



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement  
International Institute for Water and Environmental Engineering

Fondation ZIE

**INVESTIGATIONS DES CARACTERISTIQUES  
COMME CARBURANTS DE MELANGES D'HUILES  
VEGETALES INCORPOREES DANS DU GASOIL**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
MASTER SPECIALISE EN GENIE ELECTRIQUE, ENERGETIQUE ET  
ENERGIES RENOUVELABLES**

---

Présenté et soutenu publiquement le

**Kossi-Mensah Amen AMOUSSOU**

**Travaux dirigés par : Dr Tindo Sébastien DJENONTIN**

Maître Assistant des universités

**Dr Joël BLIN**

Enseignant Chercheur Zie/Cirad

**Promotion [2009/2010]**



---

**REMERCIEMENTS**

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à l'UEMOA, pour m'avoir donné cette opportunité d'approfondir mes connaissances scolaires, opportunité que je ne saurai assez remercier.

Mes sincères remerciements sont adressés aux Docteur Sébastien Tindo DJENONTIN et Docteur Joël BLIN, mes directeurs de mémoire. Leurs directives judicieuses et soutien permanent m'ont permis de mener à bien ce travail dans un environnement de recherche; leurs critiques toujours constructives sur mon rapport m'ont permis également d'améliorer sa lisibilité.

Je ne saurai oublier de remercier le Professeur Yézouma COULIBALY, Chef de l'UTER GEI et l'ensemble du corps enseignant et administratif pour leur aide et leurs conseils précieux. Recevez notre vive reconnaissance pour les efforts que vous avez consentis pour nous donner un enseignement de qualité

Je tiens à exprimer toute ma gratitude en particulier à toute l'équipe du laboratoire de la SONABHY et en particulier M. Alpha Aliou DIALLO pour l'appui technique et les précieux conseils qu'il a bien voulu m'apporter ;

Mes remerciements vont à l'ensemble des membres du laboratoire LBEB pour leur soutien permanent et leurs éclaircissements sur les différents aspects et pour leur collaboration directe dans le suivi et l'analyse.

Je remercie toutes les personnes bienfaitantes qui m'ont exprimé leur élan philanthropique, je ne saurais vous témoigner assez ma générosité et ma reconnaissance surtout camarades qui ont trouvé en moi leur ego et avec qui j'ai partagé des moments inoubliables, ce qui m'a permis de m'épanouir et de me comprendre

Que son excellence Monsieur le Président de jury et Messieurs les membres de jury trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour avoir accepté de juger ce présent travail.

---

**RESUME**

La hausse des prix des carburants fossiles fait tourner les états vers les biocarburants. Les huiles végétales sont utilisées pour se substituer au gasoil. Cette utilisation cause des problèmes de combustion due à leurs caractéristiques physico-chimiques. Pour palier à ces problèmes, plusieurs solutions ont vu le jour à savoir l'utilisation des huiles végétales comme additifs au gasoil. Cette étude consiste à déterminer la limite d'incorporation de l'huile végétale du jatropha curcas au gasoil et d'en proposer des protocoles pour son contrôle.

Les tests effectués dans les deux laboratoires ont permis d'évaluer l'évolution des caractéristiques physico-chimiques en fonction du taux d'incorporation de l'huile végétale dans le gasoil. Les résultats obtenus ont permis de connaître la limite d'incorporation (8%) et les caractéristiques les plus importants dans le choix d'une limitation.

Les tests sur moteur diesel ont permis d'étudier les émissions de gaz et des performances du moteur fonctionnant aux mélanges de 5,75% d'huile végétale. Les résultats obtenus montrent que le mélange se comporte de la même manière que le carburant standard, le gasoil, suivi de l'impact socio-économique et environnementale qu'un tel mélange peut engendrer.

**Mots Clés :**

1-mélange, 2- huiles végétales, 3- Gasoil, 4- Additifs, 5- Caractéristiques physico-chimique

**ABSTRACT**

Rising prices of fossil fuels makes every state to turn into biofuels. Vegetable oils are used to substitute diesel. This use causes combustion problems due to their physico-chemical. To overcome these problems, several solutions have emerged: the use of vegetable oils as additives to diesel. This study is to determine the incorporation limit of *Jatropha curcas* vegetable oil for diesel and to propose protocols for its control.

The tests in two laboratories have been evaluated changes in physical and chemical characteristics depending on the rate of incorporation of vegetable oil in diesel. The results obtained allowed to know the limit on intake (8%) and the most important characteristics in choosing a limitation.

Tests on diesel motor were used to examine gas emissions and engine performance running on mixtures of 5.75% vegetable oil. The results show that the mixture behaves the same way as diesel, followed by the socio-economic and environmental causes such a mixture can.

**Key words:**

1-mixture, 2-vegetables oils, 3-diesel, 4-additives, 5-physic-chemical characteristics

---

**LISTE DES ABREVIATIONS**

**2IE** : Institut International d'Ingénieurs de l'Eau et l'Environnement

**API** : American Petroleum Institute

**ASTM**: American Society for Testing and Material

**BTL** : Biomass To Liquid

**cal/cm** : calorie par centimètre

**CE** : Communauté Européenne

**CO** : monoxyde de carbone

**CO<sub>2</sub>** : dioxyde de carbone

**Cst** : centistokes

**DAGRIS** : Développement des AGRo-Industries du Sud

**DIN**: Deutsches Institut für Normung

**EMC**: Ester Méthylique de Colza

**EMC5**: Ester Méthylique de Colza à 5%

**EMHV** : Esters Méthylques d'Huile Végétale

**EN** : Européan Normalization

**FAGACE**: Fonds Africain de Garantie et de Coopération Economique

**FAO** : Food and Agriculture Organization

**FCFA** : Franc de la Communauté Financière Africaine

**g** : gramme

**g/mol** : gramme par moles

**GEI** : Génie Energétique et Industriel

**GTep** : Giga tonne équivalent pétrole

**GTZ** : Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit

**HAP** : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique

**HVJC** : Huile Végétale de *Jatropha Curcas*

**HVP** : Huile Végétale Pure

**ISO** : International Organization for Standardization

**kg** : kilogramme

**kJ** : kilojoule

**KOH** : hydroxyde de potassium

**kWh** : kilowattheure

**l** : litre

**LBEB** : Laboratoire de Biomasse Energie et Biocarburants

---

**LESEE** : Laboratoire d’Energie Solaire et Efficacité Energétique

**MDP** : Mécanisme de Développement Propre

**mg** : milligramme

**MJ** : mégajoules

**ml** : millilitre

**NO<sub>x</sub>** : oxyde d’azote

**PCI** : Pouvoir Calorifique inférieur

**PIB** : Produit Intérieur Brut

**ppm** : partie pour million

**SO<sub>2</sub>** : dioxyde de soufre

**SONABEL** : Société Nationale d’Electricité du Burkina

**SONABHY**: Société Nationale Burkinabè des Hydrocarbures

**SO<sub>x</sub>** : Oxyde de Soufre

**tCO<sub>2</sub>** : tonne équivalent CO<sub>2</sub>

**Tep** : Tonne équivalent pétrole

**TOR** : Tema Oil Refinery

**UE** : Union Européenne

**UEMOA** : Union Economique et Monétaire Ouest Africain

**UTER** : Unité Thématique d’Enseignement et de Recherche

**SOMMAIRE**

REMERCIEMENTS .....	i
RESUME.....	ii
LISTE DES ABREVIATIONS.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	ix
Introduction générale.....	1
I- Revue bibliographique.....	3
I-1 Généralités sur les biocarburants .....	3
I-1-1 Enjeux énergétiques dans le monde .....	3
I-1-2 Enjeux énergétiques en Afrique : cas du <i>Jatropha curcas</i> .....	5
I-1-3 Perspectives de développement des biocarburants en Afrique .....	6
I-1-4 Différents types de biocarburants.....	7
I-1-4-1 Huiles Végétales Pures .....	7
I-1-4-2 Filière mélanges huile végétale pure / gasoil .....	8
I-1-4-3 Biodiesel .....	9
I-1-4-4 Alcools .....	10
I-1-3-4 Biomass To Liquid (BTL) et dihydrogène.....	11
I-2 Généralités sur les additifs du gasoil .....	11
I-2-1 Les huiles végétales pures (HVP) .....	11
I-2-2 Les esters méthyliques ou éthyliques (Biodiesel) .....	12
I-2-3 Autres additifs du gasoil.....	12
I-2-4 Cadre législatif existant sur les additifs du gasoil .....	12
I-3 Techniques d'analyse et de contrôle de qualité des huiles végétales pures / gasoil comme carburant.....	13
I-3-2 Point éclair.....	14
I-3-3 Indice de cétane.....	15
I-3-4 Acidité.....	15
I-3-5 Teneurs en eau.....	15

I-3-6 Taux de cendres.....	15
I-3-7 Taux de sédiments.....	15
I-3-8 Teneur en phosphore.....	16
I-3-9 Point de trouble.....	16
I-3-10 Point d'écoulement.....	16
I-3-11 Teneur en soufre.....	16
II- Matériels et méthodes.....	17
II-1 Méthodes d'obtention des mélanges huiles végétales jatropha curcas / gasoil.....	17
II-2 Protocoles d'analyse mises en œuvre pour le contrôle de qualité des huiles végétales carburants.....	17
II-2-1 Validation d'une méthode de détermination de la teneur en eau par différence.....	18
II-2-2 Validation d'une méthode de détermination du taux de sédiments.....	18
II-2-3 Détermination de l'acidité.....	18
II-2-4 Détermination du pouvoir calorifique inférieur.....	19
II-2-5 Détermination de la viscosité.....	20
II-2-6 Détermination du point de trouble.....	20
II-2-7 Détermination du point d'écoulement.....	21
II-2-8 Détermination du point éclair.....	21
II-2-9 Détermination de l'indice de cétane.....	21
II-3 Performance et émission de gaz d'un moteur diesel fonctionnant au mélange HVJC/ gasoil....	21
III-Résultats et discussions.....	23
III-1 Résultats.....	23
III-1-1 Fractionnement de la biomasse oléagineuse de Jatropha curcas.....	23
III-1-2 Caractéristiques physicochimiques des huiles végétales brutes de Jatropha curcas comparées au gasoil.....	23
III-1-3 Caractéristiques physicochimiques des mélanges huile de Jatropha curcas avec le gasoil.....	24
III-1-3-1 Evolution des PCI en fonction du taux d'incorporation d'huile de Jatropha curcas dans le gasoil.....	24
III-1-3-2 Evolution de la viscosité en fonction du taux d'incorporation d'huile de Jatropha curcas dans le gasoil.....	24
III-1-3-3 Autres paramètres physicochimiques.....	25



III-1-4 Détermination de la limite d'incorporation au gasoil .....	27
III-1-4-1 Repérage de la zone limite d'incorporation .....	27
III-1-4-2 Evolution de la viscosité en fonction de la température dans la zone d'incorporation .....	27
III-1-4- Essais sur le banc moteur .....	28
III-1-4-1 Emission des gaz d'échappement.....	28
III-1-4-2 Les performances du moteur diesel.....	29
III-2 Discussions .....	30
III-2-1 Fractionnement de la biomasse oléagineuse de <i>Jatropha curcas</i> .....	30
III-2-2 Caractéristiques physicochimiques des huiles végétales brutes de <i>Jatropha curcas</i> comparées au gasoil .....	30
III-2-3 Caractéristiques physicochimiques des mélanges huile de <i>Jatropha curcas</i> avec le gasoil .....	30
III-2-3-1 Evolution des PCI en fonction du taux d'incorporation d'huile de <i>Jatropha curcas</i> dans le gasoil .....	30
III-2-3-2 Evolution de la viscosité en fonction du taux d'incorporation d'huile de <i>Jatropha</i> <i>curcas</i> dans le gasoil.....	30
III-2-3-3 Autres paramètres physicochimiques.....	31
III-2-4 Détermination de la limite d'incorporation au gasoil.....	31
III-2-4-1 Repérage de la zone limite d'incorporation .....	31
III-2-4-2 Evolution de la viscosité en fonction de la température dans la zone d'incorporation .....	31
III-2-4- Essais sur le banc moteur .....	32
III-2-4-1 Emission des gaz d'échappement.....	32
III-2-4-2 Les performances du moteur diesel.....	32
III-3 Evaluation de l'impact socio économique et environnemental des mélanges huiles végétales / Gasoil : cas du 2iE et de la SONABEL.....	32
III-3-1 Cas du 2ie .....	33
III-3-2 Cas de la SONABEL .....	33
IV-Conclusion et perspectives .....	34
IV-1 Conclusion .....	34
IV-2 Perspectives .....	34

---

Références bibliographiques .....	36
Annexes.....	39

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Estimation des réserves prouvées en énergies fossiles.....	4
Tableau 2 : Evolution de la consommation du gasoil du 2ie et de la SONABEL (Ouaga ouest) .....	4
Tableau 3 : Propriétés physico-chimique du mélange huile de <i>Jatropha curcas</i> /gasoil (Forson et <i>al</i> , 2003).....	9
Tableau 4 : Fractionnement de la biomasse oléagineuse de <i>Jatropha curcas</i> .....	23
Tableau 5 : Analyse immédiate des co-produits après extraction de l'huile de la graine de <i>Jatropha curcas</i> .....	23
Tableau 6 : Caractéristiques physiques et chimiques des huiles végétales brutes de <i>Jatropha curcas</i> comparées au gasoil .....	23
Tableau 7 : Evolution de quelques caractéristiques physicochimiques en fonction du taux d'incorporation d'huile végétale pure de <i>Jatropha curcas</i> dans le gasoil.....	26
Tableau 8 : Variation du coût et de la quantité de CO <sub>2</sub> évitée .....	33

**LISTE DES FIGURES**

Figure 1: Réaction de transestérification des huiles végétales (source Schuchard et <i>al</i> , 1997).....	10
Figure 2 : Différents mélanges huiles végétales de <i>Jatropha curcas</i> / gasoil.....	17
Figure 3 : Evolution des PCI en fonction du taux d'incorporation d'huile de <i>Jatropha curcas</i> dans le gasoil .....	24
Figure 4: Evolution de la viscosité en fonction du taux d'incorporation d'huile de <i>Jatropha curcas</i> dans le gasoil .....	25
Figure 5 : Exploration de la limite d'incorporation de l'huile de <i>Jatropha curcas</i> dans le gasoil .....	27
Figure 6 : Evolution de la viscosité en fonction de l'augmentation de la température dans la zone d'incorporation limite de l'huile au gasoil .....	27
Figure 7 : Emissions des gaz d'échappement en fonction de la charge. ....	28
Figure 8 : Performances du moteur en fonction de la charge.....	29

## INTRODUCTION GENERALE

Les pays africains sont les plus vulnérables à la crise actuelle du carburant, car une augmentation aussi minime qu'elle soit du prix des produits pétroliers, a une répercussion néfaste sur l'ensemble des coûts des denrées de première nécessité. En effet, les besoins en pétrole augmenteront dans le moyen terme avec le développement des secteurs de l'électricité et du transport, dans les pays en croissance et en développement. C'est pourquoi, ces pays s'intéressent de plus en plus aux biocarburants de première génération comme une source renouvelable d'énergie, alternative aux carburants fossiles (Majer *et al*, 2009).

