

Evaluation des Performances et des Emissions Polluantes d'un Moteur Diesel à Injection indirecte Fonctionnant avec différentes Huiles Végétales et leurs Mélanges au Gas-oil

Tizane Daho¹, Oumar Sanogo^{2*}, Hervé Jeanmart³, Jean Kouliadiati¹

¹*Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées, Université de Ouagadougou, 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso*

²*Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies, Centre National de Recherche Scientifique et Technologique (IRSAT/CNRST), 03 BP 7047 Ouagadougou 03, Burkina Faso*

³*Unité de Thermodynamique, Université catholique de Louvain, Place du Levant, 2 B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique*

(Reçu le 03/11/2007 – Accepté après corrections le 22/05/2008)

Résumé

Dans cette étude, les huiles de coton, de palme et de coprah, produites ou disponibles localement, sont utilisées sous forme pure ou sous forme de mélange au gas-oil dans un moteur diesel à injection indirecte (4 temps et 4 cylindres). L'évaluation des performances et des émissions polluantes est effectuée. Le comportement global de ces différentes huiles végétales ou leurs mélanges au gas-oil ainsi que leurs particularités par rapport au gas-oil pur sont mis en évidence. On note une baisse du couple et une augmentation de la consommation spécifique avec l'augmentation de la proportion d'huile végétale. Les émissions de monoxyde de carbone (CO) augmentent avec la proportion d'huile végétale dans le mélange en raison de l'augmentation de la viscosité et de la réduction de la volatilité. Quant aux émissions des oxydes d'azote (NO_x), elles varient très peu pour l'ensemble des carburants testés. Enfin, les émissions directes de dioxyde de carbone (CO₂) et de dioxyde de soufre (SO₂) sont favorables aux huiles végétales ou leurs mélanges au gas-oil.

Mots clés : Huile végétale, Gas-oil, Moteur diesel, Injection indirecte, Performances, Emissions

Summary

In this paper, the performances and the emissions characteristics of an indirect injected four strokes, four cylinders engine using vegetable oils, produced or available locally, (cotton oil, palm oil and coconut oil) are investigated. The similarities and the particularities of these vegetable oils and their blends with diesel in comparison with pure diesel are shown. The results show a reduction of couple and an increase of brake specific fuel consumption with the percentage of vegetable oils in the fuel. There is an increase in carbon monoxide (CO) emissions with the percentage of vegetable oil due to the viscosity rising and the volatility reduction. There is no change in nitrogen oxides (NO_x) emissions with all fuels. The different vegetable oils and their blends with diesel are environmentally friendly concerning carbon dioxide (CO₂) and sulphur dioxide (SO₂) emissions.

Keywords : Vegetable oils, Diesel, Diesel engine, Indirect injection, Performances, Emissions

* Auteur de correspondance : sanogo_oumar@hotmail.com

1. Introduction

L'une des raisons de l'intérêt accordé actuellement aux carburants d'origine végétale est sans conteste le rôle qu'ils pourraient jouer dans la réduction des émissions des gaz à effet de serre (GES). Le gain en termes de réduction d'émissions peut atteindre 60 à 90 % pour les meilleures de ces filières^[1]. Le bilan peut être beaucoup plus mitigé dans d'autres cas. Toutefois, ces huiles végétales se présentent comme une source potentielle de réduction des émissions polluantes et cancérigènes^[2]. Outre cet aspect environnemental, les biocarburants apparaissent comme une solution stratégique dans un contexte mondial marqué par la diminution des réserves mondiales de pétrole, la hausse et l'instabilité des prix du pétrole. On distingue de nos jours deux principaux groupes de biocarburants :

- Les biocarburants dits de « première génération » à savoir l'éthanol issu des matières amylacées et sucrées par fermentation et les huiles végétales (huile végétale pure et biodiesel) ;
- Les biocarburants dits de « seconde génération » à savoir l'éthanol cellulosique le biomethanol, le gaz naturel de synthèse, les carburants issus de la synthèse Fischer Tropsch, l'huile de pyrolyse.

