

TABLE DES MATIERES

<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>i</i>
<i>TABLE DES MATIERES</i>	<i>ii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>iv</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>v</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>vi</i>
<i>Liste des annexes</i>	<i>viii</i>
<i>Introduction</i>	<i>1</i>
PARTIE I: ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES	
<i>I- CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE</i>	<i>3</i>
<i>I-1- CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL</i>	<i>4</i>
I-1-1-Problématiques :.....	<i>4</i>
I-1-2-Composition et propriétés des carburants usuels [9] :	<i>4</i>
I-1-3-Nature des émissions et impacts environnementaux :	<i>5</i>
<i>I-2- CONTEXTE ECONOMIQUE</i>	<i>6</i>
I-2-1-Production du carburant dans le monde :.....	<i>6</i>
I-2-2-Avantages des biocarburants face aux carburants fossiles :	<i>7</i>
<i>I-3- LES BIOCARBURANTS</i>	<i>8</i>
I-3-1- Les différents types de biocarburants et leurs origines :	<i>8</i>
I-3-2- Disponibilités des matières premières :	<i>9</i>
I-3-3- Répartition de la teneur en acide gras de différentes huiles végétales :	<i>10</i>
I-3-4- Utilisation du biocarburant par ajout :	<i>11</i>
<i>II- GENERALITE : POURQUOI AVOIR CHOISI LE JATROPHA ?</i>	<i>13</i>
<i>II-1- HISTORIQUE DE LA PLANTE DE JATROPHA</i>	<i>13</i>
II-1-1- Possibilités de l'utilisation de Jatropha :	<i>14</i>
II-1-2- Importance potentielle de Jatropha dans le secteur énergétique :.....	<i>15</i>
<i>II-2-COMPOSITION DE L'HUILE VEGETALE DES PLANTES OLEAGINEUSES EN GENERAL</i>	<i>15</i>
II-2-1- L'huile végétale de Jatropha :.....	<i>16</i>
II-2-2-Utilisation de l'huile végétale de Jatropha :	<i>17</i>
II-2-3- Aspect protecteur de l'environnement :.....	<i>19</i>
<i>III- BIOCARBURANT : 1^{RE}, 2^E ET 3^E GENERATION</i>	<i>19</i>
<i>III-1-BIOCARBURANT DE PREMIERE GENERATION</i>	<i>19</i>
<i>III-2-BIOCARBURANT DE DEUXIEME GENERATION</i>	<i>19</i>

III-2-1- La filière biochimique :	20
III-2-2- La filière thermochimique :	20
III-3- BIOCARBURANT DE TROISIEME GENERATION.....	20
<i>IV- SITUATION MONDIALE ET NATIONALE.....</i>	<i>21</i>
IV-1- PRODUCTION MONDIALE DU BIOCARBURANT	21
IV-1-1-Impact environnemental.....	21
IV-2- PRODUCTION NATIONALE DU BIOCARBURANT	23
<i>V- ETUDES RECENTES – BIOCARBURANT</i>	<i>25</i>
V-1- DONNEE TECHNIQUE DE LA PRODUCTION DES DERIVES D'HUILES	25
V-1-1- La voie thermochimique :.....	25
V-1-2- La voie chimique : seulement par la transestérification :	27
V-2- TECHNIQUE DE PRODUCTION DE BIOCARBURANT	28
V-3- PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES.....	29
<i>VI- SITE ET INSTITUTION D'ACCUEIL.....</i>	<i>31</i>
VI-1-Généralité sur l'OMNIS :	31
VI-2-Responsabilité de l'OMNIS :.....	31
<i>PARTIE II : MATERIELS ET METHODES</i>	
<i>I- EXTRACTION DES GRAINES DE JATROPHA</i>	<i>34</i>
I-1- EXTRACTION CHIMIQUE DE LA GRAINE DE JATROPHA	34
I-1-1- Extraction à froid :	34
I-1-2- Extraction à chaud :	34
I-2- METHODE D'EXTRACTION MECANIQUE DES GRAINES : LE PRESSAGE ...	35
I-2-1- Présentation des matériels :	35
I-2-2- Préparation de la matière première :	36
I-2-3- Démarche du pressage des graines :	37
<i>II- PREPARATION DE L'HUILE VEGETALE DE JATROPHA PAR LA REACTION CHIMIQUE de Transestérification.....</i>	<i>38</i>
II-1- DETERMINATION DE LA QUANTITE DE SOLVANT ET PREPARATION DU BIOCARBURANT	38
II-1-1-Préparation de la solution d'huile :	38
II-1-2-Dosage de la solution d'huile préparée :	38
II-1-3-Préparation de l'ester :	39
II-1-4-Préparation du Biocarburant :	39
II-2- LAVAGE ET VALORISATION DU SOUS-PRODUIT	40
II-2-1-Lavage du biodiesel (le produit principal) :.....	40

II-2-2-Valorisation du sous-produit :	41
<i>III-ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DES PRODUITS : HUILE VEGETALE BRUTE ET BIOCARBURANT DE JATROPHA.....</i>	41
III-1- LA DENSITE.....	41
III-2- LA VISCOSITE.....	42
III-3- LE POINT ECLAIR	43
III-4- LE BSW (BASIC SEDIMENT AND WATER)	45
<i>PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS</i>	
<i>I- PRESENTATION DES PRODUITS A ANALYSER.....</i>	47
<i>II- RESULTATS OBTENUS APRES EXTRACTION PAR SOLVANT.....</i>	47
<i>III- PRESENTATION DU PRODUIT APRES PRESSAGE.....</i>	48
<i>IV- PRODUCTION DU BIODIESEL A PARTIR DE L'HUILE VEGETALE DE JATROPHA</i>	48
IV-1- PRODUIT DE LA REACTION DE TRANSESTERIFICATION	48
IV-2- VALORISATION DU SOUS-PRODUIT	49
IV-3- CARACTERISATION DES PRODUITS	50
IV-3-1- La densité :	50
IV-3-2- La viscosité :	52
IV-3-3- Le point éclair :	54
IV-3-4- Le BSW (Basic Sediment and Water):	55
<i>V- DISCUSSIONS</i>	57
<i>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</i>	50
<i>CONCLUSION.....</i>	60
<i>PERSPECTIVES.....</i>	60
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	62
<i>ANNEXES.....</i>	<i>I</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Distribution des EMHV dans les différentes huiles végétales [5]</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 2: Alternatives de l'utilisation de JatrophaCurcas</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 3: Acide gras contenus dans les diverses huiles comestibles.....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 4: Classification des huiles végétales selon l'indice d'iode.....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 5: Caractéristiques de quelques huiles végétales habituelles [12].....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 6: Valeur relevé après extraction par le solvant hexane</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 7: Résultats des analyses de la densité de l'HVB de Jatropha prise avec les températures différentes.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 8: Résultats des analyses de la densité du biodiesel de Jatropha obtenus à des températures différentes.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 9: Résultats de la viscosité obtenus par l'analyse de l'HVB de Jatropha.</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 10: Résultats de la viscosité obtenus par l'analyse du biodiesel de jatrophia.</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 11: Résultats de la viscosité de l'huile brute de Jatropha.</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 12: Résultats de la viscosité du biodiesel de Jatropha.</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 13: Résultat de l'analyse du point d'éclair.</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 14: Résultat de l'analyse du BSW.</i>	<i>55</i>

Liste des figures

<i>Figure 1: Part de la consommation d'huile végétale utilisée dans la production de biodiesel .</i>	9
<i>Figure 2: Ethanol, mélange à l'essence</i>	12
<i>Figure 3: Biodiesel, mélange au gazole</i>	12
<i>Figure 4: Mécanisme de la réaction de transestérification</i>	13
<i>Figure 5: Différentes espèces de Jatropha</i>	14
<i>Figure 6: Savon artisanal de Jatropha.</i>	17
<i>Figure 7: Huile et gazole miscibles l'un l'autre</i>	18
<i>Figure 8: Diesel vert (biodiesel)</i>	18
<i>Figure 9: Réaction de transestérification</i>	28
<i>Figure 10: Schéma détaillé de la réaction de transestérification</i>	29
<i>Figure 11: Appareil et montage d'extraction d'huile, le soxhlet.....</i>	35
<i>Figure 12: Matériel pour le pressage des graines de Jatropha.....</i>	36
<i>Figure 13: Graine normale</i>	36
<i>Figure 14: Graine décortiquée</i>	36
<i>Figure 15: Mode de pressage.....</i>	37
<i>Figure 16: Presseur mécanique</i>	37
<i>Figure 17: La séparation des phases</i>	39
<i>Figure 18: Mécanisme de la réaction de transestérification</i>	40
<i>Figure 19: Appareil de mesure de la densité</i>	42
<i>Figure 20: Matériels d'analyse de la viscosité.....</i>	43
<i>Figure 21: Matériel d'analyse du point d'éclair</i>	44
<i>Figure 22: Les tubes coniques remplis d'échantillon et la centrifugeuse</i>	46
<i>Figure 23: Les échantillons à analyser.....</i>	47
<i>Figure 25: Huile végétale brute avant et après repos.....</i>	48
<i>Figure 26: Produit et sous-produit après la réaction chimique</i>	49
<i>Figure 27: glycérines avant (1) et après valorisation (2).....</i>	49
<i>Figure 28:Densité de l'huile végétale et du biocarburant de Jatropha en fonction de la température</i>	52
<i>Figure 29: Viscosité de l'huile végétale et de biocarburant de Jatropha en fonction de la température</i>	54
<i>Figure 30: Tubes à la sortie de la centrifugeuse</i>	56
<i>Figure 31: Savon blanc de Jatropha.....</i>	VII

Liste des abréviations

AGL : Acide Gras Libre

ASTM: American Society for Testing and Materials

BTL: Biomass To Liquid

BSW: Basic Sediment and Water

CITEPA: Centre Inter-professionnel Techniques d'Etude de la Pollution Atmosphérique

CNRIT : Centre National de Recherches Industrielle et Technologie

CO : Monoxyde de carbone

COC: Point d'éclair en coupelle ouverte

COV : Composé Organique Volatile

cSt : centi-Stokes

EEHV : Ester Ethylique de l'huile végétale

EMHV : Ester Méthylique de l'huile végétale

FAO: Food and Agriculture Organization

FFA: Free Fatty Acid

GEM : Green Energy Madagascar

GES : Gaz à Effet de serre

GNV : Gaz Naturel pour Véhicule

GPL : Gaz Liquéfié de Pétrole

HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique

HC : Hydrocarbure imbrûlé

HV : Huile Végétale

HVB : Huile Végétale Brute

HVP : Huile Végétale Pure

IC : Indice de cétane

ID : Indice d'iode

IO : Indice d'octane

MMR : Madagascar Minerals Ressources

NOx : Oxyde d'azote

OCDE : Organisation Economique de commerce et de développement

OMNIS : Office des Mines Nationales et des Infrastructures Stratégiques

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PC : Pouvoir calorifique

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur

PMCC: Point d'éclair en coupelle fermée

PVC: Polyvinyl cyclique

SARA: Saturé Aromatique Résine Asphaltène

TFL : Température Limite de Filtrabilité

Liste des annexes

ANNEXE 1 : Liste des carburants

ANNEXE 2 : Fabrication de savon blanc à partir de l'huile de Jatropha

Introduction

Le problème de changement climatique dans le monde est une menace réelle. De plus, on note aussi l'épuisement des sources d'énergie naturelle non renouvelable. Un certain nombre de problèmes écologiques s'accentue dû à une forte augmentation de l'effet de serre. Plusieurs recherches ont été faites et réalisées pour identifier des ressources capables de produire de l'énergie renouvelable. Par exemple les énergies solaires, éoliennes ou hydrauliques. Dans notre étude, nous avons choisi de produire une énergie renouvelable par une biomasse : des plantes qui ont des graines oléagineuses ou même de la plante entière.

Ces ressources végétales énergétiques renouvelables sont reparties en catégories de génération. Les biocarburants de première génération sont obtenus directement de la partie de la plante : les tiges, les feuilles, les racines et même les graines. Les biocarburants de deuxième génération sont obtenus à partir des biomasses comme les pailles de céréales, bois et résidus forestiers et les cultures condamnées comme le bioéthanol. Les biocarburants de troisième génération ou les algocarburants, qui sont, d'après son nom, produits à partir des microalgues [1], [2], [3].

La hausse galopante du prix des hydrocarbures d'origines fossiles est importante depuis quelques années. Par conséquent, les pays non producteurs de pétrole avec des grandes capacités en consommation énergétique ont trouvé des ressources renouvelables qui peuvent substituer les produits de dérivés pétroliers. Cette substitution est engagée internationalement maintenant par le biocarburant vu son intérêt au niveau environnemental et aussi son caractère renouvelable.

Les biocarburants sont produits à partir des huiles végétales et des alcools. Parmi des nombreuses plantes, le Jatropha Curcas figure parmi les rares plantes non consommables. Il peut vivre et s'accroître normalement dans les pays secs et arides et sa culture n'exige pas beaucoup d'entretien. Mais seulement, le meilleur rendement des graines dépend des travaux des mains d'œuvre.

A Madagascar comme partout dans les pays non producteurs de pétrole, le coût de l'énergie au niveau global induit d'impact dramatique et incontrôlable sur l'économie et la finance nationale. La production de biocarburant à partir de l'huile végétale de Jatropha peut être

intéressant à Madagascar à cause de notre climat plus favorable à cette plante et aussi que tous les ingrédients de la production sont déjà présents ou sont faciles à trouver.

L'objectif de ce travail est de produire une huile végétale à partir de Jatropha en vue de son application comme biocarburant.

Pour ce faire, ce travail se repartît en 3 grandes parties :

- ✓ La première partie décrit l'étude et le contexte bibliographique.
- ✓ La deuxième partie s'intéressera aux matériels et méthodes de la production du biocarburant et les caractérisations physico-chimiques des produits dérivés de la plante.
- ✓ La troisième partie abordera les résultats de l'expérience et leurs interprétations.

PARTIE I : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

I- CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Les carburants fossiles proviennent de la transformation des matières organiques mortes mélangées à divers minéraux enfouis dans le sol profond depuis plusieurs millions d'années. Il s'agit du pétrole, du charbon, de la tourbe et du gaz naturel. Ces sources ne sont pas renouvelables car elles demandent des millions d'années pour se reconstituer et parce qu'elles sont utilisées beaucoup plus vite que le temps nécessaire pour créer des réserves [6], [7]. La découverte des énergies fossiles a considérablement accéléré et amplifié le développement des sociétés [1]. Les carburants qu'on a l'habitude d'employer sont tous dérivés du pétrole par raffinage.

Types de carburants :

Les carburants peuvent être classés de différentes manières (cf *plus détaillé dans l'annexe 1*). On peut distinguer : les carburants fossiles, les biocarburants et les ergols.

- Les *carburants fossiles* sont ceux qui proviennent de la transformation des matières organiques mortes mélangées à divers minéraux à des grandes profondeurs. Et aussi, des combustibles riches en carbone, essentiellement des hydrocarbures, issus de la méthanisation d'êtres vivants morts et enfouis dans le sol depuis plusieurs millions d'années, jusqu'à parfois 650 millions d'années. Il s'agit du pétrole, du charbon, de la tourbe et du gaz naturel.
- Les *biocarburants* proviennent des plantes ou animaux (non fossilisés). Parmi les produits développés commercialement, citons le bioéthanol et le biodiesel.
- Les *ergols* liquides voir solides sont utilisés dans les moteurs de fusées anaérobiques, rare type de moteur capable de fonctionner en dehors de l'atmosphère.

Concernant le carburant qu'on emploie usuellement, ils sont dérivés du pétrole brut par raffinage comme le gazole et le super sans plomb. Ces carburants sont des mélanges d'hydrocarbure qui compte de 12 à 22 atomes de carbone [8]. Les énergies fossiles sont des sources d'énergies :

- Primaires : Il s'agit bien de « sources » d'énergie que l'on va puiser dans le sol
- Nobles : Il s'agit d'une énergie chimique.
- Non-renouvelables : Les stocks souterrains d'origine géologique ne se renouvellent pas. Leur exploitation les épouse peu à peu [6]. Parce qu'elles sont nobles et non-renouvelables, ces sources d'énergie sont précieuses pour l'humanité.

I-1- CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

I-1-1-Problématiques :

Il est bien établi que l'automobile et le transport routier jouent un rôle prépondérant dans la pollution atmosphérique et contribue en particulier à la détérioration de la qualité de l'air en zones urbaines. D'après les données fournies par le Centre Inter-professionnel Techniques d'Etude de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) sur les émissions globales, le trafic routier a été responsable en moyenne de 58% des émissions de monoxyde de carbone (CO), 68% des émissions d'oxydes d'azote (NOx), 45% des émissions des composés organiques volatils (COV), 15% des émissions d'anhydres sulfureux (SO₂) et 42% des émissions des particules (moteurs Diesel). Il faut ajouter celles du dioxyde de carbone (CO₂) à ces émissions polluantes qui peuvent contribuer à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique et au renforcement de l'effet de serre naturel.

Comment peut-on réduire la pollution atmosphérique générée par le trafic routier ? Pour répondre à cette question, il faut se rappeler des différents facteurs ou des éléments influençant la nature et la composition des effluents gazeux émis par l'échappement des moteurs à essence ou diesel.

I-1-2-Composition et propriétés des carburants usuels [9] :

- Nature et composition : Deux grands types de carburants sont actuellement utilisés selon le mode de fonctionnement des moteurs à combustion interne mis en œuvre : les essences, distribuées sous forme de divers super-carburants et destinées à alimenter les moteurs à allumage commandés et les gazoles dédiés à l'alimentation des moteurs Diesel (moteur à allumage par compression). Parce qu'on se focalise seulement sur les moteurs diesel, de façon général, les gazoles correspondent à des mélanges complexes d'hydrocarbures. Ce sont des hydrocarbures de type paraffinique, naphténique ou aromatique allant en général de C12 à C25. Leurs points d'ébullition à pression atmosphérique sont compris entre 180 et 360°C environ. La composition détaillée des gazoles au sein de chaque famille d'hydrocarbures est très variable. Les gazoles contiennent encore des composés soufrés, en dépit des opérations de désulfurations ; leur teneur en soufre est réglementée.
- Caractéristiques générales : Selon le type de moteurs, les carburants doivent posséder des caractéristiques appropriées, respectant les exigences de fonctionnement du moteur utilisé dans des conditions aussi variées que possible. Le couple moteur/carburant mis en jeu doit

également répondre aux attentes de sécurité et de fiabilité exprimées par l'automobiliste, et respecter les contraintes réglementaires limitant les émissions de polluants atmosphériques.

