



# ÉTUDE COMPARATIVE DE L'UTILISATION DE TROIS HUILES VÉGÉTALES PURES (HVP) DANS UN MOTEUR DIESEL

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE  
MASTER II EN GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE  
OPTION ENERGIES RENOUVELABLES

-----  
Présenté et soutenu publiquement le 26 Janvier 2021 par

**MOUSSA YAYE Ibrahim (2014 0700)**

**Directeur de mémoire : Pr. Sayon SIDIBE,**  
Enseignant-chercheur (2iE)

Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE, 2iE)

**Jury d'évaluation :**

**Président :** Pr. N'TSOUKPOE Kokouvi Edem  
Enseignant-chercheur (2iE)

**Membres et correcteurs :**

Pr. YAMEGUEU Daniel  
Enseignant-chercheur (2iE)

Pr Sayon SIDIBE  
Enseignant-chercheur (2iE)

**Promotion [2020/2021]**

## DÉDICACES

*Je dédie ce travail :*

*À mes parents pour leur effort, soutien, conseil, patience, attention, amour...*

*À mes frères et sœurs Abdoul-Nasser, Ramatou, Mahamadou et Oumou pour leur soutien et encouragements*

*À ma grand-mère et bien aimé pour son amour et d'autres raisons qui nécessiteraient la rédaction d'un roman !*

*À mes proches-parents, amis et connaissances pour leur aide tout au long de ma formation.*

## CITATIONS

*L'homme ne cesse d'être savant tant qu'il continue d'apprendre, lorsqu'il arrête l'apprentissage en pensant que ce qu'il a appris lui est suffisant, c'est alors qu'il devient le plus ignorant.*

*Saïd Ibn Joubair*

## REMERCIEMENTS

Par ces mots, je tiens à adresser mes sincères remerciements à l'ensemble des personnes qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements sont particulièrement adressés à :

- L'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) pour la formation de qualité dispensée durant ces années d'études ;
- Pr. sayon SIDIBE, enseignant chercheur à l'institut 2iE, mon maître de stage, pour avoir accepté de m'octroyer et de diriger ce travail, pour sa disponibilité, son encadrement, son suivi et ses conseils inestimables. Soyez rassuré, nous avons énormément appris de vous et nous vous sommes reconnaissants pour cela. Vos compétences relationnelles m'ont été très inspirants ;
- Ing. Souguilimpo Innocent TANKOANO, technicien mesures physiques au LabEREE 2iE, mon encadrant au laboratoire, pour sa disponibilité et son encadrement pendant mes travaux au laboratoire, Merci M. TANKOANO pour votre aide inestimable sans laquelle je ne saurais réaliser ce travail ;
- Ing. Tahirou SIDI, technicien mesures chimiques au LabEREE 2iE, pour ses conseils et orientations durant mes travaux au laboratoire ;
- Pr Marie SAWADOGO/TIEMTORE, responsable du LabEREE 2iE, pour avoir accepté de m'accueillir au LabEREE ;
- Dr. Aboubakar GOMNA, ancien doctorant au LabEREE 2iE, pour son aide et son soutien ;
- Ing. Brice HAPPI TCHUESSA, doctorant au LabEREE 2iE, pour son soutien ;
- L'ensemble des enseignants du département GEE pour la qualité de leur formation et encadrement, pour leur professionnalisme et rigueur scientifique ;
- L'ensemble de mes frères et sœurs de la communauté musulmane de 2iE pour leur soutien ;
- L'ensemble de mes camarades de la promotion Master II GEE 2019 -2020 ;
- Tous les membres de ma famille qui m'ont toujours épaulé tout au long de ma formation ;

## RÉSUMÉ

L'augmentation croissante des prix des carburants conventionnels et le changement climatique obligent la recherche et le développement de carburants substitutifs pour maintenir le développement économique des sociétés. L'un des carburants alternatifs pour les moteurs diesels est l'Huile Végétale Pure (HVP) dont son utilisation directe dans les moteurs à injection directe pose plusieurs problèmes qui avec leurs causes ne font pas l'unanimité des chercheurs.

L'objectif global de ce travail est de contribuer à une meilleure connaissance des conditions de combustion des HVP dans les moteurs diesels à injection directe. Cette étude présente, analyse, discute et compare les résultats expérimentaux réalisés pour évaluer les performances d'un moteur diesel fonctionnant directement avec le jatropha, le coton, le balanites et le gasoil étant utilisé comme carburant de référence.

Les propriétés qui caractérisent les HVP sont déterminées et comparées avec celles du gasoil. Les résultats expérimentaux montrent que le rendement effectif du moteur diminue en moyenne de 15,8% avec les HVP. La consommation spécifique et la température des gaz d'échappement augmentent respectivement en moyenne 25,6% et 11% par rapport à celles avec le gasoil. La consommation d'air du moteur est indépendante du carburant utilisé. L'allure des courbes de pression du cylindre reste identique pour tous les carburants à l'exception des pics de pression où le gasoil a des valeurs légèrement inférieures à celles des HVP. Aux faibles et moyennes charges, le coton et le jatropha induisent des performances quasi-identiques contrairement au balanites qui s'écarte d'eux avec des performances inférieures. Et aux fortes charges, les trois HVP induisent des performances similaires.

En somme, les HVP peuvent être directement utilisées à courte durée dans les moteurs diesels à injection directe à condition que le moteur fonctionne à charge élevée. On retient également que le balanites a une mauvaise combustion comparativement au coton et au jatropha à faible charge et ne doit donc pas être utilisé en présence du coton et du jatropha.

### Mots clés

1. Moteur diesel à injection direct
2. Huiles Végétales Pures (HVP)
3. Gasoil
4. Jatropha curcas
5. Balanites aegyptiaca
6. Coton

## ABSTRACT

Growing prices for conventional fuels and climate change are forcing research and development of alternative fuels in order to maintain the economic development of societies. One of the alternative fuels for compression ignition engines is Straight Vegetable Oil (SVO) which direct use in DI engines lay to several problems which with their causes are not unanimous among researchers.

The overall objective of this work is to contribute to a better knowledge of the combustion conditions of SVO in DI diesel engines. This study presents, analyzes, discusses and compares the experimental results carried out to evaluate the performance of a diesel engine running directly with jatropha, cotton, balanites and diesel being used as reference fuel.

The important properties that characterize SVOs as a fuel were first determined and compared with those of diesel. The results of experimental tests show that the engine efficiency decreases on average by 15.8% with SVO. The specific consumption and the exhaust gases temperature increase respectively on average by 25.6% and 11% compared to those with diesel. The engine consumption is independent of the fuel used. The cylinder pressure curves remain the same for all fuels with the exception of pressure peaks at which the diesel has values slightly lower than those of SVO. At low and medium loads, cotton and jatropha produce almost identical performance unlike balanites which deviate from them with lower performance. And at high loads, the three SVOs generate similar performance.

On the whole, SVOs can be used directly in short duration in DI diesel engines provided that the engine is operated at high load. It is also noted that balanites has a poor combustion compared to cotton and jatropha and should therefore not be used directly in DI diesel engines.

### Keywords

- 1- **Direct Injection (DI) diesel engine**
- 2- **Straight Vegetable Oil (SVO)**
- 3- **Diesel**
- 4- **Jatropha curcas**
- 5- **Balanites aegyptiaca**
- 6- **Cotton**

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>2iE</b>	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
<b>LabEREE</b>	Laboratoire Énergie Renouvelable et Efficacité Énergétique
<b>Mtep</b>	Mégatonne équivalent pétrole
<b>HVP</b>	Huile Végétale Pure
<b>PCI</b>	Pouvoir Calorifique Inferieur
<b>PCS</b>	Pouvoir Calorifique Supérieur
<b>Ca</b>	calcium
<b>Mg</b>	Magnesium
<b>cSt</b>	Centistokes
<b>ppm</b>	partie par million
<b>ISO</b>	International Standardization Organization
<b>NF</b>	Norme Française
<b>FAOSTAT</b>	Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database
<b>SONABHY</b>	Société Nationale Burkinabè d'Hydrocarbures
<b>BELWET</b>	Association Belem Wend Tiga
<b>VDAS</b>	Versatile Data Acquisition Software

## TABLE DES MATIÈRES

<b>DÉDICACES</b> .....	<b>i</b>
<b>CITATIONS</b> .....	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>ii</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>1</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>3</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>4</b>
<b>I INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>5</b>
I.1 Contexte et problématique.....	5
I.2 Objectifs de l'étude .....	6
I.3 Méthodologie de travail.....	7
I.3.1 Déroulement des travaux .....	7
I.3.2 Plan de rédaction .....	7
<b>II REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>8</b>
II.1 Généralités sur les Huiles Végétales Pures.....	8
II.1.1 Définition et nomenclature .....	8
II.1.2 Historique de l'utilisation .....	8
II.1.3 Composition et classification .....	9
II.2 Production des HVP .....	10
II.2.1 Origine des HVP.....	10
II.2.2 Procédés de production des HVP .....	10
II.3 Caractéristiques physico-chimique des HVP .....	11
II.3.1 Propriétés physico-chimiques des HVP .....	11
II.3.2 Normes et spécifications des HVP .....	15
II.3.3 Synthèse sur la qualité finale des HVP.....	15
II.4 Utilisation des HVP dans les moteurs diesel .....	16
II.4.1 Généralités sur les moteurs diesels.....	16
II.4.2 Utilisation des HVP dans les moteurs diesels à injection directe.....	16
II.4.3 Performances du moteur .....	17
<b>III MATÉRIEL ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES</b> .....	<b>19</b>
III.1 Choix des carburants .....	19
III.2 Caractéristiques physico-chimiques des carburants .....	20
III.2.1 Viscosité cinématique.....	20
III.2.2 Pouvoir Calorifique Inferieur (PCI) .....	21

III.2.3	Masse volumique.....	22
III.3	Performances caractéristiques du moteur diesel.....	23
III.3.1	Consommation spécifique en carburant .....	23
III.3.2	Rendement global du moteur.....	23
III.3.3	Température des gaz de sortie .....	23
III.3.4	Ratio air-carburant.....	24
III.4	Banc d'essai expérimental TD200.....	24
III.4.1	Banc moteur avec dynamomètre hydraulique .....	25
III.4.2	Châssis instrumental.....	26
III.4.3	Fonctionnement du banc d'essai expérimental.....	26
III.5	Protocoles des mesures expérimentales.....	27
III.5.1	Cartographie moteur.....	27
III.5.2	Essais avec les HVP .....	27
<b>IV</b>	<b>RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>30</b>
IV.1	Résultats des propriétés physico-chimiques des carburants .....	30
IV.1.1	Viscosité cinématique à 40 °C.....	30
IV.1.2	PCI.....	32
IV.1.3	Masse volumique.....	33
IV.2	Résultats des essais d'HVP .....	35
IV.2.1	Consommation spécifique en carburant .....	35
IV.2.2	Rendement global.....	37
IV.2.3	Température des gaz d'échappement .....	38
IV.2.4	Rapport de combustion air-carburant .....	40
IV.2.5	Pression du cylindre .....	42
<b>V</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>45</b>
<b>VI</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>47</b>
<b>VII</b>	<b>ANNEXES.....</b>	<b>51</b>
VII.1	Annexe A : Quelques acides gras constituants des HVP.....	51
VII.2	Annexe B : Quelques plantes oléagineuses et la teneur en huile de leurs graines ou fruits ..	52
VII.3	Annexe C : Présentation du jatropha curcas, du coton et de la balanite .....	53
VII.4	Annexe D : Mode opératoire des mesures du pouvoir calorifique et de la viscosité .....	55
VII.5	Annexe E : Norme standard DIN 51605 : 2016-01 .....	58
VII.6	Annexe F : Tableaux des résultats des essais expérimentaux .....	59
VII.7	Annexe G : Notes de calculs (PCI, viscosité, masse volumique).....	60



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Propriétés physico-chimiques de quelques HVP .....	12
Tableau II : Synthèse des propriétés des HVP pour usage carburant .....	15
Tableau III : Résumé des performances des moteurs diesels à injection directe.....	18
Tableau IV : Caractéristiques d'origine et provenance des carburants .....	19
Tableau V : Caractéristiques du moteur diesel.....	25
Tableau VI : Résultats des propriétés physico-chimique des carburants .....	30
Tableau VII : Résultats des PCS des carburants .....	32

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation typique d'une molécule de triacylglycérol .....	9
Figure 2 : Schéma des procédés de production des HVP .....	11
Figure 3 : Jets de carburants (HVP à l'extrême gauche et gasoil à l'extrême droite) [16].....	13
Figure 4 : Formation de dépôt de carbone sur l'injecteur [29].....	18
Figure 5 : Échantillon du gasoil et des trois HVP .....	19
Figure 6 : Viscosimètre à tube capillaire.....	20
Figure 7 : Calorimètre adiabatique .....	22
Figure 8 : Balance de précision .....	22
Figure 9 : Prise de pression et mesure de température .....	23
Figure 10 : Banc d'essai expérimental TD200 .....	24
Figure 11 : Partie moteur avec dynamomètre hydraulique.....	25
Figure 12 : Partie châssis instrumental.....	26
Figure 13 : Protocoles des mesures expérimentales .....	29
Figure 14 : Viscosité cinématique des carburants à 40°C .....	31
Figure 15 : PCI des carburants .....	32
Figure 16 : Masse volumique des carburants .....	34
Figure 17 : Plusieurs variétés du balanites aegyptiaca [59].....	35
Figure 18 : Évolution de la consommation spécifique en fonction de la charge du moteur.....	35
Figure 19 : Évolution du rendement global en fonction de la charge du moteur .....	37
Figure 20 : Évolution de la température des gaz de sortie en fonction de la charge du moteur .....	39
Figure 21 : Évolution du ration air-carburant en fonction de la charge du moteur .....	40
Figure 22 : Évolution du débit massique d'air en fonction de la charge du moteur .....	41
Figure 23 : Pression du cylindre en fonction de l'angle du vilebrequin à 80% de charge et à 2000 tr/min .....	43

## I INTRODUCTION GÉNÉRALE

### I.1 Contexte et problématique

La consommation énergétique mondiale ne cesse de croître à cause de la forte augmentation démographique et économique à laquelle le monde fait face. Selon l'agence internationale de l'énergie (IEA), en moins d'un demi-siècle (1971 à 2017) cette consommation a plus que doublé passant de 4 000 à environ 10 000 Mtep [1]. Cependant, la diminution progressive des combustibles fossiles ainsi que les préoccupations environnementales liées aux émissions des gaz à effet de serre (GES) sont une importante source d'inquiétude pour l'humanité [2,3]. Au-delà de ce constat global, les pays en voie de développement notamment ceux de l'Afrique subsaharienne doivent faire face à l'accroissement de leurs besoins alimentaires et cela dans un contexte de sous-développement énergétique [4]. Pour ces pays dans lesquels l'économie repose principalement sur une agriculture pas assez mécanisée à cause de leurs faibles croissances économiques et du coût élevé des énergies fossiles relativement au pouvoir d'achat des populations, il est impératif de trouver des sources d'énergies alternatives qui soient renouvelables et non nocives pour l'environnement afin de substituer les carburants fossiles déjà existants pour faire face aux défis susdits.

C'est ainsi que la production et l'utilisation des biocarburants ou agro-carburants demeurent une opportunité majeure, surtout lorsque de grandes surfaces de terres arables sont disponibles et qu'une énorme partie de la population est impliquée dans l'agriculture, comme en Afrique de l'ouest. De plus, il s'avère que parmi les filières biocarburants, la plus avantageuse est celle des HVP en utilisation directe comme carburant dans les moteurs diesels [5-7].

En effet, la plupart des pays en voie de développement, en particulier ceux de l'Afrique subsaharienne dispose en général de potentiels assez importants en terme de production d'agrocarburants qui leur permettront de mécaniser l'agriculture afin d'améliorer la production paysanne et ainsi couvrir le besoin alimentaire des populations. Cette production permettra également d'utiliser le biocarburant dans des groupes électrogènes comme carburant de substitution aux produits pétroliers afin de fournir l'électricité à la population locale et ainsi améliorer l'accès aux services énergétiques [6,8]. Aussi, la production et l'utilisation des biocarburants en circuit court d'autoconsommation permettront sans doute d'apporter plus de valeur ajoutée aux produits locaux résultants de l'agriculture et par là contribuer à la réduction de la pauvreté surtout dans les zones rurales.

Cependant, l'utilisation directe des Huiles Végétales Pures (HVP) comme carburant dans les moteurs diesel n'est pas sans conséquence. En effet, les HVP ont une très grande viscosité et

un indice de cétane trop faible comparativement au gasoil, ce qui rend problématique leur utilisation directe dans un moteur diesel et conduit à des problèmes notoires tels que les dépôts de carbone dans la chambre de combustion, l'encrassement, voire le colmatage des injecteurs, filtres et autres organes du circuit d'alimentation en carburant [6,8-12].

Afin de résoudre ces problèmes, plusieurs études de recherche ont été menées et ont conduit à des solutions technologiques telles que le mélange des huiles au gasoil à certains pourcentages, le préchauffage et/ou la bicarburant, la modification de la chambre de combustion (injecteurs, pistons...), la recirculation des gaz d'échappement dans le moteur (EGR)... Cependant, force est de constater qu'il existe des divergences entre les conclusions des études menées. Il est également remarqué que rare sont les études qui se sont réellement intéressées à l'explication des causes de ses divergences.

C'est dans ce sens que s'inscrit cette étude intitulée : « **Étude comparative de l'utilisation de trois Huiles Végétales Pures (HVP) dans un moteur diesel** ». Dans ce travail, il s'agira tout d'abord d'effectuer une analyse bibliographique afin de recenser les tenants et aboutissants de la filière pour tenter de comprendre le pourquoi des divergences entre les auteurs et ensuite une étude expérimentale comparative sera réalisée entre trois HVP locales et le gasoil dans un moteur diesel à injection directe afin de mieux comprendre les conditions de combustion des HVP.

## **I.2 Objectifs de l'étude**

L'objectif global assigné à cette étude est de contribuer à une meilleure connaissance des conditions de combustion des Huiles Végétales Pures (HVP) dans les moteurs diesels à injection directe.

De façon spécifique, il s'agira de :

- Effectuer une revue bibliographique sur l'utilisation des HVP comme carburant dans les moteurs diesels ;
- Mettre en place un protocole de test sur un banc moteur pour l'étude des performances du moteur diesel ;
- Identifier et choisir trois HVP locales pouvant être utilisées dans un moteur diesel ;
- Réaliser une étude comparative entre les trois HVP choisies et le gasoil conventionnel.

## **I.3 Méthodologie de travail**

### **I.3.1 Déroulement des travaux**

Tout d'abord, ce travail a débuté par des entretiens avec le directeur de mémoire en vue de mieux mettre en exergue les objectifs attendus et les méthodes à adopter pour y parvenir. Ensuite, une analyse bibliographique a été aussitôt effectuée afin de situer l'état des connaissances actuelles sur l'utilisation des HVP comme carburant dans les moteurs diesels. Ensuite, un protocole de test a été réalisé pour le nouveau banc moteur qui sera utilisé pour les essais expérimentaux. Ce banc moteur se trouve au sein du laboratoire LabEREE de 2iE. Puis, il a été question d'identifier trois HVP locales qui seront utilisées avec le gasoil pour effectuer une étude expérimentale comparative. L'étude expérimentale s'est déroulée en trois phases à savoir la caractérisation des carburants (HVP et gasoil), la détermination des performances référentielles du moteur ou cartographie moteur et la réalisation des tests comparatifs avec chaque carburant. Enfin, la dernière étape a été l'analyse, l'interprétation et la discussion des résultats expérimentaux obtenus afin de tirer les conclusions de l'étude.

