive, elle peut être évitée par un drainage (overwatering) [5].

Les besoins en irrigation sont estimés à 1- 3 m³/an/m² en eau de mer. La croissance de la culture augmente avec une application en azote et en phosphore [5].

3. Propagation

La multiplication sexuée est la méthode la plus viable de propagation de *S. bigelovii*. Les graines pourraient être utilisées pour une propagation en masse des plantes sélectionnées. Ceci implique une germination des graines sous serre suivie d'une sélection et la croissance des plantes se fait sur un substrat de culture. Les recherches montrent qu'il est possible de produire 12 à 30 nouvelles pousses **par culture** toutes les 8 semaines. [5]

4. Mode de conduite de culture

S. bigelovii a comme saison de croissance de Mars à Aout. Des stratégies basées sur la diminution de la densité de semis sont mises en œuvre pour avoir des plantes vigoureuses en appliquant une fertilisation phosphorée avant la plantation pour améliorer la croissance de la culture. Un apport d'eau est nécessaire pendant la pollinisation de la plante puis on arrête l'irrigation dès que la plante atteint sa taille finale au lieu d'attendre la maturité de la culture [5].

5. Production et rendement

La production de graines oléifères est affectée par la variété et la salinité de l'eau d'irrigation. Les graines constituent environ 11% de la production totale de la biomasse [113]. Des plantations effectuées dans une ferme en Arabie saoudite en octobre et novembre avec des récoltes en septembre ont atteint leur objectif d'un rendement de 10-15,6 t/ha [97] de fourrage et 1 t/ha de graine, tandis que des rendements en graines oléagineuses de 2 [97] – 3,5t/ha ont été atteints dans une région située à 60 km de cette ferme [5].

6. La composition d'huile et les propriétés physiques du biodiesel de *S. bigelovii*

La teneur des graines en huile varie de 22,4 [5] à 45% [113]. L'huile de *S. bigelovii* renferme un pourcentage élevé en acide linoléique (75%). Les acides oléique (12%), et palmitique (8%) sont présents en quantité significatives. Conséquence de la teneur relativement élevée en acide linoléique de l'huile de *S. bigelovii*, les MEAG correspondants montrent une viscosité cinématique relativement faible (5.0 mm²/s). En outre, les MEAG ont un indice de cétane de 53,9 et un point d'éclair qui dépasse 150 °C. Le biodiesel de *S. bigelovii* présente un comportement à froid très favorable d'où un point de trouble de - 4°C ce qui le rend très convenable pour les régions froides. L'inconvénient qu'on peut constater est la teneur en soufre qui est relativement élevée (3.9 mg/kg) mais elle reste acceptable selon les normes.

Tab.5.17: Composition de l'huile de *Salicornia bigelovii* [113]

Acide gras	La teneur (%)
acide Palmitique (C16:0)	8
acide Stéarique (C18:0)	3
acide Oléique (C18:1)	12
acide Linoléique (C18:2)	75
acide Linolenique (C18:3)	2

Tab.5.18: Propriétés du Biodiesel de *Salicornia bigelovii* [113]

Propriété	ASTMD6751	EN 14214	Biodiesel du <i>S. bigelovii</i>
Viscosité mm ² /s à 40°C	1.9 - 6.0	3.5 - 5.0	5.0
Teneur en soufre (mg/kg)	< 15	< 10	3.9
Indice de cétane	> 47	> 51	53.9
Point de trouble (°C)	-	-	- 4
Point d'éclair (°C)	> 130	> 120	> 150
Corrosion d'une lame de cuivre (3 h à 50°C)	1	1	3

Euphorbia lathyris

Famille Euphorbiaceae

Genre : Euphorbia

Espèce : *Euphorbia lathyris*



ig. 5. *Euphorbia lathyris*, Southern California (photograph by i.E. Calvin)

L'espèce *Euphorbia lathyris* appartient à la famille des Euphorbiaceae. Cette espèce est cosmopolite se rencontre en Europe, dans le nord-ouest de l'Afrique, le sud-ouest de l'Asie et l'ouest de la chine [114]. *E. lathyris* est une plante annuelle [115], elle présente des performances agronomiques remarquables. Elle se développe dans les zones arides, résiste aux stress hydrique et thermique tout en tolérant la salinité [114]. Le rendement en graine oléifères peut varier de 1,5 à 2,5 t/ha/an avec une teneur en huile pouvant atteindre 48% [116].

La teneur des graines d'*E. Lathyris* en huile est d'environ 43% [114]. L'huile d'*E. Lathyris* montre un indice d'acidité élevée de 25,17 (selon la norme DIN V 51605 le max est de 2 mg deKOH/g), ce qui va influencer sur le process technologique de conversion. L'huile de *E. Lathyris* est caractérisée par la dominance de l'acide oléique (81.46%), les acides linoléique (3.71%) et palmitique (6.80%) sont présents en quantité significatives. Conséquence de la teneur relativement élevée en acide oléique de l'huile *E. Lathyris* les MEAG correspondant montrent une viscosité cinématique relativement faible (4.64 mm²/s). En outre, ces MEAG ont un indice de cétane de 59.6 et un point d'éclair qui dépasse 181 °C. Le biodiesel de *E. Lathyris* présente un comportement à froid très favorable avec un point limite de filtrabilité de -11°C, ce qui le rend très convenable pour les régions froides. (Tab.5.19)[114].

Tab.5.19: La composition chimique de l'huile d'*E. Lathyris* [114]

Acide gras	La teneur (%)
acide Palmitique (C16:0)	6.80
acide Palmitoléique (C16:1)	0.5
acide Stéarique (C18:0)	1.98
acide Oléique (C18:1)	81.46
acide Linoléique (C18:2)	3.71
acide Linolenique (C18:3)	2.78
acide Eicosénoïque (C20:1)	0.5
acide Erucique (C22:1)	0.2
Proportion of saturation (Cn: 0)	8.78
degré de mono-insaturation (Cn: 1)	82.66
degré polyinsaturation (Cn: 2, 3)	6.49

Tab.5.20: Les propriétés physico-chimiques d'huile *E. Lathyris* [114]

Teneur en huile (%)	43.31 \pm 0.94
Indice d'acidité (mg de KOH/g)	25.17 \pm 0.02
Indice d'iode(mg I ₂ /100mg) ISO 3961 :1996	83.37 \pm 1.39
Indice de saponification mg de KOH/g(ISO 3657 :2002)	167.47 \pm 1.97
La masse molaire mg/mol	1184.71

Tab.5.21: Propriétés du biodiesel E. Lathyris [114].

Propriété	Méthode de teste	Limite	<i>E. lathyris</i>
Teneur en MEAG(%)	GC	96.5 min	97.61
Indice de cétane	EN ISO 5165	51 min	59.6
La stabilité oxydative(110 °C, h)	pr EN 14112	6 min	10.4
Point limite de filtration (PLF, °C)	DIN EN 116	-	-11
La densité (kg/m ³)	EN ISO 3675	860–900	876.1
Viscosité cinématique (mm ² /s; 40°C)	EN ISO 3104	3.5–5.0	4.64
Point d'éclaire (°C)	EN ISO 3679	120.0 min	181
Indice d'acidité (mg KOH/g)	pr EN 14104	0.50 max	0.19
La teneur en eau (mg/Kg)	EN ISO 12937	500 max	400
Corrosion à la lame de cuivre (50 °C, 3 h)	EN ISO 2160	1 max	1
La teneur en acide Linoléique (%)	GC	12.0 max	2.78

Citrullus colocynthis

Famille : Cucurbitaceae

Genre : *Citrullus*

Espèce : *Citrullus colocynthis*



Cette espèce est très commune dans tout le Sahara Algérien. [111]. La graine de *Citrullus colocynthis* est considérée comme une source destinée pour l'alimentation animale du fait que les graines renferment 13.5% de protéine, 26.6% de l'huile, 2.1% de matière minérale, 52.9% de fibre et 4.9 % d'azote. C'est une espèce spontanée, pérenne, qui pousse dans les régions désertiques. Le fruit de cette plante contient entre 200 et 300 graines [117]. Le rendement pourrait atteindre 6.7 t/ha [5].

L'huile de *C. colocynthis* est composée principalement d'acides palmitique (C16:0), stéarique (C18:0), oléique (C18:1) et linoléique (C18:2) avec des teneurs de 10.48, 9.72, 17.95 et 61.41 respectivement. La teneur en acides gras libres est de 0,49%, ce qui évite les réactions secondaires lors du processus de conversion de l'huile en biodiesel. Conséquence de la teneur relativement élevée en acide oléique de l'huile *C. colocynthis*, les MEAG correspondants montrent une viscosité cinématique relativement faible (3.83 mm²/s) qui est la plus faible par rapport aux autres types de biodiesel. En outre, les MEAG ont un indice de cétane de 53.66 et un point d'éclair qui dépasse 142 °C. Le biodiesel de *C. colocynthis* présente un comportement à froid très favorable avec un point de trouble moyen (0.5°C) vu sa composition dominante en acide oléique (Tab.5.23, 5.24, 5.25) [118].

Tab.5.22: Caractéristiques écologiques du *C. colocynthis*

Famille	Cucurbitaceae	
espèce	<i>C. colocynthis, vulgaris</i>	
Ecologie	-S'adapte bien dans les régions semi-aride et aride. -plante grimpante pérenne qui se développe à l'état sauvage.	[119]
Rendement tonne de graines /an	6.7	[5]
Teneur en huile	47%	

Tab.5.23: La composition en acide gras de l'huile de *C. Colocynthis* [118]

Acide gras	Classe	Huile de <i>C. colocynthis</i>
Acide Caprylique	C8:0	0.0
Acide Caprique	C10:0	0.0
Acide Laurique	C12:0	0.0
Acide Myristique	C14:0	0.0
Acide Palmitique	C16:0	10.48
Acide Palmitoléique	C16:1	0.06
Acide Stéarique	C18:0	9.72
Acide Oléique	C18:1	17.95
Acide Linoléique	C18:2	61.41
Acide Linolenique	C18:3	0.38
Acide Erucique	C22:1	0.0
Total des AGS		20.20
Total des AGIS		79.80

Tab.5.24: Les propriétés physico-chimiques d'huile *C. colocynthis* [118]

Teneur en huile	<i>C. colocynthis</i>
Indice d'iode(mg I ₂ /100mg)	114.46
Densité à 15 °C (kg/m ³)	905.3
Indice d'acidité (mg de KOH/g)	0.98
Indice de saponification (mg de KOH/g)	204.44
Acide gras libre (%)	0.49
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	39.37
La masse molaire g/mol	874

Tab.5.25: Propriétés du biodiesel obtenu à partir de *C. colocynthis* [118]

Propriété	Unit	Limites		Ester de <i>C. colocynthis</i>
		ASTM D6751	EN 14214	
Teneur en esters	%	-	96.5 min	96.78
Densité à 15 °C	kg/m ³	-	860–900	883
viscosité cinématique à 40 °C	mm ² /s	1.9–6.0	3.5–5.0	3.83
Point d'éclaire	°C	130 min	120 min	142
point de trouble	°C	Report	-	0.5
Indice d'acidité	mg KOH/g	0.5 max	0.50 max	0.19
teneur en acide Linolenique	%	-	12.0 max	0.38
Pouvoir calorifique	MJ/kg	-	-	39.97
Stabilité oxydative	h	3 min	6 min	1.41
Indice de cétane	47 min	51 min	49	53.66
Glycérol libre	wt.%	0.02 max	0.02 max	0.011
Glycérol Total	wt.%	0.24 max	0.25 max	0.192

Prunus amygdalus var. amara
(Amandier amère)

Famille *Rosaceae*

Genre : *Prunus*

Espèce : *Prunus amygdalus var. amara*



1. Description

Arbre de 4 à 12 mètres, non épineux, à rameaux glabres et d'un vert clair ; feuilles à pétiole glanduleux, pliées en long dans leur jeunesse, elliptiques-lancéolées, obtusément dentées, glabres, luisantes en dessus ; stipules caduques ; fleurs blanches ou rosées, naissant avant les feuilles, solitaires ou géminées, sub-sessiles ; calice en cloche, à 5 lobes, caduc ; 5 pétales ; 15-30 étamines ; 1 style ; ovaire libre ; drupe oblongue-comprimée, pubescente-veloutée, coriace, sèche et verte à la maturité, s'ouvrant en long ; noyau oblong-pointu, sillonné sur les faces de fissures étroites, à 1-2 amandes douces ou amères [120].

Tab.5.26: Caractéristiques écologiques du *P. amygdalus var. amara*

Famille	Rosaceae	Réf
Espèce	<i>Prunus communis</i> , <i>P. americana</i> , and <i>P. amygdalus</i>	[17]
Caractéristiques	-Résistance à la sécheresse -Tolérance a la salinité -Anti-insecte (Amygdaline)	[121]
Teneur en huile	40 à 45 % (20% min)	[17]
Rendement	3 tonne de graine	[5]

2. La composition de l'huile et les propriétés physiques du biodiesel de *P. amygdalus* :

L'huile de *P. amygdalus* est composée principalement d'acides palmitique (C16:0), oléique (C18:1), linoléique (C18:2) et linoléique dont les teneurs sont de 10.3%, 33.9%, 46.0 % et 4.8 % respectivement. L'huile de *P. amygdalus* présente un indice d'acidité de 0.25 ce qui évite les réactions secondaires pendant le processus de la conversion de l'huile en biodiesel (transésterification). Comme conséquence de la teneur relativement élevée en acide oléique et linoléique de l'huile de *P. amygdalus*, les MEAG correspondants montrent une viscosité cinématique relativement faible (4.68 mm²/s) qui est conforme aux normes américaine (ASTM 6751-02) et européenne (EN14214). En revanche, les MEAG ont un indice de cétane relativement bas (44.6) du à la teneur élevée en acides gras insaturés (84.7%), mais un point d'éclair qui dépasse 173 °C. Le biodiesel de *P. amygdalus* présente un point de trouble de 10 °C et un point d'écoulement de -3°C (Tab.5.27, 5.28, 5.29).

Tab.5.27: Composition de l'huile de *P. amygdalus* [122]

Type d'acide gras	Teneur (%)
Acide myristique C ₁₄ H ₂₈ O ₂	0.1 %
Acide palmitique C ₁₆ H ₃₂ O ₂	10.3 %
Acide stéarique C ₁₈ H ₃₆ O ₂	3.9 %
Acide oléique C ₁₈ H ₃₄ O ₂	33.9 %
Acide linoléique C ₁₈ H ₃₂ O ₂	46.0 %
Acide linoléique C ₁₈ H ₃₀ O ₂	4.8 %
Acide arachidique C ₂₀ H ₄₀ O ₂	0.2 %

Tab.5.28: Propriétés de l'huile de *P. amygdalus* [122]

Propriété	Huile
Densité (15°C) g/cm ³	0.921
Viscosité cinématique (40°C) mm ² /s	34.98
Pouvoir calorifique MJ/kg	NA
Indice d'iode gI ₂ /100g huile	81.60
Indice de saponification mg KOH/ g huile	-
Indice d'acidité mg KOH/g huile	0.25

Tab.5.29: Les propriétés du biodiesel de *P. amygdalus* [122]

Propriété	EN14214	ASTM 6751-02	Amande amère
Teneur en MEAG(%)			97.9
Indice de cétane	> 51	> 45	44.6
Points de trouble (°C)	-	-3 a 12	10
Points d'écoulement (°C)	-	-15 a 10	-3
La densité à 15°C (kg/m ³)	0.86 – 0.90	870 – 900	0.887
Viscosité cinématique (mm ² /s à 40°C)	3.5 -5.0	1.9 – 6.0	4.68
Point d'éclair (°C)	> 120	> 130	173
Indice d'acidité (mg KOH/g)	< 0.5	< 0.80	0.44

Discussion générale

1. Les Performances Ecologiques des Espèces Sélectionnées

Une synthèse des données écologiques abordées dans la section précédente nous permet d'évaluer clairement le potentiel de développement des espèces sélectionnées sous les conditions climatiques locales (régionales) en Algérie. Parmi les principales contraintes pour l'installation des cultures énergétiques pour la production de biodiesel Figurent la pluviométrie dont la faiblesse risque d'exacerber la pression sur les ressources en eau disponible. Néanmoins, d'après le Tab.5.30, les espèces mentionnées plus haut montrent des besoins moindres envers la pluviométrie et ceci des points de vue quantitatif et qualitatif tout en tenant compte des performances agronomiques de ces espèces (résistance à la salinité, stress thermique, stress hydrique, nature et la fertilité du sol) (Tab.5.31).