Contrairement aux ressources fossiles, les huiles végétales pures ou en mélange avec les carburant fossile (gasoil) offrent des avantages écologiques (Murphy, 1994). De ce point de vue, elles constituent une solution possible aux problèmes de la motorisation agricole dans les pays en voie de développement (Conneman, 1994). De plus le réchauffement de la terre entraînant des inondations, des sécheresses, la recrudescence des tremblements de terre voir des tsunamis (changements climatiques) ont suscité l'intérêt des carburants moins polluants obtenus en limitant l'impact environnemental des carburants par l'utilisation des additifs naturels.

Nos pays tropicaux disposent d'un potentiel en graines oléagineuses comme celles de *Jatropha curcas* et de *Ricinus communis* dont ils peuvent disposer en permanence de milliers d'hectares. De plus, en 2003, les huiles végétales pures (HVP) sont citées parmi les dix (10) biocarburants reconnus par l'Union Européenne (Directive 2003/30/CE) qui autorise 5,75% d'additifs dans les carburants fossiles à partir de 2010 (Stymne et Dyer, 2006). Des raisons écologiques et agro-économiques ont ainsi suscité l'intérêt de l'utilisation des huiles végétales pures (HVP), et comme additifs au gasoil afin de réduire les factures de consommation électrique et pour produire d'énergie à grande échelle avec un faible impact environnemental (Meyer, 2004 ; Marty, 2005 ; Ribeiro *et al*, 2007).

Le présent travail a pour objectifs de déterminer :

- les protocoles nécessaires au contrôle de qualité des mélanges huile/gasoil pour applications carburant.
- la variation des propriétés physico chimiques en fonction du taux d'incorporation d'huiles végétales au gasoil,
- et de proposer une limite d'incorporation d'huiles végétales de *Jatropha curcas* au gasoil.

D'un point de vue méthodologique, nous avons procédé à une revue bibliographique sur les

normes de caractérisation, les spécifications des HVP carburant, les mélanges huile/gasoil et les additifs en général ; une mise au point au laboratoire de protocoles pour contrôler la qualité des mélanges huiles végétales/gasoil carburant (acidité, densité, viscosité, PCI, sédiments, indice de cétane, point éclair et point d'écoulement...), une étude de la variation des propriétés physico-chimiques en fonction du taux d'incorporation des HVP au gasoil. Les résultats sont ensuite comparés aux limites proposées par les tables de spécifications des carburants afin de proposer le taux réel d'incorporation des huiles de *jatropha curcas* au gasoil.

Le présent travail se propose de déterminer le taux d'incorporation des huiles végétales au gasoil sans modification des caractéristiques carburant. Ce mémoire présente une introduction générale, une revue bibliographique ; les matériel et méthodes les résultats et discussion ; enfin la conclusion et les recommandations et perspectives.

## **I-REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

Dans cette partie de faire, nous ferons l'état des lieux sur les défis énergétiques auxquels est confronté le monde contemporain et en particulier l'Afrique ainsi que les solutions mises en œuvre à travers le développement des biocarburants. Cependant, les besoins actuels en carburant ne peuvent encore être totalement compensés par les biocarburants de première génération issus des agro ressources. C'est pourquoi, nous nous intéresserons aux additifs au gasoil dont les huiles végétales pures en priorité. Nous aborderons également les techniques de contrôle et d'analyse des mélanges huiles végétales pures/gasoil.

### **I-1 Généralités sur les biocarburants**

#### **I-1-1 Enjeux énergétiques dans le monde**

Le développement de toute nation se base sur la consommation en énergie. Selon l'agence mondiale de l'énergie, est considéré comme développé, tout pays dont la consommation par habitant est de 6 tep par an. A cette heure seuls les pays de l'Amérique du nord dépassent ce seuil avec une consommation avoisinant 10 tep. La consommation mondiale annuelle des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon), de nos jours, est de 10 Gtep. Cette consommation depuis quelques années cause de graves problèmes environnementaux tels que les effets de serre, la pollution atmosphérique, les pluies acides, la désertification, la déforestation et la dégradation maritime.

Le secteur de l'énergie dans le monde a subi des changements radicaux ces 20 dernières années. L'augmentation de la consommation et les prix sont de plus en plus instables et imprévisibles. Que ce soit en Europe ou en Afrique, la consommation de pétrole a augmenté de 20% depuis 1994. Une étude récente de l'Union Européenne prévoit que le taux de dépendance des pays membres pour les approvisionnements énergétiques pourrait atteindre 70% vers 2030 et 90% en 2050 alors qu'elle ne serait que de 50% en 2010. De l'autre, les prix du pétrole et du gaz ont presque doublé dans l'Union Européenne au cours de ces deux dernières années (Marty et al, 2004-les enjeux énergétiques, Commission européenne, 2006).

L'impact des problèmes énergétiques sur l'économie et l'environnement a des conséquences directes sur la vie et le développement des sociétés. Les énergies fossiles qui pour se former ont mis plus des millions d'années, voient leur volumes se réduire de jours en jours à cause de la consommation qui augmente rapidement illustré par le tableau 1

**Tableau 1: Estimation des réserves prouvées en énergies fossiles**

Type de ressource	Réserves Gtep	consommation 2001 (Gtep)	Réserves exprimées en années de consommation 2001
Charbon (sauf lignite)	500	2,3	222
Pétrole	140	3,5	42
Gaz naturel	140	2,4	58
Total	800	8,2	±100

Source : BP Statistical Review, juin 2002.

Ces estimations font état de l'épuisement des réserves pétrolières dans les cinq ou les dix prochaines décennies (Derksen *et al.* et Murphy, 1994).

Contrairement à cette tendance à la baisse des ressources énergétiques fossiles, la consommation du pétrole n'a cessé de croître et double environ tous les 30 ans.

**Tableau 2 : Evolution de la consommation du gasoil du 2ie et de la SONABEL (Ouaga ouest)**

année	consommation (l)	
	2ie	SONABEL (ouest)
2005	347,13	-
2006	20626,83	-
2007	2088,99	-
2008	2470,05	9538801,16
2009	4135,91	14024654,7

Source : LESEE et SONABEL

Face à cette inquiétude, Alexander Müller, Sous-directeur général de la FAO chargé du Département du développement durable a déclaré : «Le mouvement graduel d'abandon du pétrole a commencé. Au cours des 15 à 20 prochaines années, les biocarburants pourraient fournir au moins 25 % des besoins d'énergie dans le monde » (FAO, 2006).

Toutes ces raisons poussent le monde scientifique à rechercher de nouvelles sources d'énergies renouvelables et moins problématiques du point de vue environnemental (Pramanki, 2003 ; O.M.I.Nwafor *et al* 1996. Altin *et al* 2000).

### **I-1-2 Enjeux énergétiques en Afrique : cas du *Jatropha curcas***

L'avantage de l'exploitation de *Jatropha curcas* est la production locale d'énergie permettant de réduire le coût d'importation des produits pétroliers (Martin, 1984-1986; Culot, 2006). Un expert de la FAO affirme : «*Là où il y a des terres, là où il y a des agriculteurs, là où il y a un intérêt, la bioénergie peut être la meilleure option. Et si on ajoute quelques sérieuses analyses et de bons modèles économiques, cette option est la bonne*» (FAO, 2006). Une filière absorbant une main d'œuvre abondante peut être organisée autour du "système *Jatropha*" et favoriser la mise en place d'une plate forme multifonctionnelle permettant l'éclairage des milieux ruraux.

*Jatropha curcas* a la particularité de pousser sur des sols impropres à l'agriculture et même au désert. C'est pour cette raison qu'on le qualifie de l'or vert du désert (Pellet, 2007). Sa culture ne nécessite pas la destruction des massifs forestiers comme c'est le cas pour d'autres plantes comme le palmier à huile, la canne à sucre dans certains pays industrialisés. Elle est utilisée comme culture intercalaire avec des cultures vivrières (Heller, 1996). A l'inverse, les associations écologiques dénoncent la surexploitation des ressources naturelles à des fins énergétiques. Pour elles, la monoculture à grande échelle pourrait conduire à la perte de la biodiversité et compromettre la sécurité alimentaire. En outre, l'utilisation abusive des engrais chimiques et des pesticides pour des cultures agro énergétiques a une incidence fâcheuse sur l'écosystème à travers la pollution de l'eau et du sol ainsi que les risques d'intoxication de la population.

Dans la sous-région ouest africaine, l'Union Economique et Monétaire Ouest Africaine (UEMOA) a élaboré un Programme Régional Biomasse Energie (PRBE) dont la mise en œuvre vise l'élaboration d'une Politique Energétique Commune (PEC). L'UEMOA et le FAGACE aident les états à élaborer leur politique de promotion et le développement de la filière Biocarburant. L'Union Européenne vient de financer pour le compte de la Fondation 2IE, un projet de valorisation énergétique du *Jatropha curcas* en Afrique de l'Ouest.

Le Sénégal, le Ghana, le Nigéria, le Niger, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire etc. ont déjà élaboré leur stratégie nationale de production des biocarburants. Seul, le Mali a beaucoup plus évolué dans ce domaine. Il produit le biodiesel par l'exploitation de pourghère à travers le "projet *Jatropha*" lancé en 1987 par la GTZ qui a hélas pris fin en 1997. Actuellement, le Mali possède environ plus de 10.000 kilomètres de haies de *Jatropha curcas* avec un taux de croissance de 2000 kilomètres par an, ce qui représente un potentiel de production de 1.700 tonnes d'huile par an (Henning, 2002). Des entreprises étrangères sont impliquées dans le secteur biocarburants dans plusieurs pays. On peut citer:



- Sun Biofuels – Royaume Uni : présent en Tanzanie (18.000 ha), Ethiopie, Mozambique (40.000 ha de jatropha sur des terres agricoles de première qualité –droit d’usage sur 99 ans).
- Viscount Energy – Chine : présent au Nigeria (investissement de 80 millions de \$).
- Bioenergy International – Suisse : présent au Kenya (projet d’une plantation sur 93.000 ha de *Jatropha curcas*)
- 21st Century Energy – Etats-Unis : présent en Côte d’Ivoire (investissement de 130 M de \$).
- AlcoGroup – Belgique : présent en Afrique du Sud, a racheté South Africa NCP Alcohols.
- Aurantia – Espagne : présent en République du Congo (plantations de palmier à huile et implantation de quatre raffineries de biodiesel).
- Dagris – France : présent au Burkina Faso et au Togo pour la production du biodiesel à partir de huile de coton.

D’autres pays comme l’Afrique de Sud, le Benin, le Ghana et le Madagascar ont mis en place des projets de cultures de *Jatropha curcas*.

Le développement des biocarburants en Afrique tourne principalement autour de deux filières : les biocarburants oléagineux (les huiles) et éthylique (alcool). Les huiles ont pris l’avance sur les alcools car depuis longtemps les huiles occupaient une importance place dans le commerce en Afrique. Si l’huile de palme existait depuis plusieurs siècles sur le sol africain, celle de pourghère (*Jatropha curcas*) est en plein essor car la culture de sa plante permet de lutter contre la désertification et n’est pas en concurrence avec l’alimentation.

### **I-1-3 Perspectives de développement des biocarburants en Afrique**

L’actualité récente du domaine est annonciatrice d’un développement généralisé des biocarburants jusqu’ici limitée à certains pays (Brésil, États-Unis, etc.). Ces nouvelles perspectives pourraient néanmoins être limitées à terme, notamment par des contraintes de ressources et de coûts. L’avenir des biocarburants passera sans doute par la mise au point de nouvelles filières basées sur la valorisation de la biomasse dans sa totalité (His, 2005; Culot, 2006).

Les chefs d’états ont depuis le sommet de Rio en 1992, mis en place une politique énergétique et de développement durable (*i.e. besoins qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre à leurs propres*, Rapport de Brundtland, Assemblée Générale des Nations Unis 1987). Cette politique vise un équilibre cohérent et viable à long terme entre les enjeux économiques, sociaux et environnementaux. Il existe deux façons d’aborder ces défis à savoir:

- réduire la demande énergétique en changeant les habitudes de consommation,
- utiliser l'énergie de façon plus "verte", plus diversifiée et plus efficace (les enjeux énergétiques, Commission européenne, 2006).

Le premier défi se heurte aux mentalités individuelles et collectives qui divergent sur la question et des besoins énergétiques nouveaux des pays développés et ceux en voie de développement. Le second, est possible en se tournant vers les carburants verts (les agrocarburants) ou apporter des additifs écologiques au gasoil (les huiles végétales pures).

La politique de production des biocarburants se heurtent à la diversité de nature de ces substances. Il existe en effet, différents types de biocarburant.

#### **I-1-4 Différents types de biocarburants**

Le terme biocarburant ou agro-carburant désigne un carburant liquide obtenu à partir de la transformation des matières végétales. Ils sont issus de la biomasse (agricole ou matériaux organiques non fossiles) d'où leur nom de "*carburant vert*". On distingue principalement deux grandes familles de biocarburants ;

- les biocarburants de premières générations ou seulement une partie de la plante est valorisés : les huiles végétales, les esters d'huiles végétales, l'éthanol et les éthers d'alcool
- les biocarburants de secondes générations ou toute la plante est valorisée : éthanol et les hydrocarbures synthétisés (biomass to liquid, BTL)

Les biocarburants sont considérés comme une source d'énergie renouvelable car leur combustion ne produit que du CO<sub>2</sub> absorbable par les plantes et de la vapeur d'eau et presque pas d'oxydes azotés et soufrés (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>) limitant ainsi les pluies acides.

##### **I-1-4-1 Huiles Végétales Pures**

Les huiles végétales sont utilisées comme biocarburants et dans ce domaine d'application, le rendement par hectare de l'oléagineux reste un facteur important pour sa faisabilité à cause du prix toujours compétitif du carburant Diesel (Ragauskas *et al*, 2006).

On appelle huiles végétales pures (HVP), les huiles obtenues à partir de graines oléagineuses par simple pression à froid, sans solvant, décantée et filtrée, et sans modification chimique. Elle est reconnue parmi les 10 biocarburants reconnus par l'Union Européenne.