I-1-3-Nature des émissions et impacts environnementaux :

- Emission de dioxyde de carbone : L'émission de CO₂ d'origine automobile est d'autant plus importante que la structure des hydrocarbures composant le carburant contient un nombre élevé de carbone. Le CO₂ est un composé chimiquement inerte dans l'atmosphère mais son émission massive d'origine naturelle et anthropique est responsable de plus de 50% de l'effet de Serre. Pour un carburant donné, il n'existe pas de remède pour réduire les émissions de CO₂ car c'est le produit final de la combustion complète des hydrocarbures. Pour un moteur à combustible interne, la seule alternative est de passer au Gaz Liquéfié de Pétrole (GPL) composé d'hydrocarbures en C3 - C4, ou mieux encore au Gaz Naturel pour Véhicule (GNV) constitué de 90% environ de méthane.
- Emission des imbrûlés : L'émission des hydrocarbures imbrûlés (HC) résulte de la combustion incomplète du carburant au voisinage des parois de la chambre de combustion ou lors de l'ouverture de la soupape d'échappement alors que le front de la flamme n'a pas traversé la chambre de combustion. L'apparition de combustion incomplète dépend de trois facteurs : la vitesse de rotation du moteur, le taux de remplissage et la richesse du mélange carburé. Les imbrûlés émis correspondent donc aux constituants primaires des carburants, aux produits organiques intermédiaires de combustion incomplète et au monoxyde de carbone.
- Emission des NOx et N₂O : Toute combustion utilisant l'air comme comburant émet des oxydes d'azotes de type NOx et en proportion beaucoup faible du protoxyde d'azote N₂O. Les émissions d'oxydes d'azote en présence de soleil concourent au développement de processus chimiques complexes de photo-oxydation des Composés Organiques Volatiles présent dans la troposphère. Les processus photochimiques des polluants peuvent contribuer à la formation locale de concentration anormalement élevée d'ozone et d'aérosols nocifs pour la santé humaine et l'environnement. Quant au N₂O, il est produit lors de la combustion de composés azotés réalisée en mélange pauvre. Ces conditions correspondent au mode de fonctionnement des moteurs Diesel.
- Emission de SO₂ : La présence de dioxyde de soufre dans les gaz d'échappement est due à l'oxydation partielle des composés soufrés initialement contenus dans les carburants. Ces composés soufrés, plus ou moins abondants dans le pétrole brut selon son origine, subissent en raffinerie des traitements de désulfuration. L'acide sulfurique dérivé contribue à augmenter l'acidité des pluies ou des dépôts secs.

- Emission de polluants ayant directement un caractère dangereux pour la santé : Outre les polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote, de carbone et de soufre, émis en général en grandes quantités par les véhicules et autres procédés de combustion, on retrouve dans notre atmosphère des quantités plus faibles de substances potentiellement toxiques, susceptibles d'avoir directement des effets nocifs sur notre santé. Ces polluants atmosphériques, considérés comme dangereux, incluent les matières particulières, le benzène, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les aldéhydes.

I-2- CONTEXTE ECONOMIQUE

I-2-1-Production du carburant dans le monde :

En 1900, Rudolf Diesel a présenté son moteur à allumage spontané à l'exposition universelle de Paris. Dans ce prototype, il a utilisé l'huile d'arachide comme carburant, qui devient ainsi le premier biodiesel. Des huiles végétales ont été utilisées jusqu'aux années 20 où des modifications ont été apportées aux moteurs leur permettant d'utiliser un résidu de diesel de pétrole. Avec le prix, la disponibilité et les subventions des gouvernements, le diesel est devenu rapidement le carburant de choix pour les moteurs diesels [5].

Les réserves prouvées de combustibles fossiles ou de combustibles conventionnelles dans le monde sont les suivantes [6].

- 1- pétrole brut : 1 638 milliards de barils (Venezuela : 297,8 milliards de barils, Arabie Saoudite : 265,4 milliards de barils et Canada : 173,1 milliards de barils).
- 2- gaz naturel : 192,3 billions de mètres cubes (Russie : 47,8 billions de mètres cubes, Iran : 33,6 billions de mètres cubes et Qatar : 25,2 billions de mètres cubes).
- 3- Charbon : 858,3 milliards de tonnes (États-Unis : 234,5 milliards de tonnes, Russie : 157,3 milliards de tonnes et Chine : 114,5 milliards de tonnes).

Le gazole est fortement taxé au Danemark et en Suisse, vendu plus cher que l'essence aux Etats-Unis mais encore très utilisé en France où il est moins cher et moins taxé que l'essence [7]. Comme ici à Madagascar, le gazole est moins cher que l'essence.

A cause des ressources en pétrole devenues de plus en plus rares et avec un coût en explosion depuis quelque temps, le baril de pétrole a dépassé. Ces raisons combinées aux inquiétudes

concernant le changement climatique, la qualité de l'air et de l'eau qui se dégrade de plus en plus, et les préoccupations de la santé humaine favorisent le développement des biodiesels. En effet, l'utilisation continue et croissante du pétrole comme source d'énergie amplifie la pollution de l'air et accroît le réchauffement climatique à cause de l'émission de CO₂ [5].

I-2-2-Avantages des biocarburants face aux carburants fossiles :

Les biocarburants présentent plusieurs avantages par rapport aux ressources fossiles [3]. L'utilisation du biodiesel peut fortement contribuer à réduire la pollution de l'air dans laquelle nous vivons. Ce carburant est biodégradable, non toxique et la présence d'oxygène dans sa composition permet une combustion plus complète [5]. Parmi les options pour abaisser les émissions des GES et des particules actuellement étudiées, comparés au diesel issu du pétrole, les biocarburants constituent une alternative importante [10].

L'origine des biocarburants constitue des ressources naturelles et renouvelables par exemple, les plantes, et permet de réduire au minimum l'impact au niveau des émissions de CO₂, ce qui permettrait de répliquer à l'accroissement de la demande mondiale en carburant et de contribuer à combattre le problème causé par la disparition des réserves de combustibles fossiles, non renouvelables.

En effet, durant sa croissance, la plante consomme par photosynthèse la même quantité de dioxyde de carbone que la combustion de carburant dégagera.

En plus, les réserves de combustibles fossiles parcourrent souvent des milliers de kilomètres entre leur lieu de production et d'utilisation. Ils sont parfois produits dans des pays aux gouvernements radicaux, finançant des régimes politiques aux actions déplorables, contrairement à la production du biocarburant qui peut être réalisée localement dans n'importe quel pays favorable au reboisement massif des plantes oléagineuses. La production de carburant à proximité de leur lieu d'utilisation limite les coûts financiers et écologiques du transport, les risques de déversement, encourage l'économie locale et pourrait peut-être diminuer la dépendance énergétique vis-à-vis des pays aux pratiques improbables.

C'est pour cette raison que l'homme cherche d'autres combustibles que le fossile. Plusieurs recherches ont abouti sur des plantes capables de produire de l'énergie renouvelable, avec comme motivation principale la substitution des combustibles fossiles dont l'épuisement est annoncé vers les années 2050 [11].

I-3- LES BIOCARBURANTS

Selon G. Pahl, vers 1922-1912, Rudolf Diesel disait que : « le moteur diesel peut être alimenté avec des huiles végétales et sera en mesure de contribuer fortement au développement de l'agriculture des pays qui l'utiliseraient » et prédisait que : «l'utilisation d'huiles végétales comme combustible liquide pour moteurs peut sembler insignifiante aujourd'hui mais ces huiles deviendront bientôt aussi importantes que le pétrole et le goudron de charbon » [12].

La production du biocarburant à petite échelle pourrait répondre à la demande énergétique locale mais le marché le plus important restera celui des transports. Ce dernier nécessiterait une qualité et une quantité constante qui ne peut être obtenue que par une production à grande échelle. En 2020, on estime à environ 6% la part de biocarburants dans le transport mondiale.

I-3-1- Les différents types de biocarburants et leurs origines :

Il existe plusieurs types de biocarburant qui proviennent de plusieurs matières premières diverses. Nous nous contenterons de citer les plus répandues et présentant un développement important ces dernières années :

- ✓ Le Bioéthanol

C'est un carburant qui est produit par fermentation éthanolique des matières organiques riches en sucre comme la betterave, la canne à sucre, le blé, le maïs, la pomme de terre, la cellulose...

- ✓ Le Biodiesel

C'est un carburant obtenu à partir d'huile végétale ou animale transformé par un procédé physique ou un procédé chimique appelé transestérification. Les biodiesels essayent de concurrencer les huiles végétales à l'état brut et le carburant à base de pétrole ou le diesel classique.

- ✓ Le Biogaz

C'est un carburant gaz issu de la transformation des déchets végétaux et organiques par fermentation méthanique.

I-3-2- Disponibilités des matières premières :

Entrainée par les pays en développement, la production mondiale d'huiles végétales devrait augmenter de plus de 30% d'ici 2020. Malgré tout, la production connaîtra un ralentissement par rapport à la décennie écoulée, en termes de taux de croissance annuelle. D'ailleurs, la Malaisie, l'Indonésie, où les restrictions en matière d'utilisations des terres et la réglementation environnementale devraient devenir plus déplaisantes, verront leur production cumulée d'huile de palme progresser de presque 45%, ce qui porteront leur part de la production mondiale à 36%. D'autres pays contribueront à la croissance de la production d'huile végétale, notamment la Chine, l'Argentine, l'Union Européenne et le Brésil. L'expansion de la production est prévue au Canada, en Fédération de Russie et en Ukraine, la croissance devrait être modeste aux États-Unis et en Inde.

La demande d'huile végétale à des fins non alimentaires devrait être à l'origine d'environ un tiers de l'augmentation de la consommation mondiale. D'ici 2020, la production de biodiesel représentera 15% alors qu'elle représentait 10% durant la période de référence de 2008-2010, d'après la Figure 1.

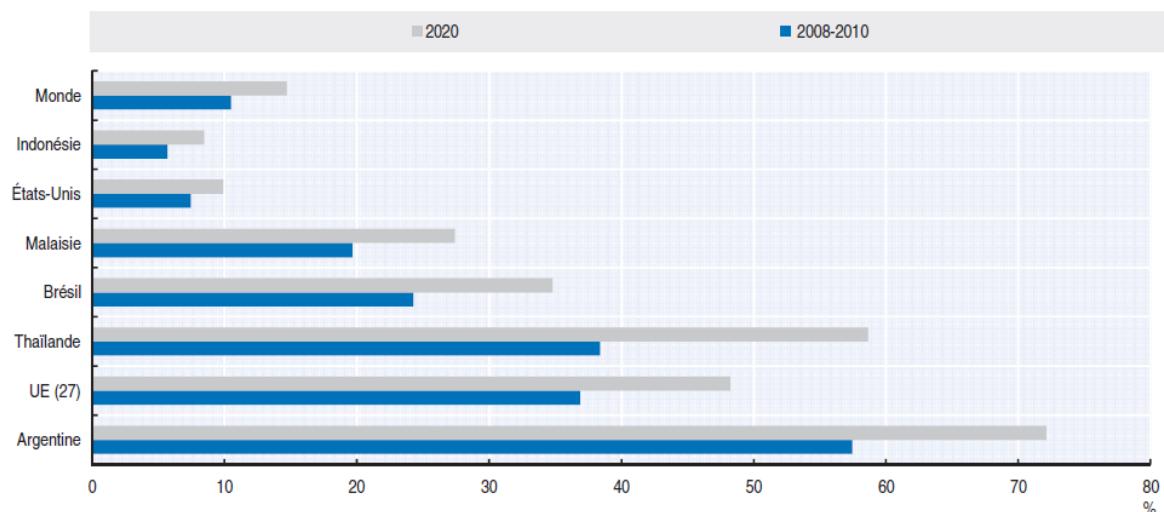


Figure 1: Part de la consommation d'huile végétale utilisée dans la production de biodiesel

(Source : perspectives agricoles de l'OCDE et FAO 2011-2020)

Le relèvement des taux d'utilisation imposés dans les pays développés, ainsi que la production croissante de biodiesel dans certaines nations en développement, stimulent cette augmentation. En Union Européenne, la demande provenant de l'industrie du biodiesel devrait quasiment doubler. D'ici 2020, l'utilisation d'huile végétale par l'industrie européenne devrait représenter plus de la moitié de la consommation totale de l'Union Européenne. Bien que l'on s'attende également à ce que le biodiesel soulève la demande aux

Etats-Unis et au Canada, son rôle restera toutefois beaucoup plus limité dans ces deux marchés. L'Argentine continuera de développer son industrie du biodiesel axée vers l'exportation, de sorte que, d'ici 2020, cette industrie, soutenue par le système de taxes à l'exportation en place, représentera 72% de sa consommation nationale. La demande de diverses matières premières à base d'huile provenant des producteurs de biodiesel devrait également augmenter dans plusieurs autres pays en développements d'Amérique du Sud (Brésil, Colombie et Pérou) et d'Asie (Inde, Indonésie, Malaisie et Thaïlande), cette expansion étant essentiellement destinée à satisfaire leurs besoins internes. La figure précédente illustre la part de la consommation d'huile végétale utilisée dans la production de biodiesel dans plusieurs pays sélectionnés. En Europe, la production de Colza représente une part importante devant le Soja et le Tournesol. Ces huiles végétales dans leur généralité sont essentiellement constituées de triglycérides à hauteur de 95% voire 98% environ [5].

I-3-3- Répartition de la teneur en acide gras de différentes huiles végétales :

L'huile végétale est à la base de production du biodiesel. A l'origine, il est possible d'utiliser toute sorte de produit des plantes oléagineuses. L'Europe a fait plus appel à l'huile de Colza comme matière première, tandis que les États-Unis ou l'Amérique du Sud favorisent plutôt l'huile de Soja. L'utilisation de Palme, de Jatropha et de Tournesol est aussi adaptée. Les huiles alimentaires usagées et les graisses animales conviennent à la fabrication du biocarburant, en fonction de leur traitement. Les huiles végétales se distinguent malgré tout par leur composition en acides gras et, dans leur aptitude à être utilisées sous forme de biodiesel pendant la période hivernale. On reconnaît cette caractéristique par la valeur TFL (température limite de filtrabilité).

En effet, les acides gras sont des molécules caractérisées par une chaîne aliphatique présentant une fonction acide carboxylique à l'une de ses extrémités. Dans les huiles végétales, la chaîne aliphatique contient un nombre pair d'atomes de carbones compris entre 6 et 24. La chaîne aliphatique peut contenir une ou plusieurs insaturations (double liaison) de type *cis* généralement en position 6, 9, 12 ou 15 (par rapport au carbone 1 de fonction carboxylique). La composition relative en acide gras des huiles de différentes espèces oléagineuses est présentée dans le tableau 1 suivant.

Tableau 1: Distribution des EMHV dans les différentes huiles végétales [5]

		palmiste	coprah	arachide africain	arachide amérique du sud	tournesol standard	tournesol oléique	colza érucique	colza PRIMOR	soja	palme
C6:0	caproïque	<0,8	<1								
C8:0	caprylique	2-5	6-10								
C10:0	caprique	3-5	5-10								
C12:0	laurique	44-51	29-54								<0,2
C14:0	myristique	15-17	15-23							<0,2	1-2
C15:0	-	-									
C16:0	palmitique	7-10	6-11	8-13	10-13	5-7	3	3-4	4-5	8-13	43-46
C16:1	palmitoléique	<0,1	<2	<0,3	<0,1	<0,4	-	0,6	<0,2	<0,2	<0,3
C17:0	-	-	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-	-	-	-
C18:0	stéarique	2-3	1-4	3-4	1-4	4-6	5	1-2	1,5	2-5	4-6
C18:1	oléique	12-18	4-11	48-66	35-41	15-25	83	9-16	60,5	17-26	37-41
C18:2	linoléique	1-4	1-2	14-28	35-41	62-70	9	11-16	21,5	50-62	9-12
C18:3	linolénique	<0,7	<0,1	<0,3	<0,3	<0,2	traces	7-12	10,3	4-10	<0,4
C20:0	arachidonique	<0,3	<0,2	1-2	1-2	<1	-	-	-	<1,2	<0,4
C20:1	gadoléique	<0,5	<0,2	1-2	1-2	<0,5	-	7-13	0,9	<0,4	-
C22:0	béhenique			3-5	3-5	<1	-	41-52	-	<0,5	-
C22:1	érucique			1-2	1-2						
C24:0											
Indice de saponification						188-194		182-193		189-195	190-209

(Source : manuel des corps gras – A. Karleskind coordonnateur – Tec&Doc 1992 chez Marie Noelle Valla)

On peut remarquer que cette composition varie fortement en fonction des saisons et des origines.

I-3-4- Utilisation du biocarburant par ajout :

Les biocarburants sont issus de la biomasse. Ils peuvent se substituer partiellement ou totalement aux carburants pétroliers fossiles [2]. Comme dans le paragraphe précédent, les biocarburants obtenus à partir des plantes résultent principalement de la filière huile et de la filière alcool.

- ✓ La filière éthanol ou filière alcool pour les moteurs à essence :

Produit à partir des matières agricoles riches en sucre ou en amidon ou des déchets de bois par le procédé de fermentation, l'éthanol est une alternative à l'essence, comme montré par la figure 2 suivante. Son utilisation requiert des modifications sur les moteurs à essence classiques.

L'éthanol est un alcool qui peut être utilisé comme carburant pour les voitures à essence. Des voitures pourraient être conçues pour rouler à l'éthanol pur. Cependant, à l'état actuel, elles roulent avec un mélange essence-éthanol (80% - 20%).