### **I.3.2 Plan de rédaction**

Le présent document adopte le plan classique d'un mémoire de recherche et comportera dans un premier temps une introduction générale qui présentera le contexte et la problématique auxquels s'inscrit cette étude. Ensuite, une revue bibliographique présente et analysera après présentation l'état des connaissances actuelles sur l'utilisation des HVP comme carburant dans les moteurs diesels. Puis, une partie dédiée aux matériels et méthodes décrira l'ensemble des techniques analytiques et dispositifs expérimentaux utilisés au cours de l'étude. Après, une partie résultats et discussions présentera, analysera et discutera les résultats obtenus et enfin une conclusion, des perspectives et des recommandations seront formulées.

## II REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

### II.1 Généralités sur les Huiles Végétales Pures

#### II.1.1 Définition et nomenclature

Les huiles végétales proviennent des cultures oléagineuses (graines oléagineuses) telles que le palmier, le sésame, l'arachide... À la différence des huiles végétales raffinées des productions industrielles, elles sont obtenues après simple pressage des graines oléagineuses suivi d'une étape de décantation et/ou de filtration. Elles sont désignées dans la littérature par plusieurs noms parmi lesquels on trouve Huiles Végétales Pures (HVP), Huiles Végétales Brutes (HVB), Huiles Végétales Carburant (HVC)...

#### II.1.2 Historique de l'utilisation

L'utilisation des huiles végétales dans un moteur diesel n'est pas une nouvelle invention, car l'inventeur du moteur diesel, Rudolf Diesel souligne que dès 1900 lors de l'exposition universelle de Paris, l'entreprise française Otto sur demande du gouvernement français avait fait fonctionner un petit moteur à l'huile d'arachide sans aucun problème [5-7,13]. En 1912, Rudolf Diesel déclarait que : « **l'utilisation des huiles végétales comme carburants peut sembler anodin aujourd'hui, mais ces huiles pourront devenir au fil du temps, aussi importantes que le pétrole et le goudron de charbon d'aujourd'hui** ». Néanmoins, il a fallu la fin de la première guerre mondiale pour que des travaux de recherche sur l'utilisation des HVP dans les moteurs diesels voient le jour. En effet, les biocarburants étaient un moyen très attractif pour les régions coloniales, riches en oléagineux, qui avaient donc sur place une source d'énergie renouvelable pouvant les rendre indépendantes. Entre 1919 et 1920 par exemple, la Belgique a réalisé des études sur la possibilité d'utiliser l'huile de palme et l'huile de coton au Zaïre (Congo) afin d'alimenter les installations industrielles. Plusieurs utilisations et recherches ont été entreprises durant la seconde guerre mondiale. Cependant l'abondance et le bon marché du pétrole a occasionné un désintéressement des industriels pour les biocarburants et ce n'est qu'à partir des deux chocs pétroliers (1973 et 1979) qu'un nouveau regain d'intérêt a vu le jour et de nombreuses études furent ainsi menées à la fin des années 1970 et au début des années 1980. La première rencontre internationale sur les huiles végétales « carburants », tenue en août 1982 aux États-Unis, a permis de faire le point de l'ensemble de ces résultats de recherche. Aujourd'hui, plusieurs chercheurs de nombreux pays mènent des études de recherches sur l'utilisation des HVP ou de leurs dérivées comme substitut du gasoil, notamment le soja aux États Unis, le colza et le tournesol en Europe ; le coton et le jatropha sont en phase expérimentale en Afrique de l'Ouest.

### II.1.3 Composition et classification

Les HVP sont principalement composées de triglycérides d'acides gras ou triacylglycérol de 95% à 98% ainsi que d'autres constituants minoritaires tels que stérols, cires, cendres, acides gras libres et diverses impuretés... Ces triglycérides sont des esters de trois molécules d'acides gras avec une molécule de glycérol. La longueur de la chaîne hydrocarbonée et le nombre de double liaison varient en fonction de la nature des acides gras [14]. La majorité des acides gras trouvés dans les huiles ont une chaîne de 12 à 18 atomes de carbones avec un nombre de double liaison compris entre 0 et 3. La Figure 1 est une représentation typique d'une molécule de triacylglycérol et l'annexe A présente quelques acides gras les plus couramment rencontrés dans les huiles végétales .

Les HVP peuvent être classées en quatre grandes familles selon la nature des acides gras majoritaires qui les constituent et donc parallèlement selon leur indice d'iode [5]:

- **Les huiles saturées** : elles sont majoritairement constituées par les acides gras : laurique, myristique, palmitique ou stéarique et ont un indice d'iode inférieur à 50.
- **Les huiles mono-insaturées** : elles sont principalement constituées par l'acide gras oléique et ont un indice d'iode compris entre 50 et 100.
- **Les huiles di-insaturées** : elles ont l'acide gras linoléique en prédominance et ont un indice d'iode compris entre 100 et 150. Ces huiles sont dites semi-siccatives.
- **Les huiles tri-insaturées** : elles ont l'acide gras linoléique en prédominance et ont un indice d'iode supérieur à 150. Ces huiles sont dites siccatives.

*NB : Le caractère "siccatif" d'une huile traduit son aptitude à « sécher » à l'air, son aptitude à s'oxyder en contact avec l'air. En d'autres termes, lorsqu'on l'abandonne à l'air, il se forme parfois plus ou moins rapidement un film à sa surface.*

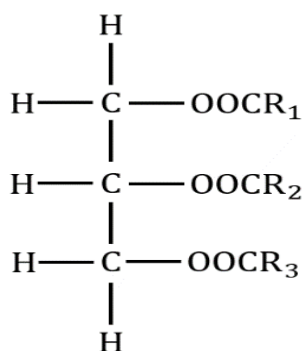


Figure 1 : Représentation typique d'une molécule de triacylglycérol

Où  $R_1, R_2, et R_3$  sont des chaînes hydrocarbonées linéaires à nombre pair d'atomes de carbone

## II.2 Production des HVP

### II.2.1 Origine des HVP

Les Huiles Végétales Pures sont obtenues à partir des graines ou fruits riches en matières grasses provenant des plantes telles que le tournesol, l'arachide, le sésame... L'annexe B présente les principales huiles végétales produites à l'échelle mondiale ainsi que la teneur en huile des graines ou fruits.

### II.2.2 Procédés de production des HVP

Le processus de production des HVP à usage carburant est principalement composé de cinq opérations qui influent sur la qualité de l'huile obtenue [6,15,16]:

**Stockage des graines** : après la récolte, les graines peuvent être stockées de nombreux mois sans conséquence exagérée sur la qualité de l'huile. Cependant, les graines doivent être aérées régulièrement pour éviter l'acidification et l'accumulation de la chaleur. La teneur maximale en humidité des graines ne doit guère dépasser 9% [17].

**Prétraitement** : cette opération consiste à éliminer les impuretés contenues dans les graines (feuilles, pierres, objets métalliques...) afin de ne pas dépasser une valeur maximale de 2% du poids des graines comme impureté [5,6]. Le prétraitement est nécessaire car les impuretés peuvent détériorer la presse et augmente le niveau d'impureté dans l'huile.

**Pressage** : c'est le procédé physique qui permet l'exsudation de l'huile à partir des graines sous l'effet d'une force de compression. La méthode la plus courante dans le cas des HVP à usage carburant est le pressage mécanique à froid à cause de sa simplicité de mise en œuvre. Avec cette méthode, il faut une presse mécanique à vis, des cuves de décantation et/ou des filtres et des bidons pour le stockage de l'huile. Les frottements à l'intérieur de la presse à vis augmentent souvent la température de presse jusqu'à 150°C, cependant pour éviter la dissolution d'une grande quantité de phosphore, il faut maintenir cette température en dessous de 80°C [17]. La vitesse de la presse influence également la qualité de l'huile [6].

**Décantation et/ou filtration** : afin d'avoir une huile de qualité suffisante il est indispensable de purifier l'huile des phospholipides, des cires et de certains éléments solides. Les huiles sont filtrées directement après le pressage ou elles sont laissées dans des cuves de décantation. Toutefois, il est recommandé d'utiliser un filtre d'au moins 10 µm et que l'huile soit à une température comprise entre 20°C et 60°C afin de retirer toutes les particules solubles [5,6,15]. À noter également qu'il est possible d'effectuer des traitements chimiques sur l'huile tels que le dégomme et la neutralisation.



**Stockage de l'huile** : Une huile dans des conditions de stockage inadéquates peut se détériorer.

Pour cela, les recommandations suivantes peuvent être données [6,12,15] :

- L'huile doit être aussi propre que possible
- Les contenants (bidons de stockage) doivent également être propre
- Éviter les variations de température, une température inférieure à 35°C est recommandée
- L'huile doit être à l'abri de la lumière pour éviter l'oxydation et l'acidification.

Il faut limiter la période de stockage car une longue période conduit à une oxydation.

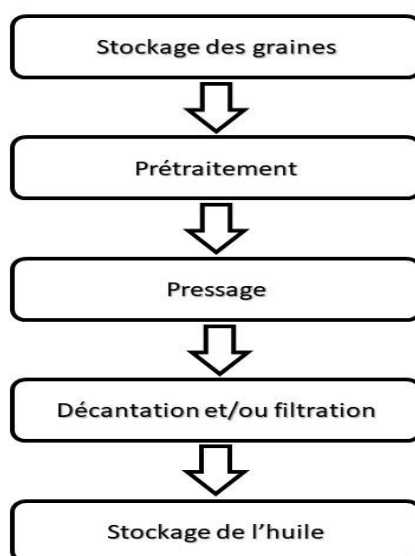


Figure 2 : Schéma des procédés de production des HVP

## II.3 Caractéristiques physico-chimique des HVP

### II.3.1 Propriétés physico-chimiques des HVP

En dehors de la composition en acide gras, les propriétés caractéristiques physico-chimiques des huiles végétales sont plus ou moins similaires à celles du gasoil et c'est pourquoi ces huiles sont utilisables dans les moteurs diesels sous réserve de certaines contraintes. Plusieurs propriétés sont évoquées dans la littérature, notamment : la viscosité cinématique, le PCI, la masse volumique, la volatilité (Courbe de distillation, tension superficielle, point éclair), le point d'écoulement, le point de trouble, l'indice de cétane, l'indice d'iode, l'indice d'acide ou acidité, l'indice de peroxyde, l'indice de saponification, la teneur en eau, la teneur en cendres ou teneur en sédiments, la teneur en cires, la teneur en phosphores ou en phospholipides, la teneur en Ca et Mg, la teneur en particules, la teneur en soufres, la teneur en carbone résiduel, la stabilité à l'oxydation à 110°C...

Tableau I : Propriétés physico-chimiques de quelques HVP

HVP	Viscosité à 40°C (cSt)	Indice de cétane	PCS (MJ/kg)	Cloud point (°C)	Point d'écoulement (°C)	Point éclair (°C)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Carbone résiduel (%wt)	Indice d'iode (gI <sub>2</sub> /g)	Teneur en cendre (%wt)	Teneur en soufre (%wt)	Références
<b>Diesel SONABHY</b>	1,6-5,9	>50	>45	-	-	>61	820-890	<0,15	-	-	<1	[5]
<b>Castor</b>	251,00	42	37,4	-	32	229	955,0	-	83-86	-	-	[5,7,11,18,19]
<b>Coconut</b>	27,00	40-42	37,1	-	-	-	918,0	-	8-11"	-	0,01	
<b>Corn</b>	31-35	38	39,5	-1,1	-40	277	910,0	0,24	103-128	0,01	0,01	
<b>Cottonseed</b>	33,5	42	38,7-39,5	1,7	-15	234	914,8	0,24	103-115	0,01	0,01	
<b>Jatropha</b>	34,00	39	38,8	9	3-5"	225	918,6	-	82-98	0,03	0,01	
<b>Linseed</b>	22,2	35	39,3-39,5	1,7	-15	241	923,6	0,22	180	0,01	-	
<b>Peanut</b>	39,6	42	39,8	12,8	-7	271	902,6	0,24	84-100	0,005	0,01	
<b>Rapeseed</b>	37,0	41	39,7	-3,9	-32	246	911,5	0,3	105	0,054	0,01	
<b>Safflower</b>	31,30	41	39,5	18,3	-7	260	914,4	0,25	145	0,006	-	
<b>Sesame</b>	35,50	40-42	39,4	-3,9	-9	260	913,3	0,24	103-116	0,01	0,01	
<b>Soybean</b>	32,60	38	39,6	-3,9	-12	254	913,8	0,25	128-143	0,01	0,01	
<b>Sunflower</b>	33,90	37	39,6	7,2	-15	274	916,1	0,27	125-140	0,01	0,01	
<b>Palm</b>	39,60	42	39,5	31	31	267	918,0	0,23	48-58	-	0,01	
<b>Jojoba oil</b>	25,50	-	42,76	-	6	-	864,0	-	-	0,014	-	
<b>Babassu</b>	30,30	38	-	20	-	150	946,0	-	16	-	-	

Cependant, ces propriétés n'ont pas le même niveau d'importance en production d'HVP et surtout pour une utilisation en circuit court d'autoconsommation. Par conséquent, elles ne doivent pas être systématiquement analysées. Sept propriétés paraissent cruciales pour une utilisation des HVP dans les moteurs diesels et parmi elles, il est intéressant de distinguer d'une part les propriétés intrinsèques qui sont fonction de la nature des graines et d'autre part les propriétés variables qui sont fortement influencées par les conditions (agronomiques et climatiques) de production des graines ainsi que les procédés de transformation des graines en l'huile [5].

### Propriétés intrinsèques

➤ **Viscosité** : La viscosité joue un rôle très important dans la combustion du carburant. Elle varie en fonction de la nature de l'huile et est 10 à 15 fois plus élevée pour les huiles que pour le gasoil. Elle varie également en fonction de la température de l'huile. Une viscosité très faible conduit à des fuites, diminue le rendement et la durée de vie de la pompe ; Cependant, une viscosité très élevée accroît les pertes de charge à l'intérieur de la pompe, modifie les caractéristiques d'injection des jets de carburants comme illustré sur la Figure 3 [16] et ceci conduit à un mauvais mélange air-carburant, une mauvaise combustion, un rendement thermodynamique faible et augmente les émissions en particules [20]. De même, une viscosité très élevée augmente la pression d'injection du carburant, ce qui augmente le délai d'injection [19,21]. Pour la plupart des HVP, à 40°C, la viscosité est inférieure à 50 cSt mais reste quand même très élevée comparativement à celle du gasoil qui est rarement supérieure à 5 cSt à la même température.

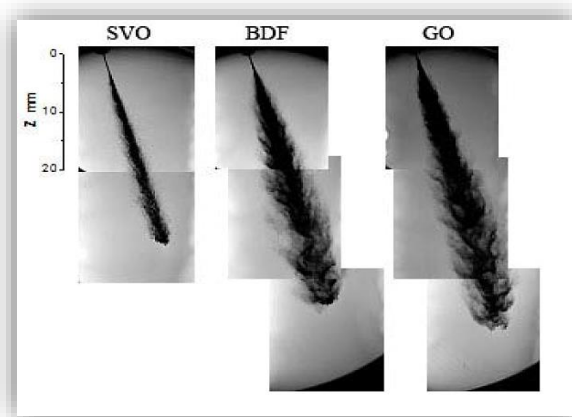


Figure 3 : Jets de carburants (HVP à l'extrême gauche et gasoil à l'extrême droite) [16]

➤ **Masse volumique** : Elle influence le choix des équipements notamment le choix des pompes volumétriques à carburant. Pour les HVP, elle est comprise entre 900 et 960 kg/m<sup>3</sup> à 15 °C et est en moyenne 10% plus élevée que celle gasoil. Une masse volumique élevée induit à une augmentation des émissions d'imbrulés, néanmoins cela signifie plus de masse par unité de volume donc plus d'énergie à volume constant [17].

➤ **Indice d'iode** : L'indice d'iode traduit le degré d'insaturation de l'huile, c'est à dire la présence de double liaison chimique dans sa structure moléculaire. Il est donc un indicateur uniquement applicable aux huiles mais pas au gasoil. Une valeur d'indice d'iode très élevée augmente les émissions en NOx [9] et une valeur très faible pourrait conduire à un comportement inapproprié de l'huile en cas de démarrage à froid [6].

### Propriétés variables

➤ **Teneur en phosphore** : La teneur en phosphore indique la présence de phospholipides qui proviennent de la membrane cellulaire des graines. La concentration des phospholipides est fonction de la nature des graines mais aussi des techniques de pressage. Ainsi, une température de presse très élevée (supérieure à 80°C) augmente la teneur en phosphore [15]. Ce paramètre est très important pour un usage carburant des HVP car les phospholipides semblent participer au phénomène de gommage (l'encrassement des soupapes, de la chambre de combustion et des cylindres). Une valeur limite de 50 ppm est préconisée pour une utilisation des HVP dans les moteurs stationnaires [17].

➤ **Teneur en eau** : La teneur en eau est très problématique car la présence de l'eau dans le carburant diminue son PCI et en d'autres termes diminue l'énergie libérée par la combustion. Comme conséquence, il faut consommer plus de carburant pour une puissance donnée (faible rendement). Elle favorise également la croissance microbienne et corrode le réservoir et les filtres [20]. La valeur limite préconisée est de 750 ppm [15].

➤ **Contamination totale** : La contamination totale est définie comme le taux de particules insolubles qui restent dans l'huile après filtration. Un niveau de contamination très élevé des HVP peut obstruer les filtres et les injecteurs. On note également que les contaminations sont très abrasives pour le système de pompe et d'injection. Une valeur limite de 100 ppm est recommandée [17].

➤ **L'indice d'acide ou acidité** : L'acidité est principalement due à la présence des acides gras libres formés par hydrolyse des triglycérides en présence d'eau. Une valeur très élevée peut sévèrement corroder le système d'alimentation du carburant et la chambre de combustion [21].

L'acidité peut évoluer à cause des conditions de stockage inappropriées de l'huile et une valeur limite de 3 mg KOH/g est recommandée [5].

### II.3.2 Normes et spécifications des HVP

Il n'existe pas de norme spécifique applicable à toutes les HVP pour leur utilisation comme carburant dans les moteurs diesels. Toutefois, il y a la Norme allemande dénommée DIN 51605 en Annexe E, qui est relative à l'utilisation exclusive de l'huile de colza comme carburant. Cependant, cette norme présente plusieurs limites dont [17] :

- Elle ne traite exclusivement que de l'huile de colza sur toutes les huiles potentiellement utilisables comme carburants dans les moteurs diesels ;
- Elle propose des méthodes analytiques très complexes appartenant à l'industrie pétrolière, ce qui rend sa mise en œuvre très coûteuse surtout dans les pays en développement où le potentiel en HVP est énorme ;
- Elle propose l'analyse de 14 paramètres qui ne sont pas tous significatifs au même degré.

### II.3.3 Synthèse sur la qualité finale des HVP

La qualité finale de l'huile dépend de deux facteurs : les facteurs de production de l'huile et les facteurs liés à la nature des graines. En résumé, le Tableau II présente les conditions que doivent satisfaire une HVP pour être utilisée en motorisation rurale. Cependant, pour leurs utilisations simples comme carburant dans les moteurs diesels, les caractéristiques qui sont les plus généralement évaluées sont la viscosité, la masse volumique et le pouvoir calorifique [22].

Tableau II : Synthèse des propriétés des HVP pour usage carburant

PROPRIÉTÉS CARACTÉRISTIQUES DES HVP POUR USAGE CARBURANT [17]			
	PROPRIÉTÉS	Valeur limite	Méthode de mesure
<b>INTRINSÈQUES</b>	Densité	900-960 kg/m <sup>3</sup>	ISO 6883
	Viscosité cinématique	50 cSt	ISO 3104
	Indice d'iode	Pas de spécification	ISO 39 61
<b>VARIABLES</b>	Teneur en phosphore	50 ppm	ISO 10540-1
	Contamination totale	100 ppm	ISO 663
	Teneur en eau	750 ppm	ISO 8534
	Teneur en acides gras libres	3 mg KOH/g	ISO 660

## II.4 Utilisation des HVP dans les moteurs diesel

### II.4.1 Généralités sur les moteurs diesels

Le moteur diesel ou moteur à allumage par compression est un moteur à combustion interne dont l'allumage n'est pas commandé mais spontané par phénomène d'autoallumage contrairement aux moteurs à essence. Ce phénomène d'autoallumage est possible grâce à un très fort taux de compression de l'air permettant d'obtenir une température de combustion aux alentours de 600 °C. Les moteurs diesels fonctionnent habituellement au gazole, au fuel lourd ou aux huiles végétales. Ils peuvent aussi bien être à deux temps qu'à quatre temps. Selon le mode d'injection du combustible, on distingue deux familles de moteur diesel : les moteurs à injection directe et les moteurs à injection indirecte. Selon la famille du moteur, l'HVP n'a pas les mêmes effets. Dans les moteurs diesels à injection indirecte (type chambre de turbulence), déjà à partir de 10% de puissance délivrée, la température moyenne de la préchambre est environ 600°C permettant ainsi aux HVP de brûler complètement [15]. Ceci n'est pas le cas avec les moteurs à injection directe où à faible charge déjà, les températures de combustion sont inférieures à 200°C causant ainsi plusieurs problèmes liés à la mauvaise combustion des huiles dans cet environnement de faible température.

