

Essais de Transtérifications comparées par méthanolyse et éthanolyse de l'huile de palme: Mesure de la densité et de la viscosité en relation avec la structure moléculaire

[Transesterification tests compared by methanolysis and ethanolysis of palm oil: Measurement of density and viscosity in relation to the molecular structure]

Edmond Konan KOUASSI^{1,2}, Abollé ABOLLE², Benjamin YAO³, and David BOA⁴

¹Laboratoire de Procédés Industriels, de Synthèse, de l'Environnement, et des Energies Nouvelles, Groupe des Procédés et Environnement, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, B.P. 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

²Laboratoire de Thermodynamique et Physico-Chimie du Milieu, UFR Sciences Fondamentales et Appliquées ; Université Nangui Abrogoua ; 02 Bp 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

³Laboratoire de Procédés Industriels, de Synthèse, de l'Environnement, et des Energies Nouvelles, Groupe des Procédés et Environnement, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, B.P. 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

⁴Laboratoire de Thermodynamique et Physico-Chimie du Milieu, UFR Sciences Fondamentales et Appliquées ; Université Nangui Abrogoua ; 02 Bp 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

Copyright © 2015 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The use of vegetable oils as fuel for diesel engines has known many approaches since the implementation of this type of engine. Existing engines had a loss of power and some cold ignition problems, when it was tested with only crude oil. Consequently, it was immediately realized that we had to make special motors or to produce biofuels whose characteristics are similar to diesel. Thus, the present study focused on comparing the methanolysis and ethanolysis in alkaline-catalysed by studying the relationship between the density, viscosity of biodiesel with their molecular structure. It appeared from this study that biodiesel derived from the methanolysis is closer to conventional diesel than biodiesel derived from the ethanolysis. Furthermore, analysis of the molecular structures of these fluids explained the difference of the density and kinematic viscosity of the biodiesels. However, it has been shown through the study that these two biodiesels are Newtonians.

KEYWORDS: palm oil, methanolysis, ethanolysis, density, viscosity, molecular structure.

RESUME: L'utilisation des huiles végétales comme carburant des moteurs diesels a connu, depuis la mise en œuvre de ce type de moteurs, de nombreuses approches. Les moteurs existant ayant connu des problèmes de perte de puissance et de démarrage à froid, lors des essais réalisés exclusivement avec les huiles brutes, on s'est tout de suite rendu compte qu'il fallait soit des moteurs spéciaux, soit des biocarburants synthétisés dont les caractéristiques sont proches du gazole. Ainsi, la présente étude s'est focalisée sur la comparaison de la méthanolyse et l'éthanolyse en milieu basique en étudiant la relation entre la densité et la viscosité des biodiesels avec leur structure moléculaire. Il ressort de cette étude que le biodiesel issu de la méthanolyse se rapproche plus du diesel conventionnel que le biodiesel issu de l'éthanolyse. De plus, l'analyse des structures moléculaires de ces fluides a permis d'expliquer la différence de la densité ainsi que de la viscosité cinématique des biodiesels. Toutefois, il a été prouvé au travers de l'étude que ces deux biodiesels sont newtoniens.

MOTS-CLEFS: Huile de palme, méthanolyse, éthanolyse, densité, viscosité, structure moléculaire.

1 INTRODUCTION

La demande énergétique dans le monde connaît aujourd'hui une croissance vertigineuse due principalement au développement des secteurs du transport et de l'industrie [1]. Aussi, les sources pétrolière et hydroélectrique s'avèrent-elles insuffisantes pour répondre à ce besoin. Pour se mettre à l'abri de la rupture, les pays pétroliers tentent de ralentir l'exportation de leurs réserves [2]. Cette attitude est à l'origine des diverses fluctuations et augmentations du prix du pétrole, entraînant des conséquences économiques dans le monde entier et plus particulièrement dans les pays en voie de développement.

Aussi, l'exploitation de l'énergie fossile a-t-elle des effets néfastes sur l'environnement dont l'échauffement de la terre et le changement climatique [3], [4].

Toutes ces raisons ont amené des chercheurs à se tourner vers la biomasse qui est l'ultime solution indiquée particulièrement au cours de ces dernières années [1], [5].

Les huiles végétales, en raison de leur disponibilité en zone tropicale et surtout par le fait qu'elles se présentent sous forme de « produits finis » sont visées pour être exploitées à des fins de biocarburant [6]. Toutefois, la viscosité et la densité des huiles sont des paramètres déterminants dans le cadre de leur utilisation comme carburant. Elles exercent une influence sur le fonctionnement des systèmes d'injection (débit, pression maximale, l'instant d'injection) et sur le mécanisme de pulvérisation des jets de combustible dans la chambre de combustion [7].

De ce fait, la viscosité élevée des huiles végétales a incité certains utilisateurs à les réchauffer avant l'injection, à chauffer les filtres, à les diluer dans du gazole ou bien à modifier les injecteurs pour avoir des passages moins étroits engendrant une modification des moteurs [8]. Pour ces raisons, l'utilisation directe des huiles brutes s'avère techniquement impraticable pour les moteurs diesel traditionnels ; d'où la nécessité de procéder à leur transformation [8], [9]. Quatre voies s'offrent aux chercheurs à cet effet: la dilution, la microémulsification, la pyrolyse et la transestérification [1].

La dernière consiste à faire réagir un alcool sur l'huile végétale dans des conditions douces. Elle est l'une des voies indiquées pour la valorisation des huiles végétales sans mélange au carburant fossile et offre la possibilité d'une industrialisation permettant de disposer de la glycérine comme sous-produit destiné aux industries cosmétique, pharmaceutique, etc.

En effet, la transestérification est une réaction chimique au cours de laquelle des esters sont transformés en d'autres esters par échange des groupements alkyles [10]. Cette réaction peut se faire soit par alcoololyse (réaction d'un alcool sur un ester), soit par acidolyse (réaction d'un acide sur un ester) ou par estérololyse (réaction d'un ester sur un autre ester).

Ces trois formes de transestérification peuvent avoir lieu dans l'huile [10]. Mais, dans le but d'obtenir des esters carburants de poids moléculaires voisins du gazole, la transestérification par alcoololyse a été effectuée dans le cadre de ces travaux.

Ainsi, la transestérification des huiles végétales se fait par réaction d'un triglycéride avec un alcool en présence d'un catalyseur. On obtient un mélange de glycérol et d'esters alkyles selon l'équation du schéma 1 [1], [2].