Les huiles végétales, pourraient être une alternative au gas-oil pour certains pays en développement. Ces huiles pourraient être utilisées comme carburant (sous forme d'ester éthylique ou méthylique) pour le transport ou même en « circuit court » (huile végétale pure) dans des usages spécifiques tels que la production locale d'électricité ou d'énergie mécanique etc.^[3] Malgré un indice de cétane compatible avec un usage dans un moteur diesel, leur utilisation directe (sans modification du moteur) peut être préjudiciable sous certaines conditions en raison de la forte viscosité des huiles. Une telle utilisation peut provoquer des dépôts ou des

encrassements dans certains types de moteurs (injection directe), un accroissement du niveau de certains polluants etc. En effet, dans un moteur diesel à injection directe, la température relativement basse dans la chambre de combustion, à faible charge, conduit à la formation de dépôts^[3] au cours de la combustion de l'huile. Les raisons majeures sont la viscosité élevée des huiles végétales et leur faible volatilité^[4, 5, 6, 7]. D'autres auteurs associent à ces caractéristiques physiques, la nature des acides gras présents dans l'huile végétale ; les acides gras polyinsaturés favorisent la formation de dépôts^[8, 9]. En revanche, dans un moteur diesel à injection indirecte, les niveaux de température plus importants dans la chambre de combustion, permettent une évaporation et une combustion sans dépôt « anormal ». Les huiles végétales seraient utilisables (pures ou en mélange au gas-oil) dans les moteurs diesel à injection indirecte sans modification majeure dans toutes les conditions de charges du moteur et sans provoquer de dépôts^[3, 6, 8, 10]. Si le comportement des huiles végétales (performances, dépôts et encrassements) en tant que carburant pour les moteurs diesel à injection directe ou indirecte fait l'unanimité, il existe des divergences sur les niveaux des émissions polluantes. Cela est lié entre autres, à la nature chimique de l'huile utilisée, aux méthodes d'évaluation, et aux conditions différentes d'essais. Seuls des essais de caractérisation spécifiques à chaque huile ou ses mélanges au gas-oil, permettent de déterminer ses potentialités en tant que carburant. L'objectif principal de cette étude est la caractérisation de la combustion d'huiles produites ou disponibles au Burkina Faso dans un moteur diesel à injection indirecte. Les huiles végétales utilisées sont les huiles de coton, de palme et de coprah. Ces huiles sont utilisées pures ou en mélange au gas-oil dans le moteur d'essai. Les performances et les émissions de gaz à l'échappement sont déterminées lors du

fonctionnement du moteur d'essai avec différents mélanges. Le gas-oil sert de référence, les huiles de coprah et de palme sont utilisées à titre comparatif.

2. Matériels et méthodes

Les essais ont été réalisés sur un moteur diesel à injection indirecte dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau I. Ce moteur est installé sur un banc d'essai comportant, en plus du moteur, un frein dynamométrique à courant de Foucault et un dispositif de commande. La figure 1 donne le schéma du dispositif expérimental.

Tableau I : Spécifications du moteur d'essai

Caractéristique	Spécification
Type	Mercedes 190 diesel, quatre temps, refroidissement à eau
Combustion	Injection indirecte, injectrice à tétons tarés à 180 bars
Nombre de cylindres	4
Alésage	87 mm
Course	84 mm
Cylindrée	1997 cm ³
Puissance maximale (constructeur)	53 kW à 4600 tr/min
Couple maximal (constructeur)	123 Nm à 2800 tr/min

La mesure du couple s'effectue grâce à un frein dynamométrique couplé à l'arbre du moteur. Les réglages de la vitesse de rotation du moteur et de sa charge sont effectués à partir du dispositif de contrôle du moteur et du frein. Le débit volumique de carburant est déterminé grâce à une jauge portant deux graduations qui servent de repère. Le temps de vidange de la jauge (lorsque la vanne de communication du réservoir au reste du circuit d'alimentation est fermée) permet d'évaluer le débit volumique du carburant. Le réservoir de biocarburant est muni d'une résistance chauffante comportant un thermostat. Le

débit d'air est évalué par la méthode de dépression à travers un diaphragme monté avant un caisson de tranquillisation. Enfin l'analyse des émissions des gaz à l'échappement est réalisée à l'aide d'un analyseur de gaz HORIBA PG250 muni d'un pré-échantillonneur PS 200.