**Dans notre travail, on s'intéressera uniquement aux moteurs à injection directe.**

### II.4.2 Utilisation des HVP dans les moteurs diesels à injection directe

L'utilisation directe des HPV comme carburant dans les moteurs diesels à injection directe peut conduire à plusieurs problèmes comme la formation de dépôts goudronneux, l'encrassement des injecteurs et des têtes des pistons, le colmatage des filtres, des baisses de puissance et de rendement, une surconsommation en carburant, des problèmes de pompage et de vaporisation du jet de carburant [6,14,19,23-26]. Afin de résoudre ces problèmes, plusieurs solutions technologiques ont été identifiées. Il s'agit notamment de :

- **Préchauffage de l'huile par bicarburation**
- **Mélange de l'huile avec le gasoil à différentes teneurs**
- **Recirculation des gaz d'échappement (EGR) dans le moteur**
- **Modification de la chambre de combustion (piston, injecteur...)**

Cependant parmi ces quatre solutions, les plus pertinentes sont les deux premières qui ont pour objectif de diminuer la viscosité de l'huile, viscosité qui semble être la première cause la plus citée dans les conclusions des auteurs.

**La suite de ce travail s'intéressera uniquement à l'utilisation directe des HVP comme carburant dans les moteurs diesels à injection directe.**

## II.4.3 Performances du moteur

### Couple et puissance

La majorité des chercheurs trouvent une baisse du couple moteur et de la puissance avec l'utilisation directe des HVP dans les moteurs diesels à injection directe et que cette baisse est due à la faible valeur du PCI des HVP [27–29]. Toutefois, certains auteurs trouvent que la puissance du moteur avec les HVP reste inchangée comparativement au gasoil [25].

### Consommation spécifique

Les chercheurs sont unanimes que quel que soit le carburant, la consommation spécifique diminue avec l'augmentation de la charge du moteur, qu'elle est plus élevée pour les HVP que pour le gasoil et que ceci est dû au faible PCI des HVP comparativement à celui du gasoil, traduisant le fait qu'il faut plus de carburant pour atteindre les mêmes performances qu'avec le gasoil [23–26,30–32]. Le PCI des HVP est inférieur à 40 MJ/kg tandis que pour le gasoil il est aux alentours de 42 MJ/kg. Néanmoins d'autres auteurs voient que ce constat est dû à la viscosité élevée des HVP [24].

### Rendement global

Globalement, le rendement effectif du moteur diminue avec les HVP [23–25,27,30,31]. Certains auteurs soulignent une relation entre cette diminution et l'augmentation de la température des gaz d'échappement avec les HVP [33]. Pour un même carburant, le rendement du moteur augmente avec l'augmentation de la charge du moteur. Certains auteurs stipulent que le faible rendement est dû à la valeur élevée de la viscosité qui conduit à une mauvaise vaporisation et atomisation du carburant, ce qui entraîne une combustion incomplète des HVP ; Cependant, on peut remarquer que le faible rendement n'est que la conséquence de l'augmentation de la consommation spécifique des HVP et de leur mauvaise combustion.

### Combustion et formation des dépôts

Il est unanimement admis que l'utilisation directe des HVP dans les moteurs diesels à injection directe aboutit à une combustion moins bonne qu'avec le gasoil. En effet, les délais d'inflammation des HVP sont plus longs comparés au gasoil et cela est dû à leurs indices de cétane qui sont plus faibles que celui du gazole [15]. C'est cette mauvaise combustion qui conduit à une formation de dépôts de carbone tout d'abord sur le nez de l'injecteur et cela après déjà quelques heures de fonctionnement (9 heures) comme on remarque sur la Figure 4 [29], ensuite sur les segments, les parois de la chambre, puis la culasse. Néanmoins, on note que la teneur en oxygène des HVP améliore leur combustion et les émissions en gaz, cependant cela est la cause de la diminution de leur PCI [33].



Figure 4 : Formation de dépôt de carbone sur l'injecteur [29]

Le Tableau III ci-dessous permet d'avoir un point de vue général sur les performances des moteurs diesel à injection direct avec l'utilisation des HVP.

Tableau III : Résumé des performances des moteurs diesels à injection directe

Performances du moteur	Constats majeurs	Causes potentielles	Références
Couple et puissance	↘	Faible PCI	[30] [26]
Rendement global	↘	Viscosité élevée	[23] [24] [28]
Consommation spécifique	↘	Viscosité élevée	[34]
		Faible PCI	[35]
		Indice de cétane	[25]
Formation des dépôts	↘	Viscosité élevée Indice de cétane	[15]
Température des gaz	↘	Viscosité élevée	[36] [28]



### III MATÉRIEL ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

#### III.1 Choix des carburants

Afin de mener l'étude comparative, l'huile de Jatropha, l'huile de coton et l'huile de balanites ont été choisies. L'annexe C présente en détail les trois plantes d'origine. Ces huiles seront utilisées avec le gasoil. Le choix de ces huiles a été guidé par les raisons ci-énoncées :

- Tout d'abord, le point commun de leur choix est sans doute leur disponibilité locale (au Burkina Faso) et d'ailleurs même dans presque toute la sous-région à l'exception du coton.
- L'huile de jatropha, parce qu'elle est non comestible et donc son utilisation comme carburant ne rentre pas directement en concurrence avec la consommation alimentaire. De plus, la plante du jatropha a des propriétés intéressantes notamment le fait qu'elle pousse dans des terres arides. Notons également que, cette plante suscite beaucoup d'attention ces dernières décennies de la part des États, mais aussi des investisseurs de la filière de production des biocarburants.
- Pour l'huile de coton, d'après les données de la FAOSTAT sur le bilan alimentaire, il s'agit de la première production d'huile au Burkina Faso avec environ 73,2% de la production totale d'huile végétale sur la période 2014-2017. Cependant, le marché burkinabé est submergé par les huiles importées dont la majeure partie est frauduleuse, constituant ainsi un environnement de concurrence déloyale au marché des huiles locales [37]. Ainsi, l'utilisation de l'huile de coton comme carburant, si faisable serait une solution intéressante pour les producteurs de cette huile en ce qu'elle leur permettra de diversifier leurs ventes afin de mieux se positionner face à la concurrence déloyale avec les huiles importées notamment l'huile de palme importées.
- Pour l'huile de balanites, il s'agit d'une huile qui est presque absente dans la littérature en ce qui concerne son utilisation directe comme carburant dans les moteurs diesels. Ainsi, la touche innovatrice de notre étude réside dans l'utilisation de cette huile. En plus, la plante du balanités est une espèce sauvage qui pousse naturellement très bien dans les zones sahéliennes et n'a pas besoin d'aménagement supplémentaire (irrigation et autres traitements).

Tableau IV : Caractéristiques d'origine et provenance des carburants

Huile	Plante	Provenance	Commentaire
Jatropha	<i>Jatropha curcas</i>	BELWET	Filtrée
Coton	<i>Coton Gossypium hirsutum</i>	SN CITEC	Raffinée
Balanites	<i>Balanites aegyptiaca</i>	BELWET	Filtrée
Gasoil	---	SONABHY	---

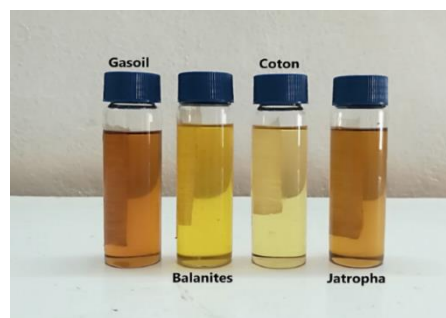


Figure 5 : Échantillon du gasoil et des trois HVP

## III.2 Caractéristiques physico-chimiques des carburants

Les caractéristiques physico-chimiques que nous avons déterminées sont : Le PCI, la viscosité cinématique et la masse volumique. Comme souligné dans la synthèse bibliographique, ces trois propriétés sont les plus évaluées dans la littérature [22]. Le PCI et la viscosité sont effectuées suivant des méthodes normalisées. Ainsi leurs modes opératoires seront présentées en annexe D. Nous nous contenterons d'expliquer brièvement le principe et le matériel de base utilisé. Notons que les mesures sont faites au LabEREE à l'institut 2iE.

### III.2.1 Viscosité cinématique

La viscosité cinématique est déterminée selon la norme ISO 3104 : 1994. Cette méthode utilise un viscosimètre à tube capillaire présenté sur la Figure 6, contenue dans un bain qui se trouve à une température donnée, ici à 40°C. La méthode consiste tout simplement à mesurer le temps mis par le fluide pour s'écouler de manière gravitaire entre deux points M1 et M2 de côtes différentes. La valeur de la viscosité est ensuite calculée par la formule suivante :

$$V = C \times t \quad (\text{Équation 1})$$

Avec : V la viscosité cinématique en  $\text{mm}^2 / \text{s}$ , t le temps moyen d'écoulement en s et C la constante associée au tube capillaire utilisé en  $\text{mm}^2 / \text{s}^2$  (tube d'Ubbelohde ou de Cannon-Fenske).

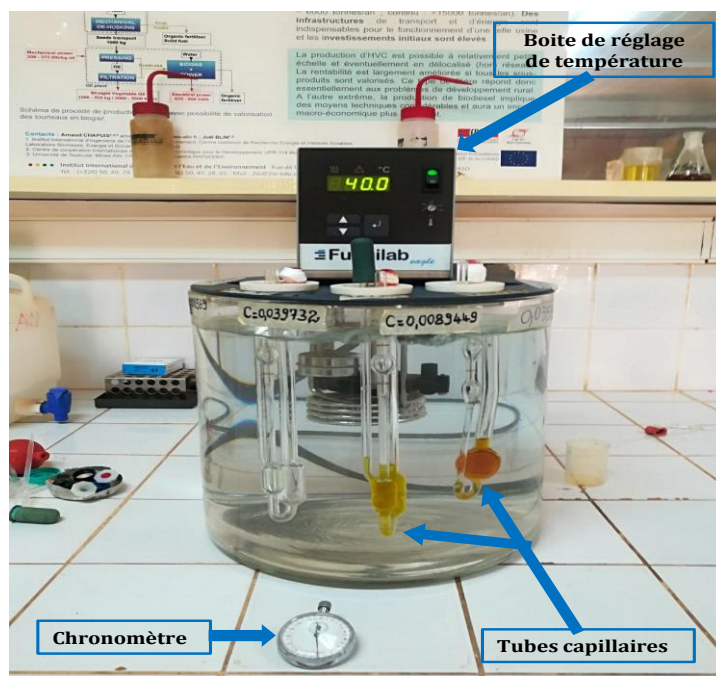


Figure 6 : Viscosimètre à tube capillaire

### III.2.2 Pouvoir Calorifique Inferieur (PCI)

La détermination du PCI est effectuée suivant la norme ISO 1928 : 2009 à l'aide d'un calorimètre adiabatique présenté sur la Figure 7. Il s'agit de déterminer la chaleur de combustion d'un échantillon de combustible capable de provoquer une élévation de température d'au moins 1 °C (masse généralement comprise entre 0,5 g et 0,8 g pour les combustibles liquides). L'échantillon est brûlé en présence d'oxygène (à 25 bar) dans une bombe calorimétrique plongée dans un volume d'eau connu. Ainsi, Le PCS est d'abord calculé d'après l'élévation de température de l'eau dans le vase calorimétrique tout en tenant compte de la capacité calorifique effective moyenne de l'appareillage utilisé (capsule de gélatine et fil d'allumage). Le PCI se déduit ensuite par calcul en connaissant le degré d'humidité de l'échantillon et le pourcentage massique anhydre d'hydrogène dans l'huile. Ci-dessous les formules utilisées pour les calculs :

$$\text{PCS} = \frac{K_1 \times E_{\text{cal}}(T_m - T_i) - K_1 \times E_{\text{pt}}(L_i - L_f) - K_1 \times \text{PCS}_{\text{capsule}} \times m_{\text{capsule}}}{m_{\text{échantillon}}} \quad (\text{Équation 2})$$

Avec :  $K_1$  : Facteur de conversion des calories en joules 4,1855 J/cal

$E_{\text{cal}}$  : Équivalent calorimétrique du calorimètre, de la bombe, de ses accessoires et de l'eau introduite dans la bombe en cal/°C,  $E_{\text{cal}} = 2674 \text{ cal/°C}$

$T_m$  : Température maximale en °C

$T_i$  : Température initiale en °C

$L_i$  : Longueur de fil de platine initiale en cm

$L_f$  : Longueur de fil de platine restante en cm

$E_{\text{pt}}$  : Pouvoir calorifique du fil de platine,  $E_{\text{pt}} = 2,3 \text{ cal/cm}$

$\text{PCS}_{\text{capsule}}$  : Pouvoir calorifique de la capsule vide, en cal/g (Il est établi en prenant la moyenne de trois (3) déterminations concordantes du PCS de la capsule de gélatine vide. Actuellement au LabEREE,  $\text{PCS}_{\text{capsule}} = 5059 \text{ cal/g}$

$m_{\text{capsule}}$  : Masse de la capsule de gélatine utilisée, en g

$m_{\text{échantillon}}$  : Masse de la prise d'essai de l'échantillon à analyser, en g

$$\text{PCI}_{\text{brut}} = \text{PCS}_{\text{brut}} - \left( \frac{E_{\text{cond}} \times K_2 \times H_{\text{ech}}}{100} + \frac{E_{\text{cond}} \times W}{100} \right) \quad (\text{Équation 3})$$

Avec :  $E_{\text{cond}}$  : Chaleur de condensation de l'eau,  $E_{\text{cond}} = 2511 \text{ J/g}$

$K_2$  : Facteur de proportionnalité : masse d'hydrogène /masse d'eau formée,  $K_2 = 8,937$

$H_{ech}$  : Teneur en % d'hydrogène de l'échantillon,  $H_{ech} = \frac{H_{anhydre}(100-W)}{100}$

$W$  : Teneur en humidité de l'échantillon, en %

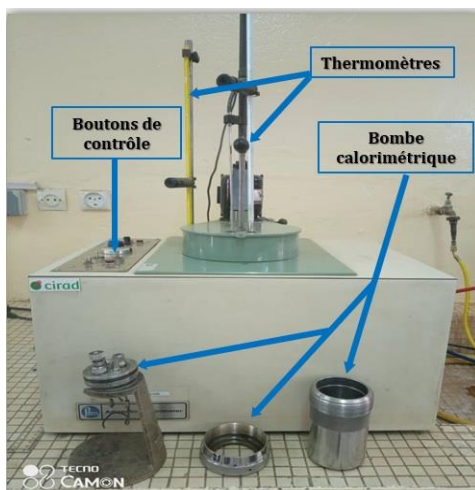


Figure 7 : Calorimètre adiabatique

### III.2.3 Masse volumique

La masse volumique est déterminée avec un vase de 25 ml de précision 0,04 ml. On mesure à l'aide d'une balance de précision présentée sur la Figure 8, la masse à vide du vase à une température donnée ( $m_0$ ). Ensuite, on remplit le vase avec le fluide en question et on mesure la masse de l'ensemble (vase+ fluide) ( $m_1$ ) à la même température que précédemment. Ainsi, la masse volumique peut être calculée avec la formule suivante :

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (\text{Équation 4})$$



Figure 8 : Balance de précision

### III.3 Performances caractéristiques du moteur diesel

#### III.3.1 Consommation spécifique en carburant

Pour trouver la consommation spécifique en carburant (travail fourni par le carburant), nous avons besoin de connaître la consommation massique du carburant et la puissance mécanique fournie (mesurée par le dynamomètre) :

$$\text{Consommation spécifique} = \frac{\text{Débit massique} \times 3600}{\text{Puissance mécanique}} \quad (\text{Équation 5})$$

Avec : Consommation spécifique en  $\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$  et Puissance mécanique en kW

$$\text{Avec : Débit massique} = \frac{\text{Masse volumique} \times \text{Débit volumique}}{1000}$$

Avec : Débit massique en  $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ , Masse volumique  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  et Débit volumique en  $\frac{\text{l}}{\text{s}}$

#### III.3.2 Rendement global du moteur

Le rendement thermique est le rapport entre l'énergie thermique de combustion et la puissance mécanique produite par le moteur :

$$\text{Rendement global} = \frac{\text{Puissance mécanique}}{\text{Energie thermique}} \times 100 \quad (\text{Équation 6})$$

Avec : Rendement global en % et Energie thermique en W

L'énergie thermique produite par la combustion du carburant se calcule à partir de la consommation en carburant et de son pouvoir calorifique :

$$\text{Energie thermique} = \text{Consommation massique} \times \text{Pouvoir calorifique}$$

Avec : Pouvoir calorifique en J/kg

#### III.3.3 Température des gaz de sortie

La température des gaz de sortie et la pression atmosphérique sont mesurés à l'aide d'un thermocouple de type K et d'une prise de pression placés sur la partie moteur du banc d'essai.

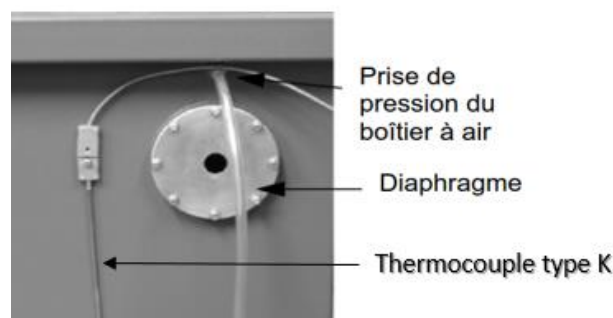


Figure 9 : Prise de pression et mesure de température

### III.3.4 Ratio air-carburant

C'est simplement le rapport entre le débit massique de l'air et le débit massique du carburant :

$$\text{Ration}_{\text{air-carburant}} = \frac{\text{Débit massique de l'air}}{\text{Débit massique du carburant}} \quad (\text{Équation 7})$$

Pour trouver le débit massique de l'air, l'équation précédente est proposé par **le constructeur du banc d'essai**. Elle prend en compte les pertes de charge du diaphragme et son diamètre.

$$\text{Débit massique de l'air} = C_d \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_A \cdot \Delta p}{R \cdot T_A}}$$

Symbole	Description	Unités	Valeur
$C_d$	Coefficient de perte de charge du diaphragme	-	0,6
$d$	Diamètre du diaphragme	m	
$P_A$	Pression ambiante	Pa	
$T_A$	Température de l'air ambiant à l'entrée	K	
$\Delta p$	Variation de pression	Pa	
$R$	Constante des gaz parfait (air)	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	287

### III.4 Banc d'essai expérimental TD200

Le banc d'essai expérimental TD200 de chez TecQuipment<sup>1</sup> est un banc d'essai complet et instrumenté pour tester des petits moteurs monocylindres habituellement utilisés pour des générateurs ou des pompes. Ce banc présenté sur la Figure 10 nous permettra de déterminer les performances caractéristiques du moteur les plus importantes. Il comprend deux parties principales qui sont le banc moteur avec un dynamomètre hydraulique et le châssis instrumental.