L'utilisation de la carte pluviométrique et des étages bioclimatiques de l'Algérie (Fig.5.1, Fig.5.2) nous montre que le choix régional de localisation de ces espèces selon les conditions climatiques, essentiellement la pluviométrie, nous permet de constater la grande possibilité de développer ces cultures à l'échelle régionale. Comme exemple les espèces, *L. leucocephala*, *R. Communis*, *C. cardunculus* et *S. chinensis* pourraient être installées dans l'est du pays où la pluviométrie dépasse les 400 mm/an d'après la carte pluviométrique. L'espèce *Salicornia bigelovii*, quant à elle, présente une grande potentialité d'être implantée sur les terres salées de l'est du pays (les chotts). L'ouest du pays, au vu de la carte pluviométrique, ou toute autre région présentant une pluviométrie supérieure à 400 mm/an sont tout indiqués pour abriter certaines espèces comme le *M. oleifera*, *B. carinata*, *J. curcas*, *E. lathyris*, *C. colocynthis* *P. amygdalus*. Le sud du pays conviendrait pour les espèces *Salicornia bigelovii*, *Citrullus colocynthis* et *S. chinensis* lesquelles pourraient être développées en irrigué sans se soucier de la qualité des eaux (eaux salées ou saumâtres, eaux usées, eaux de drainages)

En outre, une superposition de la carte synthèse de la sensibilité à la désertification (Fig.5.3) à la carte pluviométrique nous permet d'envisager une utilisation des sols sans entrer en compétition avec les terres agricoles destinées à la production de l'alimentation humaine.

Nous avançons l'hypothèse que le développement de cultures judicieusement choisies dans le but d'installer une filière de production de biodiesel allié avec la maîtrise d'un

systèmes de production intégré et rationnel selon une approche de développement durable, pourraient aboutir à terme à des retombées positives, essentiellement sur le plan écologique et socioéconomique à savoir une amélioration de l'indice de végétation (couvert végétal), de la biodiversité, de la protection des sols contre l'érosion hydrique ou éolienne ainsi que la restauration des terres dégradées (accumulation de la matière organique, la fixation de l'azote atmosphérique et autre) et la reconstruction des écosystèmes à l'échelle locale par des reboisements massifs. L'introduction de ces espèces dans un système d'assolement-rotation pourrait répondre aux besoins énergétiques (chauffage, carburant) au niveau des fermes agricoles tout en tirant profit de leurs performances agronomiques ce qui pourrait conduire à une amélioration de la production de l'alimentation par l'augmentation de la fertilité des parcelles agricoles.

Tab.5.30: Cultures énergétiques potentielles pour la production du biodiesel selon les conditions climatiques locales.

Nom botanique	Altitude		Température		Pluviométrie	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<i>Leucena leucocephala</i> [5]	500	1000	20		650	1500
<i>Jatropha curcas</i>	400	1400[92]	15	40[93]	250	1200[44]
<i>Cynara cardunculus</i> [5]	-	-	-5	-	400	-
<i>Moringa oleifera</i>	100	1200[96]	19[9]	48[96]	250	3000[9]
<i>Ricinus Communis</i> [5]	300	1800	-	25	750	1000
<i>Brassica carinata</i> [104]	-	-	-3	45	300	400
<i>Simmondsia chinensis</i> [5]	-	-	-5	36	350	2000
<i>Salicornia bigelovii</i> [5]	Espèces qui se développent dans les régions désertiques ou les terres salées ou salinisées sous conditions d'irrigations (l'eau de mer ou des eaux d'une concentration élevée en sels).					
<i>Euphorbia lathyris</i> [114]	Prospère dans les zones arides ou semi-arides.					
<i>Citrullus colocynthis</i>	Espèce se rencontrant à l'état spontané en Algérie dans les régions sahariennes [111].Elle s'adapte bien dans les zones semi-aride et aride [119].					
prunus amygdalus var. amara [121]	Espèce rustique, résistante tant à la sécheresse qu'à la salinité					

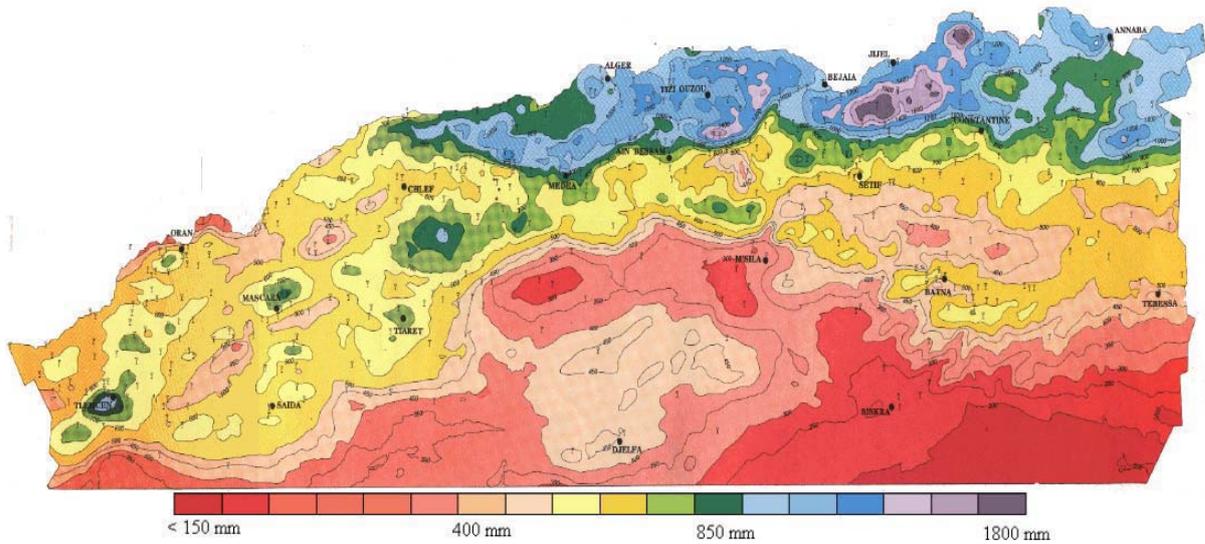


Fig.5.1 : Carte pluviométrique pour l’Algérie du Nord [123]

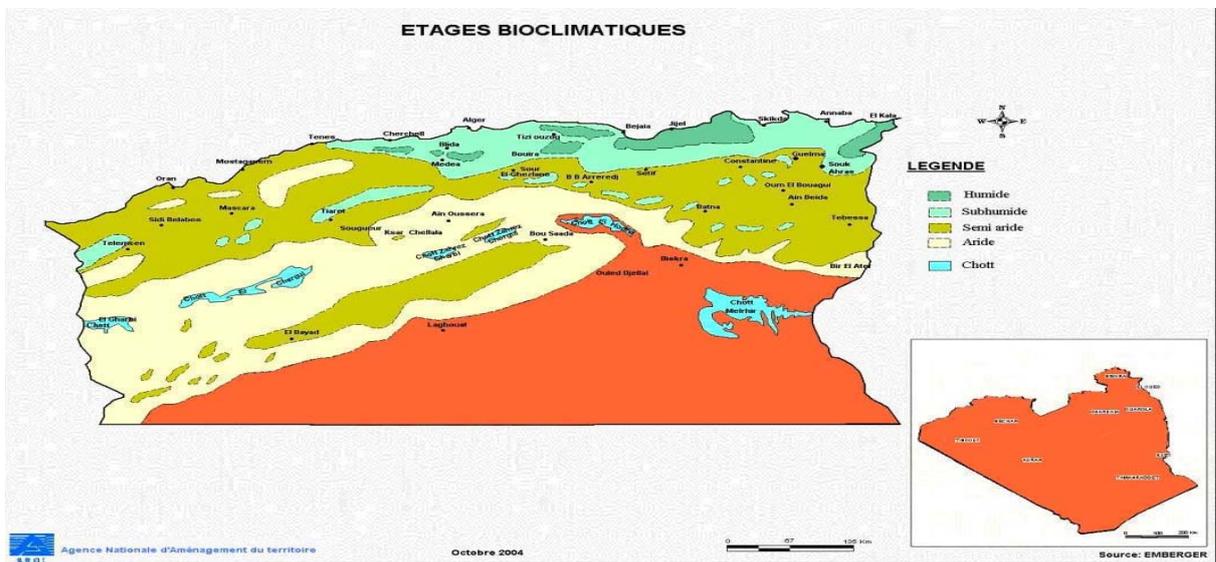


Fig.5.2: La carte des étages bioclimatiques en Algérie [124]

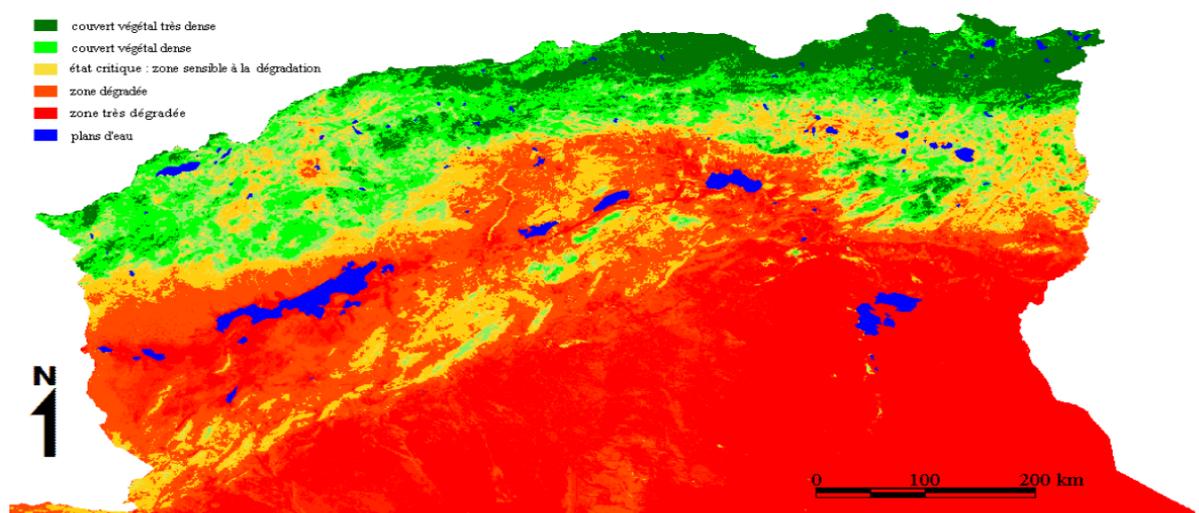


Fig.5.3: Carte synthèse de sensibilité à la désertification (2000-2005). [125]

Tab.5.31: Les exigences écologiques des espèces sélectionnées.

Espèce	sol	eau	Les éléments minéraux	Climat
<i>Leucena leucocephala</i>	Un sol profond, fertile, humide est préférable. Ses performances sont excellentes sur les sols calcaires (PH =8) mais, elle présente une faible tolérance à la salinité. Les sols à pH < 5 sont à éviter.	Elle pourrait supporter des zones très sèches ou très humides. Elle tolère la sécheresse, ce qui est due à son adaptation avec le Rhizobium locale.	S'adapte à plusieurs types de sols moins fertiles	Elle se développe sous différents type de climats du climat chauds a humides.
<i>Jatropha curcas</i>	Pas de labour.	Elle pourrait être cultivée en irrigué ou non-irrigué.	Elle s'adapte sur des sites moins fertiles et des sols alcalins mais des rendements élevés pourraient être obtenu si une fertilisation est appliquée	Se développe dans les climats tropicaux et subtropicaux mais pourrait prospérer dans les régions arides et semi arides.
<i>Cynara cardunculus</i>	Sols limoneux profonds	Résiste au stress hydrique	Elle est très exigeante. Pour une production de 20 t de MS/ha il faut : N : 277 kg/ha P : 56 kg/ha K: 352kg/ha. En Algérie cette espèce set spontanée	Elle est bien adaptée pour le climat méditerranéen.
<i>Moringa oleifera</i>	Elle préfère les sols sablonneux, limono-sablonneux. Un pH du sol de 5 à 9 Elle tolère une salinité élevée.	Elle résiste au stress hydrique	C'est une plante légumineuse	Elle se développe dans les zones subtropicale et tropicale. Elle s'est bien adaptée en Algérie. (ITAF)

<i>Recinus communis</i>	Elle préfère les sols limoneux-sablonneux avec un pH de 5 à 8. Elle est résistante à la salinité.	C'est une espèce halophyte résistante à la salinité	Une tonne de graine exige 30 kg d'azote, 12 kg de Ca, 3 kg de Mg. En Algérie cette espèce pousse spontanément sur les terrains dégradés, terres incultes et friches urbaines	Elle se développe dans les climats tropicaux humides et arides et arides avec un système de production semi-extensif.
<i>Brassica carinata</i>		Résiste à la sécheresse	une espèce peu exigeante envers la fertilité minérale du sol.	Elle présente une meilleure adaptabilité sous les climats tempéré et semi-aride. Elle pourrait être une culture d'hiver ou d'été.
<i>Simmondsia chinensis</i>	Elle préfère des sols profonds, léger, drainant. Elle est tolérante à la salinité	c'est une espèce exigeante en eau pendant les mois d'hiver et printemps.	elle n'est pas exigeante envers la fertilité du sol.	elle se développe dans les zones désertiques, arides et semi-arides.
<i>Salicornia begilovii</i>	Sol sablonneux et sablo-limoneux Très tolérante à la salinité (5% de sel deux fois la salinité de l'eau de mer)	1 à 3 m ³ /an/m ² en eau de mer ou en eau salée	Une fertilisation azote et phosphore améliore les performances agronomiques de la culture.	elle prospère dans les régions arides, désertiques et les terres salinisées.
<i>Euphorbia lathyris</i>	Elle tolère la salinité	Elle est résistante au stress hydrique	Elle est adaptée sur les sols marginaux	elle se développe dans les zones arides
<i>Citrullus colocynthis</i>	elle se développe à l'état sauvage sur tous les sols légers			Elle s'adapte bien dans les régions semi-arides, arides. Cette espèce est très répandue dans le Sahara Algérien.
<i>Prunus amygdalus var. amara</i>	elle est résistante à la salinité	c'est une espèce résistante à la sécheresse	peu exigeante	elle est bien adaptée en Algérie

2. Rendements en huiles (Potentiel Génotypique)

La teneur en huile et le rendement par hectare sont les paramètres les plus importants à considérer pour une source du biodiesel et qui devraient être relativement élevées (25- 30 %). Les rendements en huile dépendent de trois facteurs à savoir le rendement en graine par hectare, la teneur en huile de la graine et l'efficacité de la méthode d'extraction. Le rendement en huile des cultures est toujours le facteur clé afin de pouvoir décider de la convenance de la matière première pour la production du biodiesel. Les rendements élevés en huile sont les plus désirables dans l'industrie du biodiesel afin de réduire les coûts de la production.