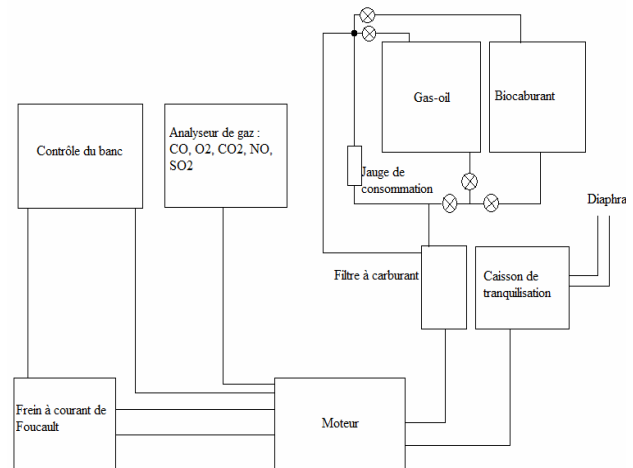


Figure 1 : Dispositif expérimental

Les caractéristiques techniques de l'analyseur de gaz HORIBA P G250 sont indiquées dans le tableau II : Les trois huiles végétales et le gas-oil utilisés proviennent respectivement du Burkina Faso (huile de coton), de Côte d'Ivoire (huiles de palme et de coprah) et de Belgique (gas-oil).

Tableau II : Caractéristiques techniques de l'analyseur HORIBA PG 250

Gaz	Détecteur	Résolution n	Echelle	Répétabilité
CO	Infrarouge	1 ppm	0-5000 ppm	±0,5% (CO<1000 ppm)
CO ₂	Infrarouge	0,1%	0-20%	-
O ₂	Cellule galvanique	0,1%	0-25%	-
No	Chimiluminescence	1 ppm	0-5000 ppm	±0,5% (NO _x <1000 ppm)
SO ₂	Infrarouge	1 ppm	0-3000 ppm	-

Le tableau III donne les compositions des mélanges testés.

Tableau III : Composition de carburants utilisés

Carburant	Composition
GO	Gas-oil pur
HC100	Huile de coton pure
HC70	70 % huile de coton + 30 % gas-oil
HC50	50 % huile de coton + 50 % gas-oil
HP100	Huile de palme pure
HP70	70 % huile de palme + 30 % gas-oil
HP50	50 % huile de palme + 50 % gas-oil
Hcop100	Huile de coprah pure
Hcop70	70 % huile de coprah + 30 % gas-oil
Hcop50	50 % huile de coprah + 50 % gas-oil

La température ambiante lors des mesures est d'environ 19 °C. A cette température, seuls l'huile de coton et le gas-oil sont liquides. Le gas-oil et l'huile de coton (y compris les mélanges des deux) sont utilisés à la température ambiante (19 °C). Les huiles de palme et de coprah sont pratiquement solides à la température ambiante du fait de leur point de fusion supérieur à 20 °C (23/26 °C pour l'huile de coprah et 23/40 °C pour l'huile de palme [8]). En effet, les acides gras saturés (acides gras majoritaires de ces deux huiles) ont des points de fusion relativement élevés [11]. Ainsi, pour permettre l'utilisation de ces huiles ou leurs mélanges, ils sont réchauffés à la température de 50 °C grâce au réservoir chauffant.

Les carburants sont testés à la même charge (pleine charge) après une période de préchauffage du moteur (15 min de fonctionnement au ralenti). Pour différentes vitesses de rotation du moteur (1500-4000 tr/min), le couple, la consommation, la dépression au diaphragme, les émissions (CO, CO₂, O₂, NO_x, SO₂) sont déterminées après une période de stabilisation du moteur à chaque régime. Les résultats présentés ci-dessous sont ceux obtenus au point de fonctionnement correspondant au couple maximal. Ces résultats sont obtenus à

l'issue de plusieurs séries de mesures pour chaque carburant dans les mêmes conditions d'essais.

Les caractéristiques physico-chimiques du gas-oil et celles des huiles végétales utilisées sont indiquées dans le tableau IV. Certaines caractéristiques ont été déterminées dans cette étude ; d'autres caractéristiques (en « italique » dans le tableau IV) sont tirées de la littérature [3, 4, 12, 13, 14]. La détermination du pouvoir calorifique inférieur (PCI) est effectuée par une évaluation du PCS à l'aide d'une bombe calorimétrique suivant la norme ASTM D240. La masse volumique et la viscosité cinématique sont déterminées respectivement suivant la norme NF T60 101 (ISO 3675) et la norme NFT 60100 (ISO 3104.3105). Le point éclair est évalué suivant la norme NF EN 22719 (ISO 2719). Enfin les points de trouble et d'écoulement sont déterminés suivant la norme NF T60 105 (ISO 3016).

