

COLLECTION
MANUELS TECHNIQUES



GUIDE TECHNIQUE POUR L'UTILISATION
D'HUILE VÉGÉTALE CARBURANT
DANS LES MOTEURS
DIESEL STATIONNAIRES

Joël **BLIN**
Sylvie **MOURAS**
Sayon dit Sadio **SIDIBE**
Philippe **GIRARD**
Gilles **VAITILINGOM**
Bruno **PECHINE**

**GUIDE TECHNIQUE POUR
L'UTILISATION D'HUILE VÉGÉTALE
CARBURANT DANS LES MOTEURS
DIÉSEL STATIONNAIRES**

Tous droits réservés

© Fondation 2iE, févr_2014, en coédition

Éditions Sud Sciences et Technologies Rue de la science

01 BP 594 Ouagadougou 01Burkina Faso

2ie@2ie-edu.org

www.2ie-edu.org

Dépôt légal BNB: 1^{er} trimestre 2014

ISBN : 978-2-67792161-1

© Harmattan Burkina, févr_2014

Avenue Mohamad Kadhafi

12 BP 226 Ouagadougou 12

Burkina Faso

infos@harmattanburkina.com

www.harmattanburkina.com

Dépôt légal BNB : 1^{er} trimestre 204

ISBN : 978-2-67792161-1

EAN : 978267792161-1

Guide technique pour l'utilisation d'huile végétale
carburant dans les moteurs diesel stationnaires

**Sous la Direction de
Joël BLIN et Sylvie MOURAS**

GUIDE TECHNIQUE POUR L'UTILISATION D'HUILE VEGETALE CARBURANT DANS LES MOTEURS STATIONNAIRES

Joël BLIN, Sylvie MOURAS,
Sayon dit Sadio SIDIBE, Philippe GIRARD,
Gilles VAITILINGOM, Bruno PECHINE,

© Coédition Fondation 2iE - Harmattan Burkina, Févr_2014

La présente publication a été élaborée avec l'aide de l'Union Européenne. Le contenu de la publication relève de la seule responsabilité des auteurs et ne peut aucunement être considéré comme reflétant le point de vue de l'Union Européenne



PREFACE

L'accès à l'énergie des populations rurales est encore très limité en Afrique subsaharienne (moins de 11% de la population rurales est relié à un réseau électrique selon AIE, 2010). La lutte contre la pauvreté des populations rurales passe par le développement d'activités productrices susceptibles de générer des revenus et des emplois qui nécessitent de l'énergie et des combustibles liquides pour le transport. Par ailleurs, la dépendance du secteur énergétique de ces pays aux produits pétroliers rend le secteur économique fragile en raison de la volatilité des prix du pétrole.

En Afrique de l'Ouest, les initiatives pour les biocarburants se concentrent essentiellement sur la production de carburants à base de plantes à graines oléagineuses. De nombreux projets de plantation d'oléagineux (principalement de *Jatropha curcas*) ont vu le jour au cours des 10 dernières années en Afrique de l'Ouest.

Conscient des enjeux liés à l'énergie sur le continent africain, 2iE et Cirad, accompagnent à travers des formations et des projets de recherche & développement, les avancées dans le domaine des biocarburants et bioénergies. Le laboratoire de biomasse énergie et biocarburants ; commun aux 2 organismes, développe des procédés de conversion énergétique de la biomasse pour la production de chaleur, de force motrice, d'électricité et de biocarburants. Les travaux qui y sont menés contribuent également à analyser les modalités d'émergence et les impacts potentiels de ces technologies et des filières correspondantes, en tenant compte des spécificités du continent africain.

C'est sur la base de l'expérience acquise par les deux partenaires que ce guide a été conçu. Il s'adresse aux opérateurs disposant d'un moteur diesel stationnaire, souhaitant utiliser des huiles végétales comme carburant, et qui cherchent des informations concrètes pour passer à l'acte !

Hamadou Maïga

Directeur Général de la Fondation 2iE

LES AUTEURS

Joël BLIN

Chercheur

Responsable du Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (LBEB),
Fondation 2iE
et UR Biowooweb (Biomasse, Bois, Energie et Bioproduits), Cirad.

Philippe GIRARD

Directeur Régional pour l'Asie du Sud Est continentale du Centre de Coopération
Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad)
Ancien Directeur de l'école Doctorale Sciences et Technologies de l'eau,
l'Energie et l'Environnement et Conseiller Scientifique de l'Institut International
d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (Fondation 2iE)

Sylvie MOURAS

Chercheur

UR Biowooweb (Biomasse, Bois, Energie et Bioproduits), Cirad
et Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant, Fondation 2iE

Bruno PECHINE

Ingénieur Chercheur

Département Simulation et Traitement de l'information
pour l'Exploitation des systèmes de Production
Electricité de France (EDF)

Sayon dit Sadio SIDIBE

Chercheur

Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant,
Fondation 2iE

Gilles VAITILINGOM

Chercheur

UR Biowooweb (Biomasse, Bois, Energie et Bioproduits), Cirad.

1 Introduction

Dans les pays du Sud comme ceux du Nord, les moteurs Diesel sont largement utilisés dans les secteurs de la production d'électricité, de l'industrie, de l'agriculture ou du transport. Ces secteurs sont de grands consommateurs de gasoil ou des fiouls qui peuvent être remplacés partiellement ou totalement par des huiles végétales carburants (HVC), d'origine agricole et renouvelables.

Le renchérissement des énergies fossiles entraîne une perte de compétitivité ainsi qu'une augmentation du coût de la vie qui impactent particulièrement les populations du Sud. Soucieux de leur dépendance énergétique et de l'augmentation de leur facture pétrolière, de plus en plus de pays du sud, et africains en particuliers, envisagent l'utilisation d'HVC comme combustible renouvelable produit localement pour subvenir à leur besoin énergétique, soit en substitution de gasoil ou des fiouls, soit pour permettre l'accès à l'énergie de nouvelles localités décentralisées.

Les huiles végétales carburant (HVC) s'obtiennent principalement par simple pressage de biomasses oléagineuses suivi d'une purification (décantation et/ou filtration). Leurs propriétés physicochimiques sont proches de celles du gasoil ou des fiouls, avec un comportement comme combustible particulièrement adapté aux moteurs Diesel stationnaires, que l'on retrouve généralement dans les industries, les centrales thermiques ou les villages pour produire de la force motrice et/ou de l'électricité.

Cependant si les huiles végétales représentent une alternative intéressante aux produits pétroliers, elles ont des caractéristiques physicochimiques qui diffèrent sensiblement de celles du gasoil et qui rendent nécessaires un certain nombre de précautions quant au choix des équipements à utiliser. Il s'avère nécessaire de procéder à des adaptations/modifications du moteur, plus ou moins importantes en fonction des contextes (nature de l'huile, climats, usages ...)

Ce guide a pour objectif de décrire la problématique de l'utilisation des huiles végétales dans un moteur diesel stationnaire sous un angle technique. Il ambitionne d'expliquer dans quels cas et sous quelles conditions il est possible de le faire et de décrire les adaptations nécessaires ainsi que les solutions techniques existantes. Il est destiné plus particulièrement aux utilisateurs de ce type de moteurs et à ceux qui se posent la question de la faisabilité technique de cette substitution. Il se veut le plus simple et opérationnel possible, avec des illustrations pour aider à comprendre et à mettre en œuvre les solutions proposées.

Sont abordés successivement (i) les huiles végétales, leur qualité en tant que carburant, les sources potentielles de dysfonctionnement dues à leur composition et les caractéristiques que doivent avoir les huiles pour pouvoir être utilisées en carburants, (ii) les moteurs diesel stationnaires, les différentes parties et pièces et leur fonctionnalité, les sources potentielles de dysfonctionnement et les caractéristiques que doit posséder un moteur pour pouvoir fonctionner avec de l'huile végétale, (iii) les solutions techniques à mettre en œuvre pour utiliser les huiles végétales et enfin (iv) le contrôle et la maintenance préventive des moteurs.

2 Généralités sur les huiles végétales

2.1 Procédé de production des huiles végétales pures

Les huiles végétales carburant (HVC) proviennent de cultures oléagineuses dédiées (tournesol, colza, l'huile de palme, de *Jatropha curcas*, etc.) ou des sous-produits agricoles (graine de coton, lin, etc.). La nature des cultures dont l'huile est issue a une influence modeste sur sa qualité carburant. Les huiles sont généralement produites par l'extraction mécanique de l'huile à partir du noyau ou de graine. Ces huiles ont une composition chimique qui correspond le plus souvent à un mélange de 95% de triglycérides et d'acides gras libres, et de 5%, de stérols, cires et diverses impuretés. . Cinq principales opérations sont nécessaires dans le processus de production de HVC (Figure 1). Celles-ci conditionnent la qualité des carburants et doivent être menées avec soin pour obtenir du carburant de haute qualité [1].

1 - Stockage des graines. Un stockage des graines de plusieurs mois peut être nécessaire pour la gestion et la planification des procédés de transformation. Les graines doivent être aérées régulièrement pour éviter l'acidification et l'accumulation de chaleur. Les lots sont considérés comme stabilisés si leur taux d'humidité est inférieur à 9% en poids. En outre, c'est la teneur maximale en humidité des graines pour un fonctionnement efficace de la plupart des presses à vis actuellement disponible sur le marché.

2 – Prétraitements. Les impuretés (feuilles, terre, pierres, objets métalliques, etc...) dans les graines doivent être éliminés pour que les lots de graines en contiennent un maximum de 2% en poids. Ces impuretés provoquent l'usure de la presse et l'augmentation du niveau d'impuretés dans l'huile. La cuisson des graines est une technique couramment utilisée pour faciliter l'extraction de l'huile, et donc augmenter la capacité de pressage et le rendement en huile. Cette étape est susceptible d'augmenter les concentrations de phosphore dans les huiles, paramètre connue pour causer des obstructions (bouchages) dans les moteurs diesel.

3 - Extraction mécanique. Le procédé de production le plus courant consiste en une extraction mécanique de l'huile à partir des graines à l'aide d'une presse à vis. Une presse à vis est composée d'un corps (cylindre percé ou cage à barreaux longitudinaux) dans lequel une vis conique sans fin tourne et comprime les graines introduites entre le corps et la vis. La pression augmente le long de la vis par l'effet de réduction progressive du volume. L'huile s'écoule hors du corps à travers les espaces aménagés (entre les barreaux ou par les trous du cylindre). Le tourteau est recueilli au bout de la

vis. Les contraintes mécaniques à l'intérieur de la vis sont élevées, jusqu'à 40 MPa et les phénomènes de frottement augmentent la température du mélange des graines, jusqu'à 150 ° C dans certains cas. Cependant, la température d'extraction doit être maintenue en dessous de 80 ° C pour éviter la dissolution d'une grande quantité de phosphore dans l'huile. Aussi, la production de HVC de haute qualité nécessite un équipement approprié et un opérateur de presse très qualifié.

4 – Filtration. Après extraction, l'huile est simplement filtrée. La filtration élimine les impuretés solides de l'huile (particules, cires, phospholipides) pour une meilleure qualité de carburant. Les huiles peuvent être directement filtrées après extraction ou filtrées après avoir décanté pendant plusieurs jours ou même quelques semaines (3-4 semaines). La filtration doit être effectuée entre 20 ° C et 60 ° C pour retirer toutes les particules solubles. Au-dessus de 60 ° C, il y peut y avoir des risques d'oxydation de l'huile. Il est recommandé de filtrer à 10 µm pour une huile de qualité carburant. Les huiles peuvent être également purifiées par des opérations chimiques telles que le dégommeage (élimination des phospholipides) et la neutralisation (rééquilibrage de pH).

5 - Stockage de l'huile. Une fois filtrées HVC doivent être stockées dans des containers propres, étanches à l'air, dans une zone de stockage dont la température reste inférieure à 35 ° C et à l'abri de la lumière pour éviter l'oxydation et l'acidification de l'huile, qui augmente leur viscosité.

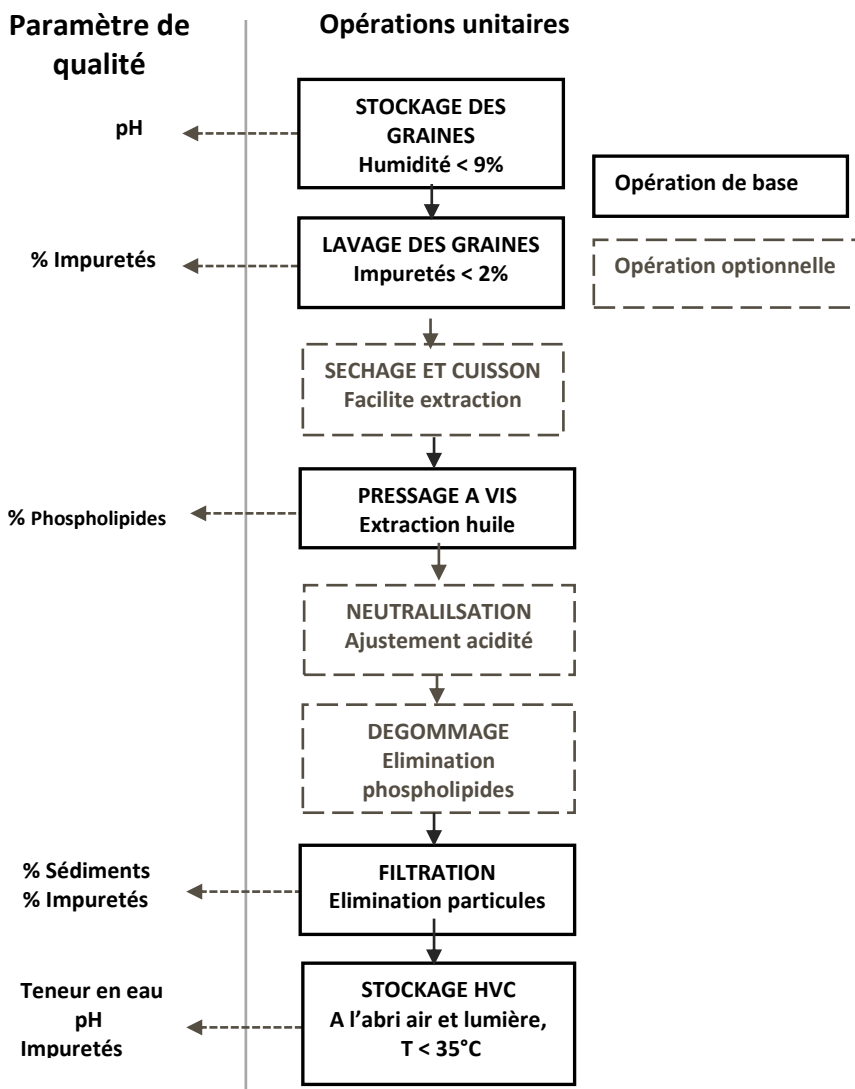


Figure 1 : relation entre procédé de production et qualité des HVC

2.2 Propriétés des huiles végétales carburants comparées aux diesels

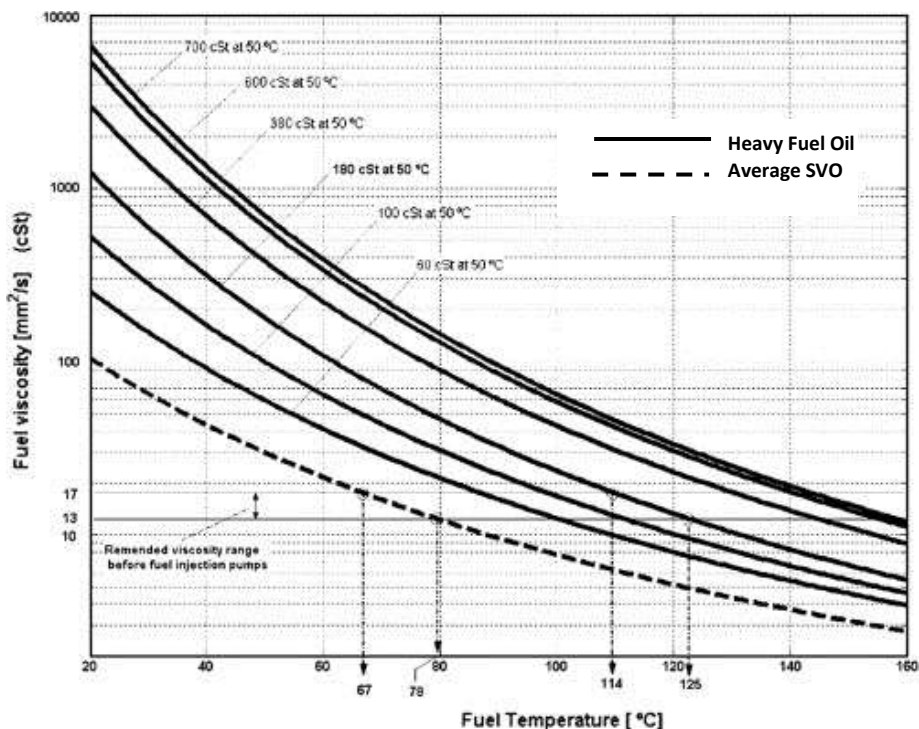
Les huiles végétales ont des propriétés similaires à celles des carburants dérivés des produits pétroliers utilisés dans les moteurs Diesel (Tableau 1). Elles sont donc utilisables comme carburants dans ces moteurs. Les HVC ont plusieurs avantages sur les gasoils pétroliers pour un usage en moteur Diesel : elles sont i) localement disponibles, ii) renouvelables, iii) avec un PCI relativement haut, iv) avec une teneur en soufre plus faible, ce qui évite les

problèmes environnementaux liés aux émissions d'acide sulfurique, v) avec une plus faible teneur en composés aromatiques et vi) facilement biodégradables. Cependant, de légères adaptations du moteur sont nécessaires, et des précautions spécifiques doivent être observées lors du fonctionnement du moteur. En effet, trois caractéristiques majeures diffèrent de celles des produits pétroliers : la viscosité (plus importante dans le cas des huiles), l'indice de cétane (plus bas dans le cas des huiles) et la nature des impuretés.

2.2.1 Viscosité cinématique

La viscosité des HVC est beaucoup plus importante que celle du gasoil. La plupart des huiles végétales ont une viscosité cinématique de l'ordre de 30 à 40 cSt à 40°C, c'est-à-dire 10 à 15 fois supérieure à celle du gasoil (Tableau 1). Cette forte viscosité perturbe l'injection du carburant dans le moteur. Elle est responsable d'une part de l'abaissement du taux d'injection sur les têtes d'injection des pompes, des filtres et des injecteurs, et d'autre part d'une mauvaise atomisation et vaporisation du carburant par les injecteurs, ce qui conduit à une combustion incomplète dans la chambre de combustion. Il en résulte une réduction de l'efficacité thermodynamique et une augmentation des émissions de particules et de suies.

Pour les moteurs stationnaires à faible vitesse de rotation (autour de 1500 tr/min), les fabricants recommandent une viscosité cinématique du carburant à l'entrée de la pompe comprise entre 13 et 17 cSt. La viscosité cinématique des HVC dépasse donc cette gamme de viscosité, de même que les fuels lourds (HFO). Pour y remédier, un préchauffage est suffisant. Comme le montre la Figure 2, il faut préchauffer les HFO entre 114 et 125°C pour atteindre une viscosité appropriée à l'injection, alors que les HVC devront être préchauffées entre 67 et 78°C pour atteindre la même viscosité.



2.2.2 Indice de Cétane

L'indice de cétane représente la capacité d'un carburant à s'auto-enflammer dans des conditions de pression normalisées. Il est directement relié au délai d'inflammation du carburant dans la chambre de combustion après son injection. Plus l'indice de cétane est élevé, plus le carburant s'enflamme facilement (démarrage à froid facilité). La plupart des huiles végétales ont des indices de cétane relativement bas, entre 29 et 43, comparés à ceux du diesel (45), du DDO (40), mais ils sont dans la gamme des « fuel oil 180 » (Tableau 1). Comme pour le gasoil lourd, ce faible indice de cétane des huiles végétales conduit à une combustion incomplète lorsque le moteur fonctionne au ralenti, ce qui rend difficile le démarrage à froid du moteur et provoque une augmentation de bruit de moteur. Ces phénomènes sont plus marqués dans le cas des moteurs à injection directe (cf. chapitre 3). Il est connu que le délai d'auto-inflammation des carburants diminue à mesure que leur température d'injection augmente.

Tableau 1 : propriétés carburants de différentes huiles végétales comparées à celles de carburants fossiles.

Origine carburants	Masse volumique kg /m ³ à 15°C	Viscosité cinématique (cS)	Indice de Cétane	PCS MJ/kg	Point Eclair °C	Carbone résiduel % m/m	Indice d'iode gI ₂ /g	Pour point (°C)	Soufre % m/m	Références
Diesel (SONABHY)	820 to 890	1.6 to 5.9 ^a	> 50	> 45.0	> 61	< 0.15	-	-	< 1.0	[3]
DDO (SONABHY)	835 to 950	5.9 to 15 ^a	> 40	> 44.70	> 66	< 0.2	-	<15	< 1.5	[3]
FO180 (SONABHY)	920 to 990	< 180 ^c	> 30	> 43.00	> 66	< 12	-	<15	< 3	[3]
Biodiesel (EN14214)	860 to 900	3.5-5.0 ^u	> 51	-	120	0.3	120	-	1	[4]
Babassu	946	30 ^a	38	-	150	-	16	-	-	[5,6,7]
Ricin	955	251 ^u	42	37.4	-	-	83-86	-	-	[5,6,7]
Noix de coco	918	27 ^u	40-42	37.1	-	-	8-11	-	0.01	[5,6,7]
Maïs	910	31-35 ^a	38	39.5	277	0.24	103-128	-40	0.01	[5,6,7]
Coton	915	34 ^u	42	38.7-39.5	234	0.24	103-115	-15	0.01	[5,6,7]
Crambe	905	54 ^a	45	40.5	274	0.23	-	-12	-	[5,6,7]
Jatropha	940	34 ^u	39	38.8	225	-	82-98	-	0.01	[5,6,7]
Lin	924	26-27 ^a	35	39.3-39.5	241	0.22	180	-15	-	[5,6,7]
Mahua	960	25 ^u	-	36	232	-	58-70	-	-	[5,6,7]
Neem	919	50 ^u	-	-	-	-	65-80	-	-	[5,6,7]
Palmier	918	40 ^a -45 ^u	42	39.5	267	0.23	48-58	-	0.01	[5,6,7]
Arachide	903	40 ^u	42	39.8	271	0.24	84-100	-7	0.01	[5,6,7]
Colza	912	35-37 ^a	41	39.7	246	0.3	105	-32	0.01	[5,6,7]
Sésame	913	36 ^u	40-42	39.4	260	0.24	103-116	-9	0.01	[5,6,7]
Soja	914	29 ^u -33 ^a	38	39.6	254	0.25	128-143	-12	0.01	[5,6,7]
Carthame	914	31 ^a	41	39.5	260	0.25	145	-7	-	[5,6,7]
Tournesol	916	34 ^a -36 ^u	37	39.6	274	0.27	125-140	-15	0.01	[5,6,7]

^a à 37.8°C; ^b à 40°C; ^c à 50°C

2.3 Impuretés sources de dysfonctionnement des moteurs

Selon la qualité et la propreté de la biomasse utilisée et leurs conditions d'extraction et de stockage en amont, les huiles végétales contiennent des impuretés qui peuvent conduire à des défaillances ou des dommages de moteur lorsqu'elles sont utilisées comme carburant. Les impuretés les plus nuisibles pour les moteurs diesel sont les phospholipides, les sédiments, les acides gras libres et l'eau.

- **Les phospholipides** proviennent directement de la rupture des parois cellulaires au sein de la biomasse végétale. Leur concentration dépend des techniques d'extraction utilisées, et en particulier des températures atteintes lors du prétraitement éventuel (cuisson) et du pressage. Des conditions de températures élevées provoquent la dissolution des phospholipides dans les huiles. Lorsque les huiles sont utilisées dans un moteur, les phospholipides polymérisent sous l'effet de la chaleur et sont responsables de la formation de dépôts qui obstruent les injecteurs et s'accumulent sur les parois de la chambre de combustion, les soupapes et les surfaces cylindriques.

- **Les sédiments** peuvent être de deux sortes, organiques ou minéraux. Dans le premier cas, il peut s'agir de fragments qui proviennent directement de la dégradation des tissus des plantes, ou de particules résultants de réactions de polymérisation des acides gras libres ou d'autres composés minoritaires formés pendant le stockage. Des conditions de stockage inadaptées (présence d'air, réservoirs en métal léger, etc.) sont propices à la formation de sédiments organiques. Les sédiments d'origine minérale sont des impuretés (sable, terre) qui n'ont pas été totalement séparées de la biomasse avant l'extraction. Comme certains sédiments se dissolvent à chaud, il est préférable de filtrer à froid (<50°C), après éventuellement une étape de sédimentation permettant une séparation des sédiments les plus denses par gravité. Bien que les sédiments ne causent pas de problèmes de combustion réels, ils peuvent influencer sur les pièces périphériques du moteur, tels que filtres ou pompes, entraînant des dysfonctionnements. En effet, les sédiments peuvent obstruer le filtre à carburant et entraîner des pertes supplémentaires dans le circuit, conduisant à une augmentation très significative de la pression d'injection. Les sédiments minéraux, qui sont très abrasifs, endommagent les circuits d'alimentation en carburant et la paroi interne de la chambre de combustion.

- **L'acidité** des huiles est principalement due à l'existence d'acides gras libres formés par hydrolyse des triglycérides en présence d'eau. De telles

réactions d'hydrolyse peuvent avoir lieu dans la biomasse si elle est stockée dans de mauvaises conditions (humidité), lors du pressage si les températures sont trop élevées, et pendant le stockage de l'huile en présence d'eau et de lumière. L'acidité de l'huile est responsable des dommages causés aux circuits d'alimentation du moteur (tuyau, joint ...), de corrosion du moteur et de l'instabilité des huiles pendant le stockage.

- **L'eau** présente dans les huiles provient directement de la biomasse qui a été mal séchée, ou de la condensation dans de mauvaises conditions de stockage. L'eau hydrolyse les triglycérides en acides gras libres. La présence d'eau dans l'huile végétale dégrade la cartouche du filtre à carburant. En outre, lors de la combustion, la présence d'eau provoque des phénomènes de cavitation, en particulier à la tête de piston, ce qui peut causer de graves dommages. En général, la présence d'eau dans un carburant est préjudiciable, car elle réduit le pouvoir calorifique, perturbe l'allumage et ralentit la propagation des flammes.

2.4 Les normes et spécifications sur les carburants, adaptation aux huiles végétales

Historiquement, Rudolf Diesel, a testé son prototype de moteur à l'huile d'arachide à l'Exposition Universelle de Paris en 1900. Son brevet a été déposé en 1892 sous le nom de «moteur à huile lourde », c'est à dire qui fonctionne avec des huiles végétales ou des résidus de distillation du pétrole comme combustible. Depuis cette date, de nombreux travaux de normalisation des combustibles pour moteurs diesels ont été réalisés.

On distingue :

- Les normes sur les carburants pétroliers : ce sont les plus nombreuses en raison de la variété de produits pétroliers utilisés comme carburants, et de l'importance économique du secteur. La plus connue et utilisée est la norme ASTM D-396 (Standard Specification for Fuel Oils) qui donne également une classification (grade) des produits pétroliers utilisés en carburant.
- Les normes pour les biodiesel, c'est-à-dire les esters obtenus par transestérification des huiles végétales, qui se sont essentiellement basées sur les spécifications et les valeurs limites des carburants pétroliers. Les principaux textes sont la norme américaine ASTM D-6751-09, la norme européenne EN 14 214 et la norme brésilienne ANP N°7/2008.
- Les normes sur les huiles végétales carburant : il n'existe qu'une prénorme: la DIN 51605, qui concerne exclusivement l'huile de colza. Cette prénorme montre toutefois certaines limites pour être applicable

à tout type d'huile végétale. En effet, comme elle est principalement basée sur les normes diesel, certains paramètres, valeurs limites, voire méthodes d'analyses qui sont proposés sont pertinents pour les hydrocarbures pétroliers, mais ne sont pas appropriés pour caractériser les huiles végétales.

