

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

Centre de Thiès

Département de Génie Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION EN
ELECTROMECHANIQUE**

THEME :

***PRODUCTION DE BIODIESEL À PARTIR DE L'HUILE
DE JATROPHA***

Directeur externe : Mr Sana FATY

Directeur interne : Mr Paul Demba

Co-directeur : Mr Salif GAYE

Auteur : Mactar DIOP

ESP ; juillet 2009

Remerciements

Louange à Dieu le tout puissant, le créateur des cieux et de la terre, qui a dit dans son livre : (Qui a inscrit l'homme au moyen du calame et lui a enseigné ce qu'il ignorait), et que Dieu accorde à notre prophète Mohammed sa grâce et sa paix, ainsi qu'à sa famille et ses compagnons.

Je remercie tous les membres de l'Ecole Polytechnique de Thiès à travers son Directeur **M. Ibrahima Kh. CISSE** et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à l'élaboration de ce document.

Ce projet ne saurait être mené sans le soutien de :

- **Monsieur Sana FATY:**

Directeur des biocarburants. Il a accepté de sacrifier un temps précieux pour notre encadrement malgré ses nombreuses charges au ministère. Je lui adresse mes sincères remerciements pour sa disponibilité et ses conseils.

- **Monsieur Salif GAYE :**

Chef de Département du Génie Electromécanique pour avoir accepté de participer à l'encadrement de ce projet. Sa contribution a été indispensable dans la correction.

- **Monsieur Paul DEMBA :**

Coordonnateur des Projets de Fin d'Etudes au Département GEM de l'EPT pour avoir accepté de participer à l'encadrement de ce mémoire.

- **Madame Gaye Adou THIAW :**

Professeur technique au laboratoire de génie sanitaire. Son soutien nous a été bénéfique à plus d'un titre lors des travaux de laboratoire.

- **Monsieur Alioune LY,**

Professeur technique au laboratoire d'hydraulique, son expérience a été indispensable ainsi que sa disponibilité pour le projet.

- **Mr Alassane DIENE**

Professeur à l'Ecole Polytechnique de Thiès. Il a été très disponible et n'a pas hésité à mettre son argent pour la réussite de ce travail.

Enfin, je remercie mes parents, mes amis et tous mes camarades de promotion pour leur soutien tout au long de mon parcours.

Dédicaces

Ce travail est dédié à tous ses futurs lecteurs qui auront à donner leurs remarques et suggestions dans le sens d'approfondir la réflexion et la recherche de solutions énergétiques alternatives.

Sommaire

Les huiles végétales sont des substances insolubles constituées en majeure partie d'esters de Glycérol d'acides *gras* appelés triglycérides.

Comme structure, un triglycéride est une molécule de glycérol connectée à trois (3) molécules d'une longue chaîne d'acides mono carboxyliques, appelés acides gras.

Ces molécules de triglycérides ont une chaîne carbonée beaucoup plus longue que celle d'un carburant diesel ordinaire.

Les huiles végétales et les graisses animales en réaction catalysée avec un alcool donnent un ester alkyle correspondant.

Cette réaction est connue sous le nom de transesterification.

Elle change complètement la composition chimique de l'huile qu'elle transforme en ester.

Au cours de cette réaction les huiles végétales réagissent avec des molécules de méthanol (ou d'éthanol) pour former des monoesters méthyliques (ou éthyliques) (Esters Méthyliques d'Huile Végétale : EMHV) et du glycérol. Ainsi les propriétés de l'huile sont changées, dès lors elle est comparable à un combustible diesel : c'est le biocarburant en question.

Les biodiesels sont caractérisés par plusieurs paramètres notamment la viscosité, la densité, l'indice de cétane, le point éclair, l'indice d'acidité, la composition en alcool, la masse molaire, la masse volumique, et les pouvoirs calorifiques.

La combustion de l'ester méthylique de l'huile de jatropha et l'influence des mélanges entre le biodiesel et le gasoil commercial sur le pouvoir calorifique inférieur ont aussi été étudiés.

Par contre la promotion de la culture des plantes oléagineuses pose un dilemme à savoir : « *Energie* » vs « *Sécurité alimentaire* », ce qui peut conduire à surclasser les productions alimentaires au profit de l'énergie et compromettre ainsi les politiques d'autosuffisance alimentaire qui revêtent une importance aussi capitale pour le Sénégal.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
DEDICACES.....	ii
SOMMAIRE.....	iii
TABLE DES MATIERES.....	iv
LISTE DES SYMBOLES ET ABBREVIATIONS.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES ANNEXES	x
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les huiles végétales	2
Introduction	3
I_1) Caractérisation des huiles végétales	4
I-1-a°) Définitions :	5
I-1-b°) Partie expérimentales	6
I-2) Particularités de l'huile de Jatropha [1].....	14
Conclusion.....	17
Chapitre II: Production de biodiesel à partir de l'huile de Jatropha	18
II-1 Historique [1]	19
II-2 Définitions :.....	20
a) Première famille	20
b) Deuxième famille.....	20
II-3) Les esters d'huiles végétales et de graisses.....	22
II-4) Historique sur la réaction de transesterification relatif aux huiles végétales.....	22
II-5) But de la réaction de transesterification.....	22
II-6) La réaction proprement dite	23
1) Cas des gaz à effet de serre	23
2) Indice de cétane.....	24
3) Indice d'octane	24
4) Miscibilité	24
5) Viscosité.....	24
II-8) Pourquoi raffiner les huiles végétales ?	24
1) Les acides gras libres	25
2) Les procédés industriels de raffinage des huiles végétales	25
II-9) Application de la réaction de transesterification à l'huile de jatropha.....	31
a) La composition chimique [9]	33
b) La masse molaire moyenne de l'huile de Jatropha	33
c) Quelques considérations sur le glycérol :.....	35
II-10) Etude expérimentales	37
a) Le matériel utilisé.....	38
b) Les proportions des réactifs	38
c) Opérations	38
d) Les caractéristiques cinétiques de la réaction	39
e) Effet de la stœchiométrie.....	40

f) Effet du temps de réaction	40
g) Effet de la température de réaction	40
h) Effet du catalyseur	40
i) La séparation des phases	41
j) Le rinçage de l'ester obtenu	41
Conclusion.....	41
II-11) Principe de production industrielle du biodiesel à partir de l'huile de jatropha	42
a) Accessoires industrielles [1]	42
b) La production industrielle du biodiesel.....	44
Conclusion.....	45
Chapitre III : Caractérisation du Biodiesel.....	46
Introduction	47
III- 1°) Caractéristiques physico-chimiques :.....	47
III-1-a°) Exemple de calcul de la masse molaire moyenne :.....	47
III_ 1- b°) Densité:	49
III-1- d°) Indice de cétane	53
III- 1- e°) Indice d'acidité.....	54
III-1- h°) La quantité de chaleur consommée par un litre d'ester méthylique	54
III_ 1- i°) Les pouvoirs calorifiques.....	54
Chapitre IV : Théorie sur la combustion de Biodiesel produit à partir de l'huile de Jatropha	62
Introduction	63
Richesse du mélange air-carburant	64
Identification des composés	65
IV_ 1°) Energie de Formation, loi de HESS [15, 16, 8]	65
IV- 2°) la combustion stœchiométrique	67
IV_ 3°) La combustion avec excès d'air : mélanges pauvres $\phi < 1$	68
IV- 4°) Combustion avec déficit d'air = Mélange riche : $\phi > 1$	70
IV_ 5) la combustion du gasoil :.....	76
IV_ 6) Variation de l'enthalpie de formation en fonction de la richesse :.....	80
IV-7) Interprétation	84
Chapitre V : Impact environnemental et socio-économique du Biodiesel produit à partir de l'huile de Jatropha	85
V- 1) Cas du biodiesel.....	86
V_ 2) le cas du gasoil (C ₁₅ H ₃₂).....	90
V_ 3) Etude comparative des émissions du gasoil et de l'ester :	94
V-4) Les mélanges de biodiesel	97
V-5) Réflexion socio-économique	99
Conclusion.....	101
Recommandations	101
 REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES.....	 102
 WEBLIOGRAPHIE.....	 103

LISTE DES SYMBOLES ET ABBREVIATIONS :

- B_α : mélange de gasoil et de biogasoil à α % en volume ;
 CN : indice de cétane (cetan number) ;
 CO : monoxyde de carbone ;
 CO₂ : dioxyde de carbone ;
 \bar{C}_p : chaleur spécifique à pression constantekJ/mol
 d : densité du composé ;
 Δh : variation d'enthalpie kJ/°C
 ΔH_f : chaleur de formationkJ/mol
 ΔH_R : chaleur de réactionkJ/mol
 E : erlenmeyer ;
 EMHV : Ester Méthylique d'Huiles Végétales ;
 E T B E : Ethyl tertio-Butyl Ether ;
 g : accélération de la pesanteur9,81 m/s²
 g/L : gramme par litre ;
 g/mole : gramme par mole ;
 GES : gaz à effet de serre ;
 H₂O : eau ;
 HC : hydrocarbures ;
 H₂SO₄ : acide sulfurique ;
 h : hauteurm
 I_a : indice d'acide.....mg KOH/g.
 I₂ : indice d'iode..... gI₂/100g
 I_{sap} : indice de saponification..... mg
 KOH/g.
 ICl : chlorure d'iode ;
 ISO: International Organization for Standardization;
 KOH : hydroxyde de potassium ;
 K : capacité d'adsorption ;
 kJ/mol : kilojoule par mole ;
 kJ/g : kilojoule par gramme ;

l : longueur	m
m : masse	g
m_H : masse d'hydrogène dans un composé	g
mm^2/s : millimètre carré par seconde ;	
\bar{M} : masse molaire moyenne d'un mélange	g/mol
M : masse molaire d'un composé.....	g/mol.
n : nombre de moles	moles
N_2 : diazote ;	
NO_x : oxydes d'azote ;	
$NaOH$: hydroxyde de sodium;	
p : pression	Pa
P [mm de Hg] : pression atmosphérique à laquelle s'effectue les essais.....	[mm de Hg]
PCS : pouvoir calorifique supérieur	kJ/kg
PCI : pouvoir calorifique inférieur	kJ/kg
$\% A_{\text{alcool libre}}$: pourcentage d'alcool libre	%
Q : quantité de chaleur	kJ
r : rayon	m
r' : taux d'accroissement de la température	%
$Na_2S_2O_3$: thiosulfate de sodium;	
T : température	°C
T_c : valeur corrigée de la température.....	°C
T_e : valeur de la température mesurée avec l'appareil.....	°C
t : temps	mn
''' : tierces ;	
V : volume	m^3
W_h : pourcentage d'hydrogène dans un mélange	%
$W/m.K$: watt par mètre et par kelvin ;	
W/L : watt par litre ;	
w_h : pourcentage d'hydrogène dans un mélange	%
$g/CV.h$: gramme par chevaux vapeurs par heure	
α (%) : pourcentage de biogasoil	%
$\beta, k, \gamma, \alpha, \psi$: constantes ;	
ϕ : richesse d'un mélange air-carburant ;	

ρ : masse volumiquem³/kg
 μ : viscosité cinématiquemm²/s

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : acides gras contenus dans les diverses huiles comestibles.....	04
Tableau I.2 : Temps d'écoulement de l'eau à 25°C	08
Tableau I.3 : Temps d'écoulement de l'acide acétique à 25°C	08
Tableau I.4 : Temps d'écoulement de l'huile Hourour à 25°C.....	08
Tableau I.5 : Temps d'écoulement de l'huile None à 25°C.....	08
Tableau I.6 : densité de l'huile Hourour à 25°C	08
Tableau I.7 : viscosité et densité de l'huile de jatropha.....	09
Tableau II.1 : les composés éliminés durant le raffinage.....	30
Tableau II.2 : caractéristiques physiques du glycérol.....	36
Tableau II.3 : les quantités des différents réactifs.....	38
Tableau III.1 résultat de la mesure de la masse volumique.....	49
Tableau III.2 : Viscosité et densité de l'ester méthylique de Jatropha.....	49
Tableau III.3 : viscosité et densité du gazole.....	49
Tableaux III.4 : Relevés de mesures de températures et calcul de ΔT pour l'acide benzoïque :.....	59
Tableaux III.5 : Relevés de mesures de températures et calcul de ΔT pour le B100.....	60
Tableaux III.6 : Relevés de mesures de températures et calcul de ΔT pour le B20.....	61
Tableau IV.1 valeurs des énergies de liaison :.....	65
Tableau IV.2 caractéristiques du gasoil :.....	76
Tableau IV.3 : synthèse de la théorie de la combustion :.....	79
Tableaux IV.4 : évolution des enthalpies standards de formation en fonction de la richesse.....	80
Tableaux IV.5 : récapitulatif des caractéristiques.....	84
Tableaux V.1 : les différentes étapes de l'exploitation.....	86
Tableaux V.2 : valeurs des masses de CO et CO ₂ formées par gramme d'ester méthylique d'huile de Jatropha :.....	87
Tableaux V.3 : émission de NO _x	89
Tableaux V.4 : valeurs des masses de CO et CO ₂ formées par gramme de gasoil	90
Tableaux V.5 : émission d'azote.....	92

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : structure générale d'une huile végétale.....	03
Figure I.2 :schéma de la manipulation dans la détermination de la viscosité.....	06
Figure I.3 : densité de l'huile de jatropha en fonction de la température	09
Figure I.4 : viscosité de l'huile de jatropha en fonction de la température.....	10
Figure I.5 : possibilités d'utilisation du jatropha.....	16
Figure II.1 : les filières des biocarburants.....	21
Figure II.2 : les étapes de la transformation des huiles	21
Figure II.3 : les différentes étapes du raffinage.....	26
Figure II.4 : la réaction catalysée de transesterification de l'huile de jatropha [1].....	32
Figure II.5 : composition des produits lors de la réaction de transesterification.....	39
Figure II.6 : la séparation entre l'ester et le glycérol après réaction.....	41
Figure II.7 : principe de production du biodiesel.....	43
Figure II.8 : principe de séparation des esters et du glycérol de l'huile de jatropha.....	45
Figure III.1 : densité de l'ester méthylique de l'huile de jatropha en fonction de la température.....	50
Figure III.2 : densité du gazole en fonction de la température.....	50
Figure III.3 : viscosité de l'ester méthylique de l'huile de jatropha en fonction de la température.....	51
Figure III.4 : viscosité du gazole en fonction de la température.....	51
Figure III.5 : densités des divers carburants en fonction de la température.....	52
Figure III.6 : viscosité des divers carburants en fonction de la température.....	52
Figure III.7 : Courbe de relevés calorimétriques : exemple de l'acide benzoïque.....	57
Figure V.1 : évolution de l'enthalpie standard de formation de l'ester méthylique d'huile de jatropha	81
Figure IV.2 : évolution de l'enthalpie standard de formation du gasoil :.....	82
Figure IV.3 : comparaison des enthalpies standards de formation en fonction de la richesse.....	83
Figure V.1 : variation des masses de CO ₂ formés en fonction de la richesse.....	88
Figure V.2 : variation des masses de CO formés en fonction de la richesse.....	88
Figure V.3 : variation de la masse d'azote formé par gramme d'ester méthylique d'huile de jatropha en fonction de la richesse.....	89

Figure V.4 : variation des masses de CO et CO ₂ formés en fonction de la richesse pour le gasoil.....	91
Figure V.5 : variation de la masse d'azote formé par gramme de gasoil.....	93
Figure V.6 : comparaison des quantités de CO et CO ₂ formées pour le gasoil et l'ester méthylique d'huile de jatropha en fonction de la richesse :.....	94
Figure V.7 : comparaison des quantités d'azote formés par gramme de substance brûlée.....	95
Figure V.8 comparaison des quantités de CO formés par gramme de substance brûlée.....	96
Figure V.9 : taux d'échange des émissions.....	99

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : tables techniques

Annexe B : propriétés des acides

Annexe C : standard pour le biodiesel

Annexe D : propriétés et enjeux du biodiesel

Introduction générale

Le coût de plus en plus élevé des hydrocarbures d'origine fossile et la perspective d'un épuisement programmé de cette source énergétique naturelle non renouvelable, couplé au phénomène des changements climatiques imputables aux émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, ont amené les états à réfléchir au développement de nouvelles sources d'énergie écologiquement propre et économiquement rentable.

Parmi ces sources d'énergie renouvelables, les bioénergies en général et les biocarburants en particulier sont celles qui attirent l'attention des responsables politiques en raison du niveau de consommation particulièrement élevé des produits pétroliers.

De ce fait, la maîtrise de l'énergie, le développement des énergies renouvelables et plus particulièrement les bioénergies et, enfin, le renforcement de la recherche dans le domaine des nouvelles technologies énergétiques sont devenus des sujets centraux dans les stratégies de développement des nations et de la communauté internationale.

Notre pays caractérisé par une situation énergétique dépendante des carburants fossiles, n'est pas resté en dehors de cette prise de conscience. Une bonne partie de sa consommation pétrolière est importée de sorte que sa facture énergétique pèse lourdement sur ses équilibres économiques et financiers.

Il s'agit donc bien là d'une situation qu'il est absolument nécessaire de redresser.

Pour contribuer à la recherche de solutions alternatives, nous avons choisi dans le cadre de notre travail de nous intéresser à un maillon de la chaîne de production du biocarburant à savoir la production de biodiesel à partir de l'huile de jatropha, un oléagineux qui se démarque et s'impose facilement à cause de ses propriétés qui seront détaillées dans la suite.

Notre travail sera axé d'abord sur la production du biodiesel puis sur la détermination et l'étude de quelques caractéristiques physico-chimiques et de combustion de ce carburant.

L'utilisation de ce comestible dans un moteur diesel à injection directe nous permettra d'en situer les limites.

Quant à la production du biodiesel, elle sera effectuée par une méthode de conversion chimique en l'occurrence la transesterification qui sera développée plus loin dans la suite.

Chapitre I : Généralité sur les huiles végétales

Introduction

Les huiles végétales sont des substances insolubles dans les solvants minéraux constituées en majeure partie d'esters de glycérol d'acides gras appelés triglycérides.

Du point de vue structural, un triglycéride est une molécule de glycérol connectée à trois (3) molécules d'acides monocarboxyliques, à longue chaîne hydrocarbonée appelés acides gras.

Contrairement aux hydrocarbures constitués exclusivement d'hydrogène et de carbone, les molécules d'une huile végétale contiennent de l'oxygène et ont la structure chimique suivante :

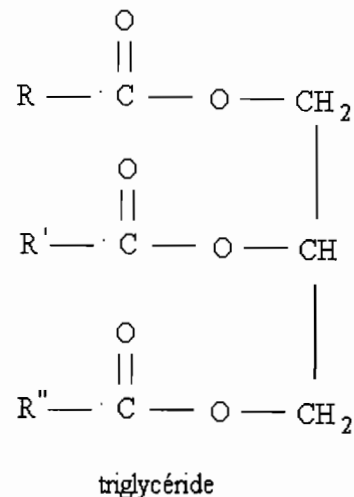


Figure I-1 : structure générale d'une huile végétale

R', R'' et R désignent des chaînes d'acides gras et différents en longueur et en nombre de doubles liaisons (voir annexe B : tableau B1).

L'une des méthodes les plus fréquemment utilisées pour l'extraction de ces huiles est la pression à froid et filtration de graines oléagineuses (colza, tournesol, palme, soja, arachide, jatropha) ou d'algues.

L'huile végétale brute peut être utilisée directement comme combustibles dans des moteurs à cycle de consommation court (engins agricoles, groupes électrogènes etc.).

Par contre son usage dans d'autres types de moteurs nécessite sa transformation préalable en raison de sa viscosité élevée qui constitue un facteur bloquant.

Parmi ces huiles on peut citer :

- Les huiles de type palmitique qui possèdent plus de 25% d'acide palmitique : ce sont généralement des huiles semi-concrètes (huile de palme par exemple) et saturée.
- Les huiles ou beurre de type stéarique : ce sont le beurre de karité, de cacao également saturée etc.

- Les huiles de type oléique (les plus répandues des huiles) et dont l'indice d'iode est compris entre 80 et 110.

Elles contiennent peu d'acide linoléique et pas ou peu d'acide linoléique (huile d'olive, d'arachide, de pourghère par exemple : elles sont fluides).

- Les huiles de type linoléique très liquides, leurs indices d'iode sont généralement supérieurs à 110.

Elles sont généralement semi-siccatives (tournesol, hévéa, coco, coton etc.).

- Les huiles tri-insaturées qui contiennent des acides de plus de 18 carbones (lin, poisson, colza).

Le tableau 1 montre la structure des acides gras les plus fréquents dans les huiles végétales.

L'acide gras est saturé s'il n'existe pas de doubles ou triples liaisons dans la chaîne hydrocarbonée.

Si deux (2) carbones adjacents manquent d'atomes d'hydrogène, un point d'insaturation est créé. S'il y a plus d'une double liaison dans la chaîne, l'acide gras est polyinsaturé.

Tableaux I-1 : Acides gras contenues dans les diverses huiles comestibles [11]

Désignation de l'acide gras	Nombre d'atomes de carbone	Formule	Classe
Palmitique	C16	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$	Saturé
Stéarique	C18	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$	Saturé
Oléique	C18 :1	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$	Insaturé
Linoléique	C18 :2	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$	Polyinsaturé
Linoléique	C18 :3	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$	Polyinsaturé

I_1) Caractérisation des huiles végétales

Pour caractériser les huiles, on utilise deux types de critères, à savoir :

- ✓ les critères distinctifs ;

- ✓ les critères de qualité

I-1-a) Définitions :

Les critères distinctifs :

1. Ils renseignent sur la composition et la structure des constituants des huiles.
2. Ce sont entre autres la densité ou la masse volumique ($d ; \rho$), la viscosité η , l'indice d'iode I_{I_2} , l'indice de saponification I_{sap} , l'insaponifiable et la composition en acide gras.

- ✓ densité ou la masse volumique ($d ; \rho$) :

Renseigne sur l'insaturation, l'état d'oxydation ou la polymérisation

- ✓ la viscosité μ :

La viscosité est la propriété de l'huile, résultant de la résistance qu'opposent ses molécules à une force tendant à les déplacer par glissement. Elle varie avec la température.

- ✓ l'indice de réfraction :

C'est une caractéristique du groupe auquel appartient l'huile et elle permet d'identifier celles de composition inconnue.

- ✓ l'indice d'iode I_{I_2} :

Il renseigne sur le degré d'insaturation.

- ✓ l'indice de saponification I_{sap} :

C'est la quantité de NaOH nécessaire pour saponifier la totalité des acides gras libres ou estérifiés. Il permet donc d'évaluer la quantité d'acide non engagée dans la liaison glycéridique.

- ✓ l'insaponifiable :

C'est l'ensemble des substances qui ne réagissent pas avec les alcalis pour donner du savon et qui ne sont pas volatiles à plus de 100 °C.

Les critères de qualité :

Ils concernent soit l'état d'altération plus ou moins important de l'huile, soit le classement en différentes catégories (brute, vierge ou raffinée).

Nous pouvons citer parmi ceux-ci :

- ✓ L'indice d'acidité I_a :

Il est fonction de la quantité d'acides gras libres et caractérise l'état d'altération de l'huile par hydrolyse. C'est la quantité en milligrammes de KOH par gramme d'huile.

- ✓ L'indice de peroxyde :

Il mesure le degré de rancidité. C'est la quantité en milligrammes de dioxygène par gramme d'huile. Il permet d'apprécier l'état de dégradation par oxydation.

I-1-b) Partie expérimentales

1) La viscosité

a) Viscosité cinématique [8]

Dans cette partie nous présentons quelques méthodes de caractérisations de l'huile.

Nous avons utilisé celle qui s'appuie sur la loi de poiseuille. Dans le cas des liquides newtoniens, l'écoulement à travers un tube capillaire obéit à la loi de Poiseuille qui relie la viscosité à la vitesse d'écoulement du fluide.

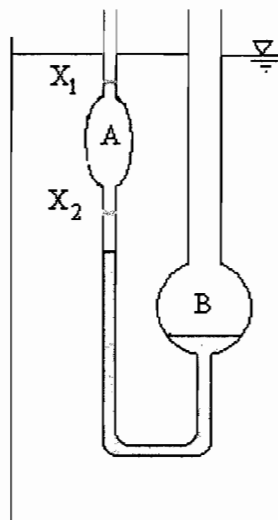


Figure I-2 : Schéma de la manipulation

b) Mode opératoire [10]

La viscosité est mesurée avec un viscosimètre du type « OSTWALD ».

Un tube capillaire de longueur l et de rayon r relie deux réservoirs A et B.

Le liquide, initialement dans B est introduit dans A par aspiration au dessus du repère X_1 . On chronomètre le temps t que le liquide met pour s'écouler entre les deux repères X_1 et X_2 , ce qui correspond à un volume balayé V .

Le capillaire est calibré sous une charge de liquide exactement reproductible et à une température exactement contrôlée. L'équation de Poiseuille s'écrit:

$$\mu = \frac{\pi r^2 p t}{8 l V} \quad (I-1)$$

Où p est l'énergie hydrostatique qui force le liquide à s'écouler.

$$p = h \rho g \quad (I-2)$$

h est la hauteur de dénivellation ; elle varie au cours de l'expérience mais toujours de la même manière d'une expérience à l'autre.

ρ est la masse volumique du liquide étudié et g l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s²).

Finalement, il vient

$$\mu = k \rho t \quad (I-3)$$

Où k est une constante du viscosimètre utilisé.

Evidemment, plus le liquide est visqueux, plus le temps t est élevé.

On ne fait que rarement des déterminations absolues mais plutôt des mesures relatives en étalonnant le viscosimètre avec un liquide de référence, généralement de l'eau.

$$\mu_i = \mu_{ref} \times \frac{\rho_i}{\rho_{ref}} \times \frac{t_i}{t_{ref}} \quad (I-4)$$

ρ_i : masse volumique du liquide étudié

ρ_{ref} : masse volumique du liquide de référence

μ_i : viscosité du liquide étudié

μ_{ref} : viscosité du liquide de référence

t_i, t_{ref} : temps d'écoulement du liquide étudié et du liquide de référence

c) Mesure du temps d'écoulement

Introduire dans le viscosimètre une quantité convenable de la solution au moyen d'une pipette jusqu'au repère de remplissage.

Faire passer la solution par le capillaire du viscosimètre, par soufflage d'air sec au moyen d'une poire en caoutchouc.

Arrêter l'opération lorsque le niveau du liquide est juste au-dessus du repère supérieur.

Immerger le viscosimètre dans le bain à 25 °C ± 0,1 °C.

Fixer le viscosimètre de façon que, d'une part, le niveau du bain soit à 20 mm au-dessus du repère de graduation supérieur et que, d'autre part, l'axe du tube soit parfaitement vertical.

Après une attente de 15 minutes au moins, laisser le liquide s'écouler en mesurant au moyen du chronomètre le temps mis par le ménisque pour redescendre du repère supérieur au repère inférieur, c'est le temps d'écoulement de la solution.

Tableau I-2 : temps d'écoulement de l'eau distillée à 25°C

Séries	1	2	3	4
Temps (mn)	1' 46 " 38	1'46''41	1'46''40	1'46''37
Tierces ("")	9638	9641	9640	9637

$$t_{\text{moy}} = 9639''''$$

Tableau I-3 : temps d'écoulement de l'acide acétique à 25°C

Séries	1	2	3	4
Temps (mn)	2'05''75	2'05''53	2'06''01	2'05''63
Tierces ("")	12575	12553	12601	12563

$$t_{\text{moy}} = 12573''''$$

Tableau I-4 : temps d'écoulement de l'huile Hourour à 25°C

Séries	1	2	3	4
Temps (heures)	2 06 04	2 07 40	2 05 06	2 09 01
Tierces ("")	756400	766000	750600	774100
Masse volumique (g/cm ³)	1,044			
Viscosité(Pa.s)	1,16 10 ³			

$$t_{\text{moy}} = 761775''''$$

Tableau I-5 : temps d'écoulement de l'huile None à 25°C

Séries	1	2	3	4
Temps (heures)	1 58 37	1 58 11	1 58 32	
Tierces ("")	7117	7091	7112	

$$t_{\text{moy}} = 7106,66''''$$

La détermination de la masse volumique à 25°C a conduit aux résultats du tableau I-6 suivant :

Tableau I-6 : Huile Hourour à 25°C

Masse de 25ml (g)	ρ (g/ml)	calcul
22,7448	0,909792	$\rho = 22,7448/25$

Nous avons déterminé également les densités et les viscosités de l'huile, pour les autres températures et nous avons le tableau suivant :

Tableau I-7: Viscosité et densité de l'huile de Jatropha

Température (°C)	20	30	35	40	45	50	55	60
Densité	0,92	0,910	0,905	0,901	0,895	0,890	0,889	0,889
Viscosité	69,91	44,87	37	30,21	28	25	19,27	19

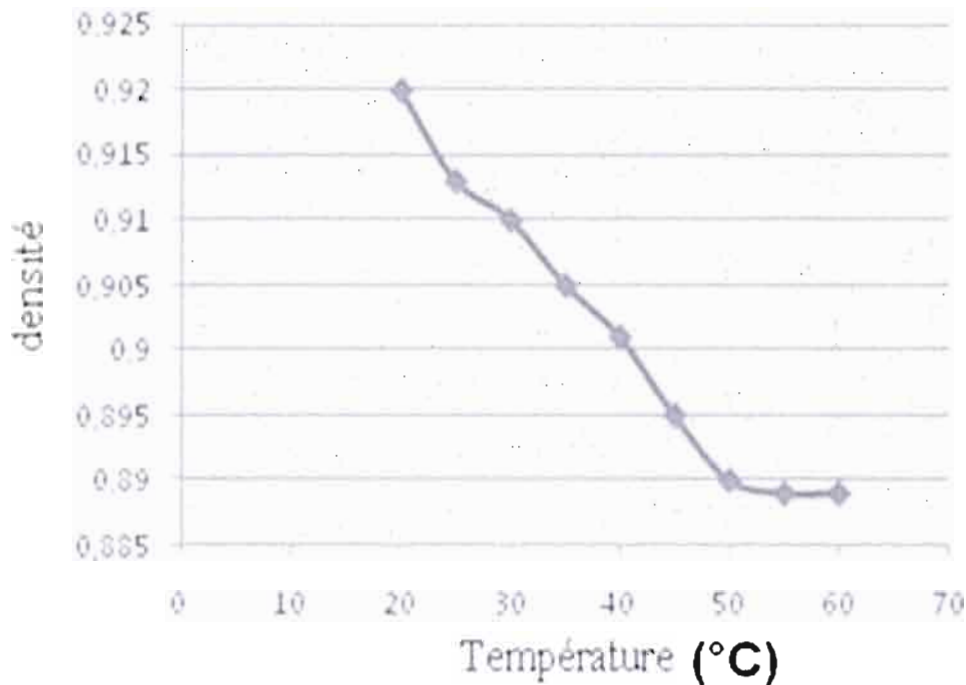


Figure I-1 : variation de la densité de l'huile de Jatropha en fonction de la température

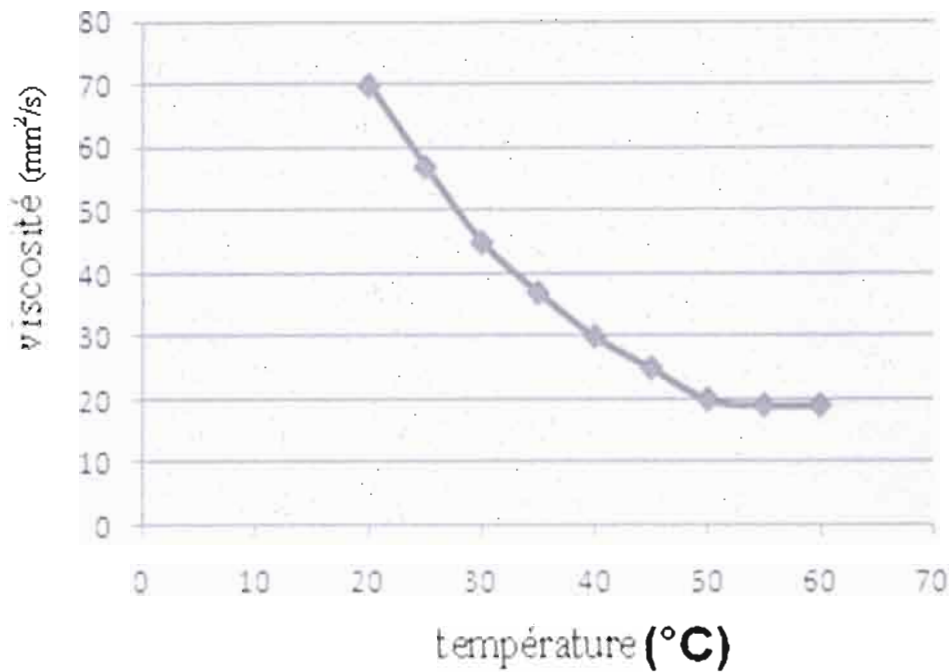


Figure I-2 : variation de la viscosité de l'huile de jatropha en fonction de la température

2) L'indice d'acidité

L'indice d'acidité d'un corps gras se détermine en neutralisant son acidité libre par une quantité de potasse nécessaire.