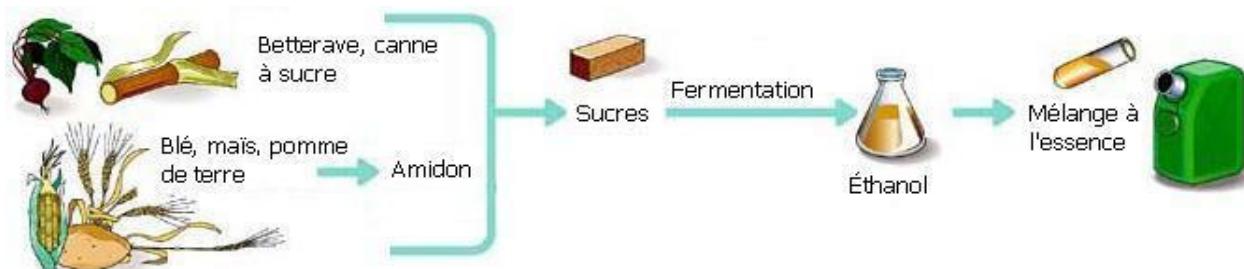


Figure 2: Ethanol, mélange à l'essence

- ✓ La filière des huiles végétales ou des biodiesels pour les moteurs diesel :

Le biodiesel est une huile végétale pure (HVP) produite à partir de ressources renouvelables telles que les huiles de grains oléagineux, les graisses de cuisson recyclées et les déchets de graisses animales. Le carburant végétal est jusqu'à plus de 70% moins polluant que le gazole et ne rejette pas de produits dangereux dans l'atmosphère.

L'huile de Jatropha ou de Tabanani, contrairement aux autres biodiesels, peut être utilisée sans mélange et sans modification des moteurs tandis que les autres huiles comme mentionnés dans la figure 3 par exemple, sont mélangés au diesel classique jusqu'à une proportion de 30% maximum. Le Jatropha est ainsi pour le moment le seul biodiesel capable de se substituer au gazole classique.

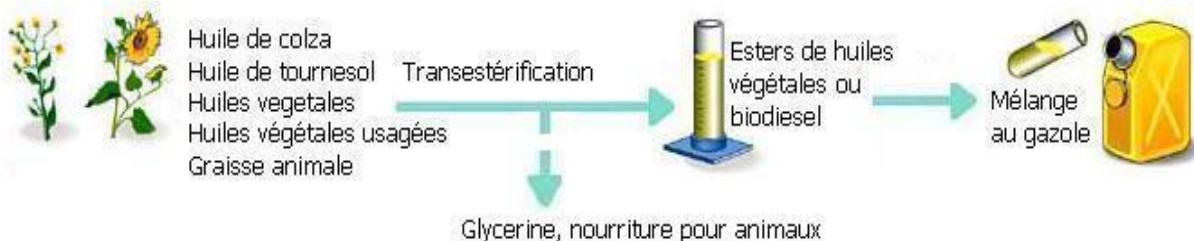


Figure 3: Biodiesel, mélange au gazole

Le procédé classique de fabrication de biodiesel en général est appelé transestérification consiste à faire réagir le méthanol sur de l'huile végétale prétraitée en présence d'un catalyseur comme le soude selon la réaction ci-dessous.

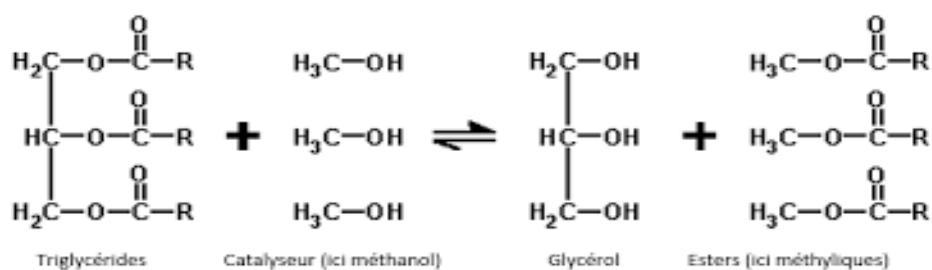


Figure 4: Mécanisme de la réaction de transestérification

Cette technologie permet de produire à partir d'une tonne d'huile et 110 kg de méthanol, 970 kg de biodiesel et 108 kg de glycérine. En général, les moteurs fonctionnant au gazole doivent être modifiés dans la plupart des cas pour fonctionner au biodiesel.

L'huile végétale est meilleure pour les moteurs par rapport au gazole car elle contient de l'oxygène. Elle est même recommandée pour les vieilles mécaniques et pour l'environnement dans les grandes villes.

II- GENERALITE : POURQUOI AVOIR CHOISI LE JATROPHIA ?

II-1- HISTORIQUE DE LA PLANTE DE JATROPHIA

Le jatropha fait partie du sous règne des Tracheobionta, de la classe des Magnoliopsida, de la sous-classe des Rosidae, de l'ordre des Euphorbiales, de la famille des Euphorbiacées, genre Jatropha. On dénombre environ 160 espèces appartenant au genre Jatropha, espèces originaires d'Amérique centrale ou du Sud. Les voici, montrées par la figure 5 suivante, quelques espèces de la même famille de Jatropha qui existent dans le monde. A Madagascar, on l'appelle Voanongo, Kinanampotsy, Kinana ou encore Valavelona. Les Français l'appellent pourghère, d'autre pays l'appelle Tabbanani ou Tabanano. Deux types de ces plantes existent dans notre pays, le Jatropha Curcas (3) et le Jatropha Mahafalensis (5) qui est endémique au Sud et qui a aussi des semences oléagineuses.



Figure 5: Différentes espèces de *Jatropha* (1 : *Jatropha integerrima*, 2 : *J. multifida*, 3 : *J. curcas*, 4 : *J. gossypifolia*, 5 : *J. mahafalensis*, 6 : *J. pinnata*, 7 : *J. podagraria*)

En général, le *Jatropha* pousse à l'état sauvage. Il peut atteindre jusqu'à 8 m de hauteur, ce qui le rend particulièrement intéressant : ses graines contiennent 27 à 40 % d'huile. L'huile de *Jatropha* n'est pas comestible, et s'avère même toxique à cause de sa teneur en ester, mais c'est un excellent carburant, huile lampante et matière première pour la production de savon et d'autres produits artisanaux.

II-1-1- Possibilités de l'utilisation de *Jatropha* :

Il y a de nombreuses possibilités d'utilisation de la plante de *Jatropha* jusqu'à ses tourteaux, comme indiquées dans le tableau suivant. Presque toutes les parties de la plante se prêtent à l'utilisation médicale (comme laxatif contre les maladies cutanées, contre la toux, comme antiseptique, etc.)

Tableau 2: Alternatives de l'utilisation de *Jatropha Curcas*

Partie de la plante de <i>Jatropha</i>	Utilité
Plantule	<ul style="list-style-type: none"> - haie de clôture des fermes, des champs ou du parc à bœuf - délimitation des propriétés communes (indication de droit foncier) - tuteur des plants de vanille et de poivre - haie de protection contre l'érosion par le vent et l'eau - haie de protection contre les feux de brousse

Huile pressée	<ul style="list-style-type: none"> - produit de soins capillaires (en particulier dans la région d'Ambalavao) - comme huile lampant - comme lubrifiant - savon de haute qualité (par saponification avec bases) - carburant des moteurs diesel à chambres de précombustion - biodiesel (utilisable pour les moteurs diesel de haute qualité après transestérification avec alcool)
Tourteau de pressage	<ul style="list-style-type: none"> - engrais d'une haute teneur en azote (environ 3-4%), engrais organique - aliment des animaux domestiques après préparation et transformation en quelque chose d'autre.

Traditionnellement, les femmes rurales ont utilisé le Jatropha Curcas comme médicament (les graines comme laxatif, le latex pour arrêter les saignements et contre les infections, les feuilles pour traiter le paludisme) et pour produire du savon [9].

II-1-2- Importance potentielle de Jatropha dans le secteur énergétique :

La source d'énergie primaire la plus importante à Madagascar est le bois (81%) qui est surtout utilisé pour la préparation de la nourriture, soit directement, soit sous forme de charbon de bois, suivi par les hydrocarbures fossiles à 14%. Malheureusement, le cuiseur utilisant l'huile de Jatropha n'est pas encore au point pour une utilisation à grande échelle, et ainsi, la substitution du bois, de feu par l'huile de Jatropha n'est pas encore envisagée.

Cependant, l'huile de Jatropha est déjà utilisable sans raffinage comme carburant des moteurs diesel à chambre de précombustion, et par transestérification, elle peut être utilisée comme carburant biodiesel par tous les moteurs diesel. Ainsi, elle possède le potentiel pour couvrir les besoins en huile minérale de 14%, et elle pourra jouer un rôle important dans la couverture des besoins énergétiques de Madagascar.

II-2-COMPOSITION DE L'HUILE VEGETALE DES PLANTES OLEAGINEUSES EN GENERAL

L'intérêt de connaître la composition d'une huile est évident puisque celle-ci va avoir une influence sur les caractéristiques physiques essentielles pour évaluer la qualité du biodiesel qui en résulte, la viscosité, le point de fusion et la stabilité thermique... [1] L'huile végétale brute peut être utilisée en mélangeant avec le gazole, un carburant fossile comme

combustibles dans des moteurs diesels à cycles courts, tel que les machines agricoles et les groupes électrogènes etc. Par contre, son usage dans d'autres types de moteurs nécessite une transformation primitive en raison de sa viscosité élevée qui constitue un facteur bloquant.

Le tableau 3 ci-dessous 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 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.

Tableau 3: Acide gras contenus dans les diverses huiles comestibles.

Désignation de l'acide gras	Nombre d'atomes de carbone	Formule	Classe
Palmitique (ex : huile de palme)	C16	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$	Saturé
Stéarique (ex : cacao)	C18	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$	Saturé
Oléique (ex : huile d'olive)	C18 :1	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$	Insaturé
Linoléique (ex : huile coco, coton)	C18 :2	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_8-\text{COOH}$	Polyinsaturé
Linolénique (ex : poisson)	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

(Source : manuel des corps gras – A. Karleskind coordonnateur – Tec&Doc 1992)

II-2-1- L'huile végétale de Jatropha :

L'huile végétale est obtenue par extraction à partir des graines. Cette étape consiste en la transformation des graines de Jatropha en sous-produits : l'huile et le tourteau. Ces sous-produits peuvent ensuite être utilisés directement comme le tourteau en tant que fertilisant. L'huile de qualité obtenue après pressage peut servir à la fabrication de savon ou à l'alimentation d'une lampe en combustible.

Compositions chimiques du dérivé d'huile végétale:

L'ester méthylique de l'huile de Jatropha est constitué de 7% d'acide stéarique, 50% d'acide oléique et 37% d'acide linoléique, les autres acides sont présents à l'état de traces [4]. La composition d'une même huile varie selon leurs origines (pays et climat).

Les huiles végétales sont composées principalement d'environ 95% de glycérides (triglycérides majoritaires, mono glycérides et di-glycérides et de 5% de composés mineurs (composés saponifiables) : les AGL, les alcools gras, les composés terpéniques, les vitamines A, D et E (tocophérols et tocotriénols), les hydrocarbures divers : hydrocarbures aliphatiques saturés et insaturés, les squalènes... [12].

II-2-2-Utilisation de l'huile végétale de Jatropha :

L'huile de Jatropha a beaucoup d'utilités. Voici quelques exemples de ses utilisations les plus fréquentes.

-L'huile lampante :

L'huile de Jatropha peut être directement utilisée comme huile lampante. Les lampes à pétrole ne sont pas praticables, à cause de la viscosité élevée de l'huile de Jatropha. Ce dernier brûle nettement plus lent que le pétrole et dégage moins de fumée, ce qui est un avantage pour l'éclairage de chambres fermées.

- Le savon :

Le savon blanc de Jatropha est un dérivé de l'huile pure de qualité du Jatropha par la réaction de saponification. Il y a également le savon noir qui est aussi obtenu par saponification mais à partir des résidus après décantation et filtration ou à partir des tourteaux. La nomination des savons (noir ou blanc) est juste à cause de la matière première. [13]



Figure 6: Savon artisanal de Jatropha.

-Le carburant de moteur diesel :

Des essais réussis pour l'utilisation d'huile de Jatropha par les moteurs diesel ont été menés dans plusieurs pays. Des moteurs diesel à chambre de précombustion, ou des moteurs stationnaires à vitesse de rotation basse ont été alimentés à 100 % par l'huile de Jatropha purifiée, et aucun problème de combustion n'a été constaté.

Pour les moteurs de voitures, une alimentation à 100 % par huile de Jatropha n'est pas appropriée. L'huile de Jatropha a un point d'allumage plus élevé que le diesel. Des résidus bouchent le flux de l'huile et ils doivent être enlevés, ce qui n'est pas facile.

Pour les moteurs diesel normaux, un mélange de carburants ordinaires est envisageable. Pour 10 L d'huile végétale, il faudra 25 L de gazole. Ce pourcentage est normal, le contraire n'est pas faisable à cause de la viscosité élevée de l'huile végétale de Jatropha.



Figure 7: Huile et gazole miscibles l'un l'autre.

- Le Biodiesel :

Même si actuellement, l'utilisation du biodiesel n'est pas encore très fréquente, par transestérification, l'huile de Jatropha se prête bien à la production de celui-ci. On ajoute du méthanol à l'huile pure, à une proportion d'environ 10 % de sa quantité ; par l'addition de quelques substances réagissantes et le réchauffement à une température considérée, les liaisons d'éther des triglycérides sont dissoutes et les acides gras libres se lient à l'alcool. Le produit est l'ester méthylique des acides gras, appelé biodiesel, et la glycérine.

L'avantage du biodiesel est qu'il peut être utilisé à 100% dans les moteurs diesel, en tenant compte des exigences en matière de transport et de stockage du biodiesel.



Figure 8: Diesel vert (biodiesel)

II-2-3- Aspect protecteur de l'environnement :

D'un point de vue environnemental, les biocarburants seraient généralement moins polluants et, surtout, contribueraient moins à l'accroissement du carbone atmosphérique que les carburants fossiles [2], [3]. « Moins polluant », puisque la combustion de la plupart des biocarburants relâche moins de produits toxiques dans l'environnement. Par exemple, la combustion du biodiesel produit moins de soufre que celle du diesel standard. En effet, les plantes, en grandissant, prélèvent le CO₂ de l'air pour fabriquer les huiles et les sucres utilisés pour faire le biocarburant. En brûlant les biocarburants dans nos moteurs, nous retournons simplement dans l'environnement le carbone qui y a été prélevé par les plantes.

III- BIOCARBURANT : 1^{RE}, 2^E ET 3^E GENERATION

Comme tous les carburants, par exemple, le gazole, l'essence sans plomb et le gaz méthane, les biocarburants sont classés en première, deuxième et troisième génération. Les types de biocarburants sont apparus selon certaines séquences, les plus récentes tentant de résoudre les défauts des générations précédentes [3].

III-1-BIOCARBURANT DE PREMIERE GENERATION

Les biocarburants de la première génération sont obtenus directement à partir des parties de plante : les feuilles, les tiges, les racines et même les graines. Il s'agit du bioéthanol ou du biodiesel. Ils sont confectionnés à partir des végétaux consommables par l'homme ou les bétails. Leur production entre en compétition avec les denrées alimentaires [2], [3]. Parfois, ils sont fabriqués à partir des plantes non consommables, ni par l'homme ni par les animaux dont le cas ici, le Jatropha.

Les biocarburants de la première génération se partagent principalement en deux filières, selon les deux grands types de moteurs à explosion : la filière de l'huile pour les moteurs diesel à allumage par compression, fonctionnant au gazole, et la filière de l'alcool pour les moteurs à allumage commandé, qui fonctionnent à l'essence [1], [14].

III-2-BIOCARBURANT DE DEUXIEME GENERATION

Les biocarburants de deuxième génération, principalement le bioéthanol, sont obtenus à partir de biomasse sans compétition avec l'utilisation alimentaire : paille de céréales, miscanthus, bois et résidus forestiers et cultures condamnées [1], [2], [14], les parties non digestes des

végétaux, certains déchets riches en cellulose : un sucre complexe qui peut être transformé en sucre simple puis fermenté en alcool [3].

Il y a deux filières de production possibles :

III-2-1- La filière biochimique :

Il s'agit de la production d'éthanol cellulosique par fermentation. Cette voie s'effectue en 3 grandes étapes. Des trois constituants majeurs de la biomasse lignocellulosique (cellulose, hémicelluloses et lignine) seule la cellulose est aujourd'hui transformable en éthanol. Une première étape consiste donc à extraire la cellulose puis à la transformer en glucose par hydrolyse à l'aide d'enzymes (Les enzymes produites dans des réacteurs à partir de microorganismes, par exemple le champignon *Trichoderma reesei*, sont capables de dégrader naturellement la cellulose en glucose). Le glucose est ensuite fermenté par des levures en éthanol. A la fin, l'éthanol est purifié par distillation et déshydratation.

III-2-2- La filière thermochimique :

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

III-3- BIOCARBURANT DE TROISIEME GENERATION

Il s'agit des agrocarburants à partir de micro-algues ou les algocarburants. Pour éviter d'épuiser les terres cultivables et pour pallier le manque de disponibilité des produits cellulosiques, les scientifiques tentent de produire du carburant à partir de microalgues [3]. Les microalgues peuvent fournir différents types d'énergies renouvelables. Il s'agit notamment du méthane produit par la digestion anaérobie des algues, du biodiesel dérivé de l'huile des micro-algues ainsi que de la production d'hydrogène par photobiologie [1]. Leur production à grande échelle s'annonce prometteuse avec des rendements élevés, et ce sans concurrencer les filières alimentaires et sans provoquer la déforestation [14].

(Les microalgues sont des organismes photosynthétiques aquatiques et unicellulaires, c'est à dire qu'elles croissent dans l'eau en utilisant l'énergie lumineuse et le CO₂ de l'air. Elles produisent une quantité importante d'huile ; elles sont donc cultivées principalement pour produire du biodiesel). Pour ces raisons, il est encore important de chercher à améliorer les procédés de première génération déjà en place. Améliorer leur rendement et diminuer les coûts de production ne peut qu'être bénéfique. De plus, la transestérification d'huile végétale pourra être appliquée aux huiles issues des algues, et donc applicable à la troisième génération [27].

IV- SITUATION MONDIALE ET NATIONALE

IV-1- PRODUCTION MONDIALE DU BIOCARBURANT

La production mondiale de biocarburant était de 22 millions de tonnes en 2010, soit plus de 700 kg par seconde, selon l'OCDE (Organisation Economique de commerce et de développement). Le marché mondial des biocarburants est en constante augmentation surtout dans les pays occidentaux où la production de biocarburant est inférieure à la demande. Cela laisse prévoir de très importantes suites pour les investissements dans ce secteur, d'autant plus que les pays occidentaux incitent à la consommation de biocarburants par le biais de la loi : l'Union européenne s'est par exemple fixé l'objectif de parvenir à 10% d'agrocarburants dans sa consommation totale. Les Etats Unis dominent le classement mondial réalisé pour le biodiesel avec des capacités de production en service de 5,9 milliards de litres. Ils sont serrés par l'Allemagne, dont les capacités sont estimées à un peu plus de 5 milliards de litres. Viennent ensuite l'Espagne à 5 milliards de litres, puis l'Indonésie [31].