Le **tableau 2** résume pour chaque norme, les spécifications retenues et les valeurs limites pour les biodiesel et l'huile de colza.

Tableau 2 : spécifications pour biodiesel et huile de colza carburant [8]

Caractéristiques	Unité	Valeurs Limites ANP N°7/ ASTM D6751 / EN 14214 Biodiesel	Valeurs limites DIN 51605 Huile de colza
Masse volumique à 20°C	kg/m ³	850-900/-/860-900 ^a	900-930
Viscosité cinématique à 40°C	mm ² /s	3.0-6.0/1.9-6.0/3.5-5.0	
Teneur en eau max.	mg/kg	500/-/500	750
Contamination totale max.	mg/kg	24/-/24	24
Point éclair, min.	°C	100/93/120	220
Eau et sédiments, max	% vol	-/0.050/-	-
Résidu carboné 100%, max	% mass.	0.05/0.05/0.30 ^b	0.4
Corrosion du cuivre (3h 50°C)	max.	class 1/class 3/class 1	-
Indice de cétane min	-	Report/47/51	39
Teneur en cendres sulfatées, max.	% mass.	0.02/0.02/0.02 ^b	0.01 (cendres totales)
Teneur en soufre, max.	mg/kg	50/15(500)/10	10
Teneur en sodium et potassium (Na+K) content, max.	mg/kg	5/5/5	-
Teneur en ester, min	% mass.	96.5/-/96.5 ^b	Sans objet
Point de colmatage du filtre, max.	°C	19/report/national spécification	-
Indice d'acide, max.	mg KOH/g	0.50/0.50/0.50	3
Teneur en glycérol libre max.	% mass.	0.02/0.020/0.02 ^b	Sans objet
Glycérol total max.	% mass.	0.25/0.240/0.25 ^b	Sans objet
Teneur en Mono-, Di- et tri- Glycérides max	% m/m	Report/-/MG 0.80 ^b ; DG 0.20 ^b ;TG 0.20 ^b	Sans objet
Teneur en alcool, max.	% mass.	0.20/-/0.20 ^b	Sans objet
Teneur en calcium et magnésium (Ca+Mg) max.	mg/kg	5/5 /5	20
Teneur en phosphore, max.	mg/kg (ppm)	10/10/10.0	12
Indice d'iode, max	g/100g	Report/-/120	95-125
Stabilité à l'oxydation (110°C),min.	H	6/-/6	6
Teneur en ester d'acide linoléique, max	% mol	-/-/12	Sans objet
Teneur en esters Polyinsaturés (≥4 doubles liaisons) esters, max	% mol	-/-/1	Sans objet

Il est possible de distinguer d'une part les propriétés intrinsèques et d'autre part les propriétés variables des huiles carburant. Les propriétés

intrinsèques sont fonction de la nature de la ressource. Elles sont relativement constantes pour un type donné d'huile et même entre différents types d'huile (Tableau 1). Les propriétés variables sont fortement influencées par les conditions dans lesquelles les graines sont obtenues et transformées en huile. En effet, ces propriétés dépendent largement de facteurs agronomiques, des conditions de stockage, des facteurs de transformation et des conditions de stockage de l'huile.

Plusieurs initiatives ont été lancées ces dernières années pour normaliser la qualité des HVC. La prénorme DIN V 51605 a été proposée en 2006 par l'Institut Allemand de Normalisation pour normaliser la qualité d'huile de colza exclusivement. Des projets sont en cours pour tenter d'adapter la prénorme DIN à d'autres oléagineux, voire même d'inclure les conditions de production et de stockage de l'huile. Dans tous les cas, les méthodologies analytiques proposées sont dérivées de normes initialement prévues pour caractériser des mélanges pétroliers complexes (ASTM D 6751-02, DIN EN 14214), alors que les huiles ont une composition chimique différente. Ces projets de norme et standards préconisent de mener un très grand nombre d'analyses en utilisant des technologies analytiques compliquées et onéreuses, qui ne sont pas forcément adaptées à l'analyse des HVC. Si on désire que les filières HVC se développent en zone décentralisée, il est primordial de pouvoir attester simplement et à moindre coût de la qualité des HVC.

Sur la base d'un travail de recherche bibliographique, d'expérimentations et de mise au point analytique, nous avons au Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburants 2iE/CIRAD travaillé sur *une proposition de standard* de qualité des HVC qui a fait l'objet d'une publication [8]. Sept propriétés nous paraissent cruciales pour une utilisation des huiles en moteur stationnaire. Elles sont explicitées ci-dessous.

2.4.1 Propriétés intrinsèques

Afin de veiller à ce que le carburant utilisé soit en effet une huile végétale pure et de confirmer leur origine végétale, il faut mesurer la densité, la viscosité et l'indice d'iode.

La **densité** des huiles végétales est comprise entre 900 et 960 kg/m³ (Tableau 1). La méthode d'essai par gravimétrie, ISO 6883, utilisée pour les huiles comestibles est très simple à utiliser. La spécification sur la densité permet de détecter les matières autres que l'huile végétale, ainsi que les mélanges avec d'autres liquides. En outre, c'est une donnée intéressante pour les pompes volumétriques à carburant dans les moteurs (un carburant

avec une densité élevée induit une augmentation des émissions d'imbrûlés, gaz et particules, dans les gaz d'échappements).

La **viscosité** est un indicateur rapide d'identification du carburant, surtout si la nature n'est pas bien connue, ou si l'huile peut avoir été altérée pendant le stockage. L'utilisation de combustibles à haute viscosité, affaiblit l'efficacité de la pompe d'injection, raccourcit la durée de vie d'une pompe et augmente le risque de fuite de carburant. Il est préférable de s'assurer que la pompe est capable de supporter au moins des viscosités supérieures à 100 cSt. Cette valeur est recommandée par le constructeur du moteur Wartsila qui a installé plusieurs centaines de MW de centrales fonctionnant sur SVO principalement de l'huile de palme en Italie.

La méthode d'essai ISO 3104 est adaptée aux HVC pour les moteurs stationnaires. La valeur limite peut être fixée à 50 cSt pour inclure une plus large gamme d'huiles végétales telles que l'huile de ricin, l'huile de palme ou l'huile d'arachide.

Une attention particulière doit être accordée à certaines huiles saturées (huile de palme, huile de coco, l'huile de babassu, graisses) qui sont solides à basse température (Tableau 1) et doivent être préchauffées, en particulier dans les réservoirs de carburant et les lignes. Les problèmes liés aux basses températures sont moins un sujet de préoccupation dans les pays tropicaux, comme en Afrique de l'Ouest.

L'**indice d'iode** est une mesure de l'insaturation totale d'huiles végétales ainsi qu'un indicateur de leur sensibilité à l'oxydation. Comme le montre la Figure 3, ce paramètre est spécifique à chaque graine oléagineuse, ce qui permet de vérifier la nature de la biomasse utilisée. Il n'y a donc pas de valeur limite à fixer pour ce paramètre. La méthode d'analyse de Wijs est adaptée pour le biodiesel (EN 14111) et les huiles végétales (ISO 3961) et peut être utilisée pour les HVC en moteur stationnaire.

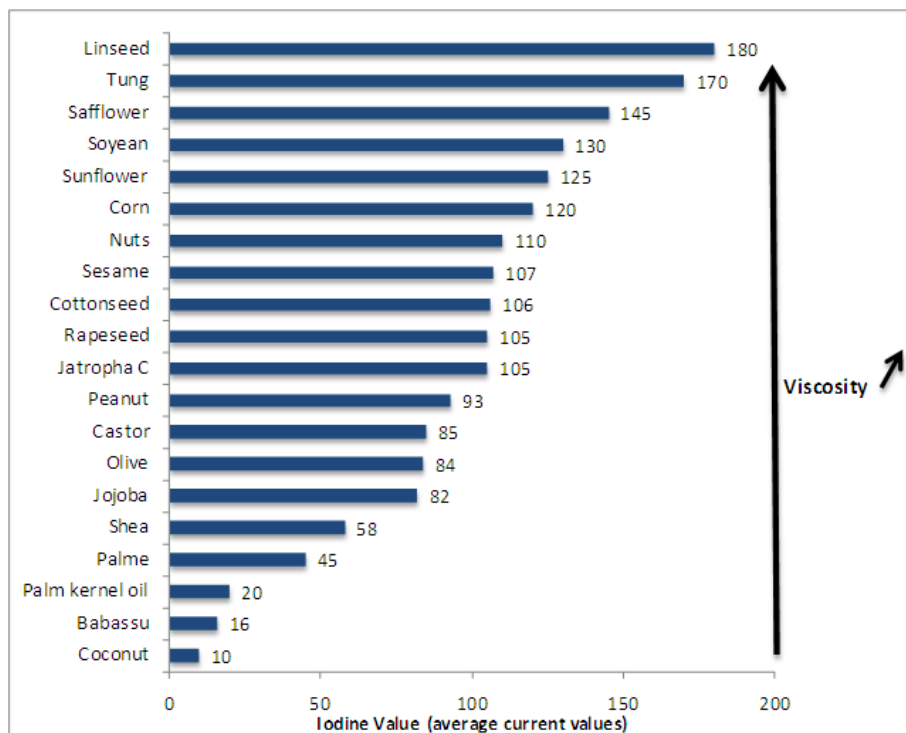


Figure 3 : indice d'iode moyen de diverses huiles végétales [8]

2.4.2 Propriétés variables

Les propriétés variables sont fonction des conditions dans lesquelles les HVC ont été obtenues et stockées. Elles peuvent mettre en évidence la présence de contaminants et d'impuretés qui peuvent conduire à des pannes de moteur. Les principales propriétés variables qui doivent être mesurées pour s'assurer que la qualité de l'huile végétale est suffisante pour une utilisation dans les moteurs stationnaires sont la teneur en phosphore, la contamination totale, la teneur en eau et la teneur en acides gras libres.

La **teneur en phosphore** indique la présence de phospholipides (ou mucilage). Comme indiqué plus haut, la teneur dépend de l'espèce de la graine et des conditions d'extraction. Il s'agit d'un élément essentiel dans la qualité de l'huile végétale carburant. La méthode de mesure par spectrophotométrie visible a de nombreux avantages, à savoir la simplicité, l'exactitude, la précision et le faible coût. Elle peut être utilisée pour l'huile végétale carburant dans les moteurs stationnaires.

La valeur limite acceptable pour une utilisation en moteur stationnaire peut être fixée à 50 ppm, dans la mesure où ce type de moteur ne fonctionne

pas avec un pot catalytique (le phosphore est un poison des catalyseurs), et ou les études ont montré que cette valeur limite est suffisante pour ne pas rencontrer de problème dans les moteurs stationnaires.

La **contamination totale** est définie comme le taux de particules solides insolubles qui restent après filtration de l'huile. Elle peut être très variable en fonction de l'espèce des graines et des conditions d'extraction. Même si ces particules sont peu abrasives elles doivent être limitées car elles sont susceptibles de bloquer les filtres et les buses d'injection. Leur abrasivité est problématique pour le système de pompe et d'injection. La méthode d'essai qui peut être utilisée est celle de la norme ISO 663. La valeur limite peut être fixée à 100 ppm comme pour le diesel et le DDO en Afrique de l'Ouest.

La **teneur en eau** est limitée dans le cahier des charges des carburants car elle favorise la croissance microbienne, la corrosion du réservoir et du filtre, et l'hydrolyse de l'huile qui conduit à la formation d'acide gras. La méthode de mesure est celle de la norme ISO 1293 (par titrage coulométrique Karl Fischer). La valeur limite qui peut être retenue est de 750 ppm.

L'**acidité** de l'huile végétale peut varier de 0,01% à 10 % en poids (soit 0.02 à 20 mg KOH/g d'huile). La teneur en acides gras est un marqueur de la qualité de l'huile car ils sont générés au cours de l'extraction et du stockage. La méthode de mesure est décrite dans l'EN 14104, par titration à l'aide d'une solution éthanolique de KOH avec la phénolphthaléine comme indicateur. La valeur limite proposée est de 3 mg KOH/g, comme pour le DDO en Afrique de l'Ouest.

En résumé, les propriétés que doit présenter une huile végétale pour être utilisée comme carburant dans un moteur stationnaire sont récapitulées dans le Tableau 3.

Propriétés		Valeur limite	Méthode de mesure
Intrinsèques	Densité	900-960kg/m ³	ISO 6883
	Viscosité cinématique	50 cSt	ISO 3104
	Indice d'iode	Informatif, pas de spécification	ISO 3961
Variables	Teneur en Phosphore	50 ppm max	ISO 10540-1
	Contamination totale	100 ppm max	ISO 663
	Teneur en eau	750 ppm max	ISO 8534
	Teneur en acides gras libres	3 mg KOH/g	ISO 660

Tableau 3: spécifications sur les propriétés variables des HVC

2.5 Conclusion sur les huiles végétales carburant

La qualité des huiles végétales carburants dépend de la nature de la ressource d'une part et du procédé de production de l'huile d'autre part. En particulier le procédé de pressage et le stockage des produits sont des étapes qui, si elles ne sont pas maîtrisées, conduisent à une dégradation de l'huile incompatible avec un usage carburant.

Il n'existe pas encore de norme générique ou de spécifications sur la qualité des huiles végétales pour une utilisation en carburants, hormis une norme allemande qui concerne exclusivement l'huile de colza. Bien que la plupart des normes sur les biodiesel donne des spécifications sur de nombreuses propriétés, sept propriétés simples peuvent suffire pour définir la qualité d'une huile végétale pour une utilisation spécifique en moteur stationnaire sans pot catalytique.

2.6 Références bibliographiques :

- [1] Girard P., Blin J., Guide technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales sans les pays de la Cedeao, Ed. l'Harmattan, 2011, 144 pages, ISBN 2296467512, 9782296467514.
- [2] Espadafor FJ, García MT, Villanueva JB, Gutiérrez JM. The viability of pure vegetable oil as an alternative fuel for large ships. Transportation Research Part D. 2009.
- [3] SONABHY. Société Nationale Burkinabé d'Hydrocarbures, National Fuel Specification 2011.
- [4] European Committee for Standardization. EN 14214 Automotive fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines - Requirements and test methods. 2010.
- [5] Karmakar A, Karmakar S, Mukherjee S. Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. Bioresource Technology. 2010; 101: 7201-10.
- [6] Singh SP, Singh D. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews; 2010;14: 200-16.
- [7] Witzelsperger J, Remmele E. Aftertreatment of rapeseed oil fuel to reduce element contents. 7th European Biomass Conference and Exhibition: From Research to Industry and Markets. Hamburg: ETA-Florence Renewable Energies, WIP-Renewable Energies; 2009. p. 1888-93.
- [8] J. Blin, C.Brunschwig, A.Chapuis, O.Changotade, S.S.Sidibe, E.S.Noumi, P.Girard, Characteristics of vegetable oils for use as fuel in stationary diesel engines—Towards specifications for a standard in West Africa, Renewable and Sustainable Energy Reviews; 2013; 22: 580-597.

3 Le moteur diesel

Issu des travaux menés par l'ingénieur allemand Rudolf Diesel entre 1893 et 1897, le moteur Diesel est un moteur à combustion interne dont l'allumage n'est pas commandé mais spontané, par phénomène d'autoallumage. Il n'a donc pas besoin de bougies d'allumage. Cela est possible grâce à un très fort taux de compression (rapport volumétrique), permettant d'obtenir des températures supérieures à 500 °C. Des bougies de préchauffage sont souvent utilisées pour permettre le démarrage du moteur à froid en augmentant la température de la chambre de combustion, mais leur présence n'est pas systématique.

Les moteurs Diesel fonctionnent habituellement au gasoil, au fuel lourd ou aux huiles végétales. Ils peuvent aussi bien être à deux temps qu'à quatre temps.

Dans ce chapitre le principe de fonctionnement du moteur diesel est détaillé, avant d'explicitier son architecture décrivant les différents organes le composant ainsi que leur fonction au sein du moteur. Les différents circuits d'alimentation en carburant, de distribution des gaz, de lubrification et de refroidissement du moteur Diesel et leur mode de fonctionnement sont également présentés. Enfin, les familles de moteur Diesel sont décrites.

3.1 Fonctionnement du moteur diesel

Le principe de base du fonctionnement d'un moteur diesel repose sur la présence de pistons qui couissent à l'intérieur de cylindres reliés à des collecteurs d'admission et d'échappement, comme schématisé sur la Figure 4.

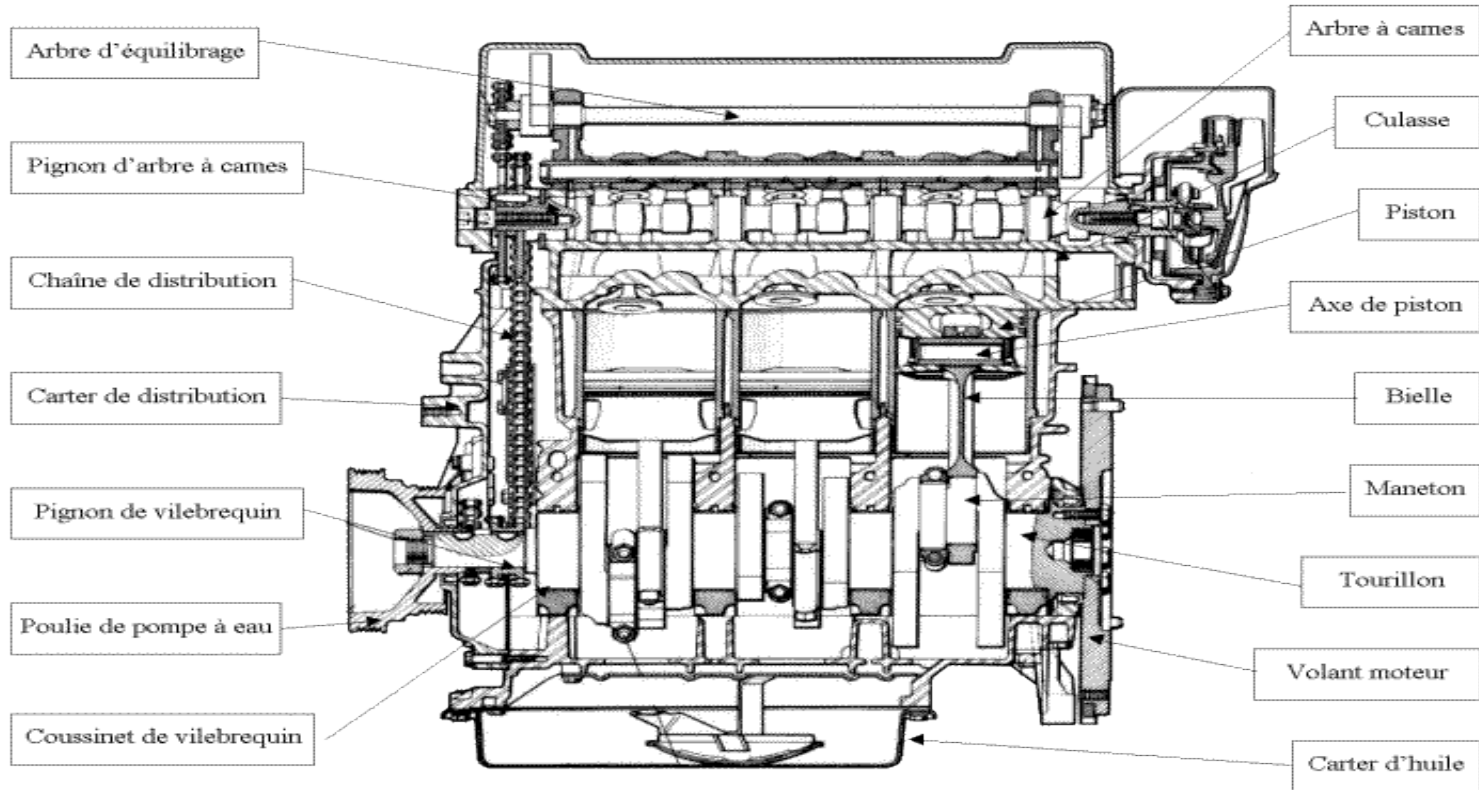


Figure 4 : cartographie du moteur diesel [1]

Le principe de fonctionnement du moteur diesel classique est le suivant. Le mélange comprimé d'air et de carburant s'enflamme à l'intérieur d'un cylindre dans lequel se déplace un piston relié à un vilebrequin par une bielle. Le mouvement du piston s'effectue entre deux positions extrêmes appelées point mort haut (PMH) et point mort bas (PMB) correspondant respectivement au volume minimal et maximal réactionnel (Figure 5).

L'énergie dégagée par la combustion engendre alors un mouvement rectiligne du piston transformé en mouvement rotatif en sortie de vilebrequin par l'intermédiaire du système bielle-manivelle.

Cycle Diesel à quatre temps

Les moteurs diesel fonctionnant selon le principe du cycle à quatre temps comprennent les phases suivantes : admission, compression, combustion-détente et échappement [2] (Figure 5).

1^{er} temps : Admission : La soupape d'admission s'ouvre et le piston qui se déplace entre le PMH et le PMB aspire de l'air pur. Au PMB, la soupape se referme.

2^e temps : Compression : Le piston évolue du PMB au PMH et comprime l'air pur jusqu'à une pression de l'ordre de 20 à 30 bars. Le carburant est injecté dans le cylindre un peu avant la fin de la compression; on parle alors d'avance à l'injection par rapport au PMH.

3^e temps : Combustion détente: La combustion naît par auto-inflammation dans une ou plusieurs zones de la chambre où se trouvent réunies les conditions de température, pression et concentration nécessaires pour déclencher ce processus. L'injection de carburant se poursuit ensuite dans un milieu où existe déjà une flamme. Sous l'effet de l'énergie thermique dégagée et de la production de gaz, le piston est repoussé vers le PMB tandis que les soupapes restent fermées.

4^e temps : Echappement : La soupape d'échappement s'ouvre quand le piston atteint le PMB ; les produits de combustion ("gaz brûlés") sont évacués à l'extérieur sous l'effet du retour du piston au PMH. A ce moment, la soupape d'échappement se referme. En fait, il existe au voisinage du PMH un intervalle de temps (dit "de croisement") pendant lequel les soupapes d'admission et d'échappement sont ouvertes simultanément.

Le fonctionnement du moteur à combustion interne se décompose en étapes intermédiaires plus connues sous le nom de temps moteur. Un temps moteur correspond à un trajet du PMH vers le PMB, ou inversement (soit un demi-tour de vilebrequin). La succession de ces temps est équivalente au cycle moteur, c'est-à-dire à la période de fonctionnement du moteur.

Guide technique pour l'utilisation d'huile végétale
carburant dans les moteurs diesel stationnaires

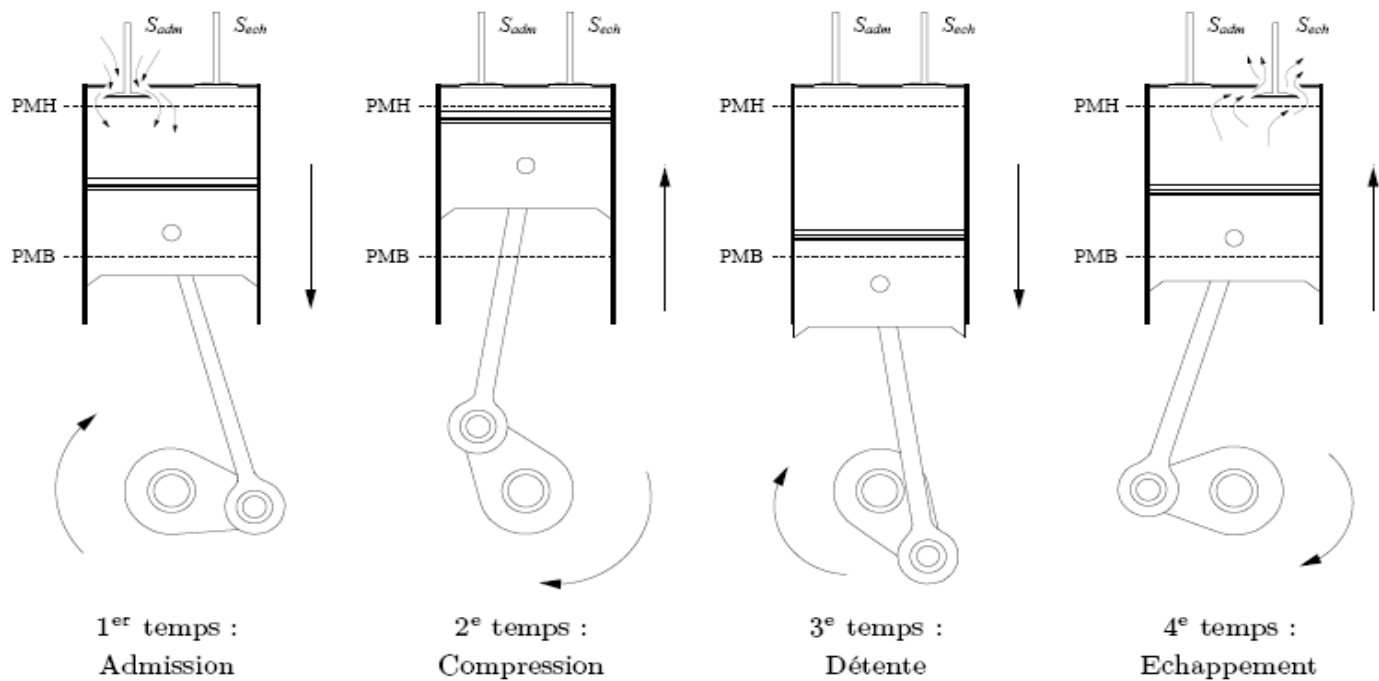


Figure 5 : schéma du cycle Diesel à quatre temps [3]

3.2 Descriptif général du moteur

Le moteur Diesel comprend toujours : le bloc cylindre, les pistons, la culasse, les soupapes, l'arbre à cames, la bielle, le vilebrequin, les carters, l'injecteur, la pompe à injection, le filtre à carburant, ...

L'ensemble de ces éléments, nécessaires à la compréhension du moteur diesel, sont décrit ci-dessous.

3.2.1 Le bloc moteur

Le bloc moteur (Figure 6) est en fonte ou en alliage d'aluminium moulé. Il constitue le bâti du moteur dont la partie intérieure est usinée pour former les cylindres ou les logements de chemises s'il s'agit d'un moteur à chemises rapportées. [4]

Sa partie supérieure est dressée pour former le plan de joint : la culasse vient, en effet, s'appuyer sur le plan de joint supérieur pour coiffer les cylindres [4]. Il reçoit l'ensemble des organes du moteur : équipements d'injection, vilebrequin, auxiliaires électriques, ...