On pèse en mg la quantité d'hydroxyde de potassium (KOH) nécessaire pour neutraliser un gramme d'huile.

On l'appelle aussi le degré d'acidité.

Il s'exprime par les paramètres de la formule suivants :

$$I_a = \frac{V \times M \times N}{10 \times m} \times [\%] \quad (\text{I - 5})$$

Où N=normalité de la solution de KOH utilisé,
M=masse molaire de l'acide oléique (282,47g/mol),
m =masse en g de l'échantillon d'huile,
I_a=indice d'acidité de l'huile.

Lors de notre expérience on a utilisé les proportions suivantes :

Solution de KOH de normalité N=0,5,

V (KOH)=10,80 ml, m=10 g,

On trouve $I_a = 15,253$.

Ceci montre par hypothèse qu'il faut 15,253 mg de KOH pour neutraliser 1000 mg d'huile.

NB : En effet l'acidité s'exprime en pourcentage d'acide majoritaire qui est l'acide oléique dans le cas de l'huile de jatropha.

D'ailleurs c'est le cas le plus fréquent.

Cependant elle s'exprime dans des cas très rares en pourcentage des autres acides notamment l'acide palmitique, linoléique etc.

3) Le point éclair

Le liquide considéré laisse apparaître des vapeurs, à une certaine température ces vapeurs combinées avec un comburant (l'oxygène par exemple) produit une déflagration.

Cette température critique est appelée le « point éclair ».

Une définition beaucoup plus simple serait la température la plus basse où un liquide peut former un mélange inflammable à sa surface.

Il existe plusieurs appareils qui ont été mis au point par les industriels du pétrole pour mesurer le « point éclair ».

Cependant l'appareil le plus fréquemment utilisé est celui de Pensky Martens [11].

Malheureusement les moyens dont nous disposons au laboratoire ne nous permettent pas de le déterminer.

Le principe est long et nécessite d'avoir la nomenclature de l'appareil ce que nous n'allons pas détailler ici mais toutefois après avoir déterminé cette température avec l'appareil, elle doit être corrigée à l'aide de la relation suivante [11]:

$$T_c = T_e - \frac{(760 - P)}{30} \quad (I - 6)$$

Avec T_c : valeur corrigée de la température,

T_e : valeur de la température mesurée avec l'appareil,

P [mm de Hg] : pression atmosphérique à laquelle s'effectue les essais.

Selon la littérature, le point éclair de l'huile de jatropha est compris entre 290°C et 325°C.

Ces valeurs élevées du point éclair de l'huile de jatropha montrent qu'elle possède de bonnes caractéristiques de stockage et que l'on peut envisager son transport en toute

sécurité ainsi que sa manipulation comparativement au gazole. Quelques auteurs soutiennent toutefois le contraire.

4) L'indice de saponification

La réaction de saponification consiste à faire l'hydrolyse d'un ester.

Dans le cas des huiles végétales cette réaction donne la formation du savon comme résultat.

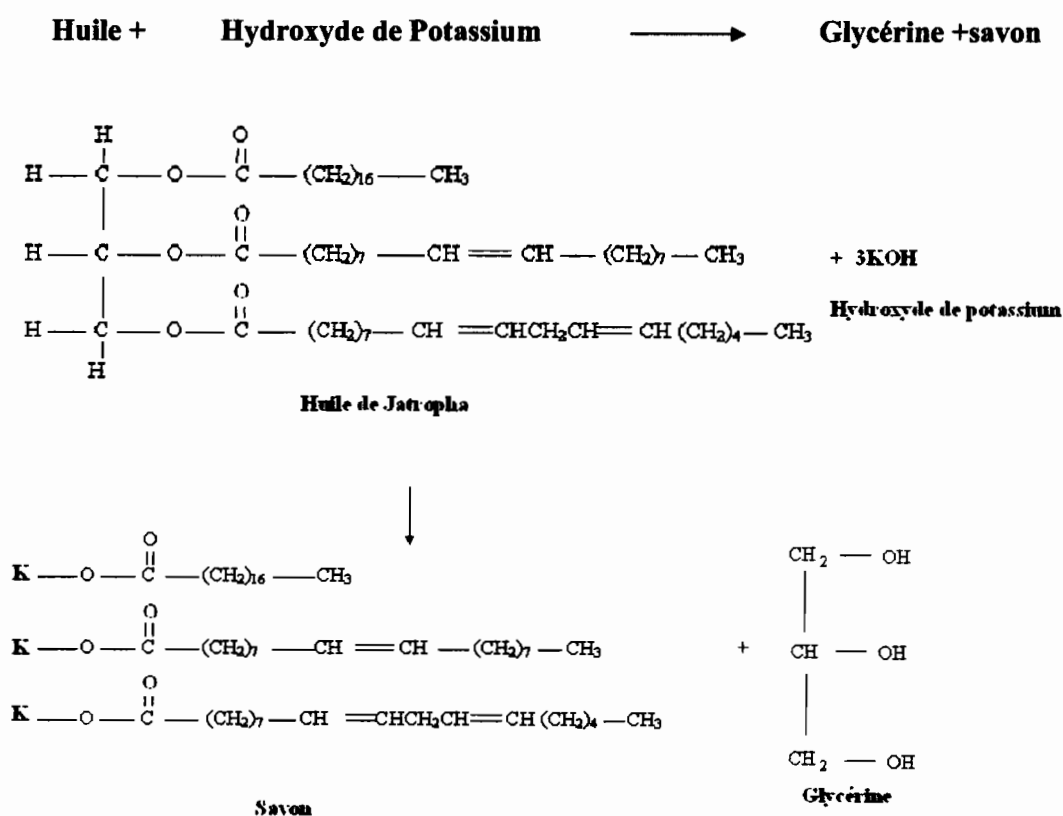
L'indice de saponification est le nombre en milligramme de potasse caustique (KOH) nécessaire pour transformer en savon les acides gras et les triglycérides d'un gramme de corps gras.

Principe

On prend un excès d'hydroxyde de potassium dans un alcool, et on le chauffe avec un échantillon d'huile de masse connue jusqu'à la saponification complète.

L'excès d'alcalin est ensuite titré avec une solution d'acide.

La réaction se déroule selon l'équation suivante :



L'indice de saponification est donné par la formule suivante :

$$I_s = \frac{(V_0 - V) \times 56,1 \times N}{P} \quad (I - 7)$$

V_0 : volume en ml de la solution d'acide chlorhydrique (HCL) à 0,5N pour le titrage du blanc,

V : volume en ml de la solution d'acide chlorhydrique (HCL) à 0,5N pour le titrage de l'échantillon,

P : poids en gramme de l'échantillon,

N : normalité exacte de la solution chlorhydrique,

I_s : indice de saponification (mg de KOH/g d'huile).

NB : l'indice de saponification s'obtient généralement à la suite d'une série d'expériences cependant compte tenu des contraintes de temps, on s'est restreint à une seule expérience.

Lors de notre expérience on a utilisé les proportions suivantes :

Solution de HCL de normalité $N=0,5$,

$V_0=24,40$ ml,

$V=10,5$ ml,

$P=2$ g.

On trouve $I_s=194,947$

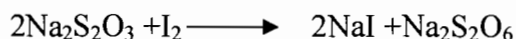
Analogiquement au cas de l'acidité, ceci montre également par hypothèse qu'il faut 194,947 mg de KOH pour saponifier 1000 mg d'huile.

5) Indice d'iode

L'indice d'iode permet de calculer le nombre de doubles liaisons de l'acide gras présents dans un triglycéride autrement dit son taux d'insaturation.

Principe

On utilise un excès d'iode pendant un temps de contact suffisamment long ou en présence de catalyseur et de titrer ensuite l'excès de réactif (iode non fixé) par un réducteur (par exemple le thiosulfate). On détermine ainsi la quantité d'iode fixé par le corps gras.



L'indice de saponification est donné par la formule suivante [13]:

$$I_i = \frac{(V - V') \times 12,69 \times N}{P} \quad (I - 8)$$

V : volume en ml de thiosulfate de sodium consommé pour le titrage du blanc,

V' : volume en ml de thiosulfate de sodium consommé pour le titrage de l'échantillon,

N : normalité du thiosulfate de sodium,

P : masse de l'échantillon en g (prises d'essai),

I_i : indice d'iode (g d'iode/100g de matières grasses).

Remarque :

Les moyens qui ont été mis à notre disposition ne nous ont pas permis de déterminer l'indice de saponification.

Cependant nous connaissons par la littérature qu'il est compris entre 100 et 105 [4'].

I-2) Particularités de l'huile de Jatropha [1]

Originnaire d'Amérique centrale et du Sud, aujourd'hui répandu dans le monde entier après avoir été introduit par des marins portugais via les îles du Cap Vert dans différents pays d'Afrique et d'Asie, le jatropha curcas est une plante de la famille des Euphorbiacées.

Elle peut atteindre jusqu'à 8m de hauteur dans certaines régions et une durée de vie de plus de 50 ans.

Son principal avantage agronomique est qu'elle résiste à la sécheresse, aux climats semi-arides et peut pousser sur des sols relativement pauvres.

Son irrigation ne pose pas de problème car c'est une espèce peu exigeante en eau, en fertilisants et en entretien.

Le jatropha peut presque pousser partout au Sénégal, même sur des sols gravillonneux, sableux ou salés contrairement à d'autres cultures dont l'irrigation nécessite des barrages tel que celui de Diama qui dessale l'eau du fleuve avant son utilisation en irrigation.

Facile à multiplier par ensemencement ou par bouturage ou en laboratoire par culture in vitro, le jatropha fournit des graines dès la deuxième ou la troisième saison suivant sa mise en terre. Elle a également la particularité de ne pas être broutée par les animaux à cause de sa toxicité.

Selon les espèces et les milieux de culture, la production d'huile de jatropha varie entre 2 tonnes à 5 tonnes par hectare seulement durant les premières années car elle peut aller jusqu'à atteindre 15 tonnes à la cinquième année.

Les graines ont un rendement en huile environ égal à 37% de leur poids avec les extracteurs d'huile artisanaux.

Avec un extracteur d'huile mécanique, on peut avoir un taux d'extraction avoisinant les 80%.

En plus de servir de source de biodiesel, l'huile de jatropha est aussi utilisée comme produit en médecine traditionnelle à cause de ses propriétés médicinales et cosmétiques.

En outre, l'exploitation du jatropha peut contribuer :

- ✓ au développement des zones rurales comme la promotion des femmes rurales avec la production artisanale du savon local,
- ✓ au contrôle de l'érosion (plantation des haies),
- ✓ à la réduction de la pauvreté (par la vente des graines et des produits dérivés).

L'électrification rurale par cette énergie renouvelable, produite et utilisée localement comme carburant des groupes électrogènes, est un autre aspect de développement durable non négligeable.

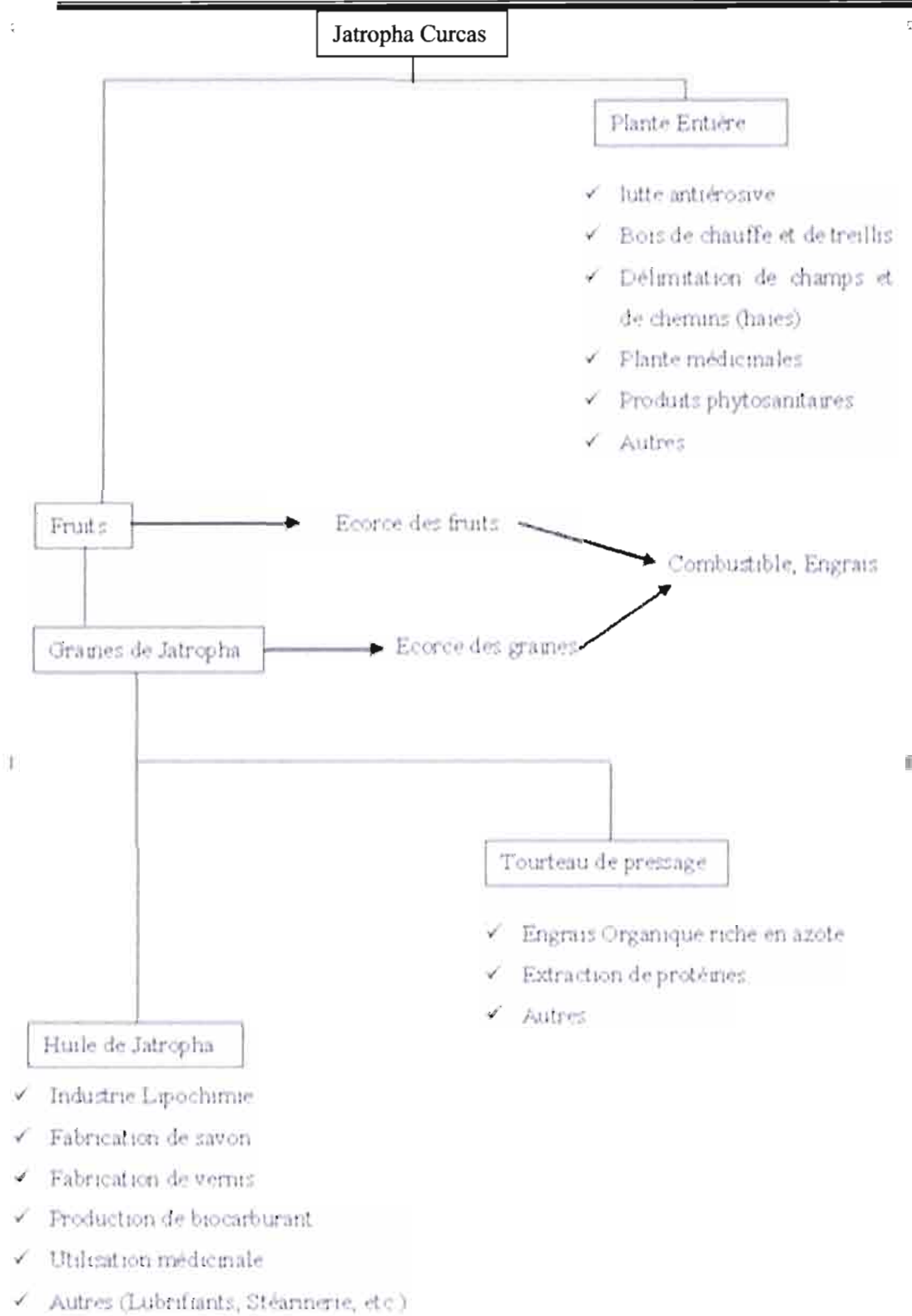


Figure 1-3 : Possibilités d'utilisation du Jatropha Curcas [2]

Cependant l'utilisation la plus courante et économiquement viable de l'huile de jatropha avant son utilisation en tant que biocarburant est la production de savon, un savon blanc avec une mousse abondante qui a des effets positifs sur la peau, en partie en raison du contenu de glycérine du savon.

Pour cette production du savon, nous allons y revenir ultérieurement dans la suite de notre travail lors de la réaction de saponification.

Le tourteau résultant de l'extraction de l'huile constitue un engrais organique à rendement non négligeable : 1 tonne de tourteau de jatropha équivaut à 200 kg de fertilisant minéral.

En outre, en raison de sa teneur en huile résiduelle, ce tourteau a aussi des propriétés insecticides et réduit la quantité de nématodes dans le sol.

L'utilisation de cet engrais serait recommandée pour les cultures bios qui bannissent l'apport chimique dans la fertilisation ou la lutte contre les parasites.



Plantation de jatropha



Phase de floraison



Fruits en cours de maturité



graines de jatropha

Conclusion

La plante de jatropha bien exploitée profitera à plus d'un titre aux populations rurales.

Le choix de cette plante parmi d'autres n'est donc pas le fruit du hasard.

Nous allons passer maintenant à la production du biodiesel à partir de l'huile de jatropha.

Chapitre II: Production de biodiesel à partir de l'huile de Jatropha

II-1 Historique [1]

Le procédé de fabrication du combustible à partir de la biomasse utilisée comme matière première dans les années 1800 est essentiellement le même que celui utilisé aujourd'hui.

L'histoire du biodiesel est beaucoup plus politique et économique que technologique.

Le début du 20^{ème} siècle a vu l'introduction massive des automobiles à essence. Depuis lors, les compagnies pétrolières ont été obligées de raffiner beaucoup de pétrole brut destiné à l'approvisionnement en essence de ces véhicules.

Aujourd'hui l'épuisement des sources d'énergies fossiles est annoncé du fait de cette exploitation massive.

C'est ce qui a engendré l'émergence de l'utilisation des huiles végétales comme carburant.

La production de biodiesel à partir d'huiles végétales n'est pas un processus nouveau.

La transformation d'huiles végétales ou de graisses animales en ester de mono alkyl, ou biodiesel est connue sous le nom de transesterification. Ce processus est connu depuis la fin du 19^e siècle.

Patrick et Duffy ont mené une réaction de transesterification dès 1853.

La vie du moteur Diesel a commencé en 1893, lorsque le célèbre inventeur allemand Rudolph Diesel a publié un document intitulé « the theory and construction of a rational heat engine ».

Le document décrit un moteur révolutionnaire dans lequel l'air est comprimé par un piston à très haute pression causant ainsi une température très élevée.

Dr. Rudolph Diesel conçut le premier moteur Diesel pour fonctionner à l'huile végétale.

Lors de l'exposition mondiale de Paris en 1900, on a montré un petit moteur Diesel qui marchait avec l'huile d'arachide.

Ce moteur marchait si bien que le changement de carburant fut remarqué par peu de visiteurs. En raison de la haute température créée, le moteur était capable de fonctionner avec une variété d'huiles végétales.

Lors de la foire universelle à Paris en 1911, M Diesel a également fait fonctionner son moteur avec l'huile d'arachide et a déclaré « le moteur diesel peut être alimenté avec des huiles végétales et contribuera considérablement au développement de l'agriculture des pays qui l'utilisent ».

Les camions de l'armée française reliaient Dakar à Alger en fonctionnant à l'huile d'arachide. L'un des premières utilisations de l'huile végétale transesterifiées pour alimenter des véhicules lourds a été vu en Afrique du sud avant la seconde guerre mondiale.

Le terme de « biodiesel » a été donné à l'huile végétale transesterifiée pour mieux rapprocher ses caractéristiques à celle du carburant diesel.

Ainsi l'utilisation des huiles végétales comme alternatives de carburant renouvelable en concurrence avec le pétrole a été proposée au début des années 1980, mais la production n'a commencé qu'après les années 1990.

Plus récemment Renault et Peugeot ont approuvé l'utilisation du biodiesel dans certains moteurs de leur camion.

Il est donc tout à fait possible de remplacer l'huile minérale par de l'huile végétale, reste à choisir la solution durable la plus adaptée à chaque pays, à son climat, à sa pluviométrie, à ses sols, à sa population.

II-2 Définitions :

Un biocarburant est un carburant fabriqué à partir de matières premières végétales utilisé comme additif aux carburants traditionnels ou comme produit de substitution.

Les biocarburants de première génération sont repartis en deux grandes familles :

a) Première famille

Le biodiesel pour les moteurs diesel, qui est fabriqué à partir de plantes contenant de l'huile (colza, tournesol, soja, palme, ricin, jatropha etc.). L'huile végétale brute obtenue par simple pressage des graines d'une des plantes citée ci dessus n'est généralement pas utilisée directement dans les moteurs diesel car elle est considérée comme un carburant incompatible avec les technologies des moteurs modernes.

b) Deuxième famille

Le bioéthanol destiné aux véhicules à essence est un alcool produit par fermentation soit du sucre issu de plantes (betteraves, cannes à sucre) soit de l'amidon issu de céréales (blé, maïs) (voir annexe D).

Pour éliminer les difficultés techniques liées au stockage de l'éthanol, celui-ci est généralement converti par une réaction chimique en un éther dérivé de l'éthanol : l'ETBE (éthyl-tertio-butyl-éther). Cependant ce dernier (la deuxième famille) des biocarburants ne sera pas traité dans le cadre de ce projet, il est donné simplement en guise d'information.

Il y a 3 types de biocarburants suivant l'état physique (solide, liquide, gazeux):

- 2) Solides : biocombustibles solides
- 3) Liquides : biohuile, biodiesel, bioéthanol
- 4) Gazeux : biogaz, gaz de biosynthèse

Il est important de rappeler que seul le biodiesel parmi les biocarburants précités sera étudié. Il convient de souligner qu'il existe deux autres filières appartenant à la catégorie des biocarburants de seconde génération : il s'agit de la filière lignocellulosique, carburant de transport fabriqué à partir de déchets agricoles et ligneux (bois, paille...) et de la filière algale.

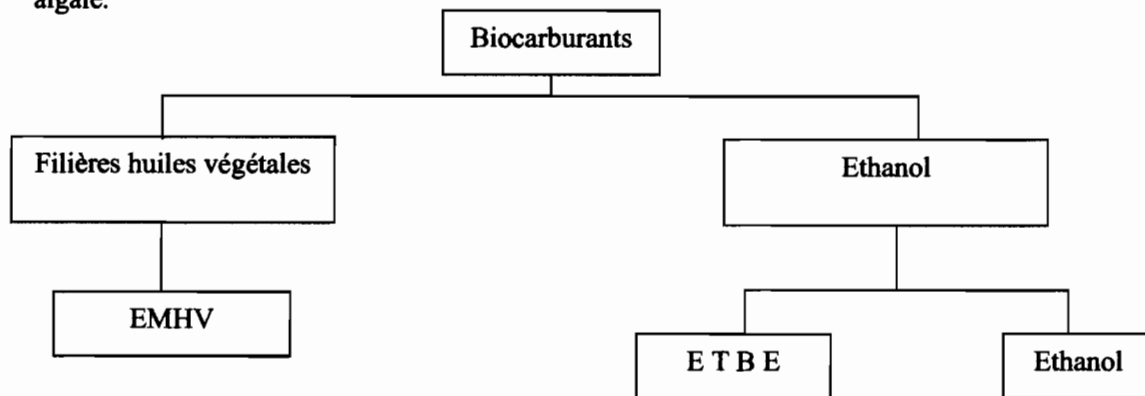


Figure II.1 : les filières des biocarburants [4']

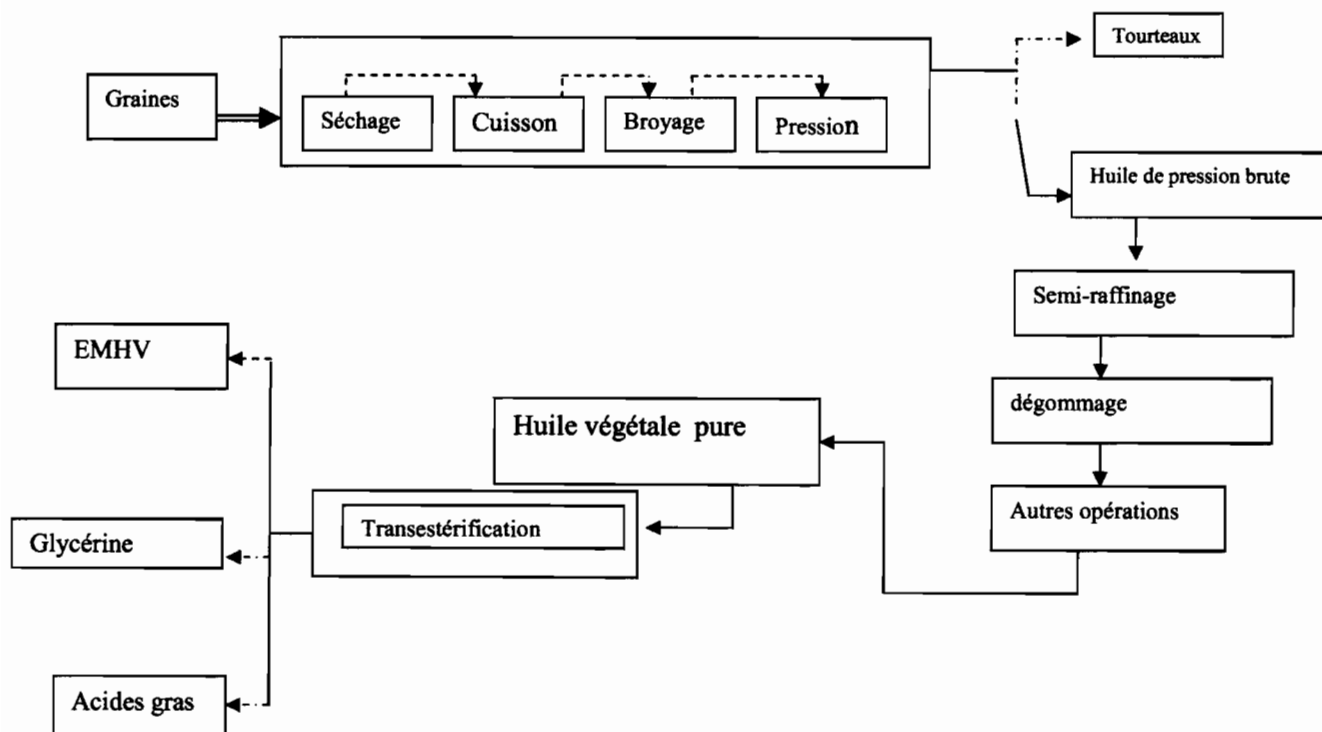


Figure II.2 : les étapes de la transformation des huiles [4']

II-3) Les esters d'huiles végétales et de graisses

Les huiles végétales et les graisses animales en réaction catalysée avec un alcool donnent un ester alkyle correspondant.

Cette réaction est connue sous le nom de transesterification.

Elle change complètement la composition chimique de l'huile qu'elle transforme en ester.

Au cours de cette réaction les huiles végétales réagissent avec des molécules de méthanol (ou d'éthanol) pour former des monoesters méthyliques (ou éthyliques) (Esters Méthyliques d'Huile Végétale : EMHV) et du glycérol. Ainsi les propriétés de l'huile sont changées, dès lors elle est comparable à un combustible diesel : c'est le biocarburant en question.

II-4) Historique sur la réaction de transesterification relatif aux huiles végétales

C'est une réaction chimique qui a fait l'objet de plusieurs recherches dans le passé.

Beaucoup de licences ont été délivrées à des chercheurs dans les années 40, pour avoir mis en place des brevets d'inventions relatifs à la conversion des huiles végétales en esters.

Nombreux de ces travaux consistaient à faire l'alkoolyse des triglycérides avec un catalyseur alcalin dans le but d'obtenir les esters alkyles correspondants.

Ces travaux étaient destinés à des utilisations purement chimiques (détergents par exemple).

Par la suite beaucoup d'investigations ont été faites sur les huiles et oléagineux, et des tests sur les esters correspondants dans chaque cas ont été réalisés par des instituts agréés dans le domaine. Par contre c'est seulement au lendemain de la première crise pétrolière dans les années 70 que beaucoup de chercheurs ont commencé à voir l'importance de ces esters.

C'est à ce moment qu'ils ont commencé à l'introduire dans des moteurs à injection directe.

II-5) But de la réaction de transesterification

La décomposition thermique d'une huile qui est un ester de glycérine, en l'absence d'oxygène conduit à la formation de glycérol et d'un mélange d'esters.

L'objectif d'une telle étude est l'utilisation des esters obtenus comme carburant diesel ; l'étude conduit en même temps à :

- 5) L'élimination totale de la glycérine,
- 6) La diminution du point d'ébullition de l'huile,
- 7) La diminution du point éclair de l'huile,
- 8) L'utilisation de la glycérine dans l'industrie chimique,
- 9) L'utilisation des sous produits dans l'industrie du savon et des détergents.

II-6) La réaction proprement dite

La réaction de transesterification permet de raffiner l'huile puisque la plus grande partie des phospholipides et des acides gras libres sera éliminée.

L'acide gras libre disparaît complètement avec les catalyseurs basiques.

En catalyseur acide, l'ester reste encore acide, ce qui risque de poser des problèmes.

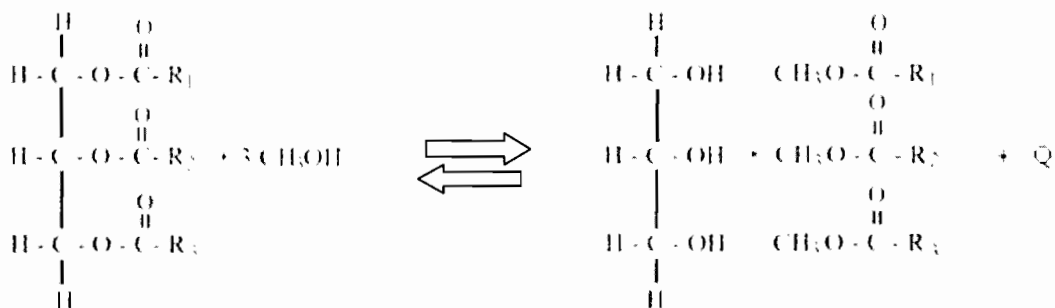
L'indice d'iode des esters méthyliques est pratiquement le même que celui des huiles brutes ; l'indice de saponification ne change pas.

L'indice de peroxyde et l'acidité doivent être mesurés à nouveau.

Lorsque la réaction est incomplète, il peut avoir présence de mono et diglycérides dans les esters. Il faut enlever les monoglycérides par filtration ou éviter d'en former.

Si l'alcool reste dans les esters, certains de leurs caractéristiques peuvent être amélioré (qualité à froid, courbes de distillation, viscosité), mais au détriment de l'indice de cétane et du point éclair.

La fabrication d'esters méthyliques ou éthyliques à partir des huiles végétales est donnée par la réaction de transesterification suivant l'équation d'équilibre:



Triglycéride (huile) + Méthanol (alcool)

Glycérol + Ester méthylique (Esters)

II-7) Caractéristiques des biocarburants

1) Cas des gaz à effet de serre

Définition

Les gaz à effet de serre sont des gaz qui de par leur propriétés physiques contribuent à l'effet de serre.