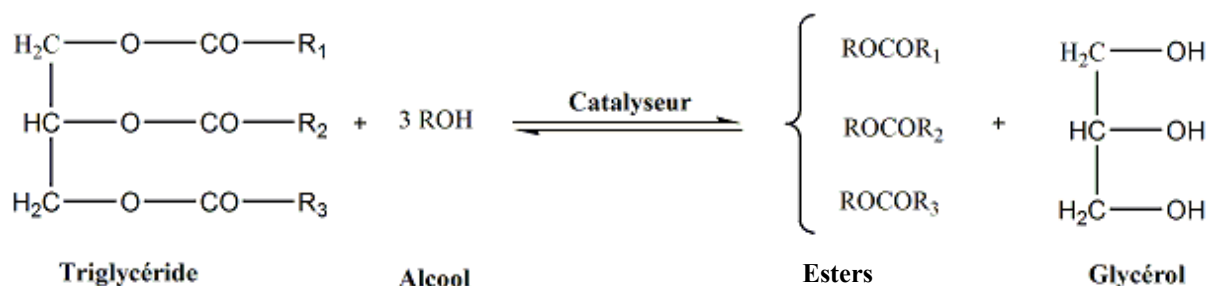


Schéma 1. Equation bilan de la transestérification des huiles végétales

Cette réaction se fait selon le mécanisme réactionnel en catalyse basique décrits par Schuchardt et al. (1998) [11] sur le schéma 2.

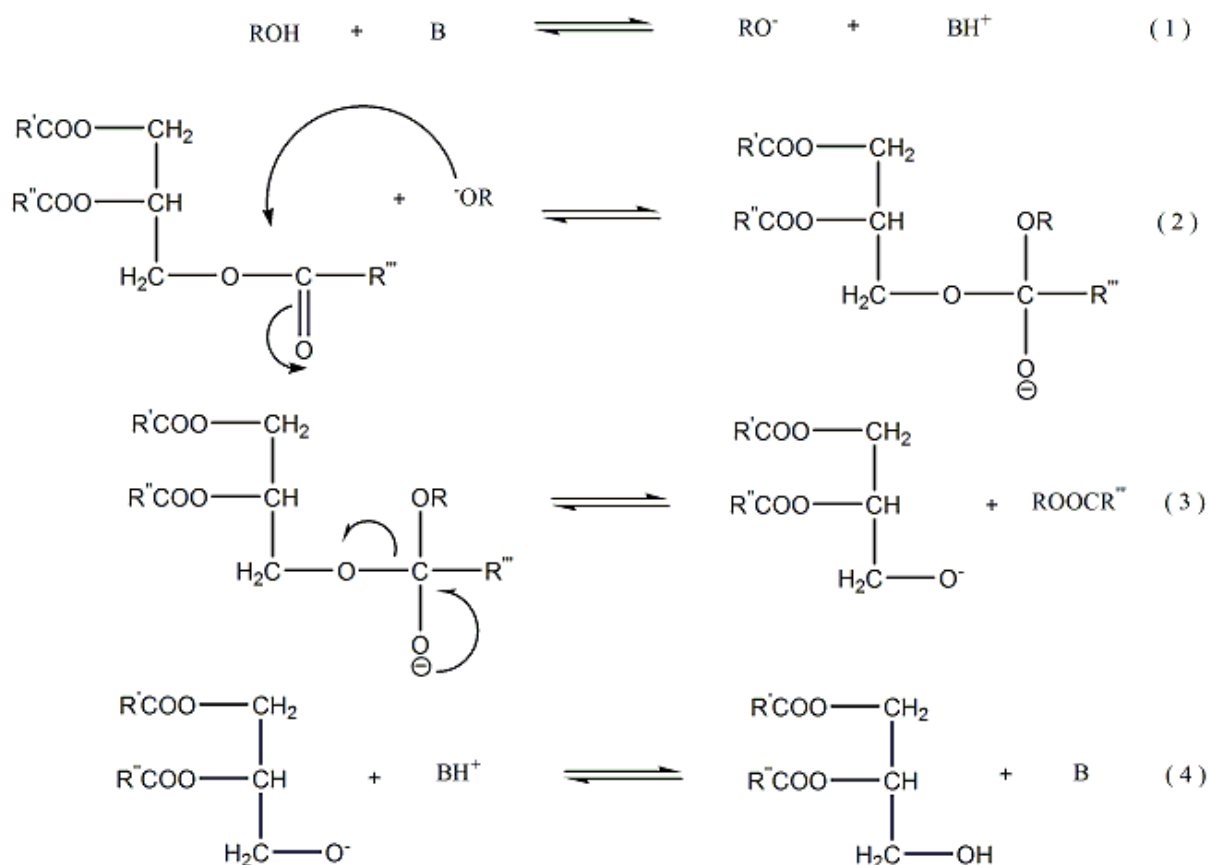


Schéma 2. Mécanisme réactionnel de la transtestérification en catalyse basique

Parallèlement à la transtestérification, l'alcool estérifie les acides gras libres présents dans l'huile.

Plusieurs facteurs sont déterminants dans la réalisation de la transtestérification. Ce sont entre autres : le type d'alcool, le type de catalyse, le ratio molaire alcool/huile végétale, la température, la pression, la durée de la réaction etc [5].

Il existe trois types de catalyseurs pour une réaction de transtestérification qui sont les catalyseurs basiques, les catalyseurs acides et les autres catalyseurs principalement composés d'alcoolates ou oxydes de métaux et des catalyseurs enzymatiques [12].

Les catalyseurs basiques tels que l'hydroxyde de potassium (KOH) et l'hydroxyde de sodium (NaOH) sont généralement utilisés en lieu et place des catalyseurs acides lors de la transtestérification des huiles végétales car ils sont bon marché et sont moins corrosives que les catalyses acides [13].

Les huiles utilisées comme matière première pour la production de biodiesel peuvent être classées en deux (2) grands groupes : les huiles comestibles et les huiles non comestibles. Toutefois, rappelons que la Côte d'Ivoire est le premier pays producteur et exportateur d'huile de palme en Afrique de l'ouest et qu'elle exporte une bonne part vers la Malaisie qui est elle-même premier pays producteur et exportateur au monde. Cette étude pourrait non seulement permettre aux entreprises productrices d'huile de palme de s'auto-suffire en énergie afin que l'huile soit à moindre coût sur le marché ivoirien, mais aussi mettre sur le marché du biocarburant dans le but de contrôler et préserver les réserves de pétrole [14], [15].