L'huile végétale pure peut être directement utilisée comme combustible dans les moteurs adaptés. Des problèmes liés à la présence des imbrûlés surgissent (encrassement, gommage du

piston, obstruction des injecteurs). Les moteurs spéciaux utilisant l'huile végétale pure sont encore trop chers car ne sont pas construits en grande série (Henning, 1996).

L'utilisation des HVP est beaucoup plus écologique que les esters méthyliques ou éthyliques (Culot, 2006). Les huiles végétales ont un point d'inflammation assez élevé (220°C pour l'huile de tournesol) propice à la sécurité du transport et de stockage même en atmosphères confinées comme dans les pays tropicaux (Lambert, 2005).

#### **I-1-4-2 Filière mélanges huile végétale pure / gasoil**

L'intérêt pour l'huile végétale en tant que carburant remonte au siècle dernier et à Rudolf Diesel, qui estimait qu'elle serait, dans le long terme, la source de carburant des moteurs diesel (Jensen, 2002). Il avait fait démarrer le premier moteur diesel à l'huile d'arachide. On pensait qu'on pouvait directement utiliser l'huile végétale dans les moteurs diesel en remplacement du gasoil facilement, mais les contraintes techniques révèlent des limites. En effet, les huiles végétales ont des propriétés physiques et chimiques qui s'éloignent de celles du gasoil. Par exemple, leur viscosité est dix fois supérieure à celle du gasoil, leur pouvoir calorifique est faible et leur acidité élevée (Vaitilingom 2006). Les différentes techniques mises en place pour l'utilisation efficiente des huiles végétales pures comme carburant sont :

- mélange des huiles végétales avec le gasoil à différente teneur,
- préchauffage des huiles végétales encore appelé technique de bicarburant.
- recirculation des gaz d'échappement (EGR) dans le moteur.
- Modification de la chambre de combustion (piston, injecteur...)

Les propriétés physiques des huiles végétales, peuvent être améliorées quand elle est mélangée avec le carburant diesel. La dissolution se fait de sorte qu'il ne peut avoir de séparation de phases. Les propriétés des mélanges sont généralement intermédiaires entre celles du gasoil et des huiles végétales comme le montre le tableau 3

**Tableau 3 : Propriétés physico-chimique du mélange huile de *Jatropha curcas*/gasoil (Forson et al., 2003)**

Propriétés	Unités	Carburant					Limites TOR
		0/100	50/50	80/20	97,4/2,6	100/0	
Densité à 15°C	kg/m <sup>3</sup>	917,7	891,7	876,9	868,9	866,9	870 max
Evaporé à 360°C	vol%	-	-	87	83	87	85 min
Taux de soufre	m%	-	-	-	-	-	1,1 max
Couleur		3,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3 max
Point éclair	°C	99	94	90	88	86	55 min
Viscosité cinématique à 37,8°C	Cst	36,9	14,6	8,2	5,9	5,7	6,5 max
Point d'écoulement	°C	-3	+6	+12	+15	+15	+15 max
Indice d'acide	mg KOH/g	-	-	-	0,4062	0,146	1 max
Cendre	m%	-	-	-	-	-	0,1 max
index diesel	-	-	27	41	50	49	48 min
Densité	-	0,918	0,892	0,877	0,869	0,867	-
gravité API	-	22,7	27,1	29,8	31,4	31,7	-
Point d'aniline	°C	-	38	58,8	71	68,1	-
Pouvoir calorifique	MJ/kg	42,048	43,099	44,15	45,202	45,90	-

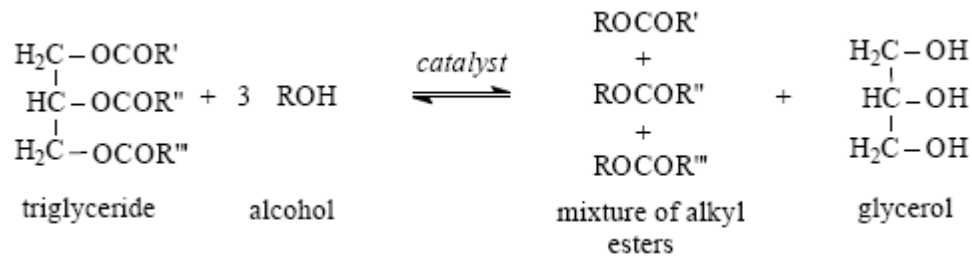
Pour certains moteurs qui n'acceptent pas les huiles végétales brutes, des mélanges riches en gasoil peuvent être utilisés. En Europe, on ajoute jusqu'à 40% d'huile végétale pour des 'vieux' moteurs, sans apporter de modifications. L'adjonction du gasoil permet non seulement la fluidité du carburant mais aussi assure le rinçage régulier du système d'injection (Vaitilingom, 1986, 1992 et 1997 ; Tang *et al.*, 2007). Les huiles comme celles du ricin peuvent en plus de ces fonctions, assurer la lubrification du moteur à cause de leur composition particulière en acides gras hydroxylés (acide ricinoléique).

### I-1-4-3 Biodiesel

On trouve dans la littérature deux définitions différentes pour le terme "biodiesel". D'une part, on sous entend l'Ester Méthylique d'Huiles Végétales (EMHV), d'autre part on parle du diesel

avec adjonction d'huiles végétales.

Un autre moyen de changer les propriétés physiques et chimiques de l'huile de pourghère est de l'estérifier. Cette réaction appelée transestérification. La transestérification est un procédé permettant de modifier les propriétés physiques d'une huile végétale afin de le rapprocher le plus de celui d'un combustible diesel. La réaction consiste à faire réagir l'huile avec un alcool en présence de catalyseur pour former des ester et de la glycérine.



**Figure 1: Réaction de transestérification des huiles végétales (source Schuchard et al, 1997)**

En fonction du type d'alcool utilisé pour cette réaction, on parle de l'éthanolise ou méthanolise basique ou acide (Haïdara, 1996 ; Tang *et al*, 2007). Cette transformation conduit à la diminution du point d'ébullition, du point éclair. La glycérine sera utilisée dans l'industrie chimique, et les sous produits dans l'industrie du savon et des détergents

#### I-1-4-4 Alcools

Le bioéthanol est obtenu par fermentation de sucres par des levures du genre *Saccharomyces*. Il est obtenus à partir d'espèces végétales tels que la canne à sucre, le sorgho sucrier, le roseau, la betterave sucrière tropicale, le maïs, le manioc, etc (Culot, 2006).

Il peut remplacer partiellement ou totalement l'essence. Il est un liquide incolore, limpide, complètement volatil, d'odeur pénétrante, de saveur brûlante, inflammable et brûle avec une flamme bleue. Il distille totalement entre 78°C et 79°C, il devient visqueux à -80°C et se congèle à -130°C. Il est miscible à l'eau en toute proportion avec un dégagement de chaleur sensible et une concentration de volume, il est également miscible avec les alcènes, le chloroforme, le glycérol, l'éther de pétrole et un volume égal d'huile de ricin.

L'alcool doit être conservé dans des récipients inertes, non susceptibles de céder des métaux, ions ou les éléments constitutifs des matières plastiques. Les récipients et les conditions de stockage doivent être conformes aux normes de sécurité (Culot, 2006).

Le bio-butanol ou alcool butylique est obtenu grâce à la bactérie Gram positive anaérobie *Clostridium acetobutylicum* qui possède un équipement enzymatique lui permettant de transformer les sucres en alcool butylique qui présente de nombreux avantages par rapport à l'éthanol.

Le méthanol ou alcool de bois est obtenu à partir du méthane. Il est aussi utilisable, en remplacement partiel de l'essence et comme additif dans le gasoil.

#### **I-1-3-4 Biomass To Liquid (BTL) et dihydrogène**

Le BTL constitue le biocarburant de l'avenir (en attendant le dihydrogène qui est plus avantageux). Il est le fruit de la dernière technologie et offre un rendement meilleur aux biocarburants précédents qui ont un rendement qu'on a certes considérablement amélioré, mais qui reste médiocre.

L'enjeu du BTL est de parvenir à produire plus de 5000 litres de carburant à l'hectare. Pour cela, il n'est plus question d'utiliser une partie de la plante, comme on le fait pour l'huile végétale brute, mais la totalité de l'espèce. Il n'a pas besoin d'une plante particulière, mais la valorisation intégrée de n'importe quelle biomasse (feuilles mortes, copeaux de bois). Pour obtenir le BTL, on comprime la biomasse qui est ensuite chauffée, ce qui a pour effet de la transformer en gaz. Ce dernier est transformé en liquide, et c'est ce liquide le carburant. L'opération se fait donc en deux étapes essentielles : la gazéification de la biomasse (solide) puis la liquéfaction du gaz obtenu. C'est le même processus que l'obtention naturelle du pétrole qui est une biomasse il y a des millions d'années, la nouveauté ici est de parvenir à le faire rapidement. Cette technologie est pour l'heure onéreuse et reste expérimentale.

#### **I-2 Généralités sur les additifs du gasoil**

Les besoins actuels en carburant ne peuvent encore être totalement compensés par les biocarburants de première génération issus des agro ressources. Le gasoil, dérivé du pétrole, pour être utilisé comme carburant et se conformer à des normes doit être couplé à différents types d'additifs, de nature diverses dont les huiles végétales pures en priorité. L'utilisation des huiles végétales pures en mélange avec le gasoil fait l'objet encore d'investigations scientifiques surtout en ce qui concerne les huiles tropicales diverses et complexes comme le *Ricinus communis* (Chakrabarti et al 2008- Naga Prasad et al 2009). Il faut d'autres additifs spécifiques pour favoriser une combustion efficiente dans les moteurs thermiques.

##### **I-2-1 Les huiles végétales pures (HVP)**

Les huiles végétales ne peuvent pas totalement remplacer le gasoil (Venkanna et al, 2009), mais leurs propriétés physiques peuvent être améliorées quand elles sont mélangées avec le gasoil. La dissolution se fait de sorte qu'il ne peut pas avoir de séparation de phases. Les propriétés des mélanges sont généralement intermédiaires entre celles du gazole et des huiles végétales (Haïdara, 1996). Le PCI du mélange décroît au fur et à mesure de l'ajout d'huile végétale dans le mélange

(De Oliveira et al, 2006) alors que la viscosité du mélange augmente par ajout d'huiles végétales (Agarwal et al, 2007 ; Naga Prasad et al 2009). De même le point éclair croît avec l'augmentation du pourcentage d'huiles végétales pures dans le mélange (Forson et al, 2003).

### **I-2-2 Les esters méthyliques ou éthyliques (Biodiesel)**

On trouve par exemple sur le marché allemand le biodiesel EMC5, composé de diesel conventionnel avec 5% d'EMC. Il est le plus souvent utilisé et se trouve déjà dans plusieurs stations service (même prix que le diesel). Il se fera de plus en plus connaître en Europe, afin de remplir les objectifs de la Commission Européenne d'incorporer par pays européen, au minimum 2% de carburant végétal en 2005 et 5,75% en 2010 dans son Directive 2003/30/EC (EC, 2003).

On retrouve aussi pour des flottes plus spécifiques (secteur agricole, véhicules municipaux, autobus, etc.) l'EMC30, l'EMC50, voir l'EMC100, dont les concentrations en ester sont respectivement 30%, 50%, et 100%. Il est tout à fait faisable d'utiliser l'EMC pur (ou presque pur), cela vaut pour les « anciens moteurs diesel » et non pour les moteurs diesel modernes qui ont parfois du mal à fonctionner avec cet ester pur.

### **I-2-3 Autres additifs du gasoil**

Les additifs du gasoil sont plusieurs et d'origine diverse. Les additifs à base de métal tels que le fer, cérium, manganèse... pour réduire les émissions de gaz surtout les hydrocarbures aromatiques polycycliques qui causent des cancers. Il existe aussi des additifs oxygénés comme l'éthanol, le méthanol, les esters, le biodiesel pour agir sur les propriétés physiques du gasoil et faciliter la combustion dans les moteurs. On utilise aussi les dépresseurs et dispersants de cire qui sont des distillats de pétrole (polyacrylates, polyméthacrylates...) pour réduire la sédimentation, les dépôts de cires et empêcher l'obstruction des filtres. Les nitrates d'amyloxyde, d'hexyle et d'octyle sont utilisés comme des promoteurs d'allumages (Ribeiro et al, 2007). Le mélange gasoil-biodiesel donne une combustion qui produit moins de CO et de HAP que le gasoil (Chaves et al, 2008).

### **I-2-4 Cadre législatif existant sur les additifs du gasoil**

Les textes en vigueur relatifs aux additifs du gasoil sont de natures diverses. Les lois pétrolières, les codes de douanes, les directives de différents pays ...etc. En ce qui concerne les lois pétrolières, plusieurs normes ont vu le jour. La norme américaine ASTM D 975 fixant les caractéristiques du gasoil comme carburant, ASTM D6751-09 donnant des caractéristiques du biodiesel pour ajout au gasoil ; ces normes sont également utilisées au Canada.

Pour les directives, nous pouvons citer entre autre la directive européenne (2003/30/CE) du 8 mai 2003, révisée le 23 avril 2009, visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports. Elle impose des objectifs indicatifs aux Etats membres de l'UE pour la substitution des carburants fossiles par les biocarburants qui devraient prendre une part de marché de 5,75% en 2010 et 10% en 2020 (Directive 2009/28/CE, CE 2009). Par exemple, les brésiliens ont fixé ce taux à 5% et le gouvernement français s'est fixé comme objectif de développer les biocarburants pour un taux d'incorporation de 7% en 2010 et 10% en 2015.

Tout carburant selon son origine doit avoir une certaine qualité avant son utilisation dans une zone géographique donnée, donc nécessitant des contrôles douaniers et des spécifications très rigoureuses (Annexe 1)

### **I-3 Techniques d'analyse et de contrôle de qualité des huiles végétales pures / gasoil comme carburant**

Le gasoil est l'un des produits issus de la distillation du pétrole brut. Il est un mélange complexe de plusieurs hydrocarbures. Il est constitué généralement de plusieurs molécules à structure linéaire composée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène (Masse, 2006). En fonction des caractéristiques physico-chimiques, on distingue deux types de gasoil : le gasoil classique et le gasoil extra. Le gasoil extra diffère du classique par son raffinage poussé qui réduit en grande proportion la teneur en soufre. Le gasoil extra a une teneur maximale en soufre qui est de 50 ppm contre 2000 ppm pour le classique. Ce qui réduit l'émission de SO<sub>2</sub> contribuant aux pluies acides. Les caractéristiques générales suivantes peuvent aider à l'identification d'un bon carburant diesel (Haïdara, 1996).