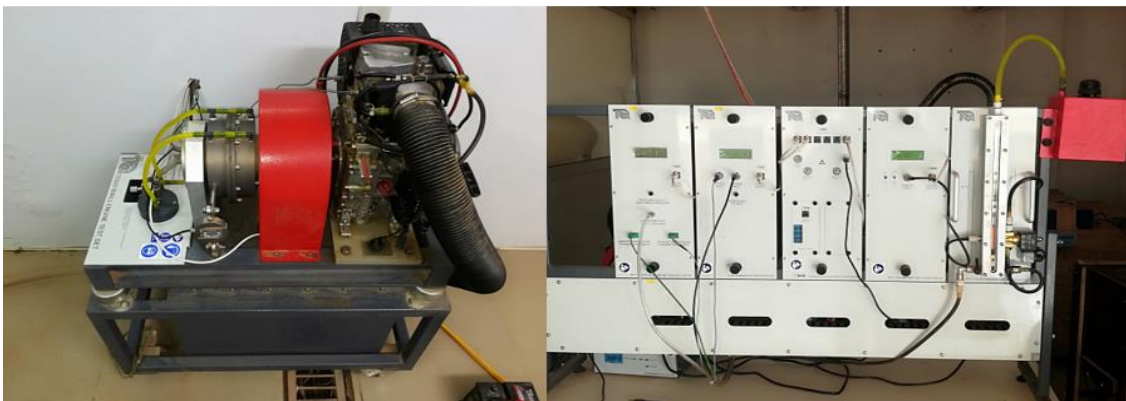


Figure 10 : Banc d'essai expérimental TD200

<sup>1</sup> TecQuipment est une entreprise britannique spécialisée dans la fabrication d'équipements pédagogiques de laboratoires pour les universités. Ils sont dans plusieurs domaines comme la mécanique des fluides, l'énergie solaire, aérodynamique, les moteurs...



### III.4.1 Banc moteur avec dynamomètre hydraulique

Le banc moteur présenté sur la Figure 11 est composé d'un charriot bas équipé de roues blocables sur lequel est monté un moteur diesel, d'un dynamomètre hydraulique et d'un caisson d'air avec un diaphragme. À côté du diaphragme, sont placés un thermocouple de type K et une prise de pression. Le diaphragme avec la prise de pression sont utilisés pour déterminer la température et la pression ambiante. Le dynamomètre hydraulique a pour seul but d'appliquer une charge au moteur diesel en test.

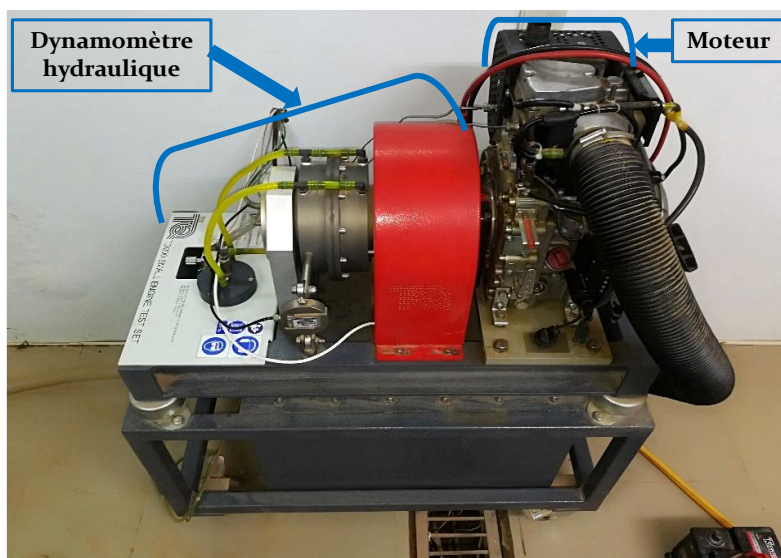


Figure 11 : Partie moteur avec dynamomètre hydraulique

#### ➤ Moteur diesel

Il s'agit d'un moteur diesel à 4 temps à injection directe dont les caractéristiques techniques sont résumées dans le Tableau V ci-dessous :

Tableau V : Caractéristiques du moteur diesel

Caractéristiques du moteur Diesel	
Marque	Hatz
Modèle	1B20
Cylindres/Temps	1/4
Alésage / Course (mm)	69 / 62
Cylindrée	232 cm <sup>3</sup>
Système d'injection	Injection direct
Refroidissement	À air
Taux de compression	22 : 1
Puissance maximal	2,2 kW@2000 tr/mn

### ➤ Dynamomètre hydraulique

Pour appliquer une charge au moteur, le banc d'essai possède un dynamomètre hydraulique présenté sur la Figure 11 et qui est simple à utiliser. La puissance fournie par le moteur est alors dissipée dans l'eau qui passe à travers le dynamomètre. Il permet d'appliquer une charge liée au débit et au niveau d'eau réglable au moyen d'une vanne à pointeau précise. Le couple est mesuré grâce à une cellule de charge électronique intégrée.

### III.4.2 Châssis instrumental

Le châssis instrumental présenté sur la Figure 12 est quant à lui composé d'un châssis équipé d'un module d'acquisition et d'analyse de données VDAS<sup>1</sup> (interface et logiciel dédié VDAS) et des modules de mesure et d'affichage (DPT1, DTS2 et DVF1). Le châssis instrumental est séparé du banc moteur afin d'éviter toute transmission de vibration du moteur aux instruments de mesure. Deux gaines de câbles sont à l'arrière du châssis, une pour les câbles d'alimentation électrique et la seconde pour les câbles des signaux. Sur la droite du châssis est fixé le réservoir fourni avec le moteur à tester.

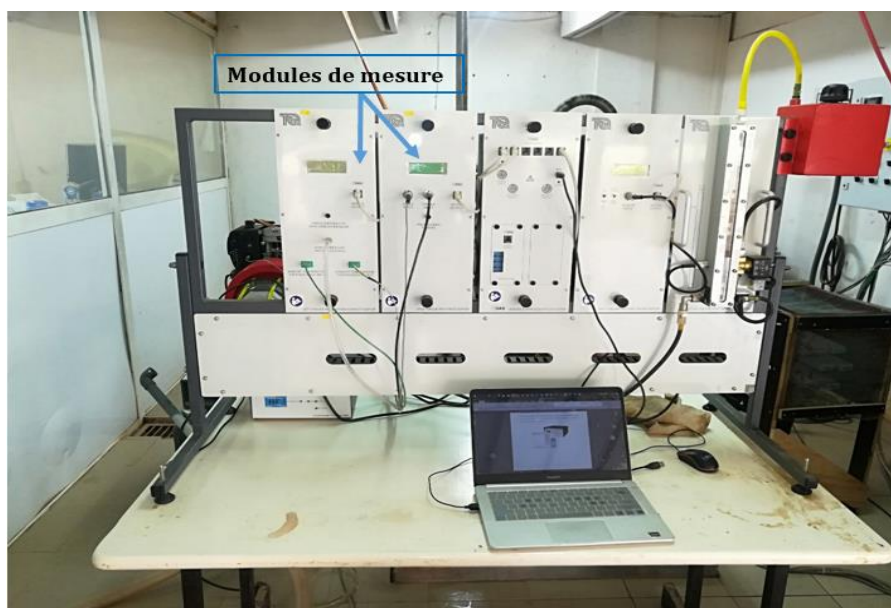


Figure 12 : Partie châssis instrumental

### III.4.3 Fonctionnement du banc d'essai expérimental

Le fonctionnement du banc est assez simple. Une fois le moteur démarré avec le carburant désiré, le dynamomètre hydraulique sert de charge variable au moteur au moyen d'une vanne à pointeau précise qui permet de faire varier le débit d'eau. Le moteur est instrumenté à l'aide de

---

<sup>1</sup> Versatile Data Acquisition Software est une marque déposée de la société TecQuipment



plusieurs capteurs (température, pression, optique...) afin que toutes les informations nécessaires puissent être mesurées, conditionnées et envoyées vers le système d'acquisition et d'analyse de données – VDAS. Ensuite, grâce à un logiciel dédié installé sur un ordinateur, on peut visualiser, tracer et enregistrer les différentes données exportables en format Excel (extension .XLSX).

### III.5 Protocoles des mesures expérimentales

#### III.5.1 Cartographie moteur

Nous entendons par cartographie moteur, les données caractéristiques référentielles du moteur qui sont obtenues avec le carburant de référence qui est le gasoil. Ainsi, la cartographie du moteur est réalisée en suivant les étapes suivantes :

**Étape 1** : On utilise le protocole de démarrage du moteur pour le démarrer au gasoil.

**Étape 2** : Ensuite, à l'aide de la vanne du dynamomètre hydraulique et de la crémaillère du moteur on charge le moteur à 100% à une vitesse de 2000 tr/mn.

**Étape 3** : On attend que le moteur atteigne son régime stable (5 à 10 mn). Ceci se caractérise par le fait que les données visualisées au niveau des modules de mesures restent plus ou moins fixes. Et ensuite, avec le logiciel VDAS on effectue une série de trois enregistrements des données du moteur (consommation spécifique, rendement global, température de gaz de sortie...).

**Étape 4** : On reprend successivement l'étape 2 puis l'étape 3, mais cette fois-ci avec une charge de 80%, puis 60%, 50%, 40%, 20% et 10%.

**Étape 5** : Enfin, on utilise le protocole d'arrêt du moteur pour l'arrêter et on récupère les données en format Excel sous l'extension .XLSX

#### III.5.2 Essais avec les HVP

Une fois les données référentielles du moteur déterminées, on peut procéder aux essais avec les HVP. Ainsi, pour réaliser une étude comparative théoriquement idéale, il aurait fallu que les essais avec les HVP soient effectués dans les mêmes conditions de température et de pression que la cartographie du moteur. Cependant, le local au sein duquel le banc d'essai est installé n'est pas instrumenté pour réguler la température et la pression qui s'y trouve. Pour résoudre ce problème de variabilité autant que faire se peut, deux mesures de précaution ont été observées :

1. Toutes les mesures de données, qu'il s'agisse de la cartographie moteur ou des essais avec les HVP ont été réalisées les matinées avant midi. Ceci a permis de maintenir les essais dans les plages de température et de pression atmosphérique suivantes :

- **Température ambiante : 28°C – 30°C**
- **Pression atmosphérique : 0,965 atm – 0,969 atm**

2. Chaque essai avec une HVP est précédé par un essai avec le gasoil qui sera comparé à la cartographie moteur. L'essai avec l'HVP n'est effectué que lorsque l'essai avec le gasoil est plus ou moins conforme à la cartographie du moteur. À noter également que le moteur est toujours arrêté avec le gasoil en fin d'essai.

Partant de là, les essais avec les HVP sont effectués en suivant les étapes ci-contre :

**Étape 1 :** On utilise le protocole de démarrage du moteur pour le démarrer au gasoil.

**Étape 2 :** Ensuite, à l'aide de la vanne du dynamomètre hydraulique et de la crémaillère du moteur on charge le moteur à 100% à 2000 tr/mn.

**Étape 3 :** On attend que le moteur atteigne son régime stable (5 à 10 mn). Ceci se caractérise par le fait que les données visualisées au niveau des modules de mesures restent plus ou moins fixes. Et ensuite, avec le logiciel VDAS on effectue une série de trois enregistrements des données du moteur (consommation spécifique, rendement global, température de gaz de sortie...).

**Étape 4 :** On reprend successivement l'étape 2 et l'étape 3, mais cette fois-ci avec une charge de 80%, puis 60%, 50%, 40%, 20% et 10%.

**Étape 5 :** On vérifie si les résultats sont plus ou moins conformes à la cartographie moteur.

**Étape 6 :** S'il n'y a pas d'écart conséquent, on augmente la température de la chambre de combustion du moteur, on arrête le moteur et on change rapidement le gasoil avec une HVP.

**Étape 7 :** On redémarre immédiatement le moteur à 2000 tr/mn et on suit exactement le protocole de la cartographie moteur avec maintenant l'HVP comme carburant.

La Figure 13 ci-dessous résume le protocole des mesures expérimentales pour la cartographie moteur et pour les essais avec les HVP.

**NB :** La variation de la charge du moteur est toujours effectuée de manière décroissante afin de limiter les erreurs d'hystérésis et par pas de 20, c'est-à-dire qu'on commence à charger le moteur à 100% puis à 80%, 60%, 40% et 20%. Toutefois comme indiqué par le constructeur, le moteur ne doit pas fonctionner de manière prolongée sans charge car cela pourrait occasionner l'usure des pièces internes à cause des frottements. Pour des questions de représentativité pour les analyses à venir, les charges de 10% et 50% ont été ajoutées.

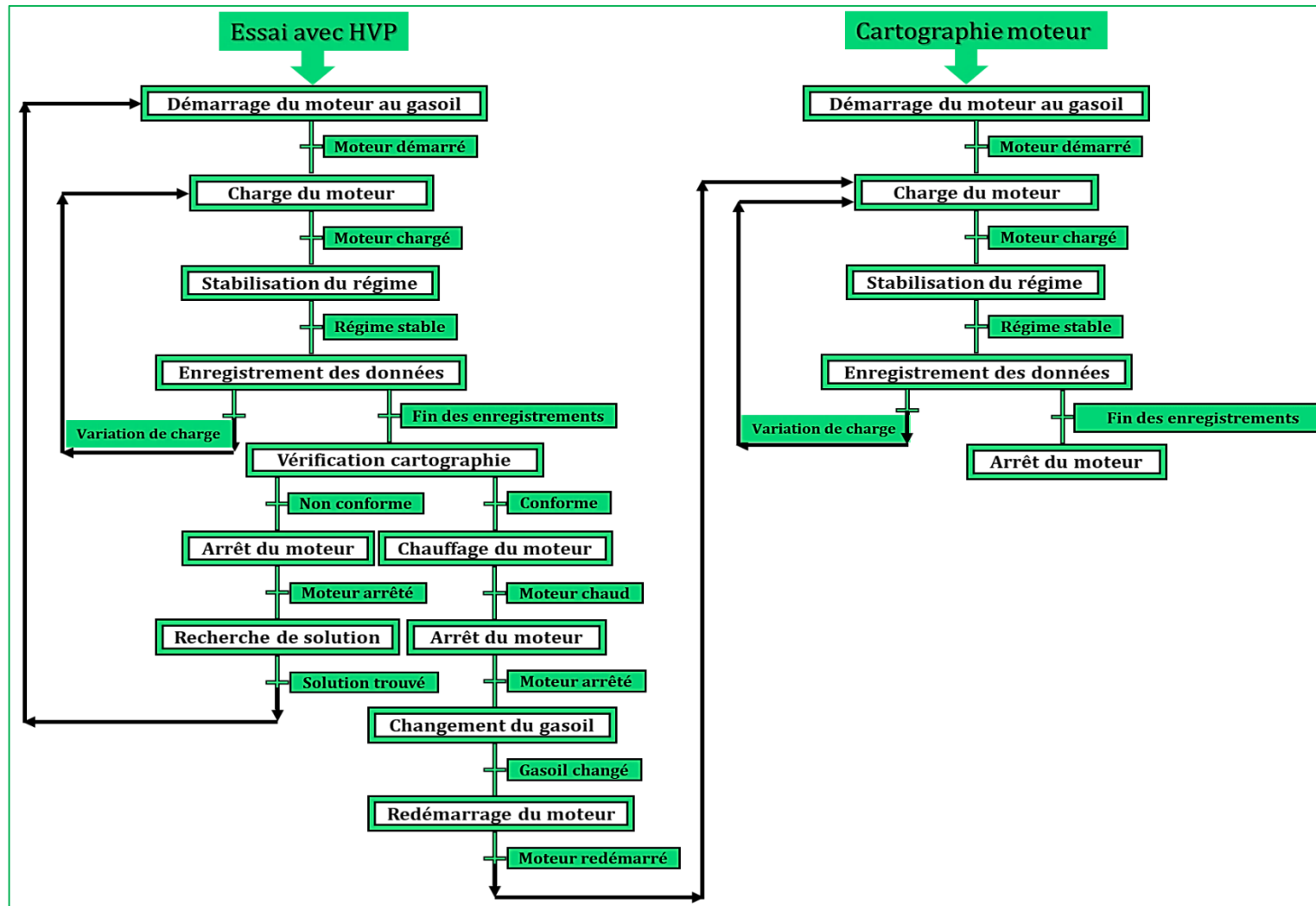


Figure 13 : Protocoles des mesures expérimentales

## IV RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Cette partie présente dans une première section les résultats et l'analyse de la caractérisation physico-chimique du gasoil et des trois HVP. Ensuite seront présentés les résultats des performances du moteur (consommation spécifique, rendement global, température des gaz...) avec le gasoil et les trois HVP ainsi que leurs analyses et discussions.

### IV.1 Résultats des propriétés physico-chimiques des carburants

La détermination des caractéristiques physico-chimiques est très fondamentale pour l'analyse des résultats de performance relatifs à la combustion des carburants dans la suite du travail. D'après Dabi et al [22], les propriétés qui sont les plus généralement utilisées pour la caractérisation des HVP sont : la viscosité, la masse volumique et le pouvoir calorifique. Le Tableau VI présente les résultats de viscosité à 40°C, de PCI et de masse volumique pour le jatropha, le coton, le balanites et le gasoil.

Tableau VI : Résultats des propriétés physico-chimique des carburants

Propriétés	Gasoil	Jatropha	Coton	Balanites
Viscosité (cSt) à 40 °C	5,3 ± 0,02	34,81 ± 0,08	33,89 ± 0,05	33,93 ± 0,05
PCI (kJ/kg)	42185 ± 97	37171 ± 296	37721 ± 307	36975 ± 144
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	845 ± 5	909 ± 5	912 ± 5	910 ± 5

#### IV.1.1 Viscosité cinématique à 40 °C

La Figure 14 présente les viscosités cinématiques du gasoil, de l'huile de jatropha, de l'huile de coton et de l'huile de balanites. Les viscosités des HVP sont en moyenne 6 fois supérieures à la viscosité du gasoil qui est de 5,3 cSt. On note également que le jatropha est légèrement (2,7% en moyenne) plus visqueux que le coton et le balanites. Cependant, la viscosité du coton et celle du jatropha qui sont respectivement 33,89 cSt et 33,93 cSt sont très proches voire identiques.

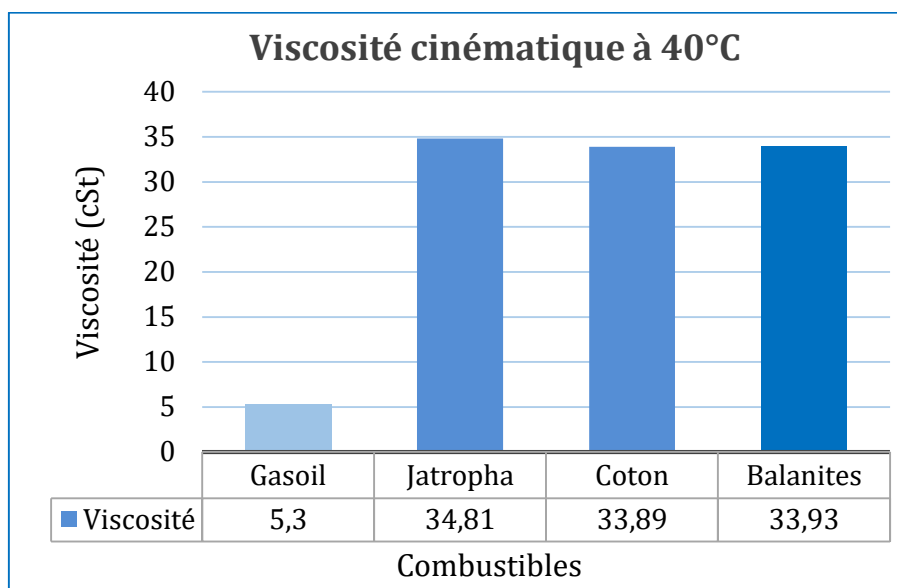


Figure 14 : Viscosité cinématique des carburants à 40°C

Les résultats des viscosités des HVP sont plus ou moins comparables à certains résultats dans la littérature. Ainsi, pour le coton, Kumar et al [38], Rakopoulos et al [39] et Joël et al [17] ont tous rapporté 34 cSt, ce qui est identique à ce que nous avons trouvé. Cependant, Martin et al [40] et Fontaras et al [41] trouvent une valeur de 32,7 cSt qui est légèrement faible comparé à ce que nous avons trouvé. Pour le jatropha, Wang et al [42] rapporte une valeur de 34,67 cSt qui est très proche de la nôtre (34,81 cSt), par contre d'autres auteurs ont des valeurs de viscosité qui s'écartent de ce que nous avons trouvé, parmi lesquels Chalatlou et al [34] et Chauhan et al [36] qui ont respectivement 39 cSt et 37 cSt. Et en ce qui concernant le balanites, une viscosité de 34 cSt qui est identique à la nôtre (33,93 cSt) a été notifiée par Gutti et al [43]. D'autre part, Deshmukh et al [44] a trouvé une valeur de 38,6 cSt qui très écartée des 33,93 cSt que nous avons trouvé. À propos du gasoil, la viscosité que nous avons trouvée qui est de 5,3 cSt se trouve bien dans la plage de viscosité proposée par les synthèses bibliographiques de Joël et al [17] et Silitonga et al [45] qui est de 1,6-5,9 cSt. La variabilité de la viscosité du gasoil à travers les chercheurs serait probablement due à la différence des techniques de raffinage desquelles découlent plusieurs qualités de gasoil.