Tableau IV : Caractéristiques physico-chimiques du gas-oil et des huiles végétales utilisées

Carburant	GO	HC100	HP100	Hcop100
Formule chimique	<i>CH_{1,73}</i>	<i>CH_{1,81}O_{0,10}</i>	<i>CH_{1,84}O_{0,11}</i>	<i>CH_{1,95}O_{0,15}</i>
Masse volumique à 20°C (kg/m ³)	844	921	915	915
Viscosité à 40°C (mm ² /s)	4 ^a	38 ^a	60	30
PCI (kJ/kg)	42750	36420	36060	34315
Indice de cétane	50	34	39	43
Point de trouble (°C)	<-5	0	31	28
Point d'écoulement (°C)	-18	-3	23/40	23/26
Point éclair (°C)	93	>200	280	230

^a Viscosité à 37,8°C

Tableau V : Erreurs et incertitudes sur les grandeurs déterminées

Grandeur	Erreurs/Incertitudes
Couple	±1Nm

Vitesse	± 5 tr/min
Consommation spécifique	3%
CO	±0,5% (CO<1000 ppm) ^b
CO ₂	-
O ₂	-
NO	±0,5% (NO _x <100 ppm) ^b
SO ₂	-

^b Répétabilité

3. Résultats et discussions

3.1 Performances

Le couple maximal est obtenu à 3000 tr/min pour l'ensemble des combustibles. La figure 2 donne le couple maximal obtenu avec les différents combustibles pour la même charge du moteur (la quantité volumique de carburant injectée est la même). Le couple décroît avec le pourcentage d'huile dans le mélange pour les trois types d'huiles. Par ailleurs, les trois types d'huiles ont un comportement global similaire : pour un pourcentage de mélange les évolutions du couple sont du même ordre de grandeur quel que soit le type d'huile. La baisse de couple par rapport au gas-oil varie de 4 à 9% pour les mélanges contenant 50% d'huile, de 7 à 11% pour les mélanges contenant 70% d'huile et de 9 à 14% pour les huiles pures. Ces résultats sont similaires aux observations faites sur la puissance du moteur. Ils s'expliquent par le fait que le PCI des huiles végétales est plus faible (15% environ pour le PCI massique) que celui du gas-oil. Ainsi, la baisse du PCI avec l'augmentation du pourcentage d'huile dans le mélange conduit à la baisse du couple. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par d'autres auteurs [6, 15, 16]. La baisse importante du couple, observée avec l'huile de coprah s'explique par son PCI plus faible comparé à celui de l'huile de coton et de l'huile de palme (tableau IV).

L'augmentation de la consommation spécifique par rapport au gas-oil varie de 3 à 6% pour les mélanges contenant 50% d'huile, de 6 à 10% pour les mélanges contenant 70% d'huile et de 11 à 20% pour les huiles pures. Ces augmentations sont

significatives compte tenu des incertitudes de l'ordre de 3% dans la détermination de la consommation spécifique (tableau V). Ces résultats confirment l'influence du PCI des différents carburants sur les performances du moteur. A quantité d'énergie égale, plus le PCI est faible, plus la masse de carburant nécessaire augmente. L'étude des facteurs de performances du moteur a révélé un bon comportement de celui-ci pour chacun des carburants utilisés. La dilution des trois huiles avec 50% de gas-oil, permet d'obtenir des performances très comparables à celles obtenues avec le gas-oil pur sur un moteur diesel à injection indirecte en conformité avec des travaux antérieurs [3, 6, 15, 16] : les écarts constatés sur les couples et les consommations spécifiques sont inférieurs à 10%.