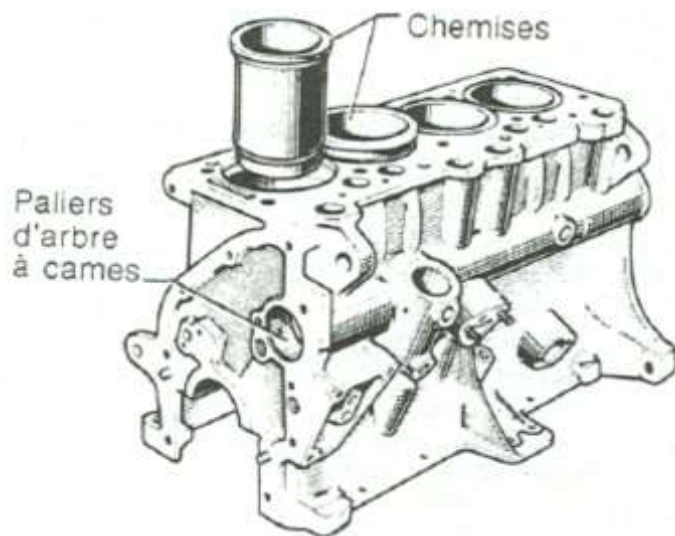


Figure 6 : schéma d'un bloc moteur [5]

3.2.2 Les cylindres

Les cylindres sont soit alésés directement dans le bloc moteur soit constitués par une chemise en acier insérée dans l'alésage (Figure 6). Le nombre de cylindres peut varier selon la nature du moteur de un à douze, pour les applications liées aux transports, ou plus sur les machines fixes destinées à la production d'énergie. Les moteurs d'automobiles sont toujours poly-cylindriques (deux à douze cylindres), la disposition des cylindres les uns par rapport aux autres dépend de facteurs mécaniques : équilibrage, complexité, refroidissement et compacité du moteur. Les cylindres peuvent être disposés en ligne (côte-à-côte verticalement, c'est la configuration la plus fréquente pour les moteurs des voitures de tourisme), à plat (deux cylindres opposés horizontalement) ou en V (disposition oblique pour les gros moteurs de six à douze cylindres).

3.2.3 Le piston

Le piston (Figure 7) est la plus active et en même temps la plus vulnérable des pièces qui constituent le moteur [5]. C'est l'organe qui, en se déplaçant dans le cylindre ou la chemise, transmet la poussée des gaz au vilebrequin par l'intermédiaire de la bielle.

Le piston supporte 4 sortes d'effort :

- Pression des gaz et température de l'explosion.
- Réaction de l'axe de la bielle (axe de piston).
- Réaction de la paroi du cylindre.
- Force d'inertie.



Figure 7 : photo d'un piston (©Gilles VAITILINGOM, 2013)

Il est en général moulé dans un matériau léger et d'une bonne conductibilité thermique comme les alliages d'aluminium. La tête et le support d'axe, devant transmettre l'énergie mécanique, sont particulièrement renforcés.

Ils se composent :

- d'une tête ou culot dont le diamètre doit être inférieur à l'alésage du cylindre quelles que soient les dilatations.
- de segments situés dans des gorges pratiquées sur le pourtour du piston, qui assurent l'étanchéité.
- la jupe doit assurer le guidage à froid comme à chaud avec un minimum de frottement.

3.2.4 La culasse

La culasse (Figure 8) assure la fermeture des cylindres dans leur partie supérieure, constituant ainsi la chambre de combustion [6].

Elle permet :

- l'arrivée et l'évacuation des gaz;
- la mise en position des éléments de la distribution et d'une partie de l'allumage;
- l'évacuation rapide des calories, le point le plus chaud du moteur étant précisément la chambre de combustion.

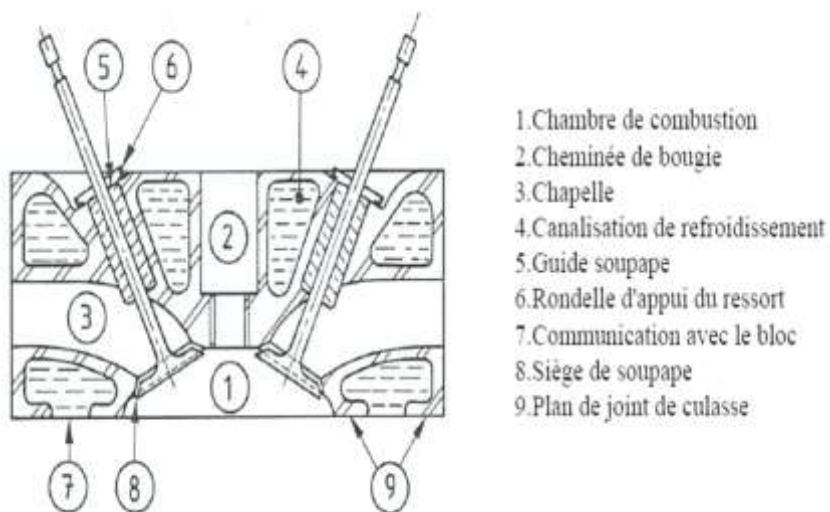


Figure 8 : schéma d'une culasse [6]

La culasse est aussi en fonte ou en alliage d'aluminium moulé. Les contraintes mécaniques étant moins importantes que pour le bloc-moteur, les constructeurs ont quasiment abandonné la fonte au profit de l'aluminium, en raison de sa légèreté et sa très bonne conductibilité thermique.

3.2.5 Les soupapes

Les soupapes (Figure 9) sont les organes qui régissent l'entrée et la sortie des gaz dans la chambre de combustion [6].

Le diamètre de leur tête doit être important pour assurer une entrée et un départ très rapide de l'air et des gaz de combustion respectivement. Cette dimension est limitée par la place libre dans la chambre de combustion, le poids de la soupape qui doit rester minimal, et par sa résistance mécanique aux chocs et aux déformations.

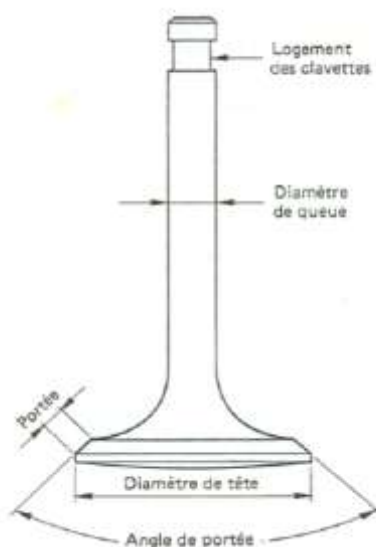


Figure 9 : schéma d'une soupape [6]

3.2.6 L'arbre à cames

L'arbre à cames (Figure 10) est l'élément le plus important de la commande de distribution. Il permet la commande de façon très précise de la levée des soupapes et assure cette levée pendant une durée bien déterminée, correspondant au diagramme de distribution du moteur.

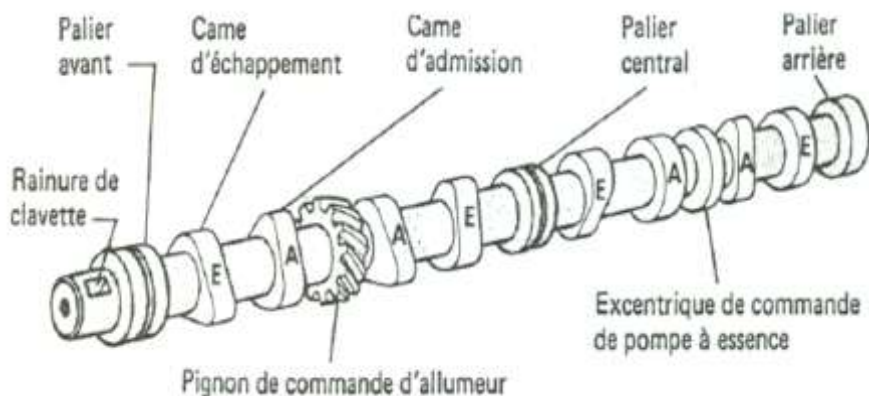


Figure 10 : schéma d'un arbre à came [6]

L'arbre à cames doit résister aux torsions provenant de la poussée des ressorts et à l'usure par frottement. Il peut être en fonte spéciale moulée ou en acier forgé ou cémenté trempé.

Selon la disposition des cylindres et des soupapes, certains moteurs disposent de deux ou quatre arbres à cames en tête [6][8].

3.2.7 La bielle

La bielle est la pièce mécanique dont une extrémité est liée au piston par l'axe de piston et l'autre extrémité au maneton du vilebrequin (Figure 11). Elle permet la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement circulaire continu du vilebrequin.

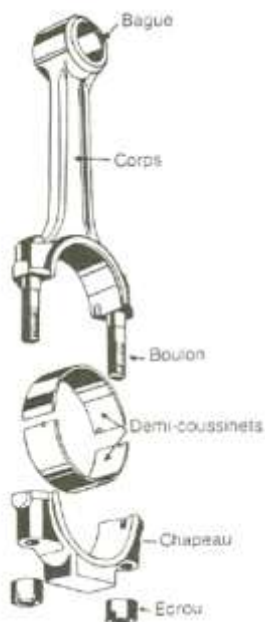


Figure 11 : éléments de la bielle [6]

Elle se compose de trois parties : [6]

Le pied relié à l'axe du piston, soit généralement avec une bague bronze, emmanchée à force, soit dans certains cas avec une bague à aiguilles.

Le corps est la partie comprise entre le pied et la tête. Il est de section en forme de "H" ou "I" pour résister aux divers efforts de compression et de traction et pour éviter ainsi le flambage.

La tête de bielle qui tourne sur le maneton du vilebrequin est coupée dans un plan perpendiculaire à l'axe de la bielle pour permettre la pose des coussinets et son montage sur le maneton du vilebrequin.

La partie inférieure qui vient coiffer le maneton est appelée chapeau. Ce dernier est généralement fixé par des boulons et des écrous auto-serreurs. La coupe peut être droite ou oblique par rapport à l'axe de la bielle.

3.2.8 Le vilebrequin

Le vilebrequin (Figure 12) est la manivelle qui reçoit la poussée de la bielle et fournit un mouvement rotatif à partir du mouvement alternatif du piston. La force exercée par la bielle applique au vilebrequin un couple qui se retrouve au bout de celui-ci sous forme de couple moteur. A l'une des extrémités du vilebrequin, le couple moteur est utilisé pour entraîner le véhicule, un alternateur, etc. A l'autre extrémité, une fraction du couple disponible permet d'entraîner les auxiliaires du moteur : la distribution (arbre à cames, soupapes, etc.), le générateur électrique (dynamo ou alternateur), le compresseur de climatisation, etc.

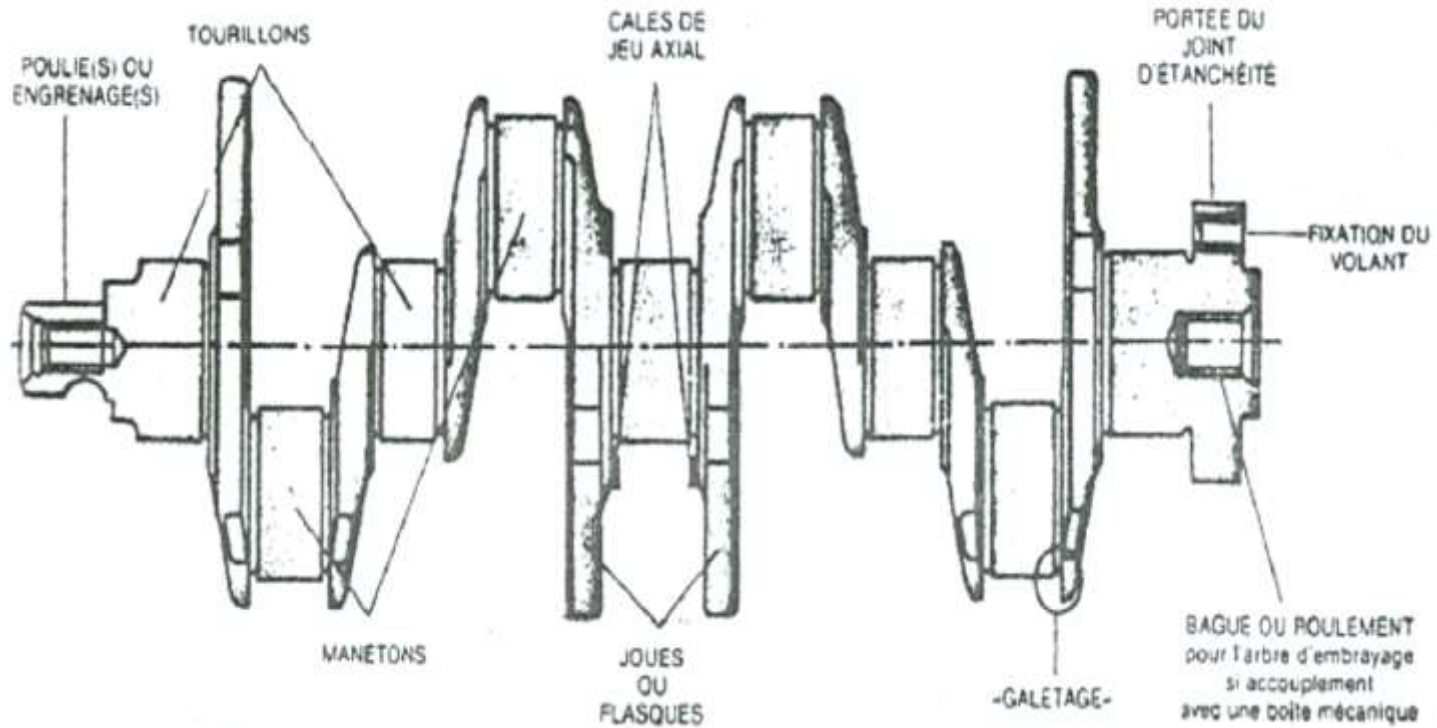


Figure 12 : schéma d'un vilebrequin [5]

3.2.9 Les carters de protection

Ce sont les couvercles qui couvrent ou ferment les différentes faces du moteur. On distingue :

- **le carter inférieur** : C'est une pièce en forme de cuvette qui abrite le vilebrequin et les têtes de bielle et qui contient la réserve d'huile de graissage. En général, il est en tôle emboutie. Il peut être en alliage léger moulé avec nervures extérieures pour assurer un bon refroidissement de l'huile échauffée par son passage dans le moteur.
- **le carter de distribution** : pratiquement la distribution est matérialisée par une liaison mécanique entre le vilebrequin et l'arbre à cames. Cette liaison est protégée par un carter étanche en tôle ou en alliage léger, appelé le carter de distribution.
- **le couvre-culasse** : ce carter ferme la culasse des moteurs à soupapes en tête. Son intérêt est lié au fait que sa disposition permet l'opération d'atelier : "réglage des soupapes". C'est un couvercle de protection étanche par joint comme le carter inférieur. Il est parfois en alliage léger.

3.3 Les différents circuits de fluides dans le moteur diesel

Dans un moteur diesel, il existe plusieurs circuits utilisant des fluides dont chacun à une fonction bien définie. Il en existe 4 qui sont :

- le système d'alimentation en carburant,
- le système de distribution des gaz (admission et échappement),
- le système de graissage,
- et le système de refroidissement.

3.3.1 Le circuit d'alimentation en carburant

Le système d'alimentation en carburant du moteur comprend : un réservoir, une pompe nourrice, un filtre avec soupape de décharge, une pompe d'injection comportant autant d'éléments qu'il y a de cylindres au moteur, et les injecteurs.

Les conduites d'amenée et de retour de carburant permettent à la pompe nourrice d'assurer un débit de balayage continu en carburant à travers le filtre, la pompe d'injection n'utilisant qu'une fraction variable de ce débit. De plus, les pompes d'alimentation et d'injection envoient du carburant en excédant par rapport à ce qui est injecté (au niveau des injecteurs). Ce surplus de carburant est ramené au réservoir à travers un circuit (durites) appelé circuit de retour.

Les circuits d'alimentation permettent d'amener à la pompe d'injection une quantité de carburant suffisante, parfaitement filtrée, sans émulsion ni présence d'eau et sous une pression déterminée. Le circuit d'alimentation comprend [7] :

a. Un circuit en "aspiration"

La pompe d'alimentation assure une dépression au sein du circuit d'alimentation qui permet d'alimenter ce dernier en carburant en « pompant » le carburant dans le réservoir. Ce circuit d'alimentation est constitué du plongeur dans le réservoir, de durites acheminant le carburant du préfiltre jusqu'au raccord d'aspiration de la pompe d'alimentation.

C'est uniquement sur cette partie du circuit qu'une panne appelée "prise d'air" peut être rencontrée suite à des soucis de raccord mal serré, de joints défectueux, de canalisation percée, etc.

b. Un circuit en "basse pression"

C'est la partie du circuit d'alimentation depuis la pompe d'alimentation jusqu'à la pompe d'injection en passant par le filtre à carburant (Figure 13). Son rôle est de permettre une bonne alimentation de la pompe d'injection en carburant. Sur cette partie, tout manque d'étanchéité se traduit par une "fuite".

c. Un circuit à haute pression

C'est la partie du circuit d'alimentation où la pression du carburant est comprise entre 180 et 300 bars. Le circuit d'alimentation haute pression commence à la sortie de la pompe d'injection et se termine aux injecteurs, il comprend :

- les tuyauteries hautes pressions (HP) et leurs raccords,
- les porte-injecteurs,
- les injecteurs.

Les différents éléments constitutifs du circuit d'alimentation des moteurs diesel sont représentés sur la Figure 13 et sont décrits ci-dessous :

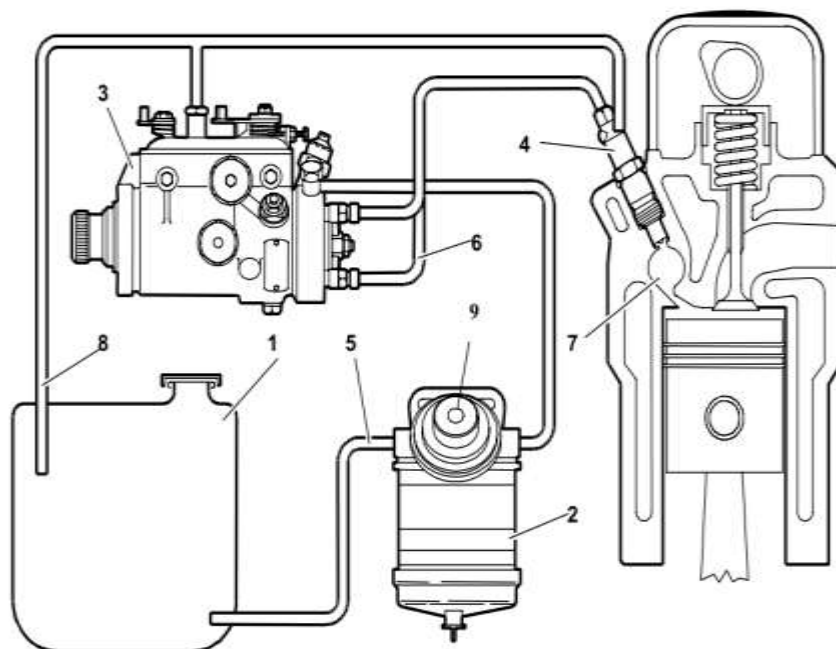


Figure 13 : schéma du circuit d'alimentation d'un moteur diesel [7]

1-Reservoir ; 2-filtre à gasoil ; 3-Pompe d'injection ; 4-Injecteur ; 5-alimentation ; 6-canalisation haute pression ; 7-chambre de turbulence ou préchambre ; 8-retour de carburant ; 9-pompe d'alimentation (amorçage)

Le filtre à combustible. Il protège l'équipement d'injection Diesel des impuretés (4 à 10 μm) et de l'eau [2]. Selon le type de moteur, on retrouve un ou deux filtres.

La pompe d'alimentation.

Elle permet d'alimenter la pompe à injection en carburant. Elle est placée entre le réservoir de carburant et le filtre à carburant. Elle a une pression relative d'environ 1 à 1,5 bars. Elle aspire le carburant dans le réservoir, en passant par le préfiltre, et refoule celui-ci à travers le (ou les) éléments filtrants (pompe à piston ou à engrenages) [8] [14].

La pompe d'injection.

Elle doit refouler sous haute pression vers chaque injecteur un volume précis de carburant, à l'instant prévu, et pendant une durée déterminée, à travers un circuit hydraulique comprenant soupape de refoulement, raccord et conduite haute pression.

Dans certains moteurs, en particulier les petits qui ont le réservoir de carburant au-dessus du moteur, la pompe d'injection est le seul mécanisme de pompage utilisé pour fournir du carburant à l'injecteur. Mais la plupart

des moteurs possède une pompe d'alimentation dite "de gavage", qui amène le carburant du réservoir à la pompe d'injection.

Les pompes d'injection des moteurs de petits générateurs appartiennent généralement à l'une des trois catégories suivantes : les pompes unitaires, les pompes en ligne et les pompes rotatives.



• **Pompes unitaires** : c'est le plus simple des types de pompe d'injection, pour les petites puissances on ne le trouve que dans les moteurs monocylindres (Figure 14). Ils utilisent un mécanisme à piston et cylindre afin de fournir du carburant à l'injecteur par l'intermédiaire d'un tuyau à haute pression. Le piston utilise un mécanisme de synchronisation depuis l'arbre à cames du moteur.

Figure 14 : exemple de pompe unitaire (©Gilles VAITILINGOM, 2013)



• **Pompes en ligne**: elles fonctionnent selon le même principe que les pompes unitaires mais équipent les moteurs à plusieurs cylindres (Figure 15). Un certain nombre de pompes unitaires sont accolées "en ligne" pour former un seul composant. Les pistons alimentent chaque injecteur, le mécanisme de synchronisation comporte un arbre à cames propre à la pompe lequel est entraînée par l'arbre à cames du moteur.

Figure 15 : exemple de pompe en ligne (©Gilles VAITILINGOM, 2013)



- **Pompes rotatives** : on les trouve sur les moteurs multi-cylindres modernes (Figure 16). Elles utilisent un mécanisme de pompage à piston unique tournant, afin de distribuer le carburant aux injecteurs. Elles fonctionnent généralement à des pressions plus élevées que les pompes en ligne et, pour y parvenir, elles fonctionnent à des vitesses très élevées.

Figure 16 : exemple de pompe rotative (©Gilles VAITILINGOM, 2013)

ASTUCE : Les pompes en ligne et les pompes rotatives se distinguent l'une de l'autre par l'emplacement des tuyaux qui sortent de la pompe. Avec les pompes rotatives, les sorties sont disposées selon une configuration carrée ou circulaire et sortent sur le côté de la pompe. Sur les pompes en ligne, les sorties sont alignées sur le dessus de la pompe.

Les pompes d'injection rotatives sont produites par un grand nombre de fabricants, mais la plupart des modèles sont des licences de Bosch ou Lucas /CAV. Les pompes rotatives de style Bosch sont produites par Denso, Zexel et Diesel-Kiki. Le style Lucas/CAV apparaît sous les noms de marque Stanadyne, Roto-Diesel, Condiesel et Delphi.

Question : Quelle pompe injection est la meilleure pour l'huile végétale?
Les pompes unitaires ou en ligne sont plus robustes que les pompes rotatives et sont mieux adaptées à l'huile végétale. Les pompes rotatives de type Lucas / CAV sont sensibles à la viscosité élevée des huiles végétales en raison de leur conception. Leur utilisation est possible si les températures ambiantes sont supérieures à 20°C ou si un système permettant le démarrage sur gasoil est installé sur le moteur. Les pompes rotatives de type Bosch utilisent un mécanisme plus robuste et peuvent être utilisées en toute sécurité avec les huiles végétales pures, mélangées ou non, réchauffées ou non. **Il est donc recommandé de privilégier les pompes unitaires ou en ligne** qui sont les meilleures, où les pompes rotatives de type Bosch.

Les injecteurs et portes injecteurs

L'injecteur ou pulvérisateur (Figure 17) est fixé et positionné dans un support dénommé porte injecteur. C'est un organe de haute précision qui assure la pulvérisation correcte et la répartition du carburant refoulé par la pompe d'injection, dans la chambre (ou la préchambre selon le cas) de combustion du moteur.

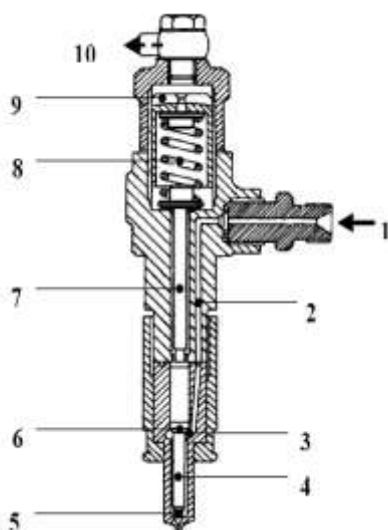


Figure 17 : schéma d'un injecteur et porte injecteur [7]

Le carburant entre dans le corps d'injecteur par l'embout 1 et est amené par le conduit 2 dans la chambre 3 de la tête de l'injecteur. Dans celle-ci, l'aiguille 4 terminée par un pointeau 5 se lève sous l'effet de la pression agissant sur l'épaulement 6, en repoussant la tige 7 que maintient le ressort supérieur 8. Ce dernier peut être taré par une vis réglable 9 ou par l'insertion d'épaisseurs calibrées. Ce tarage détermine donc la pression de levée d'aiguille et par là, celle de début d'injection, grandeur qu'il est essentiel de maintenir dans des limites précises. [9]

Il existe deux type d'injecteurs dans les moteurs diesel, ceux dits à trous et ceux à tétons :

- Les injecteurs à trous (Figure 18) sont utilisés en général sur les moteurs à injection directe car leur rôle est essentiellement de répartir le combustible. L'extrémité de la buse est percée d'un trou central ou de plusieurs trous capillaires dont le diamètre minimal est de 0.2 mm (nombre de trous = 1 à 12, angles de jets = 0 à 180°) [10].
- Les injecteurs à tétons (Figure 19) sont utilisés sur les moteurs à turbulence (injection indirecte), car la préparation du mélange carburant est assurée principalement par le tourbillonnement de l'air et facilitée par la forme étudiée du jet d'injection. La buse est percée d'un trou central de diamètre relativement important $d = 0.8$ à 3 mm et l'aiguille présente un téton de diamètre légèrement inférieur. Avec ce dispositif, on obtient un jet conique dont l'angle de dispersion α dépend de la forme du téton de l'aiguille. En outre, le téton empêche tout dépôt de calamine sur le trou d'injection.

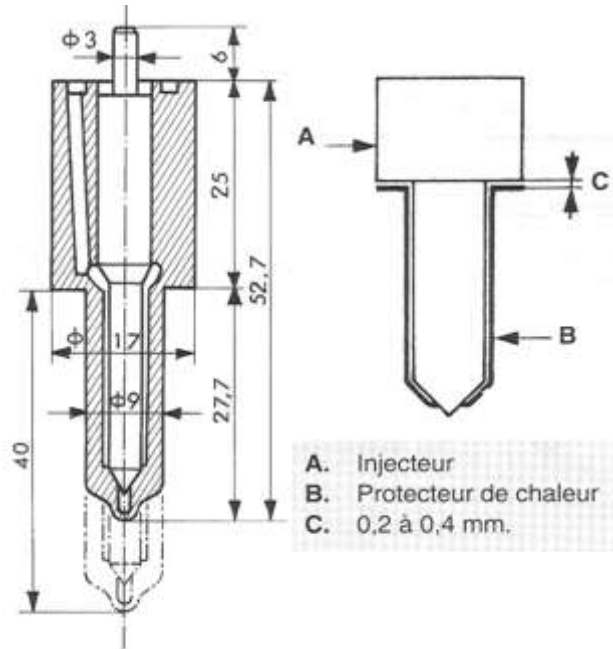


Figure 18 : schéma d'un injecteur à trous Bosch type DLL avec protecteur de chaleur [10]

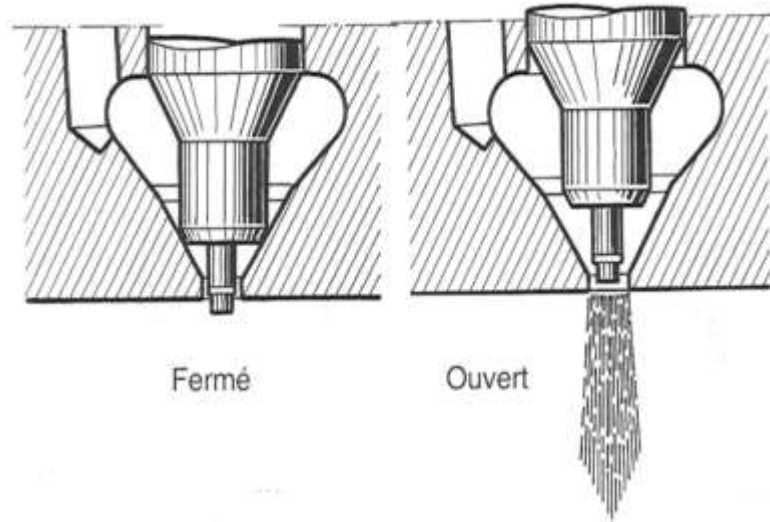


Figure 19 : schéma d'un injecteur à téton à extrémité cylindrique[10]

3.3.2 Le circuit de distribution

La distribution est l'ensemble des organes dont le déplacement, synchronisé avec celui du piston, assure, à des instants bien déterminés du cycle, l'introduction de la masse d'air nécessaire à la combustion et l'évacuation des gaz brûlés.