Il convient de souligner que 10% seulement des capacités de production de biodiesel aux Etats-Unis sont actuellement exploitées précise Tammy Klein, vice-président adjoint chez Hart Energy Consulting, en 2010[31].

Impact environnemental

Les gaz d'échappement des moteurs diesel ont été classés cancérogènes par l'OMS, associés au cancer du poumon et à celui de la vessie. Les émissions d'oxydes d'azote autorisées pour les véhicules Diesel étaient nettement plus élevées que celles autorisées pour les véhicules à essence. Depuis 2015, les maxima autorisés pour les deux types de motorisation sont proches de 80mg/km pour les véhicules Diesel et de 60mg/km pour les véhicules à essence.

- Impact environnemental concernant le biocarburant :

Le biodiesel est produit à partir de ressources renouvelables telles que les huiles des graines oléagineuses. L'utilisation de l'huile de Jatropha comme combustible est largement présentée comme un outil pour la préservation de l'environnement. Afin de vérifier cette idée, une recherche sur les avantages et inconvénients du biocarburant en comparaison au diesel conventionnel sur la base de cycle de vie doit être réalisée. Pour un combustible, au moins 6 impacts environnementaux doivent être évalués : les ressources énergétiques requises, les gaz à effet de serre, l'acidification, l'eutrophisation, le smog et les oxydes nitreux générés.

Après une analyse pertinente du combustible, dans différents pays ; il s'avère que globalement, le bilan énergétique du biocarburant à partir de Jatropha est positif car il permet d'économiser des énergies fossiles. Il émet moins de gaz à effet de serre de manière peu significative due à la plus grande émission d'oxydes nitreux. Par contre il acidifie l'environnement de manière plus significative qu'un diesel conventionnel [15]. Le Jatropha est pour le moment le seul biodiesel capable de substituer au gazole classique. Il permet également de réduire la dépendance énergétique et offre des nouveaux débouchés aux filières agricoles [7].

- Impact environnemental pour les combustibles fossiles : [6]

Ce sont des énergies non renouvelables, au même titre que l'énergie nucléaire, car leur reconstitution naturelle demanderait des millions d'années pour être achevée. Outre leur épuisement inévitable, l'exploitation de ces combustibles est à l'origine de problèmes environnementaux relatifs aux dégâts écologiques liés à leur extraction (celle des sables bitumineux de l'Athabasca a été particulièrement médiatisée) et à leur utilisation (réchauffement climatique dont seraient en grande partie responsables les gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone massivement émis par leur combustion et le méthane émis lors de l'extraction et du transport du gaz naturel). Selon la revue « Nature » (janvier 2015), un tiers des réserves de pétrole, la moitié de celles des gaz, et 80 % de celles du charbon devraient rester sous terre pour que l'objectif de la réglementation des températures soit respecté d'ici à 2050. De nombreuses conférences sur le climat ont eu lieu depuis des décennies pour essayer de contenir le réchauffement climatique. La plus médiatisée a été la Conférence de Paris de 2015 sur le climat (COP21). La consommation mondiale du pétrole représente 97% dans les transports et plus de 50% de l'énergie globale et cela ne cesse d'augmenter chaque année. Cette consommation galopante a engendré le tarif des énergies

fossiles et la dégradation de l'environnement par l'augmentation des polluants notamment les GES [12].

IV-2- PRODUCTION NATIONALE DU BIOCARBURANT

Le Jatropha, valavelona, kinanana ou encore voanongo, quel que soit le nom qu'on lui donne, l'arbuste à fleurs rouges et au coriacé feuillage vert foncé que l'on trouve à l'état sauvage dans le sud malgache n'en finit pas de ranimer la discussion. Pour certains, elle serait un véritable « or vert », une « chance inouïe pour Madagascar », une « plante du futur ». Pour ses adversaires, ce ne serait qu'un mirage (Madagascar Tribune, Septembre 2010).

L'arbuste Jatropha Curcas réclame pour la fonction de « solution miracle » face au défi de l'environnement. Cet arbuste pousse sur des sols semi-arides, ne demande pas d'eau ni d'entretiens, et son rendement en huile est supérieur à celui du colza ou du soja. En plus, Jatropha n'entre pas en concurrence avec les productions agricoles alimentaires, il donne une fonction à des millions de terres improches aux cultures. Il pourrait fournir de l'emploi dans des pays en voie de développement comme le nôtre. Le potentiel en biocarburant de Jatropha est considérable. En couvrant un pourcent de son territoire, Madagascar deviendrait autosuffisant en biocarburant [Extrait Le Quotidien de Madagascar – 24-10-2007]. Du fait, durant la crise politique, les investissements dans la Jatropha ont baissé. Cependant, des compagnies telles que la GEM (Green Energy Madagascar), la MMR (Madagascar Minérales Ressources) travaillent pour permettre au plus vite l'utilisation de diesel à base de Jatropha.

CNRIT a déjà innové un projet de valorisation de ressources naturelles locales dont le projet Jatropha. Le centre a fait appel aux programmes BAMEX –USAID en 2007-2008, à la Coopérative Koloherana Ivolamiarina dans la région d'Alaotra Mangoro depuis 2007, TANY MEVA en 2009- 2011 et au laboratoire OMNIS aussi comme membre de partenariats du projet. Le « projet Jatropha » avait comme objectif de contribuer à la promotion de la plantation à grande échelle de Jatropha Curcas par les citoyens en les appuyant dans la mesure du possible. Ils ont eu aussi l'intention de vulgariser leurs résultats de recherche obtenus à l'échelle de laboratoire à plus grande échelle pour contribuer au développement durable du milieu rural. Comme la production des savons blancs et les systèmes d'éclairage domestique conçus à partir de l'huile de Jatropha, elle pourrait être produite à l'échelle réelle pour contribuer à la lutte contre le chômage et la pauvreté. Et également la production du biocarburant de Jatropha, le premier type est destiné pour les machines agricoles du genre Kubota et pour l'électrification rurale tandis que le deuxième type est conçu pour l'utilisation

similaire du biodiesel déjà exploité dans le monde pour les véhicules diesel et les poids lourds. Jusqu'aux déchets - les tourteaux de Jatropha - ils ont l'idée de les valoriser en tant qu'engrais fertilisant naturels tout en contribuant à la protection et à la préservation de l'environnement.

Quand on sait que l'huile de Jatropha est utilisée par les compagnies aériennes pour atteindre leur quota d'énergies vertes, qu'elle entre également dans la composition de bitume servant de revêtement aux routes, que n'importe quel moteur diesel peut s'en satisfaire pour fonctionner, on veut bien croire avec lui que cette culture qui n'entre pas en compétition avec les cultures vivrières offre des perspectives de croissance infinies, disait Alphonse Ginoro, maire de Bobakilandy (*Actualité de Jatropha à Madagascar : une plante d'avenir*).

Etude socio-économique du biocarburant :

Cette énergie renouvelable est aussi intéressante du point de vue de l'emploi car elle constitue un moyen de production décentralisé et adapté aux ressources locales. Elle fait appel à une main d'œuvre de proximité et à des professions préexistantes [16], cela crée des opportunités d'implication de la femme dans les activités de développement (selon les Objectifs du Millénaire pour le Développement). La création du projet de valorisation des ressources locales est ainsi une complémentarité idéale avec les activités annuelles des paysans pour améliorer le rendement agricole et leur niveau de vie et une diversification des sources de revenu en milieu rural [17]. Economiquement, cette source d'énergie renouvelable crée de nouvelles activités génératrices de revenu supplémentaire et contribue à l'électrification rurale et à l'indépendance énergétique de Madagascar, à l'amélioration du rendement agricole et par suite du niveau de vie des paysans. Dans le cas où la mécanisation agricole est concevable, la production des produits dérivés des huiles de Jatropha est une source de revenu et de ristournes pour les régions d'intervention.

Même s'il est clair que l'introduction de la production des produits de Jatropha se traduira par des avantages possibles en termes d'emplois, la plupart des chercheurs soulignent le fait que les arrangements institutionnels et les technologies de production adoptées pour produire des biocarburants sont cruciaux pour l'impact socio-économique [18].

V- ETUDES RECENTES – BIOCARBURANT

V-1- DONNEE TECHNIQUE DE LA PRODUCTION DES DERIVES D'HUILES

En principe, toute huile végétale peut être utilisée comme carburant soit directement, soit par conversion en biodiesel. Mais pour des raisons de prix, de rendement à l'hectare, d'écobilan, de disponibilité de ces huiles, certaines d'entre elles sont préférées par rapport aux autres [13]. Beaucoup de travaux ont été effectués dans le but de produire des dérivés d'huiles végétales ayant des propriétés et performances assez voisines de celles du diesel.

V-1-1- La voie thermochimique :

La voie thermochimique consiste tout d'abord à dégrader la biomasse pour en extraire un gaz de synthèse. Ce dernier sera à son tour synthétisé pour être transformé en hydrocarbure qui pourra être ajouté au carburant actuel [1].

Transformation à l'aide de la microémulsion :

Une microémulsion est formée spontanément lors d'un mélange de deux liquides normalement non miscibles souvent en combinaison avec un ou plusieurs Co-surfactants (petite molécule amphiphile) ionique ou non ionique. On peut envisager un mélange, d'une huile végétale, d'un ester et d'un dispersant (co-solvant), ou d'une huile végétale, d'un alcool (méthanol, éthanol ou le 1-butanol) et d'un surfactant, avec ou sans gazole. En raison de leur teneur en alcool, les microémulsions possèdent des chaleurs de combustions volumétriques plus faibles que le carburant diesel mais les alcools possèdent des chaleurs de vaporisation latente élevées et tendent à refroidir la chambre de combustion, ce qui permet de réduire le dépôt de carbone.

La viscosité de l'huile, après microémulsion, a été réduite jusqu'à 11,2 cSt à 25°C. Mais les essais sur un moteur indiquent l'accumulation de carbone autour des orifices des injecteurs et sur les soupapes de l'échappement.

A cours terme, les performances des microémulsions ioniques et non ioniques de l'éthanol dans l'huile sont proches de celles du diesel en dépit du bas nombre de cétane et du contenu énergétique. La durabilité étant non déterminée.

Transformation par la gazéification :

La gazéification consiste en une décomposition thermique des substances organiques solides en élévant la température entre 900 et 1100°C en milieu oxygéné ou en présence de vapeur d'eau. Le gaz obtenu, très riche en Hydrogène (80 à 85%) est appelé Singaz (*par le National Renewable Energy Laboratory, en 2009*). Ce produit est particulièrement intéressant car il

répond à toutes les spécifications nécessaires pour le transport des carburants issus de la Biomasse. La gazéification ou dégradation enzymatique consiste à l'utilisation de lignine ou de cellulose de bois pour obtenir des gaz et d'alcools [14]. C'est pour ça que cette méthode est spécialisée pour la production du biocarburant par l'utilisation des déchets, c'est-à-dire le biocarburant de deuxième génération.

Transformation par le BTL (Biomass To Liquid) :

Cette technique vise à transformer la biomasse en hydrocarbures liquides (de type gazole) en passant par une étape de gazéification. Le fait de passer par la gazéification de la biomasse permet de rendre la technique simple, quelque soit la matière première. On peut, en effet, épurer le gaz obtenu et ajuster également la proportion des composantes des produits (notamment en hydrogène et monoxyde de carbone). Cependant, il est important de comprendre que pour le type de matières premières utilisées ainsi que pour le type de débouchés visés (*gazole Fisher-Tropsch, méthanol, DME*), la technique est modifiable à chacun des étapes de transformation; à savoir le prétraitement, la gazéification, la purification et, pour finir, la valorisation du gaz de synthèse. Également, il est possible de dire qu'il existe de multiples combinaisons possibles pour le BTL (*European BiofuelsTechnology Platform, 2010*).

Le processus de transformation Fisher-Tropsch consiste en une réaction chimique au cours de laquelle le monoxyde de carbone et l'hydrogène sont convertis en hydrocarbones liquides.

Transformation par la pyrolyse :

Il s'agit également d'une technique de décomposition thermique d'un produit organique pour en donner d'autres sous l'effet de la chaleur seule ou aidée par un catalyseur. Elle comprend l'échauffement en absence d'air et d'oxygène et le clivage des liaisons chimiques afin d'aboutir à des molécules plus simples. Cependant, elle a lieu à des températures variant de 450 à 500°C. Il est possible d'effectuer la pyrolyse des huiles végétales, de la graisse animale, des acides gras naturels et des esters méthyliques d'acide gras. La chimie de la pyrolyse est difficile à interpréter vu le nombre de voies chimiques que la réaction peut confronter ainsi que la variété de produits pouvant être obtenus. Généralement, la décomposition thermique de ces structures passe par la formation de radicaux libres ou par des ions carboniums.

Un de ses grands avantages est qu'elle permet de diminuer le gaspillage d'énergie et qu'elle s'adapte à plusieurs types de biomasses agro forestières et autres résidus de transformation. Elle permet également de retourner au sol les nutriments N, P, K, C par la répartition des charbons pyrolytiques (*par le Ballerini & Alazard-Toux, 2006*).

La pyrolyse des composés gras date depuis plus de 100 ans spécialement dans les pays où il n'y a pas beaucoup de pétrole.

Les huiles végétales pyrolysées possèdent une quantité acceptée en souffre, en eau et en sédiments et donnent des valeurs de corrosion cuivrique acceptables mais inacceptables en cendres et en carbone résiduel. Les essais des huiles pyrolysées sur les moteurs sont limités à court terme.

 Transformation par la dilution :

Une autre méthode pour utiliser l'huile végétale en tant que carburant, c'est de la diluer. Cette dilution peut être accomplie avec le carburant diesel, un solvant ou de l'éthanol. La dilution de l'huile de tournesol avec le diesel dans un ratio de 1:3 en volume a été étudiée et testée par Ziejewski et al. La viscosité de ce mélange était 4,88 cSt à 40°C.

Ils ont conclu que le mélange ne peut pas être recommandé pour une utilisation à long terme dans les moteurs diesel à injection directe en raison des graves problèmes de collage et de cokéfaction des injecteurs. Un mélange de l'huile de soja avec un solvant (48% paraffines et de 52% naphthenes) dans un ratio de 1:1 avait une viscosité de 5,12 cSt à 38°C. Ce carburant produit un dépôt de carbone lourd sur les tulipes des soupapes d'admission et a montré une usure considérable en amont de la bague. Le biocarburant produit par la dilution a donné des résultats convenables, mais son utilisation à long terme n'est pas applicable car il conduit à un empâtement du lubrifiant c'est-à-dire des problèmes aux moteurs.

 Transformation à l'aide de la méthanisation :

La méthanisation ou encore digestion anaérobiose consiste en la transformation de matière organique en biogaz. Cette dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène donne naissance à plus de 90% du biogaz qui est le méthane, le reste étant du gaz carbonique.

Historiquement, le processus de méthanisation n'est pas nouveau. Dès les années 1940, il fut utilisé à partir du fumier.

Dans les années 1970, l'application s'est étendue au traitement des eaux usées conduisant ainsi à de nombreuses applications industrielles : agroalimentaires, chimiques, pétrolières, agricoles. Aujourd'hui, il est vu comme un outil de dépollution créant de surcroit une énergie « verte », car la matière première est d'origine vivante (animale ou végétale). Le méthane produit est un avantage considérable [13].

V-1-2- La voie chimique : seulement par la transestérification :

On l'appelle aussi l'alcoolysé, c'est une réaction entre un alcool et un ester conduisant à un autre alcool et ester différents. Il s'agit de la réaction entre le triglycéride dans l'huile végétale

avec un alcool pour former un glycérol et un mélange de monoesters (ester alkylique) utilisé comme biodiesel.

Le produit dérivé de l'huile végétale de Jatropha appartient au biocarburant de la première génération. Donc pour le cas de l'huile brute de Jatropha, la réaction de transestérification est la mieux adaptée.

V-2- TECHNIQUE DE PRODUCTION DE BIOCARBURANT

La réaction de transestérification est une réaction lente, limitée et athermique [19]. A la fin de la réaction, l'huile passe à l'état d'ester en changeant ses propriétés physico-chimiques : la viscosité, la densité et la masse molaire.

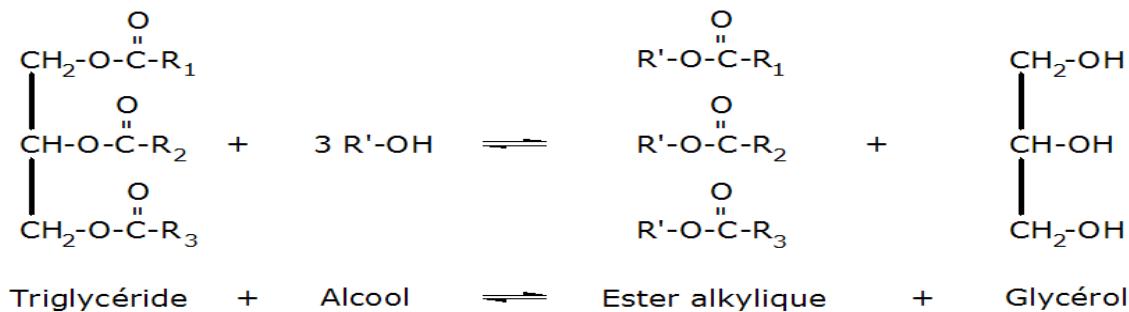


Figure 9: Réaction de transestérification

Les esters méthyliques d'huile végétale (EMHV) sont obtenus par réaction de transestérification des triglycérides avec un alcool à très courte chaîne, plus généralement du méthanol et de l'éthanol. Cette réaction est équilibrée. Elle s'effectue en présence d'un catalyseur.

Les triglycérides des huiles sont des esters de glycérol, encore désignés sous le nom de « glycérine », et d'acides gras R-COOH.

A l'aide de la figure 10 ci-dessous, on voit que la libération du glycérol n'est définitive qu'après les réactions consécutives de transestérification des triglycérides en di-glycérides, puis en mono glycérides et la formation de la troisième molécule d'ester méthylique d'acides gras.