Par ailleurs, la différence de viscosité entre les différentes HVP est dûe à la longueur des liaisons carbonées, plus la chaîne des liaisons carbone-carbone est longue plus l'huile est visqueuse. Cependant, les trois HVP qui ont été utilisées ici ont toutes des acides gras majoritaires constitués de 18 atomes de carbones (voir annexe A), ce qui ne permet pas de les départager sur cette base. Et d'ailleurs, cela expliquerait sans doute le fait que les trois huiles ont des viscosités qui se trouvent dans un même ordre de grandeur.

### IV.1.2 PCI

La Figure 15 présente le PCI du gasoil, du jatropha, du coton et du balanites. On remarque que les PCI des HVP qui sont 37,2 MJ/kg pour le jatropha, 37,7 MJ/kg pour le coton et 37,0 MJ/kg pour le balanites sont en moyenne 13% inférieurs au PCI du gasoil qui est de 42,2 MJ/kg. On note également que le PCI du coton est légèrement supérieur (1,7% en moyenne) à celui du Jatropha et du balanites. Cependant, le balanites a un PCI qui est relativement faible par rapport aux PCI des autres HVP.

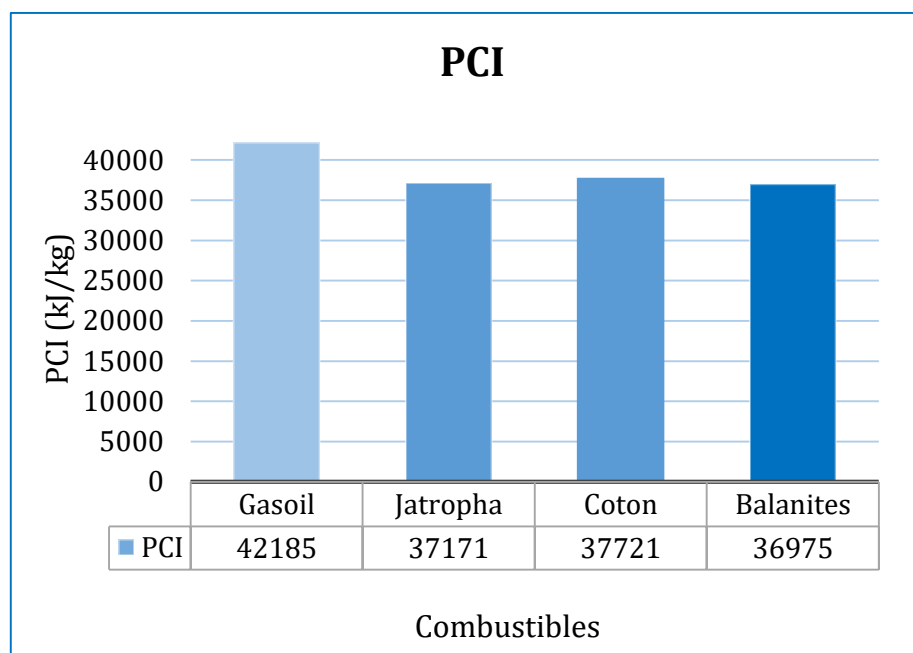


Figure 15 : PCI des carburants

Toutefois, il faut noter que la majorité des articles scientifiques donnent le PCS à la place du PCI et d'ailleurs de nombreux auteurs ne font pas la précision et se limitent simplement aux termes « Heating value » ou « Calorific value » sans préciser s'il s'agit du PCI ou du PCS. Ainsi, le **Tableau VII** présente les résultats des PCS qui ont été obtenus à travers nos mesures :

Tableau VII : Résultats des PCS des carburants

PCS (MJ/kg)			
Gasoil	Jatropha	Coton	Balanites
45,0 ± 0,1	38,6 ± 0,3	39,2 ± 0,3	38,4 ± 0,1

Ici également, nos résultats correspondent à ceux rapportés par certains auteurs. Ainsi, pour le gasoil nous avons trouvé une valeur de 45,0 MJ/kg qui est en parfait accord avec les résultats de Chalatlou et al [34]. Nos résultats sont également très proches des résultats de

Silitonga et al [45] et Agarwal et Agarwal [23] qui trouvent eux tous 45,3 MJ/kg. Cependant, une valeur inférieure de 42,5 MJ/kg a été reportée par Raj et al [46]. Pour le jatropha, notre valeur de PCS qui est de 38,6 MJ/kg correspond exactement aux résultats de De et Panua [47]. Cependant, Chalatlou et al [34] et Joël et al [17] ont trouvé des valeurs légèrement différentes, respectivement 38,4 MJ/kg, 38,8 MJ/kg et par ailleurs Oliveira et al [48] et Ružbarský et al [49] ont eu tous une valeur de 39,5 MJ/kg qui est très élevée comparée à la nôtre. Pour le coton, nous n'avons pas trouvé dans la littérature des valeurs identiques à nos résultats (39,2 MJ/kg) probablement à cause de la nature "raffinée" de l'huile de coton que nous avons utilisée. Toutefois des valeurs proches ont été identifiées notamment celles de Bart et al [50] et He et Bao [51] qui ont trouvé 39,5 MJ/kg et celui de Raj et al [46] qui est de 39,6 MJ/kg. En ce qui concerne le balanites également aucune valeur de PCS ni de PCI identique à nos résultats n'a été identifiée dans la littérature. Toutefois, une valeur de 39,8 MJ/kg très élevée comparée à la nôtre qui est de 38,4 MJ/kg a été trouvée par Deshmukh et al [44]. Ce manque d'information concernant le pouvoir calorifique de l'huile de balanites est dû à la rareté voire l'absence d'étude concernant son utilisation directe comme carburant dans les moteurs diesel.

La méthode couramment utilisée pour la détermination du pouvoir calorifique est celle du calorimètre adiabatique qui nécessite l'utilisation de plusieurs éléments (fil d'attache, capsule de gélatine, bombe calorimétrique, quantité d'oxygène, deux thermomètres, une balance de précision pour la pesée...). L'utilisation de ces éléments occasionne des mesures intermédiaires qui augmentent les erreurs de mesure (systématiques, aléatoires et de négligences) qui à leur tour ne font qu'augmenter la variabilité de la mesure du pouvoir calorifique à travers les chercheurs. Ce qui pourrait d'une part expliquer la différence des résultats à travers les auteurs.

### IV.1.3 Masse volumique

La Figure 16 présente les masses volumiques du gasoil, de l'huile de jatropha, de l'huile de coton et de l'huile de balanites. On constate que les masses volumiques des HVP qui sont respectivement 909 kg/m<sup>3</sup>, 912 kg/m<sup>3</sup> et 910 kg/m<sup>3</sup> pour le jatropha, le coton et le balanites sont en moyenne 8% supérieures à celle du gasoil qui est de 845 Kg/m<sup>3</sup>. On retient également que les trois HVP ont sensiblement une même masse volumique qui est en moyenne 910 kg/m<sup>3</sup>.

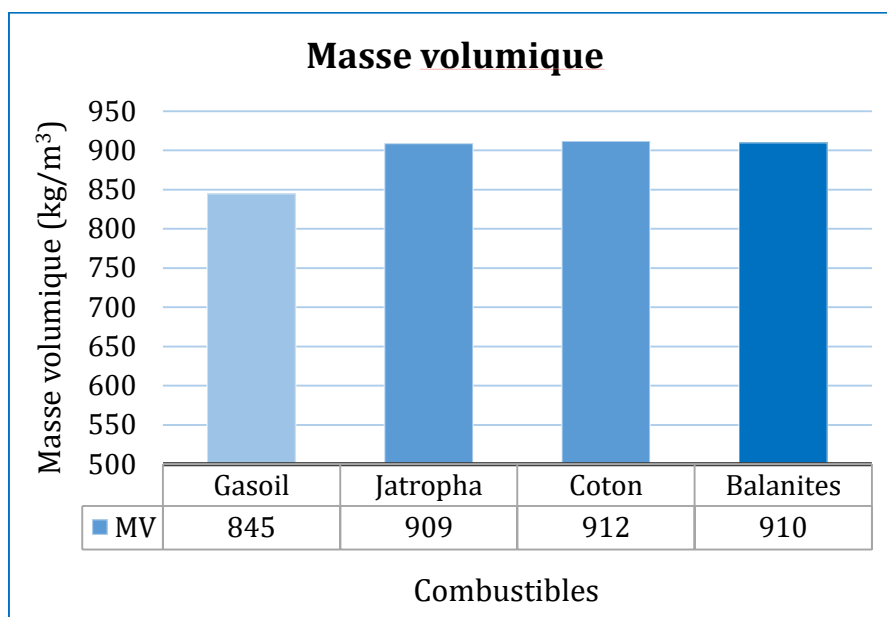


Figure 16 : Masse volumique des carburants

Plusieurs auteurs ont trouvé des valeurs de masse volumique comparables à nos résultats. Pour le coton, la valeur de la masse volumique que nous avons qui est de 912 kg/m<sup>3</sup> est exactement la même que ce que rapporte Sarada et al [52], RAMADHAS et al [53] et Altin et al [54]. Cependant, celle-ci est légèrement inférieure à la valeur de Raj et al [46] qui est de 914 kg/m<sup>3</sup> et complètement différente des 920 kg/m<sup>3</sup> de Fontaras et al [41]. Pour le balanites, les 910 kg/m<sup>3</sup> que nous avons mesuré est parfaitement identique à ce qu'a trouvé Datti et al [55], Fregon [56]. Toutefois, Ahmed et al [57] rapporte une valeur de 912 kg/m<sup>3</sup> qui est légèrement supérieure à la nôtre et Manji et al [58] à quant à lui une valeur de 1001 kg/m<sup>3</sup> qui s'écarte exagérément des résultats de masse volumique communément trouvés par la majorité des auteurs. Pour le jatropa, la majorité des articles comme Agarwal et Agarwal [23], De et Panua [33], Chalatlou et al [34] ont une valeur de 917 kg/m<sup>3</sup> qui est supérieure aux 909 kg/m<sup>3</sup> que nous avons eu à travers nos mesures.

La divergence entre les auteurs pourrait s'expliquer d'une part par la diversité des méthodes de pressage ainsi que la différence des traitements que les huiles ont reçus après le pressage (filtrage, dégommeage, neutralisation...). Cependant, cette information n'est pas précisée dans la majorité des articles, ce qui ne permet pas de faire une comparaison sur cette base. L'existence de plusieurs variétés d'une même espèce de plante comme illustré sur la Figure 17 [59] pourrait également contribuer à augmenter la divergence des résultats des chercheurs .





Figure 17 : Plusieurs variétés du balanites aegyptiaca [59]

## IV.2 Résultats des essais d'HVP

### IV.2.1 Consommation spécifique en carburant

La Figure 18 ci-dessus présente l'évolution de la consommation spécifique en carburant du moteur en fonction de la charge appliquée au moteur pour l'huile de coton, l'huile de jatropha et l'huile de balanites et le gasoil.

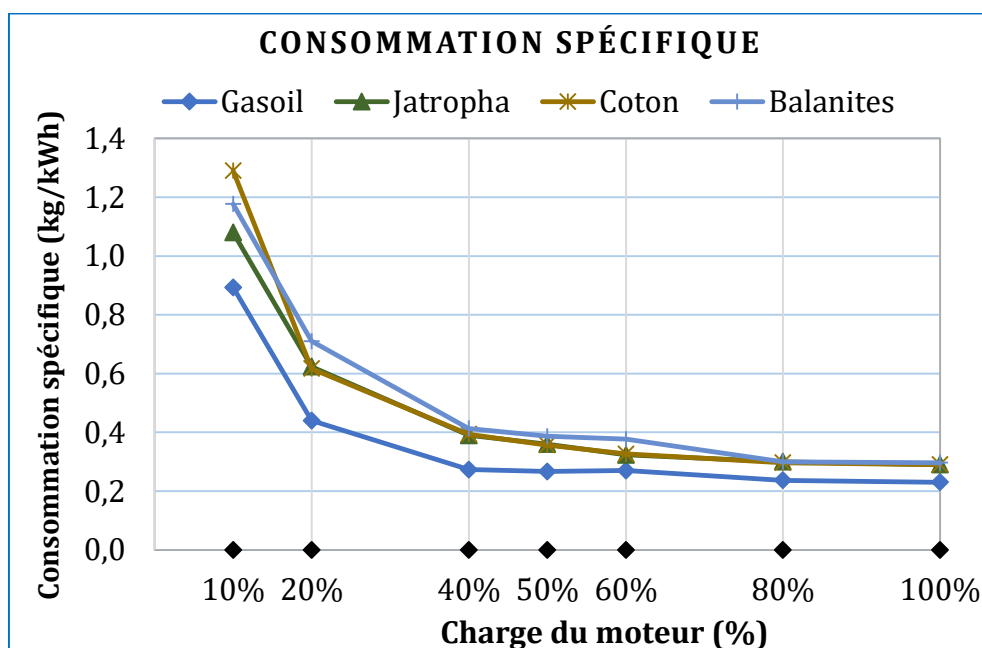


Figure 18 : Évolution de la consommation spécifique en fonction de la charge du moteur

Pour l'ensemble des carburants, la consommation spécifique en carburant décroît avec l'augmentation de la charge du moteur et tend à se stabiliser aux fortes charges (80% à 100%). Pour le gasoil, elle est en moyenne 25,6 % inférieure par rapport à celle des HVP. De plus, quel

que soit la charge appliquée au moteur la consommation spécifique avec le gasoil est inférieure à celles trouvées avec les HVP. Pour les faibles charges, elle est en moyenne inférieure à 28% par rapport à celles des HVP contrairement aux fortes charges où l'écart se réduit aux environs de 21%. Les résultats ci-énoncés sont plus ou moins en conformité avec ceux de certains auteurs dans la littérature [15,23,35,54,60-64]. Ainsi, en ce qui concerne la consommation spécifique en carburant du moteur, nous pouvons retenir que la majorité des chercheurs ont des résultats qui tendent à montrer qu'avec le gasoil on obtient des valeurs inférieures comparativement à celles obtenues avec l'utilisation des HVP et cela indépendamment de l'HVP et le moteur utilisé.

On note également que la variation de la consommation spécifique en carburant est très significative de 10% à 40% de charge, passant par exemple drastiquement de 0,89 kg/kWh à 0,27 kg/kWh pour le gasoil. Ceci démontre d'une part l'importance du choix du moteur pour un utilisateur et la nécessité à s'assurer que le moteur fonctionne majoritairement à fortes charges pour une utilisation efficiente de cette dernière. En plus, de 20% à 100% de charge, la consommation spécifique du moteur avec le jatropha et le coton sont identiques.

**La consommation spécifique du moteur avec le balanites est plus élevée par rapport à celle avec les autres carburants. Elle est en moyenne 19,2% supérieure à celle avec le gasoil. Ainsi, pour une puissance identique, le moteur consomme plus de balanites que les autres carburants. Toutefois, aux fortes charges, la consommation spécifique du moteur est identique quel que soit le carburant utilisé et est aux alentours de 0,3 kg/kWh pour toutes les HVP.**

La cause de la surconsommation en HVP comparativement au gasoil conventionnel s'expliquerait d'une part par la différence entre le PCI du gasoil et ceux des HVP. Le PCI du gasoil étant en moyenne 13% supérieur à celui des HVP, il faut donc consommer plus d'huile que de gasoil afin que le moteur puisse produire la même puissance. Cette explication est en plus confirmée par le comportement du balanites avec qui on enregistre une consommation spécifique légèrement supérieure à celles des autres HVP sachant que son PCI est le plus bas parmi les HVP. La valeur élevée de la viscosité des HVP jouerait également un rôle dans cette augmentation de la consommation spécifique car on constate que l'écart de consommation entre le gasoil et les HVP diminue avec l'augmentation de la charge du moteur en passant d'environ 28% aux faibles charges à environ 21% aux fortes charges. Ceci s'expliquerait sans doute par le fait qu'aux fortes charges, la température de la chambre de combustion est assez élevée pour réduire la viscosité des HVP avant l'inflammation du carburant concourant ainsi à l'amélioration de leur atomisation lors de la combustion dans le cylindre.

## IV.2.2 Rendement global

La Figure 19 présente l'évolution du rendement global ou rendement effectif du moteur avec le gasoil, l'huile de coton, l'huile de jatropha et l'huile de balanites en fonction de la charge appliquée au moteur.

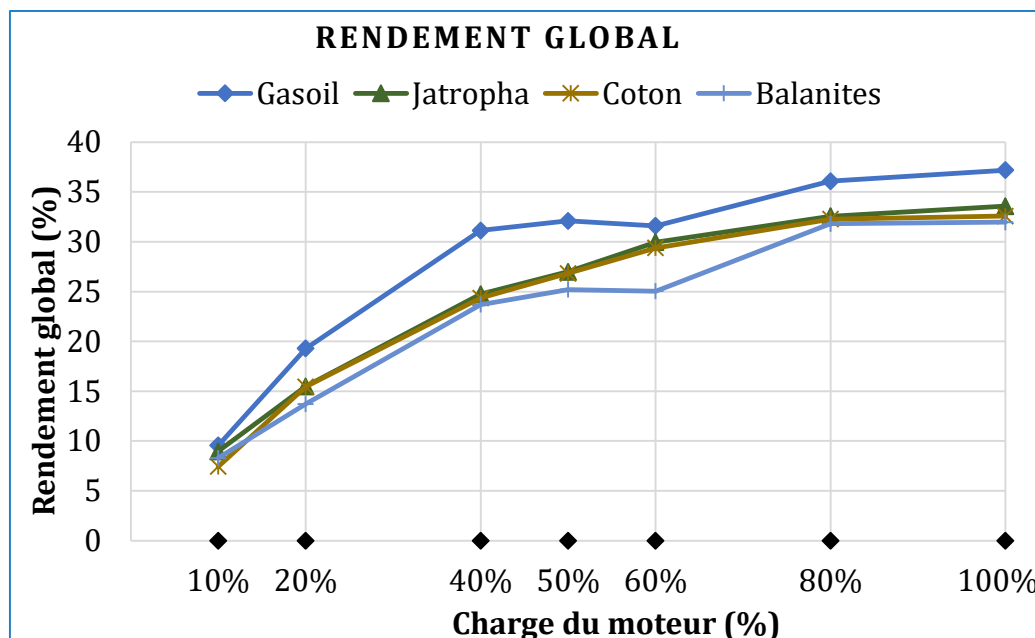


Figure 19 : Évolution du rendement global en fonction de la charge du moteur

Le rendement global du moteur augmente avec l'augmentation de la charge du moteur indépendamment du carburant utilisé. Ce constat n'est qu'une conséquence directe de la diminution de la consommation spécifique avec l'augmentation de la charge. À toutes les charges du moteur, le gasoil présente un meilleur rendement par rapport aux HVP. Ainsi, le rendement maximal du moteur qui est de 37,18% est atteint avec le gasoil en pleine charge (100% de charge) tandis que le rendement maximal qui est obtenu avec les HVP est en moyenne de 32,71% en pleine charge. Plusieurs équipes de recherche ont des résultats similaires aux nôtres [23,36,47,60,62,65]. Cependant, certains auteurs [15,61] ont des résultats contraires qui montrent tantôt que le rendement global du moteur est plus ou moins identique quel que soit le combustible utilisé ou que souvent le rendement global obtenu avec certaines proportions de mélange HVP-Gasoil peut devenir supérieur au rendement obtenu avec le gasoil.