Les différentes espèces choisies présentent des rendements potentiels très importants comparativement aux espèces conventionnelles dont la plupart sont alimentaires telles que le soja, le tournesol et le colza avec un rendement en huile de 375, 655 et 1000 kg/ha respectivement (**Tab.5.32**) [28].

Le tourteau d'extraction est également un sous-produit important destiné à être valorisé sous forme de produit à haute valeur ajoutée pour la production des concentrés protéiques à utilisation humaine ou animale, ou pour la production fourragère pour l'alimentation du bétail. Une exploitation des résidus sous forme d'engrais vert peut également être envisagée pour améliorer la fertilité du sol du point de vue physique (la structure) et chimique (la richesse en éléments minéraux) tout en diminuant les intrants agricoles, ce qui contribue à la durabilité de la filière de production du biodiesel.

Tab.5.32: Les potentialités génétiques des espèces sélectionnées

Espèce	Rendement en graine (t/ha)	Teneur en huile (%)	Rendement en huile t/ha
<i>Prenus amygdalus</i> ,	3 [5]	40 à 45 (20% min) [17]	1.2 - 1.35
<i>Moringa oleifera</i> [9]	3-6	33 -41	0.99 - 1.23/1.98 -2.46
<i>Recinus communis</i>	5[77]	48 – 60 [100]	1.75 - 2.55
<i>Simmondsia chinensis</i> [5]	2.25	47- 62	0.97 - 1.26
<i>Brassica carinata</i> [104]	1 - 2.5	30 -38	0.30 - 0.75 / 0.38 -0.95
<i>Cynara cardanculus</i>	2 - 3[5]	25% en huile et 20 % en protéine [5]	0.5 - 0.75
<i>Nicotiana tabacum</i>	0.6 à 2.5 [33]	35 - 49 [109]	0.21 - 0.294/0.875 -1.225
<i>Jatropha curcas</i>	2 – 5 [93]	30 - 50 [44]	0.94 - 2.35
<i>Euphorbia lathyris</i> [116]	1.5 à 2.5	Jusqu'à 48	0.72 - 1.175
<i>Salicornia bigelovie</i>	1 a 3.5 tonne en graine + 10 tonne/ha de fourrage [5] [97]	22.4 [5]- 45[113]	0.224 - 0.784
<i>Leucaena leucocephala</i>	3 t + 75-95kg de fourrage /arbre/an [87]	22 [88] [89]	0.660
<i>Citrullus colocynthis</i>	6.7 [5]	26.6 [117] – 47 [5]	3.149

3. Caractéristiques du biodiesel élaboré à partir des différentes espèces ciblées.

Les propriétés les plus importantes du biodiesel sont conditionnées directement par la composition des esters d'AG et la présence de composants mineurs ou de contaminants. Les principales propriétés qui ont été prises en compte dans notre étude sont la densité, la viscosité cinématique, l'indice de cétane, le point d'éclair, le pouvoir calorifique et les caractéristiques à froid (PT, PEc, TLF).

3.1. Indice de cétane (CN)

L'indice de cétane est un indice qui traduit les propriétés d'auto-inflammation. C'est un indicateur primordial pour un carburant de qualité dans le domaine du moteur diesel. L'indice de cétane d'un carburant diesel est relié au délai d'auto-inflammation (ID, ignition delay) qui désigne en effet le laps de temps qui s'écoule entre le moment où les premières gouttes de gazole qui sortent de l'injecteur et l'instant d'initiation de la combustion. Plus l'ID est faible, meilleur est le CN et vice versa [17].

D'après le Tab.5.5 synthétique, les différentes espèces retenues présentent un indice de cétane qui est conforme aux normes en vigueur (EN14214, ASTM 6751) à l'exception du biodiesel de *Prenus amygdalus var amara* (44.6) qui est inférieur à la valeur fixée par les normes européenne et américaine. Comme on peut le remarquer, le biodiesel de *Moringa oleifera* et *Simmondsia chinensis* présentent des CN les plus élevés de 67 et 69 respectivement (Fig.5.4). Il est à noter que l'indice de cétane du biodiesel de la plupart des espèces sélectionnées est largement supérieur à ceux du petrodiesel qui va de 45 à 55 [44].

3.2. Caractéristiques à froid

L'un des problèmes majeurs associé à l'utilisation du biodiesel est son comportement à froid [17]. Ces caractéristiques sont souvent représentées par trois paramètres qui sont le point de trouble (ASTM D2500 or D5773), le point d'écoulement (ASTM D97 ou D5949) et la température limite de filtrabilité (ASTM D6371). Le Point de trouble (PT) est défini comme la température à partir de laquelle la cristallisation (cristaux de diamètre ≥ 0.5) devient visible à l'œil nu. A une température au-dessous du PT, les cristaux se fusionnent entr'eux aboutissant à une agglomération suffisamment dense pour bloquer l'écoulement du fluide (carburant). La plus faible température à partir de laquelle le fluide cesse de s'écouler dans des conditions spécifiées par la norme est définie comme le point d'écoulement. La

Température Limite de Filtrabilité est généralement considéré un indicateur plus crédible pour évaluer le comportement à froid que le PT ou PEc. [47]

Le Tab.5.5 synthétique montre clairement que le biodiesel élaboré à partir des différentes espèces ciblées présente un comportement à froid très convenable pour les deux paramètres de PT et PEc (Fig.5.5 et 5.6). Par exemple, le biodiesel de *R. communis* présente les meilleures performances avec des valeurs de -23°C et -45°C pour le PT et PEc respectivement ce qui le rend parfaitement convenable même pour les régions froides. En revanche celui de *Moringa oleifera*, qui présente un PT et un PEc trop élevés est plus indiqué dans les régions et les saisons chaudes.

3.3. Viscosité cinématique

La viscosité cinématique est la 1^{ère} raison pour laquelle le biodiesel est utilisé au lieu des huiles végétales ou des graisses animales [47]. Elle affecte l'atomisation (pulvérisation) du carburant durant l'injection dans la chambre de combustion. La viscosité du biodiesel est presque moitié moindre que celle de l'huile végétale. La viscosité cinématique (ν) fait partie des spécifications les plus importantes prévues par les normes du biodiesel (normes ASTM D445 ou ISO 3104) [17].

D'après le Tab.5.33 des espèces sélectionnées montrent des viscosités satisfaisantes et qui répondent aux normes internationales. Le biodiesel de l'espèce *C. colocynthis* montre un ν la plus faible avec une valeur de $3,83 \text{ mm}^2/\text{s}$ à 40°C . En revanche, les deux espèces *R. communis* et *S. chinensis* présentent des biodiesels dont le ν est largement supérieure aux normes (Fig.5.7). Ceci constitue un inconvénient majeur pour une utilisation à l'état pure mais comme cite ci-dessus pour le cas du biodiesel de *R. communis*, leur emploi en mélange (avec le petrodiesel peut constituer une viable solution viable (B10, B20 avec des ν de $4,54$ et $4,97 \text{ mm}^2/\text{s}$ respectivement).

3.4. Le point d'éclair et la densité

Un point d'éclair minimum pour le diesel doit être assuré dans le but d'une utilisation plus sécurisée. Le PE du biodiesel est largement plus élevé que celui du diesel (150°C compare à 70°C pour le diesel), ce qui le rend beaucoup plus sûr. Le biodiesel élaboré à partir des espèces sélectionnées montrent un PE largement satisfaisant selon les normes

internationales qui stipulent que le PE du biodiesel doit être supérieur à 120 (EN EN14214) et 130 °C (ASTM6751) voir la **Fig.5.8**.

D'après la **Fig.5.9**, la densité des différentes espèces sont conformes aux normes internationales (EN14214, ASTM 6751).

Tab.5.33: Caractéristiques du biodiesel élaboré à partir de différentes espèces comparativement aux normes internationales (EN14214, ASTM 6751)

Propriété	densité	viscosité	indice de cétane	point de trouble	point d'écoulement	point d'éclair
ESPECE						
<i>Jatropha curcas</i> [44]	879.4	4.34	58.40	-	3	135
<i>Cynara cardunculus</i> [47]	-	3.56	-	- 1	-3	175
<i>Moringa oleifera</i> [98]	-	4.83	67.00	18	17	-
<i>Recinus communis</i> [102]	926.8	15.98	50.00	- 23	- 45	190.7
<i>Brassica carinata</i> [104]	879	4.50	52.00	-	-	120
<i>Simmondsia chinensis</i> [108]	-	6.67	69.00	- 13	- 16	-
<i>Nicotiana tabacum</i> [109]	888.5	4.23	51.60	-	- 5	165.4
<i>Salicornia bigeloviae</i> [113]	-	5.00	53.90	- 4	-	150
<i>Euphorbia lathyris</i> [114]	876.1	4.64	59.60	-	- 11	181
<i>Citrullus colocynthis</i> [118]	883	3.83	53.66	0.5	-	142
<i>Prenus amygdalus</i> [122]	887	4.68	44.6	10	- 3	173
EN14214 [37]	900	5	51	-	-	120
ASTM6751 [37]	900	6	47	12	10	130

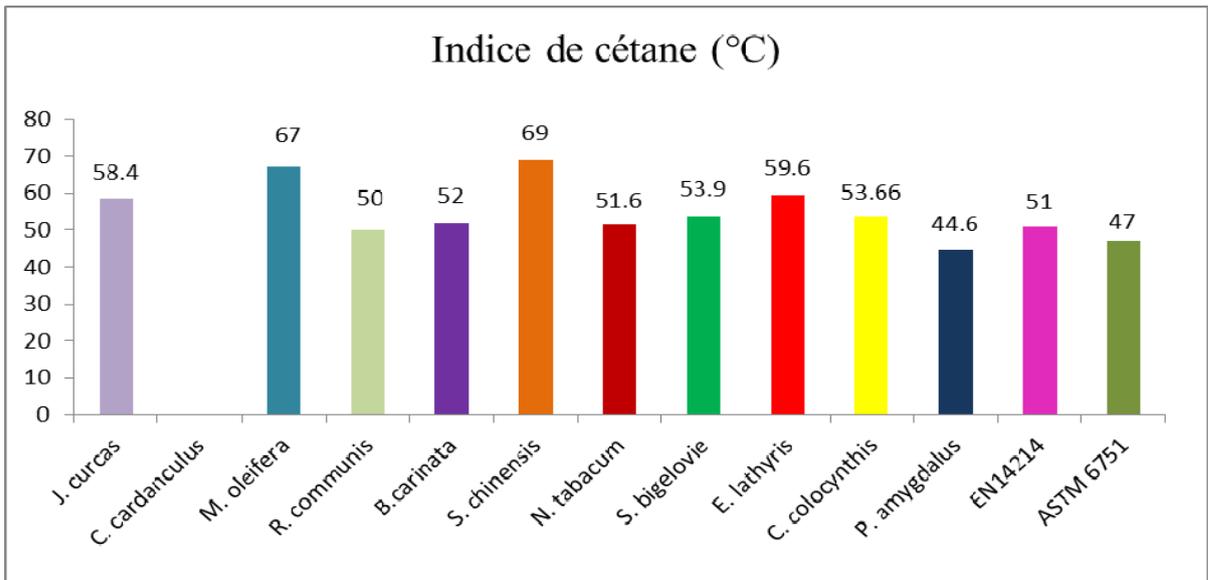


Fig.5.4: Indice de Cétane du biodiesel de différentes espèces.

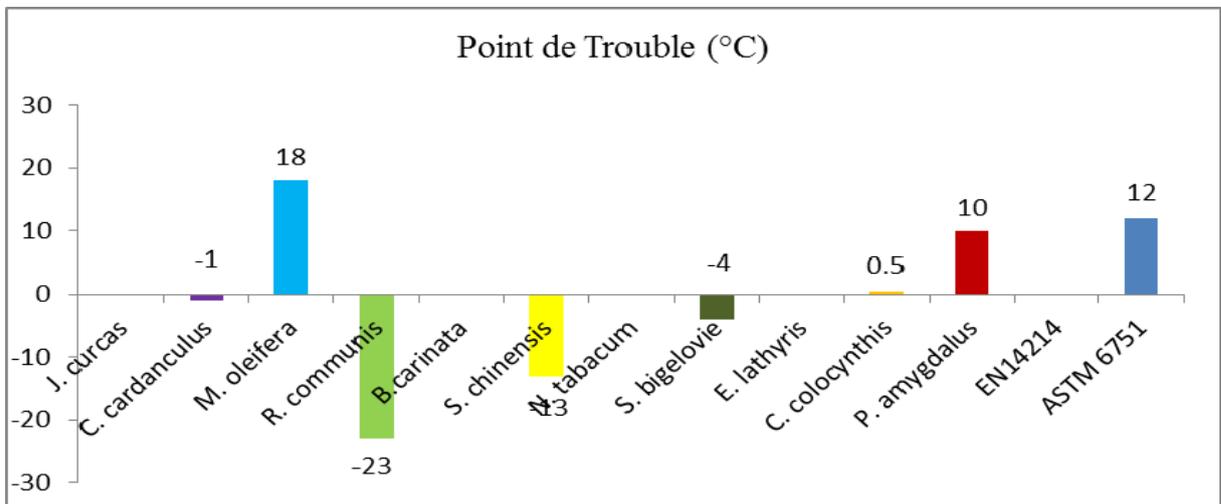


Fig.5.5: Point de trouble (PT) du biodiesel de différentes espèces.

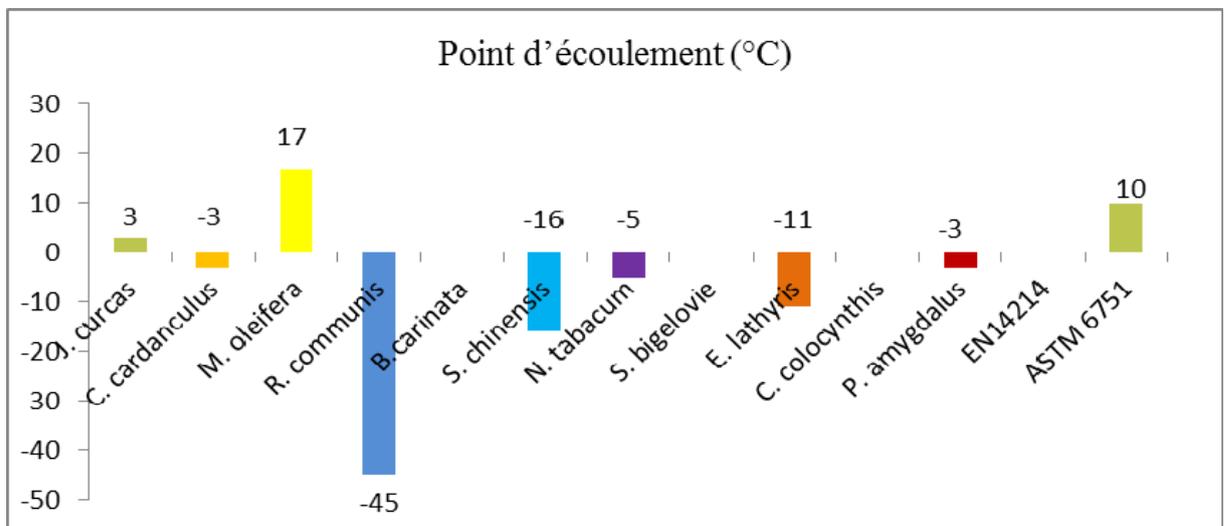


Fig.5.6: Point d'Écoulement (PEc) du biodiesel de différentes espèces.