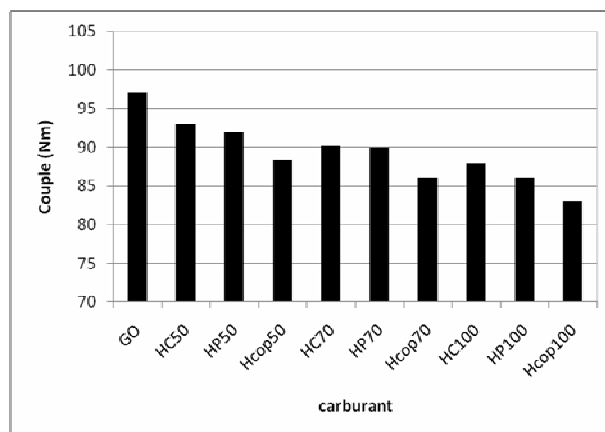


Figure 2 : Couple maximal avec les différents combustibles

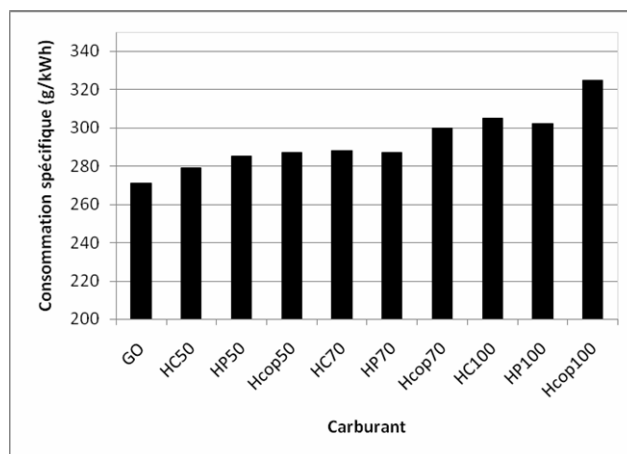


Figure 3: Consommation spécifique à 3000 tr/min

3.2 Emissions

Dans une perspective d'analyse de l'impact environnemental global de l'utilisation des huiles végétales comme carburant, tous les facteurs d'émissions sur leur cycle de vie sont pris en compte. Ces analyses complexes prenant en compte de nombreux intrants ne seront pas abordées dans ce travail. En se focalisant sur l'aspect utilisation comme carburant, le bilan carbone des huiles végétales montre leur potentiel important de réduction des gaz à effet de serre en ce sens que le terme « source » de CO₂ émis par la combustion des huiles végétales est compensé par le terme « puits » de fixation de CO₂ lors de la photosynthèse au niveau de la biomasse. Dans ce qui suit, l'analyse de l'évolution des produits de combustion des huiles végétales ou de leurs mélanges au gas-oil dans un moteur diesel est effectuée.

La figure 4 présente les émissions de monoxyde de carbone (CO) à 3000 tr/min produit par le moteur lorsqu'il est alimenté par les différents carburants. Les valeurs des émissions de CO sont rapportées à la quantité d'énergie consommée. On peut noter que l'ensemble des trois huiles végétales, pures ou en mélange au gas-oil, ont des niveaux d'émission de CO plus élevés que ceux observés avec le gas-oil pur.