L'utilisation du jatropha et le coton donne des rendements quasi-identiques. Cependant, à 100% de charge, le rendement avec le jatropha qui est de 33,58% est légèrement supérieur aux

rendements obtenus avec les deux autres HVP qui sont respectivement pour le coton et le jatropha 32,58% et 31,97%.

**De plus, globalement à toutes les charges du moteur, le balanites donne des rendements légèrement inférieurs aux rendements obtenus avec le jatropha et le coton. À l'exception des charges extrêmes du moteur (10% et 100%). A 10% de charge, le moteur n'est pas stable ce qui pourrait expliquer la forte variation des données du moteur et à 100% de charge, le rendement du moteur reste presque identique que ça soit avec le balanites, le jatropha ou le coton.**

Le faible rendement obtenu avec l'utilisation des huiles végétales comparativement au gasoil est explicable à travers leur faible indice de cétane qui varie généralement de 29 à 43 [17] et qui est en moyenne inférieur à 28% par rapport à l'indice de cétane du gasoil qui est généralement fixé à 50. L'indice de cétane étant l'aptitude du carburant à s'auto-enflammer sous l'effet de la compression, alors plus il est faible pour un carburant quelconque, plus ce carburant aura tendance à avoir un retard au niveau du délai d'inflammation. Ceci aura comme conséquence une combustion incomplète des HVP, c'est-à-dire moins d'énergie libérée à travers leur combustion. À cela s'ajoute également le faible PCI massique des HVP par rapport au PCI massique du gasoil qui fait que la combustion des HVP même lorsque complète libèrera une énergie inférieure à celle libérée par la combustion du gasoil. Toutefois, à cause de la surconsommation des HVP par rapport au gasoil à puissance effective égale, on note que leur PCI volumique est inférieur à environ 5% à 6% rapport au PCI volumique du gasoil.

### IV.2.3 Température des gaz d'échappement

La Figure 20 présente l'évolution de la température des gaz de sortie avec l'utilisation du gasoil, de l'huile de coton, de l'huile de jatropha et l'huile de balanites.

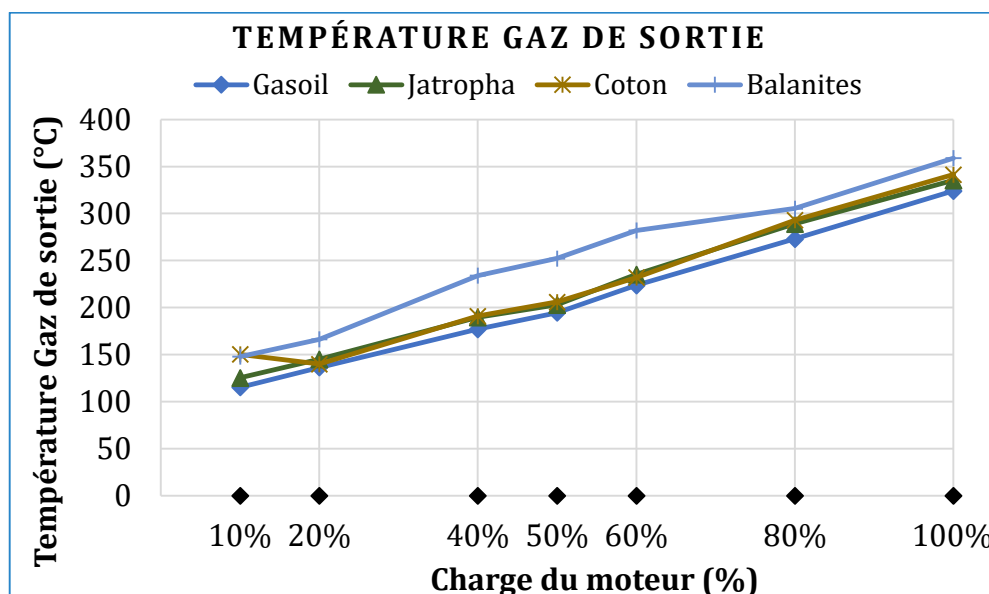


Figure 20 : Évolution de la température des gaz de sortie en fonction de la charge du moteur

Le constat global pour tous les carburants est que la température des gaz d'échappement augmente d'une manière plus ou moins linéaire avec l'augmentation de la charge du moteur.

**Les valeurs obtenues avec le gasoil sont en moyenne 5% plus faibles par rapport aux valeurs obtenues avec l'huile de coton et l'huile de jatropha. Cependant, cet écart devient plus significatif avec le balanites et atteint en moyenne les 10%. Ainsi, les températures maximales à toutes les charges du moteur sont atteintes avec le balanites comme carburant.**

Dans la littérature, plusieurs articles scientifiques [23,36,38,40] font le même constat selon lequel les températures des gaz d'échappement avec le gasoil sont inférieures à celles obtenues avec les HVP. Cependant, Chalaton et al [34] trouve qu'à forte charge la température des gaz d'échappement avec le gasoil est supérieure à celle mesurée avec le jatropha et ses mélanges, ce qui est contraire à ce que nous avons trouvé.

D'autres part, on peut retenir que malgré la légère différence de viscosité et de PCI entre l'huile de coton et l'huile de jatropha, on a avec ces deux huiles des températures de gaz d'échappement très semblables à toutes les charges du moteur. Ceci serait probablement lié aux différents traitements de raffinage que l'huile a reçus, ce qui permet de diminuer les traces d'impuretés qui sont dans l'huile améliorant ainsi ses qualités de combustion. De plus, le fort indice de cétane de l'huile de jatropha par rapport à l'huile de coton pourrait également expliquer le fait que le jatropha se comporte presque de la même manière que le coton tout en ayant des propriétés telles que la viscosité et le PCI légèrement différentes de celles du coton.

La température des gaz d'échappement étant proportionnelle à la température moyenne de la chambre de combustion [66], on pourrait expliquer le comportement des HVP à travers leur mauvaise combustion qui fait qu'une bonne partie de leur énergie n'est pas transmise au piston mais plutôt est perdue sous forme de chaleur à travers les gaz d'échappement. Ainsi, l'augmentation de la température des gaz d'échappement serait liée à toutes les causes qui concourent à la mauvaise combustion des HVP parmi lesquelles la forte viscosité, le faible PCI et la faible volatilité des HVP jouent un rôle qui ne peut être négligé.

#### IV.2.4 Rapport de combustion air-carburant

La Figure 21 présente l'évolution du ratio air-carburant pour le gasoil, l'huile de coton, l'huile de jatropha et l'huile de balanites en fonction de la charge du moteur.

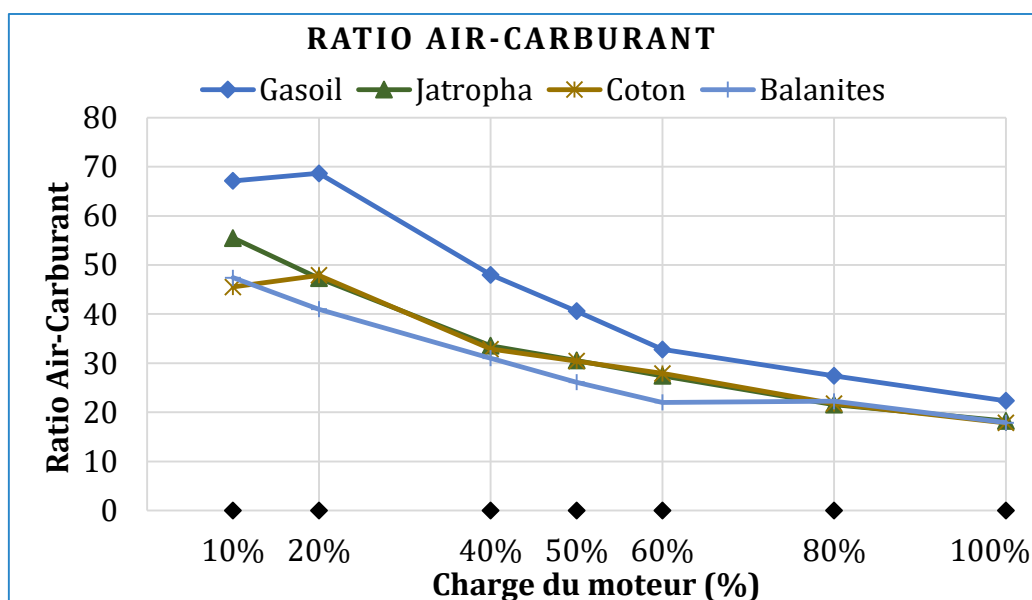


Figure 21 : Évolution du ration air-carburant en fonction de la charge du moteur

Le ratio air-carburant décroît avec l'augmentation de la charge du moteur indépendamment du carburant utilisé. La valeur obtenue avec le gasoil est supérieure à celles obtenues avec les HVP et est en moyenne 26% supérieure. Toutefois, cet écart qui est d'environ 31% aux faibles charges diminue aux charges élevées pour se retrouver aux environs de 20%.

Le coton et le jatropha ont le même comportement en ce qui concerne le ratio air-carburant, d'ailleurs tout comme pour les autres performances du moteur comme la consommation spécifique, le rendement global et la température des gaz d'échappement. De même, au niveau des charges élevées, toutes les huiles végétales se comportent presque de la même manière avec en moyenne un ratio d'environ 18 à 100% de charge.

Le ratio air-carburant avec le balanites est globalement (de 20% à 100% de charge) plus faible comparativement au ratio obtenu avec le jatropha et le coton. La forte variation des données du moteur à 10% de charge pourrait être justifié par l'instabilité du moteur à cette charge surtout avec les HVP comme carburant.

D'après Kasireddy et al [67], la présence d'oxygène dans les HVP expliquerait la faible consommation en air du moteur avec les HVP comparativement à la consommation avec le gasoil. Cependant, l'analyse de la Figure 22 qui présente l'évolution du débit d'air en fonction de la charge du moteur nous montre que globalement la consommation d'air du moteur ne dépend pas du carburant utilisé (en dehors du balanites qui s'écarte légèrement aux charges moyennes).

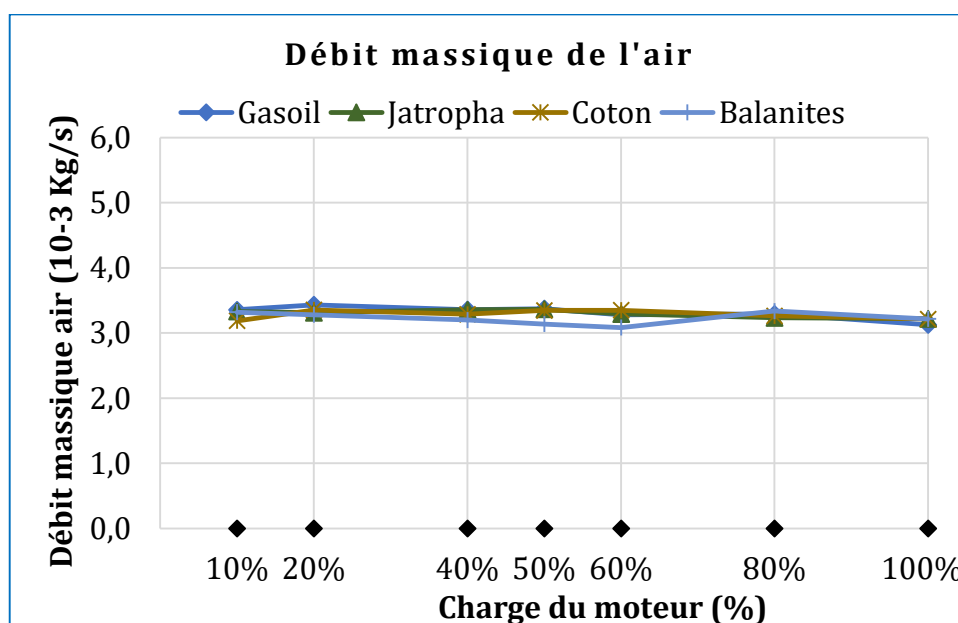


Figure 22 : Évolution du débit massique d'air en fonction de la charge du moteur

Ce dernier constat nous permet de dire que la quantité d'air consommée par le moteur pour la combustion de n'importe quel carburant est identique et n'est pas liée à la nature du carburant utilisé notamment la présence ou non d'oxygène dans sa composition chimique.

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Consommation massique d'air}}{\text{Consommation massique en carburant}}$$

Ainsi, en se basant sur la définition du ratio, si la quantité d'air consommée par le moteur pour une combustion est plus ou moins identique quel que soit le carburant, alors on peut dire que la différence du ratio en fonction du carburant utilisé n'est qu'une conséquence directe de la surconsommation des HVP par rapport au gasoil vu dans la partie *Consommation spécifique en carburant*.

### IV.2.5 Pression du cylindre

La Figure 23 présente la pression cylindre, c'est-à-dire la pression interne qui règne dans le cylindre du moteur en fonction de l'angle du vilebrequin pour le gasoil, le coton, le jatropha et le balanites. Cette courbe de pression est représentative de la combustion, donc de la manière dont l'énergie chimique du carburant est convertie dans le moteur en énergie mécanique et en chaleur. Les mesures ont été effectuées à 80% de la charge nominale du moteur et à une vitesse de rotation de 2000 tr/mn.



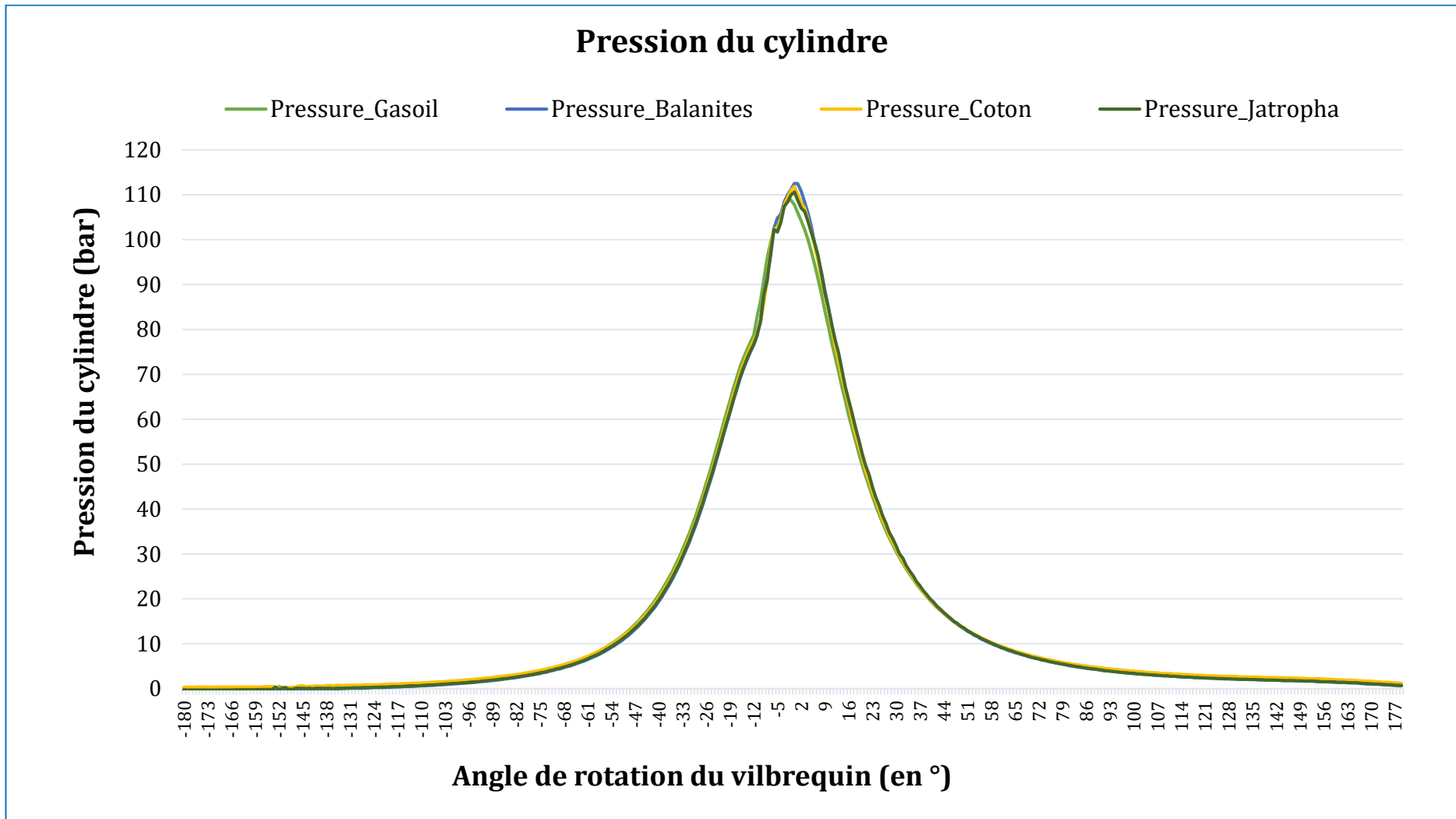


Figure 23 : Pression du cylindre en fonction de l'angle du vilebrequin à 80% de charge et à 2000 tr/min

On remarque globalement que l'allure des courbes pour l'ensemble des combustibles est régulière et que les pics de pression au sein du cylindre varient très légèrement en fonction de la nature du carburant. Ainsi, avec le gasoil on a un pic 108 bar qui est très légèrement inférieur par rapport à celle des HVP qui ont en moyenne une pression de 112 bar (respectivement 112, 112 et 111 pour le balanites, le coton et le jatropha). Toutefois, tenant compte des incertitudes liées aux appareillages de mesure, cet écart ne semble pas être si significatif pour nécessiter une tentative d'interprétation. Ce constat reste conforme aux résultats de Canakci et al [68] qui explique l'identité de la courbe du gasoil à celle des HVP par le fait que le moteur convertit de la même manière, c'est-à-dire par les mêmes phénomènes l'énergie chimique contenue dans le gasoil et les HVP en énergie mécanique sans distinction importante.

Cependant, les résultats de pression du cylindre pour les différents carburants pourraient avoir été influencés par les difficultés liées au réglage du codeur angulaire du vilebrequin. En effet, le système ECA100 qui mesure et affiche les signaux provenant du capteur d'angle du vilebrequin doit être réglé au point mort haut du moteur avant les mesures et ce réglage nécessite un niveau de précision hors pair qui serait presque impossible d'être réalisé à la main humaine sans erreur. Pourtant, d'après le manuel du constructeur, une erreur de 1% pendant le réglage peut donner jusqu'à 5% d'erreur sur les résultats, ce qui est déjà supérieure aux 4% d'écart qu'il y a entre la pression cylindre obtenue avec le gasoil et celle obtenue avec les HVP.

## V CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude avait pour objectif de contribuer à une meilleure connaissance des conditions de combustion des HVP dans les moteurs diesels à injection direct. D'abord, la revue bibliographique montre que plusieurs divergences existent entre les chercheurs concernant le comportement des HVP lorsqu'utilisées directement comme carburant dans les moteurs diesels à injection directe. Les causes de ces divergences sont nombreuses, cependant, la différence des conditions expérimentales (température, pression...), des moteurs, des HVP et des gasoils jouent certainement un rôle qui ne peut être négligé et la mise en place de normes d'essai pourrait sans doute contribuer à résoudre ces divergences.