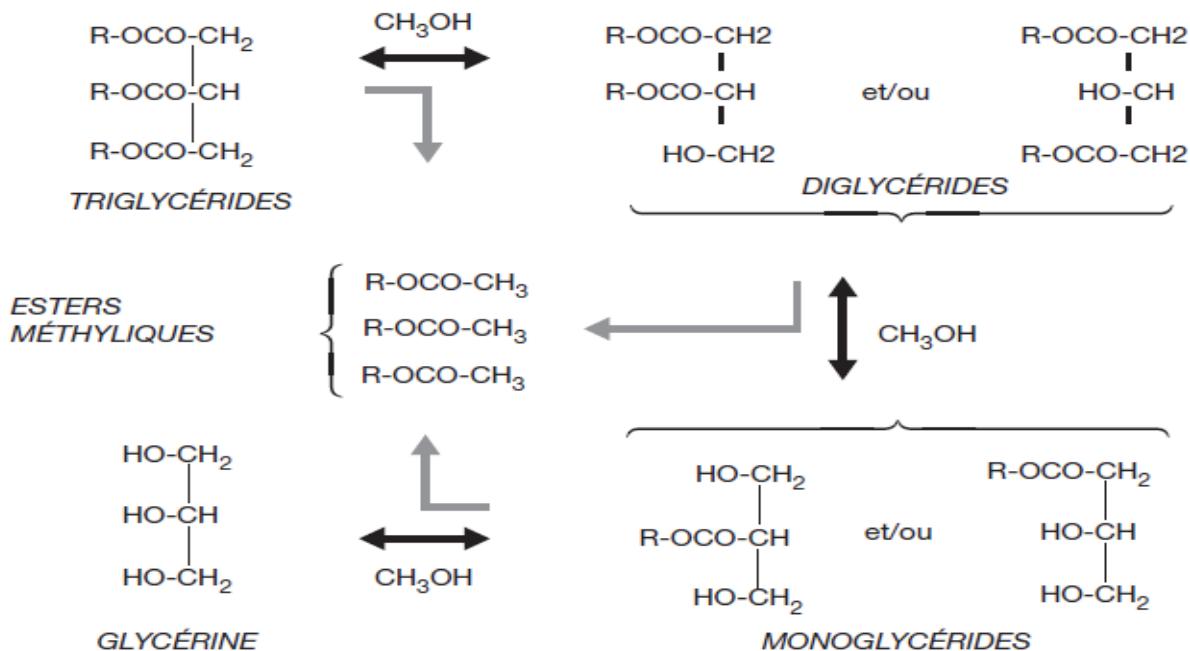


Figure 10: Schéma détaillé de la réaction de transestérification

Cette réaction peut être effectuée par catalyse homogène, avec des catalyseurs solubles dans le milieu réactionnel, ou par catalyse hétérogène, avec des catalyseurs totalement insolubles dans les réactifs [5].

V-3- PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Plusieurs paramètres physico-chimiques existent pour caractériser un biocarburant :

- La densité ou la masse molaire peut être définie comme étant la masse du produit contenu dans un volume déterminé dans des conditions de température et de pression fixées [4], [20].
- La viscosité peut être définie comme une résistance d'écoulement, et doit satisfaire à des normes afin de respecter les conditions de fonctionnement de la pompe d'alimentation du moteur. 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 [4], [9], [20].
- 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 [4].
- Le point d'éclair d'un liquide se définit comme étant la température la plus basse à laquelle la concentration des vapeurs émises est suffisante pour produire une déflagration au contact d'une flamme ou une étincelle, mais insuffisant pour produire la propagation de

la combustion en l'absence de la flamme pilote. Cette caractéristique est importante dans le cas d'une utilisation énergétique. Elle est déterminée à l'aide de l'appareil de Pensky Martens [4], [20].

- L'indice d'iode (ID) est une mesure du degré d'insaturation de l'huile ou des esters. Il est exprimé en grammes d'iode dissout dans 100 g d'huile : plus l'huile est insaturée plus son ID est élevé. Cet indice est utilisé pour classer les huiles végétales en quatre grands groupes [12].

Tableau 4: Classification des huiles végétales selon l'indice d'iode

Indice d'iode	5-50			50-100	100-150	>150	
Huiles	Saturée			Mono-insaturée	di-insaturée	Tri-insaturée	
Type	Laurique	Palmitique	Stéarique	Oléique	Linoléique	Linolénique	Eléostarique
Exemples	Babasse Coprah Palmiste	Palme	Karité	Arachide Colza Jatropha Olive Ricin	Coton Mais Soja Tournesol	Lin	De bois de chine

- L'indice de cétane (IC) mesure l'aptitude à l'auto-inflammation et caractérise le délai d'allumage du carburant après son injection dans la chambre de combustion. Il est l'un des principaux indicateurs de la qualité de combustion de carburant. Plus l'indice de cétane est élevé, plus le délai d'allumage est court, et inversement. Il sert aussi à apprécier l'aptitude à l'auto inflammation des carburants diesel. L'indice de cétane peut être mesuré à partir d'un moteur diesel normalisé CFR (*Cooperative Fuel Research*) à taux de compression variable. Plusieurs méthodes normalisées (ASTM D311, ASTM D4737) permettent d'estimer l'IC des carburants, à moindre coût, à partir de leurs caractéristiques [4], [9], [12], [20].
- L'indice d'octane (IO) exprime la résistance à la détonation des carburants utilisés dans les moteurs à allumage commandé [12].
- Le pouvoir calorifique (PC) représente la quantité d'énergie par unité de masse ou de volume de carburant lors de la réaction chimique de combustion complète conduisant à la formation de CO₂ et de H₂O. Il caractérise les carburants entre eux. Il y a une 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 [4], [12], [20].

Les teneurs en eau, teneurs en sédiment, le pourcentage en soufre et en cendre sont aussi des paramètres caractéristiques du biocarburant nécessaire à déterminer pendant l'analyse.

Les caractéristiques de quelques huiles végétales sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5: Caractéristiques de quelques huiles végétales habituelles [12]

Paramètres → Huiles ↓	ρ à 20°C (g.cm ⁻³)	η_c (mm ² .s ⁻¹)		IC	ID	PE (°C)	PCI (MJ.Kg ⁻¹)
		20°C	40°C				
Arachide	0,914	85	32	32		258	39,3
Colza	0,920	77 - 78	35 - 36	32	30,2 - 35,7	285	37,4
Coprah	0,915		30 - 43	10		230	37,1
Coton	0,921	73	34 - 38	34		243	36,8
Jatropha	0,920	77	45		55	240	38,85
Ricin	0,955	850 - 1100			85	265	37,2
Soja	0,920	61	30	30		330	37,3
Tournesol	0,925	58	32 - 37	32	58	316	37,8 - 38,1

VI- SITE ET INSTITUTION D'ACCUEIL

VI-1-Généralité sur l'OMNIS :

L'OMNIS (Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques, autrefois connu comme Office Militaire National pour les Industries Stratégiques) est une organisation gouvernementale malgache, opérant sous les auspices du Ministère de l'Énergie. OMNIS est créé en 1976, un établissement public chargé de développer, de gérer et de promouvoir les ressources pétrolières et minérales nationales à Madagascar.

VI-2-Responsabilité de l'OMNIS :

L'OMNIS est chargé dans le cadre des :

Hydrocarbures :

- Mise en place et actualisation du cadre juridique des secteurs pétroliers amont et du gaz à Madagascar ;
- Acquisition des données d'exploration technique (géologies, géophysiques et des forages) ;
- Promotion des zones contenant potentiellement des hydrocarbures ;
- Gestion des données d'exploration existantes et nouvellement acquises ;
- Analyse en laboratoire des échantillons (roche, huile et gaz).

Mines :

- La promotion du secteur minier malgache ;
- Développement des infrastructures sectorielles de base utiles pour divers minéraux,
- Engagement de la recherche sur les métaux, y compris les minéraux énergétiques (minerais radioactifs, combustibles fossiles, etc..) ;
- Réalisation d'études de développement et de faisabilité pour des projets d'exploitation minière, la production des minéraux, etc. ;
- Assistance et soutien aux entreprises nationales et internationales du secteur minier ;
- Promotion des contrats de partenariat.

La Direction technique située à Mangasoavina est répartie en 3 sous directions :

- La Direction des Mines et Forages ou DMF
- La Direction du Laboratoire ou DLAB
- La Direction des Hydrocarbures ou DH

Le laboratoire est une des directions support de l'entreprise OMNIS. Il est constitué de :

- Département Analyses, Géochimie et physico-chimique dirigé par la CDA

Le département analyse se charge de l'analyse chimique minérale et organique complète des échantillons rocheux, sableux ou argileux ; quelque soit l'échantillon rapporté par des diverses entreprises. Et le département géochimie et physico-chimie est spécialisé sur la détermination des caractéristiques des huiles lourdes ou légères comme le SARA (Saturé Aromatique Résine Asphaltène), la teneur en eau ou BSW, la densité, la viscosité, le point éclair, le point d'inflammabilité.

- Département Traitement et Biostratigraphie dirigé par le CDT

Le département traitement se charge de toutes les préparations mécaniques et les prétraitements tels que le broyage, la séparation magnétique et le séchage ; et le département biostratigraphie, des études des couches et la séparation après traitement des éléments.

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

I- EXTRACTION DES GRAINES DE JATROPHA

I-1- EXTRACTION CHIMIQUE DE LA GRAINE DE JATROPHA

I-1-1- Extraction à froid :

Les graines récoltées sont séchées dans un milieu bien aéré à l'ombre et ensuite broyées à l'aide d'un broyeur à vis jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène [28]. 100 g de cette pâte est récupérée dans un bêcher contenant 900 ml d'éther de pétrole. Le mélange est agité pendant 15 minutes puis filtré avec un papier Wattman et le mettre dans un ballon. Le solvant est par la suite évaporé en utilisant un évaporateur rotatif à 45°C. Le rendement en huile fixe a été calculé en pourcentage par rapport au poids de la matière végétale qui a servi pour l'extraction. Les échantillons d'huiles sont par la suite conservés à 4°C jusqu'à sa caractérisation [21].

I-1-2- Extraction à chaud :

L'extraction est faite avec l'appareil Soxhlet par le solvant, hexane avec un point d'ébullition de 75°C. A cause de cette température d'ébullition du solvant, l'extraction sera faite à environ 95°C pour que le solvant s'évapore parfaitement. Les échantillons de Jatropha bien broyée, sont placés dans la cartouche. L'opération est arrêtée après au moins six (6) cycles, dont la durée est de 6 heures environ, mais de préférence il faut attendre que le solvant vaporisé dans le tube du soxhlet contenant l'échantillon s'éclaircisse. Le produit gras est récupéré dans un ballon où il est ensuite évaporé au moyen d'un évaporateur rotatif ; ou tout simplement, il est mis dans l'étuve jusqu'à 100°C pour faire évaporer le reste de solvant. Le tube exempté d'eau a été pesé au début et à la fin de l'extraction pour connaître la masse exacte et le rendement de l'huile végétale contenue dans les graines de Jatropha Curcas.

L'extraction de la graine de Jatropha est réalisée tout simplement pour connaître la totalité, le rendement de l'huile végétale dans la graine de Jatropha Curcas.



Figure 11: Appareil et montage d'extraction d'huile, le soxhlet

I-2- METHODE D'EXTRACTION MECANIQUE DES GRAINES : LE PRESSAGE

Les méthodologies de pressage et de filtration ont été définies à partir d'une adaptation des connaissances bibliographiques et par rapport aux réalités du terrain. Ceci a permis d'identifier les méthodes les plus adaptées au contexte local.

I-2-1- Présentation des matériaux :

- Broyeur : aide à faire réduire l'épaisseur granulométrique de la graine, plus il est petit mieux c'est facile pour l'extraction de l'huile.
- Pressoir : sert à extraire l'huile dans la graine de Jatropha, c'est un presse mécanique qui a besoin de beaucoup de force pour le manier, pour le presser.
- Balance électronique : sert à peser avec précision les prises d'échantillon.
- Etuve : utile pour le chauffage, les graines broyées ont besoin d'une température assez élevée pour le pressage ultérieur.
- Filtre : nécessaire pour retenir les graines, les matières, pour clarifier l'huile produite à la fin du pressage. Le filtre est placé dans le cylindre de pressage en entourant la matière première. C'est un tissu sous forme d'un tamis de préférence à une ouverture d'environ 1,5 mm.



Figure 12: Matériel pour le pressage des graines de Jatropha

I-2-2- Préparation de la matière première :

Les graines sont préparées avec deux méthodes différentes, soit par le broyage direct soit par le broyage avec des graines décortiquées. L'huile produite sera différente au niveau du rendement. Après que les graines de Jatropha soient broyées, il faut les mettre dans l'étuve jusqu'à environ 60°C. La température joue un rôle dans l'extraction de l'huile végétale. Quand le broyage et le chauffage prennent fin – notre presseur ne supporte que des graines broyées d'environ 300 à 400g à la fois – on fait un pesage d'une quantité suffisante pour un pressage et enfin la manœuvre peut commencer.



Figure 13: Graine normale



Figure 14: Graine décortiquée

I-2-3- Démarche du pressage des graines :

Comme toutes les machines sous pression, le matériel de pressage a besoin d'assez de pression pour que l'huile s'extraie de la graine à travers le filtre, ce dernier et la matière première étant enfilés dans le cylindre de la machine mécanique. Le travail pressant peut s'arrêter quand il n'y a plus d'huile à la sortie du tube cylindrique ou quand l'indication de pression sur le tableau se fixe à une valeur presque précise.



Figure 15: Mode de pressage

Cette étape est surtout un travail qui a besoin de force et de courage. Cette machine à pression est une ancienne machine qui date d'environ les années 80 mais il y a une autre version un peu plus grande et un peu plus récente. Cette autre ancienne version supporte plus de 20 Kg à la fois pour un seul pressage. La technique est la même pour les deux machines.



Figure 16: Presseur mécanique

II- PREPARATION DE L'HUILE VEGETALE DE JATROPHA PAR LA REACTION CHIMIQUE de Transestérification

Pour l'obtention des produits dérivés de Jatropha, on s'est appuyé sur les différentes expériences. En combinant ces informations, on s'est attribué une procédure propre de fabrication de produits dérivés, comme le savon, la lampe à l'huile et même le biodiesel de Jatropha. La transformation de l'huile brute de Jatropha en biocarburant par la réaction d'estérification ou plus précisément la Transestérification est l'une des méthodes qui ont été choisies.

II-1- DETERMINATION DE LA QUANTITE DE SOLVANT ET PREPARATION DU BIOCARBURANT

Notre huile est déjà fiable pour l'étape suivante qui est la transformation chimique vue sa faible teneur en eau. Elle s'est reposée assez longtemps pour que les particules solides suspendues à l'intérieur se décantent au fond du tube, donc pas besoin qu'on la filtre.

II-1-1-Préparation de la solution d'huile :

Tout d'abord, préchauffer de l'huile exemptée d'eau à 45°C. Ensuite, verser 1ml de cette huile et 10ml de 2-Propanol dans un bécher bien sec. Bien mélanger la solution jusqu'à ce qu'elle s'éclaircisse. Il est important de mesurer exactement le 1 ml d'huile mais la quantité d'alcool n'exige pas beaucoup de précision.

II-1-2-Dosage de la solution d'huile préparée :

C'est le dosage des acides gras présents dans la solution d'huile par la solution de 0,1% NaOH préparée séparément. Il se trouve que la solution de soude 0,1% est la solution titrante.

Ajouter quelque goutte de phénolphthaleïne dans la solution d'huile préparée auparavant et titrer ce mélange jusqu'à la persistance de la couleur rose claire. Pendant 10 à 30 secondes, il faut arrêter le titrage et l'agitation quand la couleur apparaît ; si l'on continue de remuer, le fluide redeviendra jaune. Répéter tout le procédé une deuxième fois pour s'assurer que le volume du dosage est exact.

-Le poids en gramme (g) du catalyseur soude utilisé pour l'estérification de 1L d'huile végétale est égal au nombre de mL de solution du dosage 0,1%NaOH versée plus 5.

II-1-3-Préparation de l'ester :

Dissoudre dans 200mL de méthanol la quantité exacte de NaOH déterminée précédemment. Ce mélange doit se faire dans une fiole ou une bouteille en verre bien sèche qui peut être bien bouchée. Bien homogénéiser le mélange pendant 30mn, la solution obtenue est un méthoxyde de sodium. Quelque soit le temps, mélanger la solution du méthoxyde jusqu'à ce que le catalyseur soit dissout complètement.

II-1-4-Préparation du Biocarburant :

Préchauffer de l'huile à une température de 45 à 54°C, ajouter soigneusement 1L de cette huile dans le méthoxyde préparé auparavant. Bien secouer et mélanger la solution pendant environ 60 minutes (ajuster l'agitation juste pour avoir un petit vortex à la surface) et la verser dans un autre récipient pour la décanter. En moins d'une heure, une ligne de séparation entre les deux phases, le biodiesel et le glycérine, apparaît. L'essai est réussi dans ce cas. La glycérine représente environ 10% de tout le contenu du récipient, comme montré la figure 17.



Figure 17: La séparation des phases

Dans le cas contraire, elle produira 3 phases distinctes dont la couche de savon est la 3^e. Il faudra alors refaire les préparations avec un défaut de 1g de catalyseur.

- **Décantation et récupération du produit :**

Deux méthodes pour récupérer le biodiesel

- a- Laisser refroidir et décanter pendant 8h au moins. Le biocarburant flotte au-dessus de la masse gélatineuse de glycérine.

- b- Laisser refroidir et décanter le mélange pendant 1h environ en gardant une température modérée pour conserver la glycérine semi-liquide. Siphonner la glycérine semi-liquide de couleur marron foncé, qui se trouve à la partie inférieure de l'ampoule à décanter, dans un erleinmeyer et récupérer le biodiesel restant dans un autre erleinmeyer.