- Caractéristiques au cognement : la mesure actuelle est l'indice de cétane ; un bon carburant doit en général avoir un indice de cétane suffisamment élevé, pour éviter un cognement désagréable. Le gasoil a un indice de cétane égal à 40.
- Caractéristiques de démarrage : le carburant doit permettre le démarrage du moteur facilement, ce qui demande une haute volatilité du carburant pour former un mélange facilement combustible et un haut indice de cétane pour que la température d'auto-inflammation soit basse.
- Fumée et odeur : le carburant ne doit dégager ni odeur, ni fumée par le tuyau d'échappement. En général, une bonne volatilité est demandée pour assurer un bon mélange et donc une combustion complète.
- Corrosion et usure : le carburant ne doit pas causer de corrosion avant la combustion, ni de corrosion et usure après la combustion. Ces exigences apparaissent être directement liées à la quantité de soufre contenue dans un carburant.



- Manutention facile : le carburant doit être un liquide qui s'écoule facilement sous les conditions rencontrées. Cette caractéristique est mesurée par le point de pulvérisation et la viscosité du carburant qui doit avoir en plus, un haut point éclair, d'où l'avantage de l'utilisation des moteurs diesels, utilisant un carburant à basse inflammabilité.

Les différents paramètres de contrôle qualité des huiles végétales pures ou leurs mélanges avec le gasoil sont les suivants : la viscosité, le point éclair, l'indice de cétane, l'indice d'iode, l'indice d'acide, le PCI, le taux de sédiments, la teneur en eau, le taux de cendres, teneur en phosphore. Les propriétés physicochimiques doivent être semblables à celles de l'huile de colza qui est une pré-norme DIN 51605 du juin 2005 (Annexe 2).

### I-3-1 Viscosité

L'un des obstacles pour l'utilisation des huiles végétales comme carburant est leur viscosité trop élevée. Elles sont dix fois plus visqueuses que le gasoil à 40 °C et trente fois plus visqueuses à 0°C. Par exemple, l'huile de *Jatropha curcas* a une viscosité à 20°C de 77,1 cSt contre environ 2,5 – 4,5 cSt pour le gasoil, ce qui ne favorise pas la combustion au niveau des moteurs (Vaitilingom, 2006 ; Agarwal et al, 2007).

La viscosité d'un liquide est sa caractéristique d'être plus ou moins fluide ou, en d'autres termes, d'opposer plus ou moins de résistance au pompage ou au passage à travers un orifice ou d'un tuyau (Pan, 2004). La viscosité est dépendante de la température. Elle diminue lorsque la température augmente. Il est donc indispensable de préchauffer l'huile pour obtenir une viscosité adéquate à une température de 80-90°C (environ 8 cSt) mais il ne faut maintenir l'huile à de haute température, pour éviter l'oxydation (Haidara, 1996; Vaitilingom, 1992 et 1997).

Les mélanges avec gasoil permettent de réduire la viscosité dans les limites que ce travail se propose de déterminer pour l'huile végétale pure de *jatropha curcas*.

### I-3-2 Point éclair

Le point éclair ou flash point est la température à laquelle un fluide émet suffisamment de vapeurs pour qu'elles puissent s'enflammer au contact d'une flamme ou d'une étincelle. Ce point se trouve entre 81 - 84°C pour le gasoil contre 295 - 320°C pour l'huile de pourghère (De Theux, 2004). Il est déterminé à l'aide de l'appareil de Pensky Martens. La formule suivante (Equation 1) est utilisée pour sa détermination :

$$T_c = T_e - \frac{760 - P}{30} \quad (\text{Equation 1})$$

où  $T_c$  [°C] est la valeur corrigée de la température d'inflammation,

$T_e$  [°C] est la valeur prise comme étant la température d'inflammation,

P [mm de Hg] = pression atmosphérique à laquelle s'effectuent les essais,

### **I-3-3 Indice de cétane**

L'indice de cétane exprime globalement l'aptitude d'un combustible diesel à l'auto-inflammation et à la combustion dans un moteur diesel. Il a des incidences directes sur la faculté de démarrage à froid, le calage du cycle de combustion, le gradient de pression, la pression maximale, le bruit. L'indice de cétane des huiles végétales est généralement plus bas que celui d'un gasoil normal. La différence entre les indices de cétane d'un carburant diesel et d'une huile végétale pourrait être due à leur composition chimique ainsi qu'à leur degré de saturation et de raffinage. Les indices de cétane des huiles végétales sont compris entre 28,3 et 41,5, alors que l'indice de cétane minimal pour le gasoil est de 40 (Haidara, 1996; Vaitilingom, 1992 et 1997).

### **I-3-4 Acidité**

L'acidité ou degré d'acidité, est une expression conventionnelle du contenu en pourcentage d'acides gras libres dans les carburants, huiles et graisses. C'est la quantité de potasse nécessaire pour neutraliser l'acidité i.e. le nombre de milligramme d'agent de neutralisation par gramme. L'indice d'acidité des huiles végétales est plus élevé que celui du gasoil à cause de la forte présence d'acides gras insaturés dans les HVP. Elle est comprise entre 2 et 3mg pour les huiles végétales et maximum 1mg pour le gasoil (Forson et *al*, 2003)

### **I-3-5 Teneurs en eau**

L'eau se trouve dans les carburants en partie dissoute et en partie sous forme d'émulsion plus ou moins stable. Cette stabilité est due à la présence d'asphaltènes ou de certains agents tensio-actifs comme les acides naphthéniques. Si le gasoil a une teneur en eau presque négligeable, les huiles végétales ont une teneur avoisinant 0,1%

### **I-3-6 Taux de cendres**

Les cendres ont un pouvoir abrasif qui doit être limité pour éviter des problèmes au niveau de la pompe d'injection, des injecteurs et des cylindres

### **I-3-7 Taux de sédiments**

Les sédiments sont des produits solides non solubles, de fines particules de sables de boues de forages, de débris de roches (feldspath, gypse...), des matériaux sous formes de minéraux ou à l'état libre comme le fer, le cuivre, le nickel, le plomb... provenant des pipelines, des bacs de

stockages, des tuyauteries ou des vannes. Leur présence élevée dans les carburants peut boucher les pompes d'alimentation et caller le moteur. Le taux de sédiments est très faible pour le gasoil alors que pour les huiles végétales, il est un peu élevé à cause de l'effet de presse sur les graines pour l'extraction.

### **I-3-8 Teneur en phosphore**

La teneur en phosphore indique la présence de phospholipides. Ce paramètre est très important pour les carburants. En effet, ces phospholipides sont responsables d'encrassement des soupapes et de la chambre de combustion des cylindres lors de l'utilisation d'huile végétale carburant (phénomène de gommage). La graine de colza contient des teneurs importantes de phosphore. Cet élément peut se retrouver en plus ou moins grande quantité dans l'huile selon les conditions de trituration. Ainsi, une trituration à froid, autour de 50°C, offre l'avantage de produire une huile dont la teneur en phosphore est fortement réduite.

### **I-3-9 Point de trouble**

Le point de trouble correspond à la température à laquelle des cristaux de paraffine précipitent en quantité suffisante pour colmater les filtres. Le carburant diesel est préparé de manière à présenter un point de trouble inférieur aux basses températures ambiantes prévues dans les régions où le carburant sera utilisé. La distribution de carburant d'hiver à point de trouble bas permettant aux véhicules de circuler à basse température surtout durant les hivers rudes.

### **I-3-10 Point d'écoulement**

Le point d'écoulement correspond à la température à laquelle le carburant diesel se fige par suite de la précipitation des cristaux de paraffine. Le phénomène se produit généralement à des températures situées de 4 °C à 8 °C au dessous du point de trouble. Entre le point de trouble et le point d'écoulement, le carburant circule mais ne parvient pas à traverser le filtre à carburant, qui peut alors se colmater. S'ensuit une piètre performance du moteur à basse température et une perte de puissance.

### **I-3-11 Teneur en soufre**

La teneur en soufre du carburant diesel dépend du type de pétrole brut utilisé et du procédé pour le raffiner. Le soufre présent dans le carburant contribue à l'émission de particules par l'échappement ainsi qu'à la formation de dépôts acides dans l'huile lubrifiante. La teneur maximale en soufre pour le gasoil autorisée par l'Office des normes générales du Canada est de 0,05 % massique pour l'usage routier.

## II- MATERIELS ET METHODES

Cette partie montre comment nous avons obtenu nos mélanges et quels sont les différents tests que nous avons effectués. Dans un premier temps, une ouverture sera faite sur le pourquoi des mélanges huiles végétales pures suivi des protocoles d'analyse mis en œuvre pour la validation de ces tests.

### II-1 Méthodes d'obtention des mélanges huiles végétales *jatropha curcas* / gasoil

Les mélanges d'huiles végétales /gasoil ont été fait dans les proportions massiques (masse pour masse) l'huile végétale de *jatropha curcas* (huile belwet) utilisée provient du Burkina Faso. Le gasoil utilisé est en provenance de la SONABHY.

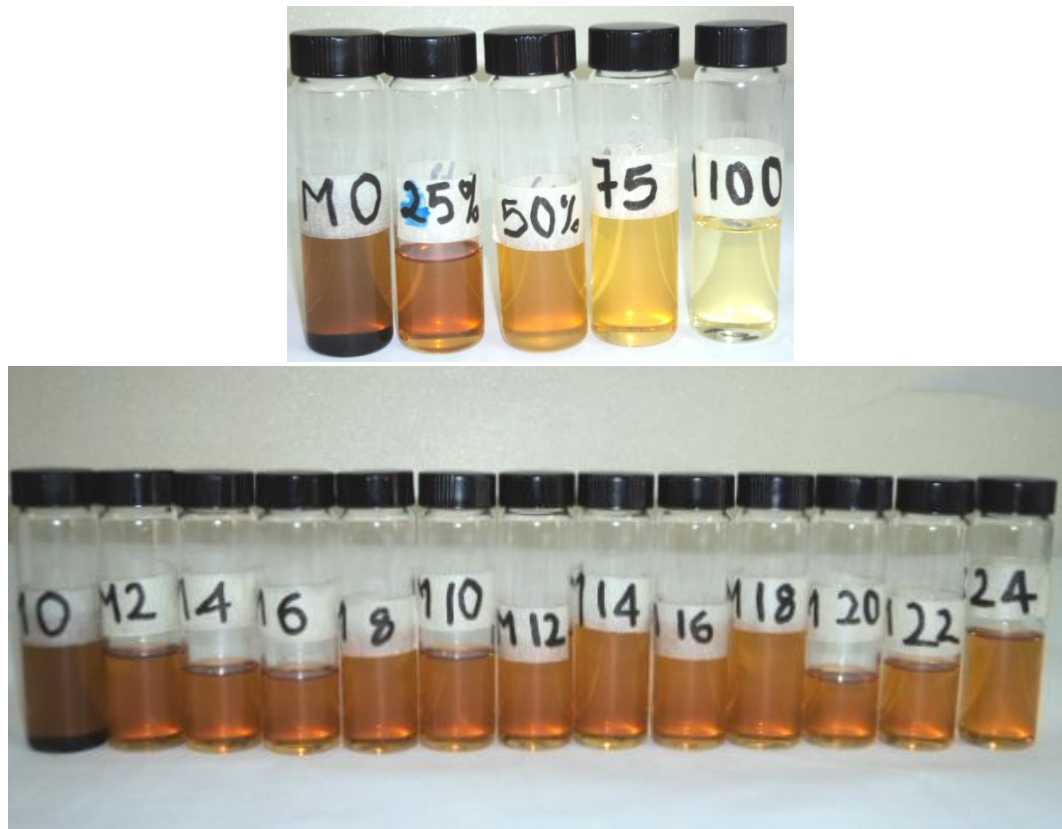


Figure 2 : Différents mélanges huiles végétales de *jatropha curcas* / gasoil

### II-2 Protocoles d'analyse mises en œuvre pour le contrôle de qualité des huiles végétales carburants

Plusieurs tests ont été effectués afin de caractériser les différents mélanges huiles végétales / gasoil.

### II-2-1 Validation d'une méthode de détermination de la teneur en eau par différence

La détermination de la teneur en eau s'est fait à l'étuve. Une prise d'essai de 5g avec une précision de 0,1mg d'huile est mise à l'étuve à une température de  $105\pm 2^\circ\text{C}$  pour une durée de 24h. Après ce temps, la prise d'essai est sortie et pesée à chaud. L'opération de chauffage et de pesée est répétée jusqu'à ce que la perte de masse entre deux pesées successives soit identique ou avec un écart de 0,1mg. La teneur est calculée par la formule :

$$\%H = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \quad (\text{Equation 2})$$

$m_0$  est la masse, en grammes, de la prise d'essai;

$m_1$  est la masse, en grammes, du vase et de la prise d'essai, avant chauffage;

$m_2$  est la masse, en grammes, du vase et du résidu.

### II-2-2 Validation d'une méthode de détermination du taux de sédiments

Selon la norme internationale NF EN ISO 3735, le taux de sédiments est fait à partir d'une cartouche d'extraction. Une masse de mélange de 10 g avec une précision de 0,1mg est pesée dans la cartouche, qui est préalablement pesée elle aussi. La cartouche avec le mélange est mise dans un elernmeyer où un volume de 150 à 200ml de toluène est versé. L'ensemble est placé sur une plaque chauffante réglée à  $270^\circ\text{C}$  pour porter le toluène à  $110^\circ\text{C}$ , sa température d'évaporation. 30 minutes après que le solvant tombant de la cartouche est incolore, cette dernière est retirée de l'elernmeyer et mise à l'étuve portée à une température variant entre  $115$  et  $120^\circ\text{C}$  pour faire vaporiser le toluène. Une heure après le séjour à l'étuve, la cartouche est mise dans un dessiccateur pour être séchée et refroidie durant une heure également et pesé ensuite. Cette extraction est répétée par périodes successives d'une heure mais pas plus d'une heure quinze minutes, s'il y a lieu, jusqu'à ce que la masse de la cartouche séchée augmentée de celle des sédiments ne diffère pas de plus de 0,2 mg entre deux extractions successives.

La teneur en sédiments,  $S$ , est calculée en pourcentage en masse, à l'aide de l'équation 3

$$S = \frac{m_3 - m_1}{m_2} \times 100 \quad (\text{Equation 3})$$

$m_1$  est la masse, en grammes, de la cartouche;

$m_2$  est la masse, en grammes, de la prise d'essai;

$m_3$  est la masse, en grammes, de la cartouche et des sédiments.

### II-2-3 Détermination de l'acidité

La méthode adaptée est la norme française NF T60-204. Une prise d'essai (PE) de masse exactement environ deux(2) grammes du mélange dont nous voulons déterminer l'acidité est mise dans un elernmeyer et sur lequel on verse 40ml du mélange oxyde diéthylique/ éthanol avec trois

(3) gouttes de la solution phénolphtaléique. Le tout est agité et titré avec une solution d'hydroxyde de potassium jusqu' à au virage de l'indicateur (coloration rose). L'acidité exprimée en pourcentage en masse est égale à:

$$\%A = (V - V_0) \times N \times M \frac{1}{10PE} \quad (\text{Equation 4})$$

V= volume en ml de la solution titrée d'hydroxyde de potassium utilisée lors du titrage du corps gras.