Ensuite, quelques propriétés importantes des HVP ont été déterminées et comparées à celles du gasoil. Ainsi, le coton, le jatropha et le balanites ont des viscosités qui sont en moyenne 6 fois supérieures à celle du gasoil, des masses volumiques en moyenne 8% supérieures à celle du gasoil et des PCI massiques en moyenne 13% inférieures.

Puis, l'étude comparative des performances du moteur avec le jatropha, le coton, le balanites et le gasoil montre globalement que les performances du moteur avec les HVP sont en dessous de celles du moteur avec le gasoil. Toutefois, le coton et le jatropha se comportent approximativement de la même manière contrairement au balanites qui induit des performances moins élevées.

**Ainsi, le rendement global du moteur avec le coton et le jatropha est trouvé en moyenne inférieur à 14,1 % par rapport au rendement avec le gasoil et celui avec le balanites est en moyenne 19,2% inférieur par rapport au gasoil. En ce qui concerne la consommation spécifique du moteur, par rapport au gasoil le moteur consomme en moyenne 32,0 % plus de coton et de jatropha et 40,7 % plus de balanites. La température des gaz d'échappement augmente avec les HVP et est en moyenne supérieure pour le coton et le jatropha de 7,4 % et 23,0 % supérieure pour le balanites par rapport au gasoil.**

Les pressions du cylindre pour les différents carburants sont presque toutes confondues à l'exception des pics de pression au niveau desquels on a des légers décalages qui ne sauraient être justifiées à cause des niveaux d'incertitude. Contrairement à l'idée la plus répandue dans la littérature, la forte viscosité des HVP n'est pas la seule cause majeure de leur mauvaise combustion. Cependant, la viscosité, le PCI, la masse volumique et l'indice de cétane jouent tous un rôle déterminant.

Enfin, en retient aussi qu'aux fortes charges, toutes les trois HVP induisent pratiquement les mêmes performances et ceci s'explique par les températures élevées de la chambre de combustion du moteur réduisant ainsi leur viscosité pendant le délai d'inflammation.

Nous pouvons retenir de cette étude qu'il est bien possible d'utiliser directement l'huile de jatropha et l'huile de coton dans les moteurs diesels à injection directe à condition de mettre en place un système de bicarburation qui permettra d'élever la température de la chambre de combustion avec le gasoil avant l'injection de l'HVP. Aussi, il est fortement conseillé de faire fonctionner le moteur à charge élevée avec les HVP comme carburant notamment ici entre 80% et 100% de charge afin de se rapprocher le mieux possible des performances référentielles du moteur.

**Au vu des performances du moteur avec le balanites, nous pouvons retenir à travers cette étude qu'en ce qui concerne l'huile de balanites, son utilisation directe dans les moteurs diesels est à éviter du fait de sa mauvaise combustion comparativement au jatropha et au coton. Toutefois, ayant une viscosité inférieure à celle du jatropha, il serait intéressant de pousser plus loin cette étude afin de mieux murir les conclusions.**

Ainsi comme perspectives, les pistes suivantes pourraient contribuer à compléter et à approfondir ce travail :

- L'utilisation d'un système d'imagerie par camera haute vitesse spécialement conçu pour les investigations optiques dans les moteurs à combustion interne afin de visualiser les processus rapides tels que les événements d'injection et la propagation de flamme. Cela permettrait également d'avoir plus d'informations sur la formation des suies à l'intérieur du moteur, sur les injecteurs, les soupapes, le piston, etc.
- Pour une étude comparative plus complète et plus juste, chaque carburant devrait se trouver dans les conditions de combustion les plus favorables à sa combustion. Par exemple, la pression d'injection et le délai d'injection doivent être optimisés pour chaque type de carburant avant son utilisation.

## VI BIBLIOGRAPHIE

- [1] Key World Energy Statistics 2019. IEA Webstore n.d. <https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2019> (accessed June 19, 2020).
- [2] Singh AP, Dhar A, Agarwal AK. Evolving Energy Scenario: Role and Scope for Alternative Fuels in Transport Sector. In: Singh AP, Agarwal RA, Agarwal AK, Dhar A, Shukla MK, editors. *Prospects Altern. Transp. Fuels*, Singapore: Springer Singapore; 2018, p. 7–19. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7518-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7518-6_2).
- [3] No S-Y. Inedible vegetable oils and their derivatives for alternative diesel fuels in CI engines: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;19.
- [4] Sécurité alimentaire et développement agricole en Afrique subsaharienne ; Rapport principal n.d. <http://www.fao.org/3/a0627f/a0627f00.htm> (accessed June 23, 2020).
- [5] Blin J, Brunschwig C, Chapuis A, Changotade O, Sidibe SS, Noumi ES, et al. Characteristics of vegetable oils for use as fuel in stationary diesel engines—Towards specifications for a standard in West Africa. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;22:580–97. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.018>.
- [6] Sidibé SS, Blin J, Vaitilingom G, Azoumah Y. Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:2748–59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.018>.
- [7] Mondal P, Basu M, Balasubramanian N. Direct use of vegetable oil and animal fat as alternative fuel in internal combustion engine 2008:20.
- [8] Jumbe CBL, Msiska FBM, Madjera M. Biofuels development in Sub-Saharan Africa: Are the policies conducive? *Energy Policy* 2009;37:4980–6. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.064>.
- [9] No S-Y. Application of straight vegetable oil from triglyceride based biomass to IC engines – A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017:18.
- [10] Mondal P, Basu M, Balasubramanian N. Direct use of vegetable oil and animal fat as alternative fuel in internal combustion engine. *Biofuels Bioprod Biorefining* 2008;2:155–74. <https://doi.org/10.1002/bbb.61>.
- [11] Misra RD, Murthy MS. Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine—A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2010:9.
- [12] Patel S, Shrivastava N. Use of Vegetable Oil as a Fuel in Diesel Engine—A Review n.d.:20.
- [13] Misra RD, Murthy MS. Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine—A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:3005–13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.010>.
- [14] Khan MY, Mathur S. COMPARATIVE STUDY OF THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF DIFFERENT STRAIGHT VEGETABLE OILS (SVOs) AND DIESEL n.d.:8.
- [15] Kouliadiati MJ, Vaïtilingom MG. CONTRIBUTION A L'ETUDE DES HUILES VEGETALES DE COTON ET DE JATROPHA CURCAS COMME BIOCARBURANT DANS LES MOTEURS DIESELS A INJECTION DIRECTE. L'UNIVERSITÉ DE OUAGADOUGOU, 2011.
- [16] Adam A. Analysis of Straight Vegetable Oil (SVO) Spray Characteristics at End of Injection (EOI). *J Med Bioeng* 2012;1:59–62. <https://doi.org/10.12720/jomb.1.1.59-62>.
- [17] Joël B, Mouras S, Sayon Dit Sadio Sidibe, Girard P, Vaitilingom G, Pechine B. Guide technique pour l'utilisation d'huile végétale carburant dans les moteurs stationnaires. Harmattan; 2013. <https://doi.org/10.13140/2.1.4611.8728>.
- [18] Chiong MC. Liquid biofuels production and emissions performance in gas turbines\_ A review. *Energy Convers Manag* 2018:19.
- [19] Mat SC. Performance and emissions of straight vegetable oils and its blends as a fuel in diesel engine\_ A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018:17.

- [20] Jiménez Espadafor F, Torres García M, Becerra Villanueva J, Moreno Gutiérrez J. The viability of pure vegetable oil as an alternative fuel for large ships. *Transp Res Part Transp Environ* 2009;14:461–9. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.05.005>.
- [21] Atabani AE. Non-edible vegetable oils A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renew Sustain Energy Rev* 2013:35.
- [22] Dabi M. Application potential of vegetable oils as alternative to diesel fuels in compression ignition engines: A review n.d.:17.
- [23] Agarwal D, Agarwal AK. Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine. *Appl Therm Eng* 2007;27:2314–23. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.01.009>.
- [24] Khan MY, Khan SY. Performance Characteristics of Compression Ignition Engine When Operated on Preheated Neem Oil 2006:6.
- [25] Wang YD, Al-Shemmeri T, Eames P, McMullan J, Hewitt N, Huang Y, et al. An experimental investigation of the performance and gaseous exhaust emissions of a diesel engine using blends of a vegetable oil. *Appl Therm Eng* 2006;26:1684–91. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.11.013>.
- [26] Azad AK, Ameer Uddin SM, Alam MM. A Comprehensive Study of DI Diesel Engine Performance With Vegetable Oil: An Alternative Boi-fuel Source of Energy. *Int J Automot Mech Eng* 2012;5:576–86. <https://doi.org/10.15282/ijame.5.2012.4.0045>.
- [27] Agarwal AK, Dhar A, Honary L, Conconi C, Dean SW. Experimental Investigations of Preheated Jatropha Oil Fuelled Direct Injection Compression Ignition Engine—Part 1: Performance, Emission, and Combustion Characteristics. *J ASTM Int* 2010;7:102414. <https://doi.org/10.1520/JAI102414>.
- [28] Pramanik K. Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Renew Energy* 2003:10.
- [29] Shah PR, Ganesh A. A novel strategy of periodic dosing of soy-lecithin as additive during long term test of diesel engine fueled with straight vegetable oil. *Fuel* 2018;228:405–17. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.121>.
- [30] Gounkaou YW, Daho T, Vaitilingom G, Piriou B, Koulidiati J, Bere A. Evaluation des performances et de l'encrassement d'un moteur diesel à injection indirecte modifiée, utilisant des carburants à base d'huiles végétales. *J Phys SOAPHYS* 2019;1:C19A4-1-C19A4-7. <https://doi.org/10.46411/jpsoaphys.19.01.004>.
- [31] Uddin SMA, Azad AK, Alam MM, Ahamed JU. Performance of a Diesel Engine Run with Mustard-Kerosene Blends. *Procedia Eng* 2015;105:698–704. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.059>.
- [32] Nieto Garzón NA, Oliveira AAM, Hartmann RM, Bazzo E. Experimental and thermodynamic analysis of a compression ignition engine operating with straight soybean oil. *J Braz Soc Mech Sci Eng* 2015;37:1467–78. <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0287-z>.
- [33] De B, Panua RS. An Experimental Study on Performance and Emission Characteristics of Vegetable Oil Blends with Diesel in a Direct Injection Variable Compression Ignition Engine. *Procedia Eng* 2014;90:431–8. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.873>.
- [34] Chalatlou V, Roy MM, Dutta A, Kumar S. Jatropha oil production and an experimental investigation of its use as an alternative fuel in a DI diesel engine n.d.:11.
- [35] Singh BP. Performance and emission characteristics of conventional engine running on jatropha oil. *J Mech Sci Technol* 2013;27:2569–74. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0641-6>.
- [36] Chauhan BS, Kumar N, Du Jun Y, Lee KB. Performance and emission study of preheated Jatropha oil on medium capacity diesel engine. *Energy* 2010;35:2484–92. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.043>.
- [37] 10.000 tonnes d'huile invendues au Burkina. *BBC News Afr* n.d.

- [38] Kumar MS, Ramesh A, Nagalingam B. Complete Vegetable Oil Fueled Dual Fuel Compression Ignition Engine, 2001, p. 2001-28–0067. <https://doi.org/10.4271/2001-28-0067>.
- [39] Rakopoulos CD, Rakopoulos DC, Giakoumis EG, Dimaratos AM. Investigation of the combustion of neat cottonseed oil or its neat bio-diesel in a HSDI diesel engine by experimental heat release and statistical analyses. *Fuel* 2010;89:3814–26. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.012>.
- [40] Martin M, Prithviraj D. Performance of Pre-heated Cottonseed Oil and Diesel Fuel Blends in a Compression Ignition Engine 2011;5:6.
- [41] Fontaras G, Samaras Z, Miltsios G. Experimental evaluation of cottonseed oil-diesel blends as automotive fuels via vehicle and engine measurements, 2007, p. 2007-24–0126. <https://doi.org/10.4271/2007-24-0126>.
- [42] Wang Y, Huang Y, Roskilly AP, Ding Y, Hewitt N. Trigeration running with raw jatropha oil. *Fuel Process Technol* 2010;91:348–53. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.11.006>.
- [43] Gutti B, Bamidele SS, Bugaje IM. CHARACTERIZATION AND COMPOSITION OF BALANITE AEGYPTIACA SEED OIL AND ITS POTENTIAL AS BIODIESEL FEEDSTOCK IN NIGERIA n.d.:8.
- [44] Deshmukh SJ, Bhuyar LB. Transesterified Hingan (Balanites) oil as a fuel for compression ignition engines. *Biomass Bioenergy* 2009;33:108–12. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.04.017>.
- [45] Silitonga AS, Atabani AE, Mahlia TMI, Masjuki HH, Badruddin IA, Mekhilef S. A review on prospect of *Jatropha curcas* for biodiesel in Indonesia. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:3733–56. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.011>.
- [46] Raj VM. Experimental study of effect of isobutanol in performance, combustion and emission characteristics of CI engine fuelled with cotton seed oil blended diesel n.d.:10.
- [47] De B, Panua RS. An Experimental Study on Performance and Emission Characteristics of Vegetable Oil Blends with Diesel in a Direct Injection Variable Compression Ignition Engine. *Procedia Eng* 2014;90:431–8. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.873>.
- [48] Oliveira LE, Da Silva MLCP. Comparative study of calorific value of rapeseed, soybean, jatropha curcas and crambe biodiesel. *Renew Energy Power Qual J* 2013:679–82. <https://doi.org/10.24084/repqj11.411>.
- [49] Ružbarský J, Müller M, Mareček J, Geršl M. *Jatropha curcas* – Analysis of Gross Calorific Value. *Acta Univ Agric Silvicae Mendel Brun* 2014;62:1381–4. <https://doi.org/10.11118/actaun201462061381>.
- [50] Bart JCI, Palmeri N, Cavallaro S. Vegetable oil formulations for utilisation as biofuels. *Biodiesel Sci. Technol., Elsevier*; 2010, p. 114–29. <https://doi.org/10.1533/9781845697761.114>.
- [51] He Y, Bao YD. Study on cottonseed oil as a partial substitute for diesel oil in fuel for single-cylinder diesel engine. *Renew Energy* 2005;30:805–13. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.01.010>.
- [52] Sarada SN, Shailaja M. Optimization of injection pressure for a compression ignition engine with cotton seed oil as an alternate fuel n.d.:8.
- [53] Ramadhas AS, Jayaraj S, Muraleedharan C. Use of vegetable oils as I.C. engine fuels—A review. *Renew Energy* 2004;29:727–42. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.09.008>.
- [54] Altin R. The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. *Energy Convers Manag* 2001:10.
- [55] Datti Y, Yahya AT, Koki IB, Lado UA, Musbahu L, Shuaibu MM, et al. DETERMINATION OF THE PROXIMATE AND MINERAL CONTENTS OF DESERT DATE KERNEL (*BALANITES AEGYPTIACA* LINN.) AND THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE KERNEL OIL AVAILABLE IN KANO STATE, NIGERIA. *FUDMA J Sci* 2020;4:250–9. <https://doi.org/10.33003/fjs-2020-0402-217>.
- [56] Fregon SME. (ببولللا) جيلجهاا ةرچشد ةرذب تيزل ةئيائيميكوزيفلا صئاصخلا n.d.:66.
- [57] Ahmed MA, Alshareef MA. Extraction and Physico-Chemical Properties of Balanites Aegyptiaca (Heglig) Seed Oil Grown In Libya. n.d.:6.



- [58] Manji, Modibbo U. U., Sarah E. E. Studies on the potentials of *Balanites aegyptiaca* seed oil as raw material for the production of liquid cleansing agents 2013.
- [59] Somaya Omer Magzoub Abdoun. Variation in Morphological, Physical and Chemical Constituents of *Balanites aegyptiaca* Fruit between Geographical Sites. University of Khartoum, Shambat, 2005.
- [60] Chalatlou V, Roy MM, Dutta A, Kumar S. *Jatropha* oil production and an experimental investigation of its use as an alternative fuel in a DI diesel engine n.d.:11.
- [61] Kouliadiati, Vaïtilingom. CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES CONDITIONS OPTIMALES DE COMBUSTION DES HUILES VÉGÉTALES DANS LES MOTEURS DIESEL ET SUR LES BRÛLEURS : CAS DE L'HUILE DE COTON. 2008.
- [62] Agarwal AK, Dhar A, Honary L, Conconi C, Dean SW. Experimental Investigations of Preheated *Jatropha* Oil Fuelled Direct Injection Compression Ignition Engine—Part 1: Performance, Emission, and Combustion Characteristics. *J ASTM Int* 2010;7:102414. <https://doi.org/10.1520/JAI102414>.
- [63] Pramanik K. Properties and use of *jatropha curcas* oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Renew Energy* 2003;10.
- [64] Rao GAP, Mohan PR. Effect of supercharging on the performance of a DI Diesel engine with cotton seed oil. *Energy Convers Manag* 2003;8.
- [65] Senthil Kumar M, Ramesh A, Nagalingam B. An experimental comparison of methods to use methanol and *Jatropha* oil in a compression ignition engine. *Biomass Bioenergy* 2003;25:309–18. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00018-7).
- [66] Vaïtilingom G. Extraction, conditionnement et utilisation des Huiles Végétales Pures Carburant. Burkina Faso n.d.:54.
- [67] Kasireddy Sravani, G. Ravindra Reddy, SIDDHARTH INSTITUTE OF ENGINEERING TECHNOLOGY. Performance and Emission Characteristics of CI Engine When Fuelled with *Pongamia* Biodiesel and Zinc Oxide Nano Fluid as Additive. *Int J Eng Res* 2016;V5:IJERTV5IS050825. <https://doi.org/10.17577/IJERTV5IS050825>.
- [68] Canakci M, Ozsezen AN, Turkcan A. Combustion analysis of preheated crude sunflower oil in an IDI diesel engine. *Biomass Bioenergy* 2009;33:760–7. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.11.003>.
- [69] Dabi M, Saha UK. Application potential of vegetable oils as alternative to diesel fuels in compression ignition engines: A review. *J Energy Inst* 2019;92:1710–26. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.01.003>.
- [70] Che Mat S, Idroas MY, Hamid MF, Zainal ZA. Performance and emissions of straight vegetable oils and its blends as a fuel in diesel engine: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;82:808–23. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.080>.
- [71] Atabani AE, Silitonga AS, Ong HC, Mahlia TMI, Masjuki HH, Badruddin IA, et al. Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;18:211–45. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.013>.
- [72] Hellier P. The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions 2015:13.
- [73] Kapseu C. Production, analyse et applications des huiles végétales en Afrique. *Ol Corps Gras Lipides* 2009;16:215–29. <https://doi.org/10.1051/ocl.2009.0280>.