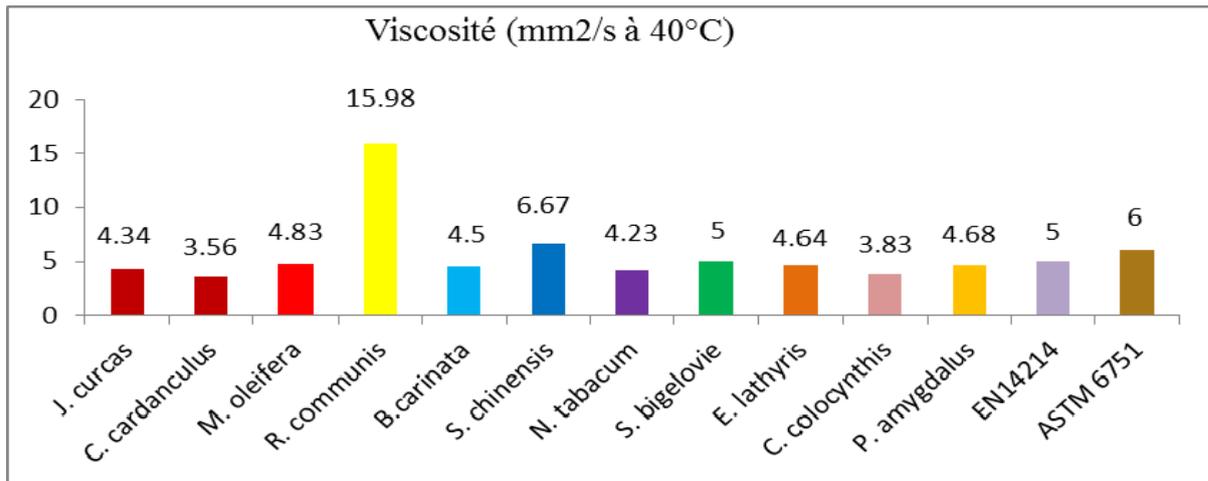


Fig.5.7: Viscosité cinématique du biodiesel de différentes espèces.

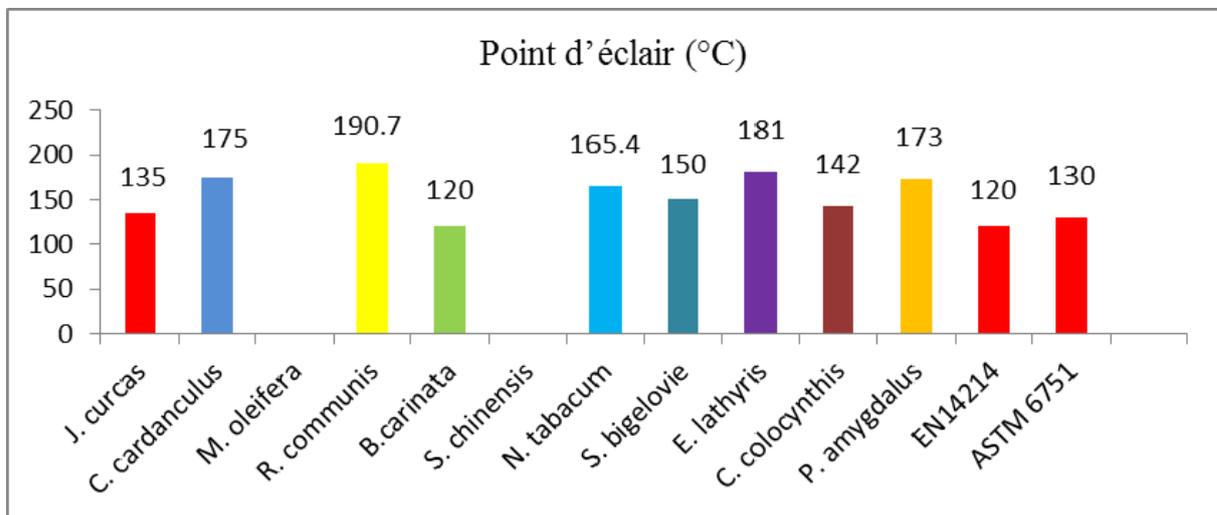


Fig.5.8: Le Point d'Eclair (PE) du biodiesel de différentes espèces

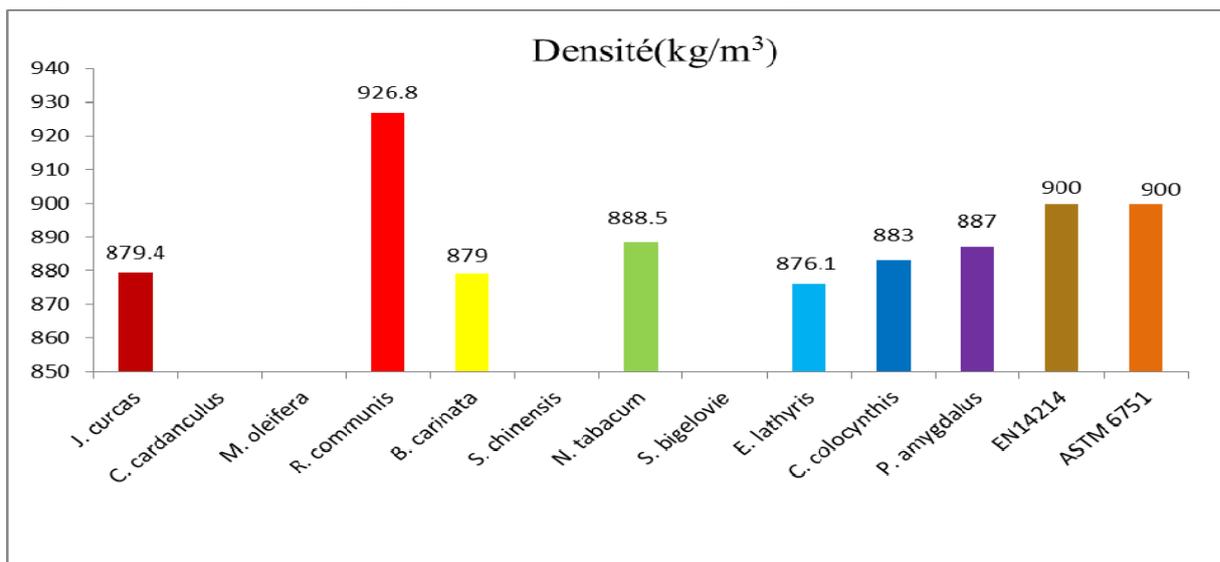


Fig.5.9: Densité du biodiesel de différentes espèces

Chapitre VI

Analyse du Cycle de Vie (ACV)

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 de *Moringa oleifera* 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.

1. Unité fonctionnelle et hypothèse retenue

La fonction de notre système est la production d'une biodiesel à partir de l'huile *Moringa oleifera* sous conditions non irriguées. L'unité fonctionnelle retenue est la tonne de biodiesel produite par hectare. D'après les données disponibles localement [56] ou dans la littérature [82] nous avons retenus les hypothèses suivantes :

1.1. Le choix de l'espèce

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

- Le *Moringa oleifera* est une espèce arboricole pérenne qui a le potentiel de produire des graines oléifères pour la production du biodiésel ;
- La plantation de cet arbre 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 (un indice de cétane de 67).

1.2. Les conditions de production (hypothèses adoptées)

- La production d'une tonne de biodiesel de *M. oleifera* par hectare (non irrigué) ;
- La culture de *M. oleifera* est conduite dans un système de production non irrigué ;
- Les travaux du sol et de plantation de *M. oleifera* sont non mécanisés ;
- La teneur de la graine en huile est de 33% ;
- La production de 1000 l de biodiesel nécessite **1000 L** de l'huile de *M. oleifera* et **100 L** de méthanol, d'où une production en graine de 3030 kg est nécessaire pour assurer d'avoir cette production.

2. Définition et modélisation du système de production

Dans le système de production, nous pouvons distinguer deux stades principaux. Le premier stade est la production de la matière première (huile de *Moringa oleifera*). Le second stade est la conversion de l'huile en biodiesel. La **fig.6.1** regroupe les différentes étapes et processus par fonction à partir du champ jusqu'à l'obtention du biodiesel.

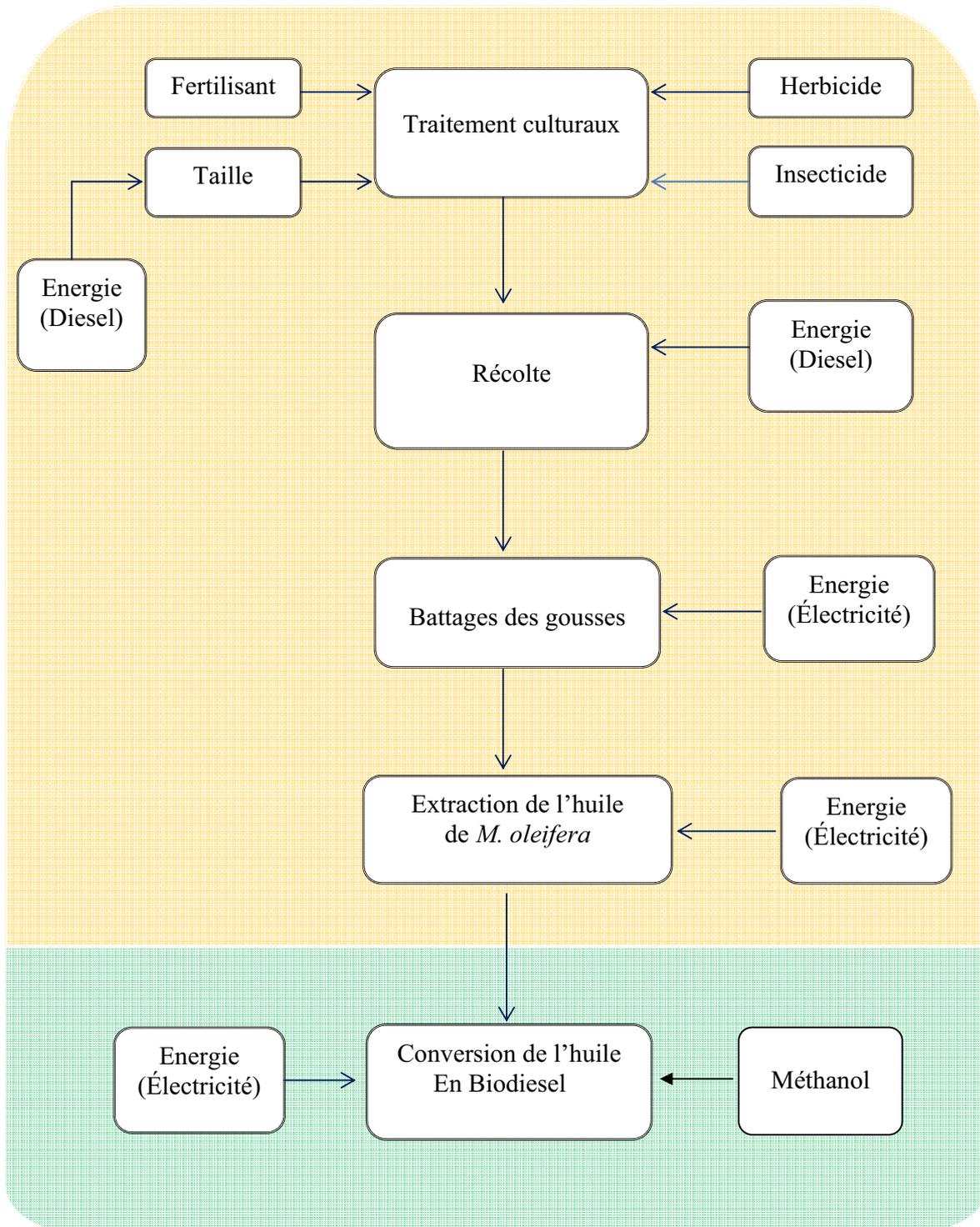


Fig. 6.1: Les différents processus de production du biodiesel de *Moringa oleifera*

3. Limites du système

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

- La chaîne d'approvisionnement énergétique, c'est-à-dire l'énergie dépensée pour mettre à disposition tous les agents énergétiques nécessaires à chaque étape du processus de production
- L'extraction, le transport et l'utilisation des matières premières intervenants dans les étapes de production du biodiesel.
En revanche
- Les infrastructures (occupation du sol et utilisation des matériaux de construction ainsi que leurs devenir après démolition des installations, par exemple mise en décharge et recyclage) bien que les énergies liées à la construction et au démantèlement des installations, ne sont pas prise en compte.

4. Inventaire

Il s'agit de quantifier les différents flux traversant le système au travers de l'inventaire. 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 (**Tab.6.1**) sont tirées de la littérature [82] 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.

Tab.6.1: Inventaire du cycle de vie de la production de 1000 L de biodiesel de *Moringa oleifera* conduite en sec.