V<sub>0</sub>= volume en ml de la solution titrée d'hydroxyde de potassium utilisée lors du dosage à blanc

N= normalité exacte en mol/L de la solution d'hydroxyde de potassium

M= masse molaire en g/mol de l'acide gras adopté pour l'expression des résultats (M= 282 g/mol pour l'acide oléique)

PE= prise d'essai en gramme.

#### II-2-4 Détermination du pouvoir calorifique inférieur

Une prise d'essai de 0,6 g avec une précision de 0,1mg est versée dans une capsule gélatine. La capsule à son tour est mise dans une bombe calorifique avec un fil de platine de 11 centimètres et complété avec de l'oxygène dont la pression varie entre 20 et 25 bars. Cette dernière est mise dans la vase avec de l'eau distillée dont la température varie entre 19 et 21°C. L'ensemble est placé dans le calorimètre. Après la stabilisation de la température du bain du calorimètre, la combustion est lancée. La température de la vase est lue dans un premier temps trois minutes après le lancé puis chaque minute jusqu'à ce qu'on ne lise une même température trois fois de suite. La température est prise et la longueur du fil restant. Connaissant le pourcentage d'hydrogène et la teneur en eau du combustible liquide en question, le PCI de ce dernier est déterminé par la formule.

$$PCS_{\text{huile}}(\text{J/g}) = \frac{4.1855*(E*\Delta T - 2.3*(Li-Lf) - m_{\text{cap}}*PCScap)}{m_{\text{huile}}} \quad (\text{Equation 5})$$

(cal/°C) : Étalonnage pour pouvoirs calorifiques, et sa valeur est de 2460 cal/°C

$\Delta T (=T_f - T_i)$  : différence entre la température initiale et la température maximale en °C.

$2.3*(Li-Lf)$  (cal) : correction due à la chaleur de combustion du fil d'allumage :  $2.3 \text{ cal/cm} \times \text{cm fil brûlés}$

$m_{\text{cap}}$  (g) : masse de la capsule de gélatine vide.

$PCScap$  (cal/g) : pouvoir calorifique de la capsule vide. C'est la moyenne de trois mesures faites avec le calorimètre.  $PCScap = 5059 \text{ cal/g}$

Le pouvoir calorifique supérieur à volume constant sur un échantillon anhydre est égal à :

$$PCI_{\text{anhyd}} = \frac{PCS \times 100}{100 - h_i} \quad (\text{Equation 6})$$

$h_i$  : humidité de l'échantillon sec à l'air en pourcentage sur masse humide.

Le PCI se déduit, par le calcul, du PCS en connaissant le nombre de molécules d'eau formées et la chaleur dégagée par le passage de l'état de vapeur d'eau à l'état liquide à la température initiale.

On admet généralement pour un produit anhydre la formule moyenne approchée suivante :

$$\text{PCI anhyd} = \text{PCS anhydre} - (2508 \cdot 9H/100) \quad (\text{Equation 7})$$

**H** étant le % massique anhydre d'hydrogène dans le combustible. 2508 kJ/kg est la valeur de la chaleur latente de condensation de l'eau à 0°C

### II-2-5 Détermination de la viscosité

La norme utilisée est ISO 3104 :1994 (F). La détermination de la viscosité se base sur la densité du liquide dont on veut connaître la valeur. En fonction de cette densité, le viscosimètre est choisi pour que le temps d'écoulement du liquide soit au minimum 300 secondes. Pour se faire, le liquide est introduit dans le viscosimètre choisi (annexe 6) et le tout est mis dans le bain contenant un mélange de glycol et de l'eau distillée. Un thermomètre est introduit comme témoin de température. On règle le bain à la température où on veut déterminer la viscosité. La température atteinte, on laisse le viscosimètre quinze minutes dans le bain pour uniformisation. Ce temps écoulé, le liquide est pompé dans la cavité supérieure du viscosimètre et on relâche en démarrant le chronomètre pour connaître le temps d'écoulement du liquide entre deux limites marquées. Connaissant la constante de temps du viscosimètre choisi, la viscosité du liquide est déterminée par la formule

$$V = C \times t \quad (\text{Equation 8})$$

V : viscosité à la température voulue

C : la constante de viscosité à la température d'essai

t : le temps d'écoulement du liquide

### II-2-6 Détermination du point de trouble

La norme utilisée est EN 23015. Un volume du liquide dont on veut connaître le point de trouble est versé dans une éprouvette ayant 30mm de diamètre, 115mm de longueur mais le liquide doit occuper un niveau donné délimité par une ligne de jauge située à 54 mm fermée par un morceau de liège dans lequel est mis un thermomètre. L'échantillon est refroidi à une vitesse déterminée et est examiné périodiquement. Le milieu est observé à chaque degré (1°C) pour savoir la température à laquelle les premières apparitions des cristaux de glace (trouble) au fond de l'éprouvette, le début de la congélation. Cette température correspond au point de trouble. (annexe 6)

### **II-2-7 Détermination du point d'écoulement**

La norme utilisée est ISO 3016 :1994 (E). un certain volume est introduit dans une éprouvette ayant comme dimension 30mm de diamètre et 115 mm de longueur. L'éprouvette est remplie jusqu'au trait de jauge situé à 54 mm du bas et dans la quelle un thermomètre est plongé par l'intermédiaire un bouchon en liège. L'éprouvette est mise dans l'appareil " cloud and pour test cabinet" (annexe 6) après le chauffage préliminaire, l'échantillon est refroidi à une vitesse donnée et sorti à des intervalles de 3 ° C pour vérifier les caractéristiques de l'écoulement. La température au quelle le liquide ne coule est notée. Le point d'écoulement est déterminé par la formule

$$\text{point d'écoulement} = T + 3 \text{ (Equation 9)}$$

T= température lue sur le thermomètre

### **II-2-8 Détermination du point éclair**

La norme utilisée est **ISO 2719:2002**. La prise d'essai est placée dans le vase d'un appareil Pensky-Martens FP 93 5G2 USL (annexe 6) puis chauffée de manière à produire un accroissement constant de sa température, ceci sous agitation continue. Une source d'inflammation est dirigée à travers une ouverture du couvercle du vase d'essai à des intervalles de température réguliers avec interruption simultanée de l'agitation. La température la plus basse à laquelle l'application de la source de chaleur provoque l'inflammation des vapeurs émises par la prise d'essai avec propagation de la flamme sur toute l'étendue de la surface du liquide est notée comme étant le point d'éclair à la pression barométrique ambiante. Cette température est corrigée à la pression atmosphérique normale au moyen d'une équation (équation1).

### **II-2-9 Détermination de l'indice de cétane**

La norme utilisée est ASTM D97-05. Un volume de 100ml est pris et versé dans le ballon de l'appareil. On démarre l'appareil et la distillation du produit commence. Après distillation, le reste est récupéré et mesuré ; connaissant le volume restant et la masse volumique de l'échantillon, il fait les introduire dans la mémoire de l'appareil et qui donne après calculs la valeur de l'indice de cétane.

## **II-3 Performance et émission de gaz d'un moteur diesel fonctionnant au mélange HVJC/ gasoil**

Le moteur diésel utilisé a des caractéristiques spécifiques présentées en annexe 3. Deux charges résistives dont la puissance totale est de 6kW sont branchées aux bornes de l'alternateur couplé au moteur diesel. La puissance totale des deux charges résistives est varié avec un pourcentage allant de 0 à 100% (0, 30, 50, 70, 100) pour connaitre la nature des gaz d'échappement,



---

leurs caractéristiques ainsi les performances du moteur à savoir la consommation spécifique, les températures d'échappement et de fumée et le rendement global. Le carburant utilisé est un mélange de 5,75% de HVJC dans le gasoil, le gasoil et le HVJC en vue d'une comparaison des différents paramètres.

### III-RESULTATS ET DISCUSSIONS

Notre étude s'est portée sur la filière *Jatropha curcas* dans toute son intégrité depuis la graine jusqu'à son utilisation comme carburant dans le moteur diesel car, à cause de sa culture et de son régime nutritive, est plus avantageuse pour le paysan africain.

#### III-1 Résultats

##### III-1-1 Fractionnement de la biomasse oléagineuse de *Jatropha curcas*

Une certaine quantité de graine de *Jatropha curcas* a été décortiquée pour la détermination du pourcentage des différentes

**Tableau 4 : Fractionnement de la biomasse oléagineuse de *Jatropha curcas***

	pourcentage
coque	37,62 ± 3,11
impureté	2,09 ± 1,71
amande	60,29 ± 2,08
Humidité amande(%)	3,94 ± 0,11

L'analyse immédiate de ces deux parties après extraction de l'huile des amandes, donne le tableau ci-dessous

**Tableau 5 : Analyse immédiate des co-produits après extraction de l'huile de la graine de *Jatropha curcas***

	tourteaux	coques
Humidité(%)	11,54±0,22	12,76±0,05
taux de matière volatile(%)	79,25±0,18	67,20±0,04
taux de cendres(%)	8,92±0,15	7,97±0,12
taux de carbone fixe(%)	11,83	24,84
PCI (kJ/kg)	19316,98±106	17276,65±106

##### III-1-2 Caractéristiques physicochimiques des huiles végétales brutes de *Jatropha curcas* comparées au gasoil

Ces caractéristiques de HVJC varient considérablement celles du gasoil.

**Tableau 6 : Caractéristiques physiques et chimiques des huiles végétales brutes de *Jatropha curcas* comparées au gasoil**

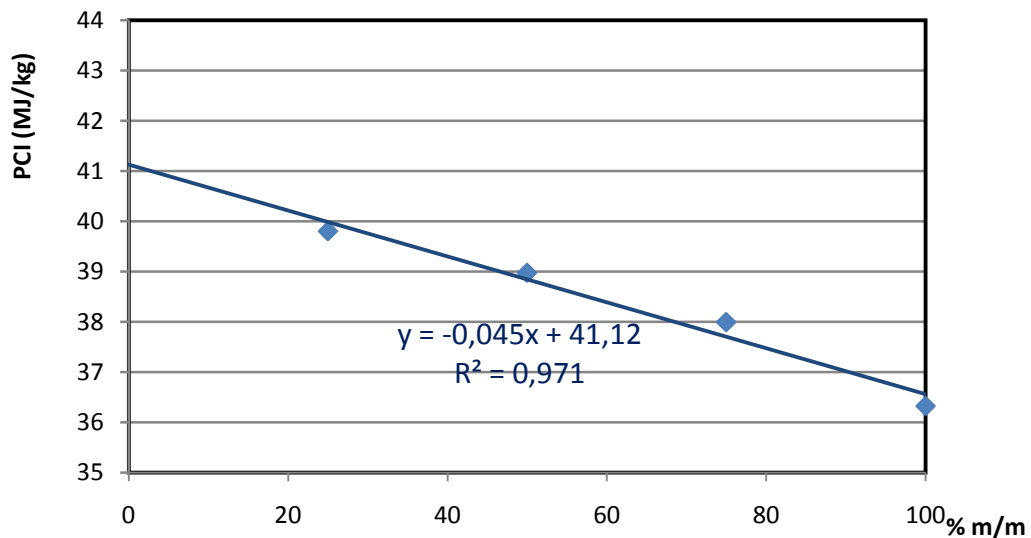
	Teneur en huile / graine	Acidité (mgKOH/g)	Indice d'iode	Indice de saponification	Viscosité (40°C en Cst)	PCI (kJ/kg)
<i>Jatropha curcas</i>	33,8 ± 1,5	2,60±0,033	100±0,7	190±1,7	39,13±0,159	36329 ± 823
Gasoil	-	1,41 ± 0,001	-	-	3,37±0,042	44868 ± 2480

Les caractéristiques du gasoil sont nettement supérieures à ceux de HVJC hormis l'indice d'iode et de saponification non déterminées pour le gasoil.

### III-1-3 Caractéristiques physicochimiques des mélanges huile de *Jatropha curcas* avec le gasoil

#### III-1-3-1 Evolution des PCI en fonction du taux d'incorporation d'huile de *Jatropha curcas* dans le gasoil

Le PCI permet de connaître la consommation spécifique du moteur. Cette évolution est montrée par la courbe suivante ;

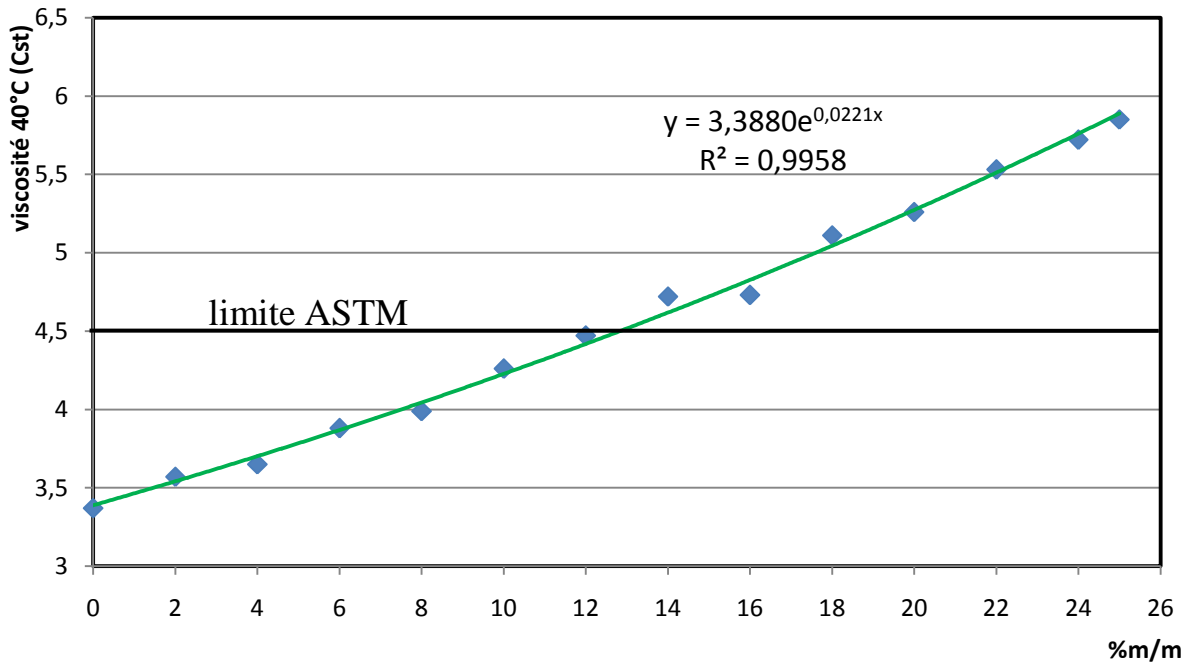


**Figure 3 : Evolution des PCI en fonction du taux d'incorporation d'huile de *Jatropha curcas* dans le gasoil**

Le PCI diminue au fur et à mesure qu'on ajoute de HVJC est suivant l'allure d'une droite linéaire.