En complément aux précédents travaux effectués, la présente étude entend valoriser l'huile de palme dans la production de biodiesel. Il s'agit donc ici de comparer la méthanolyse et l'éthanolyse et établir une relation entre la densité, la viscosité avec la structure moléculaire des différents biodiesels.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 MATIERE PREMIERE

L'huile de palme utilisée pour nos manipulations a été produite industriellement par l'huilerie de la société SOGB. L'extraction par pressage a été employée pour la production de l'huile de cette huile. Les différentes grandes étapes de cette production sont : la réception, l'extraction, la clarification [10]. Le schéma synoptique du processus de fabrication de l'huile de palme est présenté sur la figure 1 [10]. L'huile de palme ainsi obtenue a été caractérisée selon les méthodes citées dans le tableau 1.

2.2 SYNTHÈSE DES BIODIESELS

Le matériel de synthèse est constitué d'un cristalliseur, d'un fluide caloporteur, d'un ballon tricolore servant de réacteur surmonté d'un réfrigérant, d'un barreau aimanté, d'un agitateur magnétique chauffant, des ampoules à décanter, d'un thermomètre et de la verrerie courante de laboratoire.

La synthèse des biodiesel s'est déroulée en catalyse basique avec du l'hydroxyde de potassium (KOH) 98% provenant de Merck, avec deux solvants (du méthanol 99% et de l'éthanol 96% provenant de Carlo Erba). Cette synthèse a été réalisée avec un ratio molaire alcool/huile de 6:1 et du KOH de 1% (en masse) par rapport à l'huile.

Les différentes étapes du procédé de transestérification sont successivement : le chauffage de l'huile; l'ajout de l'alcool et du catalyseur; la réaction ; la séparation du biodiesel et du glycérol.

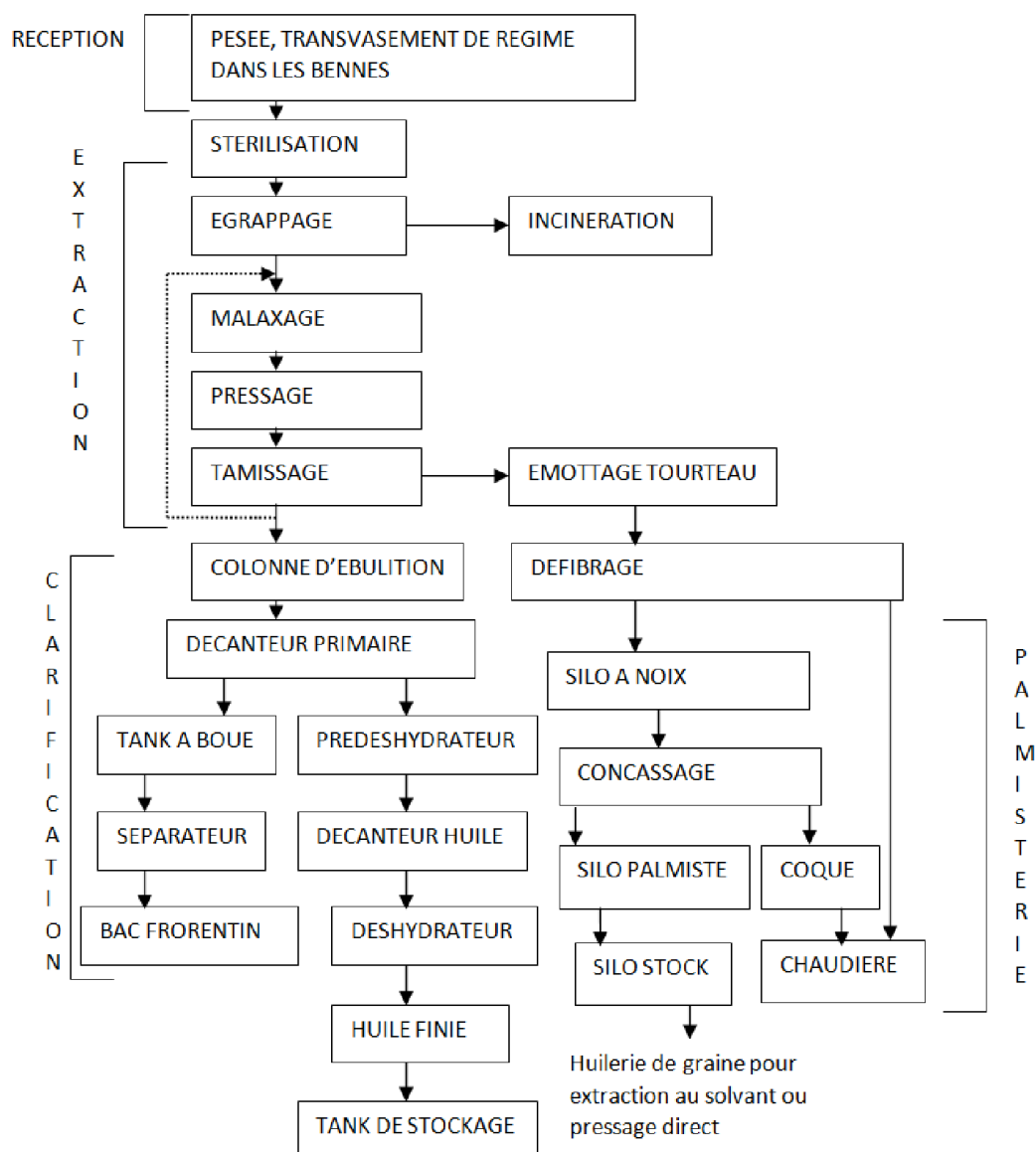


Fig. 1. Schéma synoptique de la production de l'huile de palme

2.3 CARACTERISATION DES PRODUITS

L'appareillage utilisé pour effectuer les analyses est constitué d'un réfractomètre (ABBE WYA-IS); d'un viscosimètre à chute de bille (PHYWE) et d'un viscosimètre à tube capillaire (HVU 482), d'un densimètre (DMA 4500 M), d'une balance numérique (OHAUS) de précision 0,001g et d'une balance numérique (Satorius) de précision 0,1 g d'un rotavapor (BÜCHI), d'une étuve (Memment West) et de la verrerie courante de laboratoire.

Les caractéristiques physicochimiques des produits étudiés ont été déterminées selon les normes AFNOR (1988) [16]; AFNOR (1999) [17] et ASTM ou par calcul d'après Ayuk et al. (1999) [18]; Batel et al. (1980) [19] et Aliou, (1996) [20]. Ce sont : l'indice d'acide, d'ester, de peroxyde, d'iode, de saponification et la teneur en eau et matières volatiles, la densité, la viscosité, l'indice cétane, l'indice de réfraction, et le pouvoir calorifique. Le tableau 1 donne un résumé des normes et des méthodes employées pour la caractérisation physicochimique des produits étudiés.