Les principaux gaz à effet de serre sont :

- ✓ Le dioxyde de carbone (CO₂),
- ✓ Le méthane (CH₄),
- ✓ Le protoxyde d'azote (N₂O).

En effet ces gaz absorbent le rayonnement infrarouge émis par la terre car ils en sont opaques. Or en absorbant ces rayonnement ils emprisonnent l'énergie thermique près de la surface du globe ce qui va permettre à notre planète de garder une température moyenne de +15°C à sa surface.

Ce qui fait l'avantage de la biomasse comparée aux carburants fossiles est le fait que le bilan des GES de la biomasse tout au long de son cycle de vie est neutre.

Ainsi la biomasse ne perturbe pas le résultat global des GES car elle n'y ajoute pas plus qu'elle n'en enlève.

En effet au moment de leur croissance, les arbres consomment du dioxyde de carbone et ils en libèrent également lorsqu'ils sont consommés ou qu'ils meurent.

Par contre, l'exploitation de la biomasse par l'homme peut être une source d'émission de GES.

2) Indice de cétane

L'indice de cétane, caractérise l'aptitude à l'auto-inflammation des carburants diesels.

Cette caractéristique est très importante car elle influence directement le bon fonctionnement de la combustion et le délai d'inflammation.

3) Indice d'octane

L'indice d'octane est un nombre qui mesure la valeur antidétonante d'un carburant, c'est-à-dire la compression maximale que le mélange d'air et de carburant peut supporter après introduction dans le moteur, sans qu'apparaissent les phénomènes de détonation et d'auto-allumage. L'indice d'octane concerne les moteurs à essence.

4) Miscibilité

La miscibilité est la capacité du biocarburant à se mélanger de façon homogène avec d'autres carburants. Cette propriété est indispensable dans la production du biodiesel et du bioéthanol.

5) Viscosité

C'est la caractéristique d'un biocarburant à être plus ou moins fluide.

Elle dépend de la température. Plus cette dernière est élevée, plus le biocarburant est fluide.

II-8) Pourquoi raffiner les huiles végétales ?

Les huiles végétales et les matières grasses sont indispensables à l'humanité car étant une source de nutriments et de matières premières industrielles.

L'huile végétale brute doit être raffinée avant son utilisation à des fins comestibles.

En effet, les huiles végétales brutes après extraction, contiennent des impuretés notamment des petites particules de graines, des produits toxiques (tels que pesticides, glycosides), des phospholipides, des métaux (tels que fer et cuivre), de gommes et de cires qui sont présents dans l'huile à l'état de traces et qui doivent être éliminées pour anticiper sur des futurs problèmes de maintenance relatifs à l'obturation prématurée des filtres à gazole et des dépôts dans certaines parties du moteur.

1) Les acides gras libres

La graine des huiles végétales contient naturellement des acides gras libres.

Ils participent aux réactions biochimiques de la biosynthèse.

Ils proviennent également de la réaction d'hydrolyse enzymatique qui se produit dans les huiles brutes soit au cours de leur extraction, soit au cours de leur stockage.

Leur présence dans un corps gras peut être assimilée à celle d'un catalyseur d'oxydation.

2) Les procédés industriels de raffinage des huiles végétales

Nous allons donner théoriquement à titre d'informations les différents procédés de raffinage que nécessite une huile végétale brute avant son utilisation à aucune fin que se soit. Le raffinage des huiles végétales comprend généralement les étapes suivantes :

- ✓ le dégommage ;
 - ✓ la neutralisation;
 - ✓ le lavage ;
 - ✓ le séchage ;
 - ✓ la décoloration ;
 - ✓ la désodorisation
- ...etc.

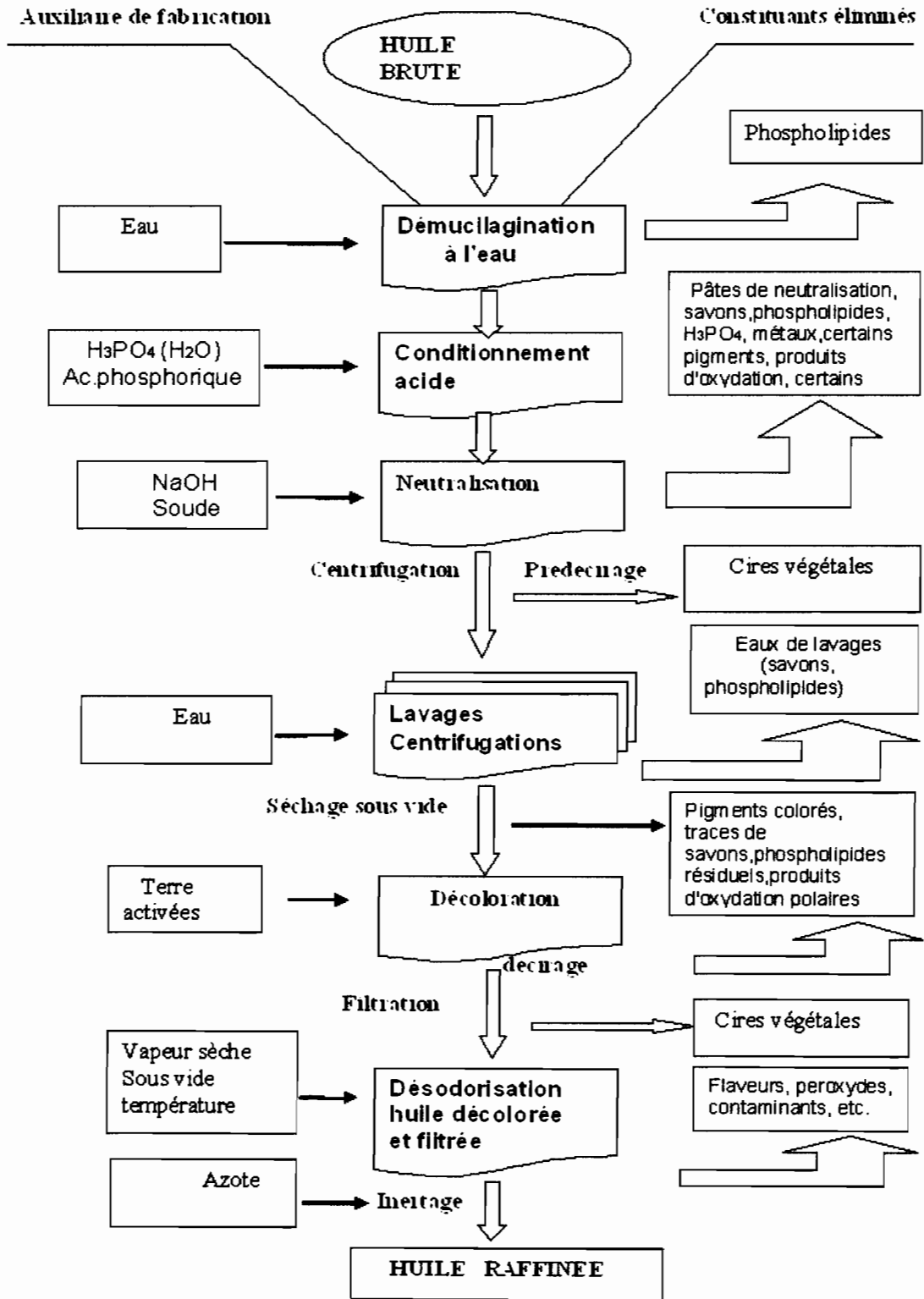


Figure II-3 :Les différentes étapes du raffinage [4']

a) Dégommage

Le dégommege ou la démulaginatation à pour but d'éliminer de l'huile végétale brute les composés susceptibles de devenir insolubles par hydratation ou d'être éliminés avec la phase aqueuse (Glucides).

Il existe différents types de dégommege de l'huile végétale mais nous allons citer les plus généralement utilisés:

- ✓ le dégommege à l'eau qui consiste à utiliser de l'eau chaude qui insolubilise les phospholipides ainsi que diverses matières colloïdales),
- ✓ le dégommege à l'acide qui consiste à éliminer les phospholipides non hydratables.

b) Neutralisation

On peut raffiner l'huile végétale des acides gras libres de deux manières.

La méthode chimique qui consiste à les neutraliser à la soude et la méthode physique (entraînement à la vapeur).

C'est l'opération la plus délicate et la plus importante du raffinage.

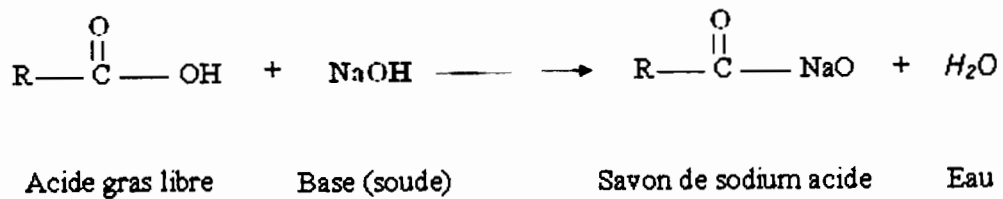
Il s'agit ici de la méthode chimique où la teneur en acides gras libres s'exprime en pourcentage d'acide oléique excepté certaines huiles comme l'huile de palme ou on l'exprime en pourcentage d'acide palmitique.

La neutralisation par des bases élimine les acides gras libres sous forme de savon appelé communément « pâte de neutralisation » qui contiennent également les mucilages, diverses impuretés.

Cette réaction permet donc d'enlever la quantité d'acide qui ne participe pas dans la liaison glyceridique pour en faire un savon.

Nous allons en profiter pour définir l'indice de saponification (I_{sap}) qui consiste à évaluer la quantité de soude (NaOH) nécessaire pour neutraliser la totalité des acides gras libres contenus dans l'huile végétale.

La réaction de neutralisation des acides gras libres s'effectue selon l'équation suivante :



Pour avoir une bonne neutralisation, il faut bien doser avec la soude.

Un mauvais dosage entraîne un rendement médiocre en huile raffinée à cause de l'effet de la saponification parasite.

Plus l'huile est acide, plus la solution de soude peut être concentrée car les risques de saponification parasites sont plus faibles.

c) Le lavage

Le raffinage ne se résume pas seulement à la neutralisation des acides gras libres.

L'huile obtenue après neutralisation contient de petites quantités de savon en solution ou en fines suspension.

Ces impuretés qui ont pu s'échapper à l'opération de neutralisation doivent être éliminées par deux lavages successifs.

La première opération consiste à faire coaguler ces fines quantités de savon en utilisant une solution aqueuse de chlorure de sodium (NaCl) à 8-10% portée à une température de 95°C.

La seconde opération de lavage utilise un volume d'eau de 7 à 10% du volume de l'huile porté à 85°C. La séparation se fait par décantation.

d) Le séchage

L'huile neutralisée sortant du lavage présente une certaine humidité pouvant provoquer le colmatage des filtres concernés au niveau du moteur.

Le séchage a pour rôle de débarrasser l'huile de l'eau qu'elle contient ainsi que la disparition de la mousse formée en surface.

L'huile lavée est séchée généralement avec une température variant entre 105 à 110°C

e) La décoloration

Cette opération consiste à éliminer les pigments colorés nuisibles à la couleur de l'huile et à sa conservation qui ont pu échapper aux opérations en amont bien que menées correctement. Lors de cette opération sont adsorbées les impuretés notamment les métaux, les savons, les composés phosphatidiques et les hydrocarbures aromatiques.

C'est le phénomène d'adsorption. Il se fait en utilisant des terres décolorantes, du charbon actif, des silices spéciales ou des combinaisons de substances.

L'opération consiste à faire un mélange terre/huile porté à une température de 90°C dans un décolorateur.

La quantité de substances adsorbées et celle de substance résiduelle dissoute sont résumées par la formule de Freundlich suivante [12] :

$$\log \frac{x}{m} = n \log C + k \quad (\text{II} - 1)$$

X : est la quantité de substances adsorbées.

m : est la quantité d'adsorption.

C : la quantité de substance résiduelle dissoute.

N : est une constante dépendant de la nature de l'adsorbant.

k : est une constante appelée capacité d'adsorption.

f) La désodorisation

La désodorisation a pour but d'éliminer les substances volatiles telles que les aldéhydes et les cétones et les acides gras qui sont responsables de l'odeur et du goût indésirables à l'huile.

La qualité de l'huile végétale désodorisée doit répondre à des valeurs normalisées en gout, acidité, couleur et indice de peroxyde.

L'opération consiste à injecter de la vapeur sèche dans l'huile portée à une température très élevée.

Tableau II-1: Les composés éliminés durant le raffinage (13).

Operations	Composants éliminés	Composants parasites introduits
Dégommage (éventuel)	Mucilages, phospholipides, glycolipides et composés protidiques	Eau
Neutralisation Chimique	Acides gras libres Phosphatides résiduels Composés de dégradation d'origine oxydative Composés métalliques Gossypol (coton) Aflatoxine (arachide) Insecticides organophosphorés.	Savon Eau
Lavage	Savon, traces de soude Phosphatides résiduels	Eau
Séchage	Eau	-
Décoloration	Pigments (caroténoïdes et chlorophyllien essentiellement) Savon	Destruction des peroxydes et formation d'isomères à double liaisons conjuguées

	Hydrocarbures polycycliques (si traitement au charbon actif)	Acides gras libres (par acidification des savons)
Désodorisation	Acides gras libres Substances volatiles responsables de l'odeur et du goût. Peroxydes et produits de dégradation Pesticides organochlorés Stéroïls et tocophérols	Formations d'isomères géométriques de dimères

II-9) Application de la réaction de transesterification à l'huile de jatropha

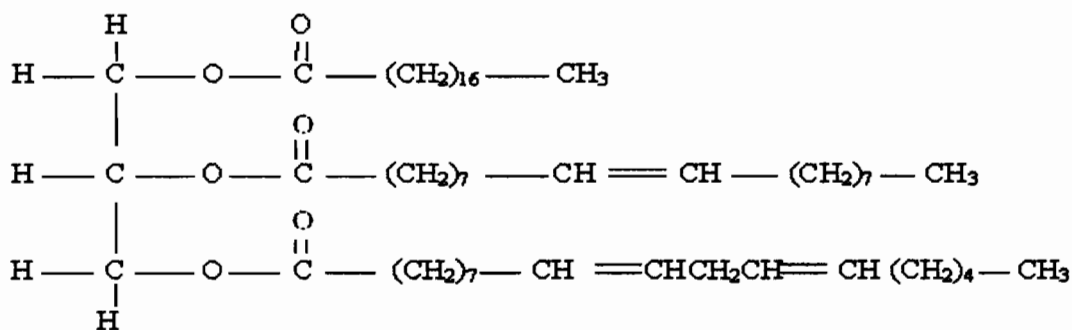
Le raffinage de l'huile de jatropha par la réaction de transesterification qui selon la définition précédente consiste à faire réagir de l'huile jatropha avec un alcool pour donner les esters correspondants et du glycérol.

L'un des facteurs importants de cette réaction de conversion est la nature et la quantité de catalyseur (base) utilisé.

Il permet d'améliorer la vitesse de réaction et d'augmenter le rendement.

Il s'agit généralement de l'hydroxyde de sodium (NaOH) ou de l'hydroxyde de potassium (KOH).

La structure organique du jatropha curcas est le suivant [5]:



La réaction de transesterification contribue au raffinage de l'huile de jatropha selon la figure suivante:

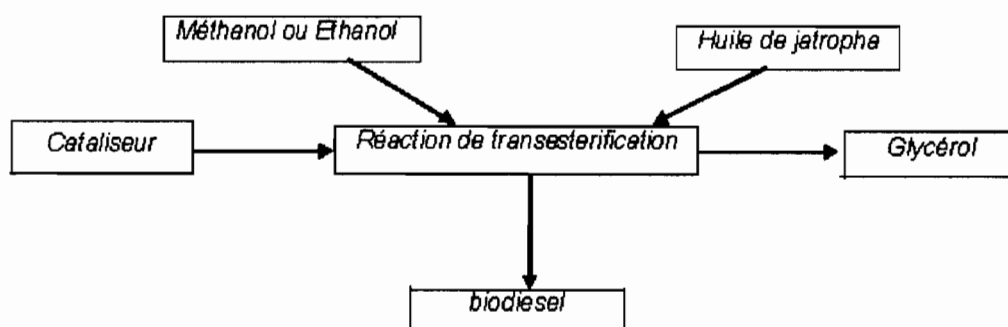
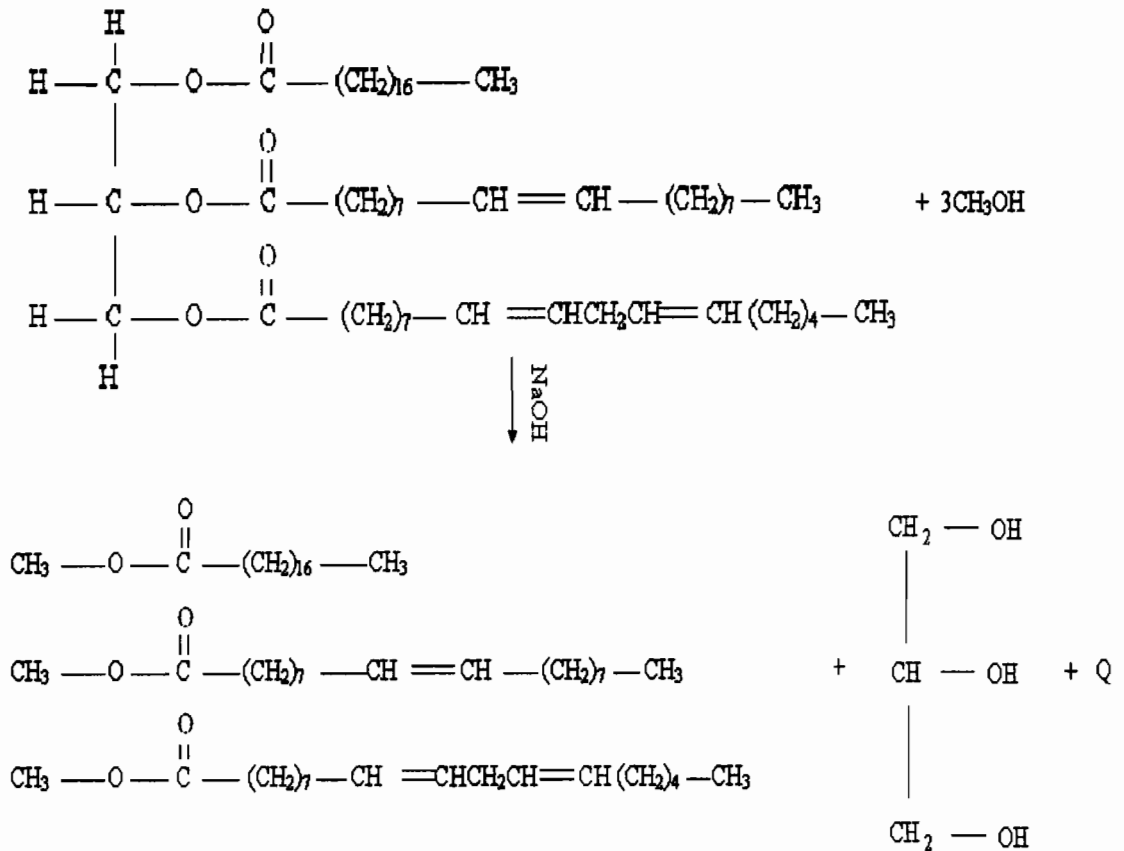


Figure II-4 : la réaction catalysée de transesterification de l'huile de jatropha [1]

Ainsi on obtient la réaction suivante :



a) La composition chimique [9]

L'huile de jatropha est constitué de : 7% d'acide stéarique ,50 % d'acide linoléique et de 37% acide linoléique .Les autres acides sont présents sous forme de traces.

b) La masse molaire moyenne de l'huile de Jatropha

Soit une masse m_H d'huile : les nombres de moles des différents composants peuvent s'écrire comme suit :

$$n(\text{Acide stéarique.}) = \frac{0.07}{284} m_H.$$

$$n(\text{Acide oléique}) = \frac{0.37}{282} m_H.$$

$$n(\text{Acide linoléique}) = \frac{0,50}{280} m_{\mu}$$

$$\text{Nombre total de moles} \quad n_T = m_H \left(\frac{0,07}{284} + \frac{0,37}{282} + \frac{0,50}{280} \right)$$

$$n_T = 3,344249 \cdot 10^{-3} m_H$$

$$\text{Les fractions molaires} = X_{\text{ac. Stéarique}} = \frac{0,07 m_H}{284 \times 3,344249 \cdot 10^{-3} m_H} = 7,37\%$$

$$X_{\text{ac. Oléique}} = \frac{0,37 m_H}{282 \times 3,344249 \cdot 10^{-3} m_H} = 39,23\%$$

$$X_{\text{ac. Linoléique}} = \frac{0,50 m_H}{280 \times 3,344249 \cdot 10^{-3} m_H} = 53,39\%$$

$$M = \sum_{i=1}^3 X_i M_i$$

$$M = X_{\text{ac. Stéa}} \cdot M_{\text{ac. Stéa}} + X_{\text{acid. oléiq}} \cdot M_{\text{ac. oléiq}} + X_{\text{ac. lino.}} \cdot M_{\text{ac. lino.}}$$

$$M = ((7,37 \times 284) + (39,23 \times 282) + (280 \times 53,39)) \times \frac{1}{100}$$

$$M = 281,0514 \text{ g/mol}$$

c) Quelques considérations sur le glycérol :

Le glycérol, encore appelé propane 1-2-3 triol ou glycérine est un alcool trihydraté, visqueux et au goût sucré. Il a été découvert en 1779 par SCHEELE.

Il est présent naturellement dans toutes les huiles végétales sous forme de glycérides et se retrouve comme sous-produit quand ces huiles sont saponifiées ou transestérifiées ou dans la production d'acide gras.

Le glycérol peut être produit à des fins commerciales par synthèse à partir du propylène.

Son utilisation est diverse : elle s'étend aux industries pharmaceutiques, cosmétiques, aux pâtes dentifrices, aux résines synthétiques et aux industries de tabac et alimentaires.

Le terme glycérol s'applique seulement au propane 1-2-3 triol pur et celui de glycérine au produit commercial purifiée qui contient plus de 95% de glycérol.

Plusieurs qualités de glycérine sont disponibles sur le marché, la différence réside dans la composition en glycérol, la couleur, l'odeur et les traces d'impuretés.

Propriétés[3] :

Le glycérol est complètement soluble dans l'eau et l'alcool ; moyennement soluble dans l'éther diethyl, l'acétate et le dioxane et insoluble dans les hydrocarbures.

A température ambiante, le glycérol est généralement sous sa forme cristallisée car il a tendance à se sous refroidir et sa température de congélation diminue grandement quand on le mélange à l'eau.

Ex : 66,7% glycérol +33,3% eau forment un mélange eutectique qui se solidifie à - 46.5 °C

Tableau II. 2 : caractéristiques physiques du glycérol [3]

Propriétés	Valeurs
Température de fusion à 1bar	18,17 °C
Température d'ébullition	
0,53 kPa	14,9 °C
1,33 kPa	166,1 °C
13,33 kPa	222,4 °C
101,3 kPa	290 C°
Densité à 25 °C	1,262
Pression de vapeur	
50 °C	0.33 Pa
100 °C	526 Pa
150 °C	576 Pa

200 °C	61 000 Pa
Tension de surface (20 °C)	36,4 mN/m
Viscosité 20 °C	1499 mPa .s
Chaleur de vaporisation	
55 °C	88,12 J/mol
95 °C	76,02 J/mol
Chaleur de formation	667,8 kJ/mol
Conductivité thermique	0,28W/m.K
Flash point	177 - 199°C
Température d'inflammation	204°C

II-10) Etude expérimentales

Nous disposons plusieurs méthodes de synthèse du biodiesel parmi lesquelles nous pouvons citer :

- ✓ la pyrolyse,
- ✓ la dilution,
- ✓ le craquage et l'hydrocraquage,
- ✓ la microémulsion,
- ✓ la transesterification,

Cependant la transesterification est la méthode de notre choix pour caractériser l'huile de jatropha car étant plus adaptée au contexte de carburant de remplacement.

Chimiquement elle consiste à ôter la molécule de glycérine des chaînes d'acides gras (huile de jatropha dans notre cas) et à les substituer dans chacune d'elles par une molécule d'alcool léger.

Dans notre expérience nous avons utilisé le méthanol en excès. Nous avons étudié les paramètres suivants :

- ✓ la cinétique de la réaction,
- ✓ l'effet de la stœchiométrie,
- ✓ l'effet du temps de réaction,
- ✓ l'effet de la température,
- ✓ l'effet du catalyseur,
- ✓ la séparation des phases.

a) Le matériel utilisé

Le matériel que nous avons utilisé est essentiellement composé de :

- ✓ réacteur en pyrex de 1000ml,
- ✓ agitateurs et barreaux magnétiques,
- ✓ thermomètre à mercure,
- ✓ condenseurs,
- ✓ ampoule de décantation.

b) Les proportions des réactifs

Les expériences qui suivent ont été réalisées sur l'huile de Hourour.

Propriétés de l'huile : volume utilisé : 500ml ; masse volumique : 0,91g/ml.

$$\rho = \frac{\text{masse}}{\text{volume}} \quad \Rightarrow m_{\text{huile}} = 500 \cdot 0,91 = 455 \text{ g}$$

On a utilisé du méthanol en excès (Ratio molaire 5 : 1). C'est à dire 4 moles de méthanol pour une d'huile. Ainsi on obtient :

Masse molaire du méthanol : $M_{\text{méthanol}} = 32,04 \text{ g /mole}$

$$n_{\text{methanol}} = r \cdot n_{\text{huile}} = 5 \times \frac{455}{887} = 2,565 \text{ moles} \quad \Rightarrow m_{\text{methanol}} = 82,18 \text{ g}$$

$$d = \frac{\text{masse / methanol}}{\text{volume / methanol}} \quad \Rightarrow \text{volume}_{\text{methanol}} = 104,025 \text{ ml}$$

Pour le catalyseur (hydroxyde sodium), on a utilisé 1,5% de la masse de l'huile ce qui représente 6,825g.

Toutes les quantités de produits utilisés sont résumées dans le tableau suivant :

Tableaux II-3 : les quantités des différents réactifs

Huile	Méthanol	NaOH
455g	49,27g (stœchiométrie)	1,5% du poids de l'huile
	65,71g (33% excès)	1,5% du poids de l'huile
	82,18g (66% excès)	1,5% du poids de l'huile

c) Opérations

Le procédé peut être décrit comme suit.

Après avoir déterminé la proportion des différents réactifs (huile, méthanol, soude), on a porté le mélange réactionnel à une température variant entre 60 et 70°C dans un réacteur, ce qui correspond à peu près à la température d'ébullition du méthanol.

La température du mélange est maintenue dans cette plage dans le but d'éviter l'évaporation de l'alcool au cours de la réaction et en évacuer l'excès.

Après que tout l'alcool en excès se soit évacué, la température s'est stabilisée à une valeur constante que nous avons relevée qui est égale à 66°C.

La réaction est terminée après 4 heures de temps.

d) Les caractéristiques cinétiques de la réaction

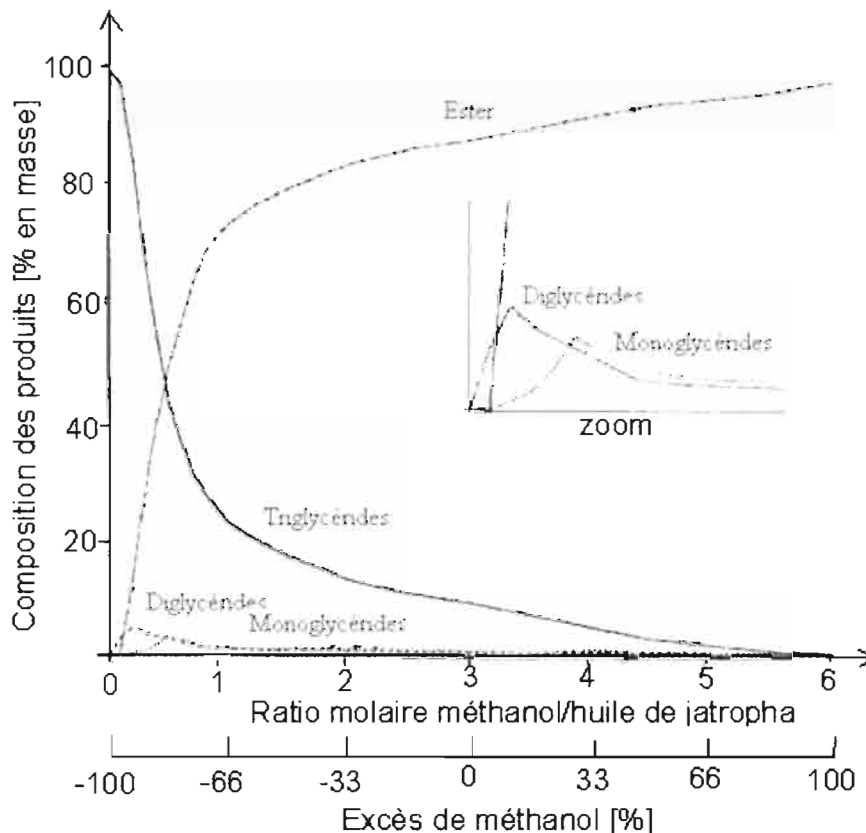


Figure II-5 : Composition des produits lors de la réaction de transestérification

Dans une première expérience on a utilisé d'une manière stœchiométrique le ratio molaire 3 :1. Ensuite on a essayé avec 4 :1 comme ratio molaire (33% d'excès de méthanol).

Enfin on a fait une dernière expérience avec 5 :1 pour ratio molaire (66% d'excès de méthanol).

De ces excès d'alcool, on a bénéficié d'une conversion de 90 à 96% qui est bonne.

Il est clair maintenant qu'un ratio théorique de 3 :1 et moins aurait pour conséquence de donner un rendement inférieur et ferait apparaître des produits intermédiaires tels que les monoglycerides, les diglycerides et les triglycérides.

Ce qui donnerait une conversion incomplète.

e) Effet de la stœchiométrie

Une des variables les plus influentes sur la formation de l'ester est le ratio molaire du méthanol par rapport à l'huile.

Chimiquement la stœchiométrie de la réaction exigerait 3 moles de méthanol pour une mole d'huile (ratio 3 :1) pour obtenir 3 moles d'esters d'acides gras et 1 mole de glycérol.

Le rendement serait inférieur dans ce cas comme le montre la courbe ci-dessus, comparé à celui obtenu avec le ratio 4 :1 que nous avons utilisé et qui correspond à 33% d'excès de méthanol.

f) Effet du temps de réaction

La durée de la réaction de transesterification de l'huile de jatropha a été très longue. Mais la formation de l'ester n'a duré que quelques minutes.

La réaction n'a pas été économique car du fait de la durée (4 heures de temps), le cout énergétique nécessaire pour le chauffage du mélange réactionnel est élevé.

g) Effet de la température de réaction

La température du milieu réactionnel doit être surveillée de près car elle doit tourner autour de la température d'ébullition du méthanol (60 à 70°C).

Cependant des chercheurs ont soutenu pour des raisons énergétiques que la réaction de transesterification peut se faire à la température ambiante mais cela prendrait beaucoup plus de temps.

Ce que nous n'avons pas essayé.