La distribution comprend [6] :

- les organes d'ouverture et de fermeture des orifices d'admission et d'échappement : à savoir les soupapes
- les organes commandant les soupapes, (ressorts, culbuteurs, tiges-poussoirs, galets ou plateaux, cames ...)
- les organes de synchronisation avec le mouvement, à savoir les arbres à cames avec leur système d'entraînement depuis le vilebrequin (engrenages ou chaînes).

L'ensemble de ce mécanisme doit être à la fois suffisamment rigide pour que la commande des soupapes se produise toujours à l'instant précis voulu (dans le moteur tournant à 1500 tr / mn, 1 milliseconde correspond à 9 degrés de rotation de vilebrequin) ; mais également suffisamment élastique pour éviter la naissance de chocs importants à certaines vitesses de rotation du moteur. Rappelons que, du fait du rapport de compression élevé, les soupapes du diesel sont toujours logées dans la culasse (soupapes en tête).

Définitions usuelles

La fiche éditée par les constructeurs est là pour vous guider. Riche d'enseignement, truffée de chiffres et de termes techniques, son exploitation demande un minimum de connaissance.

Alésage : c'est le diamètre du cylindre

Point mort haut : c'est la position maximum haute du piston ou fin de course montante.

Point mort bas : c'est la position maximum basse du piston ou fin de course descendante.

La course : c'est la distance parcouru par le piston entre le point mort haut et le point mort bas, elle correspond à un demi-tour de vilebrequin soit 180°

Cylindrée : on distingue la cylindrée unitaire et la cylindrée totale.

Cylindrée unitaire : c'est le volume balayé par le piston entre le point mort haut et le point mort bas exprimé en centimètre cube.

Cylindrée totale : c'est le produit de la cylindrée unitaire par le nombre de cylindre. Elle constitue une caractéristique essentielle du moteur.

3.3.3 Le circuit de lubrification

Lors du fonctionnement des moteurs à piston, de nombreuses pièces sont en mouvement avec des surfaces soumises à des contraintes mécaniques et thermiques. Pour assurer des déplacements affranchis de tout contact métal-métal, il est impératif d'interposer entre ces deux surfaces un fluide onctueux et visqueux qui assure un rôle de lubrifiant. Les fluides généralement utilisés pour la lubrification des moteurs diesels sont des huiles minérales, semi-synthétiques ou synthétiques, dérivées du pétrole et enrichies en additifs techniques.

En premier lieu, ces huiles doivent avant tout lubrifier des assemblages, c'est-à-dire former entre les surfaces en regard un matelas suffisamment résistant et épais pour éviter le contact métal sur métal [11].

En second lieu, ces huiles concourent à limiter les températures de certains organes et servent également à refroidir les pistons.

Enfin ces huiles jouent également un rôle chimique puissent qu'elles permettent :

- d'assurer le maintien de la propreté du moteur aussi bien dans les parties chaudes (gorges de segments, fonds de piston) que dans les parties froides (carter de distribution, canalisations internes du vilebrequin, carter inférieur),
- de protéger les pièces contre les corrosions provoquées par l'humidité (lors d'arrêts prolongés) et les acides nés de la combustion de combustibles sulfureux,
- d'évacuer les impuretés.

Selon les motoristes un lubrifiant doit être tel que :

- au repos, il reste adhérent aux surfaces (onctuosité),
- sa viscosité varie peu en fonction de la température,
- il reste inaltérable à chaud,
- il neutralise les acides produits par la combustion,
- il empêche l'agglomération des particules carbonées produites par la combustion,
- il soit filtrable,
- il soit bon marché.

3.3.4 Le circuit de refroidissement

Les combustions répétées surchauffent les pièces en contact (piston, cylindre, soupape) et ce phénomène se diffuse sur l'ensemble des pièces mécaniques du moteur. Il faut donc les refroidir sous peine de destruction. Pour un bon fonctionnement des moteurs à explosion, la température doit être régulée quand le moteur atteint une charge élevée, ce qui impose d'évacuer de l'énergie grâce à un système de refroidissement.

Au cours du cycle, la température des gaz au sein du cylindre varie de quelques degrés à plus de 2000°C [12]. Les parois de la culasse et de la chemise suivent ces variations de température avec des amplitudes beaucoup plus faibles. Ces écarts (de 60 à 80°C autour d'une moyenne de 200°C pour la surface des parois de la culasse par exemple [12] suffisent parfois à provoquer des contraintes thermiques cycliques préjudiciables à la tenue des pièces (craques thermiques dans la culasse, déformations permanentes de la culasse entraînant des problèmes d'étanchéité au niveau du joint de culasse...).

Il est donc nécessaire de refroidir le moteur diesel afin d'assurer la résistance mécanique des éléments de la chambre de combustion [12]. Ce refroidissement permet également d'assurer une faible montée en température des huiles pour qu'elles assurent une bonne lubrification du contact segment/cylindre et pour diminuer les risques de grippage des pistons ou de gommage des segments.

Deux grands systèmes de refroidissement sont classiquement utilisés pour les moteurs diesel :

- ceux dont le refroidissement est assuré par de l'eau : une circulation d'eau interne refroidit le moteur, ensuite l'eau est refroidie dans un radiateur ou un tour de refroidissement.
- et ceux dont le refroidissement est assuré par de l'air : un courant d'air frais passe sur le moteur et le refroidit.

3.4 Les différentes familles de moteur diesel

Le carburant peut être injecté et brûlé de deux manières différentes dans un moteur diesel. Une méthode consiste à injecter le carburant directement dans la chambre de combustion aménagée dans le piston. Dans l'autre méthode, la chambre de combustion est divisée en deux parties. Le carburant est injecté dans la première partie logée dans la culasse, les gaz de combustion pénètrent ensuite dans la seconde partie au-dessus du piston. Ces méthodes sont appelées à injection directe et indirecte respectivement. Suivant ces deux modes d'injection du carburant deux familles de moteur diesel sont classiquement distinguées: les moteurs diesel à injection directe et les moteurs diesel à injection indirecte.

3.4.1 Les moteurs diesel à injection directe:

Le type dominant de système d'injection dans les petits moteurs diesels modernes est l'injection directe (Figure 21). Le piston présente un creux dans la partie supérieure qui contient la chambre de combustion. Le carburant est injecté grâce à un injecteur multi-trous dans le creux de piston et se mélange avec l'air comprimé et brûle. Dans les moteurs à injection directe, c'est la capacité des injecteurs à fournir un brouillard finement atomisée de carburant qui détermine un bon mélange air-carburant et une combustion complète. Il est préféré à l'injection indirecte pour son meilleur rendement (20% de consommation en moins environ), résultant de la réduction des pertes thermiques aux parois.

Les petits moteurs à injection directe sont devenus communs dans les 25 dernières années. Auparavant, la qualité variable du carburant diesel rendait difficile une combustion complète ce qui entraînait des problèmes de dépôts de carbone. En effet, les températures moyennes de combustion peu élevées aux basses charges, n'étaient pas toujours suffisantes pour brûler complètement toutes les fractions d'un carburant diesel brut.

3.4.2 Les moteurs diesel à injection indirecte:

La plupart des moteurs diesel plus anciens utilisaient l'injection indirecte. Ce système de combustion a été conçu à une époque où les normes sur les combustibles étaient moins exigeantes qu'aujourd'hui (Figure 20). Ces moteurs sont généralement plus durables et fiables par rapport à leurs homologues à injection directe. Le carburant est pulvérisé par un injecteur à trou unique dans une chambre de pré-combustion adjacente à la partie supérieure du cylindre, d'où le nom d'injection indirecte. La majorité de la combustion du carburant a lieu à l'intérieur de la chambre de précombustion, la détente des gaz produits a lieu dans la chambre du cylindre, ce qui en repoussant le piston, entraîne la course de puissance. La chambre est également désignée en tant que chambre de précombustion ou de turbulence. L'orifice unique de l'injecteur, de type à téton, est plus grand que ceux des injecteurs multi-trous des moteurs à injection directe, ce qui les rend plus approprié pour les carburants bruts. Le téton a également un effet d'auto-nettoyage à la différence des injecteurs à orifices multiples.

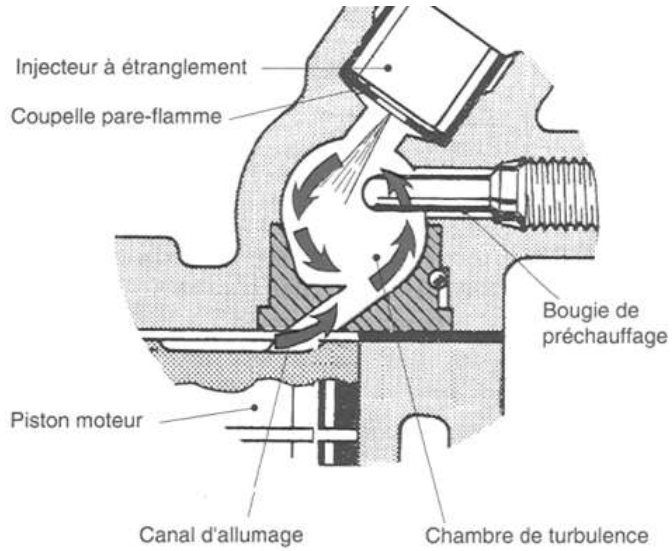


Figure 20 : schéma de principe de l'injection indirecte [13]

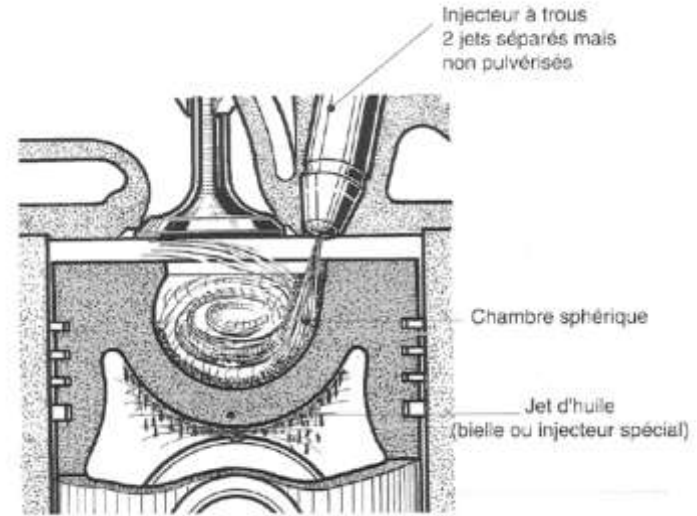


Figure 21 : schéma de principe de l'injection directe [13]

3.5 Conclusion sur les moteurs

Une multitude d'études utilisant des huiles végétales dans des moteurs à injection directe non modifiés ont démontré des défaillances prématurées des moteurs. Celle-ci est généralement attribuée à la combustion incomplète du carburant à l'origine des dépôts d'imbrulés dans le système de combustion [14-16].

Il existe un certain nombre d'exemples en Afrique ou toutefois des huiles ont été utilisées avec succès dans des moteurs à injection directe adaptés [17].

Bien que l'utilisation d'huile végétale carburant soit considérée comme expérimentale et avec un risque pour la vie du moteur, de nombreux rapports dans le Monde n'indiquent aucun effet néfaste si certaines procédures et conditions sont toujours respectées. A savoir : le démarrage et l'arrêt du moteur sur le diesel, le préchauffage de l'huile végétale et le maintien d'une charge élevée et constante sur le moteur à tout moment. L'injection indirecte est donc à privilégier. L'injection directe n'est possible que si certaines adaptations du moteur sont réalisées.

3.6 Références bibliographiques

- [1] Boursin, P. *LE MOTEUR*.
<http://philippe.boursin.perso.sfr.fr/pdgmoteu.htm>.
- [2] Vaïtilingom, G., *Performances globales des moteurs diesel alimentés par des huiles de tournesol et du colza*. 2005, CIRAD: Montpellier.
- [3] Grondin, O., *Modelisation du moteur à allumage par compression dans la perspective du contrôle et du diagnostic*, in *Sciences Physiques et Mathématiques pour l'Ingénieur*. 2004, Rouen. p. 216.
- [4] Sovanna, P., *Chap. II Système enceinte*, in *Moteurs Thermiques*, ITC/GIM, Editor. 18/10/2004. p. 6.
- [5] Sovanna, P., *Chap. II Système bielle-manivelle*, in *Moteurs Thermiques*, ITC/GIM, Editor. 18/04/2004. p. 5.
- [6] Sovanna, P., *Chap. II Système de distribution*, in *Moteurs Thermiques*, ITC/GIM, Editor. 18/04/2004. p. 7.
- [7] Sovanna, P., *Chap. II Système d'alimentation*, in *Moteurs Thermiques*, ITC/GIM, Editor. 18/10/2004. p. 14.
- [8] Sovanna, P., *Chap. III Combustion et suralimentation*, in *Moteurs Thermiques*, ITC/GIM, Editor. 18/10/2004. p. 7.
- [9] Meyer, M. *Huile végétale - le carburant renouvelable pour un marché de niche*. 2004.
- [10] Sovanna, P., *Chap. III Alimentation et injection*, in *Moteurs Thermiques*, ITC/GIM, Editor. 18/10/2004. p. 14.

- [11] BRUN, R., *Science et technique du moteur diesel industriel et de transport* TECHNIP ed. Vol. Tome 3. 1986: Ecole nationale supérieure du pétrole et des moteurs. 455.
- [12] Sovanna, P., *Chap. II Système de refroidissement*, in *Moteurs Thermiques*, ITC/GIM, Editor. 18/10/2004. p. 7.
- [13] Sovanna, P., *Chap. III Particularité du moteur diesel*, in *Moteurs Thermiques*, ITC/GIM, Editor. 18/10/2004. p. 6.
- [14] Sidibé, S.S., et al., *Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. **14**(9): p. 2748-2759.
- [15] Abbasi, T. and S.A. Abbasi, *Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. **14**(3): p. 919-937.
- [16] Hossain, A.K. and P.A. Davies, *Plant oils as fuels for compression ignition engines: A technical review and life-cycle analysis*. *Renewable Energy*, 2010. **35**(1): p. 1-13.
- [17] Vaïtilingom, G., *Utilisations énergétiques de l'huile de coton*. 2006, Cahiers Agricultures: Montpellier.

4 Problèmes liés à l'utilisation des huiles végétales dans les moteurs diesels

La plupart des moteurs diesels peuvent fonctionner avec 100% d'huile végétale, au moins pendant une courte période. Cependant, en mettant de l'huile végétale simplement dans le réservoir de votre moteur sans prendre de précautions, vous conduira à devoir rapidement acheter un nouveau moteur. Par contre si vous avez une compréhension rationnelle des problèmes potentiels liés à l'utilisation de l'huile végétale, et si vous prenez soins d'anticiper et de gérer efficacement ces problèmes, la longévité de votre générateur alimenté en huile végétale pourra égaler, voire dépasser, celle obtenue avec du diesel. Certains des points clés concernant les types de moteur ont été évoqués dans le chapitre précédent. Nous allons discuter dans ce chapitre des problèmes majeurs liés à l'utilisation de l'huile végétale et fournir les informations nécessaires sur la façon d'éviter les écueils.

Les deux soucis majeurs rencontrés lors de l'utilisation des huiles végétales dans un moteur diesel sont liés à des problèmes de combustion incomplète à faibles températures et de difficulté d'alimentation/distribution liées à la viscosité et à l'indice de cétane, caractéristiques des huiles par rapport aux diesels actuels

4.1 Problèmes de combustion à faible température

Pour qu'une huile végétale puisse brûler complètement, une température moyenne minimale de chambre de combustion de 500 ° C doit être atteinte, comparativement à environ 250° C pour le diesel. Si cette température n'est pas atteinte, une fraction de carburant partiellement brûlé va former des dépôts de carbone (cokéfaction) sur les injecteurs, les surfaces des cylindres, les soupapes et les parois de la chambre de combustion. L'encrassement des injecteurs a une forte influence sur la formation de ces dépôts. Ceci est particulièrement le cas pour les injecteurs multi-trous qui équipent les moteurs à injection directe, pour lesquels la qualité de jet de carburant finement atomisé est plus critique.



Figure 22 : dépôts carbonés sur le nez des injecteurs et la culasse (©Gilles. VAITILINGOM, 2013).

Ces dépôts engendrent une pulvérisation inégale et la production de plus grosses gouttelettes de carburant qui ne brûlent pas complètement, menant à plus d'accumulation de carbone et cette escalade finira par conduire à une panne de moteur, si rien n'est fait. Si du carburant partiellement brûlé se dépose sur les parois du cylindre, il va s'accumuler dans les segments des pistons et peut les amener à se détériorer. De trop fortes accumulations favoriseront le transfert d'imbrûlé déposé sur les parois vers le carter du moteur, soit par le balayage du piston, soit par le soufflage dû à des segments devenus inefficaces.

Afin de parvenir à une combustion complète, il est essentiel que la température du moteur soit suffisamment élevée ce qui implique qu'il fonctionne à « haut régime ». Une règle empirique typique situe le seuil à environ 70% de facteur de charge en continu pour les moteurs à injection directe, et de 10% de facteur de charge pour les moteurs à injection indirecte. En effet, ces derniers sont plus tolérants et il a été prouvé qu'ils peuvent fonctionner avec succès même à des charges faibles jusqu'à 10% [1].

Il y a deux raisons à cela. La chambre de précombustion, plus petite, conserve la chaleur de combustion aidant ainsi le carburant à finir sa décomposition. Ensuite, le téton de l'injecteur est moins sensible à la cokéfaction comme cela a été expliqué précédemment.

ASTUCE: De la fumée blanche sortant de votre tuyau d'échappement indique que la combustion n'est pas complète, ce qui est habituellement causé par un moteur en sous-charge.

Placez une feuille de papier ou un tissu blanc sur le flux d'échappement lorsque le moteur est en marche et vérifiez la présence de dépôts d'huile végétale non brûlée.

4.2 Problèmes liés à la viscosité élevée de l'huile végétale

A 25 °C, l'huile végétale est environ 10 fois plus visqueuse que le diesel. Cela peut avoir deux effets néfastes sur le moteur : une moins bonne pulvérisation du carburant injecté, et des contraintes mécaniques supplémentaires à la fois sur la pompe d'injection et la pompe d'alimentation.

L'expérience a montré que les pompes d'injection unitaires ou les pompes en ligne tolèrent l'huile végétale, plus visqueuse, que les pompes rotatives, et particulièrement celles des modèles Lucas / CAV.

La viscosité de l'huile végétale peut être réduite par deux méthodes - réchauffage ou mélange avec du diesel. Le graphique Figure 23 indique l'effet de la température sur la viscosité de différents mélanges d'huile végétale et de diesel. Le graphique met en avant qu'à une température d'environ 80 °C, l'huile de jatropha présente une viscosité d'environ 10 centistokes, soit seulement deux fois la viscosité du diesel à des températures normales de fonctionnement. La plupart des fabricants de moteurs diesel spécifient une viscosité maximale de carburant de 10 à 15 centistokes, de sorte que l'huile végétale à 80 °C se trouve dans la gamme de spécifications de la plupart des moteurs diesel.

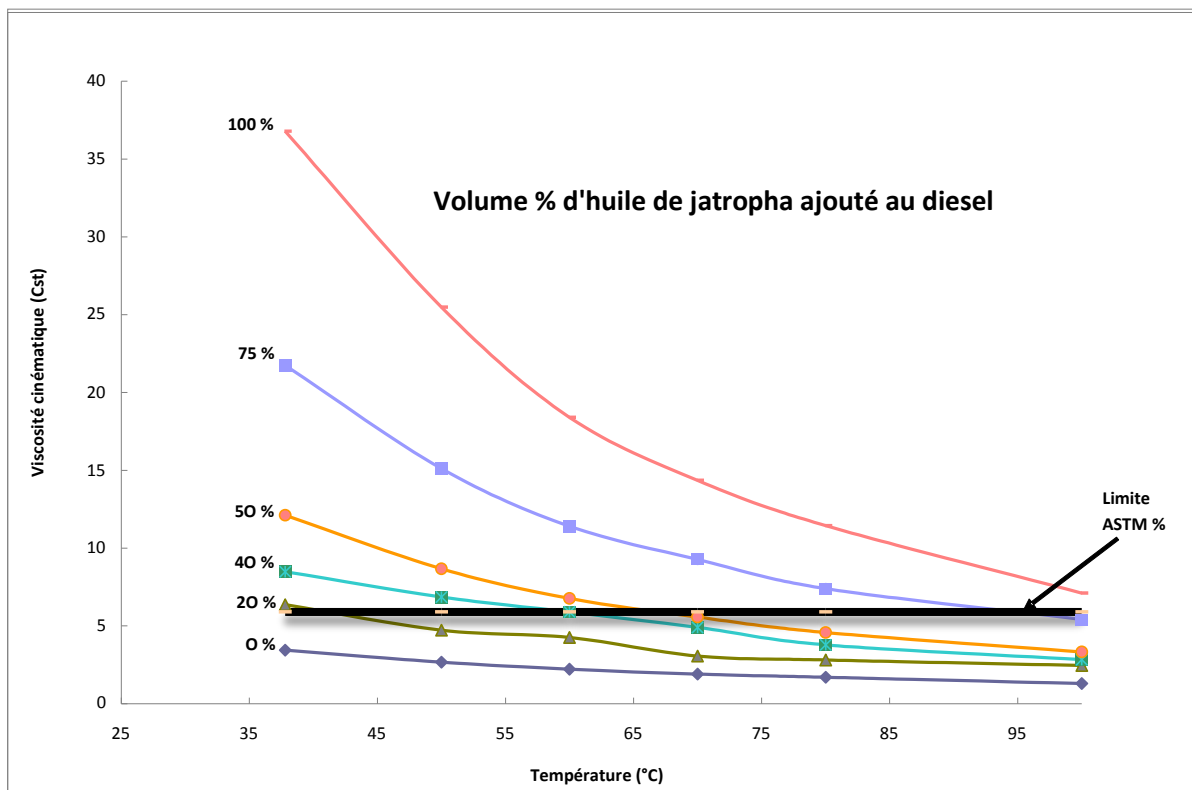


Figure 23 : viscosité de l'huile de Jatropha et de ses mélanges avec du diesel *versus* la température [2].

L'huile végétale peut être mélangée avec du diesel et dans n'importe quelle proportion afin de fluidifier le carburant. Il convient cependant de souvent (quotidiennement) agiter le mélange pour éviter une séparation de phase. Cette approche est utilisée par de nombreux praticiens pendant les périodes froides par mesure de sécurité. D'autres mélangent un faible pourcentage (moins de 10 à 15%) de kérosène pour obtenir le même résultat. Notez que cette dernière méthode réduit la viscosité mais ne résout pas définitivement les problèmes de combustion incomplète si le taux de charge du moteur n'est pas suffisamment élevé (température chambre basse). La Figure 23 met en avant le fait qu'un mélange jusqu'à 30% d'huile de jatropha peut être utilisé sans préchauffage du carburant. Au-delà de 50% d'huile de jatropha le préchauffage est nécessaire pour diminuer la viscosité du mélange afin d'être proche de la limite recommandée par la norme ASTM.

4.3 Autres problèmes rencontrés

Il y a un certain nombre d'autres problèmes qui peuvent résulter de l'utilisation de l'huile végétale. Ceux-ci peuvent être répartis dans les catégories suivantes:

- température de solidification de l'huile végétale
- colmatage des filtres
- formation de dépôts de carbone
- détérioration des qualités du lubrifiant
- problèmes de pompe d'alimentation

4.3.1 Température de solidification

Certaines huiles végétales se solidifient dans des plages de température de 22-25 °C (huile de coprah, huile de palme brute, etc.). A des températures au voisinage de ces plages, de l'huile semi-solidifiée ou solidifiée peut avoir un effet catastrophique sur la pompe d'injection et la pompe d'alimentation. Le réchauffage ou les mélanges, dus à un effet solvant du gasoil, sont les solutions à ce problème. Dans les climats où les températures sont souvent inférieures à 25 °C, il est recommandé d'installer un système de double réservoir, de sorte que le moteur peut être démarré et réchauffé sur le diesel.

4.3.2 Colmatage des filtres

L'utilisation de l'huile végétale comme carburant peut provoquer le colmatage des filtres pour une variété de raisons, pouvant conduire à la panne des pompes d'injection et/ou d'alimentation.

Lors de l'utilisation de l'huile végétale, il est important d'utiliser un filtre de qualité et de classe 5 microns. Ceux-ci peuvent être coûteux. Il convient donc de veiller à ne pas les changer trop fréquemment.

Une huile carburant de qualité filtrée à 10 microns ou moins, sèche et à faible teneur en acide gras libre est donc un prérequis. Une huile mal filtrée va rapidement colmater le filtre du moteur avec des particules végétales.

S'il y a de l'eau dans l'huile ou dans le réservoir de carburant, elle peut provoquer une émulsion avec des acides gras libres et former un résidu blanc grumeleux qui va rapidement colmater le filtre. Des teneurs élevées en acides gras libres peuvent provoquer des réactions avec certains métaux ou composants de caoutchouc pour produire des résidus. Cela ne se produit qu'à des teneurs très élevées indicatives d'une huile de mauvaise qualité.

Une autre cause fréquente de colmatage du filtre intervient suite à l'utilisation d'huile végétale dans un moteur ayant déjà fonctionné un certain temps au diesel. Les réservoirs de carburant se salissent au fil du temps, en particulier si le diesel utilisé a été transvasé sans précaution à partir de conteneurs sales. La plupart des impuretés vont se déposer dans le fond du réservoir de carburant. Les huiles végétales ayant une densité volumique supérieure ; 10% que le diesel, certaines particules qui se sont déposés en utilisation diesel, vont se retrouver en suspension dans les huiles végétales. Cette phénomène peut colmater les filtres à carburant et cela malgré une 'huile de qualité. Pour éviter ce problème, le réservoir de carburant doit être lavé soigneusement avant de passer à l'huile végétale.

ASTUCE: *démontez et nettoyez soigneusement le réservoir de carburant avant de passer à l'huile végétale.*

La dernière cause de colmatage du filtre peut être liée à l'accumulation d'huile solidifiée sur le média du filtre, **ce qui peut arriver avec des huiles de coprah ou de palme brutes.**

Bien que l'*huile de coprah* se solidifie entre 22-25 ° C, un faible pourcentage d'huile peut précipiter en matière grasse solide à des températures supérieures. Les problèmes causés par ce phénomène peuvent être résolus en réchauffant le carburant.

L'*huile de palme brute* est un mélange complexe de différents triglycérides : l'oléine et la stéarine, ayant des points de fusion différents. C'est une huile

biphasique en ambiance tropicale : la partie oléine présentant un point de fusion bas de 20 °C (point haut 35 °C). Alors que celui de la partie stéarine est proche de 30 °C (point haut : 50 °C).

On comprend que même dans les zones de production, la partie oléine restera fluide en surnageant alors que la partie stéarine se solidifiera en fond des réservoirs. Il est donc nécessaire de réchauffer l'huile de palme brute à environ 80 °C et de s'assurer de son homogénéisation ne serait-ce que pour la pomper dans les réservoirs alimentant les moteurs.