#### III-1-3-2 Evolution de la viscosité en fonction du taux d'incorporation d'huile de *Jatropha curcas* dans le gasoil

La viscosité est un paramètre très important dans l'utilisation des produits pétroliers et dérivés comme carburant. Le test de la viscosité pour les différents mélanges a été fait à 40°C, telle que nous le montre la figure ci-dessous.



**Figure 4: Evolution de la viscosité en fonction du taux d'incorporation d'huile de *Jatropha curcas* dans le gasoil**

La résolution de l'équation de la viscosité :

$$3,388e^{0,0221X} = 4,5 \quad (\text{Equation 10})$$

$$X = 12,84$$

### III-1-3-3 Autres paramètres physicochimiques

A part le PCI et la viscosité, d'autres paramètres sont déterminants dans les caractéristiques d'un combustible comme carburant. Ces paramètres à savoir l'acidité, la densité le taux de sédiments, le point d'écoulement, le point de trouble, le point éclair et l'indice de cétane sont consignés dans le tableau ci contre et en Annexe 5.

**Tableau 7 : Evolution de quelques caractéristiques physicochimiques en fonction du taux d'incorporation d'huile végétale pure de *Jatropha curcas* dans le gasoil**

Mélange (% , m/:m)	0	2	4	6	8	10	12
Acidité (mg KOH/g)	0,141 ± 0,0001	0,211 ± 0,0001	0,211± 0,0001	0,211± 0,0001	0,282 ± 0,0001	0,422 ± 0,0001	0,423 ± 0,000
Densité à 25°C	0,856	0,857	0,858	0,859	0,860	0,861	0,862
Taux de sédiments (mg/g)	0,009	-	0,031	-	0,131	-	0,184
Point d'écoulement (°C)	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18
Point de trouble (°C)	0	0	0	0	0	0	0
Point éclair (°C)	64,2	71,2	73,2	73,2	73,2	73,2	73,2
Indice de cétane	49,1	48,8	48,8	48,6	48,1	47,9	47,2

Mélange en %	14	16	18	20	22	24	25
Acidité (mg KOH/g)	0,423±0,0002	0,493 ± 0,0002	0,493 ± 0,000	0,493 ± 0,0002	0,493 ± 0,0002	0,564 ± 0,000	0,564 ± 0,0001
Densité à 25°C	0,863	0,864	0,866	0,867	0,868	0,869	0,8695
Taux de sédiments (mg/g)	-	0,244	-	-	-	-	-
Point d'écoulement (°C)	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18
Point de trouble (°C)	0	0	0	0	0	0	0
Point éclair (°C)	73,2	73,2	73,2	73,2	76,2	76,2	76,3
Indice de cétane	46,6	45,7	-	-	-	-	-

### III-1-4 Détermination de la limite d'incorporation au gasoil

#### III-1-4-1 Repérage de la zone limite d'incorporation

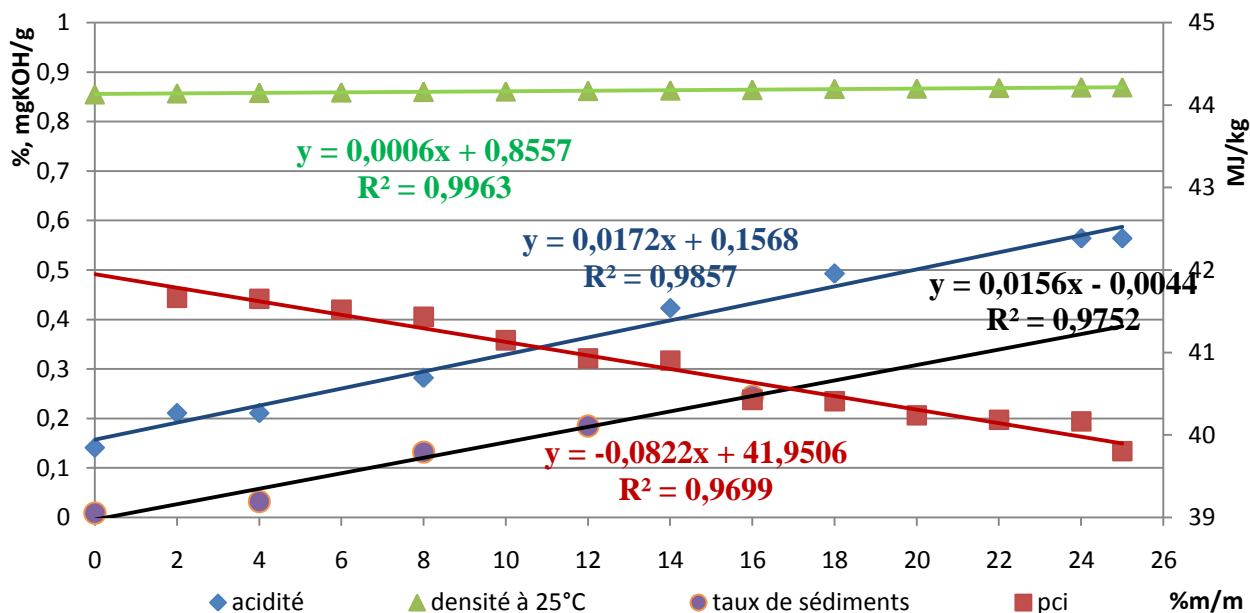


Figure 5 : Exploration de la limite d'incorporation de l'huile de *jatropha curcas* dans le gasoil

La résoudre du système d'équation du taux de sédiments et de l'acidité donne :

$$\begin{cases} 0,0156X - 0,0044 = 0,01 & \text{(Equation 11)} \\ 0,0172X + 0,1568 = 0,3 & \text{(Equation 12)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} X = 0,9 & \text{(Equation 11)} \\ X = 8,32 & \text{(Equation 12)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} X = 0,9 & \text{(Equation 11)} \\ X = 8,32 & \text{(Equation 12)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} X = 0,9 & \text{(Equation 11)} \\ X = 8,32 & \text{(Equation 12)} \end{cases}$$

#### III-1-4-2 Evolution de la viscosité en fonction de la température dans la zone d'incorporation

La viscosité de ce mélange diminue au fur et à mesure que la température comme le montre la figure ci-dessous ;

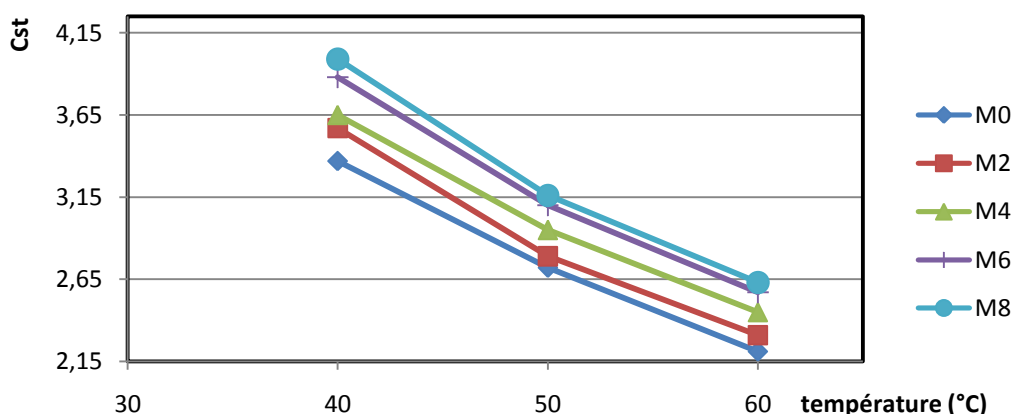
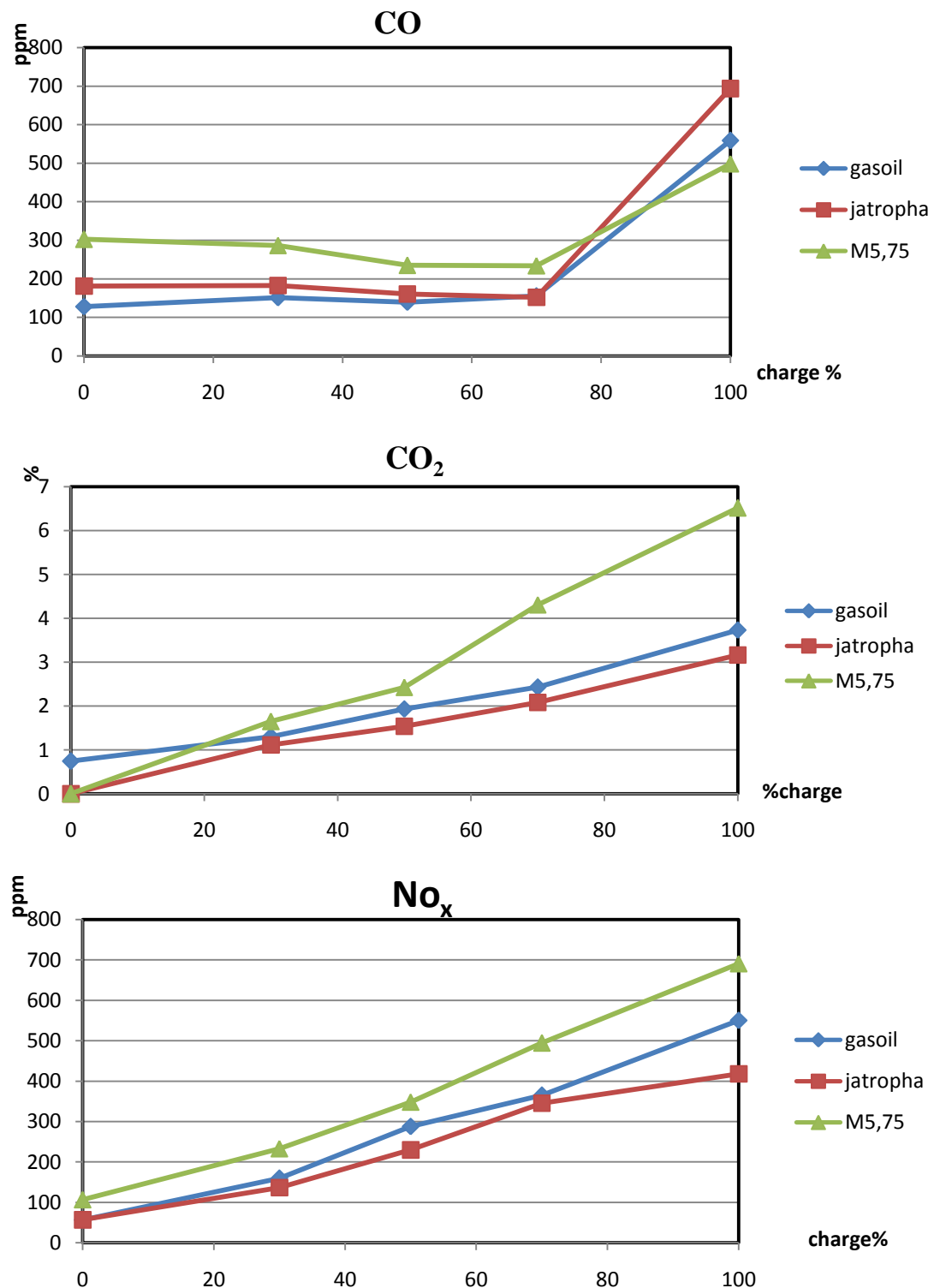


Figure 6 : Evolution de la viscosité en fonction de l'augmentation de la température dans la zone d'incorporation limite de l'huile au gasoil

### III-1-4- Essais sur le banc moteur

Cette partie concerne de l'émission des gaz d'échappement et de la performance du moteur

#### III-1-4-1 Emission des gaz d'échappement



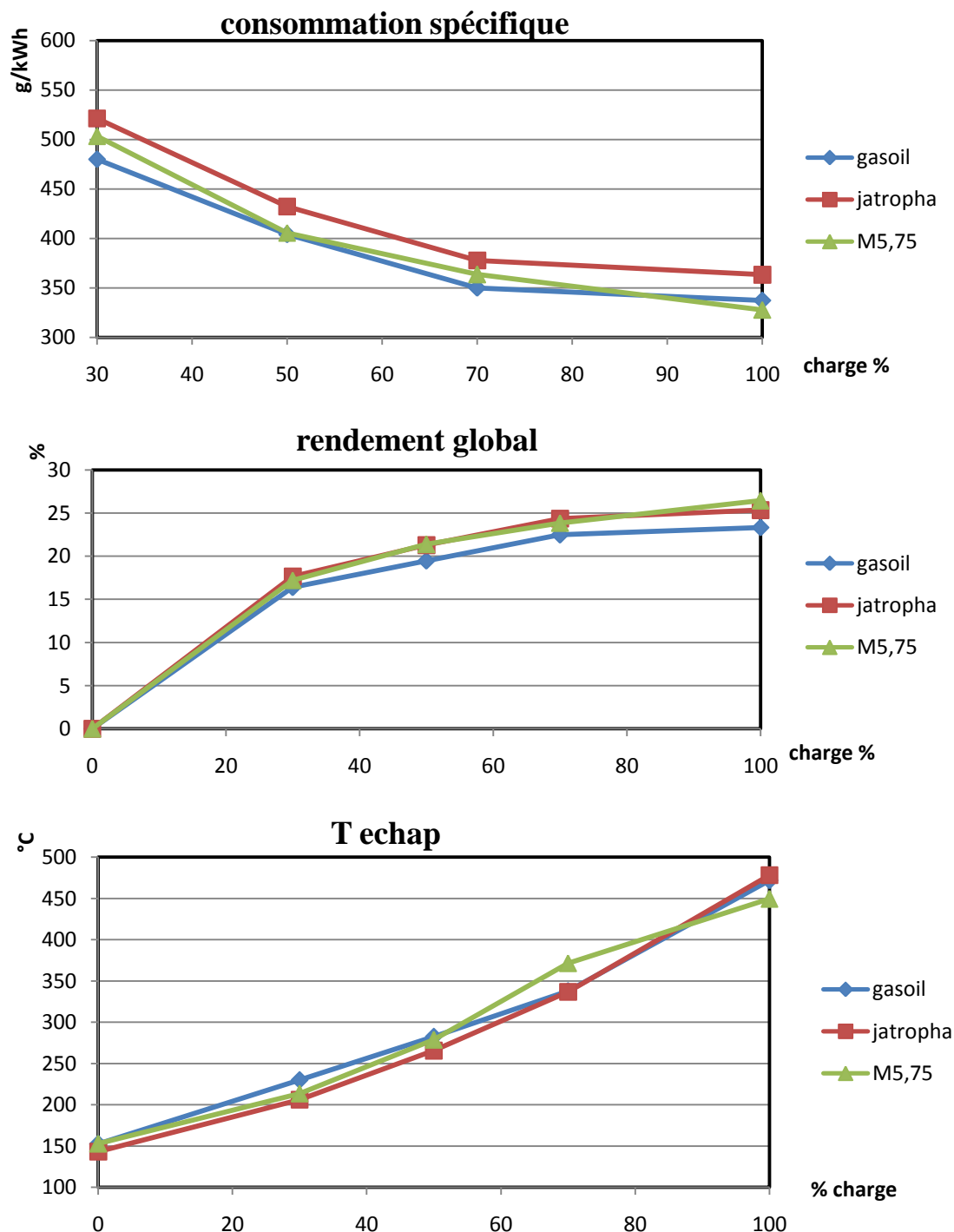
**Figure 7 : Emissions des gaz d'échappement en fonction de la charge.**

Les émissions de gaz issues de la combustion ont pratiquement le même comportement. Les émissions de CO<sub>2</sub> ou de NO<sub>x</sub>, augmentent pratiquement de la même manière avec la charge ; par

contre celle de CO diminue jusqu'à une certaine charge et augmente à la suite.