Par contre pour le faire il serait judicieux de trouver un compromis entre ce gain énergétique dans ce cas et le cout de chauffage dans l'autre cas.

h) Effet du catalyseur

Le catalyseur est l'un des facteurs les plus déterminants au cours de la réaction ; il augmente sa cinétique. Nous avons utilisé comme catalyseur l'hydroxyde de sodium (1,6% de la masse de l'huile utilisée).

Il a l'intérêt de coûter moins cher et il est majoritairement utilisé en travaux d'alcoolyse.

i) La séparation des phases

Le succès d'une réaction de transesterification est matérialisé par la présence de deux phases. C'est ce qui fait qu'après la réaction on, a à l'intérieur du réacteur, un mélange d'esters et de glycérol. Il ne faut surtout pas oublier d'arrêter l'agitation lors de la séparation.

Le glycérol qui a une densité plus grande que l'ester, est situé en bas de l'ampoule à décanter après plusieurs heures de décantation.

On voit nettement sur la figure ci-dessous la séparation des deux phases.

j) Le rinçage de l'ester obtenu

L'ester obtenu doit être lavé pour éliminer l'excès d'alcool et de catalyseur.

On place le biodiesel dans une ampoule à décanter et on verse lentement l'eau pour le rinçage (environ 100ml).

Cette étape se réalise délicatement, elle demande beaucoup de précautions avec moins d'agitation possible.

En effet la moindre agitation peut provoquer des émulsions qui affectent négativement le rendement de la synthèse.

Car la formation de ces émulsions peut représenter 15 à 20% de la masse de l'ester.

Ainsi la décantation continue à nouveau jusqu'à 24 heures environ, ensuite on récupère le biodiesel. L'alcool et le catalyseur résiduels se dissolvent dans la phase glycéro-aqueuse.

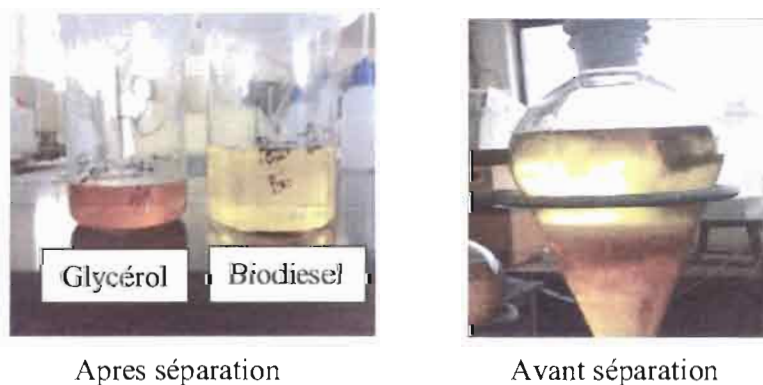


Figure II.6 : la séparation entre l'ester et le glycérol après réaction

Conclusion

Chimiquement la production de biodiesel comporte plusieurs étapes qui sont intrinsèquement liées. Malgré la délicatesse de ces opérations on est parvenu à produire du biodiesel à 96%.

L'excès de méthanol que nous avons utilisé, les six (6) paramètres que nous avons expliqués ci-dessus ainsi qu'une forte agitation de la solution lors de la réaction nous ont permis d'avoir une bonne conversion.

II-11) Principe de production industrielle du biodiesel à partir de l'huile de jatropha

a) Accessoires industrielles [1]

La production industrielle du biodiesel fait appel à un matériel technique de base notamment les réacteurs, les pompes, les bassins de décantation, les centrifugeuses, les colonnes de distillation et les réservoirs de stockage.

C'est au niveau du réacteur où la réaction de transesterification se produit.

On détermine le montant de chaque réactif avant son introduction dans le réacteur.

La composition chimique du mélange réactionnel change avec le temps.

Les paramètres clés qui déterminent la réaction de conversion sont : la température, la pression, le temps de réaction et le degré de mélange.

En général l'augmentation de la température augmente la vitesse de réaction et, par conséquent accélère la réaction de conversion.

On ferme ensuite le réacteur après avoir défini les conditions de réaction.

La séparation de biodiesel et de glycérine s'obtient en utilisant un bac de décantation.

On peut également utiliser une centrifugeuse à la place dans le cas où le bac de décantation est très cher.

Les centrifugeuses ont l'avantage d'augmenter le taux de la séparation et sont très adaptées à la séparation des liquides et des solides ainsi qu'à la séparation des liquides non miscibles de densités différentes.

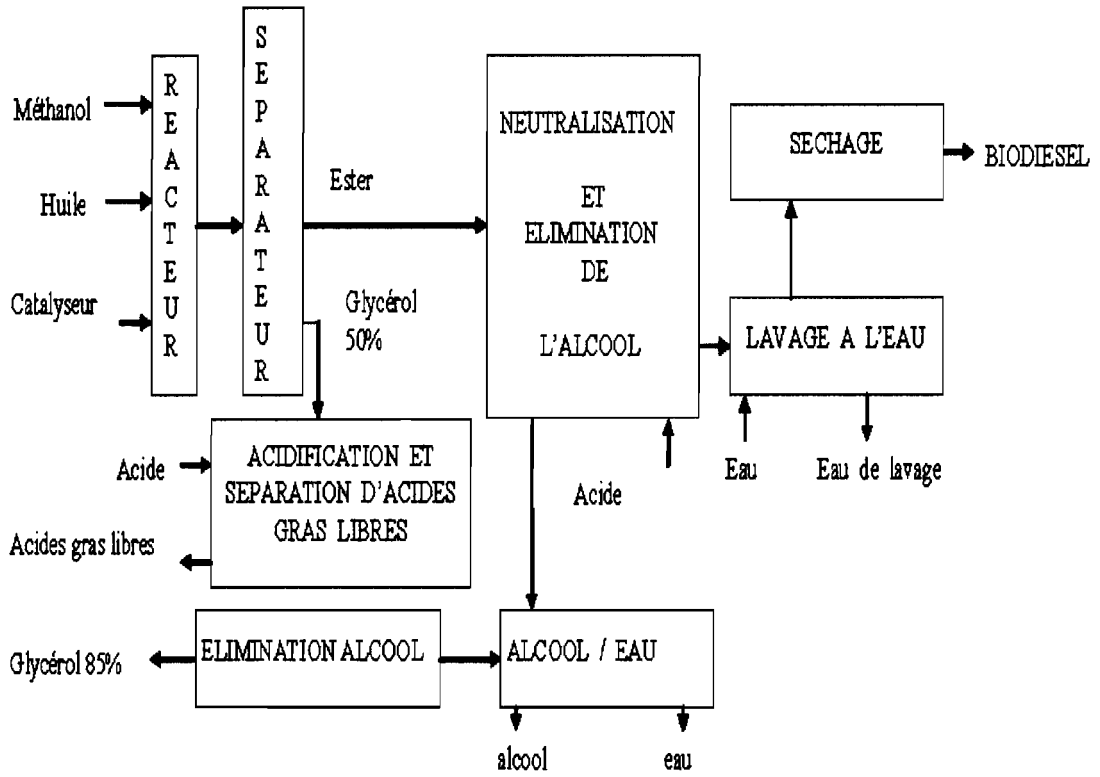


Figure II-7 : Principe de production du Biodiesel [3]

b) La production industrielle du biodiesel

La méthode la plus simple pour produire des esters d'alcool est de mélanger l'alcool, l'huile et le catalyseur dans un réacteur muni d'un réservoir à agitation.

Le réacteur peut être équipé d'un condenseur.

La température de fonctionnement est d'environ généralement égale à 340°K.

Le catalyseur le plus couramment utilisé est l'hydroxyde de sodium, l'hydroxyde de potassium est également utilisé.

Cette réaction est connue sous le nom de réaction de transesterification.

L'huile est d'abord ajoutée au système, suivie du catalyseur et du méthanol.

Le système est agité pendant le temps de réaction qui est environ égale à quatre (4) heures de temps.

Ensuite l'agitation est arrêtée.

Dans certains procédés on laisse le mélange réactionnel dans le réacteur dans le but d'obtenir une séparation des esters et de glycérol.

Dans d'autres procédés, le mélange réactionnel est pompé dans un décanteur ou séparé en utilisant une centrifugeuse.

L'alcool est séparé du glycérol et de l'ester en utilisant un évaporateur.

Les esters sont neutralisés, puis lavés en utilisant de la vapeur.

Ensuite on élimine les fines quantités de méthanol résiduelles, le sel et enfin on passe au séchage. Après toutes ces étapes en amont, le biodiesel obtenu est ensuite stocké.

Le glycérol à son tour est neutralisé et lavé avec de l'eau douce puis envoyé à la raffinerie.

Les acides gras libres contenus dans l'huile végétale vont réagir avec le catalyseur et vont s'éliminer sous forme de savon dans une réaction que nous avons déjà décrit plus haut.

Le taux d'acide gras acceptable dans ces systèmes est inférieur à 2%, il est de préférence inférieur à 1%.

Le processus est montré comme un réacteur en deux étapes.

La première étape consiste à récupérer la glycérine.

Une colonne de rectification conduit à la séparation de l'excédent de méthanol brut et de glycérine.

Dans la deuxième étape, une colonne de lavage permet de sortir l'ester méthylique en le purifiant des résidus de glycérine et de méthanol.

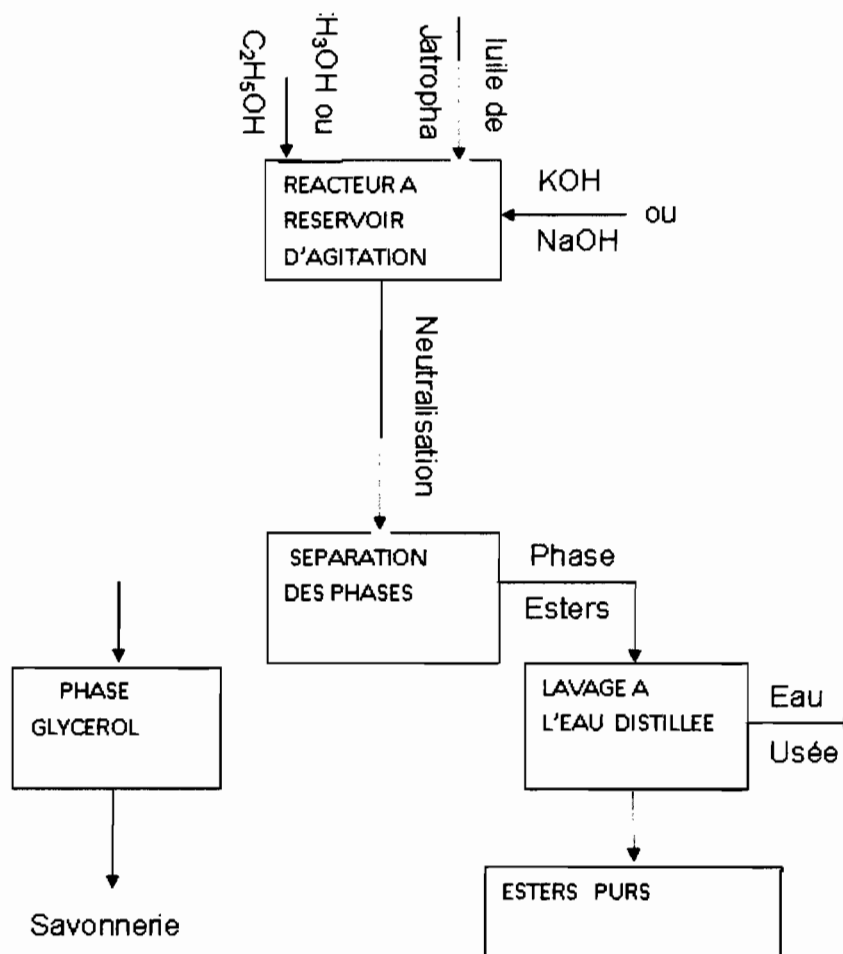


Figure II-8 : Principe de séparation des esters et du glycérol de l'huile de Jatropha [11]

Conclusion

Malgré les nombreux problèmes que nous avons rencontrés au cours de la réaction de transestérification on est qu'en même parvenu à notre fin autrement dit produire du biodiesel en petite quantité au laboratoire.

Cependant il est nécessaire de connaître tous les caractéristiques de ce biodiesel comme nous l'avons fait dans le cas de l'huile brute, c'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III : Caractérisation du Biodiesel

Introduction

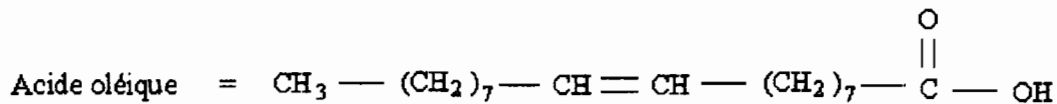
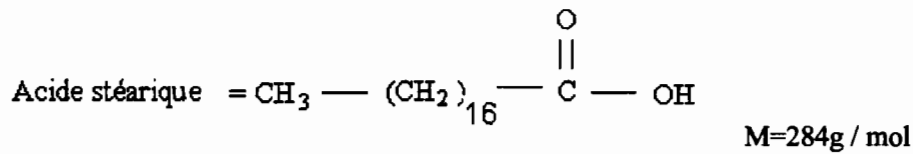
Les biodiesels sont caractérisés par plusieurs paramètres notamment la viscosité, la densité, l'indice de cétane, le point éclair, l'indice d'acidité, la composition en alcool, la masse molaire, la masse volumique, et les pouvoirs calorifiques.

Cependant les paramètres que nous allons étudier dans cette partie sont :

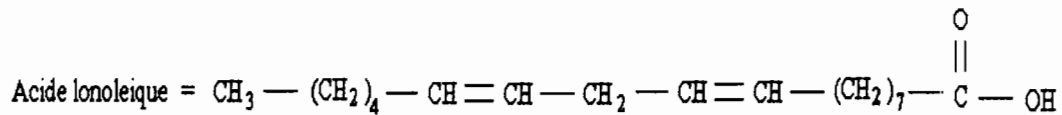
III- 1) Caractéristiques physico-chimiques :

III-1-a) Exemple de calcul de la masse molaire moyenne :

L'ester méthylique de l'huile de jatropha est constitué de : 7% d'acide stéarique ,50 % acide oléique et de 37% acide linoléique .Les autres acides sont présents sous forme de traces.

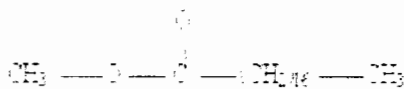


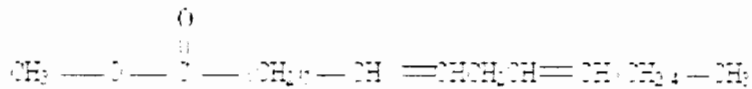
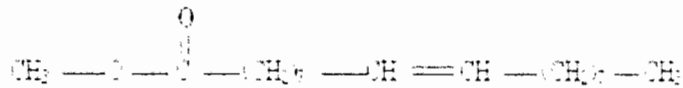
M=282 g/mol



M=280 g/mol

On peut considérer le biodiesel issu de l'huile de Jatropha comme un mélange des esters suivants :





$$\begin{cases} 7\% \text{ C}_{19}\text{H}_{38}\text{O}_2 & (1) & ; & M = (19 \times 12) + 38 + 32 = 298 \text{ g/mole} \\ 37\% \text{ C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2 & (2) & ; & M = (19 \times 12) + 36 + 32 = 296 \text{ g/mole} \\ 50\% \text{ C}_{19}\text{H}_{34}\text{O}_2 & (3) & ; & M = (19 \times 12) + 34 + 32 = 294 \text{ g/mole} \end{cases}$$

(Voir annexe A : tableau A2)

Soit une masse m_E d'ester :

Le nombre total de moles sera :

$$n_T = m_E \left(\frac{0,07}{298} + \frac{0,37}{296} + \frac{0,5}{294} \right)$$

$$n_T = 3,1855 \cdot 10^{-3} m_E$$

Les fractions molaires seront :

$$X_{(1)} = \frac{0,07}{298 \times 3,1855 \cdot 10^{-3}} = 7,3740\%$$

$$X_{(2)} = \frac{0,37}{296 \times 3,1855 \cdot 10^{-3}} = 39,2403\%$$

$$X_{(3)} = \frac{0,5}{294 \times 3,1855 \cdot 10^{-3}} = 53,3881\%$$

$$\bar{M}_E = \sum_{i=1}^3 X_i M_i$$

$$\bar{M}_E = (7,3740 \times 298) + (39,2403 \times 296) + (53,3881 \times 294) \times \frac{1}{100}$$

$$\bar{M} = 283,1668 \text{ g/mole}$$

La masse molaire de l'ester peut être assimilée à celle de l'huile, à 0,7470 % près.

III_ 1- b) Densité:

Biodiesel à 20° C (pycnomètre 104).

Tableau III.1 résultat de la mesure de la masse volumique

Masse à vide	Masse en charge de 25 ml	ρ (g/ml)
21,6 g	43,625 g	0,881

Nous avons déterminé également les densités et les viscosités de l'ester et celles du gazole pour les autres températures et nous avons les tableaux suivants :

Tableau III-2 : Viscosité et densité de l'ester méthylique de Jatropha

Température (°C)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Densité	0,881	0,870	0,864	0,860	0,850	0,843	0,835	0,820	0,820
Viscosité	10,31	9,43	6,93	3,5	3	3	3	3	3

Tableau III-3 : Viscosité et densité du gazole

Température (°C)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Densité	0,820	0,810	0,805	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800
Viscosité	4,03	4,03	3,5	3	3	3	3	3	3

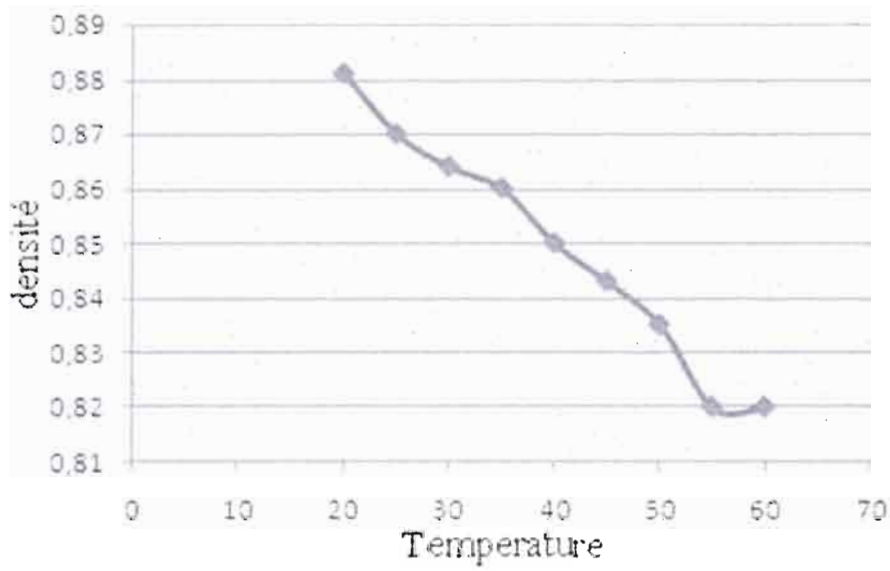


Figure III-1: densité de l'ester méthylique de l'huile de jatropha en fonction de la température

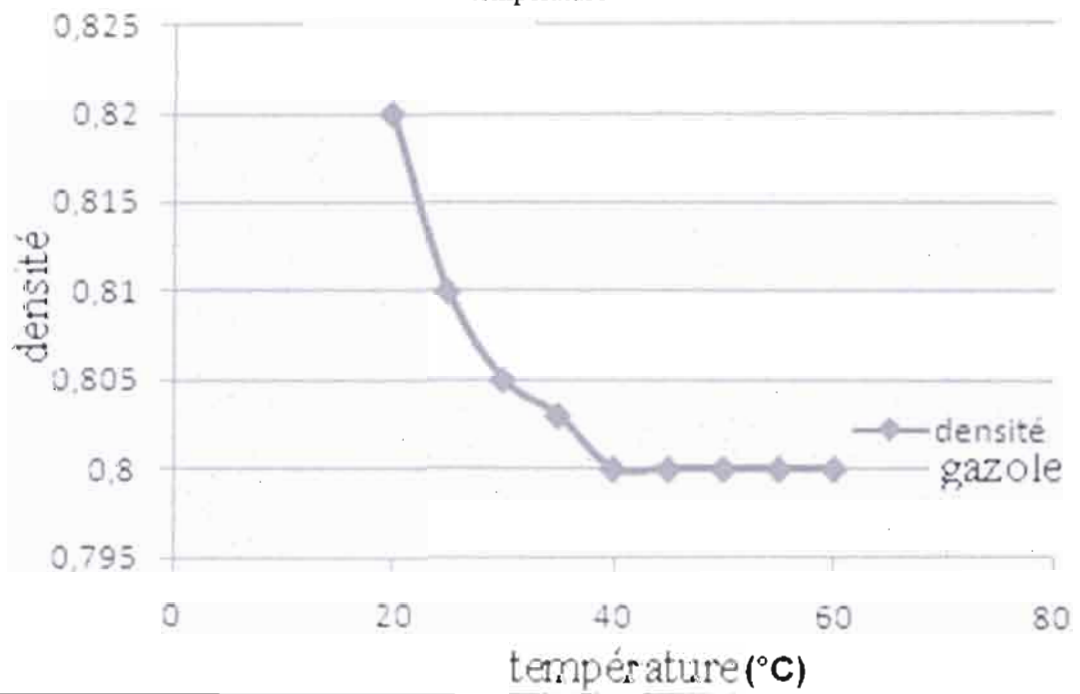


Figure III-2 : Densité du gazole en fonction de la température densité

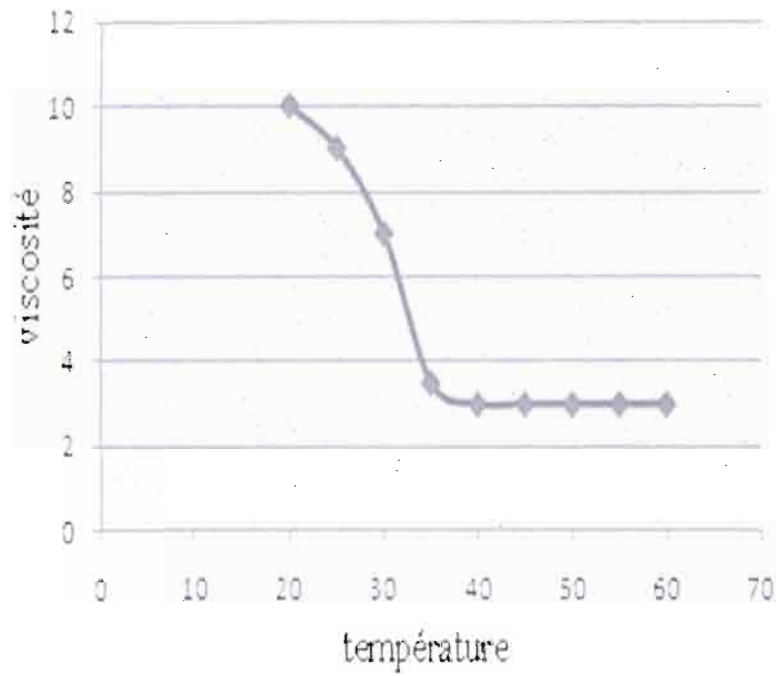


Figure III-3 : viscosité de l'ester méthylique de l'huile de jatropha en fonction de la température

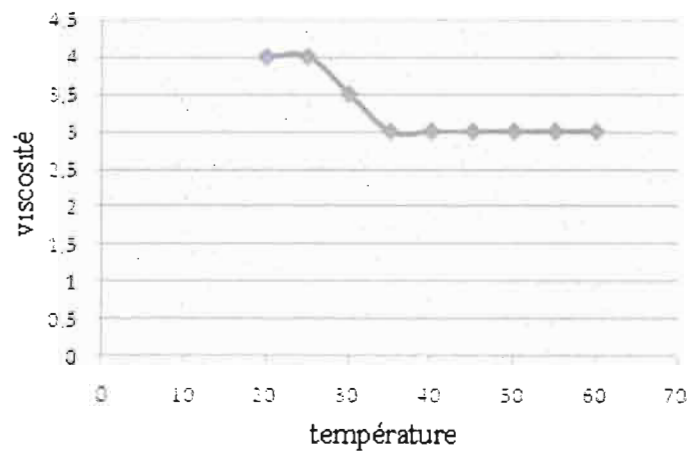


Figure III-4 : viscosité du gazole en fonction de la température

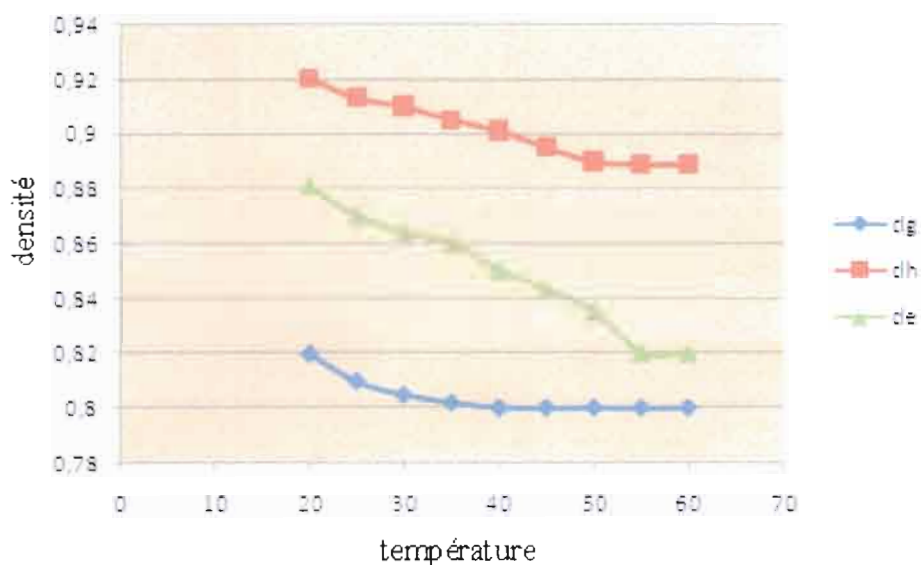


Figure III-5 : densité des divers carburants en fonction de la température

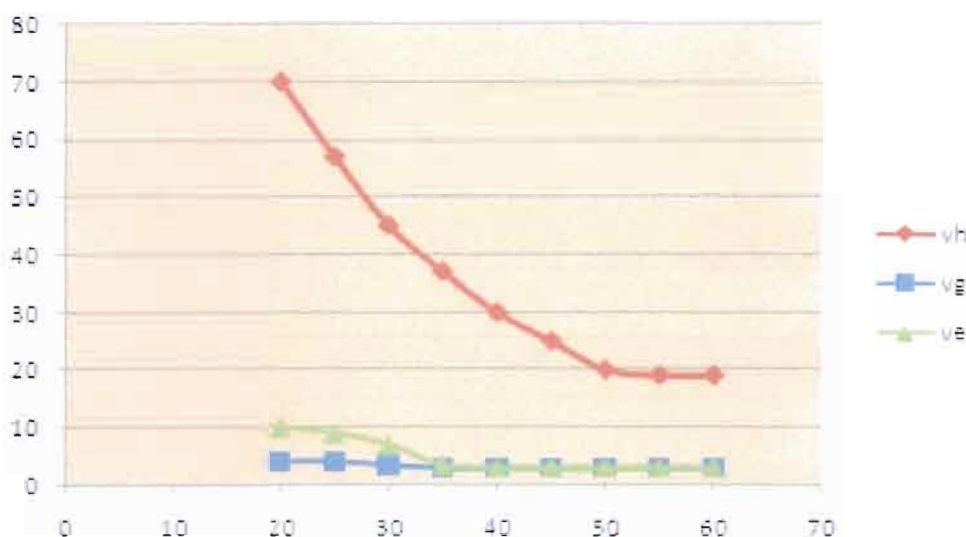


Figure III-6 : Viscosité des divers carburants en fonction de la température

Légende : dh=densité de l'huile, dg=densité du gazole, de=densité de l'ester

vh=viscosité de l'huile, vg=viscosité du gazole, ve=viscosité de l'ester

Interprétation

Les esters méthyliques de jatropha ont l'avantage d'avoir une densité et une viscosité beaucoup plus faibles que celles de l'huile que nous avons déterminées dans la première partie.

Comme la montre les courbes ci-dessus, la viscosité et la densité des esters varient inversement avec la température.

Comparées à celle du gazole, les courbes de viscosité de l'huile de jatropha et de ses esters ont des pentes beaucoup plus prononcées.

C'est ce qui justifie le rapprochement de ses courbes au dessus de 60°C.

Si nous considérons les courbes de densité, on voit qu'à partir de 40°C, la densité du gazole ne varie plus alors que celle des esters subissent une forte décroissance.

Ce qui est très favorable pour la qualité de l'injection de l'huile et de ses esters au niveau de la chambre de combustion.

III-1- d) Indice de cétane

L'indice de cétane sert à apprécier l'aptitude à l'auto inflammation d'un gazole. C'est ce qui a été dit plus haut.

La façon la plus simple de le déterminer est l'application de la formule de l'équation de Klopfenstein [13].

Cette équation est fonction du nombre de doubles liaisons et du nombre de carbone.

$$I_{\text{cétane}} = 58,1 + 2,8 \cdot \frac{n-2}{2} - 15,9 \cdot N \quad (\text{II} - 1)$$

Elle peut s'exprimer également en fonction de l'indice de saponification et de l'indice d'iode qui ont été déterminé expérimentalement plus haut.

Dans ce cas on obtient l'expression suivante :

$$I_{\text{cétane}} = 463 - \frac{2-22}{n} - 0,225 \cdot y \quad (\text{III} - 2)$$

n= nombre de carbone,

N=nombre de double liaisons,

x= indice de saponification,

y=indice d'iode.

Puisque l'ester méthylique de jatropha comporte 3 doubles liaisons et qu'il compte 57 carbones, on obtient un indice égal à 51.

Cette valeur est très proche de l'indice de cétane d'un carburant diesel normal (52) et même plus élevé que celle de certains carburants diesels.

III- 1- e) Indice d'acidité

Après la réaction de transesterification on a obtenu des esters avec une bonne conversion (90 à 96%).

On a déterminé l'indice d'acidité de ces esters en procédant de la même manière que dans le cas de l'huile.

Les résultats expérimentaux montrent qu'il est compris entre 0,03 et 0,05.

Ceci confirme ce que nous avons dit plus haut sur la réaction de transesterification c'est-à-dire qu'elle raffine l'huile de ses acides gras libres.

Elle diminue ainsi son taux d'acidité ; c'est ce qui justifie ces valeurs très différentes.

III-1- h) La quantité de chaleur consommée par un litre d'ester méthylique

Pour une mole d'ester méthylique, il faut 667,8 kJ d'énergie, soit $Q_m = \frac{667,8}{M}$ kJ/g.

Soit ρ la masse volumique de l'ester à 20°C. ($\rho = \frac{g}{l}$)

$$\text{On aura} \quad Q_v = \rho \frac{667,8}{M} \quad (\text{kJ/l.})$$

De plus, il faut au maximum une heure pour une réaction complète.

$$\text{Dans ce cas,} \quad P = \frac{667,8}{3600 \times M} \rho \cdot 10^3 \quad (\text{W/l}) = \frac{185,5}{M} \rho \quad (\text{W/l})$$

En Wattheure, cette puissance correspondra à :

$$P' = \frac{185,5}{M} \rho \times 1h = 185,5 \frac{\rho}{M} \quad \text{Wh/l}$$

$$P' = 185,5 \frac{\rho}{M} \quad \text{Wh/l}$$

Pour l'ester méthylique d'huile de jatropha,

$$\text{On aura} \quad P = \left(\frac{185,5 \times 881}{283,1668} \right) = 577,1351 \quad \text{Wh/l}$$

III_ 1- i) Les pouvoirs calorifiques

Le pouvoir calorifique massique représente la quantité d'énergie par unité de masse ou de volume du carburant lors de la réaction chimique de combustion complète conduisant à la formation de CO₂ et de H₂O.