4.3.3 Les dépôts de carbone

Lorsque la combustion de l'huile végétale n'est pas effectuée à haute température dans le moteur (~500°C ou taux de charge ~ 70% pour un moteur à injection directe) une accumulation de combustible non brûlé dans la chambre de combustion engendre la formation de dépôts de carbone sur les injecteurs et les segments de piston. Les dépôts de carbone peuvent également se former dans d'autres zones du système de combustion provoquant des problèmes de circulation d'air et de compression. Les zones concernées sont les soupapes d'échappement et l'intérieur du collecteur d'échappement lui-même. Les dépôts peuvent se former sur les sièges de soupapes, provoquant une perte d'étanchéité et de fait de compression [3].

4.3.4 Détérioration des qualités du lubrifiant

La détérioration de l'huile de lubrification peut se produire lorsque de l'huile végétale non brûlée pénètre dans le carter d'huile du moteur, balayée sur les parois du cylindre par les pistons, ou soufflée par le "blow-by" à cause de segments collés et donc peu efficaces. ce phénomène ne pose pas de problème avec le diesel car il arrive à s'évaporer ; l'huile de lubrification étant plus chaude que la chaleur de vaporisation de ce dernier, ce n'est pas le cas des huiles végétales qui s'y accumulent. Cela se traduit par une réduction de la viscosité globale et une altération du pouvoir lubrifiant de l'huile de lubrification. Elle peut entraîner l'usure des paliers et des parties mobiles du moteur. Ce problème est généralement symptomatique d'un moteur fonctionnant en sous-charge [4].

ASTUCE: *Surveillez le niveau d'huile de lubrification régulièrement et si vous le voyez augmenter, vous saurez que de l'huile végétale s'accumule dans le carter moteur.*

4.3.5 Problèmes de pompes d'alimentation

La plupart des pompes d'alimentation utilisent un diaphragme de pompage pour délivrer du carburant à partir du réservoir vers la pompe d'injection. Ces pompes sont généralement assez robustes, mais peuvent souffrir d'une durée de vie réduite en raison de la viscosité élevée de l'huile végétale. Dans la plupart des cas, le taux de pannes est très faible avant plusieurs années de fonctionnement.

4.4 Références bibliographiques :

- [1] Sidibé, S.S., et al., Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. 14(9): p. 2748-2759.
- [2] Sidibe, S.S., Contribution a l'étude des huiles végétales de coton et de jatropha curcas biocarburant dans les moteurs diesels a injection directe. Soutenue le 23 Juin 2011, à Ouagadougou, Ecole doctorale de l'Institut international d'Ingénierie l'Eau et de l'Environnement (2iE)
- [2] Larry Burns, Robert Carling, Matt Carr, Brent Erickson, and Todd West. A comprehensive systems approach to understanding large-scale biofuels deployment in the US: 90 billion gallons *Industrial Biotechnology*. March 2009, 5(1): 21-29. doi:10.1089/ind.2009.5.21.
- [3] Vaïtilingom G., 2007. Evaluation de l'utilisation de l'huile de palme brute (CPO ou HPB) comme carburant. Etude menée pour la société SOCFINCO. 68 p.

5 Quels moteurs diesel et quelles options techniques pour utiliser les huiles végétales comme carburant ?

Les huiles végétales sont utilisées sous différentes formes (pures ou transformées) avec adaptation ou non des moteurs diesel. Leur comportement global en tant que carburant ainsi que les principaux problèmes rencontrés lors de leur utilisation ont fait l'objet de nombreuses études.

Comme mentionné précédemment les principaux problèmes qui font obstacles à une utilisation courante des huiles végétales pures (HVP) dans un moteur diesel moderne sont leur viscosité élevée [1-4] et leur combustion incomplète à faibles températures qui entraînent des soucis de :

- colmatage de filtre à carburant,
- pertes de charge dans le circuit d'alimentation en carburant du moteur
- détérioration des éléments de la pompe d'injection
- dépôts charbonneux dans la chambre de combustion

Ce chapitre, loin d'être exhaustif, décrit et compare les avantages et les inconvénients des différents modes d'utilisation recommandés pour utiliser des HVP dans le moteur, à savoir l'utilisation des HVP i) en mélange à des teneurs différentes dans le gasoil, ii) la bicarburant et iii) la transestérification (biodiesel).

5.1 Les différents modes d'utilisation des HVP dans les moteurs diesel

5.1.1 Utilisation des HVP en mélange avec du gasoil

L'objectif de l'utilisation des mélanges d'huile végétale avec du gasoil est de réduire leur viscosité afin d'en faciliter la pulvérisation et l'atomisation dans la chambre de combustion.

Les études sur l'utilisation des mélanges comme carburant montrent qu'en introduisant moins de 30% d'huile dans le carburant fossile, les performances du moteur sont comparables à celles du gasoil pur [5]. De manière générale, les émissions de polluants et les performances obtenues avec les mélanges se situent entre celles des huiles végétales pures et celles du gasoil pur. Cependant, il convient, avant tout essai, de contrôler les circuits d'alimentation du gasoil et de surveiller le comportement du moteur ainsi que les filtres à gasoil qui ont tendance à s'encrasser plus rapidement en raison de l'effet détergent de l'HVP.

L'utilisation en mélange jusqu'à 30 % ne nécessite donc pas de modifications du moteur. L'utilisation en mélange avec le gasoil permet de s'affranchir des problèmes de viscosité de l'huile mais il faut néanmoins prendre garde au risque de séparations de phase de l'huile et du combustible fossile dans le réservoir en cas de non utilisation prolongée du groupe ou de stockage. Pour les mélanges avec un taux d'huile plus important, il faut préchauffer le mélange.

5.1.2 La bicarburation

C'est la solution préconisée pour utiliser 100% d'huile végétale dans le moteur diesel. Si elle est bien gérée, le moteur fonctionne sans dommage sur les organes. La bicarburation consiste à démarrer le moteur avec du gasoil, puis à injecter l'huile dans le circuit, seulement quand l'huile végétale est suffisamment fluide (préchauffée) et quand le moteur (la chambre de combustion) est « chaud ». Il faut entendre par « moteur chaud », dans le cas des moteurs à injection directe, un moteur qui fonctionne à plus de 70% de sa charge nominale depuis au moins 5 minutes. Avec ce facteur de charge, la température de combustion est supérieure à 500°C ce qui permet une combustion des HVB dans la chambre sans imbrûlés donc sans dépôts. Dans le cas des moteurs à injection indirecte, la préchambre de combustion atteint 500°C à partir de 10% charge.

La bicarburation peut être manuelle (vanne 3 voies commandée manuellement) ou automatique (électrovanne 3 ou 6 voies avec commande par un contact électrique ou un automate via un capteur de température). La bicarburation nécessite d'installer un second circuit d'alimentation pour l'huile végétale pure en parallèle à celui du gasoil. Sur ce circuit (Figure 24), on trouve en série [6] :

- un filtre à carburant adapté à l'huile végétale,
 - un réchauffeur, pour réduire la viscosité de l'huile et se rapprocher de celle du gasoil
 - une pompe de circulation et de gavage de la pompe à injection,
 - une électrovanne qui permet de basculer d'un carburant à un autre ; c'est-à-dire permettant au moteur de fonctionner soit au gasoil soit à l'HVP.
- De nombreux kit de bicarburations sont disponible commercialement. Mais en grande majorité la consigne de basculement est uniquement basée sur la température de l'huile végétale sans se préoccuper du niveau de charge ou de la température du moteur. Quelques kits commerciaux sont décrits dans le Tableau 4.

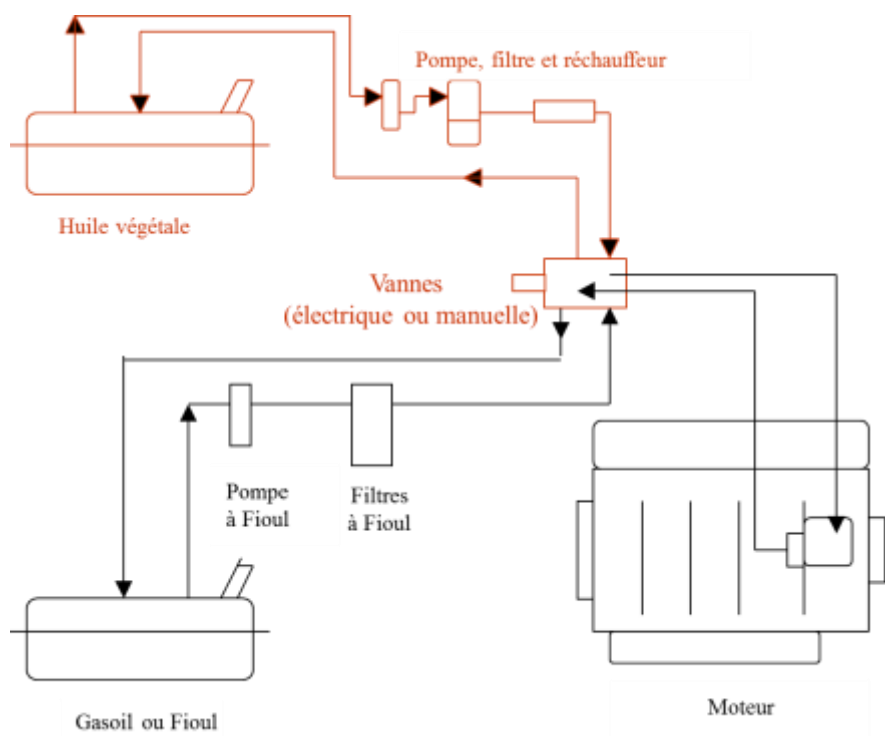


Figure 24 : schéma des modifications du circuit d'alimentation avec un kit de bicarburant [7]

Tableau 4 : caractéristiques de kits, quelques kits de bicarburation commerciaux

Accessoires Fabricants	AEDEN KIT COMPLET CLASSIQUE	ELSBETT	BIODRIVE	BIO-CLIC Profession nel	BIO-CLIC EXPERT
pompe de prégavage	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
filtre HVP	NON	NON	OUI	NON	OUI
préchauffage HVP	échangeur à plaque LDR	échangeur à plaques + électrique	échangeur à plaque LDR	échangeur à plaque LDR	échangeur à plaque LDR + électrique
vannes arrivée/retour	Electrovannes				
paramètres choix carburant	température HVP groupe relié au réseau	température HVP	température HVP	températur e HVP	température HVP
moyens de de contrôle des paramètres	jauge de température capteur	jauge de température	sonde de température (thermocouple)	sonde de températur e avec afficheur digital	sonde de température avec afficheur digital
moyen de switch carburant	interrupteur commandant les EV	interrupteur commandant les EV	boitier de contrôle	interrupteu r commanda nt les EV	interrupteur commandant les EV
gestion du choix carburant	par l'utilisateur après contrôle de la T° HVP	Par l'utilisateur après contrôle de la T° HVP	géré par le boitier de contrôle	Par l'utilisateur après contrôle de la T° HVP	Par l'utilisateur après contrôle de la T° HVP
gestion temps de vidange avant arrêt	temporisation électronique	Par l'utilisateur	temporisation électronique	par l'utilisateur	par l'utilisateur

LDR : Liquide De Refroidissement

Le kit totalement automatique est cher car il nécessite un boitier de contrôle contenant un automate programmable qui est une technologie chère.

Le contrôle des conditions de bascule gasoil/huile végétale se fait de la façon suivante : tant que les chambres de combustion n'ont pas les niveaux de température suffisants pour une bonne combustion de l'huile végétale (c'est-à-dire une température > 500°C), le moteur reste alimenté en gasoil. Dès que la température des chambres est suffisante le système de bascule pilote l'électrovanne qui alimente alors le moteur par le circuit d'huile végétale. En cas de bicarburation manuelle, le basculement est piloté par l'action de l'utilisateur sur la vanne manuelle. Avant l'arrêt, le moteur est réalimenté en

gasoil afin de purger l'ensemble du circuit d'alimentation en carburant pour pouvoir le nettoyer.

Le pilotage du système de bascule peut s'effectuer en contrôlant soit la température d'échappement soit la charge du moteur. Dans le cas où l'alimentation en gasoil est assurée par une pompe mécanique (pas alimentation électrique), il n'est pas possible d'arrêter cette pompe lorsque le moteur est alimenté par le circuit à huile végétale. Pour éviter que cette pompe en fonctionnant fasse augmenter la pression dans le circuit d'alimentation au gasoil, il est nécessaire de créer un by-pass sur ce circuit d'alimentation à l'aide d'une vanne pour que le combustible gasoil tourne en boucle (Figure 35).

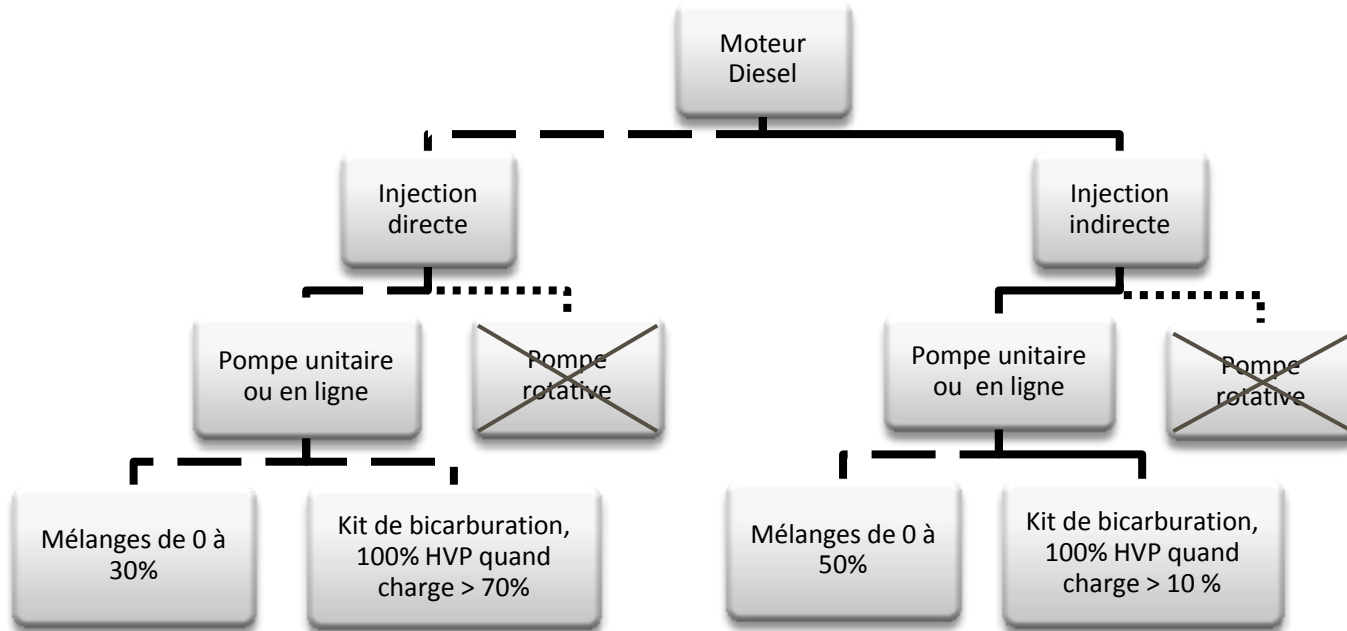
5.1.3 La transestérification

La transestérification est une transformation chimique des HVB. Elle permet de modifier les triglycérides de l'huile par réaction avec de l'alcool, principalement du méthanol (sous-produit de l'industrie pétrolière) pour produire des mono-esters, plus couramment appelés biodiesel, qui sont moins visqueux et plus volatils que les triglycérides et ont des propriétés physico-chimiques proches de celle du gasoil. L'éthanol pourrait également être utilisé mais les procédés de purification du biodiesel obtenu sont alors beaucoup plus délicats à mener à bien. La réaction de transestérification est obtenue à l'aide de catalyseurs homogènes basiques ou acides ou de catalyseurs solides en catalyse hétérogène. La filière biodiesel fournit un excellent carburant pour tout type de moteur Diesel, y compris ceux des véhicules. La technologie est largement maîtrisée mais vu l'investissement de départ et le fait qu'il est nécessaire de bien purifier le produit, celle-ci n'est rentable qu'à grande échelle. La plupart des unités construites à ce jour sont d'une capacité de l'ordre de 100 000 tonnes par an [8]. Les procédés d'élaboration sont coûteux et les coproduits (principalement la glycérine) ne trouvent pas les débouchés qui permettraient de réduire les coûts [9].

5.2 Guide rapide de sélection des solutions techniques en fonction du moteur

Le choix du moteur est crucial pour pouvoir utiliser des huiles végétales pures comme carburant. En fonction des conditions climatiques, du lieu où va être installé le moteur et du mode de fonctionnement (taux de charge, etc.) il convient de suivre un certain nombre de recommandations pour garantir un usage durable du moteur. Le diagramme de la figure 25 permet de sélectionner le type de moteur en fonction des conditions et du mode d'utilisation envisagé.

Guide technique pour l'utilisation d'huile végétale
carburant dans les moteurs diesel stationnaires



- Recommandé
- Pas de solution HVP
- Possible, bien respecter taux de mélange ou taux de charge sur le long terme

Erreur !

Source du renvoi introuvable. **Figure 25** : diagramme décisionnel pour l'adoption d'une solution HVC en fonction du type de moteur

5.3 Conclusion sur les solutions techniques pour fonctionner à l'HVP

Des trois options, la solution de mélange gasoil/huile peut être intéressante comme première solution à tester si les quantités d'huile disponibles sont faibles, et elle est la seule possible sur certains moteurs.

L'option bicarburant est celle qui est recommandée pour des applications avec des moteurs stationnaires, puisqu'elle permet de fonctionner avec des taux d'intégration d'huile de 0 à 100%. L'investissement pour concevoir un kit de bicarburant n'est pas très élevé (entre 200 et 1000 €, soit entre 130 000 et 660 000 CFA) et son installation est relativement facile (cf. chap. 6). Cependant il convient de toujours s'assurer, dans le cas d'une injection directe, que le moteur fonctionne avec de l'huile végétale uniquement lorsque le taux de charge du moteur est supérieur à 70% et que la pompe d'injection est de type « en ligne ». Dans le cas d'une injection indirecte et de pompe en ligne, le kit de bicarburant peut fonctionner à partir d'un taux de charge de 10%.

La production de biodiesel est complexe et n'est rentable qu'à grande échelle, mais le carburant obtenu présente l'avantage de pouvoir être utilisé dans tout type de moteur diesel, notamment ceux dédiés au transport. L'investissement pour une installation de production de biodiesel étant élevé, il convient de s'assurer que les approvisionnements en huile végétale, mais également en alcool, sont sécurisés.

5.4 Références bibliographiques :

- [1] Banapurmath, N.R., et al., *Combustion characteristics of a 4-stroke CI engine operated on Honge oil, Neem and Rice Bran oils when directly injected and dual fuelled with producer gas induction*. *Renewable Energy*, 2009. **34**(7): p. 1877-1884.
- [2] Forson, F.K., E.K. Oduro, and E. Hammond-Donkoh, *Performance of jatropha oil blends in a diesel engine*. *Renewable Energy*, 2004. **29**(7): p. 1135-1145.
- [3] Sirisomboon, P. and P. Kitchaiya, *Physical properties of Jatropha curcas L. kernels after heat treatments*. *Biosystems Engineering*, 2009. **102**(2): p. 244-250.
- [4] Sirisomboon, P., et al., *Physical and mechanical properties of Jatropha curcas L. fruits, nuts and kernels*. *Biosystems Engineering*, 2007. **97**(2): p. 201-207.
- [5] Sidibé, S.S., et al., *Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. **14**(9): p. 2748-2759.

- [6] Vaïtilingom, G., *Extraction, conditionnement et utilisation des Huiles Végétales Pures Carburant*, in *Conférence Internationale Biocarburants de Ouagadougou*. 2007: Enjeux et perspectives des biocarburants pour l'Afrique. p. 52.
- [7] Rousset, P., *Guide pratique pour une utilisation énergétique des huiles végétales*, ed. Cirad. 2008. 288.
- [8] Ballerini, D. and N. Alazard-Toux, *Les biocarburants : état des lieux, perspectives et enjeux du développement*. Technip ed. 2006, France: IFP. 348.
- [9] Ballerini, D. *Les biocarburants : Répondre aux défis énergétiques et environnementaux des transports*. Technip ed. 2011, France, 381p.

6 Dimensionnement d'un kit de bicarburation

Dans le chapitre précédent, il a été explicité l'intérêt de faire fonctionner les moteurs diesel en bicarburation, qui permet d'utiliser 0 ou 100% d'huile végétale comme carburant. Dans ce chapitre, les modalités de dimensionnement d'un kit permettant le fonctionnement en bicarburation sont présentées.

Le rôle du circuit d'alimentation est d'amener à chaque cylindre du moteur une quantité déterminée de carburant parfaitement filtré, parfaitement dosé, sous haute pression, à un moment précis et ce, quelles que soient les conditions d'utilisations du moteur[2]. Le choix de chaque matériel constituant le kit de bicarburation est donc primordial afin de bien remplir cette fonction avec un combustible moins adapté aux exigences des moteurs actuels sous peine de remettre en cause la longévité de l'installation.

6.1 Les équipements du kit de bicarburation

La réussite de la bicarburation dépend du choix des équipements qui doivent idéalement être choisis par une personne qui a une bonne connaissance du moteur (motoriste). Le matériel nécessaire pour faire un montage de bicarburation (Figure 26) est le suivant :

- un second réservoir de carburant
- un ou plusieurs filtres montés en série
- une pompe électrique d'alimentation ou de gavage
- un réchauffeur d'huile végétale (le cas échéant)
- des vannes trois voies (manuelle ou électrique)
- des durites pour la circulation du carburant.
- Le système de commande du basculement (manuel ou électronique).

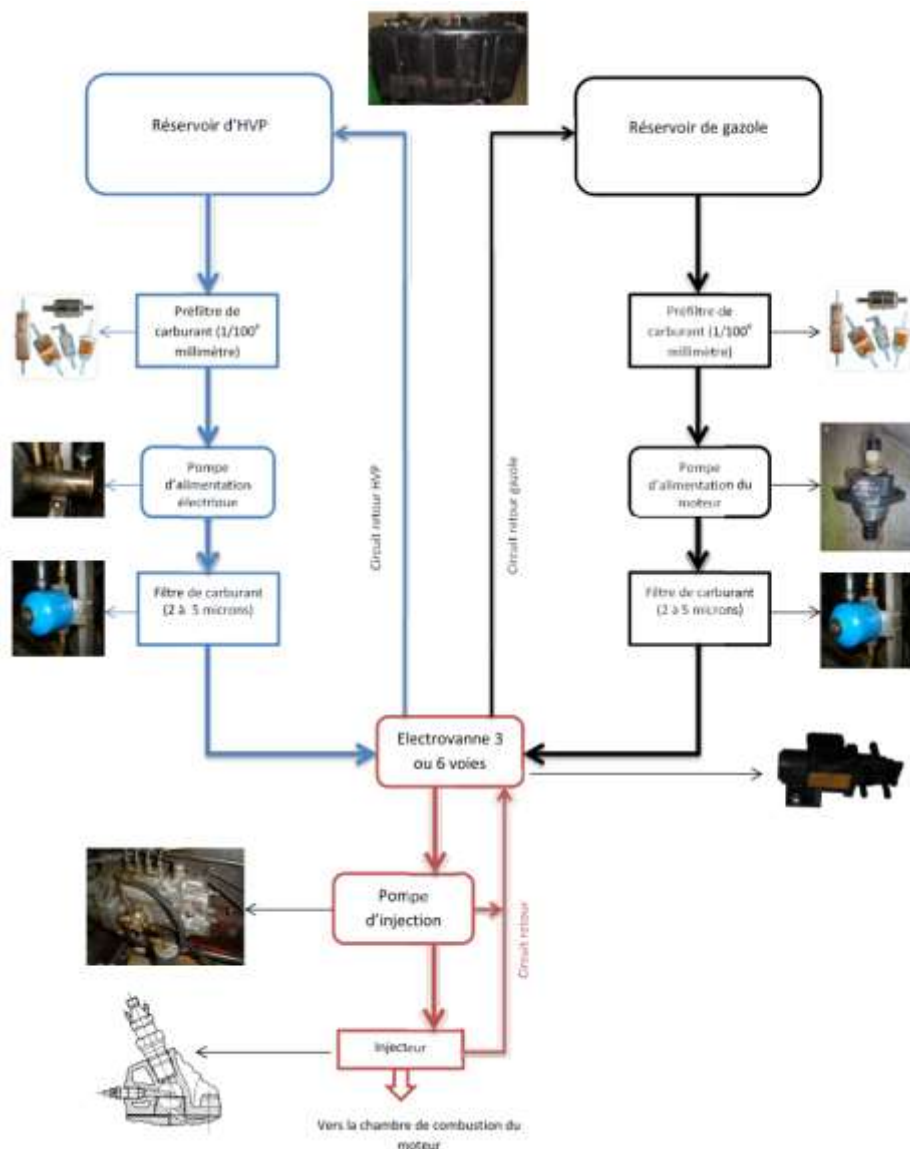


Figure 26 : schéma de principe d'un kit de bicarburant

6.1.1 Le réservoir d'huile végétale

Le réservoir de carburant est destiné à recevoir et à stocker l'huile végétale pure. Il peut être réalisé en plastique ou en tôle d'inox pour éviter la corrosion. Le réservoir doit être dimensionné pour pouvoir contenir la consommation journalière du moteur, en pratique du même volume que le réservoir de gazoil d'origine. Le réservoir doit être fixé sur le moteur de

manière à ce qu'il soit bien accessible pour les opérations de remplissage et de vidange. Il est préférable, si possible, de mettre le réservoir en hauteur pour faciliter l'écoulement de l'huile végétale par gravité.

6.1.2 Le réchauffeur d'huile végétale

L'une des principales caractéristiques différenciant l'huile végétale du gasoil est sa viscosité. La viscosité caractérise la capacité d'un fluide à s'écouler. La viscosité des HVP est plus élevée que celle du gasoil. Les HVP couramment utilisées ont en moyenne une viscosité 5 à 15 fois plus élevée que celle du gasoil. Pour compenser son manque de fluidité, il est nécessaire de prévoir un système de préchauffage de l'huile utilisant si possible la chaleur du moteur. Il est possible de faire passer la durite tout près ou au-dessus du pot d'échappement, le plus efficace étant de coller un tube en métal directement sur le pot (Figure 27). Sur les groupes électrogènes, il est possible d'installer des réchauffeurs électriques (résistances électriques chauffantes) ou un réchauffeur hydraulique (réchauffeur à plaque, ...). L'usage du réchauffeur d'huile végétale dans le circuit n'est pas systématique. Son utilisation dépend des conditions climatiques de la localité, et de la nature de l'huile utilisée.



Figure 27 : montage d'un réchauffeur d'huile végétale (©William FOTSEU, 2010)

6.1.3 Les filtres

Le rôle d'un filtre à carburant est de protéger le système d'alimentation des moteurs (la pompe d'alimentation, la pompe d'injection et l'injecteur). Il

élimine les impuretés présentes dans le carburant. Les filtres peuvent se classer en deux catégories.

Le préfiltre

Il est placé en aspiration entre le réservoir à carburant et la pompe d'alimentation du moteur. Son rôle est d'arrêter les impuretés de l'ordre de 1/100e de millimètre et d'arrêter l'eau contenue dans le carburant par décantation. Il est préférable de choisir un modèle de préfiltre avec une coque transparente afin de visuellement pouvoir observer le degré d'encrassement (Figure 28).



Figure 28 : exemples de préfiltres de carburant
(<http://ais.actstar.be/wp-content/uploads/2012/10/PreFilters.gif>)

Ces préfiltres doivent régulièrement être changés, il est recommandé de prévoir une réserve de ce type de consommable. Afin d'éviter de provoquer d'additionnelles pertes de charge dans le circuit d'alimentation il faut privilégier les préfiltres avec des embouts 1) droits (sans courbes ou angles droit) et 2) de diamètre intérieur proche de celui des durites.