Tableau 1. Normes et méthodes de caractérisation physicochimique des produits étudiés

Caractéristiques physicochimiques	Normes ou méthodes
Indice d'acide et l'acidité	NFT60-204
Indice d'iode	UICPA 2.205
Indice de saponification	NF T 60-220
Indice d'ester	calculé
Indice de peroxyde	NE 1-2-50
Teneur en insaponifiables	NF T60-205N
Teneur en eau et en matières volatiles	NF T 60-201
Densité	ASTM D 4052 – 96
Viscosité cinématique	ASTM D445 – 11a.
Indice de réfraction	UICPA 2.102
Pouvoir calorifique inférieur	calculé
Indice de cétane	calculé

Le matériel informatique ayant servi à cette étude est constitué d'un ordinateur muni de logiciels de traitement des données et d'Office 2007.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 CARACTERISTIQUES DE L'HUILE DE PALME

Les caractéristiques physico-chimiques de l'huile de palme utilisée dans le cadre de ces travaux, déterminées et comparées à celles du gazole sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Quelques caractéristiques physico-chimiques de l'huile de palme comparées au gazole

	Unités	Huile de palme	gazole	Spécifications
Densité (15°C)	-	0,915	0,875	Min 0,820 Max 0,880
Viscosité à 37,8°C	cSt	34,564	4,28	Min 1,6 Max 5,9
Indice d'acide	mg de KOH/g	2,64	0,37	Max 0,50
Acidité	%	1,32	-	-
Indice de cétane		59,76	50	Min 45,0
Pouvoir calorifique inférieur	kJ/kg	39961,82	43178	Min 35000
Teneur en eau et matières volatiles	%	0,26	0,03	Max 0,05
Indice de réfraction		1,463	-	-
Indice d'iode	g d'iode/100g	49,60	-	-
Indice de peroxyde	még d'O ₂ /kg	4,67	-	-
Indice de saponification	mg de KOH/g	201,59	-	-
Indice d'ester	mg de KOH/g	198,95	-	-
Teneur en insaponifiables	%	3,82	-	-

3.1.1 DENSITE

Selon ce tableau, la densité de l'huile de palme (0,915) est largement supérieure à celui du gazole usuel (0,875) d'où loin de la spécification du gazole (Min 0,820 Max 0,880). En général, les huiles végétales ont une densité qui varie entre 0,90 et 0,93. Cette valeur est proche de celle trouvée par Firestone (1999) [21], dont les valeurs sont comprises entre 0,924 et 0,930. Toutefois, plusieurs chercheurs ont montré que la densité élevée des huiles a des effets néfastes sur les moteurs diesel [22]. En effet, les huiles végétales ont une inertie plus élevée que celle du gazole pour la même pression d'injection. Ainsi, la densité élevée des huiles végétales conduira à une augmentation de la longueur des jets de carburant, les entraînant au fond de la chambre de combustion.

3.1.2 VISCOSITE

Le tableau révèle aussi que la viscosité de l'huile de palme est largement supérieure à celle du gazole de 8,07 fois à 37,8 °C. Or, une viscosité élevée ne favorise pas la pulvérisation ou atomisation lors de l'injection du carburant. En effet, la pression nécessaire pour une injection devra augmenter ; ce qui conduira à une combustion incomplète provoquant ainsi des imbrûlées qui s'encrasseront sur les nez d'injecteur, les cylindres les pistons [4]. Ce fait conduira aussi à l'obstruction des organes d'alimentation du moteur [23].

3.1.3 INDICE D'ACIDE

Il ressort du tableau que l'indice d'acide de l'huile de palme est largement supérieur de celui gazole et de celui de la spécification. Quand bien même cette huile n'est pas considérée comme une huile végétale acide (acidité $\geq 3\%$), elle ne convient pas à un moteur. En effet, le comportement à la chaleur des huiles est très sensible à la présence de la moindre acidité. L'acidité a donc une très grande influence sur les phénomènes de stabilité thermique. En plus de ces phénomènes, elle favorise la corrosion des pièces métalliques lors de l'utilisation directe des huiles dans les moteurs [24].

3.1.4 TENEUR EN EAU ET MATIERES VOLATILES

Selon ce tableau, la teneur en eau et matières volatiles est au-delà de la spécification du gazole en zone tropicale. Par conséquent, cette huile n'est pas conseillée pour son utilisation directe dans un moteur.

De ce qui précède, il est à noter que la densité, la viscosité, et l'indice d'acide de l'huile de palme apparaissent ici comme des facteurs limitants à son utilisation directe dans un moteur diesel. Cela est en accord avec W. Bandel et al. (1983) [13] et G. Vaitilingom (2007) [25] qui soutiennent que parmi les caractéristiques physicochimiques des huiles, deux influencent directement le bon fonctionnement des moteurs diesels usuels : la viscosité élevée qui cause des problèmes d'ordre pratique et la composition chimique en gras qui entraîne une chaleur élevée d'évaporation et ne permet pas une distillation complète des huiles végétales. Dans le cadre de cette étude, leur valeur très éloignée des spécifications montrent qu'il est déconseillé d'utiliser cette huile dans un moteur diesel, d'où l'intérêt de procéder à sa transformation. Celle-ci a été entreprise par la méthode de la transestérification.

3.2 ETUDE DE LA DENSITE DES FLUIDES ETUDIÉS

La densité des fluides étudiés a été déterminée selon la méthode décrite plus haut. Les résultats ainsi obtenus sont consignés dans le tableau 3. Ces résultats sont obtenus avec une erreur de $\Delta d = \pm 0,001$.

Tableau 3. Valeurs des densités des fluides étudiés

Fluides étudiés	Densité à 30 °C
Huile de palme brute	0,913
Méthanol	0,786
Ethanol	0,785
Biodiesel méthylique	0,874
Biodiesel éthylique	0,902
gazole	0,874

Selon ce tableau 3, l'huile de palme brute est plus dense que le gazole et les alcools. Quant aux biodiesels, ils sont moins denses que l'huile de palme brute. La transestérification permet donc d'obtenir des biocarburants plus légers que l'huile de palme brute.

Aussi constatons-nous que le biodiesel méthylique est-il plus léger que le biodiesel éthylique. Ce fait est dû non seulement à la différence de la taille des molécules contenues dans ces deux produits, mais aussi au fait que la méthanolyse en milieu basique s'est bien effectuée contrairement à l'éthanolyse. Cela est traduit par le fait que la densité du biodiesel éthylique est proche de celle de l'huile de palme brute alors que celle du biodiesel méthylique est égale à celle du gazole. Le taux de conversion des triglycérides en esters est donc faible au cours de l'éthanolyse et élevé lors de la méthanolyse. Ces

résultats corroborent avec ceux de Meneghetti et al. (2006) [26] qui stipulent que l'éthanol est convenable pour les huiles acides pour une transestérification se déroulant en catalyse acide.