Type d'input	Nomenclature	Unité	Quantité
Production de 3030 Kg de draine De <i>Moringa Oleifera</i>			
Chimique	herbicide	kg	2.66
	insecticide	kg	3.03
	fertilisant (NPK)	kg	75.00
Energie	récolte	L	90.00
	Battage	kWh	60.00
	extraction de l'huile	kWh	72.00
Transport	herbicide	tkm	0.266
	insecticide	tkm	0.303
	fertilisant	tkm	7.5
séquestration de CO2		kg	-15000
Conversion de 3030 kg de graine <i>Moringa Oleifera</i> en 1000 L de biodiesel			
Energie	conversion de l'huile en biodiesel	kWh	7.20
Transport	Méthanol	tkm	7.92
	Huile brute	tkm	88.3

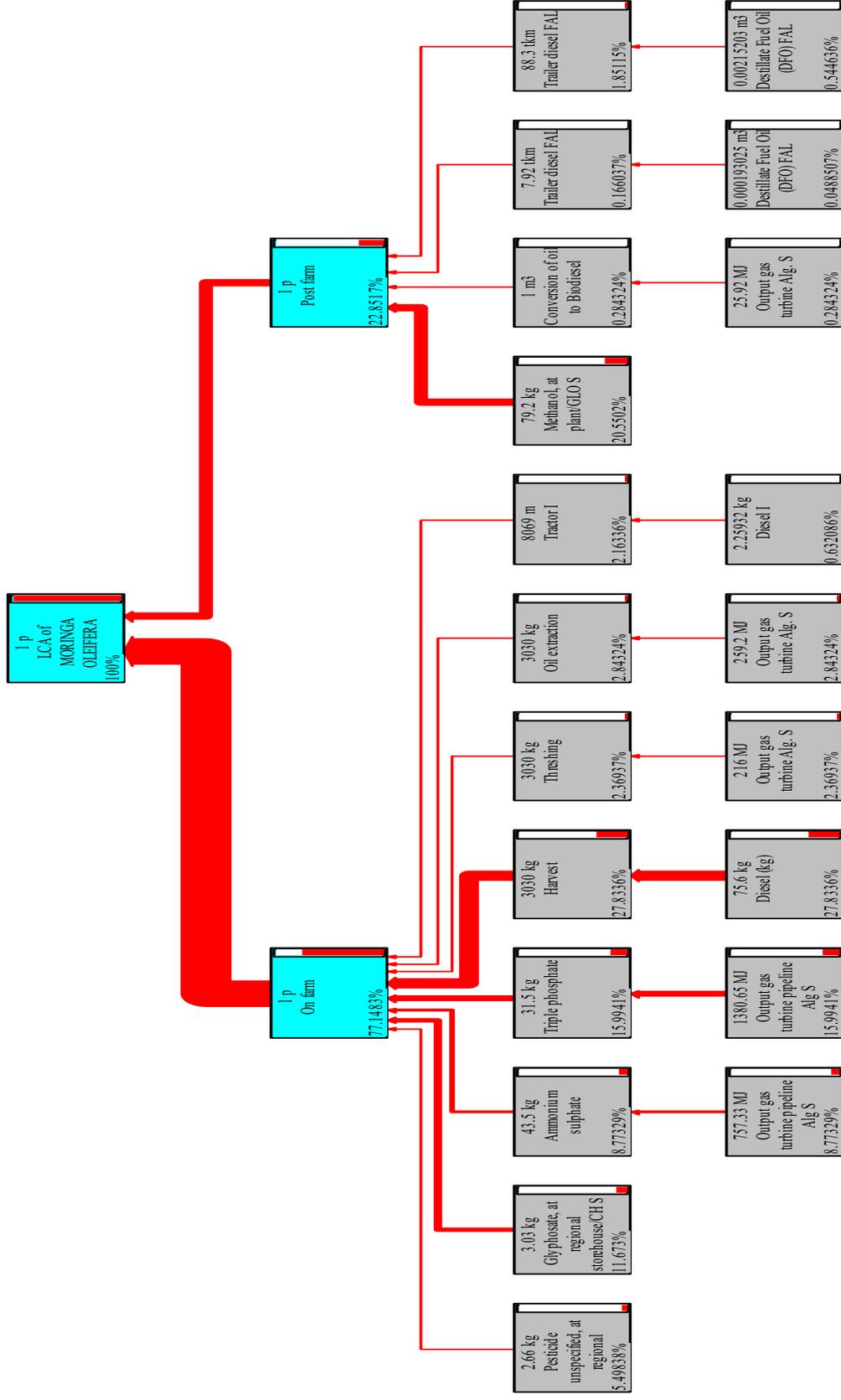


Fig. [29]: Arborescence de processus élémentaire simplifié pour l'analyse du cycle de vie du biodiesel de *Moringa oleifera*

5. Résultat et discussion

5.1. Bilan de CO₂ en kg CO₂eq

Une production de 1000 litres de biodiesel à partir des graines oléifères de *Moringa oleifera* conduite en sec, contribue à des émissions de CO₂ de 328 kg CO₂eq. Ces émissions sont dues aux intrants agricoles y compris les fertilisants, les herbicides et les pesticides ainsi que leur transport.

Le **Tab.6.2** nous montre que le facteur principal qui contribue aux scores de changement climatique (émission de CO₂) est l'étape de la production des graines de *Moringa oleifera* avec une contribution de 75.56 % contre 24.44 % pour la conversion de l'huile en biodiesel.

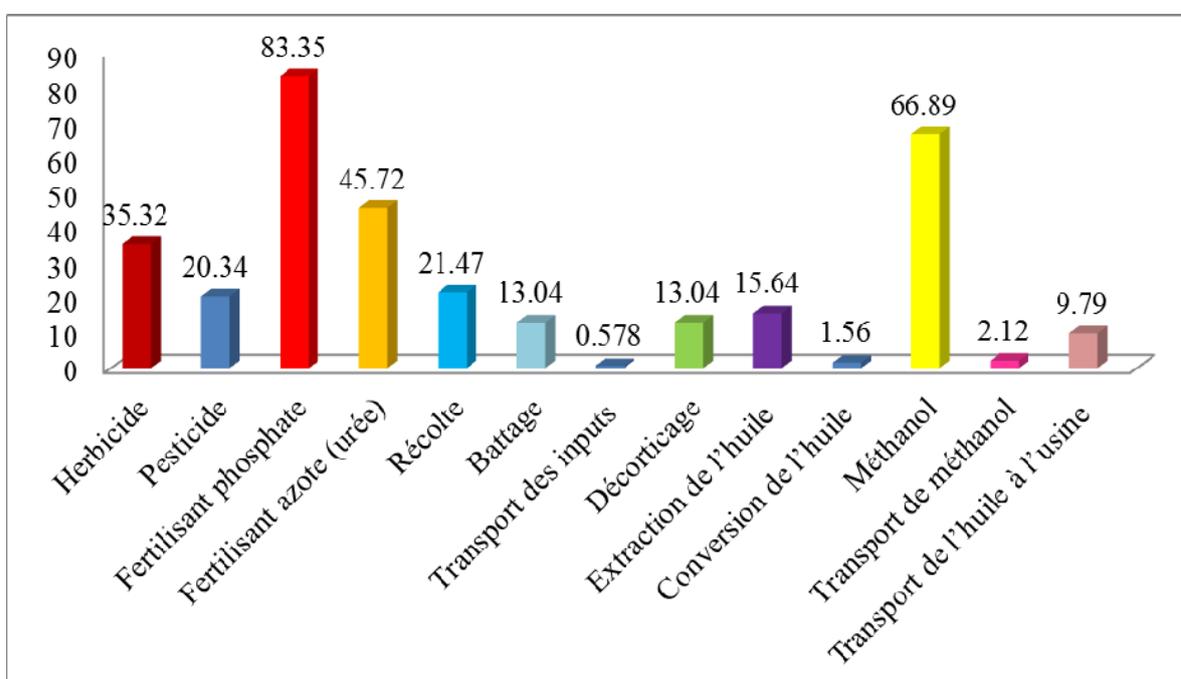
Le facteur fertilisant domine nettement les émissions en CO₂ durant l'étape de la production de graines de *Moringa oleifera* dont une contribution de 39.24 % en particulier les fertilisants phosphatés qui représentent les 25.34 % suivi du fertilisant azoté de 13.9%. Le second facteur est le désherbage qui contribue pour 10.74 % des émissions totales.

Egalement pour l'étape de la transformation de l'huile de *Moringa oleifera* en biodiesel, on peut clairement identifier le facteur qui représente une forte contribution au score de changement climatique dont une contribution de 20.33% des émissions totales de CO₂.

La séquestration de CO₂ par *Moringa oleifera* est de 15000kg /ha [82]. L'écobilan de l'impact sur le changement climatique due à la production de 1000 litres de biodiesel est de -14667 kg de CO₂ équivalents. Il s'agit donc d'un bilan CO₂ largement positif ce qui constitue un critère de durabilité satisfaisant.

Tab.6.2: les émissions en CO₂ en kg CO₂eq

Intrant	CO2 en kg eq	%
Production de graines de <i>Moringa oleifera</i>		
Herbicide	35.32	10.74
Pesticide	20.34	6.18
Fertilisant phosphate	83.35	25.34
Fertilisant azote (urée)	45.72	13.90
Récolte	21.47	6.53
Battage	13.04	3.96
Transport des inputs	0.578	0.175
Décorticage	13.04	3.96
Extraction de l'huile	15.64	4.75
Conversion de l'huile de <i>Moringa oleifera</i> en biodiesel		
Conversion de l'huile	1.56	0.47
Méthanol	66.89	20.33
Transport de méthanol	2.12	0.64
Transport de l'huile à l'usine	9.79	2.97
Total	328.91	-
Séquestration de CO ₂	-15000	-
Bilan	-14667.14	-

Fig.6.3: Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (kg CO₂eq)

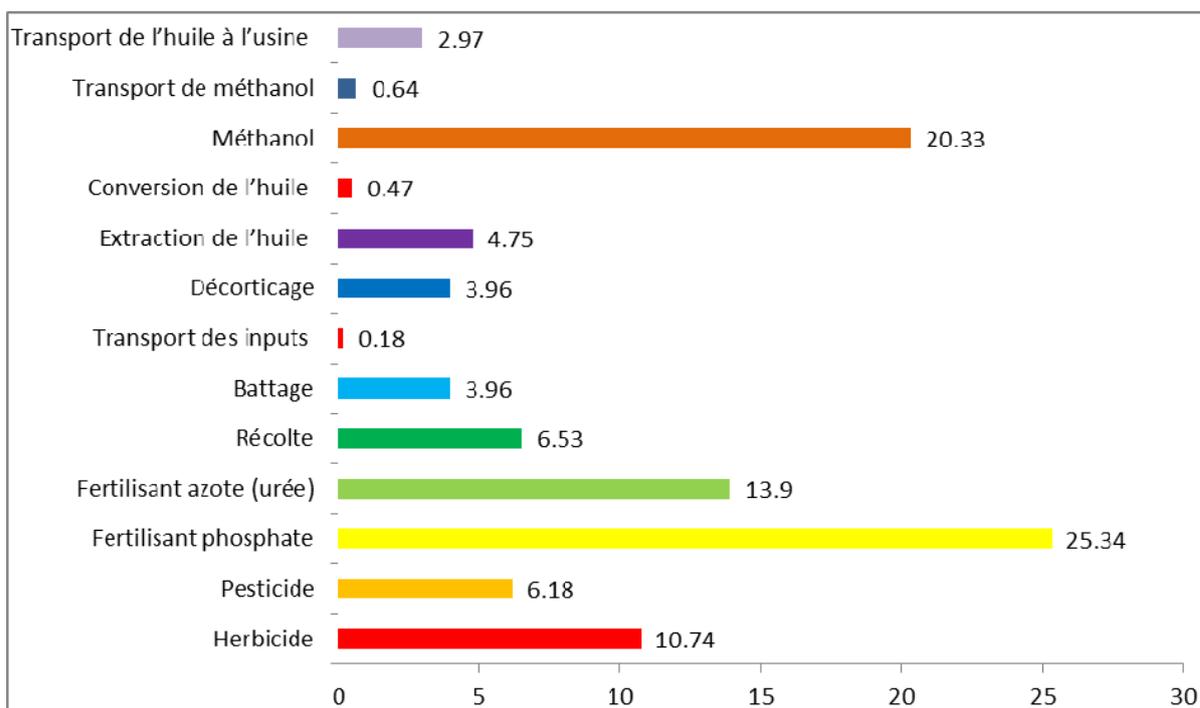


Fig.6.4: Contribution des processus élémentaires aux changements climatiques (%)

5.2. Bilan énergétique

Les résultats obtenus à l'issue de l'analyse du cycle de vie nous montrent les consommations en énergie fossile pour chaque étape aussi bien que pour chaque processus unitaire de la production du biodiesel. Les **fig.6.3** et **6.4** montrent que la consommation en énergie fossile se concentre durant la production de la matière première (huile végétale) avec une contribution de 66.12%. L'autre part de l'énergie fossile dépensée est consommée lors de la transformation de l'huile de *M. oleifera* en biodiesel avec un pourcentage voisin de 34 %.

L'utilité de l'analyse du cycle de vie réside principalement dans les détails qu'elle puisse fournir. On peut facilement remarquer que la consommation en énergie fossile est dominée essentiellement par la récolte mécanisée d'où une contribution de 3481.16 MJ/ ha, ce qui représente une contribution de 28.72 % de l'énergie totale consommée pour la production du biodiesel. Les fertilisants phosphates, les herbicides, les fertilisants azotés et les pesticides sont aussi des facteurs qui contribuent fortement à la consommation de l'énergie fossile avec respectivement 1384.65, 1025.73, 759.53 et 647.56 MJ/ha soit une contribution de 11.42, 8.46, 6.26 et 5.34% respectivement.

En ce qui concerne l'étape de transformation de l'huile en biodiesel, la dépense énergétique est dominée par le méthanol d'où une consommation de 3930.91 MJ/ha avec une contribution de 32.43% de l'énergie totale consommée.

La consommation énergétique d'origine fossile totale pour la production de 1000 litres de biodiesel est de 12118 MJ/ha. Le rendement énergétique par ha des cultures énergétiques pour le biodiesel est moins de 8% [71] par rapport à une Tep de pétrole. Si on suppose un rendement énergétique de 38000 MJ/ha, on aura un ratio (input/output) énergétique de 2.13 d'où un bilan énergétique supérieur à une unité.

Tab.6.3: Résultats du bilan énergétique (MJ)

Catégorie	Valeur (MJ)	%
Production de graines de <i>Moringa oleifera</i>		66.12
Herbicide	1025.73	8.46
Pesticide	647.56	5.34
Fertilisant phosphate	1384.65	11.42
Fertilisant azote (urée)	759.53	6.26
Récolte	3481.167	28.72
Battage	216.62	1.78
Transport des inputs	7.54	0.06
Décorticage	216.62	1.78
Extraction de l'huile	259.95	2.14
Conversion de l'huile de <i>Moringa oleifera</i> en biodiesel		33.98
Conversion de l'huile	25.99	0.21
Méthanol	3930.91	32.43
Transport de méthanol	28.83	0.23
Transport de l'huile à l'usine	132.77	1.09
Total	12117.92	-
Production énergétique	38000 MJ/ha	-
Bilan	25882.08	-
EROI	2.13	

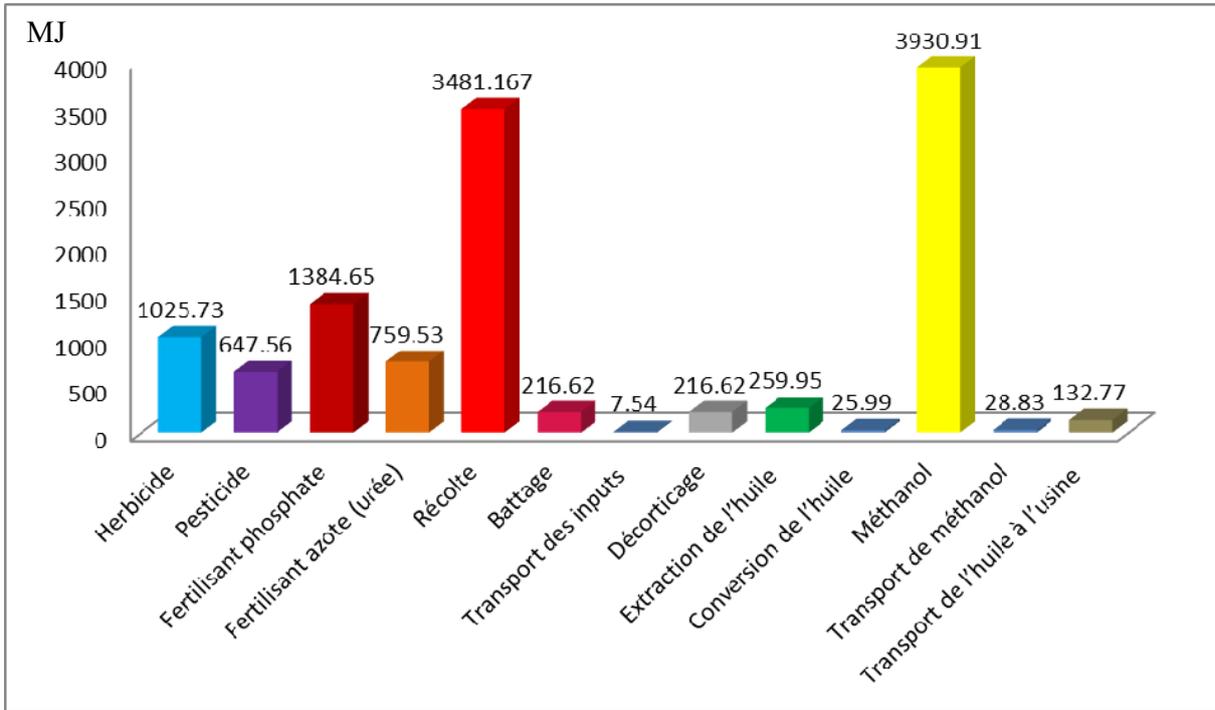


Fig. 6.3: Contribution des processus élémentaires au bilan énergétique (MJ)