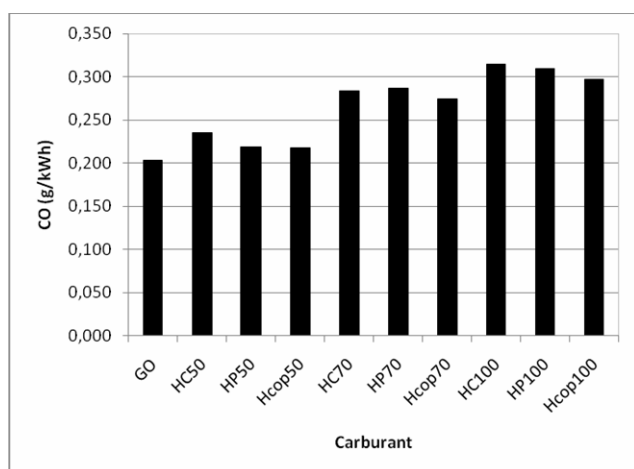


Figure 4 : CO à 3000 tr/min

Ces niveaux d'émissions de CO augmentent avec la proportion d'huile dans le carburant. Par ailleurs, les trois huiles ont un comportement global similaire ; pour une même proportion d'huile dans le mélange, les niveaux de CO sont comparables dans la limite de la précision des mesures (10%). Ce comportement des huiles végétales pourrait s'expliquer par la faible atomisation des différents carburants à base d'huile végétale, due à la viscosité relativement plus élevée et la volatilité plus faible de celles-ci. En effet, la plus forte viscosité des huiles végétales conduit à des nombres de Reynolds (Re) et de Ohnesorge (Oh) du jet (dans le cylindre) plus faibles que ceux d'un jet de gas-oil dans les mêmes conditions [6]. On obtient une granulométrie déterminée par un diamètre moyen de Sauter élevée. Cet effet, combiné avec la faible volatilité de l'huile végétale, a pour conséquence une vaporisation incomplète (« sprays incomplets ») conduisant à de fortes richesses locales [17, 18]. L'augmentation des niveaux d'émissions de CO avec le pourcentage d'huile, pourrait être liée à l'augmentation de la viscosité avec le pourcentage d'huile (dégradation de la qualité du spray). Le renchérissement du niveau de CO peut atteindre 50% avec les huiles pures [6]. Dans notre cas, on observe une augmentation des niveaux de CO d'au moins 7% pour les mélanges à 50% d'huile et de 46 à 55% pour les huiles pures par rapport au gas-oil pur. D'autres auteurs [19, 20] observent des niveaux de CO inférieurs à ceux du gas-oil par préchauffage de l'huile à des températures supérieures ou égales à 50 °C. Ce constat n'a pas pu être confirmé lors des essais rapportés ici. Les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) à 3000 tr/min présentés sur la figure 5 montrent des variations très faibles pour l'ensemble des combustibles, même si l'on peut noter une légère augmentation des niveaux suivant le pourcentage d'huile dans le carburant. Selon le type et la teneur en huile dans le carburant, les variations de NO_x par rapport au gas-oil se situent entre

-1 et +9%. Il faut cependant signaler que d'autres études indiquent que les émissions de NO_x sont inchangées ou réduites avec les huiles végétales pures [4, 6, 15, 17, 21]. En effet, la légère baisse de couple observée avec les huiles et leurs mélanges au gas-oil pourrait avoir pour conséquence, la réduction de la température moyenne dans la chambre de combustion. Par conséquent, le NO (thermique), constituant principal des NO_x dans le cas des moteurs, est réduit. Plus la baisse de puissance est importante, plus la baisse de NO_x est importante. Des études sur des moteurs ont parfois montré que la teneur en NO_x dans les gaz d'échappement croît linéairement avec la baisse de l'indice de cétane [22, 23]. Avec des indices de cétane plus faibles des huiles végétales ou de leurs mélanges, l'on pourrait s'attendre à des émissions de NO_x plus élevées qu'avec le gas-oil.

Sur la figure 6, on peut observer que les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) apparaissent relativement plus faibles avec les huiles végétales et leurs mélanges qu'avec le gas-oil pur. Elles sont du même ordre de grandeur pour l'ensemble des trois huiles et leurs mélanges au gas-oil, avec une tendance à la baisse lorsque la proportion d'huile augmente dans le carburant. Ce résultat est en cohérence avec l'augmentation ci-dessus observée du CO. En effet, en augmentant la teneur des carburants en huile végétale la conversion de CO en CO₂ est réduite ce qui maintient élevé le niveau de CO au détriment du CO₂. En outre, la teneur plus élevée en hydrogène dans les huiles végétales (rapport H/C plus élevé, voir Tableau IV) tend à réduire les émissions de CO₂ au profit de la vapeur d'eau.

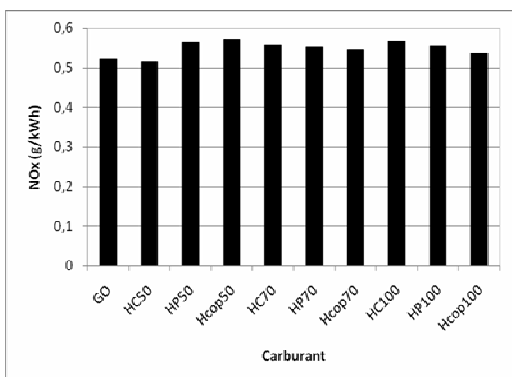


Figure 5 : NO_x à 3000 tr/min

Les émissions de dioxyde de soufre (SO₂) sont pratiquement nulles pour le gas-oil utilisé ainsi que pour l'ensemble des carburants à base d'huiles végétales. La moyenne est de 1 ppm pour l'ensemble des carburants. Cette valeur n'est pas significative compte tenu des incertitudes de mesure. Ce résultat est lié au fait que la teneur en soufre du gas-oil utilisé est pratiquement nulle (exigences des spécifications du gas-oil européen). En effet, la production du dioxyde de soufre est une fonction croissante de la teneur en soufre dans le combustible [14]. De plus, les huiles végétales ne contiennent pas de soufre. Cela explique le résultat observé avec les huiles végétales ou leurs mélanges en termes d'émissions de SO₂. Des résultats similaires ont été obtenus par d'autres auteurs [6].