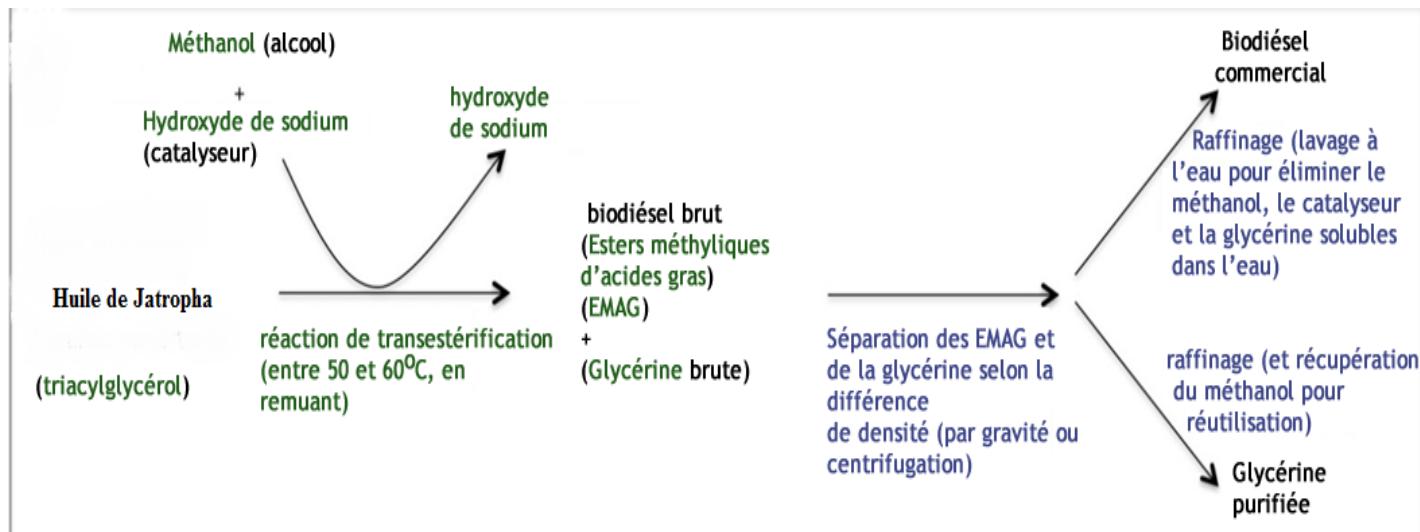


Figure 18: Mécanisme de la réaction de transestérification

II-2- LAVAGE ET VALORISATION DU SOUS-PRODUIT

II-2-1-Lavage du biodiesel (le produit principal) :

Des suspensions savonneuses sont produites avec le biodiesel lors de la réaction d'estérification. Elles se sont formées lorsque le catalyseur rencontre de l'eau avant de réagir avec l'huile.

Deux méthodes pour l'élimination du savon dans le biodiesel :

Méthode 1 : Laisser décanter le biodiesel pendant environ 2 jours puis récupérer le biocarburant propre en haut ou filtrer tout simplement. Le savon est sous forme de fils fins suspendus dans le liquide qui se décantent à la phase inférieure, c'est ce qui facilite la séparation.

Cette méthode est plus facile et plus rapide à réaliser que l'autre.

Méthode 2 : Laver le biocarburant dans l'eau une ou plusieurs fois pour enlever le savon. Pour cela, il existe un récipient laveur en PVC spécial pour le lavage muni d'un robinet fixé au demi-fond. Ajouter à l'huile une petite quantité d'acide acétique dilué qui neutralise les

quelques suspensions de soude restantes dans le biocarburant, ce qui permet d'obtenir une solution relativement neutre. Mélanger et décanter après pour séparer le biocarburant de l'eau savonneuse plus dense. Réchauffer légèrement et lentement le biocarburant pour permettre à l'eau, le savon et les impuretés résiduelles de se décanter au fond.

II-2-2-Valorisation du sous-produit :

Habituellement, pendant la préparation du biocarburant, on récupère un mélange de glycérine, de méthanol, de savon et de soude NaOH. Le taux de ce mélange récupéré dans 1 litre d'huile après la réaction d'estérification est souvent inférieur à 10% (10% de tout le contenu du récipient). On rajoute de l'acide phosphorique pour précipiter la soude au fond et reconvertis le savon en acide gras libres (FFA ou free fatty acid) qui flotte en haut. Le mélange eau-glycérine-méthanol reste au milieu. La quantité de l'acide phosphorique rajouté est la même que la quantité de soude mélangé dans le méthanol auparavant (pendant la préparation de l'ester). Après l'agitation et la décantation, on devrait apercevoir 3 phases distinctes (FFA suivit de la couche de glycérine-méthanol et le précipité marron foncé en bas). Le méthanol peut être enlevé par évaporation – après que le précipité marron soit retiré dans un autre récipient – et il n'en reste que la glycérine dans le récipient avec de l'acide gras libres, de sel et des impuretés colorantes de couleur brun. Dans notre cas (existence de la troisième phase en bas), refaire la valorisation de cette phase inférieure avec l'ajout de l'acide phosphorique et ainsi de suite.

III-ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DES PRODUITS : HUILE VEGETALE BRUTE ET BIOCARBURANT DE JATROPHIA

Il y a plusieurs types de paramètres à analyser et plusieurs méthodes pour caractériser les produits obtenus, les voilà ci-après quelques-uns des procédés physique et chimique qui sont la teneur en eau et sédiment ou BSW, la densité, la viscosité et le point d'éclair.

III-1- LA DENSITE

La densité peut être définie comme étant la masse du produit contenu dans un volume déterminé dans des conditions de pression et de température.

1- Principe :

On doit connaître la masse exacte du pycnomètre vide, la masse du pycnomètre contenant l'eau distillée et la masse du pycnomètre qui contient les échantillons à analyser. La densité ne peut être identifiée et calculée que lorsque ces quantités massiques sont recueillies et surtout avec précaution.

2- Matériel et méthode :

➤ *Matériels* : (Figure 19)

- Pycnomètre 25mL
- Plaque chauffante
- Thermomètre
- Balance de précision

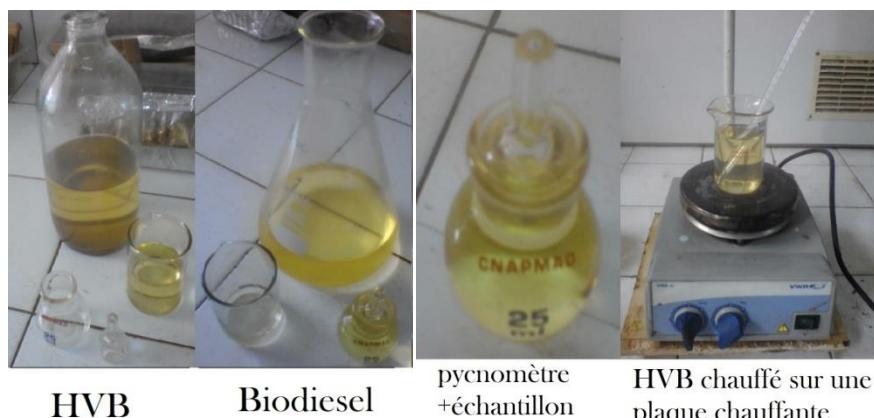


Figure 19: Appareil de mesure de la densité

➤ *Méthode*

Chauder d'abord l'échantillon, on cherche ici à identifier la densité des échantillons à chaque température reçue. Quand la température qu'on veut avoir est atteinte, mettre l'échantillon préchauffé dans le pycnomètre et ensuite le peser afin de pouvoir connaître sa masse exacte.

III-2- LA VISCOSITE

La viscosité peut être définie comme une résistance à l'écoulement. Elle représente la capacité de rétention des particules du fluide et quantifie sa capacité à s'épancher.

1- Principe :

Le but est de bien préciser le temps d'écoulement de l'échantillon dans le viscosimètre qui est plongé dans le bain afin de connaître la viscosité du liquide à analyser.

2- Matériels et méthodes :

➤ Matériels :

Pour effectuer l'analyse de la viscosité des échantillons, les instruments utilisés sont :

- Thermomètre
- Plaque chauffante
- Bain thermostatique contenant de l'huile de silicone
- Chronomètre
- Viscosimètre double calibrage et mono calibrage

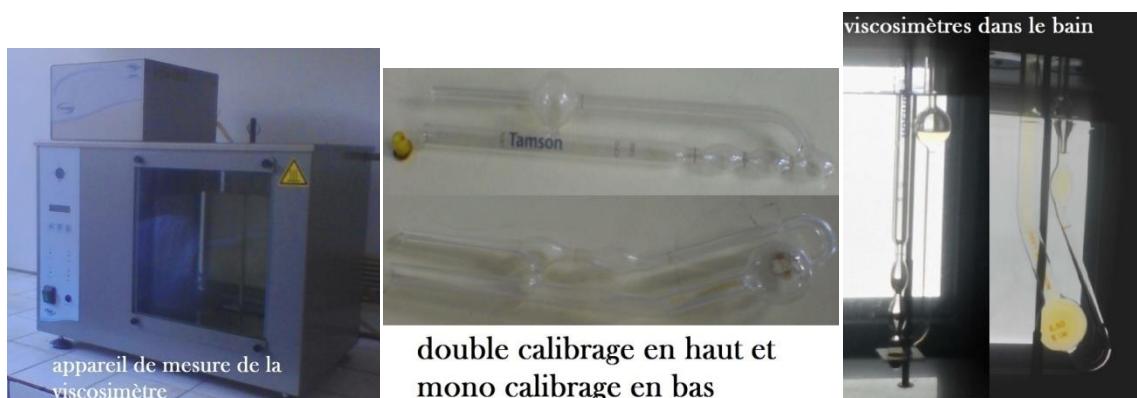


Figure 20: Matériels d'analyse de la viscosité

➤ Méthode :

Tout d'abord, chauffer l'échantillon à une température spécifiée aux analyses en même temps que le bain contenant la solution de l'huile de silicone. Une fois la température atteinte, mettre le viscosimètre dans le bain préchauffé et ensuite verser l'échantillon dedans afin que l'analyse puisse commencer. Enfin, prélever le temps de l'écoulement du liquide en commençant au trait inférieur jusqu'à ce qu'il atteint le trait supérieur du bulbe.

III-3- LE POINT ECLAIR

Le point éclair est la température la plus basse où le liquide à analyser peut former un mélange inflammable à sa surface. Il s'agit aussi de la température à partir de laquelle les vapeurs du produit s'enflamment en présence d'une flamme, dans des cas standards.

1- Principe :

Comme dit avant, c'est la détection de la température la plus basse pour former un mélange inflammable. Le liquide considéré laisse apparaître des vapeurs. A une certaine température ces vapeurs combinés avec un comburant (le gaz méthane) produit une inflammation [19]. Le test de point éclair consiste à chauffer doucement l'échantillon à un rythme constant d'élévation de température et avec une agitation complète. A chaque degré d'augmentation de température, une flamme est introduite dans la vapeur produite au-dessus de l'échantillon. La plus basse température à laquelle les vapeurs s'enflamme est le point d'éclair. [22]

Matériels et méthode :

➤ Matériels :

- Appareil électrique manuel en vase clos de Pensky-Martens
- Thermomètre
- Agitateur
- Gaz comburant
- Briquet à gaz



Figure 21: Matériel d'analyse du point d'éclair

➤ Méthode :

Un appareil semi-automatique de ce type est constitué d'une vase ou coupelle, on le remplit avec le liquide qu'on va analyser. Refermer ensuite la coupelle. Le couvercle est muni d'un thermomètre dont l'embout est situé au-dessus du liquide dans les vapeurs et d'un agitateur baigné dans l'échantillon. L'appareil dispose d'un chauffage qui permet d'elever la température degré par degré. Chaque fois que la température atteint un degré supérieur, une flamme est plongée dans les vapeurs. S'il y a inflammation ou une petite étincelle, c'est que le

point d'éclair est atteint. Dans le cas contraire, l'appareil continu d'augmenter la température du liquide jusqu'à ce que le point d'éclair soit atteint [23]. Plus la température du point d'éclair est élevée, plus la sécurité lors de l'entreposage et de la manutention du biodiesel est assurée.

III-4- LE BSW (BASIC SEDIMENT AND WATER)

La teneur en eau permet de quantifier la quantité d'eau dans un liquide donné.

1- Principe

On utilise souvent du toluène saturé, mélangé dans les échantillons à analyser. Dans notre cas, on peut dire que ces échantillons sont de qualité supérieure. On n'a pas employé ou mélangé les échantillons avec de l'eau lors de la préparation et du traitement. L'huile brute produite est pure et certainement, son biocarburant dérivé aussi. La détermination du BSW des échantillons est faite par une centrifugation à 4000 tours par minute et sans solvant additif.

Cette méthode de caractérisation a pour but de connaître le pourcentage d'eau dans les liquides à analyser mais pas la teneur en sédiment. La teneur en eau et en sédiment sont séparément déterminées même si elles sont inséparables. Le sédiment ici indique les matières solides en suspension et pas les impuretés solides insolubles qui étaient dans le solvant.

2- Matériel et méthode :

➤ Matériels :

Pour mettre en œuvre cette méthode de détermination de la teneur en eau et en sédiment des échantillons d'huile végétale et de biodiesel de Jatropha, il faut employer les appareils cités et figurés ci-après :

- Deux tubes coniques de 100ml chacune ;
- Une centrifugeuse ROTO SILENTA III réglée par tour et par minute.



Figure 22: Les tubes coniques remplis d'échantillon et la centrifugeuse

➤ Méthode :

Remplir les tubes coniques des échantillons jusqu'au trait et les installer dans la centrifugeuse pendant 30 minutes à 4000 tours/min. Il ne reste qu'à attendre la minuterie, enlever les tubes de la centrifugeuse une fois terminée et il suffit simplement de lire la graduation sur le bas du tube pour connaître le volume en eau et en sédiment de ces échantillons.

PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

I- PRESENTATION DES PRODUITS A ANALYSER

Les échantillons à analyser sont l'huile végétale de Jatropha et le biocarburant dérivé de celle-ci, montrée dans la figure ci-dessous, est produite par un appareil mécanique à pression à partir de graines sèches de Jatropha. Elle a une couleur jaune verdâtre avec un aspect visqueux tandis que le biocarburant a une couleur jaune claire avec une odeur caractéristique.



Figure 23: Les échantillons à analyser

II- RESULTATS OBTENUS APRES EXTRACTION PAR SOLVANT

L'extraction de 5g de cet échantillon dure environ 6 heures, suffisant pour avoir la totalité de l'huile. A la sortie de l'extraction, l'échantillon dans le soxhlet et l'huile extraite dans le tube ont été bien séchés.

Nous avons obtenu un pourcentage assez élevé d'huile végétale. L'huile produite par cette extraction semble être la même que celle sortie de la machine de pressage.

Tableau 6: Valeur relevé après extraction par le solvant hexane

Prise de l'échantillon	HVB produite	Taux d'huile dans la graine
5g	1,87g	37,4%
5g	1,91g	38,2%

La différence est due à la durée d'extraction et au temps de séchage dans l'étuve. Un léger décalage de temps et de température pourra marquer des différences. Les graines de Jatropha ont produit en moyenne 37,8% d'huile végétale.

III- PRESENTATION DU PRODUIT APRES PRESSAGE

Le produit final est une huile végétale brute. C'est un liquide visqueux de couleur jaune verdâtre selon la qualité, c'est-à-dire s'il n'y a pas d'eau ou de matières en suspension.

*Figure 24: Huile végétale brute avant et après repos*

Ce sont les mêmes produits mais l'huile végétale dans le deuxième bêcher est déjà reposée pendant plusieurs jours. Les matières en suspension se décantent au fond du bêcher, l'huile devient claire et donne sa véritable couleur (jaune verdâtre).

IV- PRODUCTION DU BIODIESEL A PARTIR DE L'HUILE VEGETALE DE JATROPHA

IV-1- PRODUIT DE LA REACTION DE TRANSESTERIFICATION

Après la préparation de l'huile végétale de Jatropha par la réaction de transestérification, on a obtenu un produit composé du biodiesel qui est le produit principal, de la glycérine qui est le sous-produit encore à valoriser ultérieurement, du savon souvent dissous dans le biodiesel.

Voici présenté ci-dessous par la figure 26 le résultat obtenu par la réaction d'estérification, après décantation et séparation des phases.



Figure 25: Produit et sous-produit après la réaction chimique

La glycérine dans la petite erleinmeyer - solution grenat foncée - obtenue est environ 8% de la quantité du biodiesel produit. D'après la norme, le sous produit devrait être au maximum 10% de la quantité du produit principal.

L'essai de 500 mL d'huile végétale de Jatropha, mélangé avec 100 mL de méthoxyde a donné environ 500 mL de biodiesel brute (le liquide jaune) et 100 mL de sous produit.

La quantité du biodiesel produit est presque la même que celle de l'huile végétale à transformer.

IV-2- VALORISATION DU SOUS-PRODUIT

Après la valorisation, on obtient 2 sortes de glycérines. L'une est obtenue par un ajout de 3,5 mL d'acide phosphorique et l'autre par un deuxième ajout. Cela est due à la présence de la troisième phase inférieure du mélange réactionnel (un précipité de couleur foncée au niveau de la phase inférieure).



Figure 26: glycérines avant (1) et après valorisation (2)

Les deux résultats de la figure 26 (2) sont des glycérines brutes composées d'acide gras libre, de sel et d'impuretés colorantes marron et brun grenat. La différence est que la deuxième a un excès d'acide gras et avec un aspect plus visqueux que l'autre. Lorsque la réaction est incomplète, il peut y avoir présence de mono et diglycéride dans l'ester. On a le même cas ici, après la valorisation du sous produit, comme montré par la figure 26.

IV-3- CARACTERISATION DES PRODUITS

L'analyse physico-chimique permet de savoir l'aspect et les caractéristiques physique et chimique des échantillons à étudier. Dans notre cas, l'huile végétale et le biodiesel de Jatropha Curcas sont dérivés l'un de l'autre.

IV-3-1- La densité :

La densité d'un liquide est le rapport entre la masse d'un échantillon prise à une température bien définie et la masse d'eau prise à la même température, exprimée clairement par la formule ci-dessous :

$$D = \rho_n \frac{m+A}{m'+A}$$

Où :

ρ_n est la masse volumique de l'eau

m est la masse de l'échantillon à analyser dans le pycnomètre, en g

m' est la masse d'eau en g, dans le même pycnomètre

A est le coefficient ou la correction due à la poussée de l'air sur le fluide contenant le pycnomètre [25]. A = 0,0012, généralement.

Les tableaux 7 et 8 suivants nous montrent les résultats d'analyses.

Tableau 7: Résultats des analyses de la densité de l'HVB de Jatropha prise avec les températures différentes.