### III-1-4-2 Les performances du moteur diesel

Il s'agit de la consommation spécifique, du rendement global et de la température des gaz d'échappement présenté ci-dessous ;



**Figure 8 : Performances du moteur en fonction de la charge.**

La consommation spécifique des différents carburants utilisés diminue avec la charge alors que le rendement global et la température des gaz d'échappement croient avec la charge.



## **III-2 Discussions**

### **III-2-1 Fractionnement de la biomasse oléagineuse de *Jatropha curcas***

La proportion des amandes dans la graine est très élevée donc la séparation de la coque et de l'amande est envisageable. Les deux parties ainsi séparées pourront être utilisées autrement ; l'amande pour la production de l'huile et dont le reste (tourteaux) sera utilisé lui aussi. La coque elle aussi sera valorisée pour d'autre fin.

Le taux d'humidité des tourteaux comme des coques est supérieur à la norme qui est 9% donc difficile pour la conservation. Les coques seront plus utiles pour une consommation dans les chaudières des centrales thermiques en vue d'une production d'électricité.

### **III-2-2 Caractéristiques physicochimiques des huiles végétales brutes de *Jatropha curcas* comparées au gasoil**

L'acidité de l'huile de *jatropha curcas* est très supérieure à celle du gasoil ; ce qui veut dire que le HVJC ne peut pas être directement utilisable dans les moteurs car causera une usure à long terme des matériaux constituant les moteurs. De même la viscosité de HVJC est nettement supérieure à celle du gasoil, donc pour une utilisation comme carburant, doit être chauffée. Par contre le PCI du gasoil est supérieur à celui de HVJC, valeur qui se justifie car la teneur en eau du gasoil est très faible à celle de HVJC.

### **III-2-3 Caractéristiques physicochimiques des mélanges huile de *Jatropha curcas* avec le gasoil**

#### **III-2-3-1 Evolution des PCI en fonction du taux d'incorporation d'huile de *Jatropha curcas* dans le gasoil**

On observe une décroissance linéaire par ajout de HVJC, ce qui est conforme aux données de la littérature. Plus nous ajoutons de HVJC au gasoil, plus le PCI du mélange diminue. Du point de vue consommation, pour avoir les mêmes performances d'un moteur diesel en utilisant HVJC, il faut un volume conséquent plus que celui que consommerait le moteur si c'était du gasoil.

#### **III-2-3-2 Evolution de la viscosité en fonction du taux d'incorporation d'huile de *Jatropha curcas* dans le gasoil**

La viscosité varie d'une manière exponentielle par ajout de HVJC. La courbe montre qu'entre 12 et 14%, (la résolution de l'équation cartésienne de la courbe de tendance donne une valeur de 12,84%) l'incorporation est théoriquement possible, valeur limitée par la norme ASTM à 4,5Cst à 40°C. en ne tenant compte de ce paramètre, un moteur diesel peut utiliser un mélange d'un pourcentage massique de 12,84% limite de HVJC.

### **III-2-3-3 Autres paramètres physicochimiques**

L'acidité augmente au fur et à mesure qu'on ajoute de HVJC au gasoil. Il en est de même pour le taux de sédiments, la densité et le point éclair. La densité des mélanges respectent la norme ASTM D 1288 (norme pétrolière) dont la spécification Mini 0,820 Maxi 0,890. Selon la spécification de la SONABHY, (NF M07 019), le point éclair doit être 61 mini ; valeur respectée par tous les mélanges. Le point découlement et le point de trouble ne varie pas. A n'importe quel taux d'incorporation, la valeur reste identique à celle du gasoil. Ces deux paramètres ne sont donc pas limitant pour le taux d'incorporation. Par contre l'indice de cétane diminue progressivement par ajout de HVJC mais ces valeurs ne limitent la capacité des différents mélanges quant à leur utilisation dans les moteurs ; les différentes valeurs trouvées pour cet indice respectent la spécification de la SONABHY qui est de 45 mini. Il en résulte qu'en dehors la viscosité les paramètres les plus significatifs sont l'acidité et le taux de sédiments.

### **III-2-4 Détermination de la limite d'incorporation au gasoil**

#### **III-2-4-1 Repérage de la zone limite d'incorporation**

Le paramètre le plus important dans la détermination de cette limite est le taux de sédiments car ils entraînent plusieurs dommages aux moteurs tels que le colmatage prématuré des filtres, encrassement du circuit de carburation, effet abrasif sur le système d'injection, combustion hétérogène. Seule la valeur du gasoil respecte la norme qui est 0,01%. Les différents mélanges ont un taux largement au dessus. Le problème vient de HVJC qui contient trop de particules en suspension. Pour résoudre ce problème et déterminer une zone limite, le HVJC doit être plus décantée et filtrée avec des filtres dont les ports auront une finesse de 0.8  $\mu\text{m}$  donc une production industrielle et non plus artisanale.

Concernant l'acidité, la norme fixe une valeur de 0,3mgKOH/g. certains mélange ont des valeurs supérieures à cette norme mais pour d'autres c'est inférieure.

La résolution de l'équation de la droite de l'acidité limitant la valeur de la norme donne un mélange théorique possible de 8,32% de HVJC dans le gasoil. Or concernant la viscosité, la limite d'incorporation est de 12,84% de HVJC.

Il ressort que le pourcentage théorique d'incorporation possible est de 8,32%. Mais pour avoir une marge sécuritaire, le taux d'incorporation possible de HVJC dans le gasoil est de 8%.

#### **III-2-4-2 Evolution de la viscosité en fonction de la température dans la zone d'incorporation**

Il en résulte que la viscosité des mélanges dans la zone limite d'incorporation se comporte presque de la même manière que celle du gasoil.

### **III-2-4- Essais sur le banc moteur**

#### **III-2-4-1 Emission des gaz d'échappement**

L'émission du CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> évolue avec la charge. Cela est dû à une injection de masse importante de carburant dans le moteur entraînant l'élévation de la température à des charges trop élevées. Les valeurs du mélange M 5,75 est supérieur aux deux autres (le gasoil pur et le HVJC) car sa consommation volumétrique est supérieure pour la même production d'énergie.

Le CO diminue avant de croître. A une charge (70%) le dégagement est moindre donc une combustion plus complète que les autres charges. La combustion du mélange M5,75% est moins complète que celle du gasoil ou de HVJC ce qui explique les émissions de CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> plus important pour ce mélange les autres carburants mais un CO<sub>2</sub> dont une partie est d'origine végétale.

#### **III-2-4-2 Les performances du moteur diesel**

La consommation spécifique de tous les carburants diminue au fur et à mesure que la charge augmente. La consommation du mélange est légèrement supérieure à celle du gasoil et inférieure à celle de HVJC. Ce constat peut être expliqué par le fait que le point éclair du mélange qui est supérieur à celui du gasoil et inférieur à celui de HVJC et aussi par la décroissance du PCI par ajout de HVJC au gasoil.

Le rendement global évolue presque de même manière pour tous les carburants et augmente avec la charge. Il est inversement proportionnel à la consommation spécifique. Tous cela s'explique par le taux des molécules d'oxygène qui est nul dans le gasoil, faible dans le mélange et élevé dans le HVJC.

La température des gaz d'échappement augmente avec les charges pour tous les carburants avec un léger ascendant de HVJC sur le mélange et le gasoil. En effet l'ajout de HVJC au gasoil augmente la température dans la chambre de combustion. Ce constat est lié à la viscosité ; plus la viscosité est élevée, plus la vaporisation des gouttes de carburant envoyé dans la chambre de combustion est difficile (les gouttes étant plus grosses) donc une combustion dégageant une température élevée. Bref l'ajout de HVJC au gasoil augmente la température dans la chambre de combustion.

### **III-3 Evaluation de l'impact socio économique et environnemental des mélanges huiles végétales / Gasoil : cas du 2iE et de la SONABEL**

L'incorporation de l'huile végétale dans le gasoil contribuera à réduire la consommation du gasoil et de facto à la réduction des gaz à effet de serre spécialement le CO<sub>2</sub> et des dépenses d'approvisionnement en hydrocarbure comme le montre le tableau ci-dessous :

**Tableau 8 : Variation du coût et de la quantité de CO<sub>2</sub> évitée**

année	2ie	
	coût(FCFA)	tCO <sub>2</sub>
2005	11477	0,0840448
2006	86849,725	0,6359903
2007	6967,275	0,5057721
2008	81666,1	0,5980318
2009	136743,63	1,0013585
	SONABEL (Ouaga ouest)	
2008	126562006	2309,47
2009	186080872	3395,5545

Il faut noter que les bénéfices présentés dans ce tableau ne tiennent pas compte du coût de revient d'un litre de HVJC car pour le moment aucune législation ne l'a fixé et aussi la quantité de CO<sub>2</sub> évité par la production d'un litre de HVJC.

### III-3-1 Cas du 2ie

La quantité de CO<sub>2</sub> évité chaque année malgré qu'elle est en forte augmentation d'année en année, n'est pas éligible au MDP car n'atteint pas la valeur minimale qui est de 5000tCO<sub>2</sub> mais servira d'exemple pour d'autres institutions.

Le bénéfice engendré est un peu significatif malgré qu'il soit faible.

### III-3-2 Cas de la SONABEL

Ces chiffres ne concernent que la centrale de production thermique de Ouaga Ouest de la SONABEL. La quantité de CO<sub>2</sub> évitée est très importante mais elle aussi n'est pas éligible au MDP. Pour que la SONABEL en bénéficie, il va falloir faire cette étude sur l'ensemble de ces centrales thermiques. De même la réduction des coûts de consommation du gasoil est très importante. De ce fait, une incorporation de HVJC dans le gasoil profitera à la SONABEL qui consommera moins de gasoil, et en même réduira le prix du kWh qui arrangera les ménages, et aussi le développement d'autres activités économiques et du cout la hausse du PIB du pays et permettant ainsi d'accroître les investissements.

## **IV-CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

### **IV-1 Conclusion**

Le point éclair des mélanges HVJC /gasoil augmente par ajout de HVJC, augmentation qui ralentirait la proportion de gaz vaporisé. Néanmoins tout les mélange respecte la norme donc nous pourrons envisager un démarrage à froid des moteurs diesel à injection directe comme indirecte.

L'indice de cétane par contre diminue par ajout de HVJC et respecte la norme du gasoil standard pour les mélanges étudiés. Ce qui confirme la thèse possible d'un démarrage à froid des moteurs à injection directe et indirecte.

Le taux de sédiments, l'acidité et la viscosité des différents mélanges permettent de spécifié clairement le taux d'incorporation possible donc des paramètres à contrôler pour déterminer la limite d'incorporation des huiles végétales dans du gasoil.

L'étude de l'émission de gaz, de la température des gaz d'échappement, le rendement thermique et la consommation spécifique a permis de conclure que tous les mélanges HVJC/gasoil ont une communauté de comportement en tant que carburant. Tous les échantillons testés se comportent de la même manière pour chaque paramètre étudié.

Contrairement aux limitations des diverses littératures, notre étude a montré dans un premier temps les paramètres les plus significatifs dans la détermination de la limite d'incorporation et dans un second temps proposer une limite maximale d'incorporation de HVJC dans le gasoil et enfin voir l'impact d'un tel type de carburant en ce qui concerne les émission des gaz , les températures des gaz et la performance du moteur diésel.

L'huile végétale de jatropha curcas comme additif au gasoil permet de connaitre réellement les possibilités d'utilisation des diverses huiles comme additifs au gasoil et les caractéristiques les plus importants à contrôler avant leur mélange. Le comportement des gaz d'échappement ouvre un autre débat quant au démarrage à froid du moteur avec un tel carburant.

### **IV-2 Perspectives**

Les résultats et interprétations que nous avons faits doivent être appuyés par d'autres études pour explorer les points suivants :

- Essai de démarrage à froid pour voir le comportement (diverses déformations) des pistons et cylindres,

- 
- Essai des teneurs en eau, en phosphores et en soufre des divers mélanges afin de valider la limite maximale d'incorporation de HVJC dans le gasoil,
  - Mise en place des dispositifs de filtrage des huiles de jatropha curcas pour réduire de taux de sédiments qui est trop élevé,
  - Analyser l'huile à moteur utilisée lors du fonctionnement du moteur pour connaître la durée de vie du moteur diesel fonctionnant avec le mélange, test qui consiste à voir si l'huile à moteur contient après utilisation des espèces métalliques qui n'y étaient pas au départ en vue de connaître l'état usure du moteur.