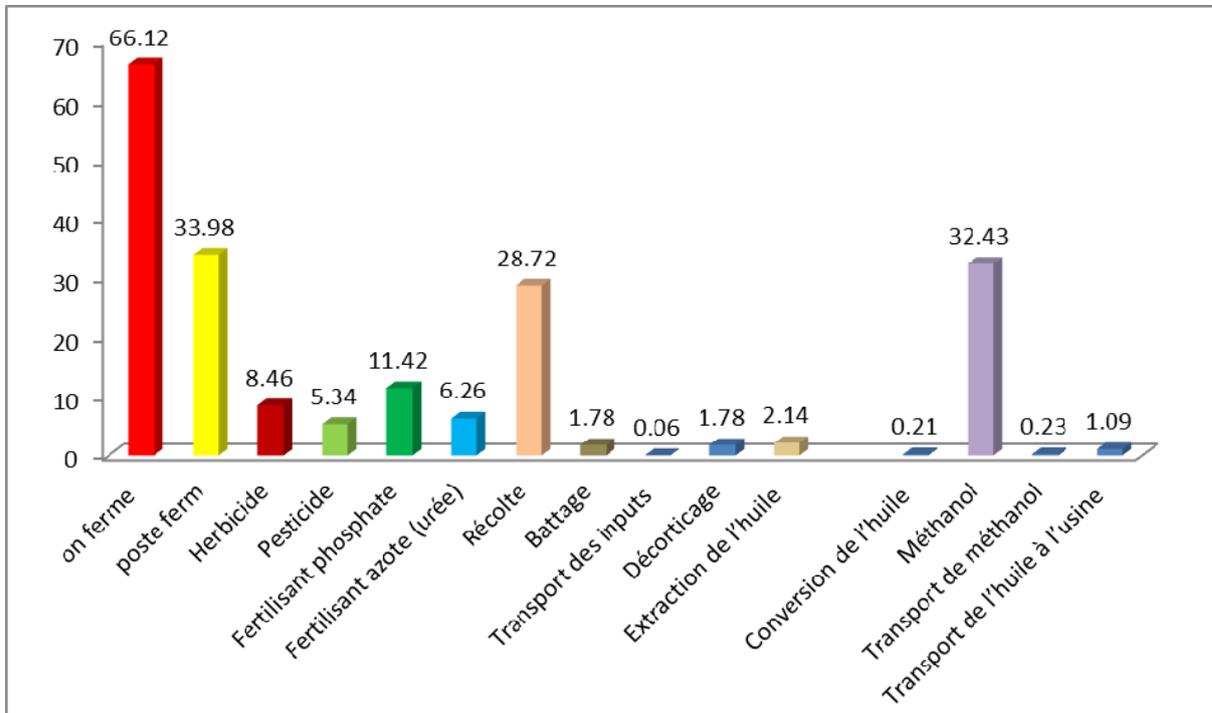


Fig.6.4: Contribution des processus élémentaire au bilan énergétique (%)

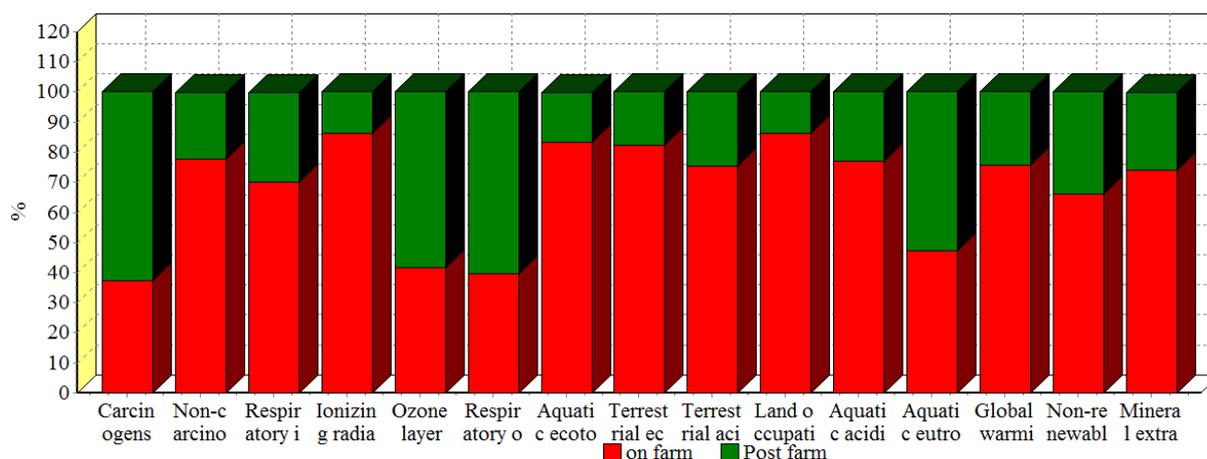
5.3. ETUDE D'IMPACT

5.3.1. Caractérisation intermédiaire

L'analyse de l'impact s'effectue au niveau intermédiaire. Seuls les résultats de 4 catégories sont présentés : la toxicité humaine, l'écotoxicité, le changement climatique et 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 *Moringa oleifera* aux scores de diverses catégories d'impact est donnée.

Tab.6.4: Caractérisation intermédiaire

Catégorie d'impact	unité	Biodiesel
Effet cancérigène	kg C ₂ H ₃ Cl eq	1.654
Effet Non-cancérigènes	kg C ₂ H ₃ Cl eq	0.829
Formation de photo-oxydants	kg PM2.5 eq	0.198
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	2.812E-5
Radiations ionisantes	Bq carbone-14	3914.393
Effet respiratoire	kg C ₂ H ₄ eq	0.101
Ecotoxicité Aquatique	kg TEG	19219.051
Ecotoxicité terrestre	kg TEG	3852.683
Acidification et eutrophisation terrestre	kg SO ₂ eq	5.831
Occupation des sols	m ² org.arable	0.611
Acidification Aquatique	kg SO ₂ eq	1.165
Eutrophication Aquatique	kg PO ₄	0.008
Changement climatique	kg CO ₂ eq	328.909
Energie primaire non renouvelable	MJ	12117.926
Extraction de minerais	MJ surplus	0.897



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

Fig.6.5: Contribution des étapes de Production pour les Différentes Catégories d'impact intermédiaires

5.3.2. Caractérisation des dommages

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

- Les impacts sur la santé humaine comprenant les effets cancérigènes et non cancérigènes, respiratoires, les radiations ionisantes et la destruction de la couche d'ozone stratosphérique.
- Les impacts sur la qualité des écosystèmes, regroupant les effets sur les écosystèmes terrestres (écotoxicité et acidification terrestres), sur les écosystèmes aquatiques (écotoxicité, acidification et eutrophisation aquatiques) et l'occupation des sols.
- Les impacts sur le changement climatique liés à l'effet de serre ;
- L'utilisation des ressources, regroupant les extractions de minerais et les énergies non renouvelables.

Le **Tab.6.4** montre les catégories d'impact environnemental dues à la production de 1000 litres de production de biodiesel de *Moringa oleifera*. On peut clairement remarquer d'après la **fig.6.5** et **6.6** que l'étape de la production de la matière première présente une contribution prédominante aux scores 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.

Santé humaine

On note que les principaux facteurs contribuant au score de cette catégorie dommage sont dominés par la consommation en énergie fossile avec une contribution indirecte due à l'utilisation du gaz naturel de 25.88 %, suivie de l'utilisation du diesel au niveau de la ferme avec un pourcentage de 18.88 %, puis de 17.37 %, 15.56 %, 12.14 % et 9.84 % pour l'utilisation de diesel pour le transport, d'herbicide, de méthanol et de pesticides respectivement (**Fig.6.7**).

Qualité des écosystèmes

On note que les principaux facteurs contribuant au score de cette catégorie de dommages sont représentés par la consommation en énergie fossile avec une contribution indirecte due à l'utilisation du gaz naturel de 47.69 %, suivie de l'utilisation du glyphosate comme herbicide au

niveau de la ferme avec une contribution de 18.53 %, puis de 15.86 %, 10.94 % pour l'utilisation du méthanol et de pesticide respectivement (**Fig.6.8**).

Changement climatique

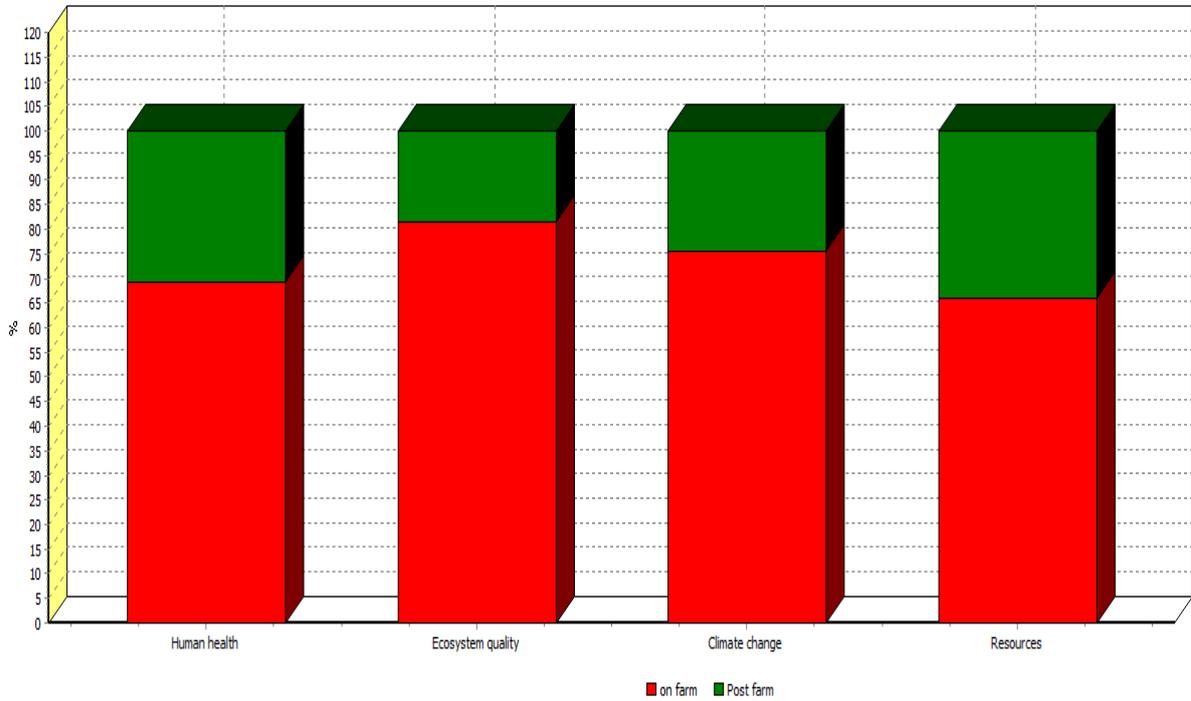
On note que les principaux facteurs contribuant au score de cette catégorie de dommage sont également dominés par la consommation en énergie fossile avec une contribution indirecte due à l'utilisation du gaz naturel de 52.40 %, suivi de l'utilisation du méthanol pour la conversion de l'huile en biodiesel avec un pourcentage de 20.33 %, puis 10.74%, 6.54% et 6.18 % pour l'utilisation d'herbicide, diesel et les pesticides respectivement (**Fig.6.9**).

Utilisation des ressources

On note que les principaux facteurs contribuant au score de cette catégorie dommage sont prédominés par l'utilisation du méthanol avec une contribution de 32.43 %, suivie de l'utilisation du diesel au niveau de la ferme avec un pourcentage de 28.78 %, ainsi que l'utilisation du gaz naturel comme un vecteur énergétique contribuant pour de 23.62 % au score de l'utilisation des ressources et 8.46% pour l'herbicide (**Fig.6.10**).

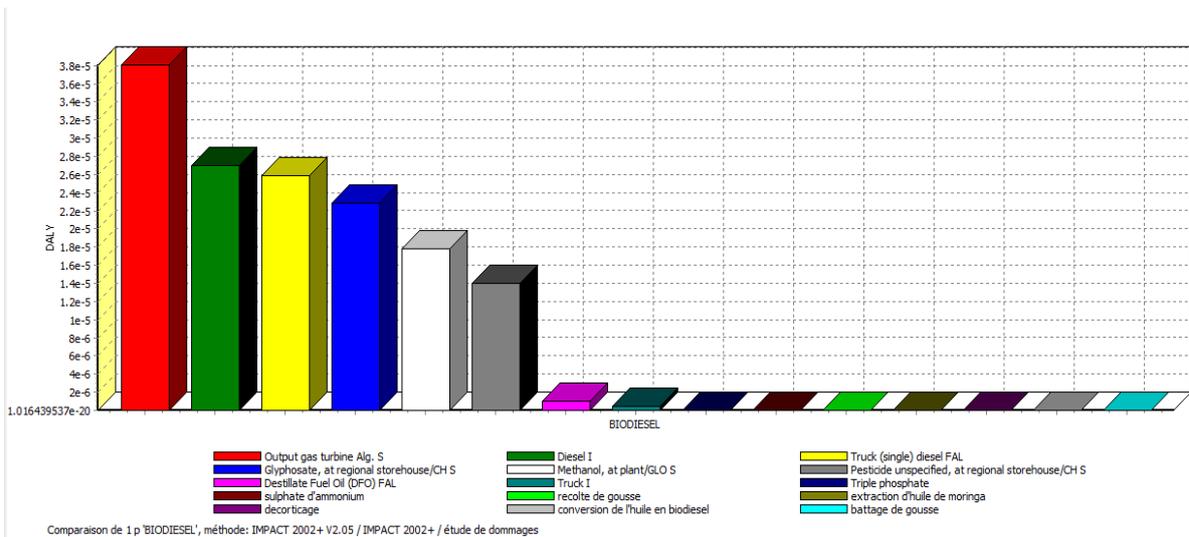
Tab.6.5: Etude de dommages

Catégorie d'impact	unité	Biodiesel
Effet cancérigène	DALY	4.631E-6
Effet Non-cancérigènes	DALY	2.323E-6
Formation de photo-oxydants	DALY	1.390 E-4
Destruction de la couche d'ozone	DALY	2.952E-8
Radiations ionisantes	DALY	8.220E-7
Effet respiratoire	DALY	2.159E-7
Ecotoxicité Aquatique	PDF*m2*yr	0.964
Ecotoxicité terrestre	PDF*m2*yr	30.474
Acidification et eutrophisation terrestre	PDF*m2*yr/	6.06512531
Occupation des sols	PDF*m2*yr/	0.6666695832
Acidification Aquatique	-	-
Eutrophication Aquatique	-	-
Changement climatique	kg CO ₂ eq	328.9099499
Energie primaire non renouvelable	MJ	12117.92628
Extraction de minerais	MJ surplus	0.8974999288



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

Fig.6.6: Contribution des étapes de production sur les différentes catégories de dommages