Le filtre principal

Monter en série entre la pompe d'alimentation et la pompe d'injection, son rôle est d'éliminer les impuretés fines (2 à 5 microns) contenues dans le carburant afin de protéger la pompe d'injection et l'injecteur), si l'on ne veut pas colmater très rapidement ce filtre. **D'où l'intérêt d'avoir une huile végétale pure bien filtrée (5 microns maximum)**. Généralement le filtre utilisé est un filtre à cartouche. Classiquement on utilise des filtres prévus pour les moteurs de camion ou des tracteurs (Figure 29).

Remarque : un filtre placé en aspiration engendre une baisse de débit minorée de 40 à 50% par rapport au même filtre placé en refoulement[3].



Figure 29 : exemple de filtre à cartouche (©Valentin LEFEBVRE, 2012)

6.1.4 La pompe d'alimentation

La pompe d'alimentation encore appelée pompe de gavage ou de pré-gavage est située entre le filtre à carburant et l'électrovanne. Son rôle est de vaincre les pertes de charge du circuit afin d'assurer l'alimentation sous une légère pression de la pompe d'injection.

Elle est constituée par une membrane et deux clapets : un clapet d'aspiration et un clapet de refoulement. Elle est commandée électriquement par la batterie (12 ou 24 V continu).

Selon les modèles, il existe deux types de pompe :

- refoulantes : à placer le plus près possible du réservoir avec un pré filtre,
- aspirantes : à placer après le filtre à gasoil afin d'éviter le fonctionnement systématique de la pompe d'alimentation du circuit d'huile végétale ainsi que la décharge accidentelle de la batterie, un interrupteur doit être installé à la borne positive sur le circuit électrique et alimenté seulement lorsque le moteur fonctionne à l'huile végétale.

La pompe doit être choisie pour délivrer un débit proche, plutôt supérieur (10 à 20%) de celui de la pompe d'alimentation du moteur (cf. doc technique du moteur).

6.1.5 Les vannes

Les vannes servent à réguler l'alimentation de la pompe d'injection en carburant par l'un ou l'autre des réservoirs (réservoirs de gasoil ou d'huile végétale). Elles peuvent être à trois voies ou à deux voies selon le mode de basculement et le matériel disponible pour la conception du kit.

Dans un moteur diesel, le système d'alimentation de la pompe d'injection amène une quantité de carburant légèrement supérieure à celle qui est injectée à chaque cycle, pour garantir un jet homogène. Un circuit de retour du surplus de carburant vers le réservoir est donc prévu. Quand un deuxième circuit d'alimentation est ajouté pour l'huile végétale, il y a deux solutions pour gérer ce retour de carburant :

- soit prévoir un circuit retour spécifique pour l'huile végétale vers le réservoir d'huile végétale. Le kit de bicarburant comprend alors deux vannes trois voies : une pour basculer l'alimentation de la pompe d'injection du circuit gasoil vers le circuit huile, et l'autre pour basculer le retour du carburant du circuit retour gasoil vers le circuit retour huile végétale.
- soit garder un seul circuit retour. Celui-ci est branché sur le réservoir d'huile végétale y compris quand le moteur fonctionne au gasoil (l'introduction de gasoil dans l'huile végétale n'est pas gênante). Il n'y a alors plus besoin de bascule sur le circuit retour et une seule vanne trois voies sera nécessaire pour le kit.

Le diamètre intérieur des voies d'entrées et sorties doivent être choisi de manière à ne pas occasionner des pertes de charge supplémentaires dans le circuit d'alimentation du moteur. Pour limiter le temps de purge, la vanne 3 voies doit être installée le plus près possible de la pompe d'injection.

Deux types de vanne peuvent être utilisés pour l'alimentation de la pompe d'injection en carburant selon que le kit de bicarburant est manuel ou automatique.

Vanne manuelle

Une vanne manuelle est constituée d'une vanne trois voies (une entrée et deux sorties) ou de deux vannes deux voies connectées sur un tube en T. Les vannes manuelles sont commandées par action de l'opérateur une fois que les conditions de basculement sont réunies (viscosité de l'huile et température de combustion complète de l'huile dans la chambre de combustion). L'installation de vannes manuelles est simple et moins onéreuse à mettre en place (50 000 à 100 000 F CFA) que les électrovannes. Mais leur exploitation est assez difficile puisqu'elle dépend de l'opérateur.

Electrovanne

Une électrovanne encore appelée électrovalve est une vanne commandée électriquement. Selon la technologie et le fabricant, elle peut être à trois voies ou à six voies. La vanne six voies est un assemblage de deux électrovannes trois voies, tel que l'une se ferme quand l'autre s'ouvre. L'avantage de la vanne six voies est de gérer à la fois le basculement des deux circuits aller et retour du carburant.

L'électrovanne est montée entre le filtre à carburant et la pompe d'injection du moteur. Elle est généralement alimentée par du courant continu de 12 ou 24 V. Une électrovanne est composée de deux parties :

- une tête magnétique constituée principalement d'une bobine, d'un tube, d'une culasse, d'une bague de déphasage, et de ressort(s).
- un corps, comprenant des orifices de raccordement, obturés par clapet, une membrane, un piston, etc. selon le type de technologie employée.

L'ouverture et la fermeture de l'électrovanne est liée à la position du noyau mobile qui est déplacé sous l'effet du champ magnétique engendré par la mise sous tension de la bobine par l'intermédiaire d'un contact électrique ou d'un automate.

Une électrovanne est plus onéreuse à mettre en place que des vannes manuelles, mais elle présente de nombreux avantages dans son exploitation : le basculement se fait seul et selon des informations précises de capteurs (température, puissance, courant...) en évitant ainsi les erreurs humaines éventuelles

6.1.6 Les durites

Une durite est un tuyau rigide ou souple, en caoutchouc renforcé par de la toile à l'intérieur, ou par une tresse de métal à l'extérieur. Elle sert à transporter le carburant du réservoir vers la pompe d'injection en passant successivement par le filtre, la pompe d'alimentation et les vannes 3 voies.

Dans le circuit d'alimentation du moteur, elle doit être la plus courte possible afin de diminuer les pertes de charge dans le circuit. L'huile végétale étant détergente et acide, la durite doit être choisie en conséquence.

6.1.7 Commande du kit bicarburation

Il est important de faire un bon choix des équipements pour la réalisation du kit de bicarburation. Le bon fonctionnement du kit en dépend. Selon le mode de fonctionnement, le basculement peut être manuel ou automatique.

6.1.7.1 Basculement manuel

C'est un opérateur qui, suivant une température (échappement et huile végétale) ou une puissance de consigne, actionne les vannes (manuelles) pour que le moteur bascule de l'alimentation gasoil à l'alimentation huile végétale (et réciproquement). Dans les climats froids, ou lorsque l'huile utilisée à une basse température de solidification (par exemple l'huile de palme) il est indispensable de réchauffer l'huile végétale pour la rendre plus fluide. Il faut alors aussi définir une consigne de température de l'huile pour le basculement et mesurer la température de l'huile végétale dans le réservoir à l'aide d'un thermomètre ou d'un thermocouple :

- **Thermomètre**

Le thermomètre mesure la température du milieu où il est plongé. Il existe plusieurs types de thermomètre :

- thermomètres à aiguille (
- Figure 30). Ils ont un cadran gradué sur lequel la température est lue.
- thermomètres électroniques sur lesquels la température s'affiche directement sous forme d'un nombre.

Le thermomètre à aiguille peut être monté sur la tubulure d'échappement des gaz du moteur et présente l'avantage d'être plus robuste et simple à utiliser. Le choix du thermomètre à aiguille dépend de la plage de température à mesurer. Il est recommandé de choisir un thermomètre dont la plage de mesure varie de 0 à 700°C. La plupart des moteurs diesel ont une température d'échappement des gaz qui varie en 100 et 600°C en fonction de la charge.



Figure 30 : exemple de thermomètre à aiguille (directindustry.fr)

- **Thermocouple avec afficheur**

Un thermocouple avec afficheur (Figure 31) est composé de deux parties : la sonde thermocouple qui est placée dans la canalisation d'échappement, le plus près possible de la culasse et l'afficheur qui permet la visualisation numérique de la température mesurée par la sonde.

Un thermocouple est composé de deux métaux de natures différentes reliés à une extrémité. Quand la jonction des métaux est soumise à des variations de température, une tension dépendante de la température est produite, qui peut

être ensuite transcrite en température. Les alliages de thermocouple sont généralement disponibles en fils. Il existe différents types de thermocouples (e.g. K, T, N, J, etc.), correspondant chacun à une gamme de température ou à une gamme de précision. Dans le cas de l'utilisation du thermocouple dans le moteur diesel, un thermocouple de type K (-270°C à +1200°C) doit être utilisé. L'avantage de l'utilisation du thermocouple avec afficheur est sa grande précision et sa mobilité. Son inconvénient principal est de fonctionner avec une batterie (pile) pour l'affichage de la mesure.



Figure 31 : exemple de thermocouple avec afficheur (omega.fr)

- **Mesure de la puissance de consigne à l'aide d'un transformateur de courant (TC)**

Le transformateur de courant mesure le courant alternatif à fréquence industrielle (Figure 32). Il est en général connecté à un ampèremètre, mais il peut également être branché à un wattmètre ou une centrale d'acquisition de données. La caractéristique la plus importante d'un transformateur de courant est donc son rapport de transformation, exprimé par exemple sous la forme 400 A/1 A (transforme 400A à l'entrée en 1A à la lecture).



Figure 32: photo d'un transformateur de courant (Wikipedia.org)

6.1.7.2 Basculement automatique

Les équipements nécessaires pour le basculement automatique du kit de bicarburation sont : une ou des électrovannes, un capteur (thermocouple, TC, thermocontact, ...) et un automate (centrale d'acquisition de donnée, contacteur, ...). Le basculement automatique de l'électrovanne est effectué lorsque la consigne de température d'échappement ou de puissance du moteur (ainsi que la consigne de température de l'huile végétale le cas échéant) sont atteintes. Cette consigne est programmée dans l'automate. La sonde de température placée dans la tubulure des gaz d'échappement du moteur ou le transformateur de courant donnent l'information à l'automate sur le niveau de température des gaz ou sur la puissance du moteur respectivement. Cette information est comparée avec la consigne et lorsque les conditions définies sont atteintes, l'automate envoie une tension vers l'électrovanne qui bascule le fonctionnement du circuit d'alimentation.

Dans certain cas (climat froid ou huile végétale à basse température de solidification) il est obligatoire de d'ajouter la consigne de température de l'huile à travers un thermocouple plongé dans le réservoir d'huile.

▪ **Thermocouple**

Le thermocouple est placé dans la zone où on veut mesurer la température. Il est connecté à un automate. Les critères suivants sont pris en compte dans leur sélection:

- plage de mesure de températures
- résistance chimique du thermocouple ou de la gaine
- résistance aux abrasions et vibrations
- conditions requises d'installation (compatibilité avec les équipements existants).

Il est recommandé d'utiliser un thermocouple de type K (plage de température -270°C à +1200°C). Les matériaux constituant ce type de thermocouple résistent bien à des fortes températures.

▪ **Thermo contact (bilame)**

Pour mesurer la température des gaz d'échappement, et envoyer l'information à l'automate, un thermocouple tel que décrit plus haut, ou un thermocontact peuvent être utilisés. Un thermocontact (Figure 33) est un interrupteur qui se ferme lorsqu'un seuil de température réglable est atteint. Le bilame se dilate lorsqu'il est mis en contact avec une surface chaude. Lorsque la température de déclenchement est atteinte, le composant ne laisse plus passer le courant. Or, c'est l'inverse qui serait utile pour le pilotage, c'est-à-dire que la température de déclenchement laisse passer le courant pour actionner le

circuit HVP. Pour pallier à cette difficulté, un relais sur les bornes NC (normalement fermé) du thermocontact est utilisé et sert d'inverseur. Ainsi, lorsque les conditions de basculement sont réunies, le thermocontact s'ouvre, le circuit de commande n'est plus alimenté, le relais revient à sa position de repos, ce qui ferme le circuit de puissance et donc actionne le circuit HVP.

Le thermocontact est placé en contact direct avec la tubulure d'échappement du moteur. Le réglage de la température de déclenchement est réalisé par l'intermédiaire d'une tige qui règle la distance initiale entre les lames.



Figure 33 : photo du thermocontact (©Valentin LEFEBVRE, 2012)

▪ **Automate :**

Un automate est un dispositif électronique programmable destiné à la commande de processus (industriels) par un traitement séquentiel. Il envoie des ordres vers les pré-actionneurs (partie opérative) à partir de données d'entrées (capteurs), de consignes et d'un programme informatique. Lorsque le basculement d'un carburant à un autre est automatisé, il est nécessaire d'utiliser un automate qui permet de déclencher l'électrovanne lorsque la température ou la puissance de consigne est atteinte. L'automate est l'équipement le plus cher dans le kit de bicarburation. Son installation demande une excellente connaissance de l'instrumentation et la maîtrise des capteurs.

6.2 Détermination du point de basculement

Dans le cas des moteurs à injection directe, il est important de connaître le taux de charge et donc la température des gaz d'échappement à partir desquels la combustion des HVP est complète dans les chambres de combustion. Il n'existe pas de taux de charge (et donc de température associée) universel à partir duquel la combustion des HVP est complète pour tout type de moteur. Idéalement il faut déterminer le taux de charge de basculement pour chaque moteur. Cela suppose de disposer d'un banc de charge qui permet de faire fonctionner le moteur avec 100% de HVP à

des taux de charge croissants (de 10% à 100%) et de mesurer la teneur en carburant imbrûlé dans les gaz d'échappement pour chaque taux de charge. Le taux de charge (ou la température des gaz d'échappement associée) à partir duquel la combustion des HVP est complète correspond au taux de charge (ou à la température d'échappement) auquel il convient de faire basculer le kit de bicarburant (gasoil=>HVP).

Il est très compliqué de disposer d'un banc de charge et d'équipements pour analyser les gaz d'échappements. Dans la pratique, plusieurs options sont possibles pour déterminer la valeur de la consigne de basculement, mais dans tous les cas il est nécessaire de connaître la puissance du moteur à équiper avec le kit de bicarburant, et de connecter le moteur à un (des) équipement(s) permettant de le faire fonctionner à différents taux de charge.

Si le moteur est couplé à un alternateur (groupe électrogène dont la puissance apparente est définie en kVA) les taux de charge peuvent être déterminés en utilisant un multimètre (ampèremètre/ voltmètre) branché au circuit électrique à la sortie de l'alternateur. La puissance délivrée est calculée en multipliant la tension par le courant ($P=U*I$) pour chaque phase. La puissance totale délivrée est la somme des puissances mesurées pour chaque phase.

Dans ce cas, le basculement du kit pour passer à une alimentation à 100% HVP peut se faire en mesurant en continu soit :

- la puissance délivrée (à l'aide d'un transformateur de courant),
- la température des gaz d'échappements (thermocouple).

Dans le premier cas, il convient de faire basculer le kit (électrovanne ou vanne manuelle) pour passer à une alimentation à 100% HVP dès que la puissance délivrée est supérieure au seuil requis par le moteur pendant quelques minutes, le temps que la température monte (ce seuil est de 70% pour les moteurs à injection directe et 10% pour les moteurs à injection indirecte).

Dans le second cas le basculement doit être fait lorsque la température des gaz d'échappement est supérieure à celle obtenue lorsque le moteur tourne à 70% de la puissance apparente du groupe.

Si le moteur est couplé à une machine mécanique (force motrice) il est nécessaire de connaître la puissance mécanique du moteur (kW ou CV) et d'identifier un équipement qui consomme une puissance proche de 70% de la puissance du moteur. En connectant cet équipement au moteur et en mesurant la température des gaz d'échappement, il est possible de déterminer la température des gaz d'échappement de consigne à laquelle il convient de faire basculer le kit (électrovanne ou vanne manuelle) pour passer à une alimentation à 100% de HVP.

Bien souvent, les utilisateurs d'huiles végétales ne se donnent pas la peine de faire ce travail et classiquement considèrent que le basculement peut être fait quand la température des gaz d'échappement atteint 500°C (température classique de combustion des huiles végétales).

6.3 Montage du kit de bicarburation

La conception du kit de bicarburation commence par la mise en place d'un cahier des charges. Ce cahier des charges prend en compte le principe de fonctionnement du kit de bicarburation et les équipements disponibles. Pour la pose du kit de bicarburation il faut compter en termes de temps:

- environ 20 h pour préparer toutes les pièces, les supports, les connections, etc.,
- deux grosses journées à deux pour tout installer proprement,
- 2 à 3 h pour tout vérifier et mettre en route, soit au total environ une semaine de travail.

6.3.1 Préparation du montage du kit

Les différentes étapes de préparation du montage sont les suivantes :

- rédiger un cahier de charge sur le fonctionnement du kit de bicarburation. Ce cahier des charges doit permettre d'explicitier exactement le mode de basculement choisi (manuel ou automatique) ainsi que les différentes consignes à respecter (viscosité ou température de l'huile, charge de basculement, température des gaz d'échappement, etc.).
- établir un schéma technique de montage du kit de bicarburation avec des notes techniques sur le schéma.
- s'assurer que tout le matériel est disponible de même que l'outillage nécessaire pour monter le kit de bicarburation sur le moteur.
- et enfin, préparer le matériel, confectionner le support et raccorder le matériel.

6.3.2 Installation du kit de bicarburation sur le moteur

L'installation d'un kit de bicarburation conçu par 2iE est utilisée comme exemple. La partie commande de ce kit a été complètement conçue dans le laboratoire biomasse énergie et biocarburants du 2iE (LBEB). Sa mise en œuvre et son installation sont relativement simples. Ce kit a été conçu pour travailler avec de l'huile de Jatropha au Burkina Faso, ou les conditions

climatiques (températures extérieures) garantissent que l'huile est toujours suffisamment fluide. Le kit n'a donc pas été équipé d'un système de contrôle de la température de l'huile végétale. Il fonctionne sur un moteur diesel à injection directe de 8 kW.

6.3.2.1 Présentation du kit de bicarburation

Le kit de bicarburation comprend deux parties : un circuit de commande (automate) et un circuit de puissance (qui gère les éléments à piloter : électrovannes, pompes, réchauffeur etc.). Certains éléments du kit s'adaptent sur un support, d'autres sont fixés directement sur le moteur (cf. photo Figure 34).

Il comprend :

- le réservoir qui sert à stocker le carburant (HVP)
- le thermocontact qui donne l'information au boîtier de commande que la température des gaz d'échappement a atteint la consigne.
- le boîtier de commande ou l'automate qui sert à commander les électrovannes en fonction des consignes programmées.
- 3 électrovannes qui servent au basculement gasoil/huile végétale et réciproquement et un by-pass pour s'assurer que la pompe d'alimentation mécanique est toujours alimentée en carburant.
- Le kit de bicarburation 2iE fonctionne grâce à une alimentation en courant continu de 12V pour l'alimentation des électrovannes et du boîtier de commande. Par conséquent, il est nécessaire qu'une batterie ou une alimentation stabilisée se trouve à proximité du moteur à équiper.

6.3.2.2 Schéma de principe

Selon la technologie du moteur, les conditions de basculement ne sont pas les mêmes. Les réglages à effectuer pour le bon fonctionnement de la bicarburation dépendent du moteur considéré.

Avant d'installer un kit de bicarburation sur un moteur diesel à injection directe, il est nécessaire de vérifier que la charge moyenne sur la durée journalière de fonctionnement est supérieure au seuil (typiquement à 70%). Il n'est en effet pas possible d'installer un kit sur un moteur continuellement sous exploité.

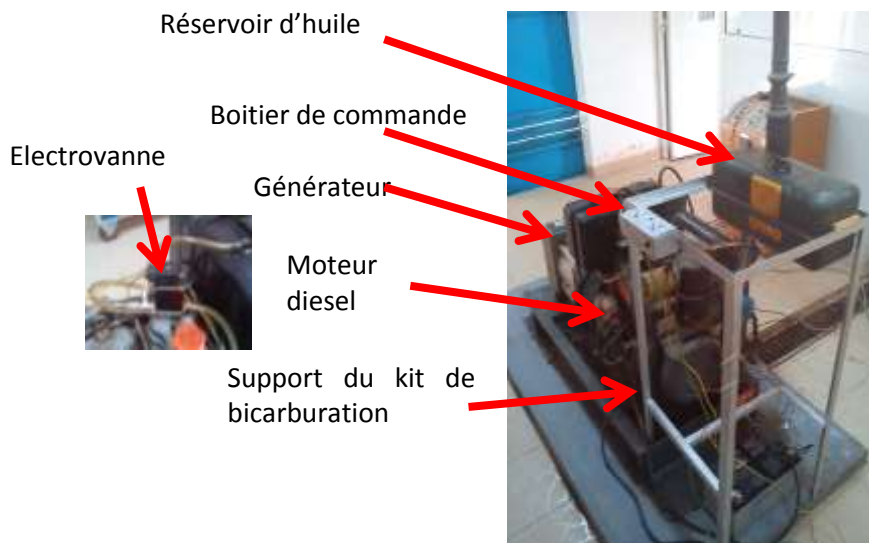


Figure 34 : vue d'ensemble du kit de bicarburation sur le moteur (©Sayon SIDIBE, 2012)

Des photos de chaque partie de l'installation sont présentées par la suite pour permettre d'illustrer le montage du kit mais celles-ci ne sont qu'un exemple : les composants peuvent être placés à d'autres endroits selon l'encombrement et la géométrie du moteur à équiper, à partir du moment où le circuit de principe est respecté. Un schéma de principe est donné en Figure 35.

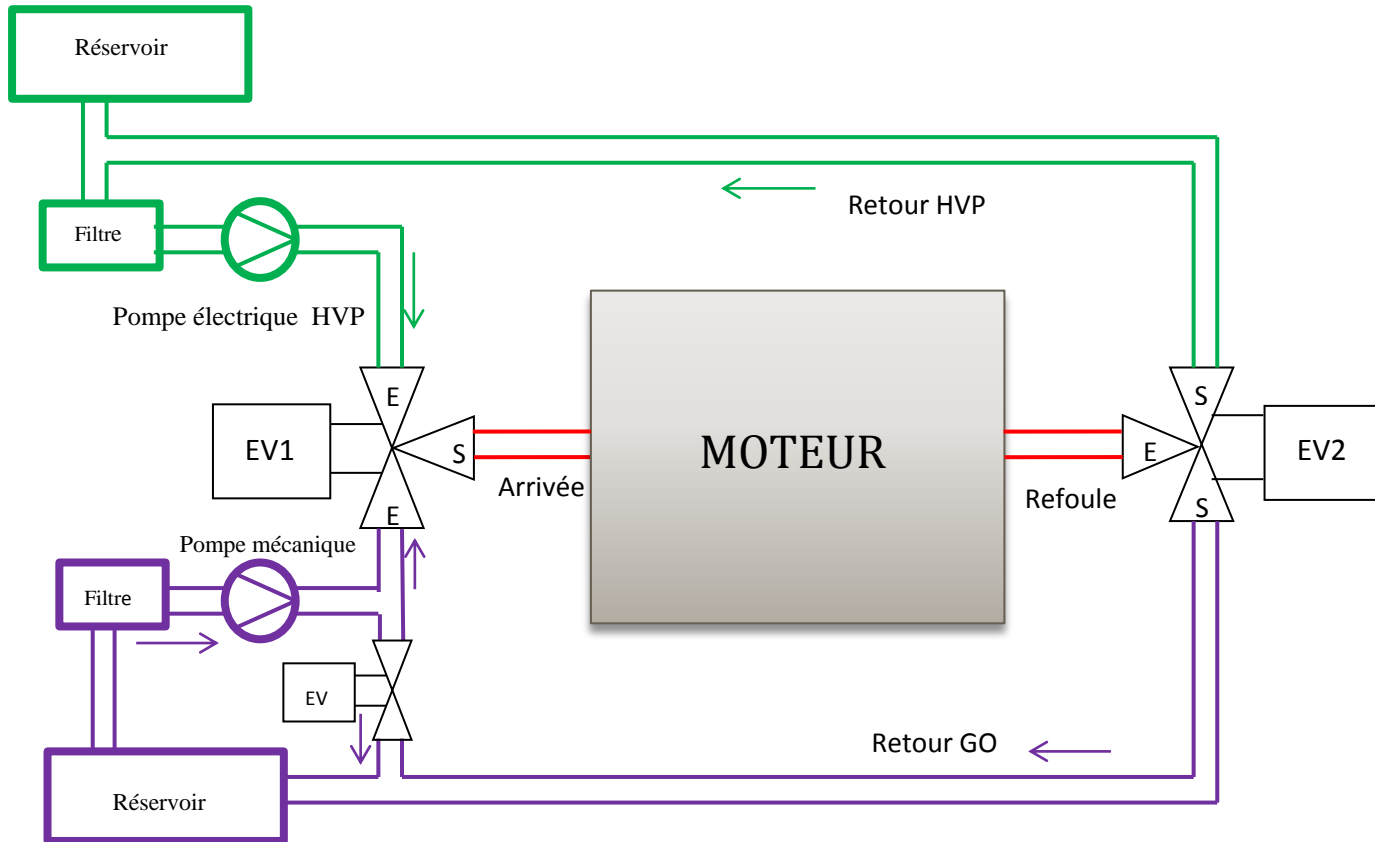


Figure 35 : schéma de principe d'un kit de bicarburant conçu à 2iE (©Valentin LEFEBVRE, 2012)

6.3.2.3 Boitier de commande

Le boitier de commande est la partie maîtresse du kit de bicarburation (Figure 36). Le boitier permet de gérer le choix du carburant de manière manuelle ou automatique en fonction de la consigne de la température des gaz d'échappement.

Il est composé de :

- un clavier d'interface qui permet à l'utilisateur de gérer et de contrôler le mode de fonctionnement du kit de bicarburation.
- une carte électronique qui est le cœur du boitier de commande.
- un bornier qui permet le raccordement des câbles de connexion venant du thermocontact, des électrovannes et de la batterie (alimentation 12V du boitier).

La réalisation du boitier de commande est effectuée par un électronicien suivant le schéma technique de la Figure 37. Le boitier de commande est fixé sur le support métallique fixé sur le châssis du moteur (Figure 36). Il est connecté aux éléments électroniques (capteurs, électrovannes, pompes...) par des câbles électriques.

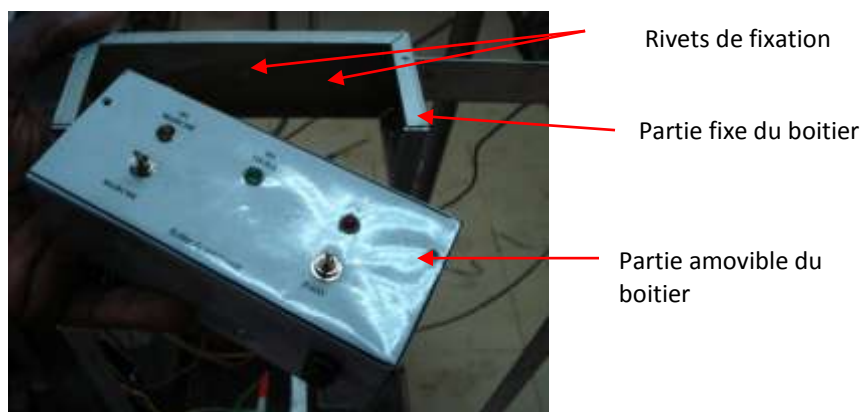


Figure 36 : boitier de commande du kit de bicarburation 2iE (©Valentin LEFEBVRE, 2012)

NB : Il est très important de bien visser le boîtier. En effet, la partie amovible du boîtier est relié à la masse et si le courant ne passe pas entre la partie mobile et la partie fixe, la pompe à HVP ne fonctionne pas.