VII ANNEXES

VII.1 Annexe A : Quelques acides gras constituants des HVP

Quelques acides gras communs et leur pourcentage dans quelques huiles [6–12]

Acides gras					Huiles							
Nom commun	C <sub>xy</sub> : Z*	Formule chimique	Masse moléculaire	Nom chimique	Palme	Coton	Jatropha	Neem	Sésame	Balanites	Coco	Babassu
Laurique	C12 : 0	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	200	Dodécanoïque	0,1-0,2	-	-	-	-	0,1	46,5	48,8
Myristique	C14 : 0	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	228	Tétradécanoïque	0,8-0,9	0,8	0,1-0,15	0,26	8,5	0,1	18,4	17,2
Palmitique	C16 : 0	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	256	Hexadécanoïque	39-47	24,7-28	12,7-15,6	14,9	6,6-11	15,9	8,1	9,7
Stéarique	C18 : 0	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	284	Octadécanoïque	3-6	0,8-2,5	3,7-10,5	20,6	0,7-7	6,9	4	4
Oléique	C18 : 1	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	282	cis-9- Octadécenoïque	36-44	13-19,4	<b>34,3-45</b>	43,9	43-44,6	33,5	6,1	14,2
Linoléique	C18 : 2	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	280	cis-9,cis-12- Octadécadiénoïque	6-12	<b>51-58</b>	29,44,2	17,9	35-38,9	<b>43,6</b>	1,5	1,8
Linoléique	C18 : 3	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	278	cis-9,cis-12,cis-15- Octadécatriénoïque	<0,5	0,3	<0,5	0,4	<0,3	-	-	-

## VII.2 Annexe B : Quelques plantes oléagineuses et la teneur en huile de leurs graines ou fruits

Quelques plantes oléagineuses et la teneur en huile de leurs graines [15]			
Famille	Nom botanique	Nom commun	Huile/Graine (%)
Palmacée	<i>Cocos nucifera</i>	Cocotier	60
Palmacée	<i>Elaeis guineensis</i>	Palme et palmiste	20 et 50
Palmacée	<i>Orbignya Eprciosa</i>	Babassu	60
Juglandacée	<i>Juglan regia</i>	Noix	50
Crucifère	<i>Brassica compestris</i>	Colza	41
Papilionacée	<i>Arachis hypogaea</i>	Arachide	50
Linacée	<i>Linium usitatissimun</i>	Lin	38
Composée	<i>Carthamus tinctorius</i>	Carthame	35
Euphorbiaceae	<i>Aleurites fordii</i>	Tung	60
Euphorbiaceae	<i>Ricinus communis</i>	Ricin	49
Euphorbiaceae	<i>Jatropha curcas</i>	Jatropha curcas	25
Malvacée	<i>Gossypium hirsutum</i>	Coton	36
Buxacée	<i>Simmondsia</i>	Jojoba	60
Sapotacée	<i>Butyrospermum parkii</i>	Karité	30
Pedaliacée	<i>Sesamum indicum</i>	Sésame	52
Composée	<i>Heliantus annuus</i>	Tournesol	40
Papilionacée	<i>Glycine max</i>	Soja	25

## VII.3 Annexe C : Présentation du jatropha curcas, du coton et de la balanite

### Plante du Jatropha curcas



Le jatropha curcas est une espèce d'arbuste de la famille des Euphorbiaceae. En Afrique, il est appelé pourghère ou *tabanani* en wolof ou *bagani* (poison) en bambara à cause de sa toxicité. Le Jatropha est une plante buissonnante qui peut atteindre 8 m de hauteur, il a la capacité de survivre dans les milieux semi-arides et ne fait donc pas concurrence aux cultures vivrières. Elle est cultivée notamment pour la production d'huile à usage principalement industriel.

### Plante du coton



Arbustes de la famille des Malvacées, le cotonnier pousse généralement dans les régions tropicales et subtropicales arides. Le cotonnier sauvage vit une dizaine d'années et peut mesurer jusqu'à dix mètres. Cependant, en culture, on limite sa taille à un ou deux mètres pour faciliter le ramassage

du coton et il est généralement exploité sous la forme de plante annuelle. Le coton est une fibre végétale qui entoure les graines des cotonniers et est la fibre naturelle la plus produite dans le monde. Le coton représente la plus importante source des recettes d'exportation agricole des PMA en Afrique de l'ouest notamment au Bénin, Burkina Faso, Tchad et le Mali.

### Plante du balanites



Le dattier du désert ou balanites aegyptiaca appelé *taboghart* en tamasheq ou *zeguene* en bambara, ou encore *sump* en Wolof est un arbre du genre balanites présent et cultivé notamment en Afrique tropicale. Il connaît différents usages alimentaires et médicinaux. Le balanites aegyptiaca est un arbre très épineux, à feuilles caduques, allant jusqu'à 8 mètres de haut. Le fruit et les feuilles du balanités entrent dans l'alimentation des populations locales. Le fruit, appelé *kelgga* en mooré, est généralement consommé (sucés comme bonbons et vendus sur les marchés urbains) frais par succion une fois débarrassé de son épicarpe. Son goût est sucré, avec une pointe d'amertume. Cette consommation est proche de celle d'une datte ou d'une friandise.

## VII.4 Annexe D : Mode opératoire des mesures du pouvoir calorique et de la viscosité

### Mode opératoire de la détermination du pouvoir calorifique

1. On pèse à 0.1 mg près une capsule de gélatine vide et on note sa masse.
2. On introduit dans la capsule, avec l'aide d'une pipette pasteur, une masse d'huile permettant d'obtenir une élévation de température de 1 à 2 °C.
3. On place la masse d'huile qui se trouve dans une coupelle sur un support et on relie les 02 bornes de la bombe par un fil d'allumage de longueur ( $L_i = 11\text{cm}$ ) et de chaleur de combustion connus (2.3 cal/cm).
4. On ajuste et visse sur le corps de la bombe son couvercle.
5. On remplit la bombe en oxygène jusqu'à une pression de 25 bars.
6. On introduit dans le vase calorimétrique une quantité d'eau suffisante pour immerger la face supérieure du couvercle de la bombe. Cette quantité, vérifiée par pesée, doit être la même à 1g près que celle utilisée au cours de l'étalonnage de la bombe calorimétrique pour la détermination de la capacité calorifique effective. Elle est de 2 kg. La température de l'eau doit être stable et comprise entre 19 et 21°C
7. On place la bombe dans le vase calorimétrique et celui-ci dans la jaquette, en établissant les connexions, en ajustant le thermomètre et en mettant l'agitateur en marche.
8. On règle la température de la jaquette afin qu'elle soit égale ou légèrement inférieure à celle du vase calorimétrique et on attend jusqu'à l'équilibre.
9. On note la température initiale et on procède à la mise à feu à l'aide du bouton "ignite"
10. On surveille l'élévation de la température du vase toutes les minutes jusqu'à ce que 03 lectures successives soit identiques. On note cette température comme la température maximale ( $T_f$ ).
11. On retire la bombe dans le calorimètre, on vérifie si la combustion était complète c'est-à-dire s'il n'y a pas de dépôt de suie à l'intérieur de la bombe ou de traces de carbone résiduel sur la coupelle.
12. On note la longueur du fil d'allumage métallique qui n'a pas brûlé ( $L_f$ ).
13. Finalement, on rince soigneusement l'intérieur de la bombe et du couvercle avec un peu d'eau distillée.

On utilise les formules ci-dessous pour calculer le PCS et le PCI :

$$PCS = \frac{K_1 \times E_{cal}(T_m - T_i) - K_1 \times E_{pt}(L_i - L_f) - K_1 \times PCS_{capsule} \times m_{capsule}}{m_{\text{échantillon}}}$$

Avec :



$K_1$  : Facteur de conversion des calories en joules 4,1855 J/cal

$E_{cal}$  : Équivalent calorimétrique du calorimètre, de la bombe, de ses accessoires et de l'eau introduite dans la bombe en cal/°C,  $E_{cal} = 2674$  cal/°C

$T_m$  : Température maximale en °C

$T_i$  : Température initiale en °C

$L_i$  : Longueur de fil de platine initiale en cm

$L_f$  : Longueur de fil de platine restante en cm

$E_{pt}$  : Pouvoir calorifique du fil de platine,  $E_{pt} = 2,3$  cal/cm

$PCS_{capsule}$  : Pouvoir calorifique de la capsule vide, en cal/g (Il est établi en prenant la moyenne de trois (3) déterminations concordantes du PCS de la capsule de gélatine vide. Actuellement au LabEREE,  $PCS_{capsule} = 5059$  cal/g

$m_{capsule}$  : Masse de la capsule de gélatine utilisée, en g

$m_{échantillon}$  : Masse de la prise d'essai de l'échantillon à analyser, en g

$$PCI_{brut} = PCS_{brut} - \left( \frac{E_{cond} \times K_2 \times H_{ech}}{100} + \frac{E_{cond} \times W}{100} \right)$$

Avec :

$E_{cond}$  : Chaleur de condensation de l'eau,  $E_{cond} = 2511$  J/g

$K_2$  : Facteur de proportionnalité : masse d'hydrogène /masse d'eau formée,  $K_2 = 8,937$

$H_{ech}$  : Teneur en % d'hydrogène de l'échantillon,  $H_{ech} = \frac{H_{anhydre}(100-W)}{100}$

$W$  : Teneur en humidité de l'échantillon, en %

### **Mode opératoire de la détermination de la viscosité cinématique**

1. Allumer le viscosimètre et régler à l'aide des boutons de commande la température à laquelle vous voulez mesurer la viscosité.
2. Avant chaque mesure, rincer le tube avec la solution à étudier.
3. Après chaque mesure, rincer le tube à l'eau distillée si la solution étudiée est aqueuse et avec de l'acétone si la solution étudiée est une huile.
4. Verser 20 ml de la solution à étudier dans un bécher puis la verser dans le tube de remplissage (1) du viscosimètre.
5. Placer l'ensemble dans le bain du viscosimètre des conditionné à la température réglée.
6. Boucher le tube de ventilation (2) pour *Ubbelohde* (*Cannon* n'en possède pas) et utiliser une propipette sur le tube de mesure (3) pour faire monter le liquide dans le capillaire jusqu'au-

dessus du repère M1 (environ 5 mm au-dessus), soyez patient, ça monte tout seul mais lentement dans le capillaire.

7. Une fois que le liquide atteint le point M1 commencer à chronométrer et stopper le chronomètre quand le liquide atteint le point M2.
8. Répéter l'opération deux fois (à partir des point 6 et 7) et calculer le temps moyen d'écoulement en faisant la moyenne des trois durées.
9. Retirer le viscosimètre du support, le vider, le rincer et le ranger soigneusement.

La viscosité cinématique du fluide en question est donnée par la formule suivante :

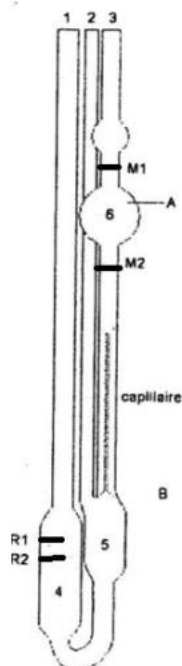
$$V = C \times \Delta_m t$$

Avec :

V : la viscosité cinématique en  $\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$

C : la constante du tube capillaire utilisée en  $\frac{\text{mm}^2}{\text{s}^2}$

$\Delta_m t$  : le temps moyen d'écoulement en s



## VII.5 Annexe E : Norme standard DIN 51605 : 2016-01

Paramètres	Unités	DIN 51605 : 2016-01		Méthodes
		Min	Max	
Masse volumique à 15°C	kg/m <sup>3</sup>	910	925	EN ISO 3675
Viscosité à 40°C	mm <sup>2</sup> /s	-	36	EN ISO 3104
PCI	kJ/kg	36	-	DIN 51900-1
Indice d'iode	g d'Iode/100g	-	125	EN ISO 3961
Acidité	mg KOH/g	-	2	EN 14104
Flash point	°C	101	-	EN ISO 2719
Indice de cétane	-	40	-	EN 15195
Stabilité à l'oxydation à 110°C	h	6	-	EN 14112
Contamination totale	mg/kg	-	24	EN 12662
Teneur en Soufre	mg/kg	-	10	EN ISO 20884
Teneur en phosphore	mg/kg	-	3	DIN 51627-6
Ca	mg/kg	-	1	DIN 51627-6
Mg	mg/kg	-	3	DIN 51627-6
Teneur en eau	mg/kg	-	750	EN ISO 12937



VII.6 Annexe F : Tableaux des résultats des essais expérimentaux

Tableaux des données moyennes du moteur Diesel											
	Pui_G	CS_G	RG_G	RV_G	BMEP_G	RAC_G	DmA_G	TGS_G	DvC_G	DmC_G	Chaleur_G
P100	2197	0,23	37,18	71,03	5,7	22,34	3,13	324	10,2	0,00014	5908
P80	1827	0,24	36,08	74,92	4,7	27,44	3,29	273	8,5	0,00012	5064
P60	1333	0,27	31,59	74,44	3,5	32,80	3,28	224	6,9	0,00010	4220
P50	1126	0,27	32,09	76,43	2,9	40,61	3,37	195	6,0	0,00008	3517
P40	920	0,27	31,13	76,10	2,4	48,00	3,36	177	5,3	0,00007	2954
P20	407	0,44	19,29	77,85	1,1	68,67	3,43	136	3,8	0,00005	2110
P10	202	0,89	9,56	75,99	0,5	67,13	3,36	115	3,5	0,00005	2110
	Pui_J	CS_J	RG_J	RV_J	BMEP_J	RAC_J	DmA_J	TGS_J	DvC_J	DmC_J	Chaleur_j
P100	2205	0,29	33,58	73,54	5,70	18,24	3,22	335	11,6	0,00018	6572
P80	1817	0,30	32,56	73,94	4,70	21,56	3,23	289	9,9	0,00015	5580
P60	1337	0,32	29,96	75,19	3,45	27,45	3,29	235	7,9	0,00012	4464
P50	1104	0,36	26,99	77,18	2,86	30,58	3,36	203	7,0	0,00011	4092
P40	920	0,39	24,74	77,09	2,38	33,57	3,36	190	6,5	0,00010	3720
P20	403	0,62	15,49	76,31	1,05	47,33	3,31	145	4,7	0,00007	2604
P10	200	1,08	8,96	76,69	0,52	55,50	3,33	125	4,2	0,00006	2232
	Pui_C	CS_C	RG_C	RV_C	BMEP_C	RAC_C	DmA_C	TGS_C	DvC_C	DmC_C	Chaleur_C
P100	2211	0,29	32,58	72,95	5,73	17,85	3,21	341	11,8	0,00018	6786
P80	1825	0,30	32,27	74,10	4,73	21,76	3,26	293	9,6	0,00015	5655
P60	1329	0,33	29,39	76,75	3,47	27,91	3,35	232	7,8	0,00012	4524
P50	1112	0,36	26,82	76,22	2,88	30,42	3,35	206	7,0	0,00011	4147
P40	918	0,39	24,35	75,01	2,38	32,87	3,29	191	6,4	0,00010	3770
P20	408	0,62	15,45	76,43	1,05	47,90	3,35	140	4,6	0,00007	2639
P10	196	1,29	7,43	72,33	0,51	45,52	3,19	150	4,8	0,00007	2639
	Pui_B	CS_B	RG_B	RV_B	BMEP_B	RAC_B	DmA_B	TGS_B	DvC_B	DmC_B	Chaleur_B
P100	2187	0,30	31,97	73,02	5,6	17,87	3,22	359	11,7	0,00018	6840
P80	1813	0,30	31,81	76,03	4,7	22,24	3,34	305	9,8	0,00015	5700
P60	1333	0,38	25,05	71,23	3,5	22,02	3,08	282	9,0	0,00014	5320
P50	1119	0,39	25,20	71,70	2,9	26,14	3,14	252	7,9	0,00012	4440
P40	904	0,41	23,70	73,45	2,3	31,03	3,20	234	6,9	0,00010	3823
P20	406	0,71	13,72	74,11	1,0	41,00	3,28	166	5,1	0,00008	2960
P10	215	1,18	8,29	75,73	0,6	47,43	3,32	148	4,6	0,00007	2590

Pui=Puissance(W) ; CS=Consommation spécifique(kg/kWh) ; RG=Rendement global(%) ; RV=Rendement volumétrique(%) ; BMEP=Pression effective moyenne(bar) ; RAC=Ratio Air-Carburant ; DmA=Débit massique Air((10<sup>-3</sup> kg/s) ; DmC=Débit massique Carburant(kg/s) ; DvC=Débit volumique Carburant(ml/min) ; TGS=Température des gaz de sortie(°C) ; Chaleur=Chaleur de combustion(W) ; G=Gasoil ; J=Jatropha ; C=Coton ; B=balanites.

**VII.7 Annexe G : Notes de calculs (PCI, viscosité, masse volumique)**

Calcul des pouvoirs calorifiques										
Coefficient	Coton		Balanites		Jatropha			Gasoil		
K1	4,1855	4,1855	4,1855	4,1855	4,1855	4,1855	4,1855	4,1855	4,1855	4,1855
Ecal	2460	2460	2460	2460	2460	2460	2460	2460	2460	2460
LI	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
PCScapsule	5059	5059	5059	5059	5059	5059	5059	5059	5059	5059
Mcapsule	0,1112	0,1161	0,1152	0,1152	0,1125	0,115	0,1148	0,1131	0,1125	0,1150
Ti	25,1	24,6	24,93	24,76	25,57	25,12	24,71	24,45	24,5	24,61
Tm	27,23	26,77	27,04	26,88	27,71	27,23	26,83	26,9	26,96	27,06
Lf	2,5	0	4,7	3,8	3,5	3	5,5	3,8	2,1	1,9
Ept	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
mechatillion	0,5015	0,5009	0,5021	0,5008	0,5011	0,5019	0,5020	0,5068	0,5065	0,5054
<b>PCS</b>	<b>38873</b>	<b>39487</b>	<b>38290</b>	<b>38577</b>	<b>39074</b>	<b>38281</b>	<b>38535</b>	<b>44913</b>	<b>45136</b>	<b>44922</b>
<b>Moyenne PCS</b>	<b>39180</b>		<b>38434</b>		<b>38630</b>			<b>44990</b>		
Econd	2511	2511	2511	2511	2511	2511	2511	2511	2511	2511
K2	8,937	8,937	8,937	8,937	8,937	8,937	8,937	8,937	8,937	8,937
W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HanGasoil								12,50%	12,50%	12,50%
HanHuile	6,50%	6,50%	6,50%	6,50%	6,50%	6,50%	6,50%			
HechGasoil								0,125	0,125	0,125
HechHuile	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065			
<b>PCI</b>	<b>37414</b>	<b>38028</b>	<b>36831</b>	<b>37119</b>	<b>37615</b>	<b>36822</b>	<b>37076</b>	<b>42108</b>	<b>42330</b>	<b>42116</b>
<b>Moyenne PCI</b>	<b>37721</b>		<b>36975</b>		<b>37171</b>			<b>42185</b>		
<b>Ecart-type</b>	<b>307</b>		<b>144</b>		<b>296</b>			<b>97</b>		
<b>PCI (kJ/kg)</b>	<b>37721 ± 307</b>		<b>36975 ± 144</b>		<b>37171 ± 296</b>			<b>42185 ± 97</b>		
<b>Ecart sur PCS</b>	<b>307</b>		<b>144</b>		<b>296</b>			<b>97</b>		

Calcul de la viscosité cinématique							
Tube capillaire	1B4903	Jatropha, balanites et coton					
Constante C	0,039732						
Tube capillaire	75/4559	Pour le gasoil					
Constante C	0,0089449						
Carburants	Temps en heures						
Jatropha curcas	14mn37	14mn38	14mn33				
Balanites	14mn16	14mn12	14mn14				
Coton	14mn11	14mn16	14mn12				
Gasoil	09mn53	09mn48	09mn49				
	En seconde			Moyennes	Constante	Viscosité	Viscosité
	877	878	873	876	0,039732	34,81	<b>34,81 ± 0,08</b>
	856	852	854	854	0,039732	33,93	<b>33,93 ± 0,05</b>
	851	856	852	853	0,039732	33,89	<b>33,89 ± 0,05</b>
	593	588	589	590	0,0089449	5,3	<b>5,3 ± 0,02</b>

Calcul de Masse volumique												
± 0,04	Jatropha			Balanites			Coton			Gasoil		
V (ml)	25			25			25			25		
m0 (g)	26,9235	26,9145	26,9213	26,9236	26,9215	26,9225	26,9229	26,9238	26,9256	26,9208	26,9166	26,9124
moyenne	26,9198			26,9225			26,9241			26,9166		
m1 (g)	49,6607	49,6515	49,6584	49,6669	49,6742	49,6692	49,7304	49,7222	49,7265	48,0440	48,0601	48,0521
moyenne	49,6569			49,6701			49,7264			48,0521		
MV (kg/l)	0,909			0,910			0,912			0,845		
	0,9095	0,9095	0,9095	0,9097	0,9101	0,9099	0,9123	0,9119	0,9120	0,8449	0,8457	0,8456
	0,909			0,910			0,912			0,845		
	5,185			5,038			5,058			5,126		
	±5			±5			±5			±5		
MV (kg/m3)	909			910			912			845		