3.3 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE COEFFICIENT DE VISCOSITE CINEMATIQUE ν

Dans cette étude, les coefficients de viscosité des différents fluides ont été déterminés en fonction de la température thermodynamique avec une erreur de $\Delta\nu = \pm 0,01$ cSt. Les graphes sont représentés à la figure 2.

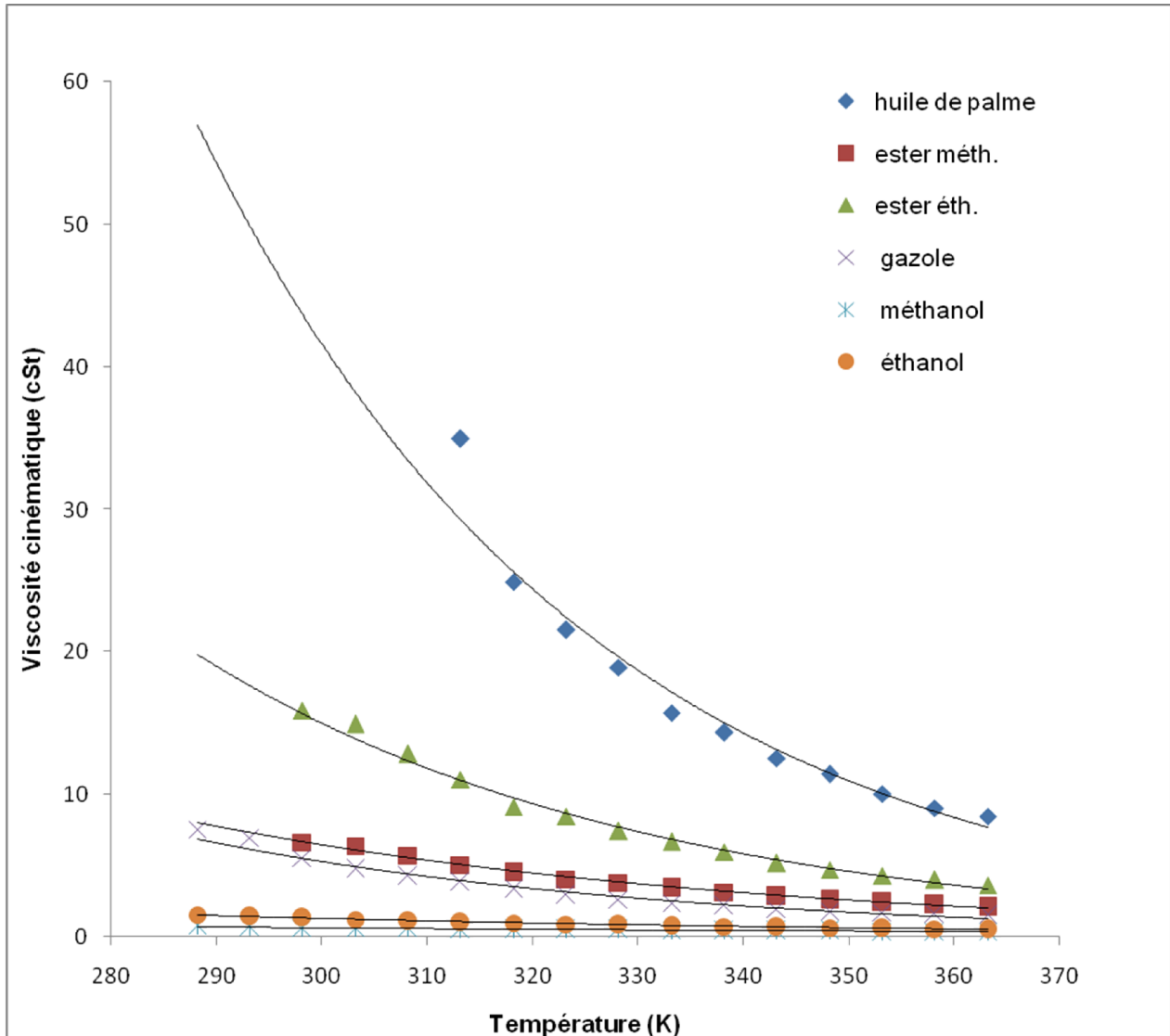


Fig. 2. Courbes de la variation de la viscosité cinématique des fluides en fonction de la température

Les courbes obtenues ici sont de types exponentiels. Les tendances des graphes de la figure 2 confirment que le coefficient de viscosité cinématique de l'huile de palme est plus élevé que celui du gazole. De plus, même l'huile chauffée à 90 °C, demeure toujours plus visqueuse que le gazole pris à 25 °C (avec un écart $\Delta\nu = 3$ cSt). Cette situation est bien illustrée par la figure 3, et confirme bien qu'il n'est pas conseillé d'utiliser l'huile de palme brute dans les moteurs diesel usuels.