Guide technique pour l'utilisation d'huile végétale
carburant dans les moteurs diesel stationnaires

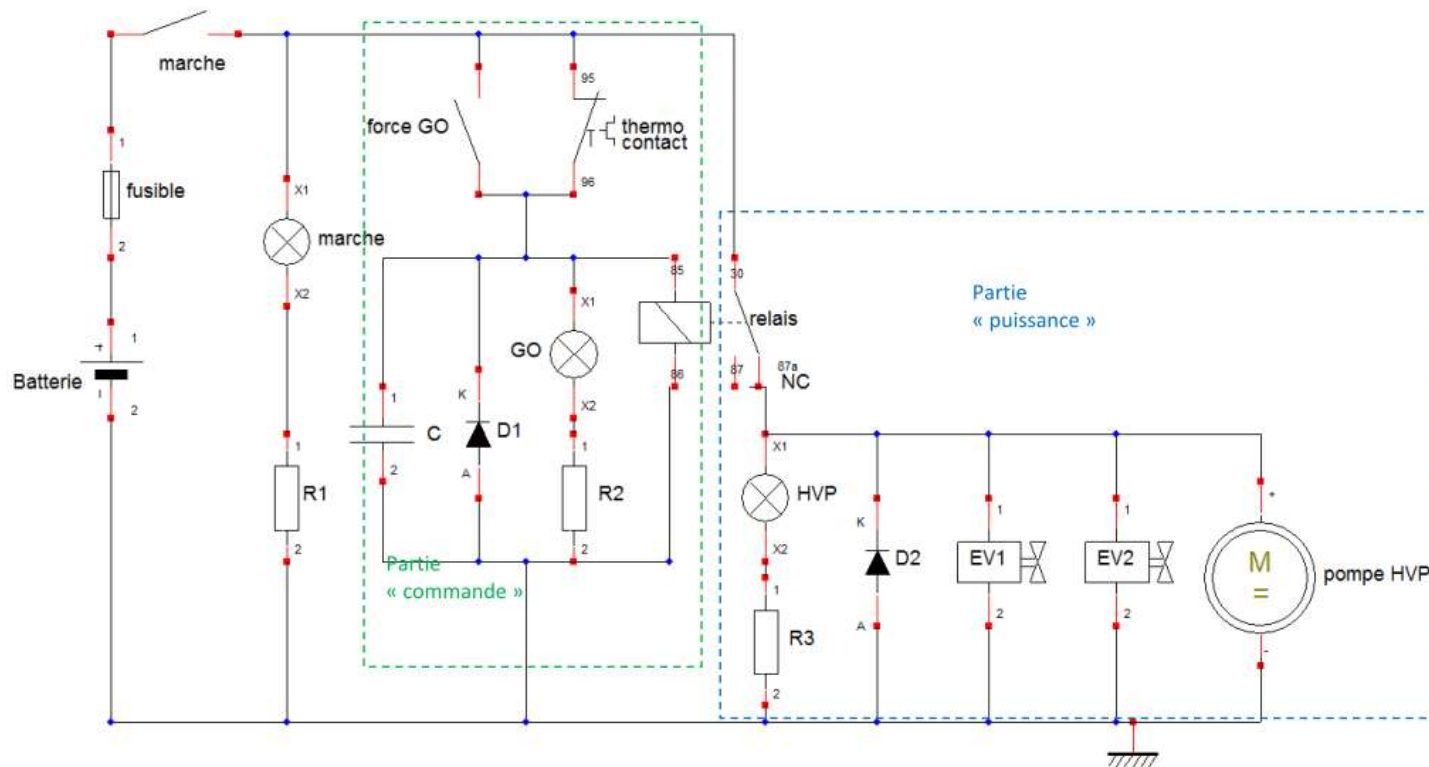


Figure 37 : schéma électrique du boîtier de commande (©Valentin LEFEBVRE, 2012)

6.3.2.4 Installation du filtre à carburant et de la pompe d'alimentation

Le filtre est monté sur le support du moteur, sous le réservoir de carburant (Figure 38). Il est connecté au réservoir par le biais de la durite. Les deux embouts de connexion doivent être bien serrés par des colliers de serrage de durite.

La pompe d'alimentation est fixée sur le support, sous du filtre à carburant et connectée à ce dernier par une durite.

La connexion électrique de la pompe d'alimentation est reliée au boîtier de commande, sur le bornier prévu à cet effet.

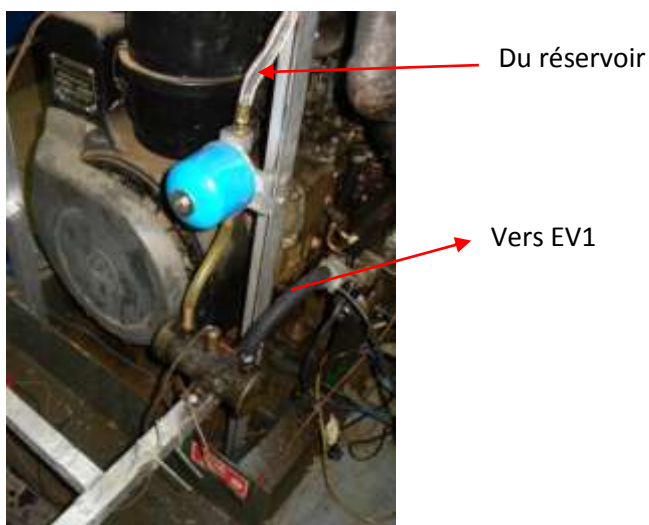


Figure 38 : photo de montage du filtre avant la pompe d'alimentation (©Valentin LEFEBVRE, 2012)

6.3.2.5 L'installation des électrovannes

Sur le kit de bicarburation 2iE, il est prévu d'installer deux vannes trois voies, une pour l'alimentation du moteur en HVP et une pour le retour de carburant HVP, (EV1 et EV2,

Figure 35) et une électrovanne deux voies pour le by-pass de la pompe d'alimentation mécanique du moteur en gasoil, placée sur le circuit d'origine, quand le moteur fonctionne avec l'HVP (EV3, Figure 35).

- Branchement des circuits de carburant.

En suivant le schéma de principe du circuit carburant (Figure 35), les électrovannes 3 voies sont placées sur la durite d'arrivée (EV1) et la durite de refoulement de carburant (EV2) au plus près de la pompe d'injection afin de diminuer le temps de purge du circuit à l'arrêt du moteur. Au repos, le système

fonctionne au gasoil, il faut donc brancher l'entrée normalement ouverte des électrovannes sur l'arrivée de gasoil et le retour dans le réservoir de gasoil.

- Electrovanne 2 voies de bypass

Cette électrovanne (EV3) a pour objectif de renvoyer le gasoil vers le réservoir lorsque le moteur fonctionne à l'huile végétale. En effet, la pompe à gasoil est mécanique donc continue de fonctionner lorsque l'électrovanne d'alimentation est en position fermée pour le gasoil.



Figure 39 : électrovanne 3 voies (©Valentin LEFEBVRE, 2012)

- Branchement électrique de l'électrovanne 3 voies d'arrivée carburant (EV1)

L'ensemble des bornes négatives des électrovannes doit être relié à la masse commune du moteur. Cette mesure permet de réduire significativement les longueurs de câble à utiliser. Pour réduire l'encombrement, il est aussi possible de pointer entre-elles les électrovannes.

6.3.2.6 Le thermocontact

Le thermocontact est le composant qui informe le boîtier de commande sur le niveau de température des gaz d'échappement. Il doit être fixé sur le collecteur d'échappement, le plus près possible de la culasse (Figure 40).

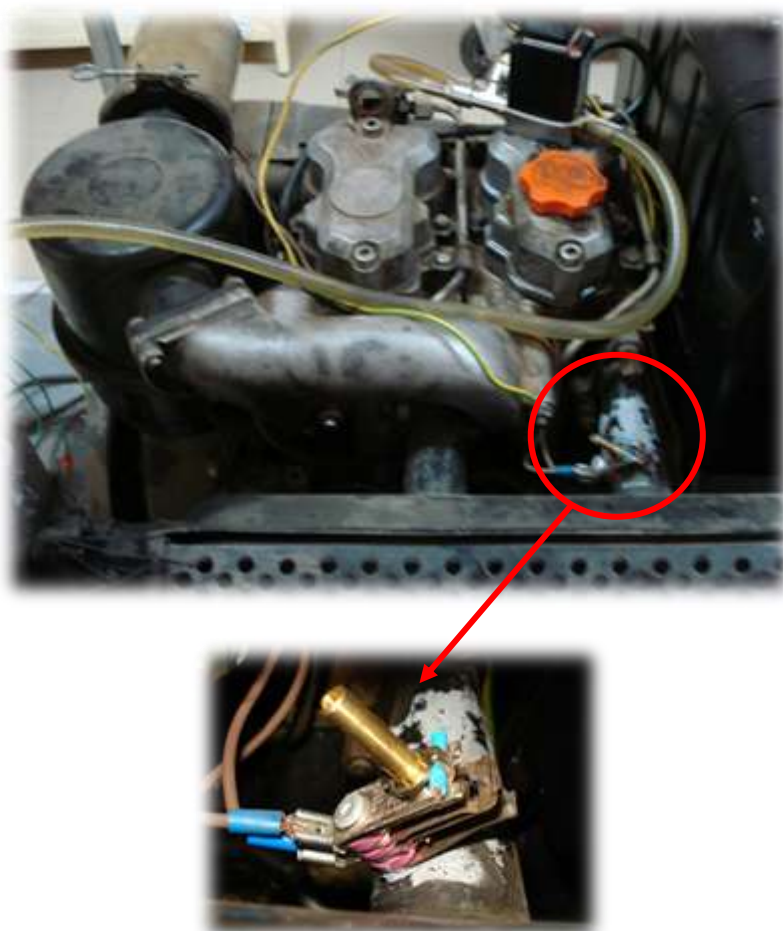


Figure 40 : installation du thermocontact (©Valentin LEFEBVRE, 2012)

Pour régler le thermocontact, il faut s'assurer que tous les éléments sont bien installés et que les branchements électriques sont bien réalisés. Le principe est d'alimenter la pompe d'huile végétale et les électrovannes lorsque le thermocontact est ouvert (Figure 37). Tout en surveillant les voyants de carburant, on tourne doucement la tige de réglage du thermocontact, jusqu'à ce que le voyant vert HVP s'allume. La position n'est pas forcément facile à trouver et il est parfois nécessaire de recommencer plusieurs fois. Si le thermocontact est bien réglé, l'alimentation de carburant doit passer à l'huile (dans les 30 secondes environ). Sinon, il faut reprendre sur le réglage du thermocontact.

Une fois la position trouvée, il faut vérifier que le basculement du carburant est effectué à la charge seuil définie en fonction du type de moteur. Quand le réglage est correct, il faut sceller la tige avec de la colle afin que celle-ci ne puisse plus tourner avec la vibration du moteur.

6.4 Références bibliographiques

- [1] Sidibé, S.S., J. Blin, and C. Brunshwig, *Qualité des huiles végétales pour une utilisation comme carburant*, in *Guide technique pour l'utilisation énergétique des huiles végétales dans les pays de la CEDEAO*, Harmatan, Editor. 2011: Paris. p. 144.
- [2] Sidibé, S.S., *Contribution à l'étude d'utilisation des huiles végétales de coton et de jatropha curcas dans un moteur diesel à injection directe*, in *Energétique-combustion*. 2011, 2iE: Burkina Faso. p. 235.
- [3] Dubois, M., R. Armeo, and A. Vieux, *Technique de mla réparation automobile* Les éditions Fourcher ed, ed. T.m. Diesel. 1974. 134.

7 Essais in situ de moteur fonctionnant avec des huiles végétales carburant

Ce chapitre traite des différents types d'essai qui peuvent être mis en œuvre en fonction des objectifs poursuivis, des protocoles d'essais utilisés ainsi que des caractéristiques à mesurer pour établir les performances du moteur. Il décrit également les points de surveillance d'un moteur sur le long terme pour mieux prévoir les opérations de maintenance préventive à réaliser.

Avant de faire fonctionner un moteur avec de l'huile végétale, il est nécessaire de s'assurer de son état de fonctionnement initial. Pour cela, il est nécessaire de procéder à des « essais initiaux » qui permettront de définir les paramètres de réglages, de vérifier les performances escomptables et enfin de disposer des informations nécessaires à l'élaboration d'un prévisionnel ou d'une analyse de faisabilité économique de la substitution par de l'huile végétale.

7.1 Les objectifs des différents essais in situ

7.1.1 Essais initiaux d'un moteur en exploitation

Le but des essais initiaux d'un moteur est de valider in-situ les performances électriques et thermiques de l'installation **avec un carburant normalisé** (gasoil) pour les conditions extérieures du site et au point de fonctionnement nominal du moteur tel que défini par le fournisseur (essai de contrôle in-situ). Ces essais permettent d'établir des points de fonctionnements de référence avec un carburant conventionnel.

7.1.2 Essais de performance du moteur avec de l'huile végétale

Les essais de performance ont pour objectif de mesurer l'efficacité du moteur dans différentes conditions de fonctionnement. Ils sont réalisés avec de l'huile végétale en faisant varier le niveau de charge, le taux d'incorporation d'huile végétale s'il s'agit d'utiliser des mélanges huile/gasoil.

Dans ce cas, ces essais permettent de déterminer le taux d'incorporation maximal d'huile dans le gasoil.

Dans le cas d'utilisation d'huile à 100% avec un kit de bicarburant, les essais de performance permettent également de déterminer la consigne de basculement du circuit d'alimentation gasoil/huile végétale (cf. 6.2).

Ces essais de performances sont plus particulièrement décrits dans la suite. Il faut savoir que peu de constructeurs s'engagent sur les performances de leurs moteurs avec un carburant non normé comme les huiles végétales. Les performances et les points de fonctionnement de référence sont donc ceux d'un fonctionnement nominal au gasoil, qui permettent de réaliser des comparaisons sur les performances attendues avec l'huile.

7.1.3 Essais d'endurance

Ces essais ont pour objectif d'apprécier l'évolution des performances du moteur dans le temps et de définir ainsi la fréquence des opérations de maintenance.

Il s'agit d'essais sur de longue durée (au minimum 50 à 100 heures) dans des conditions représentatives (il peut y en avoir plusieurs) du fonctionnement usuel du moteur.

C'est avec les essais d'endurance qu'il est possible d'apprécier à partir de quel moment les dépôts carbonés induisent une perte des performances du moteur qui nécessite une opération de nettoyage. Ils ne seront pas détaillés dans la suite car les mêmes protocoles sont utilisés.

7.2 Description des essais

7.2.1 Normes internationales

Les normes ISO 15550 et ISO 3046/1 définissent les conditions de référence ainsi que les méthodes d'essai pour déterminer la puissance des moteurs, leurs consommations de carburant et d'huile de lubrification.

Les normes ISO 8528-1 ISO 8528-6 définissent les méthodes de réception d'un groupe électrogène. Ces spécifications peuvent servir de référentiel à la réception de moteur Diesel couplé à un alternateur.

On distingue deux types d'essai dans la norme :

- Un contrôle fonctionnel normal ISO : réalisé chez le constructeur dans les conditions du banc d'essai. Le but de cet essai est de :
 - contrôler que le moteur fournit bien les puissances électriques et thermiques demandées dans des conditions normalisées.
 - réaliser les courbes de corrections en fonction des conditions atmosphériques et de la qualité du combustible,
 - établir un certificat d'essais approprié pour les essais en charge (100 %, 75 % et 50 %).

Au moment de l'acquisition d'un moteur le vendeur doit fournir le

rapport d'essai et les caractéristiques certifiées par le constructeur.

- Un contrôle de réception in situ : réalisé sur site dans les conditions réelles de fonctionnement, pour des charges variant de 25 % à 100 % en fonction des possibilités, notamment pour disposer des données qui serviront de point de référence pour l'estimation de la rentabilité économique de la substitution. Ce contrôle est, prévu sur moteur neuf, mais il est préconisé ici pour les moteurs en exploitation au gasoil, afin d'établir les points de fonctionnement, dont les caractéristiques initiales peuvent avoir dérivé au cours du temps. Les résultats serviront de référence pour le fonctionnement à l'huile végétale

Remarque : pour un moteur alimenté en biocarburant, la difficulté sera de tester chez le constructeur en banc d'essai le carburant utilisé sur site. Il sera réalisé en fonction de l'équipement du constructeur, sinon seul le contrôle sur site pourra être effectué.

7.2.2 Conditions générales d'essais

Caractéristiques de référence

Il faut savoir que les constructeurs effectuent des essais de réception de leur moteur avant commercialisation. Sur demande, ils doivent fournir la fiche de résultats de ces essais avec les caractéristiques de fonctionnement (au gasoil) qui ont été mesurées.

De plus, il doit communiquer la courbe de correction de puissance du moteur en fonction des conditions atmosphériques locales. Cette courbe de correction doit être calculée en fonction des températures, pressions et humidités minimales et maximales observées sur le site.

Conditions d'essais

Tous les essais doivent être effectués sur un moteur ayant fonctionné au moins une demi-heure dans les conditions nominales pour qu'il soit stabilisé en température et en pression.

La qualité des combustibles fossiles doit être conforme aux spécifications du constructeur (composition, pression, température et PCI). En ce qui concerne les caractéristique des huiles végétales elles devront correspondre aux spécifications données en fin de chapitre 2.

Afin de s'assurer que le PCI du carburant alimentant le moteur est stable durant les essais en particulier dans le cas de l'utilisation de mélanges gasoil/huile, il est recommandé de bien maîtriser le dosage des deux constituants du mélange et de procéder à une homogénéisation par agitation régulière dans le réservoir.

Pour les tests initiaux au gasoil (ou contrôle de réception in situ), plusieurs niveaux de puissance électrique de sortie doivent être testés (100 % ; 75 %, 50 %, 25 % et à vide) afin de déterminer le point de basculement à l'huile végétale par la suite.

Pour les essais de performance avec de l'huile végétale carburant, il faut faire varier le niveau de charge du moteur (entre 25 et 100 %), ainsi que le taux d'incorporation d'huile dans le cas de mélange gasoil/huile entre 5 et 30% en volume.

7.2.3 Grandeurs mesurées lors des essais

La norme ISO 8528-6 :1993 § 5.2 spécifie les types de mesures à réaliser lors de la réception d'un groupe électrogène. Ces mesures peuvent s'appliquer en cas de réception de moteur Diesel couplé à un alternateur. Cette norme est la référence pour la plupart des constructeurs de moteur, c'est sur cette base que sont données les informations/caractéristiques des moteurs par le constructeur. Ces mesures peuvent également être réalisées chez les grandes centrales de production d'électricité pour valider et contrôler les performances de leurs moteurs.

La liste des mesures à réaliser selon la norme (pour chaque palier de puissance) est la suivante :

Conditions du site d'essai

- altitude, pression atmosphérique, température ambiante, humidité relative,
- température de l'air d'admission,
- température du fluide de refroidissement entrée moteur,

Carburant (numéro de spécification si essai avec carburant référencé) :

- température, pression, débit, teneur en eau, densité du carburant,
- pouvoir calorifique inférieur (PCI), et sa stabilité dans le temps,

Moteur/Cogénération (caractéristiques techniques) :

- tension, intensité, fréquence, facteur de puissance, puissance nominale,
- puissance des auxiliaires nécessaires au fonctionnement,
- taux de compression du turbocompresseur, pression d'admission,
- consommation spécifique (en kWh/kWh),
- température, pression et débit de l'eau entrée/sortie moteur, (puissances thermiques valorisables),
- température et débit des fumées en sortie du moteur,
- fonctionnement des dispositifs de commande et de surveillance.

Huile de lubrification (numéro de spécification) :

- analyses (viscosité, % humidité, présence de particules, de métal,...),
- pression et température,
- consommation spécifique (g/kWh).

Commande (contrôle de fonction selon les spécifications techniques) :

- démarrage du groupe avec les positions « Manuel » et « Automatique »,
- régulation de puissance dans les positions « Manuel » et « Automatique »,
- fonction de tous les dispositifs de sécurité du module,

Données environnementales :

- mesures à l'émission (NOx, SOx, CO, Hydrocarbure, poussières),
- émissions acoustiques,
- Echangeurs de chaleur :
- bilan sur chaque échangeur : température de l'eau entrée/sortie et amont/aval, débit et pression,
- puissance délivrée par les échangeurs (Intercooler HT, Huile, Moteur et Gaz d'échappement).

En pratique, les opérateurs ne disposent pas de tous les équipements pour mener l'ensemble des mesures. Les données vraiment indispensables à mesurer pour établir les performances du moteur sont les suivantes :

- Température et débit du carburant, y compris le débit retour
- Tension/intensité, fréquence et puissance nominale du courant généré
- Consommation spécifique du moteur
- Température des fumées à l'échappement
- Mesure d'émission (NOx, SOx, CO, Hydrocarbures, poussières) éventuellement (selon équipement ou avec l'aide d'un laboratoire spécialisé)

7.3 Indicateurs de performance

Le premier indicateur de performance est le rendement énergétique d'un moteur ou d'une cogénération. La méthode utilisée pour déterminer le rendement d'une cogénération est la méthode directe.

Glossaire :

Puissance active : c'est la puissance électrique qui arrive effectivement au réseau, compte tenu du rendement moteur, des pertes en ligne, des pertes thermiques etc...

Puissance réactive : c'est la puissance engendrée par les éléments réactifs du circuit, que sont des condensateurs (réactance capacitive) ou des bobines (réactance inductive). La puissance réactive ne consomme pas d'énergie, mais n'effectue aucun travail. Elle se mesure en voltampères réactifs (VARs).

Puissance apparente : c'est la puissance totale fournie à la charge. Elle se mesure en voltampères (VA) et correspond à la somme de la puissance active et de la puissance réactive du circuit.

7.3.1 Rendement énergétique

Rendement global

$$\eta_{global_cogé} = \frac{Puissance_Elec. + Puissance_Thermique}{Puissance_Introduite}$$

La puissance introduite est caractérisée par l'énergie apportée par le carburant en entrée du module. La puissance électrique produite est mesurée en sortie de la cogénération (fourniture au réseau) et la puissance thermique au niveau des échangeurs du réseau d'eau chaude ou sur le circuit de refroidissement si la chaleur n'est pas valorisée, ainsi qu'en sortie fumées.

Rendement électrique

Le rendement électrique de la cogénération permet d'estimer le retour sur investissement de l'installation. Comme pour le rendement global, ce rendement est à réaliser pour différents niveaux de puissance fournis par le moteur.

$$\eta_{elec_cogé} = \frac{Puissance_élec_total}{Puissance_Combustible}$$

Pour un suivi financier, c'est la puissance active qui est ici mesurée (électricité vendue au réseau), par contre pour le suivi de performances globales d'un moteur, c'est la puissance apparente qu'il faut prendre en compte.

Rendement thermique

Le rendement thermique permet de contrôler l'efficacité globale thermique de la cogénération. Ce rendement sera à réaliser pour différents niveaux de puissance électrique du moteur. Ce rendement est aussi utile pour estimer la part de la quantité d'énergie thermique valorisable pour un usage chaleur (séchage par exemple).

$$\eta_{th_cogé} = \frac{Puissance_thermique_fournie}{Puissance_Combustible}$$

Remarques : toutes ces valeurs de rendements sont à déclarer lors de la définition des valeurs de garanties en cas de réception d'installations neuves ou de reprise d'installations existantes.

Les méthodes de calcul des puissances qui interviennent dans le calcul des rendements sont présentées à l'annexe 3.

7.3.2 Consommation spécifique du moteur

La consommation spécifique de carburant est exprimée en g/kWh. Pour ces essais la consommation spécifique est déterminée par la mesure de débit de fuel pour une puissance électrique apparente fournie. La formule est la suivante :

$$CS_{Moteur} = \frac{\text{Consommation_Combustible}}{E._Elec_Totale} = \frac{V_{Combustible}}{[(V_1 * I_1) + (V_2 * I_2) + (V_3 * I_3)] * t}$$

$$CS_{Moteur} \quad \text{Consommation spécifique de carburant} \quad \frac{g/kW}{h}$$

Cette valeur de consommation spécifique est déterminée pour des conditions atmosphériques et une puissance électrique totale données. Une incertitude peut être fixée en fonction des mesures (puissance électrique et débit combustible) afin d'établir une carte de contrôle statistique sur ce paramètre. Les valeurs déterminées par les essais au fioul servent de référence pour le suivi des essais au biocarburant.

7.3.3 Suivi de la qualité de l'huile de lubrification

L'analyse de l'huile s'effectue par prélèvement à l'aide de Kit adapté (type Verno Lab par exemple). On contrôle alors la viscosité, la présence de métaux, indicateur d'usure des pièces du moteur et le taux de dilution de l'huile. En l'absence d'équipement, les paramètres à surveiller sont :

- la présence de matière carbonneuse : vérification de la combustion
- la présence de combustible (huile végétale) dans l'huile de lubrification
on réalise des prélèvements d'huile après un fonctionnement significatif à l'huile végétale (ex. 50 h à valider par le constructeur), puis ensuite à une fréquence plus importante (dépendant des premiers résultats d'analyse). Pour plus de détail, le lecteur pourra se référer à [1].

7.3.4 Eléments de contrôle du moteur dans les essais avec l'huile végétale comme carburant

Les éléments de contrôle du moteur sont notamment l'encrassement des injecteurs, les dépôts de carbone dans la chambre de combustion et les soupapes, le gommage des segments, ainsi que l'état de l'huile de lubrification (présence de boue due à une polymérisation, la dilution due au passage de biocarburant, etc.). Les paramètres d'encrassement, d'usure, de durée d'endurance, de couleur des

fumées, ne font pas l'objet de méthodes de mesure normalisées et s'appuient sur des retours d'expérience. En fonction des constats, la fréquence de remplacement de l'huile de lubrification sera révisée : il n'est pas rare que la fréquence soit 2 à 3 fois plus élevée que le plan de maintenance normal.

L'encrassement est vérifié par endoscope avec des fréquences variables en fonction des configurations.

Au-delà des suivis de performances qui sont organisés de la même façon pour un fonctionnement au gasoil, à l'huile ou en mélange, c'est tout le comportement du moteur qu'il faut contrôler avec notamment les fumées, l'analyse de l'huile de lubrification et la perte de puissance.

Pour les essais d'endurance, les paramètres de consommation spécifique et de rendement moteur sont des indicateurs importants pour la détection de l'encrassement.

7.4 Instrumentation nécessaire

7.4.1 Système d'acquisition / supervision

Les conditions d'utilisation du système d'acquisition/supervision sont différentes d'un site à l'autre. Le système doit pouvoir transmettre les données de manière automatique via les réseaux de communication existants ou dans le cas où il n'existerait pas de réseau de communication compatible, le système doit disposer de suffisamment de mémoire afin de stocker les données localement.

Certains moteurs peuvent communiquer via un protocole de communication, comme le « modbus RTU », le système d'acquisition / supervision doit pouvoir communiquer avec les protocoles de communication standard.

Le système d'acquisition/supervision est utilisé pour suivre des moteurs de puissances variées (de 5kWe à 1MWe). Il doit pouvoir s'adapter selon le type de mesures et le nombre de voies (Ajout de module d'acquisition supplémentaire).

Le réseau électrique des sites où le système d'acquisition/supervision est installé n'est pas forcément alimenté en continu : le système d'acquisition/supervision doit pouvoir fonctionner sur batterie et avoir une consommation raisonnable.

7.4.2 Liste des mesures en continu

La liste des voies de mesures suivante (Tableau) est valable pour tous types de moteur Diesel. Dans le cas de moteur de petite puissance (< 50 kW) la liste des voies de mesure peut être réduite.