Le carburant est pris, sauf mention contraire à une température de référence, généralement 25°C. L'air et les produits de combustion sont considérés à cette même température.

On fait la distinction entre le pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI) selon que l'eau obtenue par combustion se trouve à l'état liquide ou à l'état gazeux.

La seule grandeur véritablement utile en pratique est le PCI, puisque, dans les produits de combustion des moteurs et des brûleurs, l'eau est rejetée sous forme de vapeur.

1) Le Pouvoir calorifique inférieur

Méthode de détermination :

Pour déterminer le PCI massique, il faut connaître la teneur massique en hydrogène du carburant.

Si W_H désigne cette teneur en pourcentage, la masse d'eau formée lors de la combustion du carburant s'écrit :

$$m_{H_2O} = \frac{\bar{M}}{2} W_H \cdot M_{H_2O} \quad (\text{III} - 3)$$

$$\bar{M} = \frac{(\rho V_i + \rho_i V_i) \times M_i \times M_i}{M_i \rho V_i + M_i \rho_i V_i} \quad (\text{III} - 4)$$

avec i et i' pour un mélange de deux corps donnés.

M_{H_2O} = masse molaire de l'eau (= 0,018 kg)

En prenant en compte l'enthalpie massique de vaporisation Δh de l'eau à 25°C, soit 2358 kJ/kg, on obtient (III - 5) :

$$PCI_m = PCS_m - \frac{\bar{M}}{2} W_h M_{H_2O} \Delta h \quad (\text{III} - 5)$$

$$PCI_m = PCS_m - 21,22 \bar{M} W_h \quad (\text{III} - 6)$$

PCI_m et PCS_m exprimée en kJ/kg.

2) Le pouvoir calorifique supérieur

a) *Bombe calorimétrique, principe de la mesure [7] :*

Une masse connue de la substance ou du matériau est introduite dans la bombe calorimétrique (cylindre en acier). On y installe un dispositif de mise à feu constitué d'électrodes et on procède au remplissage de la bombe en oxygène sous forte pression.

Elle est placée ensuite dans un calorimètre rempli d'eau dont on peut mesurer la température.

Le dispositif de mise à feu est par la suite connecté et l'agitation mise en marche.

On déclenche la mise à feu et on lit la variation de température de l'eau.

L'acide benzoïque est utilisé comme étalon et par comparaison, on déduit le pouvoir calorifique supérieur de l'échantillon inconnu

b) Mode Opératoire :

Placer quelques grammes du combustible dans une cuvette prévue à cet effet et la mettre en place. Relier les électrodes avec du fil en alliage de nickel-chromium ou même en platine.

Placer 10 ml d'eau distillée dans la bombe calorimétrique et fermer.

Remplir le seau de 2 l d'eau et démarrer l'agitateur.

Pendant 5 mn, noter l'évolution de la température de l'eau.

Mettre à feu et noter l'évolution de la température de l'eau à partir de la sixième minute jusqu'à la cinquième minute après la première valeur de constance.

c) Calcul du pouvoir calorifique supérieur [7]

Evolution de la température

Soient : a = instant de mise à feu

b = temps au bout duquel la montée de température a atteint 60 % de sa valeur totale

c = instant du début de la période dans laquelle la température commence à être constante

ta = la température à l'instant de mise à feu

tc = température à l'instant c

r'₁ = taux d'accroissement de la température durant les cinq (5) premières minutes avant la mise à feu

r'₂ = taux d'accroissement de la température pendant cinq minutes après l'instant C.

Si la température chute au contraire, r'₂ devient négatif.

C₁ = volume (ml) de la solution standard alcaline utilisée pour titrer l'acide.

C₂ = pourcentage de soufre dans l'échantillon

C₃ = longueur du fil fusible (cm) consommée lors de la mise à feu.

W = énergie équivalente du calorimètre ou chaleur spécifique du calorimètre

m = masse de l'échantillon brûlé

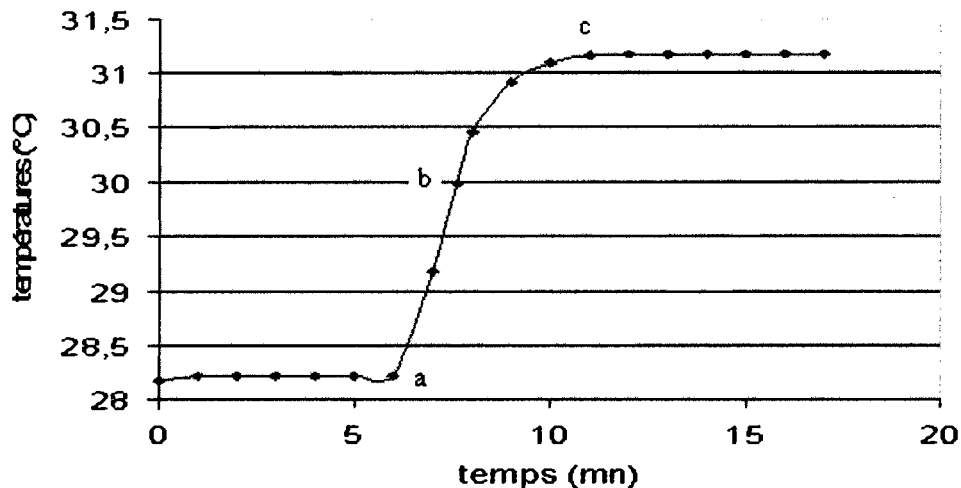


Figure III-7 : Courbe de relevés calorimétriques : exemple de l'acide benzoïque

- **L'accroissement de température**

L'accroissement net de température corrigé t est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta T = T_c - T_a - r_1'(b - a) - r_2'(c - d) \quad (\text{III} - 7)$$

- **Corrections thermochimiques**

e_1 = correction en calories pour la chaleur de formation de l'acide nitrique (HNO_3)

$e_1 = C_1$ si 0,0725 N est utilisé pour la titration

e_2 = correction en calories pour la chaleur de formation de l'acide sulfurique (H_2SO_4)

$$e_2 = (14 \times C_2 \times m)$$

e_3 = correction en calories pour la chaleur de combustion du fusible

= 2,3 C_3 si on utilise le nickel-chromium

= 2,7 C_3 si on utilise de l'acier galvanisé

- **Le pouvoir calorifique supérieur**

$$PCS_1 = \frac{\Delta T \times W - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (\text{III} - 8)$$

d) Standardisation du calorimètre

Il s'agit de déterminer la chaleur spécifique W du calorimètre en connaissant l'évolution de la température après combustion d'une masse m d'acide benzoïque (voir formule (III-7)).

$$W = \frac{\Delta h \times m + C_1}{\Delta T} \quad (\text{III - 9})$$

Δh = Chaleur de combustion de l'acide benzoïque ($6318 \text{ cal/g} = 26452,2024 \text{ kJ/kg}$)

m = masse de l'échantillon brûlé

C_1 = correction due à la chaleur de combustion du fil : $C_1 = 2,3 \text{ cal/cm}$ (nickel – chromium)

Pour cela nous avons brûlé 1,1553g d'acide benzoïque et avons relevé l'évolution de la température dans le calorimètre.

Nous avons aussi procédé à la combustion de 1,4302 g d'ester dans les mêmes conditions et les résultats fournis ci-après ont permis de calculer les pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur de cet ester.

Résultats :**Acide benzoïque**

m= 1,15 34 g

 $L_f = 10 \text{ cm}$ $L_c = 6 \text{ cm}$ Tableaux III.4 : Relevés de mesures de températures et calcul de ΔT pour l'acide benzoïque

temps	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Températures	26,73	26,73	26,73	26,73	26,73	26,73	26,73	26,75	26,80	26,85	26,86	26,90	26,92	26,93	26,95	26,95	27,03

Masses (g)	$L_{\text{fus-}}^{\text{cons-}}$ (cm)	V KOH (ml) ; 0.0725 N	T_a (°C)	T_c (°C)	b (mn)	r_1 (°C/mn)	r_2 (°C/mn)	c (mn)	ΔT (°C)
1,4302	6	9,10	28,25	31,18	7,6375	0,008	0	12	2,92

 $L_{\text{fus-}}^{\text{cons-}}$: longueur de fusible consommée

« valeurs tirées des expériences réalisées avec la bombe calorimétrique 1341, PARR instrument Co »

B 100

m = 1,5590g

 $L_f = 10 \text{ cm}$ $L_c = 7 \text{ cm}$ Tableaux III.5 : Relevés de mesures de températures et calcul de ΔT pour le B100

temps	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Températures	27,09	27,09	27,09	27,09	27,09	27,09	27,09	27,40	27,40	27,50	27,60	27,69	27,75	27,78	27,79	27,80	27,80

Mélanges B_i	Masses (g)	$L_{\text{fus-}}^{\text{cons-}}$ (cm)	V KOH (ml) ; 0.0725 N	T_a (°C)	T_c (°C)	b (mn)	r_1 (°C/mn)	r_2 (°C/mn)	c (mn)	ΔT (°C)	W_h	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)
B_{100}	1,5590	7	14,214	27,32	32,88	7,3348	0,016	-0,004	12	5,55734	11 ,7155	41700,337	28695,753

B20 :

$m = 0,8644 \text{ g}$

$L_f = 10 \text{ cm}$

$L_c = 7 \text{ cm}$

Tableaux III-6 : Relevés de mesures de températures et calcul de ΔT pour le B100

temps	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Température	29,48	29,48	29,48	29,48	29,48	29,48	29,48	32,60	32,73	32,84	33,02	33,37	33,51	33,64	33,92	34,06	34,12	35

« valeurs tirées des expériences réalisées avec la bombe calorimétrique 1341, PARR instrument Co »

Conclusion

Le pouvoir calorifique est un critère prépondérant dans la caractérisation des biodiesels, cependant notre étude ne saurait être complète sans qu'on ait vu la combustion des esters et du gasoil.

Pour cela, nous étudierons dans le chapitre suivant la combustion de l'ester méthylique de l'huile de jatropha puis nous la comparerons avec celle du gasoil.

Chapitre IV : Théorie sur la combustion de Biodiesel produit à partir de l'huile de Jatropha

Introduction

La combustion est un processus chimique qui libère de l'énergie à partir d'un mélange de combustible et de l'air.

Elle n'est possible qu'en présence simultanée de carburant, d'oxygène et de chaleur.

La combustion est une réaction chimique au cours de laquelle de certaines matières d'autres matières sont produites.

Il s'agit d'une combinaison de matières inflammable avec l'oxygène de l'air accompagné de dégagement de chaleur.

La quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une mole d'hydrocarbure en CO₂ et en eau (H₂O) est appelée la chaleur de combustion.

La combustion en CO₂ et en eau est caractéristique des composés organiques ; dans des conditions spéciales, il est utilisé pour déterminer leur teneur en hydrogène et de carbone.

Lors de la combustion la partie combustible du carburant est subdivisée en une partie instable et un résidu solide.

Pendant le chauffage il s'évapore avec une partie de carbone sous forme d'hydrocarbures, de gaz combustibles et du CO libéré par la dégradation thermique du combustible.

Le CO est principalement formé par les réactions suivantes :

- ✓ Réduction des émissions de CO₂ qui n'ont pas réagit avec C,
$$\text{CO}_2 + \text{C} \longrightarrow 2\text{CO},$$
- ✓ Dégradation des fragments de carbonyle (-CO) dans les molécules de carburant à 600 à 750 K.

Le processus de combustion est déclenché en chauffant le combustible au dessus de sa température d'inflammation en présence d'oxygène ou de l'air.

Si la combustion complète se produit, les éléments combustibles (C, H et S) réagissent avec la teneur en oxygène de l'air pour former du CO₂, H₂O et surtout du SO₂.

Par contre si on n'a pas assez d'oxygène ou que le mélange carburant-air est insuffisant, alors les gaz seront partiellement refroidis en dessous de la température d'inflammation et que la combustion du processus demeurera incomplète.

La mesure standard de l'énergie d'un combustible est son pouvoir calorifique (HV :heating value),parfois appelé chaleur de combustion.

Dans ce travail, nous examinons la combustion selon trois cas de figure, à savoir :

- en condition stœchiométrique ;

- avec déficit d'air ;
- avec excès d'air.

Nous étudions les chaleurs de réactions selon la loi de HESS et les masses des différents produits de combustion.

Richesse du mélange air-carburant

Dans les applications industrielles de la combustion (moteurs, turbines, foyers, etc...), les conditions de combustion ne sont pas nécessairement celles correspondant à la stœchiométrie. Elles se caractérisent soit par un excès, soit par un défaut de carburant par rapport à l'oxygène.

La composition du milieu réactionnel s'exprime alors par la richesse ϕ , définie par la relation :

$$\phi = \frac{(m_c / m_a)_{re}}{(m_c / m_a)_{st}} \quad (IV - 1)$$

$\left(\frac{m_c}{m_a}\right)_{re}$: Rapport des masses respectives m_c et m_a de carburant et d'air effectivement utilisées.

$\left(\frac{m_c}{m_a}\right)_{st}$: Rapport des masses respectives m_c et m_a de carburant et d'air à la stœchiométrie

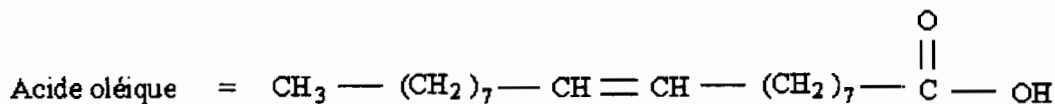
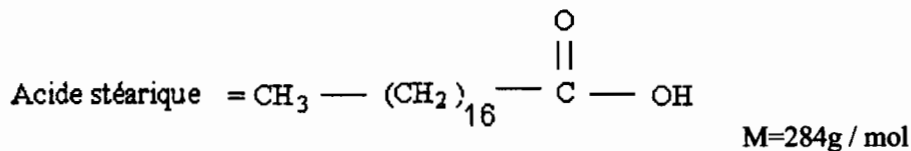
La richesse s'écrit également en fonction du rapport stœchiométrique r .

$$\phi = (q_{m,c} / q_{m,a}) \cdot r \quad (IV - 2)$$

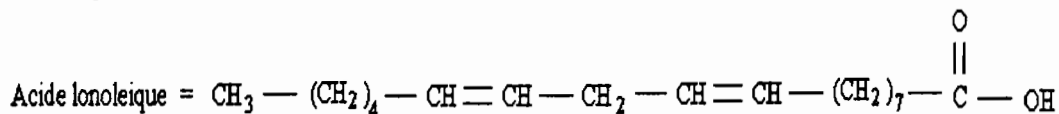
$q_{m,a}$ = débit - masse d'air

$q_{m,c}$ = débit - masse de carburant

$$r = \left(\frac{m_a}{m_c}\right)_{st}$$

Identification des composés

M=282 g/mol



M=280 g/mol

IV_ 19) Energie de Formation, loi de HESS [15, 16, 8]

La chaleur de formation peut être calculée à partir des énergies de liaison en considérant la structure chimique du composé.

Nous allons déterminer l'énergie nécessaire qu'il faut fournir à chaque molécule de l'ester de l'huile de jatropha pour rompre ces liaisons : c'est l'énergie d'atomisation.

Ainsi nous allons utiliser la règle générale de la loi de HESS qui consiste à faire la différence entre la somme des enthalpies de formation des produits et la somme des enthalpies de formation des réactifs.

$$\Delta H_f = \sum \Delta H_a - \sum \Delta H(x-y)_R - \Delta H_{res} - \sum \Delta H_{latente} \quad (IV - 3)$$

Quelques énergies d'association, d'atomisation et de résonance :

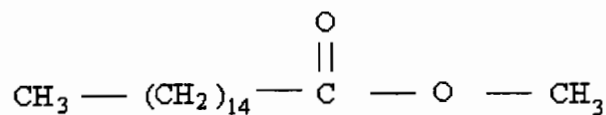
Tableau IV.1 valeurs des énergies de liaison [17] :

Atomisation de liaisons	Energie kJ/mol	Association de liaisons	Energie kJ/mol	Résonance	Energie (kJ/mol)
H-H	435,4	C-H	414,5	Benzène	150,4

C (graphite)	717,2	N-H	359,5	(C ₆ H ₆)	
		O-H	428,7	Naphtalène	255,4
O = O	498,2	H-OH	497,5	(C ₁₀ H ₈)	
N≡N	946,2	C - O	351,7	CO ₂	137,9
		C = O	698,1	groupe COOH	117
		C - C	347,5		
		C = C	615,5		
		C ≡ C	812,2		

Les énergies de formation des esters étudiés :

➤ Ester d'acide stearique :



$$\Delta H_f = 19 \Delta H_a [C_{(\text{graphite})}] + 19 \Delta H_a [H - H] + \Delta H_a [O = O] - 36 \Delta H_{dis} [C - H] -$$

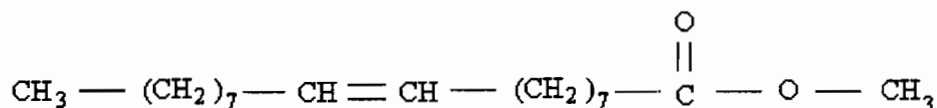
$$17 \Delta H_{dis} [C - C] - \Delta H_{dis} [C = O] - 2 \Delta H_{dis} [C - O]$$

AN :

$$\Delta H_f = [19 \times 717,2] + (19 \times 435,4) + (498,2) - (36 \times 414,5) - 17(347,5) - (698,1) - (2 \times 351,7)$$

$$\Delta H_f = 166,6 \text{ kJ/mol.}$$

➤ Ester d'acide Oléique



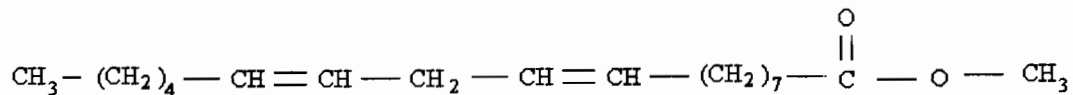
$$\Delta H_f = 19 \Delta H_a [C_{(\text{graphite})}] + 18 \Delta H_a [H - H] + \Delta H_a [O = O] - 36 \Delta H_{dis} [C - H]$$

$$-16 \Delta H_{dis} [C-C] - \Delta H_{dis} [C=O] - 2 \Delta H_{dis} [C-O]$$

$$AN: \Delta H_f = (19 \times 717,2) + (18 \times 435,4) + 498,2 - (36 \times 414,5) - (16 \times 347,5) - 698,1 - (2 \times 351,7)$$

$$\Delta H_f = +78,7 \text{ kJ/mol}$$

➤ Ester d'acide linoléique :



$$\Delta H_f = 19 \Delta H_a [C_{(\text{graphite})}] + 17 \Delta H_a [H-H] + \Delta H_a [O=O] - 34 \Delta H_{dis} [C-H]$$

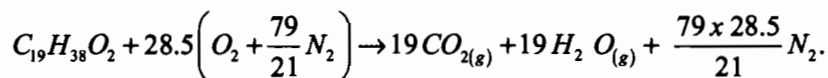
$$-15 \Delta H_{dis} [C-C] - \Delta H_{dis} [C=O] - 2 \Delta H_{dis} [C-O] - 2 \Delta H_{dis} [C=C]$$

$$\Delta H_f = (19 \times 717,2) + (17 \times 435,4) + 498,2 - (34 \times 414,5) - (15 \times 347,5) - 698,1 - (2 \times 351,7) - (2 \times 615,5)$$

$$\Delta H_f = -411,2 \text{ kJ/mol.}$$

IV- 2) la combustion stœchiométrique

➤ Ester d'acide stéarique :



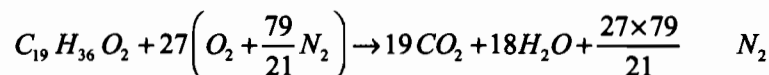
La chaleur de réaction est, selon la loi de HESS :

$$\Delta H_R = \sum \Delta H_{fp} - \Delta H_{fr} \quad (\text{Voir annexe A, tableau A1})$$

$$\Delta H_R = (19 \times -393,5) + (19 \times -241,8) - (166,6)$$

$$\Delta H_R = -12237,3 \text{ kJ/mol}$$

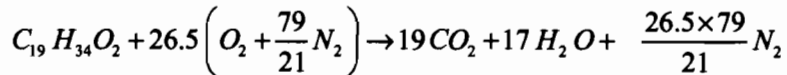
➤ Ester d'acide oléique:



$$\Delta H_R = (19 \times -393,5) + (18 \times -241,8) - (+78,7)$$

$$\Delta H_R = -11907,6 \text{ kJ/mol}$$

➤ Ester d'acide linoléique



$$\Delta H_R = (19 \times -393,5) + (17 \times -241,8) - (-411,2)$$

$$\Delta H_R = -11175,9 \text{ kJ/mol}$$

En considérant les fractions molaires des constituants, l'énergie totale libérée par la combustion stœchiométrique d'une mole d'ester d'huile de jatropha sera :

$$Q = \sum_{i=1}^3 X_i \Delta H_{Ri}$$

$$\text{AN} \quad Q = -(0,073740 \times 12237,3) - (0,392403 \times 11907,6) - (0,533881 \times 11175,9)$$

$$Q = -11541,557 \text{ kJ/mol} \quad ; \quad m_{CO_2} = (0,073740 \times 17) + (0,392403 \times 19) + (0,533881 \times 19)$$

$$\text{Soit} \quad m_{CO_2} = \frac{44 \times 18,852}{283,1668} \text{ g/g}$$

$$m_{CO} = 0$$

$$m_N = \frac{26,84 \times 79}{21 \times 283,1668} \text{ g/g}$$

IV_ 3) La combustion avec excès d'air : mélanges pauvres $\phi < 1$

Dans cette partie, nous supposons que le gaz restant (O_2) aura gagné en température et sa capacité calorifique à pression constante sera de la forme $C_p = a + Tb + CT^2$

Pour le dioxygène [2]:

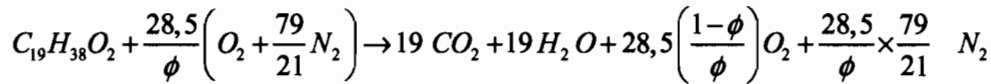
$$a = 26,2 \text{ J/mol.K}$$

$$b = 11,493 \cdot 10^{-3} \text{ J/mol.K}$$

$$c = -3,222 \cdot 10^{-6} \text{ J/mol.K}$$

$$R = 8,32 \text{ J/mol.K}$$

➤ Ester d'acide stéarique



Dans ce cas, comme dans les cas qui suivront, nous déduisons de la chaleur de réaction, le gain en enthalpie de l'O₂ pour des températures entre 25-29°C.

Nous aurons alors à déduire :

$$\bar{Q} = \int_{T_1}^{T_2} (a + bT + cT^2) .dT$$

$$\bar{Q} = [aT]_{T_1}^{T_2} + \left[\frac{b}{2} T^2 \right]_{T_1}^{T_2} + \left[\frac{c}{3} T^3 \right]_{T_1}^{T_2}$$

AN.

$$\bar{Q} = [26,2 \times (29 - 25)] + [0,5 \times 11,493 \times 10^{-3} \times (29^2 - 25^2)] + [(1/3) \times -3,222 \times 10^{-6} \times (29^3 - 25^3)]$$

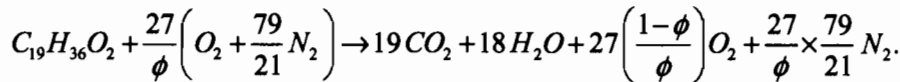
$$Q = 106,032 \text{ J/mol.}$$

La chaleur de réaction sera alors :

$$\Delta H_R = (-19 \times 393,5) + (19 \times 241,8) + 166,6 + 28,5 \left(\frac{1-\phi}{\phi} \right) \times 106,032 \times 10^{-3}$$

$$\Delta H_R = -2715,7 + 3,022 \left(\frac{1-\phi}{\phi} \right) \text{ kJ/mol}$$

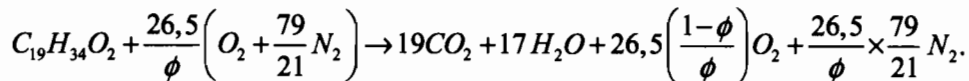
➤ Ester d'acide Oléique :



$$\Delta H_R = (-19 \times 393,5) + (-18 \times 241,8) + 27 \left(\frac{1-\phi}{\phi} \right) \times 106,032 \times 10^{-3} - 78,7$$

$$\Delta H_R = 11907,6 + 2,863 \left(\frac{1-\phi}{\phi} \right) \text{ kJ/mol}$$

➤ Ester d'acide linoléique.



$$\Delta H_R = 11 175,9 + 2,81 \left(\frac{1-\phi}{\phi} \right) \text{ kJ/mol}$$

Dans ces conditions la fonction approchée de la chaleur de réaction d'une mole d'ester méthylique sera :

$$Q_T = \sum_{i=1}^3 X_i Q_i$$

$$Q_T = 10438,9229 + \left(\frac{1-\phi}{\phi}\right) \cdot (0,073740 \times 3,022 + 0,392403 \times 2,863 + 0,533881 \times 2,81)$$

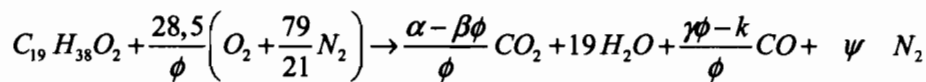
$$Q_T = 10438,9229 + 2,846 \times \left(\frac{1-\phi}{\phi}\right) = \frac{10436,0769\phi + 2,846}{\phi} \text{ kJ/mol.}$$

IV- 4^o) Combustion avec déficit d'air = Mélange riche : $\phi > 1$

Ici, l'hypothèse est que la combustion libère du dioxyde de carbone, de l'eau et du monoxyde de carbone, le diazote étant considéré comme gaz inerte.

Exprimons les chaleurs théoriques de réactions :

➤ Ester d'acide stéarique

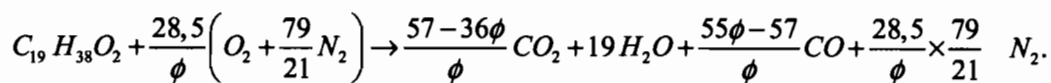


Equation générale d'équilibrage :

$$\begin{cases} 19 = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + \gamma - \frac{k}{\phi} & (1) \\ 2 + \frac{28,5 \times 2}{\phi} = \frac{2\alpha}{\phi} - 2\beta + \gamma - \frac{k}{\phi} + 19 & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} (2)-(1) \left\{ \begin{aligned} 2 - 19 + \frac{49}{\phi} &= \frac{\alpha}{\phi} - \beta + 19 \Rightarrow \frac{\alpha}{\phi} - \beta = \frac{57 - 36\phi}{\phi} \\ 38 - 2 - \frac{57}{\phi} &= \frac{-k}{\phi} + \gamma - 19 \Rightarrow \gamma - \frac{k}{\phi} = 55 - \frac{57}{\phi} \end{aligned} \right. \\ 2 \times (1) - (2) \end{cases}$$

d'où



$$\text{Condition : } \begin{cases} 57 - 36\phi > 0 \\ 55\phi - 57 > 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \phi < \frac{57}{36} \\ \phi > \frac{57}{55} \end{cases} \Rightarrow \phi \in \left] \frac{57}{55}; \frac{57}{36} \right[$$

Dans ce cas, la chaleur de réaction à la température standard sera :

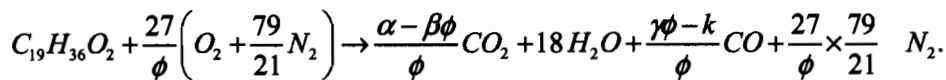
$$\Delta H_R = 393,5 \left(\frac{57-36\phi}{\phi} \right) - (19 \times 241,8) - \frac{55\phi-57}{\phi} \times 110,5 + 166,6$$

$$\Delta H_R = \frac{-57}{\phi} (393,5 - 110,5) + (32 \times 393,5) - (57 \times 110,5) - (19 \times 241,8) + 166,6$$

$$\Delta H_R = \frac{28728 - 20243,5\phi}{\phi} - (4760,8)$$

$$\Delta H_R = \frac{28728\phi - 25004,3}{\phi} \quad \text{kJ/mol}$$

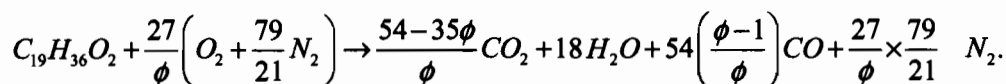
➤ Ester d'acide Oléique :



$$\begin{cases} 19 = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + \gamma - \frac{k}{\phi} & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2 + \frac{54}{\phi} = \frac{2\alpha}{\phi} - 2\beta + 18 + \gamma - \frac{k}{\phi} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \text{-(1)+(2)} \quad & \begin{cases} 2 + \frac{54}{\phi} - 19 = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + 18 & \Rightarrow \frac{\alpha}{\phi} - \beta = \frac{54}{\phi} - 35 & \Rightarrow \frac{\alpha}{\phi} - \beta = \frac{54 - 35\phi}{\phi} \\ 2(1)-(2) \quad & \begin{cases} 38 - 2 - \frac{54}{\phi} = -18 + \gamma - \frac{k}{\phi} & \Rightarrow \frac{\gamma\phi}{\phi} = 54 \left(\frac{\phi-1}{\phi} \right) \end{cases} \end{cases} \end{aligned}$$



$$\text{condition} \quad \begin{cases} 54 - 35\phi > 0 \\ \phi - 1 > 0 \end{cases} \Rightarrow \phi \in \left] 1; \frac{57}{35} \right[$$

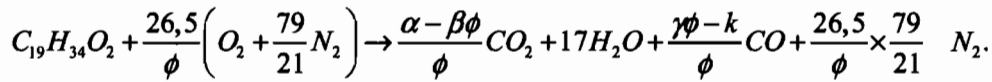
$$\Delta H_R = -393,5 \left(\frac{54 - 35\phi}{\phi} \right) - (18 \times 241,8) - 54 \left(\frac{\phi-1}{\phi} \right) \times 110,5 - 78,7$$

$$\Delta H_R = -\frac{54}{\phi} (393,5 - 110,5) + (35 \times 393,5) - (54 \times 110,5) - (18 \times 241,8) - 78,7$$

$$\Delta H_R = -\frac{15282}{\phi} + 3374,1 \quad \text{kJ/mol}$$

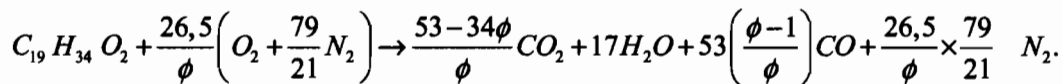
$$\Delta H_R = \frac{3374,1\phi - 15282}{\phi} \quad \text{kJ/mol}$$

➤ Ester d'acide linoléique :



$$\begin{cases} (1) & 19 = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + \gamma - \frac{k}{\phi} \\ (2) & 2 + \frac{53}{\phi} = \frac{2\alpha}{\phi} - 2\beta + 17 + \alpha - \frac{k}{\phi} \end{cases}$$

$$\begin{cases} (2)-(1) & \left\{ 2 + \frac{53}{\phi} - 19 = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + 17 \Rightarrow \frac{\alpha}{\phi} - \beta = \frac{53 - 34\phi}{\phi} \right. \\ 2 \times (1) - (2) & \left\{ 38 - 2 - \frac{53}{\phi} = \gamma - \frac{k}{\phi} - 17 \Rightarrow \alpha - \frac{k}{\phi} = 53 \left(\frac{\phi - 1}{\phi} \right) \right. \end{cases}$$



$$\text{Condition : } \begin{cases} 53 - 34\phi > 0 \\ \phi - 1 > 0 \end{cases} \Rightarrow \phi \in \left] 1; \frac{53}{34} \right[$$

$$\Delta H_R = -393,5 \left(\frac{53 - 34\phi}{\phi} \right) - (17 \times 241,8) - 53 \left(\frac{\phi - 1}{\phi} \right) \times 110,5 + 411,2$$

$$\Delta H_R = -\frac{53}{\phi} (393,5 - 110,5) + (34 \times 393,5) - (53 \times 110,5) - (17 \times 241,8) + 411,2$$

$$\Delta H_R = -\frac{14\,999}{\phi} + 3823,1 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_R = -\frac{3823,1\phi - 14\,999}{\phi} \text{ kJ/kg}$$

Ainsi, nous pouvons prévoir l'énergie libérée (théorique) par la combustion d'une mole d'ester méthylique pour :

$$\phi \in \left] \frac{57}{55}; \frac{57}{36} \right[\Rightarrow]1,036; 1,583[$$

$$Q = \sum_{i=1}^3 X_i \Delta H_{Ri}$$

$$mCO = \left(0,073740 \times \left(\frac{55\phi - 57}{\phi} \right) + 0,392403 \times (54) \left(\frac{\phi - 1}{\phi} \right) + 0,533881 \times (53) \left(\frac{\phi - 1}{\phi} \right) \right) \times \frac{12 + 16}{283,1668}$$

$$Q_r = 0,073740 \left(\frac{28728 - 25004,3}{\phi} \right) + 0,392403 \left(\frac{3374,1\phi - 15282}{\phi} \right) + 0,533881 \left(\frac{3823,1\phi - 14999}{\phi} \right)$$

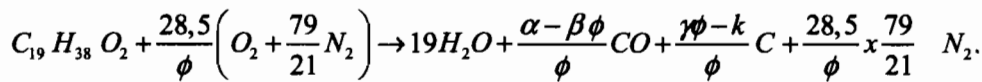
$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \frac{1521,27\phi - 11885,98}{\phi} \quad kJ/mol \\ mCO = 5,3 \left(\frac{\phi - 1}{\phi} \right) \quad g/g \\ \phi \in \left[\frac{57}{55}; \frac{57}{36} \right] \Rightarrow]1,036; 1,583[\\ mN = \frac{2 \times 26,84 \times 79}{21\phi \times 283,1668} \times 14 \quad g/g \end{array} \right.$$

Pour des valeurs entre $\phi \in]1,036; 1,583[$ nous considérons la combustion peu modélisable puisque ce ne seront plus seulement les produits cités plus haut qui se formeront.