---

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

1. Pramanik, K. 2003 Properties and use of *Jatropha curcas* oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Renewable Energy* 28: 239-248.
2. DeOliveira, Edimar. Rafael L. Quirino, Paulo A.Z. Suarez and Alexandre G.S. Prado. Heats of combustion of biofuels obtained by pyrolysis and by transesterification and of biofuel/diesel blends *Thermochimica Acta*, 450 (1-2), 2006, 87-90.
3. Chaves, Eduardo Sidinei; Tatiana Dillenburg Saint' Pierre; Eder José dos Santos; Luciano Tormen; Vera Lúcia Azzolin Frescura Bascuñan; Adilson José Curtius. Determination of Na and K in biodiesel by flame atomic emission spectrometry and microemulsion sample preparation. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2008, 19 (5)
4. Marty, G. "Les huiles végétales pures, de la graine au pot d'échappement, carburant vert.", Ed Tournesol (2005), 93p.
5. Vaitilingom, G. "Utilisations énergétiques de l'huile de coton" *Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures* (2006), 15 (1), 144-149.
6. Vaitilingom G, Liennard A. Various vegetable oils as fuel for Diesel and burners : *Jatropha curcas* particularities. In: Curcas J, ed. *Biofuels and industrial products*. Graz(Autriche): Technische Universitat Graz, 1997.
7. Ch .S. Naga Prasad, K. Vijaya Kumar Reddy, B.S.P. Kumar, E. Ramjee, O.D. Hebbel and M.C. Nivendgi. Performance and emission characteristics of a diesel engine with castor oil, *Indian Journal of Science and Technology* Vol.2 No.10 ,2009
8. Mohammed H. Chakrabarti et Ahmad Rafiq. Études transestérifications d'huile de ricin AS A Première étape de son utilisation dans la production de biodiesel, 2008
9. O.M.I.Nwafor & Rice Performance of Rapeseed Oil Blends in a Diesel Engine, , *Applied Energy*, Vol. 54, No. 4, pp. 345-354, 1996
10. Recep Altin , Selim çetinkaya , Hüseyin Serdar Yücesu. The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel, , *Energy Conversion and Management* 42 2000
11. Nu´bia M. Ribeiro, Angelo C. Pinto, Cristina M. Quintella, Gisele O. da Rocha,,O Leonardo S. G. Teixeira, Lílian L. N. Guarieiro, Maria do Carmo Rangel, Ma´rcia C. C. Veloso, Michelle J. C. Rezende, Rosenira Serpa da Cruz, Ana Maria de Oliveira, Ednildo A. Torres,r and Jailson B. de Andrade. The Role of Additives for Diesel and Diesel Blended (Ethanol or Biodiesel) Fuels: A Review, , *Energy & Fuels* 2007

12. B.K.Venkanna, C. Venkataramana Reddy, Swati B Wadawadagi. Performance, emission and combustion characteristics of direct injection diesel engine Running on Rice Bran Oil / Diesel Fuel Blend , , International Journal of Chemical and Biomolecular Engineering 2009
13. Ulf Schuchardta, Ricardo Serchelia, and Rogério Matheus Vargas Transesterification of Vegetable Oils: a Review, *J. Braz. Chem. Soc.*, Vol. 9, No. 1, 199-210, 1998,1997
14. F.K. Forson E.K. Oduro, E. Hammond-Donkoh . Performance of jatropha oil blends in a diesel engine, , *Renewable Energy* 29 (2004) 1135–1145, 2003
15. Deepak Agarwal, Avinash Kumar Agarwal. Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine, *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 2314–2323 2007
16. Vaïtilingom G. Huiles végétales-biocombustible diesel. Influence de la nature des huiles et en particulier de leur composition en acides gras sur la qualité' - carburant. Université' d'Orleans; 1992.
17. Haiying Tang, Nadia Abunasser , Anfeng Wang, Bradley R. Clark, Kapila Wadumesthrige,Sidong Zeng, Manhoe Kim, Steven O. Salley, Gary Hirschlieb, John Wilson, K.Y. Simon N. Quality survey of biodiesel blends sold at retail stations, *Fuel* 87 (2008) 2951–2955, 2008
18. Aliou ousmane Haïdara . Valorisation d'une huile végétale tropicale: l'huile de pourghère, mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Département de génie chimique, université de Sherbrooke, 1996
19. Martin Mayer. Forum, Haute école suisse d'agronomie, Huile végétale – le carburant renouvelable pour un marché de niche, 2004
20. Peder Jensen. L'huile végétale brute comme carburant automobile, 2002
21. J Connemann, Biodiesel in Europa 1994, *Fat Sci.Technol.* 96, 536 (1994)
22. Heller, J., 1996. *Physic Nut. Jatropha curcas L.* Promoting the Conservation and use of Underutilized and Neglected Crops. International Plant Genetic Resources Institute, Rome.
23. Henning, R. 1996. Combating desertification - Fuel from *Jatropha* plants. In UNIDO Symposium on development and utilization of biomass energy resources in developing countries, Vienna, Dec. 1995. UNIDO, Environment and Energy Branch, Industrial Sectors and Environment Division, Vienna, Austria. (in press)
24. Martin, G. and A. Mayeux. 1984. Réflexions sur les cultures oléagineuses énergétiques. II. Le Pourghère (*Jatropha curcas L.*): un carburant possible. *Oléagineux* 39(5):283-287.



25. J. Ragauskas, Charlotte K. Williams, Brian H. Davison, George Britovsek, John Cairney, Charles A. Eckert, William J. Frederick, Jr., Jason P. Hallett, David J. Leak, Charles L. Liotta, Jonathan R. Mielenz, Richard Murphy, Richard Templar, Timothy Tschaplinski, 2006. The Path Forward for Biofuels and Biomaterials, Vol. 311. no. 5760, pp. 484 - 489
26. Stéphane HIS, 2005. Biofuels in Europe, Volume 64, Issue 11, November 2005, Pages 931-935
27. Barthélémy DE Theux. Utilisation de l'huile de palme comme combustible dans les moteurs diesel, mémoire d'ingénieur, haute école Léonard de Vinci 2004
28. Directive 2003/30/CE du Parlement européen et du Conseil du 8 mai 2003
29. Directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009
30. European Committee for Standardization, EN 14214.
31. American Society of Testing Materials, ASTM D 6751.
32. Brundtland, report of the world commission on Environment and Development, Assemblée Générale des Nations Unies, 1987
33. Commission Européenne, Les enjeux énergétiques, Eurobaromètre Spécial 258 / Vague 65.2 – *TNS Opinion & Social*, 2006

**Site web**

1. [www.alterenergies.org](http://www.alterenergies.org)

**ANNEXES**

Annexe 1: Caractéristiques du gasoil et gasoil grand froid (Arrêté du 6 février 2009).

Annexe 2: Propriétés physicochimiques des huiles végétales carburantes

Annexe 3: caractéristiques du banc moteur

Annexe 4: impact environnemental

Annexe 5 : Récapitulatif sur l'évolution de quelques caractéristiques physicochimiques en fonction du taux d'incorporation d'huile végétale pure de *Jatropha curcas* dans le gasoil

Annexes 6 : Photo des matériels utilisés

**Annexe 1: Caractéristiques du gasoil et gasoil grand froid (Arrêté du 6 février 2009).**

Propriétés	Unités	Limites	
		Minimum	Maximum
Indice de cétane mesuré		51,0	
Indice de cétane calculé		46,0	
Masse volumique (15°C)	kg/m <sup>3</sup>	820	845
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	% m/m	-	11
Teneur en soufre	mg/kg	-	10
Point éclair	°C	55	-
Résidu de carbone (sur le résidu 10% de distillation)	% m/m	-	0,30
Teneur en cendre	% m/m	-	0,01
Teneur en eau	mg/kg	-	200
Contamination totale	mg/kg	-	24
Corrosion à la lame de cuivre (3h à 50°C)	Cotation	Classe 1	
Stabilité à l'oxydation 1	g/m <sup>3</sup>	-	25
Stabilité à l'oxydation 2	g/m <sup>3</sup>	-	60
Variation de l'indice d'acide	mgKOH/g	-	0,30
Pouvoir lubrifiant, diamètre de marque d'usure corrigée (wsd 1, 4) à 60° C.	µm	-	460
Viscosité à 40° C.	mm <sup>2</sup> /s	2,00	4,50
Distillation % (v/v) condensé à 250° C	% (v/v)	-	< 65
Distillation % (v/v) condensé à 350° C	% (v/v)	85	-
point 95 (V / V) condensé à	°C	-	360
Teneur en esters méthyliques d'acides gras conforme à la norme EN 14214 et additivés	% (v/v)	-	7

Source : [www.bcma.fr](http://www.bcma.fr) visité le 16/07/2010 à 21H52

**Annexe 2: Propriétés physicochimiques des huiles végétales carburants**

Propriétés caractéristiques de l'huile de colza				
Propriétés/teneur	Unités	Mini	Maxi	Méthodes d'analyse
Densité (15°C)	kg/m <sup>3</sup>	900	930	DIN EN ISO 3675 /DIN EN ISO 12185
Point éclair	°C	220	-	DIN EN 2719
Viscosité cinématique (40°C)	mm <sup>2</sup> /s	-	36	DIN EN ISO 3104
Valeur calorifique	kJ/kg	36000	-	DIN 51900-1,-2,-3
Indice de cétane	-	39	-	-
Carbone résiduel	%masse	-	0,40	DIN EN ISO 10370
Indice d'iode	g/100g	95	125	DIN EN 14111
Teneur en soufre	mg/kg	-	10	DIN EN ISO 20884 /DIN EN ISO 20846
Propriétés variables de l'huile de colza				
Propriétés/teneur	Unités	Mini	Maxi	Méthodes d'analyse
Teneur en particules	mg/kg	-	24	DIN EN 12662
Acidité	mgKOH/g	-	2,0	DIN EN 14104
Stabilité à l'oxydation (110)	h	5,0	-	DIN EN 14112
Teneur en phosphore	mg/kg	-	12	DIN EN 14107
Teneur en calcium et magnésium	mg/kg	-	20	DIN EN 14538
Teneur en cendres	%masse	-	0,01	DIN EN ISO 6245
Teneur en eau	%masse	-	0,075	DIN EN ISO 12937

Source : [www.alterenergies.org](http://www.alterenergies.org) 18/06/2010 à 11h10

**Annexe 3: Caractéristiques du banc moteur**

<b>MOTEUR DIESEL</b>	
<b>Désignation</b>	<b>Caractéristiques</b>
Type	Lombardini 9LD 561-2/L, quatre temps, refroidissement à air
Combustion	Injection directe
Nombre de cylindres	02
Alésage	90mm
Course	88mm
Cylindrée	1120 cm <sup>3</sup>
Puissance maximale	12 kW à 2200 tr/mn
Taux de compression	17,5 : 1
Vitesse de rotation	2200 tr/mn
Couple maximum	6 kgm
<b>ALTERNATEUR TRIPHASE</b>	
<b>Désignation</b>	<b>Caractéristiques</b>
Type	GENELEC
Puissance	6 kVA
Cos $\phi$	0,8
RPM	1500

**Annexe 4: Impact environnemental**

Année	2ie					
	consommation (l)	masse (kg)	mas_HVJC	tCO <sub>2</sub>	transport	tCO <sub>2</sub> évité
2005	347,13	298,5318	17,165579	0,0671174	0,0169274	0,0840448
2006	2626,83	2259,0738	129,89674	0,5078963	0,128094	0,6359903
2007	2088,99	1796,5314	103,30056	0,4039052	0,101867	0,5057721
2008	2470,05	2124,243	122,14397	0,4775829	0,1204489	0,5980318
2009	4135,91	3556,8826	204,52075	0,7996761	0,2016824	1,0013585
SONABEL						
2008	9538801,16	8203369	471693,72	1844,3224	465,14756	2309,47
2009	14024654,7	12061203	693519,17	2711,66	683,89452	3395,5545

année	2ie		
	coût	coût mélange (FCFA)	mas_HVJC
2005	199600	188123	11477
2006	1510430	1423580,28	86849,725
2007	121170	114202,725	6967,275
2008	1420280	1338613,9	81666,1
2009	2378150	2241406,38	136743,63
SONABEL			
2008	2201078368	2074516362	126562006
2009	3236189072	3050108200	186080872

**Annexe 5 : Récapitulatif sur l'évolution de quelques caractéristiques physicochimiques en fonction du taux d'incorporation d'huile végétale pure de *Jatropha curcas* dans le gasoil**

Mélange (% , m/:m)	0	2	4	6	8	10	12	
Acidité (mg KOH/g)	0,141 ± 0,0001	0,211 ± 0,0001	0,211± 0,0001	0,211± 0,0001	0,282 ± 0,0001	0,422 ± 0,0001	0,423 ± 0,000	
PCI(kJ/kg)	44868 ± 2480	41662 ± 565	41652 ± 370	41520 ± 342	41431 ± 484	41148 ± 250	40930 ± 316	
Densité à 25°C	0,856	0,857	0,858	0,859	0,860	0,861	0,862	
Viscosité (Cst)	40°C	3,37±0,042	3,57±0,01	3,65±0,006	3,88±0,009	3,99±0,003	4,26±0,076	4,45±0,028
	50°C	2,72±0,001	2,79±0,013	2,95±0,005	3,10±0,006	3,16±0,040	3,39±0,016	3,49±0,024
	60°C	2,21±0,004	2,31±0,003	2,45±0,006	2,57±0,012	2,63±0,002	2,70±0,003	2,83±0,006
Taux de sédiments (mg/g)	0,009	-	0,031	-	0,131	-	0,184	
Point d'écoulement (°C)	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	
Point de trouble (°C)	0	0	0	0	0	0	0	
Point éclair (°C)	64,2	71,2	73,2	73,2	73,2	73,2	73,2	
Indice de cétane	49,1	48,8	48,8	48,6	48,1	47,9	47,2	

Mélange en %	14	16	18	20	22	24	25	100	
Acidité (mg KOH/g)	0,423±0,0002	0,493 ± 0,0002	0,493 ± 0,000	0,493 ± 0,0002	0,493 ± 0,0002	0,564 ± 0,000	0,564 ± 0,0001	2,60±0,033	
PCI(kJ/kg)	40901 ± 420	40427 ± 278	40410 ± 102	40238 ± 838	40184 ± 782	40164 ± 959	39804 ± 275	36329 ± 823	
Densité à 25°C	0,863	0,864	0,866	0,867	0,868	0,869	0,8695	0,912	
Viscosité (Cst)	40°C	4,72±0,032	4,73±0,026	5,11±0,066	5,26±0,071	5,53±0,068	5,73±0,017	5,85±0,031	39,13±0,159
	50°C	3,70±0,034	3,73±,014	3,85±0,166	4,07±,188	4,32±0,032	4,47±0,001	4,64±0,038	27,60±0,313
	60°C	3,01±0,038	3,08±0,00	3,21±0 ?057	3,40±0,004	3,52±0,004	3,68±0,020	3,85±0,027	20,07±0,038
Taux de sédiments (mg/g)	-	0,244	-	-	-	-	-	0,253	
Point d'écoulement (°C)	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-18	-3	
Point de trouble (°C)	0	0	0	0	0	0	0	2	
Point éclair (°C)	73,2	73,2	73,2	73,2	76,2	76,2	76,3	-	
Indice de cétane	46,6	45,7	-	-	-	-	-	-	



**Annexes 6 : Photo des matériels utilisés**



**Photo1 : Point éclair**



**Photo 2 : Point de trouble et point d'écoulement**



**Photo 3 : Densimètre**



**Photo 4 : Viscosimètre**