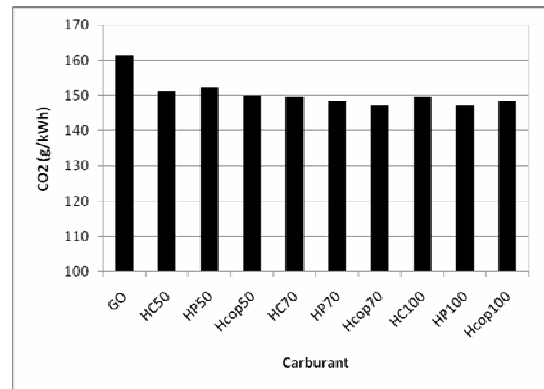


Figure 6 : Dioxyde de carbone à 3000 tr/min

Les réglementations en vigueur dans certains pays en développement autorisent des valeurs limites de teneur en soufre du gas-oil pouvant atteindre 1% (en masse). Dans ce cas, l'utilisation des huiles végétales ou leurs mélanges au gas-oil présenterait un réel intérêt en termes de réduction de SO₂ comparativement aux pays développés où les teneurs des carburants en soufre sont réglementées en dessous de 0,05% (en masse).

4. Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer le comportement (performances et émissions)

de différentes huiles végétales en cas d'utilisation comme carburant de substitution au gas-oil dans un moteur à injection indirecte non modifié fonctionnant dans des conditions de réglages au gas-oil. Le comportement global des différentes huiles végétales (pures ou en mélange au gas-oil) est similaire à celui du gas-oil pur. Cependant il n'est pas exclu, qu'à faible charge, l'usage des huiles végétales comme carburant conduise à des dépôts qui à terme seraient préjudiciables à la qualité de la combustion et à la tenue mécanique du moteur. On note aussi qu'en raison du PCI plus faible des huiles végétales, il y a une baisse du couple et une augmentation de la consommation spécifique lorsque la proportion d'huile dans le carburant augmente. Quant aux émissions polluantes, elles augmentent pour le CO mais restent conformes aux normes d'émissions. Les NO_x augmentent légèrement. Les émissions directes de CO₂ diminuent avec l'augmentation de la proportion d'huile dans le carburant. Les résultats confirment d'une part, l'importance des conditions de fonctionnement sur les résultats des émissions. D'autre part, ils révèlent le caractère particulier de chaque huile en tant que carburant diesel. En d'autres termes, des conditions standards de fonctionnement du moteur au gas-oil, ne permettent pas une combustion optimale des huiles végétales sans aucune modification des caractéristiques physico-chimiques de l'huile (viscosité) et des conditions d'injection (pression d'injection, avance à l'injection, etc.). Enfin, si l'utilisation des carburants à base d'huile végétale est intéressante en termes d'émissions de GES (CO₂ en particulier) et de dioxyde de soufre, il est nécessaire d'utiliser chaque carburant dans ses conditions optimales de fonctionnement. Cela, pour espérer une réduction des émissions des autres polluants. Cela devra être pris en compte dans la suite des travaux, avec une attention particulière sur les émissions polluantes telles les

particules, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les composés organiques volatiles (COV) et les hydrocarbures imbrûlés (HC).