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

Fig.6.7: Contribution des différents intrants sur la santé humaine

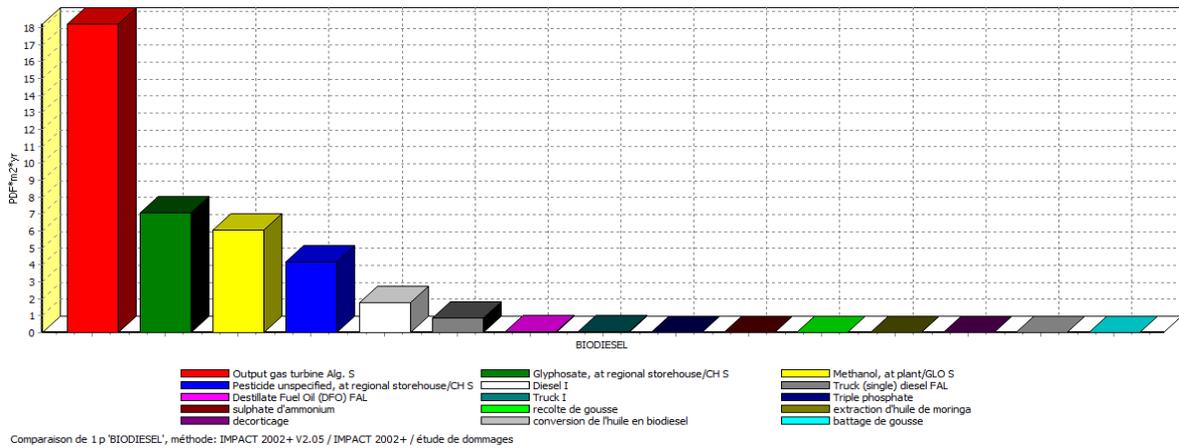


Fig. 6.8 : Contribution des différents intrants sur la qualité des écosystèmes

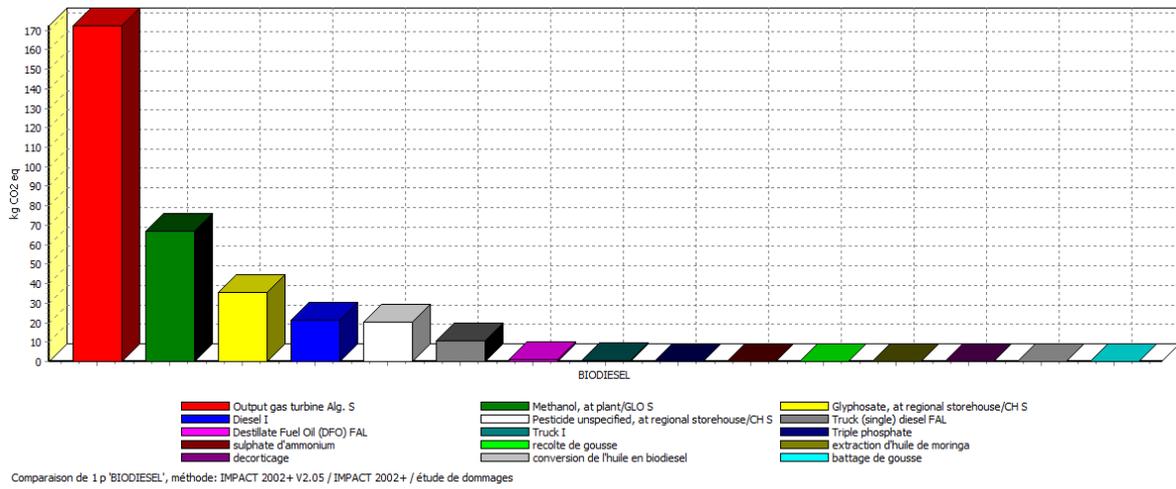


Fig. 6.9 : Contribution des différents intrants sur le changement climatique

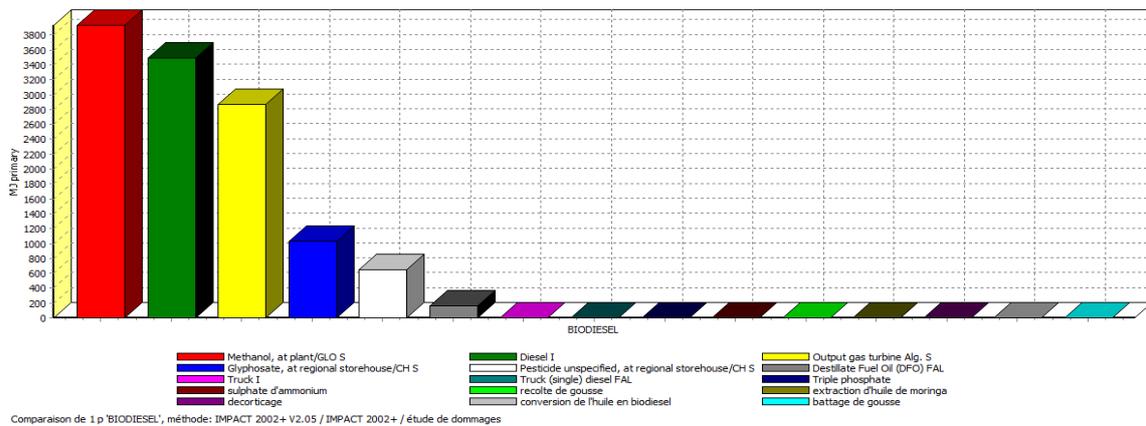


Fig. 6.10: contribution des différents intrants sur l'utilisation des ressources

Conclusion

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 de *Moringa oleifera* sous les conditions locales. Cette analyse nous a permis d'identifier les points faibles de notre système de production en considérant deux facteurs critiques à savoir le bilan du CO₂ et le bilan énergétique.

Une production de 1000 litres de biodiesel à partir des graines oléifères de *Moringa oleifera* conduite en sec, contribue à des émissions de CO₂ de 328 kg CO₂ eq. Sachant que la capacité de séquestration de CO₂ par *Moringa oleifera* est de 15000 kg /ha, L'écobilan de l'impact sur le changement climatique du à la production de 1000 litres de biodiesel est de - 14667 kg de CO₂ équivalent. Le bilan CO₂ est largement positif, ce qui est un critère de durabilité satisfait.

La consommation énergétique d'origine fossile totale pour la production de 1000 litres de biodiesel est de 12118 MJ/ha. On a obtenu un ratio énergétique (EROI) de 2.13 d'où un bilan énergétique supérieur à l'unité. Les principaux contributeurs à la consommation énergétique sont la mécanisation des opérations agricoles avec une contribution de 28.72 %, et l'utilisation du méthanol avec une contribution de 32.43 %.

L'étape de la production de la matière première présente une contribution prédominante aux scores de 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.

Ce sont là quelques remarques et conclusions relatives à l'analyse du cycle de vie pour la production de biodiesel à partir de *Moringa Oleifera*, qui signalons-le est une espèce qui a déjà été introduite dans notre pays. Il faut également souligner que cette approche d'analyse du cycle de vie est très précieuse en tant qu'outil de décision, lorsqu'il s'agit de comparer deux ou plusieurs filières de production différentes (procédés différents, matières premières différentes, etc.)

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude avait pour objectif central d'établir un inventaire des espèces végétales oléagineuses à fort potentiel en huile susceptible de représenter une source de matière première fiable, du point de vue quantitatif et qualitatif pour la production de biodiesel. Une analyse de cycle de vie a été réalisée dans le but d'évaluer les impacts éventuels sur l'environnement.

Le choix des espèces retenues a été réalisé selon trois types de critères à savoir les performances agro-écologiques, le potentiel génétique et les caractéristiques techniques du biodiesel élaboré à partir de ces espèces. Elles sont non alimentaires, ce qui est pour nous une condition principale pour la production du biodiesel qui permet ainsi d'éviter toute concurrence avec les sources oléagineuses alimentaires. Elles doivent être en outre susceptibles d'être développées sur des terres marginales dans la perspective d'améliorer leur fertilité de manière à ne pas utiliser des terres à vocation agricole.

La filière du biodiesel est constituée de deux étapes essentielles à savoir la production de la matière première et sa conversion en Biodiesel. D'après l'analyse du cycle de vie qui a été menée, le facteur principal qui contribue aux scores de changement climatique (émission de CO₂) est l'étape de la production des graines de *M. oleifera* avec une contribution de 75.56 % contre 24.44 % pour la conversion de l'huile en biodiesel et c'est le cas aussi pour le bilan énergétique avec une contribution de 66.12% et 34.00 % respectivement. Le bilan CO₂ est largement positif, et un bilan énergétique (EROI de 2.92), ce sont deux critères de durabilité largement satisfaits.

La contribution du biodiesel aussi minime soit-elle, 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 GES. Elle permettra ainsi d'assurer la sécurité énergétique en particulier dans les pays en voie de développement tout en favorisant un développement rural durable.

RECOMMENDATIONS

RECOMMANDATIONS

Pour envisager une filière durable de production du biodiesel en Algérie, de nombreux facteurs critiques devraient être pris en considération dans le but d'une exploitation meilleure des ressources naturelles disponibles et même d'y améliorer le potentiel. Et tout cela dans une approche intégrale basée sur le concept de développement durable en répondant aux objectifs socio-économique et environnementaux tout en satisfaisant les normes en vigueur afin d'obtenir un carburant de qualité, en assurant la conservation de la biodiversité par la diversification des ressources du Biodiesel et en veillant à l'efficacité du système de production confortée par une analyse complète du cycle de vie (de berceau au tombeau ou du puits à la roue). La durabilité du biodiesel devrait se focaliser sur l'établissement d'un modèle de production local intégré adossé à la disponibilité locale d'une ressource ainsi qu'à un réseau de distribution locale.

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, toute action entreprise pour améliorer la faisabilité et la durabilité de cette filière devrait être de s'assurer de la maîtrise du système cultural de production de la biomasse. Ces améliorations pourront porter sur les éléments suivants :

- 1- La sélection, l'adoption et le développement des cultures d'espèces arboricoles à hautes performances agronomiques (meilleure interaction du potentiel génétique et écologique) et qui pourront apporter une valeur ajoutée pour des applications conventionnelles et industrielles ;
- 2- La maîtrise des pratiques culturales tout en réduisant les apports externes à savoir les fertilisants, les pesticides, les herbicides et l'énergie fossile. Une substitution de ces apports est possible par l'exploitation des coproduits comme les tourteaux d'extraction toxiques inappropriés pour l'alimentation animale et les débris de la taille, l'utilisation des espèces fixatrice de l'azote, l'utilisation des métabolites secondaires produits en abondances par les espèces choisies comme des biopesticides. 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 en particulier l'eau et le maintien de la productivité des terres (fertilité) à long terme par l'entretien des propriétés physico-chimique et biologique du sol.
- 4- Le couplage d'un système de production alimentation-énergie est l'une de 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.

Ce sont là quelques recommandations à prendre en considération avant toute action de développement à grande échelle d'une filière de production de biocarburants dans notre pays. Nous suggérons par ailleurs de commencer par une opération pilote où toutes les données critiques seront évaluées et contrôlées : des rendements réels obtenus jusqu'à la qualité du produit fini. Une ferme pilote soutenue par l'Etat et éventuellement par un programme des nations unies pour le développement rural, pourrait être implantée dans une région compatible avec l'ensemble des exigences de cette filière.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]**Lucas Reijnders, Mark A.J. Huijbregts:** Biofuels for Road Transport, a Seed to Wheel Perspective. Springer (2009).
- [2]**Ayhan Demirbas:** Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy* 35 4661–4670 (2007).
- [3]**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.
- [4]**ASTM:** ASTM Standard specification for biodiesel fuel (B100) blend stock for distillate fuels. In: Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, Method D6751-08; (2008).
- [5]**N. El Bassam:** Handbook of Bioenergy Crops, A Complete Reference to Species, Development and Applications. By Earthscan (2010)
- [6]**Ashok Pandey:** Handbook of Plant-Based Biofuels. CRC Press Taylor & Francis Group (2009).
- [7]**Demirbas A. :** Biofuels, Securing the Planet’s Future Energy Needs.Springer (2009).
- [8]**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).
- [9]**Aninidita Karmakar a, Subrata Karmakar b, Souti Mukherjee:** Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource Technology* 101 7201–7210 (2010).
- [10]**Chisti Y.:** Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends Biotechnol* 26:126–131(2008).
- [11]**Lin Lin a, Zhou Cunshan, Saritporn Vittayapadung, Shen Xiangqian, Dong Mingdong:** Opportunities and challenges for biodiesel fuel. *Applied Energy* 88 1020–1031(2011).
- [12]**B.K. Barnwal, M.P. Sharma:** Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 9, 363–378(2005).
- [13]**OECD-FAO:** Challenges for Agricultural Research, OECD Publishing (2010).
- [14]**Laura Azócar & Gustavo Ciudad & Hermann J. Heipieper & Rodrigo Navia:** Biotechnological processes for biodiesel production using alternative oils. *Appl Microbiol Biotechnol* 88:621–636(2010).
- [15]**Sarin R, Sharma M, Sinharay S, Malhotra R** Jatropha–palm biodiesel blends: an optimum mix for Asia. *Fuel* (2007) 86:1365–1371
- [16]**M.P. Dorado:** An approach to the economics of two vegetable oil-based biofuels in Spain, *Renewable Energy* 31, 1231–1237, (2006).
- [17]**Ahindra Nag:** Biofuels Refining and Performance.by The McGraw-Hill Companies, Inc(2008)
- [18]**Mustafa Balat, Havva Balat:** Progress in biodiesel processing. *Applied Energy* 87 1815–1835(2010).
- [19]**El Bassam N.** Energy plant species: their use and impact on environment and development. UK: James & James Science Publishers (1998).