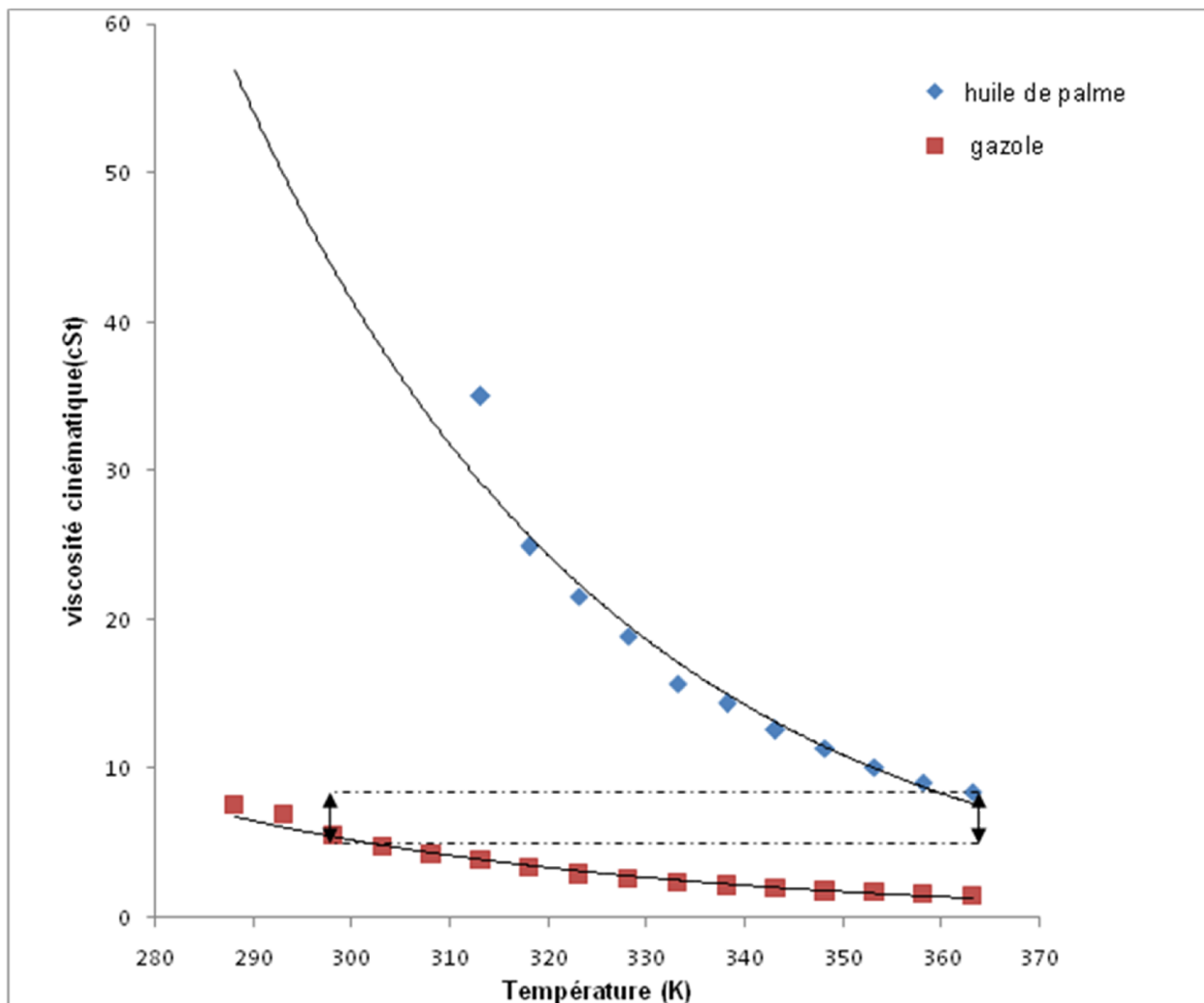


Fig. 3. Courbes comparatives de la variation du coefficient de viscosité cinématique de l'huile de palme et du gazole.

Aussi, selon la figure 2, la viscosité du biodiesel méthylique et celle du biodiesel éthylique se rapprochent-elle de celle du gazole, ce qui est intéressant pour leur utilisation dans les moteurs diesels usuels.

Par ailleurs, ces graphes montrent bien que le coefficient de viscosité cinématique de ces fluides décroît en fonction de la température. Cette variation est décrite par la formule de Eyring selon l'équation (1):

$$\eta = A e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

où E_a est l'énergie d'activation ; R , la constante des gaz parfaits ; T , la température absolue du liquide ; A , constante caractéristique du fluide et η , le coefficient de viscosité dynamique.

Le coefficient de viscosité cinématique est le rapport du coefficient de viscosité dynamique par la masse volumique du fluide.

$$\text{Soit } \nu = \frac{\eta}{\rho} \Leftrightarrow \nu = \frac{A}{\rho} e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

3.4 RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE VISCOSITE ET LA STRUCTURE MOLECULAIRE DES FLUIDES ETUDIES

La courbe de $\ln(\eta) = f\left(\frac{1}{T}\right)$ pour les liquides obéissant au modèle de Eyring est linéaire de coefficient $\frac{E_a}{R}$. La figure 4 traduit le lien entre la viscosité et la structure moléculaire des substances.