Température en °C	Poids du pycnomètre vide, en g	Poids du pycnomètre + eau, en g	Poids du pycnomètre + HVB, en g	Masse d'eau (m'), en g	Masse d'huile (m), en g	Masse volumique de l'eau, ρ_n	Densité
30	27,1679	52,0473	49,9376	24,8794	22,7697	0,99713	0,91250
40	27,1679	51,9703	49,6693	24,8024	22,5014	0,99225	0,90020
50	27,1679	51,8767	49,5068	24,7088	22,3389	0,98802	0,89326
60	27,1679	51,7705	49,4781	24,6026	22,3102	0,98313	0,89152

Tableau 8: Résultats des analyses de la densité du biodiesel de Jatropha obtenus à des températures différentes.

Température en °C	Poids du pycnomètre vide, en g	Poids du pycnomètre + eau, en g	Poids du pycnomètre + biod, en g	Masse d'eau (m'), en g	Masse du biod(m), en g	Masse volumique de l'eau, ρ_n	Densité
30	27,1679	52,0473	49,0431	24,8794	21,8752	0,99713	0,87673
40	27,1679	51,9703	48,8408	24,8024	21,6729	0,99225	0,86705
50	27,1679	51,8767	48,7139	24,7088	21,5460	0,98802	0,86155
60	27,1679	51,7705	48,5674	24,6026	21,3995	0,98313	0,85513

Les masses d'eau et d'échantillons prises par peser diminuent quand la température augmente. D'après le calcul, la densité a donné le même résultat. La densité diminue aussi quand la température augmente. La densité de l'eau, de l'huile végétale et du biocarburant varient réciprocement avec la température. Le biodiesel a l'avantage d'avoir une densité beaucoup plus faible que l'huile végétale de Jatropha.

Les variations de la densité de l'huile végétale et du biocarburant de Jatropha sont représentées par les figures suivantes.

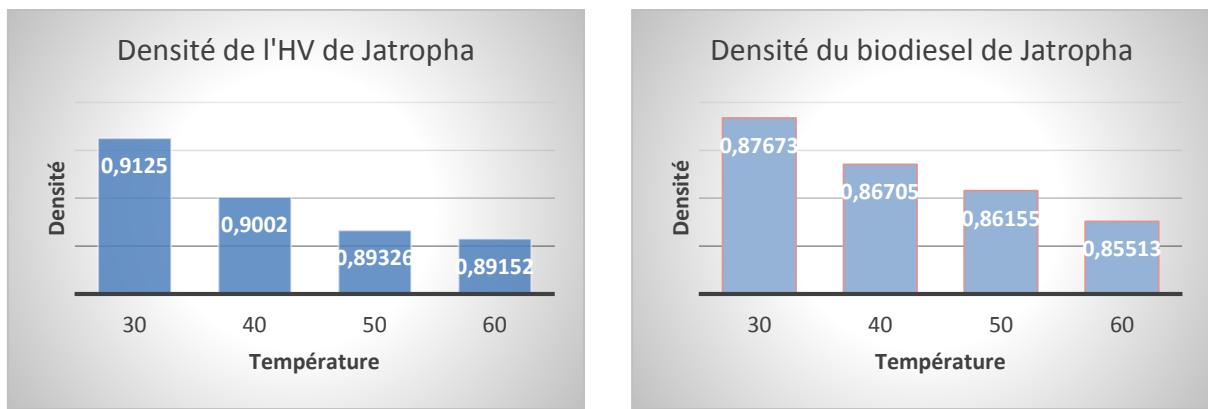


Figure 27:Densité de l'huile végétale et du biocarburant de Jatropha en fonction de la température

IV-3-2- La viscosité :

Il s'agit ici de la viscosité cinématique de l'huile végétale et de son biodiesel dérivé, exprimée par :

$$V = C*t$$

Où :

V est la viscosité cinématique, en centistokes ou cSt ou m^2/s

C est le coefficient de la viscosité

t est le temps d'écoulement, en seconde.

Nos résultats sont illustrés dans les tableaux 9, 10, 11 et 12.

1- Avec un viscosimètre à double calibrage

Tableau 9: Résultats de la viscosité obtenus par l'analyse de l'HVB de Jatropha.

Température en °C	Série du viscosimètre	Coefficient du viscosimètre	Temps d'écoulement en s	Viscosité en cSt
30	600	19,78512	26	514,41312
40	600	19,81484	62	1228,52008
50	500	8,337358	18	150,07244

60	500	8,349847	17	141,947399
----	-----	----------	----	------------

Tableau 10: Résultats de la viscosité obtenus par l'analyse du biodiesel de jatropha.

Température en °C	Série du viscosimètre	Coefficient du viscosimètre	Temps d'écoulement en s	Viscosité en cSt
30	600	19,70891	23	453,30493
40	600	19,73582	80	1578,8656
50	500	8,824127	56	494,15111
60	500	8,837343	33	291,63231

Les résultats de la viscosité des échantillons à 40°C sont vraiment élevés. Nous notons aussi que toutes ces valeurs sont supérieures à ceux des résultats de la littérature. Cela est dû à cause de la différence et l'origine de l'huile et aussi que l'application du viscosimètre à double calibrage est spécifiée aux liquides opaques comme l'huile lourde.

2- Avec un viscosimètre mono calibrage

Tableau 11: Résultats de la viscosité de l'huile brute de Jatropha.

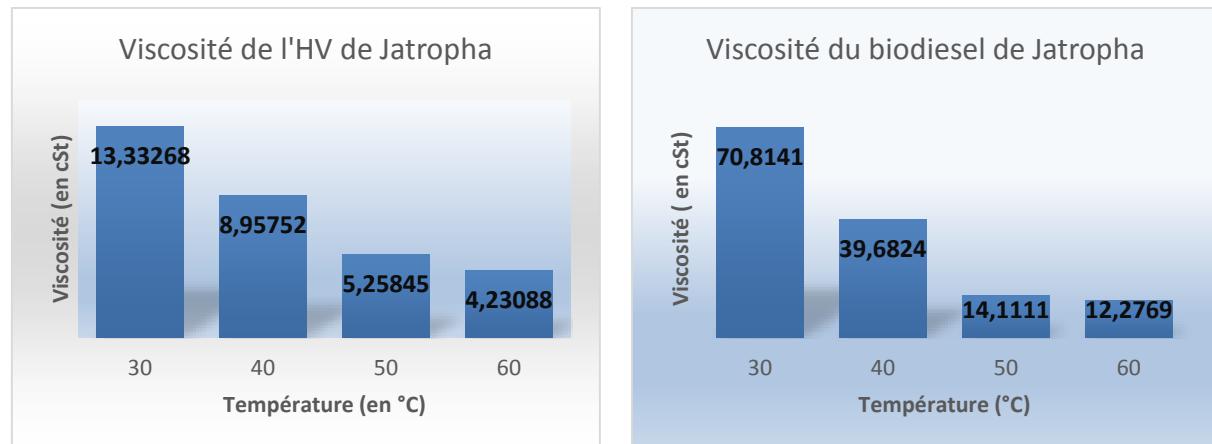
Température en °C	Série du tube	Coefficient du viscosimètre	Temps d'écoulement en s	Viscosité en cSt
30	200	0,12578	106	13,33268
40	100	0,01566	572	8,95752
50	50	0,004089	1286	5,25845
60	50	0,004076	1038	4,23088

Tableau 12: Résultats de la viscosité du biodiesel de Jatropha.

Température en °C	Série du tube	Coefficient du viscosimètre	Temps d'écoulement en s	Viscosité en cSt
30	200	0,12578	563	70,8141
40	100	0,01566	2534	39,6824
50	50	0,004089	3451	14,1111
60	50	0,004076	3012	12,2769

On observe que la viscosité diminue quand la température augmente. Ce qui veut dire que les échantillons deviennent moins visqueux à une température supérieur à la normale. La viscosité de nos échantillons varie réciprocquement avec la température.

Les variations de la viscosité de l'huile végétale et du biocarburant de Jatropha en fonction de la température sont représentées par la figure 29.

Figure 28: Viscosité de l'huile végétale et de biocarburant de Jatropha en fonction de la température

IV-3-3- Le point éclair :

Le point éclair ou appelé aussi point de flash est la température la plus basse à laquelle un corps combustible émet suffisamment de vapeur pour former, avec l'air ambiant, un mélange gazeux qui s'enflamme sous l'effet d'une source d'énergie calorifique telle qu'une flamme pilote.

Résultats :*Tableau 13: Résultat de l'analyse du point éclair.*

Echantillons	Point éclair, en °C
HVB de Jatropha	30
Biodiesel de Jatropha	38

Le point éclair de l'huile végétale est inférieur à ceux du biodiesel.

Le point éclair de l'huile de Jatropha varie selon le type de la plante. Les valeurs élevées montrent parfois que l'huile de Jatropha possède de bonnes caractéristiques de stockages 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]

IV-3-4- Le BSW (Basic Sediment and Water):

La teneur en eau et sédiment est exprimée en pourcent, selon la relation suivante:

$$\text{BSW} = (\text{S}/\text{V}) \times 100$$

Avec :

S est le volume d'eau et sédiments dans l'échantillon, en mL

V est le volume d'huile ou de biocarburant à analyser, en mL

BSW est la teneur en eau et sédiment

Expression des résultats :*Tableau 14: Résultat de l'analyse du BSW.*

Echantillons	Volume d'eau et sédiment, en mL	BSW, en %
HVB	0	0
Biodiesel	0	0

Les graduations lues sur les tubes coniques sont littéralement sur le 0. La valeur comme 0% dans la teneur en eau ou en residu est rarement présentée dans les analyses. Voyons sur les photos suivantes : les fonds des tubes sont sans trace d'eau ou de sédiment.



Figure 29: Tubes à la sortie de la centrifugeuse

(L'huile végétale est dans le premier tube et le biodiesel dans le deuxième)

Cette huile est propre depuis le début, la préparation des graines pour l'extraction. Visiblement, le biodiesel qu'on a transformé avec est aussi propre. Le chauffage des graines est effectué dans l'étuve ; quant au lavage du biodiesel, on l'a tout simplement décanté pendant environ 2 jours. C'est pour ces raisons que ces pourcentages vis-à-vis de l'eau et des matières suspendues sont vraiment nuls.

V- DISCUSSIONS

Cette étude est basée sur la production de biocarburant à partir de la plante de Jatropha. Produire un produit combustible autre que les carburants usuels peut être un atout pour les pays non producteurs de pétrole. Pourtant, les pays producteurs des biocarburants de première, deuxième et surtout troisième génération sont encore les pays développés et suivent un peu derrière eux les pays en voie de développement. Le biocarburant de première génération est dérivé des plantes (feuilles, fleurs, graines, racines) ou des animaux. Notre cas ici c'est le biodiesel provenant de graines oléagineuses de Jatropha. Basé sur des nombreuses propriétés intéressantes qui lui sont attribuées, le Jatropha est dévoilé comme une plante miracle. Au-delà de ses potentialités pour la production de biodiesel, elle présente de nombreux avantages. Elle a la réputation de s'adapter aux conditions semi-arides et aux sols pauvres, de se propager facilement par bouturage ou par semence. Elle pourrait fournir différents produits et sous-produits qui contribuent aux principaux objectifs de développement rural : la promotion d'activité féminine (production de savon), la réduction de la pauvreté (commercialisation des produits dérivés), le maintien de la fertilité du sol par le contrôle de l'érosion et du feu de brousse (plantation en haie vive) et la valorisation des produits forestiers (utilisation des tourteaux comme engrais organiques). Donc, c'est probablement pour toutes ces raisons que différents pays en voie de développement ont portés leurs choix sur cette plante pour modifier la production agricole et accroître les revenus des agriculteurs.

1- Transformation des graines en huile végétale

Quand les graines sont déjà trop sèches au moment du pressage il est évident que le rendement d'huile végétale soit faible. Le rendement recueilli après l'extraction des graines augmente ou diminue en fonction de l'humidité ou du séchage des graines. C'est pourquoi, il est préférable de conserver le produit en tant que biocarburants au lieu de stocker en tant que graines. A part le fait de conserver les graines, la perte au niveau du rendement de l'huile produite est due au pressage proprement dite. Le taux d'huile dans la graine atteint une totalité de 36% et peut être plus alors que le rendement d'huile qu'on a obtenu est seulement de 20% environ.

2- Production du biocarburant

Il y a un énorme avantage économique et écologique de Jatropha dans la vision d'une production massive de carburant vert. Pendant la saison de la récolte, où les graines ne sont pas encore chères (tous les agriculteurs ont des stockes qu'ils vendent à un prix abordable), il faut profiter de transformer de l'huile brute en huile raffinées. Cette vision de la production en masse devrait avoir un rapport avec le stockage des graines. En cas de besoin, pendant le temps où le Jatropha est à sec, le prix de revient du biocarburant sera évalué en fonction du prix des matières premières [13] et il sera vraiment élevé quand les graines sont rares.

La commercialisation des produits dérivés du Jatropha au niveau local n'a pas pu être développée. Jusqu'à présent, celle-ci se fait de manière informelle et concerne principalement la vente de graines et non des produits dérivés.

L'exploitation des sous-produits pourra apporter un coût important, comme le glycérol : un co-produit du biodiesel par la transestérification et le tourteau : un sous-produit provenant du pressage des graines. Le glycérol est valorisable dans de nombreux domaines et peut être vendu à diverses entreprises, après traitement. Ainsi, il peut être utilisé dans l'industrie cosmétique, la médecine, l'industrie papetière ou agroalimentaire. Il est utilisable dans les crèmes hydratantes, les savons, et comme dégraissant dans les produits d'entretien. Mais également, le glycérol peut être placé en fermentation afin d'obtenir de l'éthanol [9]. Le tourteau est aussi valorisable, c'est le principal sous-produit issu du pressage de l'huile qui, selon ce mode d'extraction, contient 1 à 20% de matières grasses. Son utilisation pourra permettre d'améliorer le taux de protéines brutes et de glucides tout en abaissant le niveau des lipides de la ration. Sa détoxification est possible et doit être préalable pour sa valorisation en alimentation animale [24].

Le biodiesel produit est soit directement utilisable dans un moteur diesel, soit utilisable après mélange avec du diesel pétrolier conventionnel [14], ce qui reste la pratique la plus courante. Le biodiesel doit répondre à un besoin et donc posséder un indice de cétane et un pouvoir calorifique suffisamment élevés. Sa viscosité en revanche ne doit ni être trop élevée ni trop faible. En effet, une viscosité trop élevée provoquerait des risques de surpression dans le moteur, alors qu'une viscosité trop faible engendrerait des risques de fuites. Cette viscosité détermine également la quantité de l'aérosol lors de l'injection. Le point éclair doit être le plus élevé possible pour des raisons de sécurité.

3- Impact causé par le projet entier

On sait déjà que le Jatropha n'apporte que des avantages dans l'environnement et au niveau de la société. Stimulés par une réglementation de plus en plus déplaisante, des efforts considérables ont été entrepris sur le plan technique visant à réduire les émissions de polluants atmosphériques en agissant à différents niveaux : mise au point de moteurs à combustion interne plus performants, pose obligatoire des pots catalytiques pour traiter les effluents de sortie, reformulation des carburants. Compte tenu du renouvellement lent du parc automobile, les mesures efficaces sont celles portant sur la reformulation des carburants car elles concernent tous les véhicules en circulation [9].

Une approche biologique par fermentation mettant en jeu la durée de stockage des graines de Jatropha et celle par utilisation de champignons microscopiques pourrait permettre de baisser les teneurs en composés toxiques et autres facteurs antinutritionnels [24]. Il y a un période où des associations ont fait des formations dans divers endroits dans notre pays concernant le Jatropha. Après la formation, d'autre ont suivi les programmes et même fait des progressions, des améliorations et d'autres pas. Une des stratégies de mise en place du programme est de mettre en place de pépinières de production de plantes de Jatropha, pour ceux qui ont de moyens. Les paysans propriétaires de pépinière et bénéficiaires de la formation sont ceux qui ont plus d'avantages.

Réflexion socio-économique :

D'après ce qui précède, le biodiesel présente beaucoup d'avantages et est 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. L'implantation de la plante de Jatropha commence à être déjà oubliée par les gens. Il y a un temps où le mot Jatropha était connu, pas comme le cas d'aujourd'hui [4].

Certes, le développement de l'industrie du biodiesel va créer des emplois et va diminuer également 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 - puisque la culture de ces plantes végétales sera certainement beaucoup plus rentable comparées aux cultures traditionnelles destinées à l'alimentation, ce qui va provoquer un effet de détournement de la production alimentaire à des utilisations industrielles.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION

Les priorités du gouvernement ont toujours été l'eau, l'alimentation et les énergies. Actuellement, la communauté se préoccupe plus du réchauffement climatique, de la pollution hydraulique, atmosphérique et sols, et l'économie des énergies. Pour préserver l'environnement, il existe plusieurs sortes d'énergies propres et renouvelables recherchées : solaire, éolienne, géothermique, électrique, biologique. ... Les bioénergies notamment les biocarburants, ont attiré l'attention de beaucoup de chercheurs et d'industries. Le biodiesel, utilisé dans beaucoup de pays, présente des caractéristiques proches de celles du petrodiesel mais contient moins de polluants. Cette étude sur le Jatropha représente l'une des propositions de solutions au niveau des huiles végétales et de leurs transformations dans le but d'en faire un carburant de substitution. On peut dire dès maintenant que l'huile brute de Jatropha - 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. Dans ce cas, des adaptations des moteurs ou des réglages doivent être nécessaires pour changer le carburant ou aussi le mélange de l'huile avec le gazole, un carburant diesel. Surtout les moteurs diesel ou les motoculteurs n'ont jamais été conçus pour des carburants végétaux, et comme on le sait déjà, le carburant de Jatropha est à la fois lubrifiant. En plus, la valorisation des déchets issus de la production de carburant de Jatropha en engrais fertilisant naturel devrait figurer parmi les atouts potentiellement intéressants de cette filière. Cet engrais pourra devenir un second produit de toute unité d'exploitation, non seulement comme un simple sous-produit mais à l'avenir ça pourrait être une des facteurs qui améliorera la productivité à Madagascar.

PERSPECTIVES

Ce travail est loin d'être fini, c'est la raison pour laquelle nous suggérons :

- Une réorganisation des producteurs et représentants des collectivités locales formées à la production de plantes par pépinière, aux techniques de plantation et à l'entretien des plantes jusqu'à la première production.
- Une utilisation de technologies avancées et adaptées dont la production de biocarburant en vue d'offrir des conditions de vie des populations rurales améliorées grâce à l'accroissement du niveau de satisfaction de leurs besoins socio-économiques et aussi la baisse significative de la pauvreté.