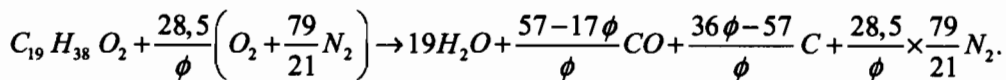
Pour des valeurs de ϕ supérieures à 1.583, nous ferons l'hypothèse que le CO_2 se transformera en CO et en carbone (graphite).

Dans ce cas, nous nous proposons de donner les équations et de faire le bilan énergétique simplifié :

► Ester d'acide stéarique:



$$\begin{cases} (1) \left\{ \begin{array}{l} 19 = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + \gamma - \frac{k}{\phi} \\ (2) \left\{ \begin{array}{l} 2 + \frac{57}{\phi} = 19 + \frac{\alpha}{\phi} - \beta \\ \Rightarrow \frac{\alpha}{\phi} - \beta = \frac{57 - 17\phi}{\phi} ; \frac{\gamma\phi - k}{\phi} = \frac{36\phi - 57}{\phi} \end{array} \right. \end{array} \right. \end{cases}$$

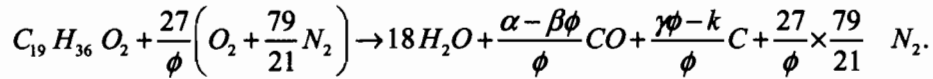


$$\text{Dans ce cas } \Delta H_R = (-19 \times 241,8) - \left(\frac{57 - 17\phi}{\phi} \right) \times 110,5 + 166,6$$

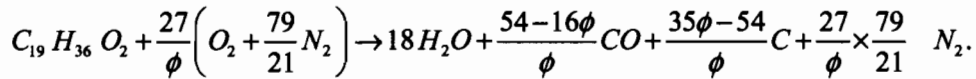
$$= (-19 \times 241,8) + (17 \times 110,5) + 166,6 - \left(\frac{57 \times 110,5}{\phi} \right)$$

$$\Delta H_R = - \left(\frac{2549,1\phi + 6298,5}{\phi} \right) \quad kJ/mol$$

Ester d'acide oléique :



$$\begin{cases} 19 = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + \gamma - \frac{k}{\phi} \\ 2 + \frac{57}{\phi} = 18 + \frac{\alpha}{\phi} - \beta \end{cases} \Rightarrow \frac{\alpha}{\phi} - \beta = \frac{54 - 16\phi}{\phi} ; \gamma - \frac{k}{\phi} = \frac{35\phi - 54}{\phi}$$



$$\phi < \frac{54}{16} ; \phi > 54/35$$

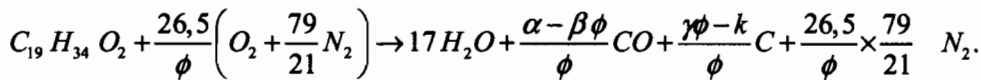
$$\phi \in] 1,54 ; 3,37 [$$

$$\Delta H_R = (-18 \times 241,8) - \left(\frac{54 - 16\phi}{\phi} \right) \times 110,5 - 78,7$$

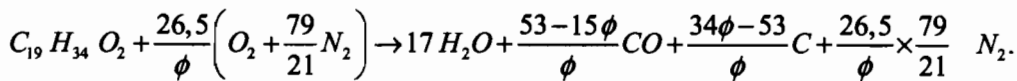
$$= (-18 \times 241,8) + (16 \times 110,5) - \left(\frac{54 - 110,5}{\phi} \right) - 78,7$$

$$\Delta H_R = - \left(\frac{2663,10\phi + 5967}{\phi} \right) \quad kJ/mol$$

➤ Ester d'acide linoléique :



$$\begin{cases} 19 = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + \gamma - \frac{k}{\phi} \\ 2 + \frac{53}{\phi} = 17 + \frac{\alpha}{\phi} - \beta \end{cases} \Rightarrow \frac{\alpha}{\phi} - \beta = \frac{53 - 15\phi}{\phi} ; \frac{\gamma\phi - k}{\phi} = \frac{34\phi - 53}{\phi}$$



$$\phi \in] 1,56 ; 3,53 [$$

$$\Delta H_R = (-17 \times 241,8) - \left(\frac{53 - 15\phi}{\phi} \times 110,5 \right) + 411,2$$

$$\Delta H_R = (-17 \times 241,8) + (15 \times 110,5) - \left(\frac{53}{\phi} \times 110,5 \right) + 411,2$$

$$\Delta H_R = -\left(\frac{2041,9\phi + 5856,5}{\phi}\right) \text{ kJ/mol}$$

Dans ce cas aussi, nous pouvons tenter de prévoir l'énergie de la combustion d'une mole d'ester d'huile de jatropha :

$$\begin{aligned} & 0,073740 C_{19}H_{38}O_2 + 0,392403 C_{19}H_{36}O_2 + 0,533881 C_{19}H_{34}O_2 + \\ & \frac{1}{\phi}(28,5 \times 0,073740 + 27 \times 0,392403 + 26,5 \times 0,533881) \left(O_2 + \frac{79}{21}N_2\right) \\ & \Rightarrow (0,073740 \times 19 + 0,392403 \times 18 + 0,533881 \times 17)H_2O + \\ & \left(0,073740 \times \left(\frac{57-17\phi}{\phi}\right) + 0,392403 \times \left(\frac{54-16\phi}{\phi}\right) + 0,533881 \times \left(\frac{53-15\phi}{\phi}\right)\right).CO + \\ & \left(0,073740 \times \left(\frac{36\phi-57}{\phi}\right) + 0,392403 \times \left(\frac{35\phi-54}{\phi}\right) + 0,533881 \times \left(\frac{34\phi-53}{\phi}\right)\right).C \\ & + \frac{79}{21\phi}(28,5 \times 0,073740 + 27 \times 0,392403 + 0,533881 \times 26,5).N_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \Rightarrow 0,073740 C_{19}H_{38}O_2 + 0,392403 C_{19}H_{36}O_2 + 0,533881 C_{19}H_{34}O_2 + \frac{26,84}{\phi} \left(O_2 + \frac{79}{21}N_2\right) \rightarrow \\ & \left(\frac{53,68-15,54\phi}{\phi}\right).CO + \left(\frac{34,54\phi+53,68}{\phi}\right).C + \frac{26,84}{\phi} \times \frac{79}{21}N_2 + 17,54 H_2O \end{aligned}$$

$$Q = -0,073740 \left(\frac{2549,1\phi + 6298,5}{\phi}\right) - 0,392403 \left(\frac{2653,1\phi + 5967}{\phi}\right) - 0,533881 \left(\frac{2041,9\phi + 5856,5}{\phi}\right)$$

$$Q = -\left(\frac{2319,18\phi + 5932,59}{\phi}\right) \text{ kJ/mol}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi \in] 1,53; 3,26 [\\ Q = -\left(\frac{8190,15\phi + 20950,86}{\phi}\right) \text{ kJ/kg} \\ mCO = \left(\frac{53,68-15,54\phi}{\phi}\right) \times \frac{(12+16)}{283,1668} \text{ g/g} \end{array} \right.$$

$$mN = \frac{2 \times 26,84 \times 79}{21\phi} \times \frac{14}{283,1668} \text{ g/g}$$

IV_ 5) la combustion du gasoil :

Le gasoil commercial : $C_{15}H_{32} \Rightarrow M = (15 \times 12) + 32 = 212 \text{ g/mol}$

Propriétés :

Tableau IV.2 caractéristiques du gasoil [1']

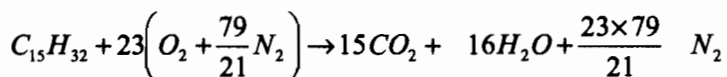
Caractéristiques	Gazole
Densité à 15° C	0,840
PCI volumique (kJ/l)	35 952
Viscosité à 20°C (mm ² /s)	3.8 à 8.52
Viscosité à 40° C (mm ² /s)	2 à 4.5
Température limite de filtrabilité (° C)	-2 à -15
Indice de cétane	48 - 52
PCI massique (kJ/kg)	42 800

- **Chaleur de formation à la température standard :**

$$\Delta H_f = 15 \Delta H_a(C_{\text{graphite}}) + 16 \Delta H_a(H-H) - 14 \Delta H[C-C] - 32 \Delta H[C-H].$$

$$\Delta H_f = -404,6 \text{ kJ/mol}$$

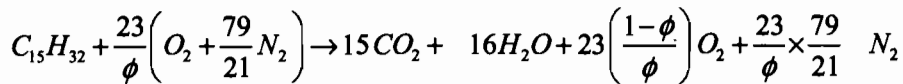
- **Combustion stoechiométrique :**



$$\Delta H_f = (-15 \times 393,5) + (-16 \times 241,8) + 404,6 = 9366,7 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_f = -44184,547 \text{ kJ/kg}; \quad m_{CO_2} = \frac{15 \times 44}{212} = 3,11 \text{ g/g} \quad ; \quad m_N = \frac{23 \times 79 \times 2 \times 14}{21 \times 212} = 11,42 \text{ g/g}$$

- Combustion en mélange pauvre $\phi < 1$



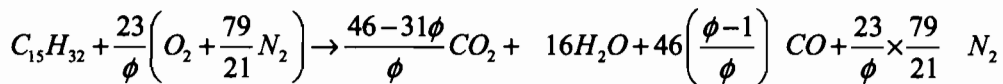
$$\Delta H_f = [-15 \times 393,5] + [-16 \times 241,8] + 23 \times 106,032 \cdot 10^{-3} \times \left(\frac{1-\phi}{\phi} \right) + 404,6 = -9366,7 + 2,93 \left(\frac{1-\phi}{\phi} \right) \text{ kJ/mol}$$

$$mCO_2 = 3,11 \text{ g/g} ; mN_2 = \frac{11,42}{\phi} \text{ g/g} ; \Delta H_f = \frac{-44196,37\phi + 13,82}{\phi} \text{ kJ/kg}$$

- Combustion en mélange riche $\phi > 1$

$$\begin{cases} (1) & 15 = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + \frac{\gamma}{\phi} - \frac{k}{\phi} \\ (2) & \frac{46}{\phi} = \frac{2\alpha}{\phi} - 2\beta + 16 + \gamma - \frac{k}{\phi} \end{cases}$$

$$(2)-(1) \begin{cases} \frac{46}{\phi} - 15 = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + 16 \Rightarrow \frac{\alpha}{\phi} - \beta = \frac{46}{\phi} - 31 = \frac{46-31\phi}{\phi} \\ \gamma - \frac{k}{\phi} = 46 \left(\frac{\phi-1}{\phi} \right) \end{cases}$$



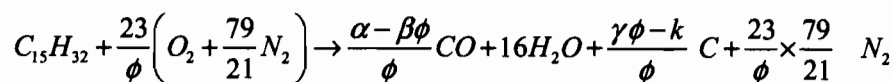
$$\Delta H_f = \left(-393,5 \times \frac{46-31\phi}{\phi} \right) + (-16 \times 241,8) + \left(46 \times \left(\frac{\phi-1}{\phi} \right) \times -110,5 \right) + 404,6 = -\frac{13018}{\phi} + 3651,3$$

$$\Delta H_f = \frac{17223,11\phi - 61405,6}{\phi} \text{ kJ/kg}$$

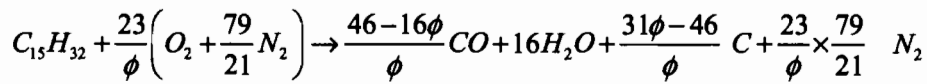
$$mCO = 46 \times \left(\frac{\phi-1}{\phi} \right) \times \frac{28}{212} = 6,07 \left(\frac{\phi-1}{\phi} \right) \text{ g/g}$$

$$\phi \in]1, 1,48[; mCO_2 = \frac{44}{212} \times \left(\frac{46-31\phi}{\phi} \right) = \frac{9,54}{\phi} - 6,434 \text{ g/g} ; m_N = \frac{11,42}{\phi} \text{ g/g}$$

- Combustion en mélange riche : $\phi > 1.48$



$$\begin{cases} 15 = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + \gamma - \frac{k}{\phi} \\ \frac{46}{\phi} = \frac{\alpha}{\phi} - \beta + 16 \end{cases} \Rightarrow \frac{\alpha}{\phi} - \beta = \frac{46-16\phi}{\phi} ; \gamma - \frac{k}{\phi} = \frac{31\phi-46}{\phi}$$



$$\Delta H_f = \left(\frac{46-16\phi}{\phi} \right) \times (-110,5) + (16 \times -241,8) + 404,6 = \frac{-5083}{\phi} - 1696,2 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_f = - \left(\frac{8001\phi + 23976,415}{\phi} \right) \text{ kJ/kg}$$

$$m_{CO} = \frac{28}{212} \times \left(\frac{46-16\phi}{\phi} \right) = \frac{6,07}{\phi} - 2,11 \text{ (g/g)}$$

$$m_N = \frac{23 \times 79}{\phi \times 21} \times \frac{2 \times 14}{212} = \frac{11,427}{\phi} \text{ (g/g)}$$

$$m_{CO_2} = 0$$

$$\phi \in]1,48 ; 2,875 [$$

Tableau IV.3 : synthèse de la théorie de la combustion

ϕ	Biodiesel (Ester méthylique Huile de jatropha)				Gasoil (C15 H32)			
	mCO_2 (g/g)	mCO (g/g)	mN (g/g)	Q (kJ/kg)	mCO_2 (g/g)	mCO (g/g)	mN (g/g)	Q (kJ/kg)
<1	2,9	0	$\frac{9,98}{\phi}$	$\frac{36854,87\phi+10}{\phi}$	3,11	0	$\frac{11,42}{\phi}$	$\frac{-44196,37\phi+13,82}{\phi}$
=1	2,9	0	9,98	-40758,86	3,11	0	$\frac{11,42}{\phi}$	-44182,547
]1,036;1,583[	$\frac{9,78}{\phi}-6,5$	$5,3\left(\frac{\phi-1}{\phi}\right)$	$\frac{9,98}{\phi}$	$\frac{5372,34\phi-41975,189}{\phi}$	$\frac{9,54}{\phi}-6,434$	$6,07\left(\frac{\phi-1}{\phi}\right)$	$\frac{11,42}{\phi}$	$\frac{17223,11\phi-61405,6}{\phi}$
]1,583;1,59[	$\frac{9,78}{\phi}-6,5$	$5,3\left(\frac{\phi-1}{\phi}\right)$	$\frac{9,98}{\phi}$	$\frac{5372,34\phi-41975,189}{\phi}$	0	$\frac{6,07}{\phi}-211$	$\frac{11,42}{\phi}$	$-\left(\frac{8001\phi+23976,415}{\phi}\right)$
[1,59;2,875[	0	$\frac{5,3}{\phi}-1,536$	$\frac{9,98}{\phi}$	$\frac{-(8190,15\phi+20950,86)}{\phi}$	0	$\frac{6,07}{\phi}-2,11$	$\frac{11,42}{\phi}$	$-\left(\frac{8001\phi+23976,415}{\phi}\right)$
]2,875;3,26[	0	$\frac{5,3}{\phi}-1,536$	$\frac{9,98}{\phi}$	$\frac{-(8190,15\phi+20950,86)}{\phi}$	-	-	-	-

IV_ 6) Variation de l'enthalpie de formation en fonction de la richesse :Tableaux IV.4 : évolution des enthalpies standards de formation en fonction de la richesseVariation de l'enthalpie standard de formation en fonction de la richesse Φ (**Biodiesel (Ester méthylique Huile de jatropha)**)

Φ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,50	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,26
$-\Delta H^\circ$ $\cdot 10^3$ (kJ/kg)	-	36,90	36,87	36,87	36,86	40,75	29,60	24,60	22,61	21,28	19,82	18,66	17,71	16,91	16,24	15,67	15,17	14,61

Variation de l'enthalpie standard de formation en fonction de la richesse Φ (**Gasoil (C15 H32)**)

Φ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,50	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,875
$-\Delta H^\circ$ $\cdot 10^3$ (kJ/kg)	-	44,127	44,161	44,173	44,179	44,182	33,95	26,64	23,98	22,986	21,32	19,99	18,9	17,99	17,22	16,34

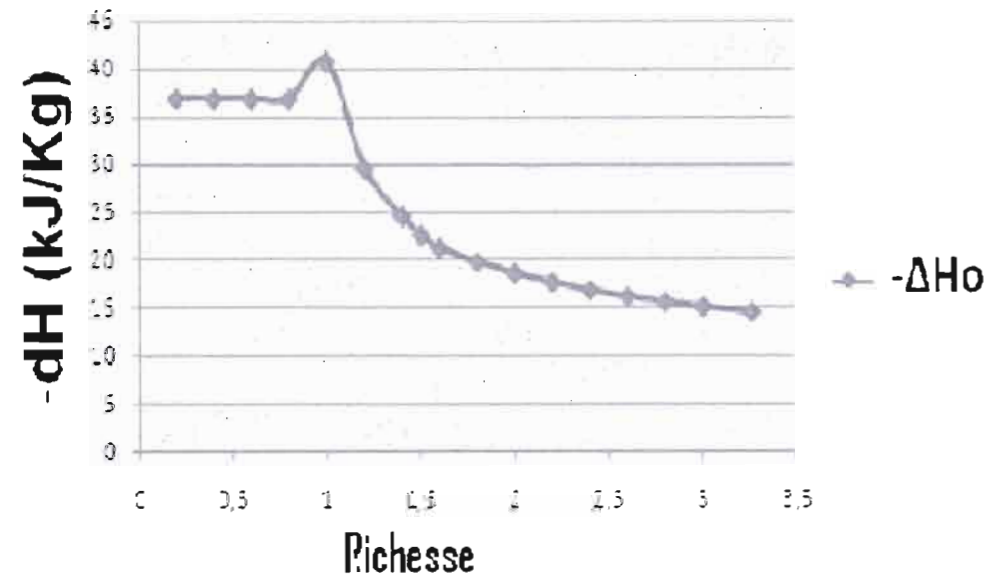


Figure IV-1 : Evolution de l'enthalpie standard de formation de l'ester méthylique d'huile de jatropha

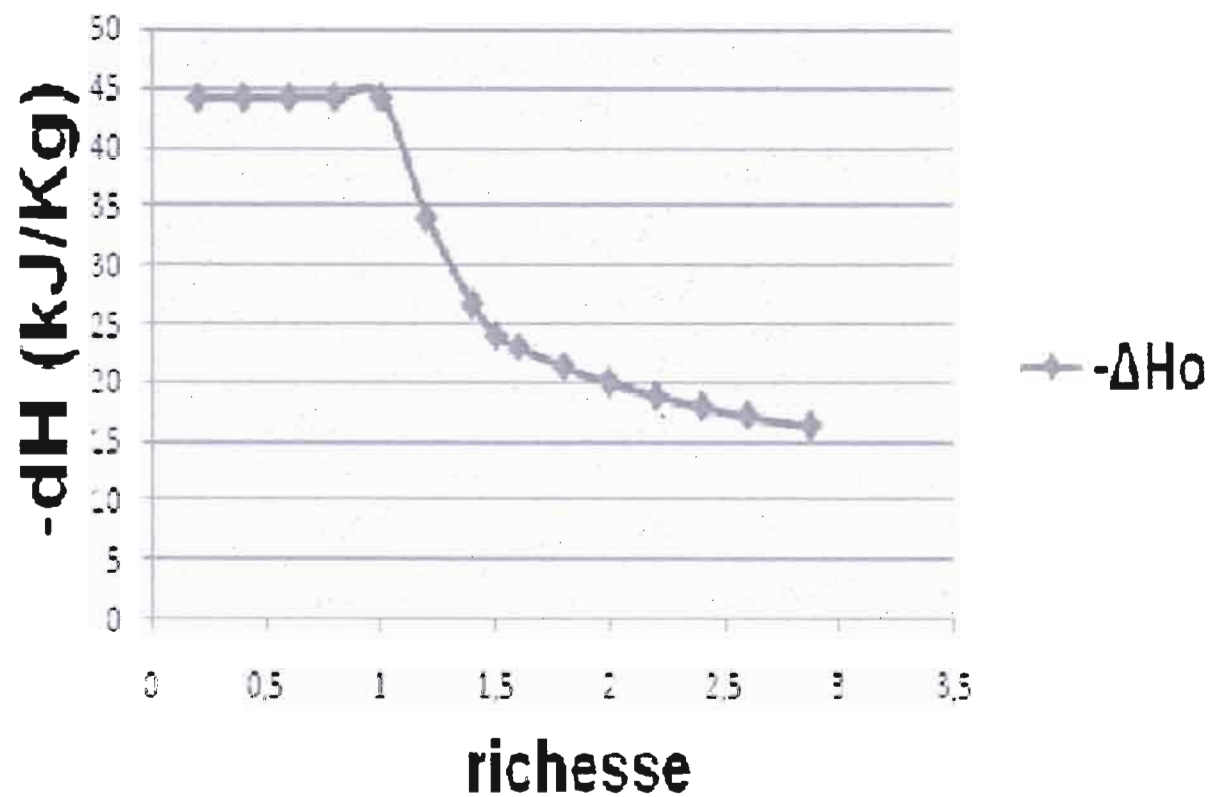


Figure IV-2 : évolution de l'enthalpie standard de formation du gazole

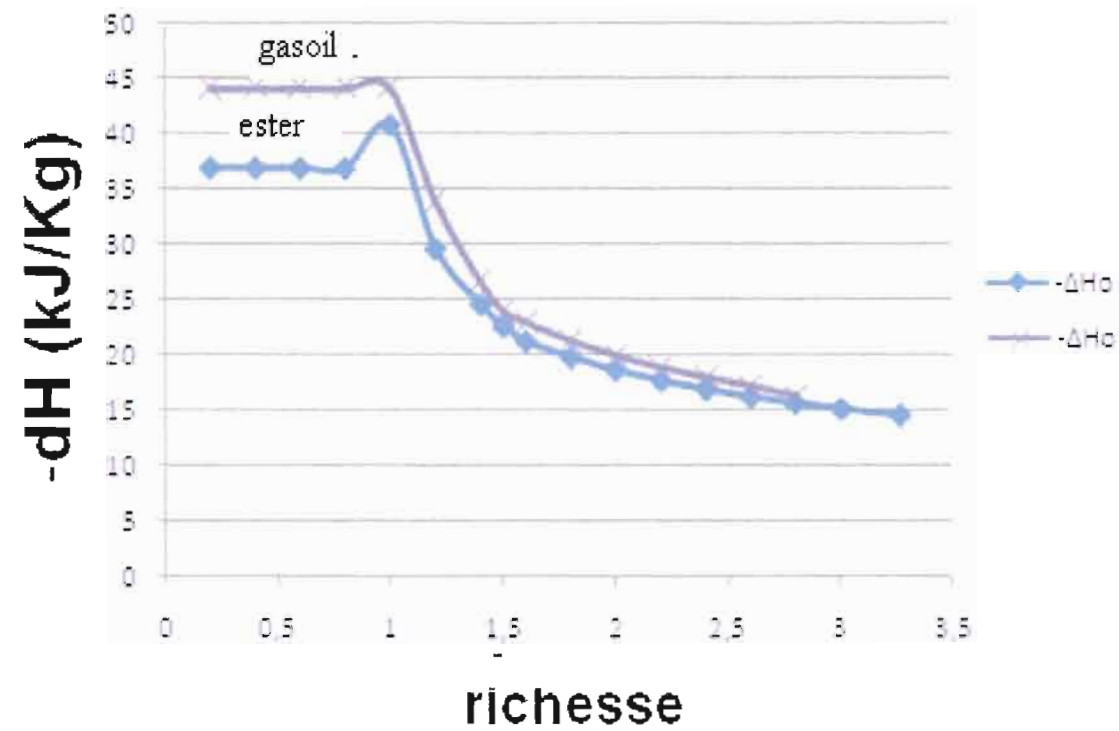


Figure IV-3 : Comparaison des enthalpies standards de formation en fonction de la richesse

IV-7) Interprétation

D'après les courbes d'évolution des enthalpies standards de l'ester de l'huile de jatropha et du gazole nous constatons que les chaleurs de formation gardent une valeur constante avant d'atteindre la stœchiométrie.

Le maximum sera atteint quand la richesse est égale à l'unité ensuite les courbes décroissent très rapidement selon la richesse du mélange en oxygène.

Si nous regroupons ces deux courbes sur un même graphe nous pouvons dire qu'on peut assimiler les chaleurs de formation de ces deux carburants au delà de la stœchiométrie.

On remarque seulement pour des mélanges pauvres en oxygène ($\phi < 1$) une différence significative.

Récapitulation

Le tableau suivant regroupe les caractéristiques des esters méthyliques de l'huile de jatropha les plus essentielles et également celles du gazole permettant de faire une étude comparative des deux carburants (voir annexe C).

Tableaux IV-5 : récapitulatif des caractéristiques

Caractéristiques	Huile	Ester	Gazole
$M_{moyenne}$ (g/mole)	281,0514	283,1668	200
d (à 20°C)	0,9097	0,8810	0,82
Viscosité (Pa.s) à 20°C	69,91	10,31	4,03
Indice d'acidité	15,253	0,03-0,05	
Indice de saponification	194,947		
Pouvoir Calorifique (MJ/Kg)	40,6	41,7	42,8
Indice de cétane		50,79-51,67	45-52
Point éclair (°C)	290-325		54-84

Chapitre V : Impact environnemental et socio-économique du Biodiesel produit à partir de l'huile de Jatropha

Introduction

S'agissant des énergies fossiles ou des bioénergies, chacune dispose plusieurs étapes au cours de son exploitation.

C'est ce qui est illustré par le tableau ci-dessous.

Tableaux V-1 : les différentes étapes de l'exploitation [4']

Carburants classiques	Biodiesel
Production du pétrole brut	Culture (consommations d'intrants et de carburants)
Transport du brut	Approvisionnement des usines de production des biocarburants
Raffinage	Transformation industrielle (consommations d'énergie, de matières premières et émissions de gaz à effet de serre) Synthèse des produits EMHV et ETBE (prise en compte de la production du méthanol et de l'isobutène)
Distribution depuis la raffinerie jusqu'au dépôt de distribution	Transport des produits jusqu'au dépôt avant distribution
Consommation	Consommation

L'exécution de chaque étape peut être source d'émissions de gaz de nature à aggraver notre atmosphère et avoir ainsi des conséquences environnementales néfastes.

Ces gaz sont principalement le protoxyde d'azote (N_2O), le méthane (CH_4), le dioxyde de carbone (CO_2).

Dans cette partie nous nous limiterons à étudier uniquement la contribution de la consommation de chaque type d'énergie dans cette émulsion pour afin aboutir à une comparaison des deux.

En effet les autres étapes sont similaires de manière homologue.

V- 1) Cas du biodiesel

En raison de l'intérêt croissant pour l'utilisation du biodiesel comme carburant de substitution, beaucoup de chercheurs travaillant dans le cadre de la protection de l'environnement ont fait des analyses sur l'impact des ces émissions vis-à-vis de celui-ci.

La réduction des gaz à effet de serre que nous avons définis dans le **chapitre II**, est l'un des objectifs les plus recherchés dans notre étude.

Le but de ce présent chapitre est donc d'étudier les impacts de ces gaz sur l'environnement.