Remerciements

Les auteurs tiennent à saluer la collaboration entre le Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement (Burkina Faso), l'Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (Burkina Faso) et le Laboratoire de Thermodynamique et Turbomachines de l'Université catholique de Louvain (Belgique) qui a permis de mener à bien la présente étude. Ils remercient également la Société Green Oil (Burkina Faso) pour avoir financé ce travail et la Société National Burkinabé d'Hydrocarbures (Burkina Faso) pour son appui technique

Bibliographie

- [1] HIS S., Les biocarburants dans le monde, IFP-Diffusion des connaissances (2004) ;
- [2] Krawczyk T., Biodiesel – Alternative fuel makes inroads but hurdles remain, *INFORM* (1996) 7, 801 – 829;
- [3] Vaitilingom G., Utilisations énergétiques de l'huile de coton, *Cahiers Agricultures* (2006) vol.15, n°1, 144-149 ;
- [4] Rakopoulos C.D., Antonopoulos K.A., Rakopoulos D.C., Hountalas D.T. et Giakoumis E.G., Comparative performance and emissions study of direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or biodiesels of various origins, *Energy conversion and Management* (2006) 47, 3272-3287;
- [5] Pramanik K., Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine, *Renewable Energy* (2003) 28, 239 – 248;
- [6] Vanhemelryck J.L., Influences des propriétés du carburant dans les moteurs diesel à injection directe : application aux huiles végétales et leurs dérivés, thèse de doctorat, (1997), UCL/FSA/Unité de Thermodynamique et de turbomachines ;

- [7] Ayhan Demirbaş, Biodiesel fuels from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical alcohol transesterifications and others methods : a survey, *Energy Conversion and Management* (2003) 44, 2093-2109;
- [8] Vaitilingom G., Huiles végétales – biocombustibles diesel : influence de la nature des huiles et en particulier de leur composition en acides gras sur la qualité-carburant, thèse de doctorat, (1992) Université d'Orléans ;
- [9] Fangrui M. Milford A.H., Biodiesel production: a review, *Bioresource Technology* (1999) 70, 1-15 ;
- [10] Guibet J.C, Carburants et Moteurs tome 1 et 2, publications de l'Institut Français du Pétrole/ Ed. Technip 1987, Paris;
- [11] Zaliha O., Chong C.L., Cheow C.S., Norizzah A.R., Kellens M.J., Crystallization properties of palm oil by dry fractionation, *Food Chemistry* (2003) 86, 245-250;
- [12] Ramdhas A.S., Jayaraj S. Muraleedharan, Use of vegetables oils as IC engines fuels-a review, *Renewable Energy* (2004) 29, 727-742;
- [13] Goering C.E., Schwab A.W., Daugherty M.J., Pryde E.H., Heakin A.J., Fuel properties of eleven oils, *Trans. ASAE* (1982) 25, 1472-1483 ;
- [14] Guibet J.C, Carburants et Moteurs tome 2, Publications de l'Institut Français du Pétrole/ Ed. Technip 1997, Paris;
- [15] Kalam M.A., Husnawan M., Masjuki H.H., Exhaust emission and combustion evaluation of coconut oil-powered indirect injection diesel engine, *Renewable Energy* (2003) 28, 2405 – 2415;
- [16] Forson F.K., Oduro E.K. and Hammond-Donkoh E., Performance of jatropha oil blends in a diesel engine, *Renewable Energy* (2004) 29, 1135 – 1145
- [17] Altin R., Çetinkaya S., Yücesu H.S., The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines, *Energy Conversion Management* (2001) 42, 529 – 538;
- [18] Silvio C.A. de Almeida, Carlos Rodrigues Belchior, Marcos V.G. Nascimento, Leonardo dos S.R. Vieira, Guilherme Fleury, Performance of Generator fuelled with palm oil, *Fuel* (2002) 81, 2097 – 2102;
- [19] Bari S., Lim T.H., Yu C.W., Effect of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system, performance and emissions of a diesel engine, *Renewable Energy* (2002) 27, 339 – 351;
- [20] Kalam M.A., and Masjuki H.H., Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil, *Biomass and Bioenergy* (2004) 27, 289 – 297;
- [21] Crookes R. J., Kiannejad F., Nazha M.A. A., Systematic assessment of combustion characteristics of biofuels and emulsions with water for use as diesel engine fuels, *Energy Conversion Management* (1997) 38, 1785 – 997;
- [22] Cunningam L.J. Henly T.J., Kulinowski A.M., The effects of Diesel ignition improvers on low-sulphur fuels on heavy-duty Diesel emissions, *SAE Paper* (1990), 902173;
- [23] Yakup I., Duran A. Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI Diesel engine performance and emissions, *Energy Conversion and Management* (2003) 44, 389 – 397.