- [20] **Hary Sulisty** : Biodiesel Production from High Iodine Number Candlenut Oil. World Academy of Science, Engineering and Technology 48 (2008).
- [21] **Mustafa Balat**: Progress in biodiesel processing. Applied Energy 87 1815–1835(2010).
- [22] **Mustafa Balat**: Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work. Energy Conversion and Management 52 (2011) 1479–1492.
- [23] **Ma YL**: Microbial oils and its research advance. Chin JBioprocess Eng. 2006 (4):7–11
- [24] **Li et Wang**: Use food industry waste to produce microbial oil. Science and Technology of Food Industry 6:65–69(1997).
- [25] **John Chi-Wei Lan, Amy Tsui, Shaw S. Wan and Ho-Shing Wu**: Biochemical Engineering. by Nova Science Publishers, Inc. New York(2009).
- [26] **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).
- [27] **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)
- [28] **Eric Lichtfouse**: Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture. Springer Dordrecht Heidelberg London New York(2010).
- [29] **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).
- [30] **Qiang Li & Wei Du & Dehua Liu** : Perspectives of microbial oils for biodiesel production. Appl Microbiol Biotechnol 80:749–756(2008).
- [31] **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.
- [32] **C. Angerbauer , M. Siebenhofer , M. Mittelbach , G.M. Guebitz**: Conversion of sewage sludge into lipids by *Lipomyces starkeyi* for biodiesel production. Bioresource Technology 99 (2008) 3051–3056
- [33] **Geoffrey S. et A, Pablo** : Agricultural Wastes. by Nova Science Publishers, Inc(2009).
- [34] **Usta N.**: Use of tobacco seed oil methyl ester in a turbocharged indirect injection diesel engine, *Biomass and Bioenergy*, (2005)28, 77-86.
- [35] **Mustafa Balat, Havva Balat** : A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel: Energy Conversion and Management 49 (2008) 2727–2741
- [36] **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.
- [37] **Babu AK, D. Devaradjane**: Vegetable oils and their derivatives as fuels for CI engines—an overview. SAE 2003. 2003-01-0767.
- [38] **Mustafa Canakci** : The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks .Bioresource Technology 98 (2007) 183–190
- [39] **Gerhard Knothe, Jon Van Gerpen, Jürgen Krahl**: The Biodiesel Handbook. AOCS Press (2005)

- [40]**Kahraman Bozbas:** Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 542–552.
- [41]**Dwight Tomes, Prakash Lakshmanan, David Songstad:** Biofuels. Global Impact on Renewable Energy, Production, Agriculture, and Technological Advancements. Springer Science+ Business Media, LLC (2011).
- [42]**Luis F. Razon:** Alternative crops for biodiesel feedstock. *Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* (2009) 4, No. 056.
- [43]**Meng X, Yang J, Xu X, Zhang L, Nie QJ, Xian M. :** Biodiesel production from oleaginous microorganism. *Renew Energy* (2009); 34:1–5.
- [44]**Arjun B. Chhetri, Martin S. Tango, Suzanne M. Budge, K. Chris Watts, and M. Rafiqul Islam:** Non-Edible Plant Oils as New Sources for Biodiesel Production. *International Journal of Molecular Sciences* (2008) 9, 169-180.
- [45]**Johann Vollmann I Istvan Rajcan:** Oil Crops. Springer ScienceBusiness Media, LLC (2009).
- [46]**N. EL BASSAM:** C₃ and C₄ plant species as energy sources and their potential impact on environment and climate. *Renewable Energy* 15 (1998) 205-210.
- [47]**M.M. Gui, K.T. Lee, S. Bhatia:** Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock (2008)
- [48]**Umer Rashid, Farooq Anwar, Bryan R. Moser, and Gerhard Knothe:** *Moringa oleifera* oil: A possible source of biodiesel. *Bioresource Technology* 99 (2008) 8175–8179
- [49]**Ali Y, Hanna M.A:** Alternative diesel fuels from vegetable oils. *Bioresource Technol* (1994);50:153–63
- [25]**John Chi-Wei Lan, Amy Tsui, Shaw S. Wan and Ho-Shing Wu:** Biochemical Engineering. by Nova Science Publishers, Inc. New York, (2009).
- [50]**Alan H. Scragg:** Biofuels, Production, Application and Development. CAB International, 2009.
- [51]**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. *Bior esource Technology* 101 (2010) 5897–5902.
- [52]**Mascia P.N., Jürgen Scheffran, Jack M. Widholm:** 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).
- [53]**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)
- [54]**Cirad:** Guide technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales /Patrick Rousset, Coordonnateur. – Brasília :.288p (2008)
- [55]**K.G. Ramawat:** Desert Plants, Biology and Biotechnology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2010).
- [56] **ITAF :** Institut Technique d’ Arboriculture Fruitière, Tessela EL Merdja, Alger, (2011).
- [57]**DAVID M. MOUSDALE:** BIOFUELS, Biotechnology, Chemistry, and sustainable Development. CRC Press Taylor & Francis Group, (2008).
- [58]**Ulgiati, S.,:** A comprehensive energy and economic assessment of biofuels: when “green” is not enough. *Critical Reviews in Plant Sciences* 20 (1), 71–106 (2001)

- [59] **Alan H. Scragg** : Biofuels, Production, Application and Development.(2009) CAB International.
- [60] **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
- [61] **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.
- [62] **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](http://www.proquest.com) (publication number AAT 1452305; accessed March 13, 2009): p. 45-46.
- [63] **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.
- [64] **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).
- [65] **Rattan lal, B.A. stewart**: Soil quality and Biofuel production.CRC Press, Taylor & Francis group. (2010).
- [66] **M.H. Jayed , H.H. Masjuki, R. Saidur, M.A. Kalam, M.I. Jahirul**: Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 2452–2462.
- [67] **Ayhan Demirbas**: Importance of biodiesel as transportation fuel. Energy Policy 35 (2007) 4661–4670.
- [68] **Wilfred vermerris**: Genetic improve of bioenergy crops (2008).
- [69] **Ekko C. van Ierland, Alfons Oude Lansink**: Economics of Sustainable Energy in Agriculture, Kluwer Academic Publishers(2003).
- [70] **Balat M** : Current alternative engine fuels. Energy Sources (2005);27:569–77.
- [71] **Caye M. Drapcho, Nghiem Phu Nhuan, Terry H. Walker**: Biofuels Engineering Process Technology. by the McGraw-Hill Companies, Inc (2008).
- [72] **Walter Zegada-Lizarazu, Andrea Monti**: Energy crops in rotation. A review. Biomass and bioenergy 35 (2011) 12-2 5
- [73] **Jean-Claude K., Michel**: Advances in Botanical Research. 2009, Elsevier Ltd.
- [74] **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).
- [75] **FRANK D. GUNSTONE**: THE CHEMISTRY OF OILS AND FATS Sources, Composition, Properties and Uses. By Blackwell Publishing Ltd (2004).
- [76] **Lian Pin Koh, Jaboury Ghazoul**: Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities. Biological Conservation 141 (2008) 2450 –2460.
- [77] **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).
- [78] **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. Bior esource Technology 101 (2010) 5897–5902.

- [79] **Ashwani Kumar, Satyawati Sharma:** Potential non-edible oil resources as biodiesel feedstock: An Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1791–1800.
- [80] **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).
- [81] **Luisa Gouveia:** Microalgae as a Feedstock for Biofuels. Springer Heidelberg Dordrecht London New York (2011).
- [82] **Wahidul K. Biswas:** Life Cycle Assessment of Biodiesel Production from *Moringa Oleifera* Oilseeds. Centre of Excellence in Cleaner Production Curtin University of Technology. (2008) Email: w.biswas@curtin.edu.au, Internet: <http://www.c4cs.curtin.edu.au/>
- [83] **Olivier Jolliet, Myriam Saadé, Pierre Crettaz, Schanna Shaked:** Analyse du cycle de vie, comprendre et réaliser un écobilan. 2^e édition mise à jour et augmentée. Presses polytechniques et universitaires Romandes, (2010).
- [84] **Jeroen B. Guinée (final editor), Marieke Gorrée, Reinout Heijungs, Gjalt Huppes, René Kleijn, Arjan de Koning, Lauran van Oers, Anneke Wegener Sleeswijk, Sangwon Suh, Helias A. Udo de Haes :** Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS (2004).
- [85] **Jan C. J. Bart, Natale Palmeri and Stefano Cavallaro:** Biodiesel science and technology From soil to oil. Published by Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AH, UK (2010)
- [86] **N. P. Singh :** *leucena leucocephala* a promising forage plant. ICAR research complex for NEH region Tripura center, lembucherra – 799 210, Tripura (west) (2006).
- [87] URL : <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/data/pf000158.htm>
- [88] **Nighat afza, Mahboob ali kalhoro, Rashid alikhan and M. Aijazanwar :** Physicochemical and toxicological studies of different parts of *leucaena leucocephala*. *pakistan journal of pharmacology*. vol.24, no.2,(2007), pp.13-16
- [89] **J.A. ADENEYE:** note on the nutrient and mineral composition of *leucaena leucocephala* in western Nigeria. *Animal Feed Science and Technology*, 4, 221-225 Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam -- Printed in The Netherlands; (1979).
- [90] **T. Chandrasekhara rao, g. Lakshminarayana, rao, g. Azeemoddin, d. Atchyuta ramayya and s.d. Thirumala RAO:** Characteristics and Compositions of *Carissa spinarum*, *Leucaena leucocephala* and *Physalis minima* Seeds and Oils. *JAOCS*, Vol. 61, no. 9 (September 1984)
- [91] **Pant KS, Kumar D, Gairola S.** Seed oil content variation in *Jatropha curcas* L. in different altitudinal ranges and site conditions in H.P. India *Lyonia*; 11:31–34 (2006).
- [92] **Manian K, Gopalakrishnan S.** Physiological basis for ecological preference of *Eucalyptus globulus* Labill (blue gum) - II Growth and Oil production. *Indian Forester*.; 121:300–305 (1995) .
- [93] **Jean-Claude Kader, Michel Delseny:** Advances in BOTANICAL RESEARCH. Academic Press is an imprint of Elsevier 32 Jamestown Road, London NW17BY, UK. (2009)
- [94] **R.D. Misra, M.S. Murthy:** *Jatropha*-The future fuel of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 1350–1359 (2011).

- [95]**Jorgelina Cecilia Pasqualino** : Cynara Cardunculus As An Alternative Crop For Biodiesel Production. Department of chemical engineering Universitat Rovira i Virgili Tarragona - Spain - september (2006).
- [96]**Norman Borlaug et al.,:** Lost Crops of Africa: Volume II: Vegetables. National Academy Press (2006).
- [97]**Redouane Choukr-allah, Clive v. Malcolm, Atef Hamdy:** Halophytes AND Biosaline Agriculture. MARCEL DEKKER, INC (1996).
- [98]**UmerRashid, FarooqAnwar, Bryan R. Moser, Gerhard Knothe:** *Moringa oleifera* oil: A possible source of biodiesel. Bioresource Technology 99 (2008) 8175–8179.
- [99]**Jhosianna P.V. da Silva, Tatiana M. Serra, Marcelo Gossmann, Carlos R. Wolf, Mario R. Meneghetti, Simoni M.P. Meneghetti:** *Moringa oleifera* oil: Studies of characterization and biodiesel production. biomass and bioenergy 34:1527-1530 (2010)
- [100]**Johann Vollmann Istvan Rajcan:** Oil Crops. Springer ScienceBusiness Media, LLC (2009).
- [101]**Jan C. J. Bart, Natale Palmeri and Stefano Cavallaro:** Biodiesel science and technology. From soil to oil CRC Press Boca Raton Boston New York Washington, DC (2010).
- [102]**Flórez J.P. Nieto, N.A., Londoño, N.Y., Barajas,C.L:** Proceso Experimental de Producción y Operación del Biocombustible obtenido partir del Aceite de Ricino. Tesis. Universidad Francisco de Paula Santander (2004).
- [103]**Mohammed h. Chakrabarti and rafiq ahmad:** transesterification studies on castor oil as a first step towards its use in bio diesel production. *Pak. J. Bot.*, 40(3): 1153-1157 (2008).
- [104]**Massimo Cardone, Marco Mazzoncini,Stefano Menini,Vittorio Rocco, Adolfo Senatore, Maurizia Seggiani,Sandra Vitolo :** *Brassica carinata* as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterization. Biomass and Bioenergy 25, 623 – 636 (2003).
- [105]**Mohamad I. Al-Widyan a, Mu'taz A. Al-Muhtaseb:** Experimental investigation of Jojoba as a renewable energy source. Energy Conversion and Management 51, 1702–1707 (2010).
- [106]**Janice Emily Bowers:** Shrubs and Trees of the Southwest Deserts. By Southwest Parks and Monuments Association Tucson, Arizona 85701.ISBN 1-877856-34-7.Library of Congress Number 93-084560 (1993).
- [107]**Johnson, J. D. and Hinman, C. W.** Oil and rubber from arid land plants, *Science*, vol 208, pp460–464 (1980).
- [108]**Shailesh n. Shah & brajendra k. Sharma & bryan r. Moser & sevim z. Erhan:** Preparation and Evaluation of Jojoba Oil Methyl Esters as Biodiesel and as a Blend Component in Ultra-Low Sulfur Diesel Fuel. Bioenergy. Res. 3:214–223 (2010).
- [109]**Veljkovic V.B., S.H. Lakicevic, O.S. Stamenkovic, Z.B. Todorovic, M.L. Lazic,:** Biodiesel production from tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seed oilwith a high content of free fatty acids. Faculty of Technology, Bulevaroslobod-enja 124, 16000 Leskovac, Serbia and Montenegro (2006).
- [110]**N.Usta, B.Aydogan, A.H. Con, E. Uguzdogan, S.G. Ozkal:** Properties and quality verification of biodiesel produced from tobacco seed oil. Energy conversion and Management.522031.2039 (2011).

- [111]**P. Ozanda**: Flore du Sahara, Edition du Centre National de la Recherche Scientifique. Paris (1977).
- [112]**Rafael Martinez-Garcia**: Physiological Studies Of The Halophyte *Salicornia Bigelovii*: A Potential Food and Biofuel Crop for Integrated Aquaculture agriculture Systems. The University Of Arizona. Thèse de Doctorat (2010).
- [113]**Carl N. Hodges**: An Introduction to Integrated Seawater Agriculture Systems (ISAS): A Source of Sustainable Biofuels. 2nd International Symposium on Biofuels March 31, Delhi, India (2010).
- [114]**RuiWang, Milford A. Hanna, Wan-Wei Zhou, Pinaki S. Bhadury, Qi Chen, Bao-An Song, Song Yang a, 2010** : Production and selected fuel properties of biodiesel from promising non-edible oils: *Euphorbia lathyris L.*, *Sapiumsebiferum L.* and *Jatropha curcas L.* Bioresource Technology 102 1194–1199 (2011).
- [115]**Mohammad Arif, Zakwan Ahmed**: BIO·DIESEL: Jatropha Curcas (A PROMISING SOURCE). **SATISH SERIAL PUBLISHING HOUSE**. 403, Express Tower, Commercial Complex, Azadpur, Delhi-11 0033 India (2009).
- [116]**Melvin Calvin**: Hydrocarbons from Plants: Analytical Methods and Observations. Naturwissenschaften 67, 525-533. by Springer-Verlag (1980).
- [117]**Wajih N. Sawaya, Nuhad J. Dagher, and Jehangir K. Khalil**: *Citrullus colocynthis* Seeds as a Potential Source of Protein for Food and Feed. J. Agric. Food Chem., 34, 285-288(1986)
- [118]**Solomon Giwa, Luqman Chuah Abdullah and Nor Mariah Adam**: Investigating “Egusi” (*Citrullus Colocynthis L.*) Seed Oil as Potential Biodiesel Feedstock. *Energies*, 3, 607–618; doi: 10.3390/en3040607 (2010).
- [119]**R.S. Sain, P. Joshi&E.V. DivakaraSastry**,:Cytogenetic analysis of interspecific hybrids in genus *Citrullus*(Cucurbitaceae).*Agricultural Research Station (Rajasthan Agricultural University), Durgapura, Jaipur 302018, India* (2002).
- [120]**Tela Botanica** : Base de Données Nomenclaturale de la Flore de France par Benoît Bock BDNFF v4.02. <http://www.tela-botanica.org>
- [121]**Xia Li, Yongmei Huang, JiruiGong, XinshiZhang**: A study of the development of bio-energy resources and the status of eco-society in China Energy 35 (2010) 4451–4456.
- [122]**Mehdi Atapour, Hamid-Reza kariminia**: Characterization and transestérification of Iranian bitter almond oil for biodiesel production. Applied Energy (2011)
- [123]**ANRH** : Agence Nationale des Ressources hydriques (1993).
- [124]**ANAT**: Agence Nationale d’Aménagement de Territoire (2004).
- [125]**BENSLIMANE, M., A. Hamimed, W. El Zerey, A. Khaldi, K. Mederbal**: Analyse Et Suivi Du Phénomène De La Désertification En Algérie Du Nord. Laboratoire de recherche sur les systèmes biologiques et la géomatique, Centre universitaire de Mascara, B.P. 763, Mascara 29000(2008).