Ainsi nous allons étudier les émissions des gaz à effet de serre suivants :

✓ **L'émission de CO₂ et de CO en fonction de la richesse Φ**

Tableaux V-2 : valeurs des masses de CO et CO₂ formées par gramme d'ester méthylique d'huile de Jatropha :

Variation massique de CO₂ en fonction de la richesse Φ :

Φ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,26
m CO ₂ (g/g)	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	1,65	0,48	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Variation massique de CO en fonction de la richesse Φ :

Φ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,26
m CO (g/g)	0	0	0	0	0	0	0,883	0,883	0,883	1,776	1,4	1,114	0,87	0,67	0,5	0,35	0,23	0,089

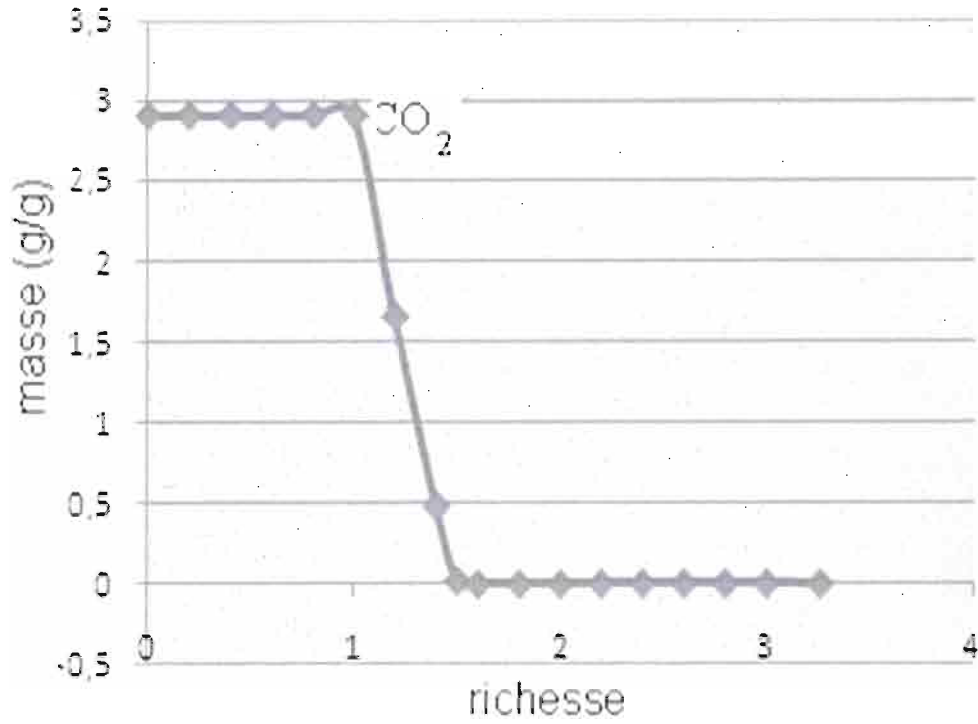


Figure V-1 : Variation des masses de CO₂ formées en fonction de la richesse

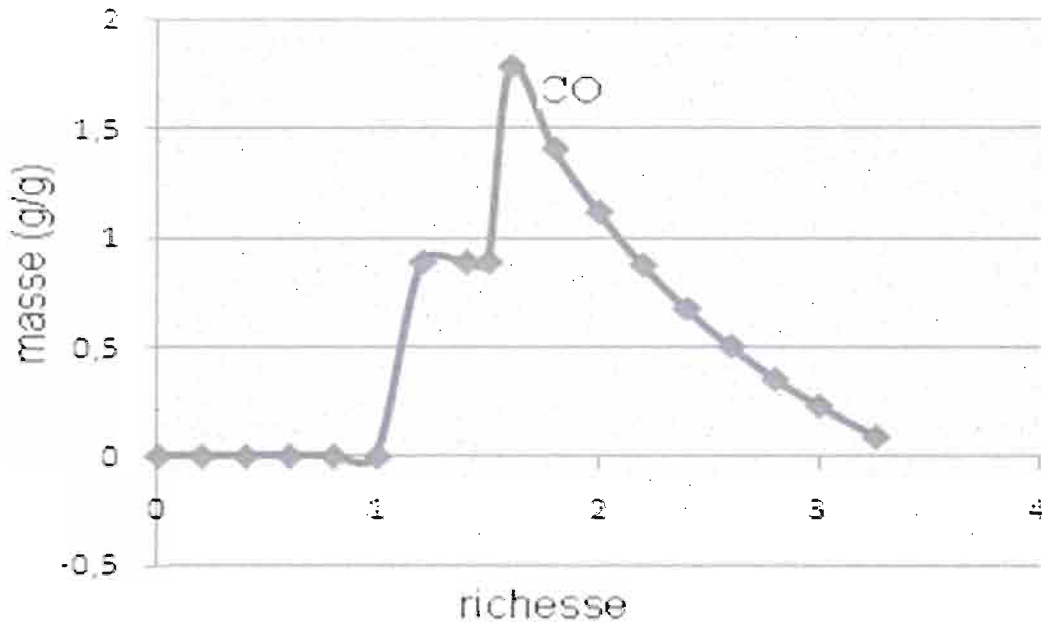


Figure V-2 : Variation des masses de CO formées en fonction de la richesse

✓ L'émission de NO_x

Tableaux V-3 : émissions de NO_x

Φ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,26
m N(g/g)		49,9	24,95	16,63	12,47	9,98	8,31	7,13	6,65	6,23	5,54	4,99	4,53	4,16	3,83	3,56	3,32	3,06

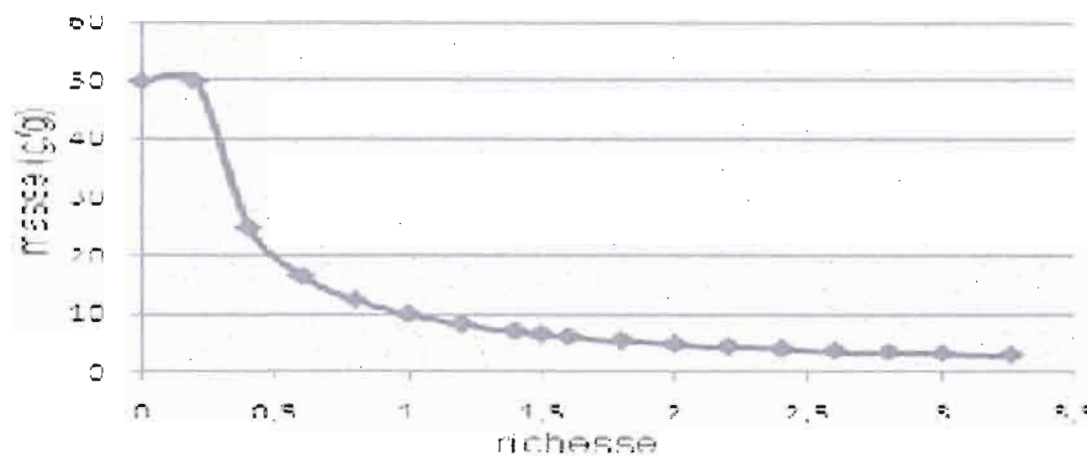


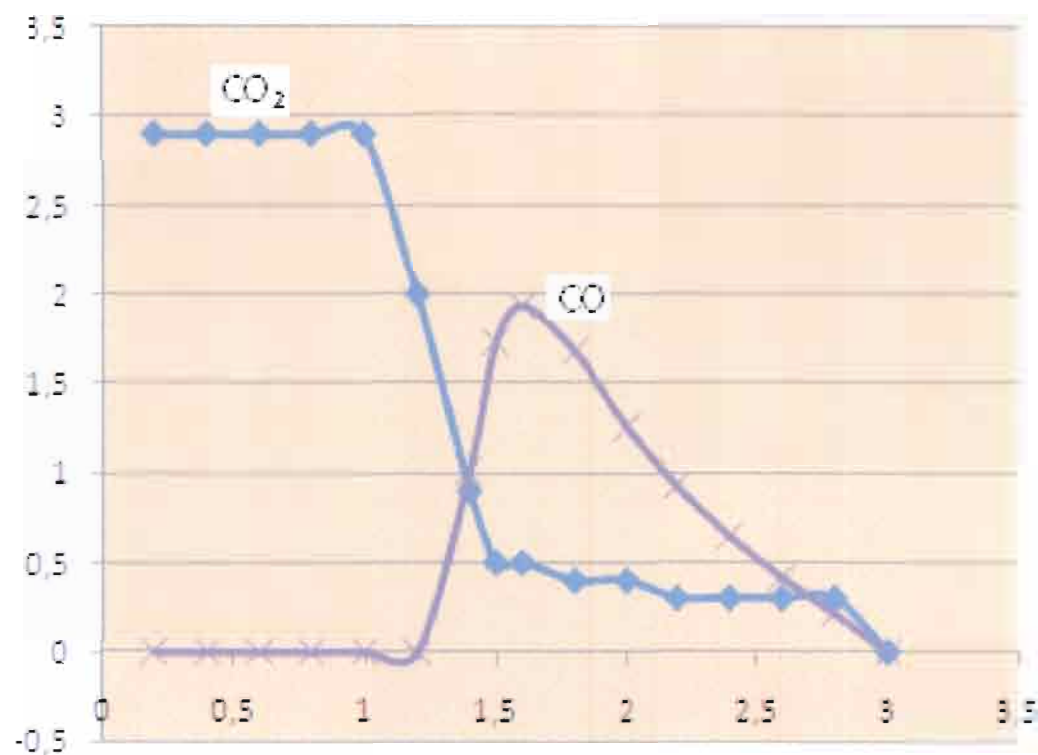
Figure V-3 : Variation de la masse d'azote formée par gramme d'ester méthylique d'huile de jatropha en fonction de la richesse

V_ 2) le cas du gasoil (C₁₅H₃₂)✓ L'émission de CO₂ et CO en fonction de la richesse ϕ :Tableaux V.4: valeurs des masses de CO et CO₂ formées par gramme de gasoil :Variation massique de CO₂ en fonction de la richesse Φ

Φ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,875
m CO ₂ (g/g)	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	1,516	0,38	0	0	0	0	0	0	0	0

Variation massique de CO en fonction de la richesse Φ

Φ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,875
m CO (g/g)	0	0	0	0	0	0	1,01	1,73	1,93	1,68	1,26	0,925	0,65	0,42	0,22	0

✓ L'émission de CO_2 et COFigure V-4 : variation des masses de CO et CO_2 formées en fonction de la richesse pour le gasoil

✓ L'émission d'azote :

Tableau V-5 : émissions d'azote

Φ	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,26
m N (g/g)	57,1	57,1	28,55	19,03	14,27	11,42	9,51	8,51	7,61	7,13	6,34	5,71	5,19	4,75	4,39	4,07	3,80	3,50

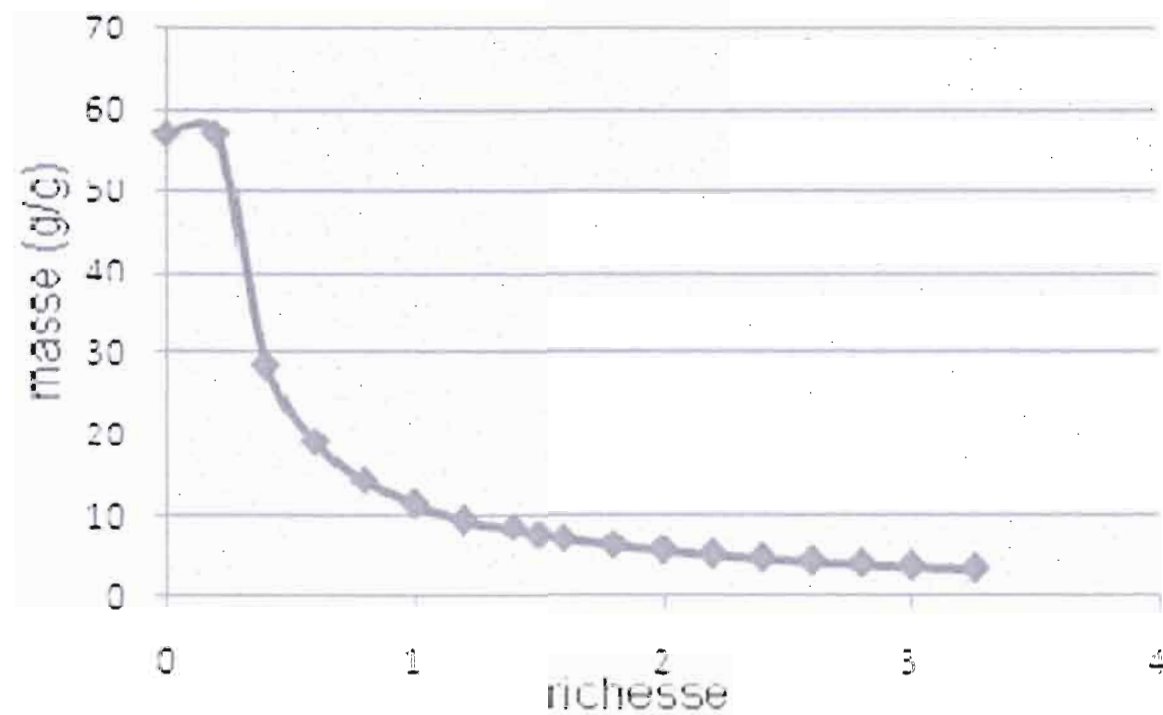


Figure V-5 : variation de la masse d'azote formée par gramme de gazole

Remarque :

On constate que les courbes d'émission de l'ester d'huile de Jatropha et celles du gazole présentent de manière homologue des similitudes mais ceci ne nous permet pas d'avancer une quelconque interprétation faisant objet à une comparaison.

Ainsi passons à une représentation cumulée typique de ces courbes pour pouvoir les comparer.

V_3) Etude comparative des émissions du gasoil et de l'ester :

✓ L'émission de CO₂



Figure V-6 : comparaison des quantités de CO₂ formées pour le gasoil et l'ester méthylique d'huile de jatropha en fonction de la richesse

Nous remarquons que les courbes d'émission en CO₂ des deux carburants peuvent être assimilées pour des richesses supérieures à l'unité.

Par contre pour $\phi < 1$, l'émission de CO_2 est plus importante pour l'ester ce qui va la défavoriser par rapport au gazole car étant un facteur perturbant le bilan des gaz à effet de serre (GES).

✓ **L'émission d'azote :**

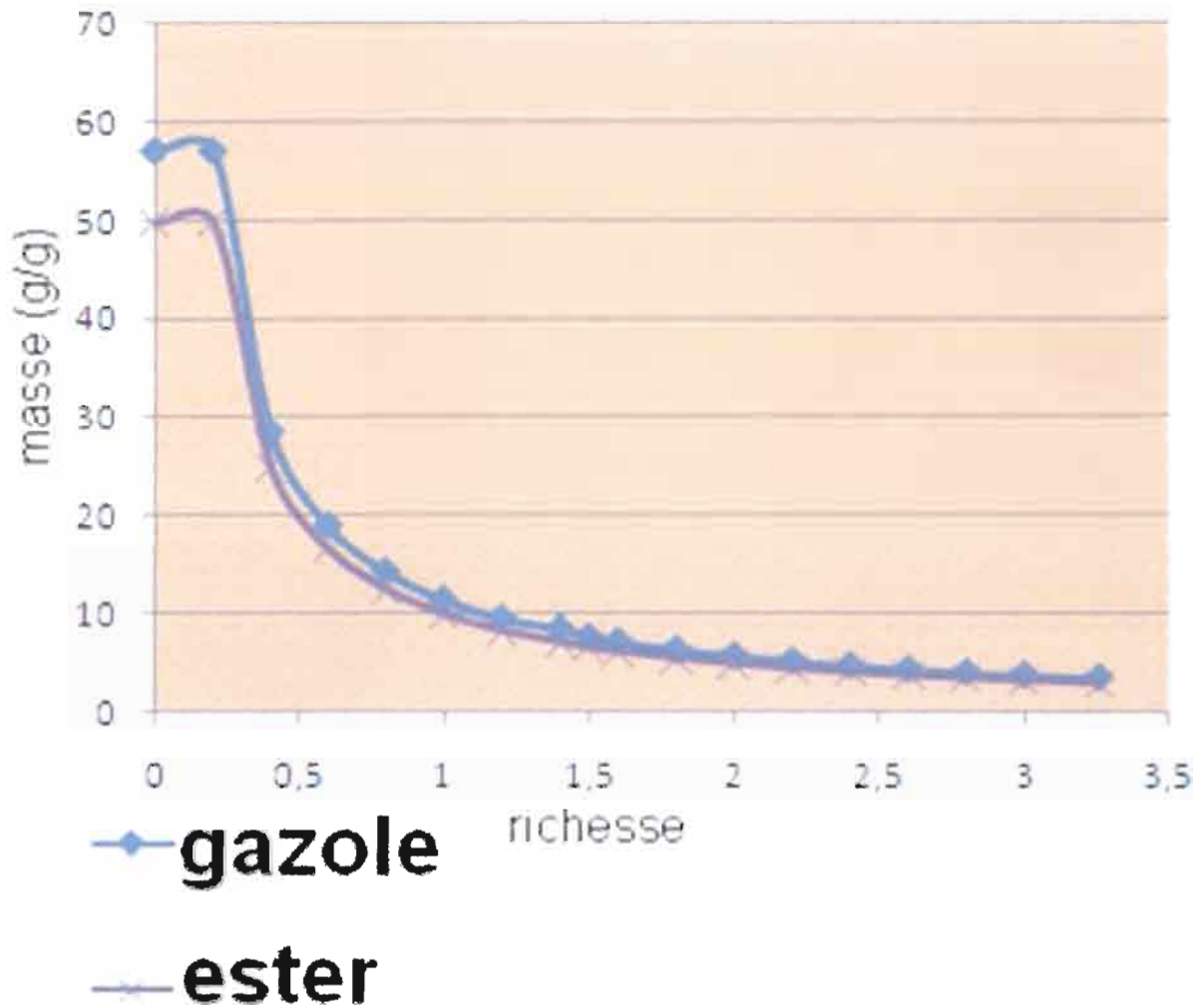


Figure V-7 : comparaison des quantités d'azote formées par gramme de substance brûlée

Pour une richesse $\phi > 0,75$ on voit que la courbe d'émission en azote du gazole est légèrement au dessus de celle de l'ester.

Alors que pour $\phi < 0,75$, elle est largement au dessus.

Un comportement similaire peut être supposé pour le cas de NO_x , cependant aucune étude dans ce sens n'a été faite dans le cadre de notre projet pour passer à une confirmation.

✓ L'émission de CO :



Figure V-8 : comparaison des quantités de CO formées par gramme de substance brûlée

Tant que la richesse Φ reste inférieure à 1,2 ($\phi \leq 1,2$), on peut confondre les courbes d'émission en CO des deux carburants.

Par contre pour $1,2 \leq \phi \leq 1,6$ la formation en CO pour le gazole est plus importante et pour une richesse $\phi \geq 1,6$ l'émission en ester domine.

Conclusion

Excepté le méthane que nous n'avons pas étudié et en supposant que le NOx a un comportement similaire à celui de l'azote nous pouvons dire globalement que le biodiesel produit à partir de l'huile de jatropha pollue moins que le gazole en terme d'émission de gaz à effet de serre.

V-4) Les mélanges de biodiesel

Le biodiesel peut être mélangé avec le carburant diesel conventionnel avec n'importe quelle proportion.

Trois mélanges ont un intérêt particulier.

B2 contient 2% de biodiesel avec 98% du diesel conventionnel.

De même B20 contient 20% de biodiesel et B100 contient 100% de biodiesel.

B2 a de l'intérêt en raison de ses avantages lubrifiant. Quant à B20, il contribue à réduire les émissions des moteurs et il est également utilisé dans la lubrification.

B100 remplace entièrement le carburant conventionnel, il suffit de le produire en quantité suffisante à moindre coût.

Les mélanges de biodiesel les plus fréquemment rencontrés sont proportionnellement composés de 20% en volume de biodiesel et de 80% en volume de diesel conventionnel.

Pour le biodiesel à base d'huile de Soja obtenu par exemple à cette concentration, l'impact des émissions est estimé dans le tableau suivant [4] :

Gaz	% émission
NOx	+ 2.0 %
PM	- 10.1 %
HC	- 21.1 %
CO	-11.0 %

Le mélange contribue à économiser le volume de carburant conventionnel qu'on aurait du utilisé.

Il est difficile d'identifier sans ambiguïté une différence d'émissions de CO₂ entre le biodiesel et le diesel conventionnel.

Comme mentionné précédemment, le but de cette étude est de déterminer comment les gaz d'échappement des moteurs diesel sont affectés par l'utilisation de biodiesel bien que dans la plupart des cas il n'est que 20% en volume dans le mélange, il peut aussi être utilisé à des concentrations variant de 1 à 100%.

En conséquence nous avons déterminé que la régression statistique de corrélation serait appropriée car elle offre un moyen de prédire le taux d'échange des gaz d'échappement en fonction de la concentration de biodiesel dans le carburant diesel conventionnel.

Cette partie décrit notre approche statistique pour estimer l'effet du biodiesel sur les émissions de polluants réglementés.

Une technique dans l'analyse de régression multivariable est de normaliser les variables indépendantes.

La normalisation implique la soustraction de la moyenne de chaque observation, puis en divisant le résultat par l'écart-type.

Il est utile de comparer le coefficient de régression des différentes variables indépendantes afin de déterminer l'importance relative.

Toutefois dans notre démarche nous avons inclus une seule variable indépendante, la concentration de biodiesel.

L'équation de régression peut être exprimée comme suit :

$$\text{Log (émission)} = a * (\text{vol\% de biodiesel}) + b$$

Ou a et b sont déterminés au moyen de la courbe d'ajustement statistique du processus.

Dans la pratique, ces émissions seraient estimées comme suit :

$$\text{Emissions} = \exp [a * (\text{vol\% de biodiesel}) + b] = \exp [a * (\text{vol\% de biodiesel}) + b] * \exp (b)$$

Le taux d'échange des émissions dues à l'utilisation du biodiesel est généralement calculé à partir de la formule suivante :

$$\text{taux d'échange des émissions} = \frac{(\text{Emissions}) \text{ avec du biodiesel} - (\text{Emissions}) \text{ sans biodiesel}}{\text{Emissions sans biodiesel}} \times 100$$

La combinaison de l'équation (3) avec l'équation (4) donne :

$$\text{taux d'échange des émissions} = \frac{\{\exp[a \times (\text{vol\% biodiesel})] \times \exp(b) - \exp[a \times 0] \times \exp(b)\}}{\exp[a \times 0] \times \exp(b)} \times 100$$

$$\text{Ce qui donne : taux d'échange des émissions} = \frac{\{\exp[a \times (\text{vol\% biodiesel})] - 1\} \times \exp(b)}{\exp(b)} \times 100$$

On obtient finalement :

$$\text{taux d'échange des émissions} = \{\exp[a \times (\text{vol\% biodiesel})] - 1\} \times 100$$

Cette dernière équation ne contient pas la constante b, elle peut donc être utilisée pour prédire le taux d'échange des émissions pour une concentration de biodiesel donnée.

Ces équations sont représentées sur un même graphique pour fournir une évaluation visuelle de la qualité de l'ajustement.

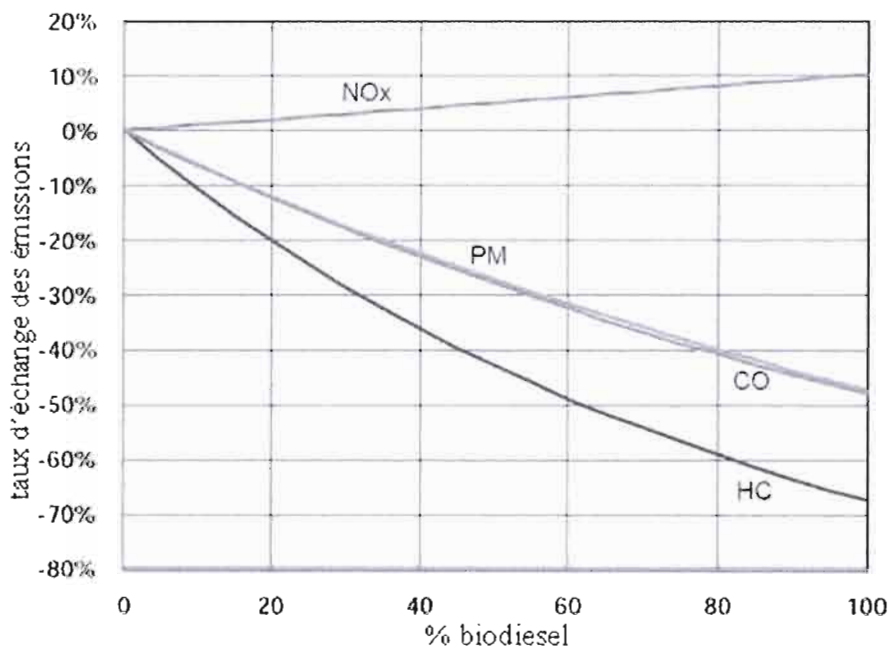


Figure V-9 : taux d'échange des émissions [4]

V-5) Réflexion socio-économique

D'après ce qui précède, le biodiesel présente beaucoup d'avantages et peut être ainsi utilisé comme carburant de substitution.

Cependant, en dépit de ses avantages, des recherches récentes ont soulevé quelques doutes au sujet des biocarburants de première génération.

En effet, dans certains pays où la filière est très développée comme le Brésil, on a constaté une augmentation rapide des prix des denrées alimentaires résultant de l'expansion de la production de biodiesel.

Ceci va constituer un réel souci, imposant un fardeau accru aux pauvres au niveau des pays en voies de développement comme le Sénégal.

Par conséquent le développement de l'industrie du biodiesel va créer certes des emplois et diminuera également en partie le taux de chômage, cependant il pourra être une cause possible d'une crise alimentaire globale mais peut être pas le facteur le plus significatif.

Puis que la culture des plantes végétales sera certainement beaucoup plus lucrative comparées aux cultures traditionnelles destinées à l'alimentation, ce qui va provoquer un effet de détournement de la production alimentaire à des utilisations industrielles.

Bien qu'on ait démontré particulièrement lors de notre étude que l'émission de gaz à effet de serre (GES) du biodiesel produit à partir de l'huile de jatropha est faible comparée à celle du diesel conventionnel, d'autres recherches avancent des incertitudes au sujet de la contribution du biodiesel à la réduction des gaz à effet de serre (GES) d'une manière générale.

Pour l'émission de CO₂ on a cru initialement que le biodiesel ne causerait aucune augmentation nette des émissions de CO₂ (le gaz principale à effet de serre chaude) par que simplement le CO₂ qui est émis dans l'atmosphère quand ils sont brûlé est compensé par le CO₂ que la récolte absorbe pendant qu'elle se développe.

Cependant des études récentes ont soutenu le contraire en disant que les biodiesels peuvent nécessairement ne pas réduire ces émissions et peuvent accélérer la déforestation.

Pour être plus simple, on peut dire que le biodiesel produit plus ou moins du CO₂, tout dépend de la méthode dont il est produit.

En effet certaines usines de production d'éthanol basées au USA sont actionnées par l'électricité, d'autres par des centrales à charbon. Il est probable que les émissions de telles centrales soient beaucoup plus importantes que la réduction des émissions des sources d'énergies qu'elles produisent.

Et si nous prenons le cas du Sénégal, non comptant de tout ce qui précède, un manque de disponibilité financière pour soutenir l'important effort d'investissement requis peut se poser.

Voilà pas mal d'inquiétudes qui doivent bien attirer notre attention dans la filière des biocarburants mais ne doivent pas constituer un blocage pour sa promotion.

En effet toute découverte présente une facette d'inconvénients.

Il suffit de trouver un compromis entre ces avantages et ses inconvénients.

Et vu tous les avantages que le biodiesel met à notre disposition ainsi que la facture pétrolière très chère on va se passer des inconvénients.

Conclusion

Cette étude sur le Jatropha représente l'une des premières contributions au Sénégal sur la recherche de solutions aux niveaux des huiles végétales et leurs transformations dans le but d'en faire un carburant de substitution.

On peut dire dès à présent que l'huile brute de jatropha de par ses caractéristiques physico-chimiques sous des conditions expérimentales bien définies de transestérification peut être transformée en esters méthyliques, carburant de substitution au niveau des moteurs à injection directe.

Par contre la promotion de la culture des plantes oléagineuses pose un dilemme à savoir : « *Energie* » vs « *Sécurité alimentaire* », ce qui peut conduire à surclasser les productions alimentaires au profit de l'énergie et compromettre ainsi les politiques d'autosuffisance alimentaire qui revêtent une importance aussi capitale pour le Sénégal.

Il convient de réfléchir sérieusement sur cette question, en essayant de trouver un compromis entre ces deux aspects qui aboutira à la mise en place d'une politique convenable.

Cependant, malgré ces perspectives très prometteuses, le biodiesel demeure méconnu et son marché reste embryonnaire au Sénégal à l'heure actuelle.

Recommandations

Ce projet pédagogique de fin d'étude peut être considéré comme un point d'origine sur la production de biodiesel à partir de l'huile de jatropha.

Tout ce qu'on s'était fixé comme objectif n'est pas atteint ce qui nous permet de faire les recommandations suivantes pour ceux qui veulent bien trouver une suite à cette ébauche:

- ✓ L'utilisation d'un moteur à injection directe muni d'un analyseur de gaz pour quantifier de manière stricte la composition des gaz d'échappement.
- ✓ Une recherche de cout relative à chaque type de donnée concernant la plante depuis la culture en passant par la récolte et l'extraction de l'huile jusqu'à la production de l'ester.

Ce qui va permettre de faire une analyse microscopique et macroscopique ainsi que le cout de production des esters : c'est l'étude économique.

Références bibliographiques

- (1) Ayhan Demirbas : *Biodiesel*, A Realist Fuel Alternative for Diesel Engines 1988.
- (2) Edgar Munch, Hauptstr.27,6960 Osterburken Schlierstadt (1ere Partie): Memoire de Fin d'Etude 1986.
- (3) Gerhard KNOTHE; Jon Van GERPEN, JURGEN KRAHL: *The biodiesel handbook*, Illinois, AOCS, 2004, 303 p.
- (4) Kyle W. Scholl, Spencer C. Sorenson : Combustion of Soybean Oil Methyl Ester in a Direct Injection Diesel Engine 2008.
- (5) R.E.E. Jongschaap, W.J. Corré, P.S. Bindraban and W.A. Brandenburg: Claim and facts on *Jatropha Curcas L* 2007.
- (6) A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions Draft Technical Report 2002.
- (7) Instructions for the 1341 Plain Jacket oxygen bomb calorimeter; manual n° 147, 23p
- (8) S. FATY : Cours de Chimie de l'Ingénieur, DIC1, 2005
- (9) Daniel fortin ; modou lo ; guy maynart : Plantes médicinales du Sahel
- (10) Dr Gilles OLIVE : Chimie Industrielle 2008.
- (11) Aliou Ousmane Aidara : mémoire de maitrise es sciences appliquées ; valorisation D'une huile végétale tropicale : l'huile de pourghère 1996.
- (12) WOLFF J .P. Manuel d'analyse des corps gras. Ed. Azoulay .1968
- (13) REZANKA T. & REZANKOVA H. characterization of fatty acids and Tri glycerol in vegetable oils by gas chromatography and statistical analysis. Analytical Chemical Acta, 1999, Vol .398, p. 253-261.
- (14) Eugene AVALLONE, Theodore BAUMEISTER III, Standard handbook for mechanical engineers, 10th edition, New York; Mc Graw-hill, 1995, 1683p

- (15) National Council of examiners for Engineering and surveying (NCEES),
Fundamentals of engineering, supplied reference handbook, fifth edition, 2001, 176p
- (16) S. GAYE et G. MENGUY : Energie et Environnement, Presse Universitaire de
Dakar, 2008
- (17) Desmond WINTERBONE: Advanced thermodynamics for engineers; London,
ARNOLD, 1997, 393p
- (18) Ya Sangharé : Projet de Fin d'Etude, Ecole Polytechnique de Thiès 2008.