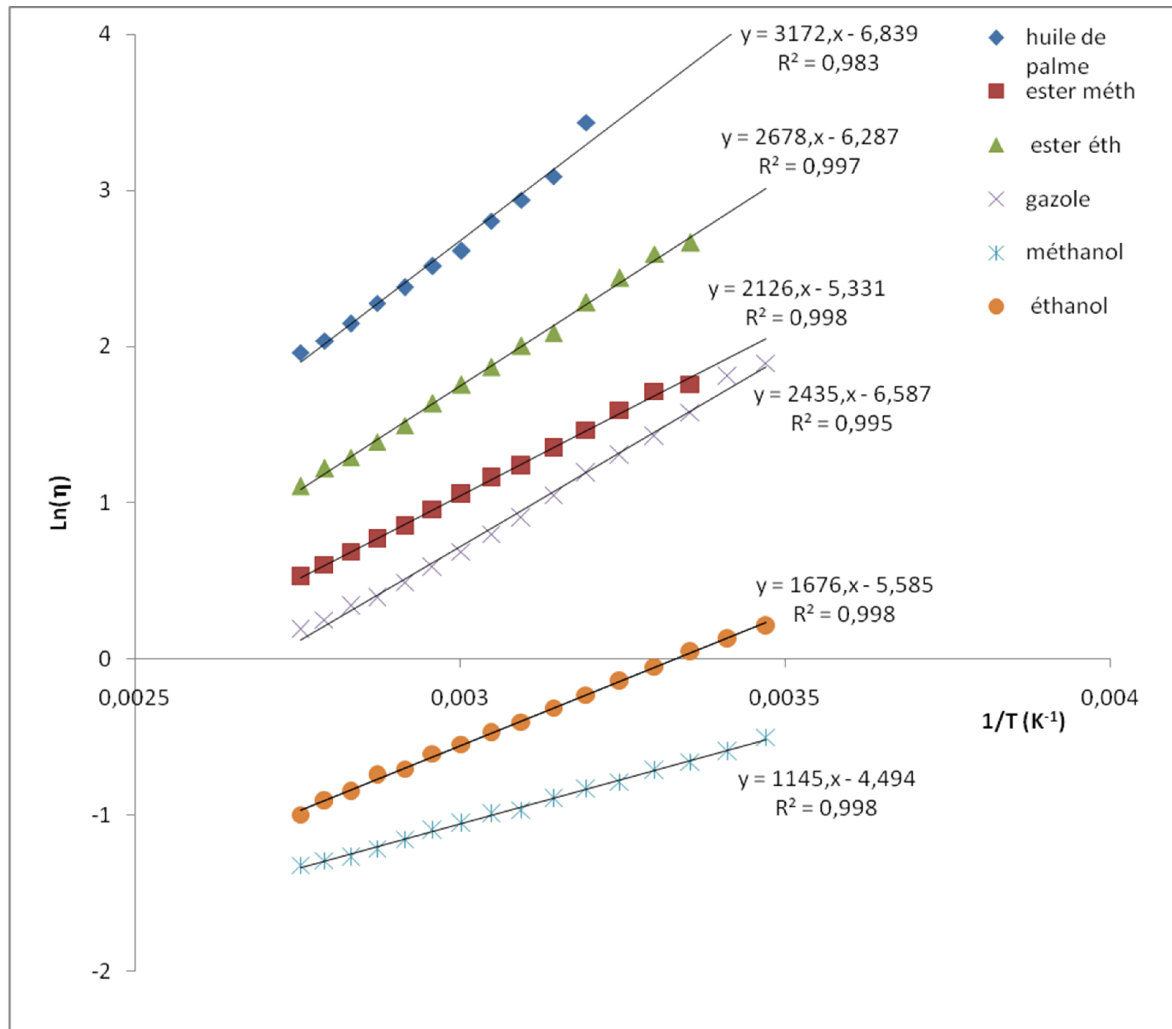


Fig. 4. Variation du $\ln(\eta)$ des substances étudiées en fonction de l'inverse de la température

Ces courbes ont permis de déterminer l'énergie d'activation de chaque fluide et de vérifier si le modèle de Eyring s'adapte bien aux différents fluides étudiés. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 4.

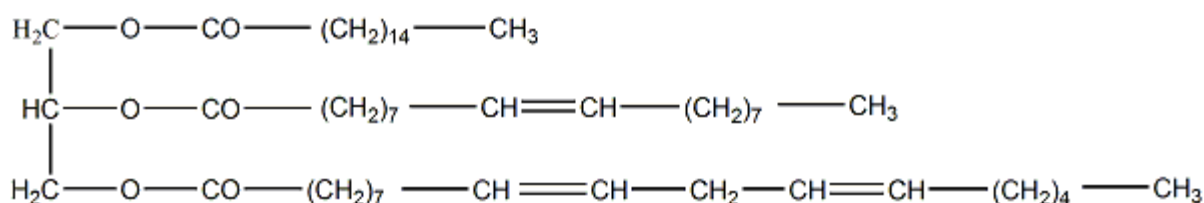
Tableau 4. Valeurs de l'énergie d'activation des fluides et des coefficients de corrélation

Fluides étudiés	Energie d'activation (J)	Coefficient de corrélation R^2
Huile de palme brute	26372,01	0,983
Gazole	20244,59	0,995
Biodiesel méthylique	17675,56	0,998
Biodiesel éthylique	22264,89	0,997
Ethanol	13934,26	0,998
Méthanol	9519,53	0,998

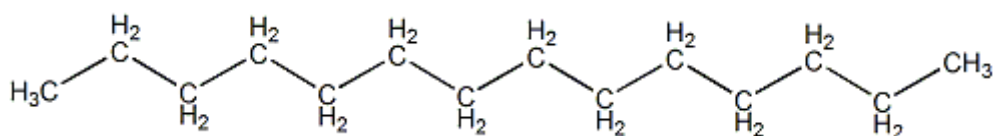
Dans ce tableau, les valeurs des coefficients de corrélation tendent vers 1 montrant que la variation du coefficient de viscosité dynamique η en fonction de la température T dans la gamme de température étudiée peut être effectivement décrite par la relation de Eyring.

De plus, ce tableau montre que l'huile de palme possède une énergie d'activation supérieure à celle du gazole, et que celles des biodiesels se rapprochent au mieux de celle du gazole. Tout cela confirme les différences de viscosité de ces différents fluides.

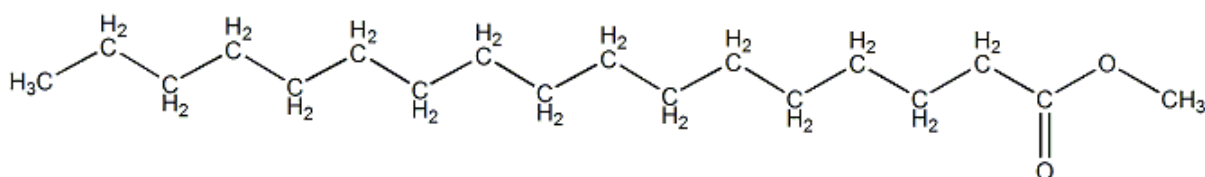
Par ailleurs, l'analyse des structures moléculaires de ces fluides selon le schéma 3, permet de justifier les résultats précédents.



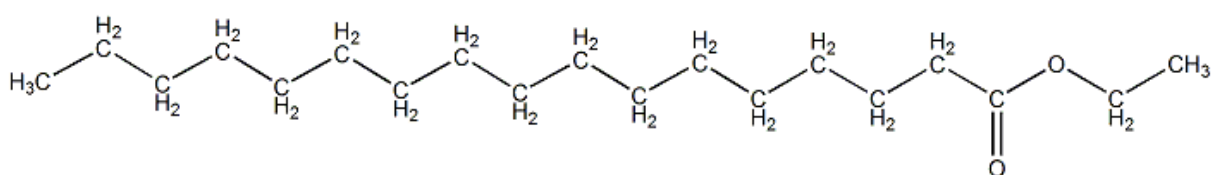
(a) Huiles de palme



(b)Gazole



(c) Ester méthylique



(d) Ester éthylique

Schéma 3. Structures moléculaires des fluides étudiés

Selon ce schéma, l'huile de palme brute est constituée de grosses molécules ramifiées (les triglycérides), alors que le gazole est constitué majoritairement d'alcane non ramifiés ayant un nombre de carbone compris entre 12 et 18. De ce fait, ces molécules d'alcane peuvent glisser plus facilement les uns sur les autres que les triglycérides. Ce qui explique la grande différence de viscosité entre le gazole et l'huile de palme. De plus, le fait que la viscosité des biodiesels se rapproche de celle du gazole stipule que lors de la transtestérification, les triglycérides ont été réduits à des esters méthyliques et éthyliques qui ont des structures moléculaires se rapprochant de celle du gazole comme le montre le schéma 3.

4 CONCLUSION

Cette étude a montré que l'huile de palme brute présente des caractéristiques très différentes du gazole usuel. Même quand elle est chauffée à 90°C, elle demeure plus visqueuse que le gazole pris à 25 °C ($\Delta\nu = 3$ cSt). Ce constat confirme bien qu'il n'est pas conseillé d'utiliser l'huile de palme brute dans les moteurs diesel usuels ; ce qui justifie sa transformation par la transestérification.