Conclusion

- Une production de bioélectricité et d'électricité lancée à partir d'unités locales de transformation.
- Une production d'alcool locale spécifiée à la transestérification (méthanol et propanol-2).

Un jour, les réserves fossiles sous terre vont être à sèches. Il vaut mieux commencer maintenant vu que les inconvénients et les blocages de la production de biocarburant à partir de Jatropha peuvent se passer derrière tous ces avantages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- BERNA HAMAD, (2009), Thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat : Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en condition douces par catalyses hétérogènes acide et basique (Université Claude Bernard – Lyon 1), Page 187
- [4]- MACTAR DIOP, (2009), Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception électromécanique, Production de Biodiesel à partir de l'huile de Jatropha, Page 101
- [5]- El Hadji Ibrahima NDIAYE, (2012), Thèse pour l'obtention de grade de docteur en énergétique, Ecole doctorales des sciences exactes et de leurs applications dans l'Université de PAU et des PAYS de l'ADOUR ; Caractérisation thermophysique des biodiesels : vitesses de son, densité, compressibilité, Page 169
- [6]- Aurore MAMYTIANA, (Sept 2016), Les sources d'énergie fossile, les hydrocarbures non conventionnels, Page 11
- [7]- Aurore MAMYTIANA, (Sept 2016), Le gazole et le Biocarburant, un carburant diesel, Page 8
- [8]- 1ere GMB technologie, Les carburants, les composés chimiques des carburants, Page 7
- [9]- Jean-Pierre SAWERYSYN, Carburants d'aujourd'hui, carburants de demain : impacts sur la pollution atmosphérique, Page 10
- [10]- Les biocarburants : Perspectives, risques et opportunités, (2008), article, Impacts des biocarburants sur l'environnement, la situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture, Page 21
- [11]- Centre National de Recherches Industrielle et Technologie (CNRIT) et Ecole Supérieur Polytechnique (ESP) Université d'Antananarivo (2014), Contribution à la valorisation de l'huile de Jatropha en carburant pour la mécanisation agricole et l'électrification, Page 12

[12]- MESBAHI Dalila, (2012), Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister, La transestérification hétérogène de l'huile de tournesol sous alumine : Production du biodiesel EEEHV, Page 75

[13]- J. BARBIER, M. CISSAO, C. CISSE, F. LUCHL, Dans la communauté rurale de Dialocto Sénégal, (2012), Intérêts de mettre en place une filière courte basée sur la culture du Jatropha. Supervisé par G. MERGEY, Professeur à l'Université de Liège, Page 122

[14]- Florent ALLAIN, Thèse de doctorat présentée décembre 2014, Etude expérimentale et théorique de la transestérification des huiles végétales par catalyse hétérogène : approche jmulti-étagée du procédé de synthèse du biodiesel.

[15]- Maxime de Ville, (2010), Développement local en Afrique, Avantages et désavantages de l'huile de Jatropha, Page 3

[16]- Programme spécial Biocarburants, plan REVA (Retour Vers l'Agriculture).

[17]- Le CNRIT et ces partenaires, intervenus par RAHARISEHENO IhantaVololonirina, Ingénieur en Génie Chimique et RAVAOARINIRINA Zoé Martine, Chimiste dans la spécialité Chimie Minérale, Projet Jatropha : Valorisation des ressources naturelles locales,

[18]- Agra CEAS Consulting, (2009), Potentiel pour la production de biocarburants dans les pays de la FEMIP. FTF/REG/04/2006, Page 26

[19]- ABOÏNA GERARD TCHAKBLO, (2009), Mémoire pour l'obtention de master en génie énergétique ; Production de biodiesel par transestérification alcoolique : étude sur réacteur pilote, Page 53

[20]- LYES TARABET, (2012), Thèse de doctorat en sciences énergétique, Etude de la combustion d'un biocarburant innovant dans les moteurs à combustion interne de véhicules, Page 129

[21]- H. CHAABEN, S. MOTRI, Z. BEN SELMA MOHAMED, (2015), Journal of New Sciences, article JS-INAT, Page 8

[22]- Daniel BALLERINI, Jean-Claude GUICHET, Xavier MONTAGE, « Carburants »

[23]- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2016, Méthode d'analyse, Détermination de la température du point d'éclair selon la technique Pensky- Marten (vase clos), Page 8

[24]- Dr THIERRY NESSEIM, Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture – Université de Thiès, Possibilités d'utilisation du tourteau de Jatropha en alimentation animale : états des connaissances, Page 19

[25]- Randrianarivelo Fenitra Harifidimala, Mémoire en vue d'obtention de licence en génie chimique, ESP Antananarivo : Caractérisation et essai de valorisation de l'huile lourde de Tsimiroro par le Jatropha.

[26]- M. Amrani Département de Génie Chimique, Faculté des Sciences et des Techniques Université de Tanger, dans le Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (2007) 295-299 : Simulation du procédé de fabrication du biodiesel à partir des graisses jaunes, Page 5.

[27]- Maria del Pilar Rodriguez, (2014), Mémoire de maîtrise en génie chimique, Production de Biodiesel à partir d'une huile modèle de microalgues par voie de catalyse enzymatique hétérogène (Université Sherbrooke, Canada), Page 62

[28]- MEUNIER Michel, (2009), Mission à Madagascar, Validation de la campagne de pressage de Jatropha à Madagascar, Page 12

[29]-Aliou Ousmane HAIDAR, (1996), Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées de l'Université de Sherbrooke, Valorisation d'une huile végétale tropicale : l'huile de Pourghère.

[30]- PIERRE-HENRI TEXIER, Ingénieur général des Ponts, des Eaux et des forêts, membre de l'Académie d'Agriculture de France, Vice-président du club des bio économistes ; MELANIE GUITT et, Ingénieur de projets à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) ; MASSIMILIANO CAPEZZALI, Directeur Adjoint du Centre de l'Energie à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) : Le Jatropha: une plante écologique et un biocarburant durable ? Page 3

WEBOGRAPHIE

[2]- Biocarburants ou agrocarburants ?

- http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF_Energie_ER13_Part_FR.PDF
- <http://www.universalis.fr/encyclopedie/biocarburants-agrocarburants/1-les-principales-filieres-de-biocarburants/>
- http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF_Energie_ER13_Part_FR.PDF
- <https://www.notre-planete.info/ecologie/energie/biocarburants.php>

[3]- Notions théoriques pour la réalisation des ateliers : sur le Biocarburant.

http://cegepsherbrooke.qc.ca/~robergse/biodiesel/IntroTheorique_Corr3.pdf

[31]- <http://www.planetoscope.com/biocarburants>
<http://www.20minutes.fr>

ANNEXES

ANNEXE 1 : Liste des carburants

Carburant	PCI
Essence (automobile)	43,8 MJ/kg
Essence (aviation)	44,0 MJ/kg
GPL	46,1 MJ/kg
Fioul ou gazole	42,5 MJ/kg
Kérosène	43,3 MJ/kg
Dihydrogène	120,0 MJ/kg
Iso-octane	44,4 MJ/kg
Iso-heptane	44,6 MJ/kg

A. Tableau des densités d'énergie :

Type de Carburant	Densité énergétique spécifique (MJ/kg)	Densité énergétique volumétrique (MJ/L)	CO ₂ produit par combustion (kg/kg)

- Carburants solides issus de la biomasse

Fumier animal/détritus

		$\sim + 40 \% ((C_6H_{10}O_5)_n) +$
Bagasse (tige de canne)	9,6	$15 \% ((C_{26}H_{42}O_{21})_n) + 15 \% ((C_9H_{10}O_2)_n) : 1,30$

Son (balle de la graine)	14,6	
Plantes séchées((C ₆ H ₁₀ O ₅) _n)	10 – 16	IF50 % ((C ₆ H ₁₀ O ₅) _n) + 25 %((C ₂₆ H ₄₂ O ₂₁) _n) + 25 %((C ₁₀ H ₁₂ O ₃) _n) : 1,84
Bois((C ₆ H ₁₀ O ₅) _n)	16 – 21	IF45 % ((C ₆ H ₁₀ O ₅) _n) + 25 %((C ₂₆ H ₄₂ O ₂₁) _n) + 30 %((C ₁₀ H ₁₂ O ₃) _n) : 1,88
- Carburants liquides		
		(En estimant que le contenu en carbone est 23 % wt + O ₂ masse) :
Huile de pyrolyse	17,5	21,35 0,84
Méthanol (CH ₃ -OH)	19,9 – 22,7	15,9 1,37
Éthanol (CH ₃ -CH ₂ -OH)	23,4 – 26,8	23,4 1,91
Butanol (CH ₃ -(CH ₂) ₃ -OH)	36,0	29,2 2,37
Graisse	37,67	31,68 [Veuillez insérer la composition moyenne ici]
Biodiesel	37,8	33,3 – 35,7 ~2,85
Huile de tournesol(C ₁₈ H ₃₂ O ₂)	39,495	(12 % (C ₁₆ H ₃₂ O ₂) + 16 % (C ₁₈ H ₃₄ O ₂) + 71 % (AL) + 1 % (ALA)) : 2,81

Huile de ricin($C_{18}H_{34}O_3$) 39,56 33,21 (1 %PA + 1 %SA + 89,5 %ROA + 3 %OA + 4,2 %AL + 0,3 %(ALA)) : 2,67

Huile d'olive($C_{18}H_{34}O_2$) 39,25 - 39,82 33 - 33H 75 %($C_{18}H_{34}O_2$) + 1 %(ALA)) : 2,80

- Carburant gazeux

Méthane (CH_4) 55 – 55,7 (liquéfié) 23,0 – 23,3 (Le méthane est un gaz à effet de serre) 2,74

Dihydrogène (H_2) 120 – 142 (liquéfié) 8,5 – 10,1 (production et liquéfaction de l'hydrogène) 0,0

- Carburants fossiles

Charbon 29,3 – 33,5 39,85 - 74,43 (En ne comptant pas : CO, NO_X , Sulfates et Particules) : ~3,59

Pétrole 41,868 28 – 31,4 (En ne comptant pas : CO, NO_X , Sulfates et Particules) : ~3,4

Essence 45 – 48,3 32 – 34,8 (En ne comptant pas : CO, NO_X , Sulfates et Particules) : ~3,30

Gazole (Diesel) 48,1 40,3 (En ne comptant pas : CO, NO_X , Sulfates et Particules) : ~3,4

Gaz naturel 38 – 50 (liquéfié) 25,5 – 28,7 (Éthane, Propane et Butane N/C : CO, NO_X et Sulfates) : ~3,00

Éthane (CH_3-CH_3) 51,9 (Liquéfié) ~24,0 2,93

- Combustibles nucléaires

Uranium-235 (^{235}U)	77 000 000	(Pur) 1 470 700 000	Dépend de la concentration du minerai d'uranium (extraction, enrichissement, transport) : 0,0
Fusion nucléaire Deutérium (H^2 , Tritium (H^3))	300 000 000	(liquéfié) 53 414 377,6	(Dépend de la production d'eau lourde, de l'extraction de l'Hydrogène-Tritium et de la distillation à vide) : 0,0
- Piles à combustible			
Pile à combustible à méthanol direct (DMFC)	4,5466	3,67	~1,37
Pile à membrane échangeuse de protons	Jusqu'à 5,68	Jusqu'à 4,5	(Recyclage de la pile) : 0,0
Pile à combustible à oxyde solide	Jusqu'à 11,13	Jusqu'à 10,24	(Recyclage de l'oxyde de Sodium) : 0,0
- Batteries			
Batterie au plomb	0,108	~0,1	(~600 cycles)
Batterie nickel-fer	0,1278	~0,13	(~2000 cycles si aucun effet mémoire)
Batterie nickel-cadmium	~0,2	~0,2	(~1000 cycles si aucun effet mémoire)
Nickel métal hydride	0,22 - 0,324	0,36	(~800 cycles si aucun effet mémoire)
Super ironbattery	0,33	(1,5 * NiMH) 0,549	(~300 cycles)

Zinc-air	0,4 - 0,72		
Lithium ion	0,54 - 0,72	0,9 - 1,9	(Durée de vie ~4 ans, 300-500 cycles)
Lithium-Ion-Polymer	0,65 - 0,87	(1,2 * Li-Ion) 1,08 - 2,28	(Durée de vie ~4 ans, 300-500 cycles)

ANNEXE 2 : Fabrication de savon blanc à partir de l'huile de Jatropha

Objectif : Adapter le protocole issu de la bibliographie afin d'obtenir du savon blanc à base d'huile de Jatropha.

Cette protocole est une extraite dans le manuel du Jatropha à Madagascar (par Henning et Ramorafeno, 2005) d'après une recherche bibliographique et un peu de connaissance dans une petite savonnerie artisanal (savonnerie artisanal MillaAmbohimandroso, Ambatondrazaka).

Matériel :

- 2 grands bols en fer ;
- 1 seau en plastique ;
- 1 bâton en bois ;
- 1 petit bol en fer.

Produits utilisés :

- 8L d'huile ;
- 4,5 L d'eau ;
- 1 kg de soude caustique.

L'ajustement des quantités des produits est fait par rapport à 8L d'huile.

Déroulement des opérations :

- Mettre le 4,5 L d'eau dans le grand bol en fer.
- Déverser le premier $\frac{1}{2}$ kg de soude petit à petit dans le bol contenant l'eau tout en remuant avec le bâton en bois. Quand tout est dissous, verser le $\frac{1}{2}$ kg restant sans arrêter de remuer.

- Laisser reposer 15minutes le mélange de soude.
- Mesurer et mettre le 8L d'huile dans le deuxième bol.
- Verser petit à petit la solution de soude dans l'huile tout en remuant fortement, le mélange devient jaune et un peu gluant.
- Au bout de 30 minutes de mélange, la solution se trouve au stade de trace. C'est-à-dire si on laisse une goutte de mélange en surface, elle ne s'incorpore pas au mélange et forme un trait sur le dessus. C'est le signe que le savon est formé.
- (Verser le colorant et l'odorant si on veut de savon de couleur avec une odeur citron par exemple)
- Mettre le mélange dans un endroit fermé et laisser reposer pendant 72 h.

Observation :

- Si on met la soude dans l'eau, la solution devient opaque et il se forme une fine couche de mousse au-dessus.
- La solution ne dégage ni odeur ni réaction importante.
- Au bout d'1 h, le savon devient immobile quand on déplace le bol.
- Au bout de 2j et demi, une croûte se forme au-dessus du savon alors qu'en dessous le savon reste gluant. C'est à ce moment-là que nous pouvons faire des boules de savon, ou les mettre dans un moule de forme définie.

Résultat :

A partir du protocole et après le 72 h de séchage, on obtient environ 12 kg de savon blanc. Pour réaliser ce protocole, il faut 3h le savon est de couleur blanc crème, ne dégagent aucun parfum particulier et il présente une bonne solidification comme les savons vendus sur le marché. Quand on mélange un petit morceau dans un seau rempli d'eau et que l'on mélange, une mousse assez compact apparaît rapidement. Au contact de la peau, l'eau savonneuse ne pique pas.



Figure 30: Savon blanc de Jatroph α

IMPETRANTE :
RAKOTORAVO Tahirinirina
Email : nhikita17@gmail.com
Tel : +261 34 79 371 50
Adresse : CU Ankatso I Hangar P 09
Nombre de page: 65, nombre de figure: 31, nombre de tableau: 14



« CONTRIBUTION A LA PRODUCTION D'UNE HUILE VEGETALE DE JATROPHA EN VUE DE SON APPLICATION COMME BIOCARBURANT »

RESUME

Le Jatropha Curcas pousse partout à Madagascar surtout dans la région du Sud. Le rendement d'extraction de l'huile de sa graine peut atteindre jusqu'à 30 à 40%. Le procédé choisi est le pressage mécanique produisant les produits dérivés tels que le savon, l'huile lampante et le biodiesel par une transformation chimique catalysée.

L'huile végétale de Jatropha présente une densité de 0,9125 g/cm³ et une viscosité de 13,3326 cSt à 30°C. Celle du biocarburant a une densité de 0,8767 g/cm³ et une viscosité de 70,8151 cSt à la même température. Tous les deux ont une faible teneur en eau et la température d'inflammabilité est conforme au gazole, carburant fossile.

La mise au point de ce carburant végétal en une substitution des combustibles fossiles dans des moteurs diesel ou des motoculteurs, jusqu'à maintenant, renferme des étapes différentes comme la reformulation chimique du produit ou même la déformation des moteurs.

La transestérification d'huiles végétales de Jatropha est une réaction catalytique homogène. On obtient un mélange d'esters : le biodiesel, à la dernière étape. Cette réaction chimique, en présence de la soude comme catalyseur, permet de produire à partir d'une tonne d'huile végétale et 110kg de méthanol, 970 kg de biodiesel de couleur jaune et 108 kg de glycérine, grenat (environ 10% de la quantité du mélange).

Mots clés : Huile végétale, Biocarburant, Transestérification. Jatropha

ABSTRACT

Jatropha Curcas pushes everywhere in Madagascar especially in the area of the South. The oil extraction's yield of its seed can reach up to 30 to 40%. The selected process is mechanical pressing producing the derived products such as the soap, oil phosphorescing and the biodiesel by a catalyzed chemical conversion.

The vegetable oil of Jatropha has a density of 0,9125 g/cm³ and one viscosity of 13,3326 ST at 30°C. That of biocarburant, which has a density of 0,8767 g/cm³ and one viscosity of 70,8151 ST at the same temperature. Both have a low water content and the flash point is conform to the gas oil, fuel fossil.

The development of this fuel vegetable in a substitution of fossil fuels in diesel engines or cultivators, until now, contains stages different like chemical reformulation from the product or even the deformation of the engines.

The vegetable oil cross esterification of Jatropha is a homogeneous catalytic reaction. A mixture of esters is obtained: the biodiesel, at the last stage. This chemical reaction, in the presence of soda like catalyst, makes it possible to produce starting from a ton of vegetable oil and methanol 110kg, 970 kg of biodiesel of yellow color and 108 kg of glycerin, garnet (approximately 10% of the quantity of the mixture).

Key words: Vegetable oil, Biocarburant, Transesterification, Jatropha.

Encadreur: RAVELONANDRO Pierre Hervé, Professeur Titulaire