WEBLIOGRAPHIE

- (1') [http://www. Techniques-ingenieur.fr](http://www.Techniques-ingenieur.fr)
- (2') [http://www. Biofueltesting.net](http://www.Biofueltesting.net)
- (3') <http://www.bioléa.net>
- (4') <http://www. .wikipédia.org>
- (5') <http://www.industrie.gouv.fr>
- (6') [http://www.infomysteres.com/fichiers/energies_ alternatives.pdf](http://www.infomysteres.com/fichiers/energies_alternatives.pdf)

ANNEXE A

Tableau A1 : Chaleurs de formation standard de diverses substances à 25°C (kJ/mol) [5']

Substance	ΔH_f°	Substance	ΔH_f°	Substance	ΔH_f°
Al(s)	0	CO (g)	-110,5	NO ₂ (g)	33,83
Al ₂ O ₃ (s)	-1676	CO ₂ (g)	-393,5	N ₂ O (g)	81,55
Ag(s)	0	Cl (g)	121,7	N ₂ O ₄ (g)	9,66
AgBr(s)	-100,4	Cl ₂ (g)	0	N ₂ O ₄ (l)	19,50
AgCl(s)	-127,1	Cl (aq)	-167,2	N ₂ O ₄ (s)	-41,8
Ag (aq)	105,6	Cu (s)	0	NOCl (g)	51,9
Ba (s)	0	CuO (s)	-157	O (g)	247,5
BaCO ₃ (s)	-1216	Cu ₂ O (s)	-169	O ₂ (g)	0
BaO(s)	-552,5	Cu (aq)	64,77	O ₃ (g)	142
Ba (aq)	-557,6	Fe (s)	0	P (s blanc)	0
Br (g)	111,9	Fe ₂ O ₃ (s)	-824,2	P (s rouge)	-18,4
Br ₂ (g)	30,91	Fe ₃ O ₄ (s)	-1118	P ₄ O ₆ (s)	-298,4
Br ₂ (l)	0	F (g)	78,99	POCl ₃ (g)	-558,5
Br (aq)	-121,6	F ₂ (g)	0	POCl ₃ (l)	-597,0
Ca (s)	0	F (aq)	-322,6	PCl ₃ (g)	-306,4
CaC ₂ (s)	-59,8	H (g)	218	PCl ₃ (l)	-373,0
CaCO ₃ (s)	-1207	H ₂ (g)	0	PH ₃ (g)	5,4
CaO (s)	-635,1	H ₂ O (g)	-241,8	KCl (s)	-436,7
CaSO ₄ (s)	-1434,1	H ₂ O (l)	-285,8	KClO ₄ (s)	-397,7
Ca (aq)	-542,8	H ₂ O (c)	-187,8	K (aq)	-252,4
C (s. diamant)	1,90	HF (g)	-271,1	Na (g)	107,1
C (s. graphite)	0	HCl (g)	-92,31	Na (s)	0
CH ₄ (g)	-74,86	HBr (g)	-36,4	NaHCO ₃ (s)	-947,7
C ₂ H ₂ (g)	226,7	HI (g)	26,1	Na ₂ CO ₃ (s)	-1131,1
C ₂ H ₄ (g)	52,28	H ₂ S (g)	-20,1	Na ₂ O (s)	-418
C ₂ H ₆ (g)	-84,68	H (aq)	0	NaCl (s)	-411,2
C ₂ H ₄ (l)	-103,8	OH (aq)	-230,0	NaBr (s)	-361,4
C ₂ H ₆ (l)	-49,03	I (g)	106,8	NaI (s)	-178,8
C ₂ H ₅ OH (l)	-238,7	I ₂ (g)	62,4	Na (aq)	-140,1
C ₂ H ₅ OH (g)	-200,86	I ₂ (s)	0	S (s rhomb.)	0
C ₂ H ₅ OH (l)	-277,7	Mg (s)	0	S (s monoc.)	0,30
CH ₃ Cl (g)	-30,83	MgO (s)	-601,7	SO ₂ (g)	-296,8
CH ₃ Cl (l)	-105	MgCO ₃ (s)	-1098	SO ₃ (g)	-395,7
CH ₂ Cl ₂ (g)	-92,47	Mg (aq)	-466,9	S ₂ (g)	-1209,2
CH ₂ Cl ₂ (l)	-121	N (g)	472,6	SO ₂ (aq)	-809,3
CHCl ₃ (g)	-103,1	N ₂ (g)	0	Zn (s)	0
CHCl ₃ (l)	-134,5	NH ₃ (g)	-46,19	ZnO (s)	-348,3
CCl ₄ (g)	-103	N ₂ H ₄ (l)	50,6	ZnS (s)	-206
CCl ₄ (l)	-119,4	NO (g)	90,37	Zn (aq)	-153,9

Tableau A2 : tableau de Mendeleïev :

1 H 1,0079																	2 He 4,0026
3 Li 6,941	4 Be 9,0122	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> Numéro atomique symbole poids atomique </div>										5 B 10,811	6 C 12,011	7 N 14,007	8 O 15,999	9 F 18,998	10 Ne 20,179
11 Na 22,990	12 Mg 24,305											13 Al 26,981	14 Si 28,086	15 P 30,974	16 S 32,065	17 Cl 35,453	18 Ar 39,948
19 K 39,098	20 Ca 40,078	21 Sc 44,956	22 Ti 47,88	23 V 50,942	24 Cr 51,996	25 Mn 54,938	26 Fe 55,847	27 Co 58,933	28 Ni 58,69	29 Cu 63,546	30 Zn 65,38	31 Ga 69,723	32 Ge 72,61	33 As 74,921	34 Se 78,96	35 Br 79,904	36 Kr 83,80
37 Rb 85,468	38 Sr 87,62	39 Y 88,906	40 Zr 91,224	41 Nb 92,906	42 Mo 95,94	43 Tc (98)	44 Ru 101,07	45 Rh 102,91	46 Pd 106,42	47 Ag 107,87	48 Cd 112,41	49 In 114,82	50 Sn 118,71	51 Sb 121,76	52 Te 127,61	53 I 126,90	54 Xe 131,29
55 Cs 132,91	56 Ba 137,33	57 La 138,91	58 Hf 178,49	59 Ta 180,95	60 W 183,85	61 Re 186,21	62 Os 190,2	63 Ir 192,22	64 Pt 195,08	65 Au 196,97	66 Hg 200,59	67 Tl 204,39	68 Pb 207,2	69 Bi 208,98	70 Po (209)	71 At (210)	72 Rn (222)
57 Fr 223	58 Ra 226,02	59 Ac 227,03	60 Rf (261)	61 Ha (262)													
			68 Ce 140,12	69 Pr 140,91	70 Nd 144,24	71 Pm (145)	72 Sm 150,36	73 Eu 151,96	74 Gd 157,25	75 Tb 158,93	76 Dy 162,50	77 Ho 164,93	78 Er 167,26	79 Tm 168,93	80 Yb 173,04	81 Lu 174,97	
			82 Th 232,04	83 Pa 231,04	84 U 238,03	85 Np 237,05	86 Pu (244)	87 Am (243)	88 Cm (247)	89 Bk (247)	90 Cf (251)	91 Es (252)	92 Fm (257)	93 Md (258)	94 No (259)	95 Lr (260)	

ANNEXE B

Tableau B 1 : Quelques acides gras des HV utilisés ou testés comme alternative au gasoil.[1]

Huile ou graisse	Indice d'iode	Indice saponif	Composition en acide gras									
			8 :0	10 :0	12 :0	14 :0	16 :0	18 :0	18 :1	18 :2	18 :3	22 :1
Babasse	10-18	245-246	2,6-7,3	1-2-7-6	40-45	11-27	5.2-11	1-8-7-4	9-20	1.4-6,6		
Colza	110-126	188-193					1,5-6	1-2,5	52 ; 66.9	16-1-31	6-4-14.1	1-2
Coco	6-12	248-265	4,6-9,5	4.5-9,7	44-51	13-20,6	7,5-10.5	1-3,5	5-8,2	1-2,6	0-0,2	
Maïs	103-140	187-198				0-0,3	7-16,5	1-3,3	20-43	39-62,5	0.5-1.5	
Cotton	90-119	189-198				0,6-1.5	21-4-26-4	2,11-5	14,7-21,7	46,7-58,2		
Olive	75-94	184-196			0-1.3	7-20	0.5-5	55-84,5	3,5-21			
Palme	35-61	186-209		0-0.4	0.5-2.4	32-47,5	3,5-6,3	36-53	6-12			
Arachide	80-106	187-196				0-0.5	6-14	1,9-6	36.4-67,1	13-43		0-0.3
Sésame	104-120	187-195					7,2-9,2	5,8-9,2	35-46	35-48		

Tableau B2 : Propriétés de quelques acides gras comme fuel .[3]

Huile ou graisse	Indice de cétane	Pouvoir calorifique (kJ/kg)	Viscosité cinématique A 37,8°C (mm ² /s)	Point de trouble (°C)	Point de figeage	Flash point
Maïs	37	39 500	34	-1 ; 1	- 40	277
Colza	37,6	39 709	37,0	-3,9	- 31,7	246
Coco						
Soja	37,0	39 623	32,0	-3,9	-12,2	254
Cotton	41,8	39 468	33,5	1,7	-15	234
Palme	42					
Arachide	41,8	39 782	39,6	12,8	-6,7	271
Sésame	40,2	39 349	35,5	-3,9	-9,4	260
Castor**		39 500	297		-31,7	260

Tableau B3 : Caractéristiques principales relatives des esters d'acides gras. [3]

Huile – ester	Indice de cétane	Pouvoir calorifique (kJ/kg)	Viscosité cinématique 40°C ; mm ² /s	Point de trouble (°C)	Point de figeage	Flash point
*Coco -éthyle	67,4	38 158	3,08	5	-3	190
* Maïs - Méthyle	65	38 480	4.52	-3,4	-3	111
Coton . méthyle	51,2		6.8 (212)		- 4	110
* Olive - méthyle	61	37 287	4.70	-2	- 3	>110
*Palme -éthyle	56,2	39070	4,5(37,8°C)	8	6	193
*Colza - Méthyle	56	37500	4.53	-6		169
- Méthyle	53,7	8850	4 ,96	-6		
- Méthyle	47,9	39870	4,76 (37,82)	-3	-9	166
- éthyle	67,4	40663	6,02	1	-12	170
Friture méthyle	59	37337	4.5	1	-3	>110

ANNEXE C

Tableau C1. : Propriétés des acides gras et des esters servant de Biodiesel. [3]

Nom trivial (système)	Masse molaire (g/mol)	Point de fusion (°C)	Température D'ébullition °C	Indice de cétane
*Acide caprylique (octanoïque) (8 :0)	144.213	16.5	239.3	
Ester éthylique	158.24		193	33,6
Ester éthylique	172.268	43.1	208.5	
Ester butylique	200.322			39,6
*Acide caprique (décanoïque) (10 :0)	172.268	31.5	270	47,6
Ester méthylique	186.295		224.	47,2 ; 47,9
Ester éthylique	200.322	-20	243-245	51,2
Ester propylique	214,349			52,2
Ester iso-propylique	214.349			46,6
Ester butylique	228.376			54,6
*Acide laurique (dodécanoïque) (12 :0)	200.322	44	131	
Ester méthylique	214.349	5	266	61,4
Ester éthylique	228.376	-1.8	163	
*Acide Myristique (14:0) (tétradécanoïque)	228,376	58	250,5	
Ester méthylique	242,430	18,5	295	66,2 ; 73,5
Ester éthylique	256,430	12,3	295	66,9
Myristate de butyle	284,484			69.4
*Acide palmitique (16:0) (hexadécanoïque)	256,430	63	350	
Ester méthylique	270.457	30.5	415-418	.74, 5
Ester éthylique	284,454	19,3-24	191	93,1
Ester propylique	298,511	20,4	190	85
Ester isopropylique	298,511	13-14	160	82,6
Ester butylique	312,538	16,9		91,9
Ester 2-butylque	312,538			84,8
Ester isobutylque	312,538	22,5-28,9	199	83,6
Triglycérol	807,339	66,4	310-320	85
*Acide palmitoléique (16 :1) (9-z.hexadécanoïque)	254,412			
Ester méthylique	268,439			51
*Acide Stéarique (18 : 0) (octadécanoïque)	284,484	71	360	61,7
Ester méthylique	298,511	39	442-443	75,6-101
Ester éthylique	312,538	31-33,4	199	76,8 ; 97,7
Ester propylique	312,538			69,9 ; 90,9
Ester isopropylique	312,538			96.5

Tableau C1 : suite

Ester butylique	326,565	27,5	343	80-92,5
Ester 2 butylique	326,565			97,5
Ester isobutylique	326,565			99,3
Triglycérol	891,501	73		85
*Acide Oléique(9(Z) octadécanoïque) (18 :1)	282,468	16	286	41,1
Ester méthylique	296,495	-20	48,5	55 ; 59,3
Ester éthylique	310,522		216-217	53,9 ; 67,8
Ester propylique	324,547			55,7 ; 58,8
Ester iso propylique	324,547			86,6
Ester butylique	338,574			59,8-61,6
Ester2-butylique	338,574			71,9
Ester isobutylique	338,574			59,6
Triglycérol	885,453	-5,5	235-240	45
* Acide linoléique (18 :2)				
(9(z) ; 12(z) (octadécanoïque)	280,452	-5	229-230	31,2
Ester méthylique	294,475	-35	215	42,2
Ester éthylique	308,506		270 ; 275	37,1 ; 39,6
Ester propylique	322,533			40,6 ; 44
Ester butylique	336,56			41,6 ; 53
Triglycérol	879,405			32
Acide linoléique (9Z ; 12Z ; 15Z; octadécatriñoïque) (18 :3)	278,463	-11	230-232	20-4
Ester méthylique	292,463	-57 ; -52		22,7
Ester éthylique	306,49		174	26,7
Ester propylique	320,517			26,8
Ester butylique	324,544			28,6
Triglycérol	873,357			23
* Acide Eurique (22 :1) 13z-docosénoïque)	338,574	33	265	
Ester méthylique	352,601	30	221-222	
Ester éthylique	366,628		229-230	

Tableau C2 : Standard ASTM (D6751) USA pour le biodiesel.[3]

Propriétés	Limites	Unités	Méthode
Flash point	120 min	C°	D 93
Eau et sédiments	0.050 max	% volume	D 2709
Viscosité cinématique (40°C)	10.9 ; 6,0	mm ² /s	D 445
Résidu de sulfate	0.020 max	% masse	D 874
Soufre	0,0015 max	masse	D 5453
Indice de corrosion du cuivre	n°3 max		D 130
Indice de cétane	47 min		D 613
Point de trouble		°C	D 2500
Résidu en carbone (100% d'échantillon)	0,05 max	% masse	D 4530
Indice d'acide	0,8 max	mg KOH/8	D 664
Glycérine libre	0,020 max	% masse	D 6584
Total en glycérine	0,24 max	% masse	D 6584
Contenu en phosphore	0,001 max	% masse	D 4951
Température de distillation (conditions atmosphériques d'évaporation)	360 max	°C	D1160

Tableau C3 : Standard Européen EN 14 213 pour les biodiesel comme combustibles de chauffage .[3]

Propriétés	Méthode	Limites		Unités
		Min	Max	
Contenu en Ester	EN 14103	96,5		% (masse)
Masse volumique à 15°C	EN 180 3675 EN 180 12185	860	900	kg/m ³
Viscosité 40°C	EN 180 3164 1803105	3.5	5	mm ² /s
Flash Point	EN 180 3679	120		°C
Contenu en soufre	EN 180 20846- 24180 20884	10		mg/kg
Résidu en carbone	EN 150 10 370	0.3		% masse
Résidu de sulfate	150 3987	0.02		% masse
Contenu en eau	EN 15012937	500		mg/kg
Contamination Totale	EN 12662	24		mg/kg
Stabilité à l'oxydation 110 °C	EN 14112	4		h
Indice d'acide	EN 14104	0.5		mg KOH/g
Indice d'iode	EN 14111	130		g I ₂ /100g
Contenu en Monoglycéride	EN 14105	0.8		% masse
Contenu en diglycéride	EN 14105	0.2		%masse
Contenu en Triglycéride	EN 14105	0.2		% masse
Glycérine libre	EN 14105 EN 14106	0,02		% masse
Pointe trouble	180 3016	0		°C
Pouvoir calorifique	DIN 51 900-1 DIN 51 900-2	35		MJ/kg

Tableau C4 : Standard Brésilien pour le Biodiesel (ANP : agência Nacional do Petróleo)
 .[3]

Propriétés	Limites	Méthodes
Flash point (°C)	min 100	ISO/CD 3679
Eau et sédiments	max 0.02	D 2709
Viscosité cinématique (mm ² /s)	Spécifications actuelles sur pétrodiesel	D 445 ; EN 150 3104
Résidu sulfaté (% massique)	max 0.02	D 874 ; 150 3987
Soufre (%massique)	max 0.001	D 5453 ; EN 150 14596
Corrosion du cuivre 50°C, 3 h	max N° 1	D 130 ; EN 150 2160
Indice de cétane	min 45	D613 ; EN 1502160
Point trouble	Spécifications actuelles sur pétrodiesel	D 6371
Résidu de carbone	max 0.05	D 4530 ; EN 150 10 370
Indice d'acide (mg KOH/g)	max 0.8	D 664 ; EN 14 104
Glycérine libre (%masse)	max.0.02	D 6854 EN 14 105-6
Total en glycérine (%masse)	max 0.38	D 6854 ; EN 14105
Température d'évaporation (95%)	max 360	D 1160
Phosphore (mg/kg)	max 10	D 4951 ; EN 14 107
Densité	Spécifications actuelles sur pétrodiesel	D 12 98/4052
Alcool (%masse)	max 0.5	EN 14 110
Indice d'iode	-----	EN 14 111
Monoglycéride (% massique)	max 1,00	D 65 84 ; EN 14 105
Diglycéride (%massique)	max 0,25	D 65 84 ; EN 14 105
Triglycéride (%massique)	max 0,25	D 65 84 ; EN 14 105
N a +K (mg/kg)	max 10	EN 14 108-9
Sensibilité à l'oxydation à 110 °C (h)	min 6	EN 14 112

Tableau C5 : Standard SUD- Africain pour le biodiesel.[3]

Propriétés	Limites	Méthodes de Teste
Composition es ester (% massique)	min 96.5	EN 14 103
Masse volumique (kg/m ³) à 15°C	min 860	ISO 3675- 150 12 185
Viscosité cinématique à 40°C (mm ² /s)	3.5-5	150 31 04
Flash point (°C)	Min -120	ISO 3 679
Composition en soufre (mg/kg)	Max 10	ISO 20846 -150 20 884
Résidu de carbone (10%) (%masse)	0.3	ISO 10370
Indice de cétane	51	ISO 5165
Contenu en cendre sulfatée (% masse)	0,02	ISO 12 937
Contenu en eau (% massique)	0.05	EN 12 937
Contamination Totale (mg/kg)	max 24	ISO 21662
Taux de Corrosion du cuivre (3hr, 50°C)	max N°1	ISO 21 60
Indice d'acide	0.5 mg KOH/g	EN 14 104
Stabilité à l'oxydation à 110 °C	min 6 h	EN 14 112
Indice d'iode	max 140 gI ₂ /100g	EN 14 111
Ester méthylique d'acide linoléinique	12% max	EN 14 103
Ester méthyliques polyinsaturés (% massique) (≥4 doubles liaisons)	max 1%	
Contenu en méthanol (% massique)	max 0.2	EN 14 110
Contenu en Monoglycéride (% massique)	max 0.8 %	EN 14 105
Contenu en Diglycéride	max 0.2 %	EN 14 105
Contenu en Triglycéride	max 0.2 %	
Glycérol libre	max 0.02 %	EN 14 105-EN 14 106
Total de glycérol	max 0.2 5%	EN 14105
Métaux Groupe 1 (Na+K)	max 5 mg/kg	EN 14 108-EN 14109
Moteurs Groupe 2 (Mg+Ca)	max 5 mg/kg	pr EN 14 538
Contenu en phosphore	max 10 mg/kg	

Tableau C6 : Quelques méthodes détaillées .[3]

Standard	Titre
ASTM 6584	Détermination du glycérine libre et total dans le B 100 d'ester méthylique de Biodiesel par chromatographie en phase vapeur
EN 14 078	Produits liquides. Détermination des acides gras par la spectroscopie infrarouge.
EN 14103	Détermination des esters et de l'ester méthylique d'acide linoléique
EN 14104	Détermination de l'indice d'acide
EN 14 105	Détermination du glycérol total et libre et la composition en mono-di-triglycéride.
EN 141 06	Détermination du glycérol libre.
EN 141 07	Détermination de la quantité de phosphore par la méthode de le mesure de l'émission spectrométrique de l'ICP : inductively coupled plasma
EN 14108	Détermination de la composition en sodium par la méthode de la spectroscopie de l'absorption atomique
EN 14 109	Détermination de la composition en potassium par la méthode de la spectroscopie de l'absorption atomique
EN 14 110	Détermination de la composition en méthanol
EN 14 111	Détermination de l'indice d'iode
EN 14 112	Détermination de la stabilité à l'oxydation (Accemerated Oxidation test)
EN 14 331	Séparation et caractérisation des esters méthyliques d'acide gras par chromatographie en phase liquide ou vapeur
EN 14538	Détermination de la composition en (Ca ; Mg) par analyse spectrale de l'émission optique avec ICP.

ANNEXE D

LA QUALITÉ DES HUILES VÉGÉTALES CARBURANT (3')

Une huile végétale utilisée comme carburant doit correspondre à la norme ci-dessous.

PRÉ-NORME DIN 51605 (juin 2005)

Propriétés caractéristiques de l'huile de colza				
Propriétés / teneurs	Unités	Mini	Maxi	Méthode d'analyse
Densité (15°C)	kg/m ³	900	930	DIN EN ISO 3675 / DIN EN 50 121 85
Point d'éclair	°C	220	-	DIN EN 2719
Viscosité cinématique (40°C)	mm ² /s	-	36	DIN EN ISO 3104
Valeur calorifique	kJ/kg	36000	-	DIN 51903-1,-2,-3
Indice de cétane	-	39	-	-
Carbone résiduel	% masse	-	0,40	DIN EN ISO 10370
Indice d'iode	g/100g	95	125	DIN EN 14111
Teneur en soufre	mg/kg	-	10	DIN EN ISO 20884 / DIN EN ISO 20846
Propriétés variables de l'huile de colza				
Propriétés / teneurs	Unités	Mini	Maxi	Méthode d'analyse
Teneur en Particules	mg/kg	-	24	DIN EN 12662
Acidité	mg KOH/g	-	2,0	DIN EN 14104
Stabilité à l'oxydation (110°C)	h	5,0	-	DIN EN 14112
Teneur en phosphore	mg/kg	-	12	DIN EN 14107
Teneur en calcium et magnésium	mg/kg	-	20	DIN EN 14538
Teneur en cendres	% masse	-	0,01	DIN EN ISO 6245
Teneur en eau	% masse	-	0,075	DIN EN ISO 12937

Pour le **Tournesol** (et a fortiori pour le Colza), on ajoutera à la norme le critère des **cires cristallisables et non cristallisables**. La méthode d'analyse la plus précise pour déterminer le taux de cires est la chromatographie en phase gazeuse (celles gravimétriques ou turbidimétriques comme le *Cold-test* ne sont pas assez précises, surtout pour les faibles teneurs). Un bon décirage de l'huile (par wintérisation), avec ou sans décorticage des graines avant trituration, permet d'obtenir des seuils inférieurs à 100 ppm. Cette valeur pourrait donc être prise comme étalon, mais le seuil adéquat en combustion dans un moteur reste à définir par des expérimentations.

ANALYSE MINIMUM DE CONTRÔLE

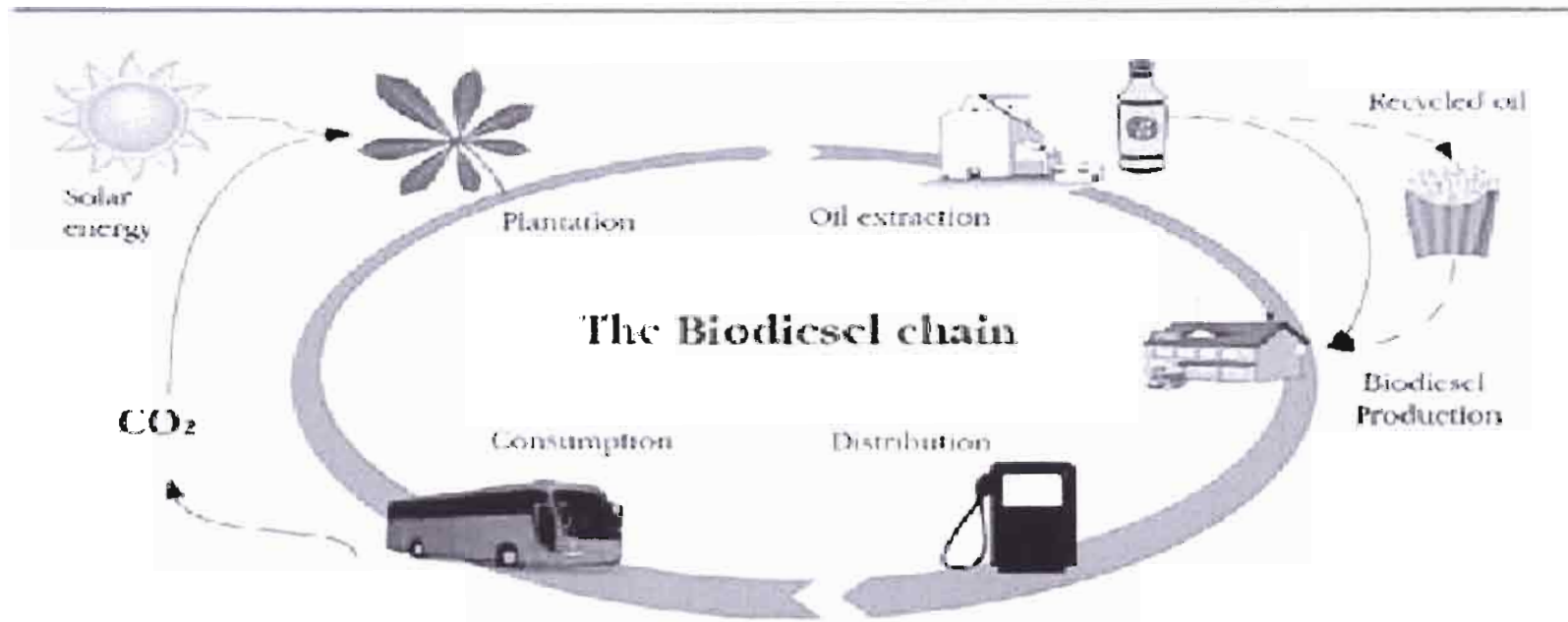
Tous les paramètres de la norme ne doivent pas être systématiquement analysés en production d'huile carburant, car nombre d'entre eux sont par nature déjà conformes à celle-ci. Il faut pratiquer une analyse d'huile avec au moins les facteurs ci-dessous :

Propriétés / teneur	Unités	Maxi	Méthode d'analyse
Teneur en particules	mg/kg	24 (24 ppm)	DIN EN 12662
Acidité	mg KOH/g	2,0	DIN EN 14104
Teneur en Phosphore	mg/kg	12 (12 ppm)	DIN EN 14107
Teneur en Ca et Mg	mg/kg	20 (20 ppm)	DIN EN 14538
Teneur en eau	% masse	0,075 (750 ppm)	DIN EN ISO 12937
Teneur en cires - totales - cristallisables	mg/kg	100 (100 ppm) ? 75 (75 ppm) ?	Chromatographie gazeuse Seuils à valider

Pierre-Jean BORNICHE – 07/2005

Etapes de la production du biodiesel produit à partir de l'huile de jatropha (2')

Jatropha Project



Les enjeux des biocarburants (6')

	Essence	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	MTBE	ETBE Blé	ETBE Betterave
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée	0,873	2,05	2,05	0,76	1,02	1,02
Indicateur effet de serre (g eq. CO2/kg) (avec hypothèse de combustion totale des produits, effectuée sur la base de leur teneur en carbone)	3635	505	527	N/C	2336	2346

	Gazole	Huile Colza	Huile Tournesol	EMHV Colza	EMHV Tournesol
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée	0,917	4,68	5,48	2,99	3,16
Indicateur effet de serre par kg (avec hypothèse de combustion totale des produits, effectuée sur la base de leur teneur en carbone)	3454	601	468	787	671

	PCI MJ/Kg	%*	Coeff**	PCS / PCI MJ/L	%***	Coeff****
Essence	42,5		1	32,4		1
Méthanol	19,9	47	2,14	15,8	49%	2,04
Ethanol	26,8	63	1,59	21,3	66%	1,52
MTBE	35,22	83	1,21	26,3	81%	1,23
ETBE	35,88	84	1,18	26,9	83%	1,2
Tournesol	37,7	88	1,14	34,9	97%	1,03
Palme	35,6	83	1,20	32,1	89%	1,12
Biohuile	17	40	2,52			
Kérosène	43,3					
GPL	46,1					
GNV	48					
Hydrogène	120					
Iso-octane	44,4					
Iso-heptane	44,6					
Iso-butène	44,7					
Chanvre	16,46			17,6	49%	2,04
Gazole	42,8			36		1,00
EMHV Colza	37,39	87	1,14	33	92%	1,09
EMHV Tournesol	37,02	86	1,16	32,7	91%	1,1
Colza	37,2	87	1,15	34,3	95%	1,05

Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée	Essence	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	MTBE	ETBE Blé	ETBE Betterave
sans tenir compte du pouvoir calorifique des carburants (A)	0.873 litre	2.05 litre	2.05 litre	0.76 litre	1.02 litre	1.02 litre
Coefficient de conversion pour tenir compte du pouvoir calorifique (B)	1	1.52	1.52	1.23	1.2	1.2
en tenant compte du pouvoir calorifique des carburants (A / B)	0.873 leqp	1.349 leqp	1.349 leqp	0.618 leqp	0.85 leqp	0.85 leqp
Multiple par rapport à l'essence *	1	1,5	1,5	0,7	1,0	1,0

Indicateur effet de serre (g eq. CO2/kg) (avec hypothèse de combustion totale des produits, effectuée sur la base de leur teneur en carbone)	Essence	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	MTBE	ETBE Blé	ETBE Betterave
sans tenir compte du pouvoir calorifique des carburants (A)	3635	505	527	N.C	2336	2346
Coefficient de conversion pour tenir compte du pouvoir calorifique (B)	1	1.59	1.59	1.21	1.18	1.18
en tenant compte du pouvoir calorifique des carburants (A * B)	3635	803	838		2756	2768
Multiple par rapport à l'essence *	1	-4,5	-4,3		-1,3	-1,3

Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée	Gazole	Huile Colza	Huile Tournesol	EMHV Colza	EMHV Tournesol
sans tenir compte du pouvoir calorifique des carburants (A)	0.917 litre	4.68 litre	5.48 litre	2.99 litre	3.16 litre
Coefficient de conversion pour tenir compte du pouvoir calorifique (B)	1	1.05	1.03	1,09	1.10
en tenant compte du pouvoir calorifique des carburants (A / B)	0,92 leqp	4,46 leqp	5,32 leqp	2,74 leqp	2,87 leqp
Multiple par rapport au gazole *	1	4,9	5,8	3,0	3,1

Indicateur effet de serre (g eq. CO2/kg) (avec hypothèse de combustion totale des produits, effectuée sur la base de leur teneur en carbone)	Gazole	Huile Colza	Huile Tournesol	EMHV Colza	EMHV Tournesol
sans tenir compte du pouvoir calorifique des carburants (A)	3454	601	468	787	671
Coefficient de conversion pour tenir compte du pouvoir calorifique (B)	1	1.15	1.14	1.14	1.16
en tenant compte du pouvoir calorifique des carburants (A * B)	3454	691	534	897	778
Multiple par rapport au gazole *	1	-5,0	-6,5	-3,8	-4,4