Ce procédé a permis d'obtenir des biodiesel plus légers que l'huile de palme brute, le biodiesel méthylique étant à son tour plus léger que le biodiesel éthylique.

Les courbes de types exponentiels obtenues en fonction de la température montrent que la variation de la viscosité cinématique en fonction de la température suit la loi de Eyring. La courbes de $Ln(\eta) = f\left(\frac{1}{T}\right)$ obtenues avec des coefficients de corrélation proches de 1 permettent de valider la formule de Eyring. Ce qui révèle que les biodiesels obtenus sont newtoniens.

Quant à la viscosité du biodiesel méthylique et du biodiesel éthylique elles se rapprochent de celle du gazole. La comparaison des énergies d'activation des fluides montre que l'huile de palme possède une énergie d'activation supérieure à celle du gazole contrairement à celles des biodiesels qui se rapprochent de celle du gazole. Par ailleurs, l'analyse des structures moléculaires des produits étudiés justifie les différences de densité et de viscosité des fluides étudiés.

REFERENCES

- [1] Ayhan Demirbas, "Progress and recent trends in biodiesel fuels", *Energy Conversion and Management*, 50, pp. 14–34, 2009.
- [2] Jon Van, Gerpen, Gerhard Knothe, *The Biodiesel Handbook*, AOCS Press, 2005.
- [3] O.M.I.N Wafor, "Emission characteristics of diesel engine operating on rapeseed methyl ester", *Renewable Energy*, 29, pp. 119-129, 2004.
- [4] B. Tesfa, R. Mishra, F. Gu, A.D. Ball, "Water injection effects on the performance and emission characteristics of a CI engine operating with biodiesel", *Renewable Energy*, 37, pp. 333 – 344, 2012.
- [5] Mustafa Balat, Havva Balat, "Progress in biodiesel processing", *Applied Energy*, 87, pp. 1815–1835, 2010.
- [6] Ashraful, A. M., H. H. Masjuki, M. A. Kalam, I. M. R. Fattah, S. Imtenan, S. A. Shahir and H. M. Mobarak, "Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review", *Energy Conversion and Management*, 80, pp.202-228, 2014.
- [7] Banapurmath, N. R., P. G. Tewari and R. S. Hosmath, "Performance and emission characteristics of a DI compression ignition engine operated on Honge, Jatropha and sesame oil methyl esters," *Renewable Energy*, vol. 33, n°9, pp.1982-1988, 2008.
- [8] G. Vermeersch, "Utilisation énergétique des huiles végétales et de leurs produits de la transestérification", *CEMAGREF, BTMEA* ; n° 30, pp. 10-15,1988.
- [9] Gille Vaitiligom, "Utilisation des huiles végétales comme carburant des moteurs diesel *Oléagineux*, 38, n° 8-9, pp.497-502, 1983.
- [10] Abollé A., *Transformation des huiles végétales en carburant*, Thèse de docteur ingénieur, Université de Cocody, Abidjan, 1999.
- [11] Ulf Schuchardt, Ricardo Serchelia, and Rogério Matheus Vargas, "Transesterification of Vegetable Oils: a Review", *J. Braz. Chem. Soc.*, vol. 9, n° 1, pp. 199-210, 1998.
- [12] Z. Helwani, M.R. Othman, N. Aziz, W.J.N. Fernando, J. Kim, "Technologies for production of biodiesel focusing on green catalytic techniques: A review", *Fuel Processing Technology*, 90, pp.1502–1514, 2009.
- [13] W. Bandel et W. Heinrich, "Les carburants dérivés des huiles végétales et les difficultés relatives à leur utilisation dans les moteurs diesel", *Oléagineux*, 38, n° 07, pp. 445-449, 1983.
- [14] Lozada, I., Islas, J., Grande, G., "Environmental and economic feasibility of palm oil biodiesel in the Mexican transportation sector", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 486–492, 2010.
- [15] Meisam H., Meisam T., "Upstream and downstream strategies to economize biodiesel production", *Bioresource Technology*, 102, pp. 461–468, 2011.
- [16] AFNOR, Corps gras d'origine animale et végétale ; Détermination de la teneur en matières insaponifiables: Corps gras, graines oléagineuses, produits dérivés. Tome 1: Corps gras et produits derives, AFNOR, Paris, 1988.
- [17] AFNOR, Corps gras d'origine animale et végétale ; Détermination de l'indice d'acide et de l'acidité : Corps gras, graines oléagineuses, produits dérivés. Tome 1 : Corps gras et produits dérivés ; AFNOR, Paris, 1999.

- [18] Ayuk et al, P., "Uses, management and economic potential of *Irvingia gabonensis* in the humid lowlands of Cameroon", *Forest Ecol. Manag.*, 113, pp. 1–9, 1999.
- [19] Batel, F., "Pflanzenolefurfür die Kraftstoff-und Energieversorgung", *Grundlagen der Landtechnik*, pp. 40-51, 1980.
- [20] Aliou Ousmane Haïdara, *Valorisation d'huile végétale tropicale : l'huile de pourghère*, Mémoire de Maîtrise des Sciences Appliquées, Université de SHERBROOKE, Canada, 1996.
- [21] Firestone, D., *Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats and Waxes*, AOCS Press, 1999.
- [22] Abollé A., Loukou K., Planche H., "The density and cloud point of diesel oil and mixture with the straight vegetable oil (SVO): Palm, Cabbage, Cotton, Groundnut, Copra and sunflower", *Biomass and Bioenergy*, 33, pp.1653-1659, 2009.
- [23] Abollé A., Loukou K., Planche H., "The viscosity of diesel oil and mixture with the straight vegetable oil (SVO Palm, Cabbage, Cotton, Groundnut, Copra and sunflower)" *Biomass and Bioenergy*; 33; pp. 1116-112, 2008.
- [24] R. Stern, O. Perdu, G. Hillion, "Gasoils de substitution à partir d'esters d'huiles végétales : Une opportunité pour certains pays ?", *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, vol. 42, n°6, pp. 883-893, 1988.
- [25] Gille Vaitilingom, " Enjeux et perspective des biocarburants pour l'Afrique", Conférence Internationale, Burkina Faso, 2007.
- [26] Meneghetti PSM, Meneghetti MR, Wolf CR, Silva EC, Lima GES, Coimbra DA, "Ethanolysis of castor and cottonseed oil: a systematic study using classical catalysts", *J. Am Oil Chem. Soc.*, 83, pp. 819–22, 2006.