Tableau 5 : grandeurs à mesurer au cours des essais de fonctionnement des moteurs

Voie de mesure	Capteur	Echelle	type
T° échappement	Thermocouple	0-500 °C	Analogique Tc
P. échappement	CAPTEUR DE PRESSION	0-1 bar	ANALOGIQUE 4-20MA
T° eau entrée moteur	Intégrateur E Thermique ou Pt100	0-100 °C	Réseau modbus ou Ana 4-20 mA
T° eau sortie moteur	Intégrateur E Thermique ou Pt100	0-100 °C	Réseau modbus ou Ana 4-20 mA
Energie thermique refroidissement	Intégrateur E Thermique		Réseau modbus ou Impulsion
Température admission biocarburant	Pt100	0-100°C	Analogique Pt100
Volume de carburant consommé	débitmètres	0,5-15 l/min	Impulsion
Consommation électrique auxiliaires	Tywatt tri	0-60A	Impulsion
Production électrique active	Compteur	variable	Impulsion
Production électrique réactive	Compteur	variable	Impulsion
Puissance active, réactive, apparente	Wattmètre Triad	variable	ANALOGIQUE 4-20MA

7.4.3 Mesures ponctuelles in situ

Certaines mesures ne peuvent pas être relevées en continu. Une mesure ponctuelle est effectuée avec un système portable ou une analyse en laboratoire.

Mesure d'encrassement

Un endoscope à écran LCD avec enregistrement sur carte mémoire permet de vérifier l'encrassement des pistons et des injecteurs. En fonction de la courbe de charge et du temps de fonctionnement journalier du moteur, les vérifications d'encrassement se font en fin de journée avec l'endoscope et le contrôle de l'huile de lubrification.

Emissions de polluants

Pour chaque type de carburant un analyseur de fumées de combustion est utilisé, de manière ponctuelle, afin de mesurer les émissions de polluants (NOx, SOx, CO, Hydrocarbure, poussières, suie) dans les gaz d'échappement.

7.5 Conclusion sur les essais de fonctionnement et de maintenance

Les essais initiaux réalisés avec un carburant normalisé, le gasoil, servent de point de référence pour ensuite un fonctionnement du moteur à l'huile végétale. Les paramètres de suivi de performance permettant une comparaison entre le fonctionnement du moteur au gasoil et celui à l'huile végétale sont la consommation spécifique et le rendement moteur en fonction du niveau de charge et des conditions ambiantes. Les essais permettent de déterminer les conditions d'utilisation optimales sur site soit avec kit de bicarburant, soit en mélange huile/gasoil. Dans ce dernier cas, ils permettent de déterminer le taux d'huile végétale adapté à un risque d'encrassement minimal.

Références

[1] B. Péchiné et Eric Nanteau - EDF R&D H-P1C-2011-00482-FR : Cahier des charges de tests et de suivi de fonctionnement d'un moteur Diesel alimenté à l'huile de Jatropha – Mai 2011.

8 Conclusion

Ce guide a démontré qu'il n'y a pas de problème technique majeur à une utilisation des huiles végétales pures dans les moteurs diesels stationnaires. Il apparaît cependant assez clairement, que pour un bon usage carburant, il est avant tout nécessaire de bien **maitriser la qualité de ces huiles**. Au niveau technique (moteurs), si les **équipements sont bien sélectionnés**, les adaptations à apporter sont relativement simples à mettre en œuvre. Il convient également de s'assurer que **l'installation énergétique est bien dimensionnée** par rapport aux besoins de l'unité ou du réseau à alimenter.

Les moteurs diesels modernes sont de plus en plus performants et conçus pour une combustion optimale de carburants fossiles (gasoil DDO, fioul...) aux caractéristiques physico chimique bien normalisées. Ainsi les huiles végétales dont les propriétés diffèrent des carburants fossiles, notamment en termes de viscosité ou de combustibilité, sont de moins en moins adaptées à ces moteurs. La présence d'impuretés, résultant de contaminations ou de mauvaises conditions de pressage, peut rapidement entraîner des détériorations de l'ensemble des éléments constitutifs du moteur. Il est donc fondamental de veiller à respecter scrupuleusement les recommandations qui sont faites ici en matière de spécifications des huiles carburant. Le respect de ces spécifications a malheureusement comme conséquence d'accroître le prix unitaire des huiles.

Les adaptations des moteurs telles que décrites dans ce guide sont également indispensables pour utiliser des huiles végétales carburant. Le kit de bicarburant apparaît ainsi quasi incontournable dans la grande majorité des cas, pour un fonctionnement avec 100% d'huile végétale.

Afin d'assurer un fonctionnement optimisé et durable du moteur, il est primordial que l'installation de génération d'énergie soit bien dimensionnée par rapport aux besoins à satisfaire. Or, les installations en milieu rural sont trop souvent surdimensionnées, ceci afin de permettre notamment le raccordement ultérieur de nouveaux consommateurs ou d'anticiper un accroissement de la demande : capacité de production ou électricité villageoise. Ce surdimensionnement pose plusieurs problèmes rarement pris en compte par les opérateurs. En ne fonctionnant pas dans une plage de puissance optimale, les consommations spécifiques du moteur sont élevées, la consommation de carburant étant assez constante quel que soit la charge du moteur. Ce fonctionnement en sous capacité se traduit également par une usure prématurée du moteur. Ces deux phénomènes conjugués engendrent des surcoûts importants voire rédhibitoires pour la rentabilité de ces petites centrales rurales, aussi bien en mode diesel qu'en

mode huile végétale. Dans ce dernier cas, le surdimensionnement conduit également à un fonctionnement du moteur dans une plage de puissance pour laquelle les conditions de température ne seront pas optimum voire même jamais atteintes pour permettre une bonne combustion des huiles végétales. Un surdimensionnement de l'installation se traduit donc dans ce cas précis soit par une impossibilité d'utiliser les huiles végétales y compris avec un kit de bicarburant, soit par une altération rapide du moteur. Il est donc essentiel d'analyser très finement les besoins et la demande des consommateurs pour dimensionner correctement son installation.

Même si l'option de substitution du gasoil par les huiles végétales peut apparaître attractive compte tenu de la disponibilité éventuelle en huile végétale dans un environnement immédiat, il convient de ne pas envisager cette substitution si le moteur n'a pas été correctement équipé, sous peine de remettre en cause dramatiquement la durée de vie du moteur.

La disponibilité en huile constitue souvent un frein au développement de la filière. Il est en effet difficile pour un investisseur d'opter pour cette option, s'il n'a pas l'assurance de pouvoir disposer sur le long terme d'un approvisionnement de qualité, à un coût compatible avec ses coûts de production. Il est également hasardeux pour un agriculteur de se lancer dans la production d'huile végétale carburant, s'il n'a pas lui-même l'assurance de pouvoir écouler son produit à un prix suffisamment rémunérateur.

Comme cela a été mentionné dans ce guide, de nombreuses huiles végétales peuvent être utilisées dans les moteurs, même si certaines sont mieux adaptées notamment en raison de leur faible viscosité. Cette flexibilité dans le choix du type d'oléagineux qui peut être utilisé nous semble particulièrement importante puisque cela permet à la fois aux utilisateurs de diversifier les sources d'approvisionnement potentiel, mais aussi aux producteurs de diversifier les cultures et de privilégier celles qui offrent de plus larges perspectives économiques notamment en termes de marchés pour les huiles et ses coproduits. Le recours quasi exclusif aux plantations de jatropha dans de nombreux pays africains nous paraît ainsi contraire aux intérêts de développement de cette filière. Il nous semble en effet essentiel de privilégier les cultures oléagineuses susceptibles de satisfaire à la fois la demande alimentaire et non alimentaire de ces huiles, mais également des tourteaux (alimentation bétails). La toxicité des huiles de jatropha limitent leurs utilisations au seul marché non alimentaire est donc limite les perspectives commerciales des producteurs, même si ces huiles sont d'excellentes huiles carburant.

Le manque d'énergie en milieu agricole africain a pour conséquence de limiter le recours à la mécanisation ou à l'irrigation, ce qui se traduit trop

souvent par des rendements à l'hectare très inférieurs aux moyennes observées internationalement. L'utilisation d'une fraction de la production oléagineuses pour produire de l'énergie qui permette (via la mécanisation et irrigation) d'accroître les productions agricoles, constitue dès lors un enjeu considérable qui devrait pousser les gouvernements à favoriser la mise en place de cultures oléagineuses plus classiques, susceptibles de satisfaire à la fois les besoins considérables de leur population en huile alimentaire, en alimentation pour le bétail et en énergie.

L'utilisation des huiles végétales pures dans les moteurs diesel pourrait participer à ce triple défi.

ANNEXE 1 : LISTE D'INSTRUMENTS ET COUT POUR LES ESSAIS

Système d'acquisition	Tarif unitaire	Nombre	Total
Centrale d'acquisition (8 voies analogiques + 6 voies logiques)	1 920,00 €	1	1 920 €
Module 4 entrées ana +- 10v A3-1	358,00 €	1	358 €
Module logique 4 entrées comptage D1-1	325,00 €	1	325 €
Petit matériel Armoire (armoire, protection, bornier,...)	500,00 €	1	500 €
Capteurs	Tarif unitaire	Nombre	Total
Pression d'huile	300,00 €	1	300 €
T° eau entrée moteur	150,00 €	1	150 €
T° eau sortie moteur	150,00 €	1	150 €
T° huile moteur ou culasse	150,00 €	1	150 €
T° échappement	200,00 €	1	200 €
Débitmètre, 2 plages, 0,5-15 l/m	50,00 €	2	100 €
Compteur d'énergie + TC	300,00 €	2	600 €
Wattmètre (U, I, S, Cos phi) + TC	500,00 €	1	500 €
Température air admission	150,00 €	1	150 €
Température réservoir carburant	150,00 €	2	300 €
Energie thermique refroidissement	200,00 €	1	200 €
Système autonome	Tarif unitaire	Nombre	Total
Station météo	2 500,00 €	1	2 500 €
Système Mobile d'analyse	Tarif unitaire	Nombre	Total
Endoscope à écran LCD et mémoire	300,00 €	1	300 €
Opacimètre portable	600,00 €	1	600 €
Analyseur de combustion	2 000,00 €	1	2 000 €
Coût Total			11 303 €

Ce devis (2011) concerne l'instrumentation de base pour le suivi d'un moteur. Les mesures en laboratoire sur l'analyse de l'huile carburant et l'huile de lubrification ne sont pas estimées ici.

Instrumentation Optionnelle	Tarif unitaire	Nombre	Total
Modem GSM	440,00 €	1	440 €
T° échappement (2ème si valorisation fumées)	200,00 €	1	200 €
Module 4 entrées ana +- 10v A3-1	358,00 €	1	358 €
P. échappement (si valorisation fumées)	300,00 €	1	300 €

ANNEXE 2 : DESCRIPTION DE L'INSTALLATION D'ESSAI

La Figure 41 présente les différents éléments d'une installation de génération d'électricité à partir d'un moteur diesel et précise les grandeurs à mesurer sur ces différents constituants.

Les limites du module de cogénération sont définies dans la Figure 41. Elles sont composées de :

- La fourniture du combustible,
- L'énergie et/ou la puissance électrique fournie (vendue au réseau),
- L'eau de refroidissement moteur en sortie d'échangeur Eau (Ech. Eau/Eau),
- L'eau de refroidissement moteur en sortie d'échangeur Huile en fonction de la puissance (Ech. Eau/Huile),
- La sortie des fumées.

Remarques : les moteurs de faible puissance ne disposent généralement pas de dispositif (échangeur) permettant de valoriser l'énergie thermique du circuit d'huile.

En général, il n'y a pas d'échangeur eau/fumée sur les fumées des moteurs Diesel, mais selon les applications, l'énergie potentiellement disponible peut être valorisée pour du séchage par exemple : celle-ci sera donc mesurée.

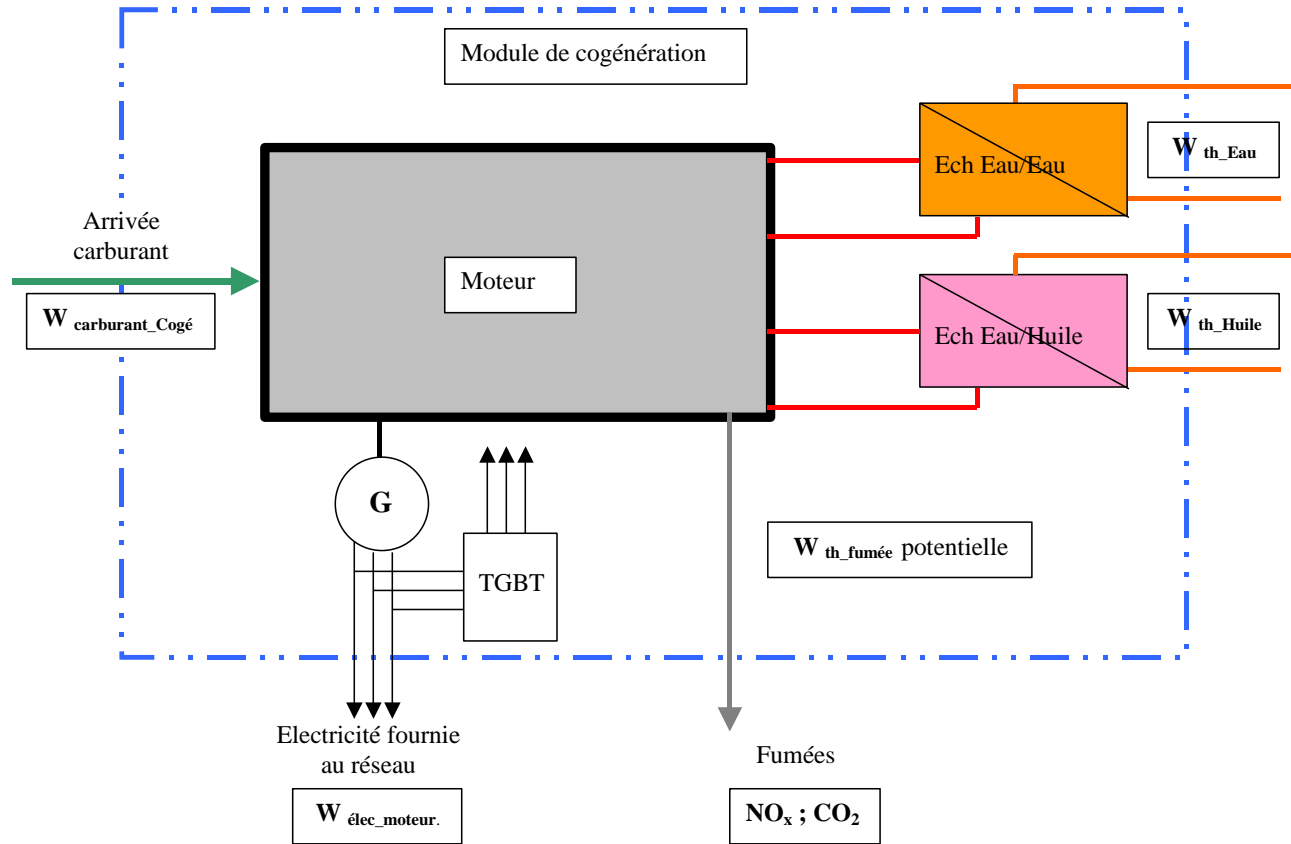


Figure 41 : schéma de principe du groupe Diesel en cogénération

ANNEXE 3 : CALCULS DE PUISSANCES

Puissance combustible

La puissance absorbée par le moteur est composée de la puissance contenue dans le carburant aux conditions atmosphériques données (P_{atm} ; T_{ext} et humidité relative). Des corrections de puissance et de consommation spécifique sont réalisées à l'aide des abaques de la norme ISO 3046-1.

La puissance absorbée est calculée de la manière suivante :

$$W_{absorbée_Moteur} = W_{combustible} = Q_{combustible} * PCI_{combustible}$$

$Q_{combustible}$	Débit de carburant en entrée du moteur	Nm^3/h
$PCI_{combustible}$	PCI du combustible	kJ/Nm^3

Puissance électrique fournie par le moteur

Deux types de puissance sont à mesurer, la puissance active (vendue au réseau) et la puissance apparente dépendant de la puissance active et de la puissance réactive.

La puissance électrique active fournie par le moteur (réseau triphasé non équilibré) est calculée par la formule suivante :

$$Puissance_{E_Active_Moteur} = P1 + P2 + P3 = (V_1 * I_1 * \cos\Phi_1) + (V_2 * I_2 * \cos\Phi_2) + (V_3 * I_3 * \cos\Phi_3)$$

V_x	Tension monophasée de la phase x	V
I_x	Intensité de la phase x	A
$\cos \Phi_x$	Déphasage courant/tension de la phase x	degré

La puissance électrique apparente fournie est calculée par la formule suivante :

$$Puissance_{E_Apparente_Moteur} = (V_1 * I_1) + (V_2 * I_2) + (V_3 * I_3)$$

V_x	Tension monophasée de la phase x	V
I_x	Intensité de la phase x	A

Cette puissance électrique apparente sert pour le suivi des performances du moteur dans le temps et le calcul de la consommation spécifique.

Les Wattmètres (type Triad) associés à des transformateurs de courant (TC) réalisent directement ces mesures de puissance active, réactive et apparente.

Puissance thermique disponible

La puissance thermique disponible produite par le moteur peut être déterminée pour une valorisation éventuelle de la chaleur. Elle est égale à la somme des puissances disponibles sur l'eau de refroidissement du moteur, sur l'eau de refroidissement de l'huile (sur certains moteurs) et sur la puissance thermique disponible en sortie fumées.

En cas de valorisation de la puissance thermique par échangeur eau/eau ou eau/huile la puissance transmise par les échangeurs est mesurée sur le circuit d'eau secondaire. Elle s'écrit :

$$W_{th_eau} = Q_{eau} * (h(T_{eau_sortie}) - h(T_{eau_entrée}))$$

W_{th_eau}	<i>Puissance transmise par l'échangeur</i>	<i>kW</i>
Q_{eau}	<i>Débit d'eau chaude traversant l'échangeur</i>	<i>kg/s</i>
$h(T)$	<i>Enthalpie spécifique à T</i>	<i>kJ/kg</i>
T_{eau_sortie}	<i>Température en sortie de l'échangeur</i>	<i>°C</i>
$T_{eau_entrée}$	<i>Température à l'entrée de l'échangeur</i>	<i>°C</i>

Si l'eau circulant dans l'échangeur n'est pas à la pression ambiante, il peut être nécessaire de mesurer la pression de l'eau du circuit de refroidissement.

Pour la valorisation thermique des fumées, la puissance thermique disponible sera égale à :

$$W_{th_fumées} = Q_{fumées} * (h(T_{fumées_sortie_Moteur}) - h(T_{fumées_échappement}))$$

$W_{th_fumées}$	<i>Puissance thermique disponible dans les fumées</i>	<i>kW</i>
$Q_{fumées}$	<i>Débit de sortie des fumées</i>	<i>kg/s</i>
$h(T) *$	<i>Enthalpie spécifique des fumées à T</i>	<i>kJ/kg</i>
$T_{fumées_sortie_Moteur}$	<i>Température des fumées à la sortie du moteur</i>	<i>°C</i>

$T_{\text{fumées_échappement}}$ *Température des fumées possible à l'échappement* °C
**

* Pour cette estimation, il faut déterminer l'enthalpie par la table des fumées avec une composition correspondante relativement stable.

** La température d'échappement après valorisation doit rester au-dessus d'une valeur minimale (100 °C) afin d'éviter la condensation des fumées. La valeur communément admise est 120 °C.

La perte de charge maximale disponible sur le circuit de fumées doit être prise en compte pour ne pas dégrader les performances du moteur.

TABLE DES MATIERES

1	Introduction	7
2	Généralités sur les huiles végétales	9
2.1	Procédé de production des huiles végétales pures	9
2.2	Propriétés des huiles végétales carburants comparées aux diesels	11
2.2.1	Viscosité cinématique	12
2.2.1	Indice de Cétane	13
2.3	Impuretés sources de dysfonctionnement des moteurs	15
2.4	Les normes et spécifications sur les carburants, adaptation aux huiles végétales	16
2.4.1	Propriétés intrinsèques	18
2.4.2	Propriétés variables	20
2.5	Conclusion sur les huiles végétales carburant	22
2.6	Références bibliographiques :	22
3	Le moteur diesel	23
3.1	Fonctionnement du moteur diesel	23
3.2	Descriptif général du moteur	27
3.2.1	Le bloc moteur	27
3.2.2	Les cylindres	28
3.2.3	Le piston	28
3.2.4	La culasse	29
3.2.5	Les soupapes	30
3.2.6	L'arbre à cames	30
3.2.7	La bielle	31
3.2.8	Le vilebrequin	32
3.2.9	Les carters de protection	34
3.3	Les différents circuits de fluides dans le moteur diesel	34
3.3.1	Le circuit d'alimentation en carburant	34
3.3.2	Le circuit de distribution	41
3.3.3	Le circuit de lubrification	42
3.3.4	Le circuit de refroidissement	43
3.4	Les différentes familles de moteur diesel	43
3.4.1	Les moteurs diesel à injection directe:	44
3.4.2	Les moteurs diesel à injection indirecte:	44
3.5	Conclusion sur les moteurs	46
3.6	Références bibliographiques	46
4	Problèmes liés à l'utilisation des huiles végétales dans les moteurs diesels	48
4.1	Problèmes de combustion à faible température	48
4.2	Problèmes liés à la viscosité élevée de l'huile végétale	50

4.3	Autres problèmes rencontrés	52
4.3.1	Température de solidification	52
4.3.2	Colmatage des filtres	53
4.3.3	Les dépôts de carbone	54
4.3.4	Détérioration des qualités du lubrifiant	54
4.3.5	Problèmes de pompes d'alimentation	55
4.4	Références bibliographiques :	55
5	Quels moteurs diesel et quelles options techniques pour utiliser les huiles végétales comme carburant ?	56
5.1	Les différents modes d'utilisation des HVP dans les moteurs diesel	56
5.1.1	Utilisation des HVP en mélange avec du gasoil	56
5.1.2	La bicarburation	57
5.1.3	La transestérification	60
5.2	Guide rapide de sélection des solutions techniques en fonction du moteur	60
5.3	Conclusion sur les solutions techniques pour fonctionner à l'HVP	62
5.4	Références bibliographiques :	62
6	Dimensionnement d'un kit de bicarburation	64
6.1	Les équipements du kit de bicarburation	64
6.1.1	Le réservoir d'huile végétale	65
6.1.2	Le réchauffeur d'huile végétale	66
6.1.3	Les filtres	66
6.1.4	La pompe d'alimentation.	68
6.1.5	Les vannes	69
6.1.6	Les durites :	70
6.1.7	Commande du kit bicarburation	70
6.2	Détermination du point de basculement	74
6.3	Montage du kit de bicarburation	76
6.3.1	Préparation du montage du kit	76
6.3.2	Installation du kit de bicarburation sur le moteur :	76
6.4	Références bibliographiques	85
7	Essais in situ de moteur fonctionnant avec des huiles végétales carburant	86
7.1	Les objectifs des différents essais in situ	86
7.1.1	Essais initiaux d'un moteur en exploitation	86
7.1.2	Essais de performance du moteur avec de l'huile végétale	86
7.1.3	Essais d'endurance	87
7.2	Description des essais	87
7.2.1	Normes internationales	87
7.2.2	Conditions générales d'essais	88

7.2.3	Grandeurs mesurées lors des essais	89
7.3	Indicateurs de performance	90
7.3.1	Rendement énergétique	91
7.3.2	Consommation spécifique du moteur	92
7.3.3	Suivi de la qualité de l'huile de lubrification	92
7.3.4	Éléments de contrôle du moteur dans les essais avec l'huile végétale comme carburant	92
7.4	Instrumentation nécessaire	93
7.4.1	Système d'acquisition / supervision	93
7.4.2	Liste des mesures en continu	93
7.4.3	Mesures ponctuelles in situ	95
7.5	Conclusion sur les essais de fonctionnement et de maintenance	95
8	Conclusion	96
Annexe 1	Liste d'instruments pour les essais	99
Annexe 2	Description de l'installation d'essai	100
Annexe 3	Calculs de puissances	102

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : relation entre procédé de production et qualité des HVC	11
Figure 2 : relation entre température et viscosité cinématique d'une huile végétale et de fuels lourds	13
Figure 3 : indice d'iode moyen de diverses huiles végétales	20
Figure 4 : cartographie du moteur diesel	24
Figure 5 : schéma du cycle Diesel à quatre temps	26
Figure 6 : schéma d'un bloc moteur	27
Figure 7 : photo d'un piston	28
Figure 8 : schéma d'une culasse.....	29
Figure 9 : schéma d'une soupape	30
Figure 10 : schéma d'un arbre à came	31
Figure 11 : éléments de la bielle	32
Figure 12 : schéma d'un vilebrequin	33
Figure 13 : schéma du circuit d'alimentation d'un moteur diesel	36
Figure 14 : exemple de pompe unitaire	37
Figure 15 : exemple de pompe en ligne.....	37
Figure 16 : exemple de pompe rotative	38
Figure 17 : schéma d'un injecteur et porte injecteur	39
Figure 18 : schéma d'un injecteur à trous Bosch type DLL avec protecteur de chaleur	40
Figure 19 : schéma d'un injecteur à téton à extrémité cylindrique	40
Figure 20 : schéma de principe de l'injection indirecte	45
Figure 21 : schéma de principe de l'injection directe	45
Figure 22 : dépôts carbonés sur le nez des injecteurs et la culasse.....	48
Figure 23 : viscosité de l'huile de Jatropha et de ses mélanges avec du diesel <i>versus</i> la température.....	51
Figure 24 : schéma des modifications du circuit d'alimentation avec un kit de bicarburation.....	58
Figure 25 : diagramme décisionnel pour l'adoption d'une solution HVC en fonction du type de moteur	61
Figure 26 : schéma de principe d'un kit de bicarburation.....	65
Figure 27 : montage d'un réchauffeur d'huile végétale.....	66
Figure 28 : exemples de préfiltres de carburant	67
Figure 29 : exemple de filtre à cartouche	68
Figure 30 : exemple de thermomètre à aiguille	71
Figure 31 : exemple de thermocouple avec afficheur	72
Figure 32 : photo d'un transformateur de courant.....	72
Figure 33 : photo du thermocontact.....	74
Figure 34 : vue d'ensemble du kit de bicarburation sur le moteur	78
Figure 35 : schéma de principe d'un kit de bicarburation conçu à 2iE	79
Figure 36 : boîtier de commande du kit de bicarburation 2iE	80
Figure 37 : schéma électrique du boîtier de commande	81
Figure 38 : photo de montage du filtre avant la pompe d'alimentation.....	82

Figure 39 : électrovanne 3 voies	83
Figure 40 : installation du thermocontact.....	84
Figure 41 : schéma de principe du groupe Diesel en cogénération	101

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : propriétés carburants de différentes huiles végétales comparées à celles de carburants fossiles.	14
Tableau 2 : spécifications pour biodiesel et huile de colza carburant [8].....	17
Tableau 3 : spécifications sur les propriétés variables des HVC.....	21
Tableau 4 : caractéristiques de kits quelques kits de bicarburation commerciaux .	59
Tableau 5 : grandeurs à mesurer au cours des essais de fonctionnement des moteurs.....	94

L'accès à l'énergie est une composante essentielle du développement économique et social, ainsi que du bien-être des populations. Dans les pays d'Afrique de l'Ouest, l'accès à l'énergie et la disponibilité des services associés sont toujours parmi les plus bas des pays en développement, alors que la forte croissance économique et démographique de ces pays, avec le développement de nombreuses industries locales, d'activités artisanales et agricoles, accroît les besoins en énergie.

Parallèlement, les pays africains disposent de grandes quantités de ressources de biomasse soit sous forme de résidus agricoles ou forestiers, soit sous forme de cultures dédiées.

Fort de ce constat, la Fondation 2iE et le Cirad, centre de coopération internationale de recherche agronomique pour le développement, mènent conjointement depuis une dizaine d'années des activités de recherche, formation et expertise sur la valorisation énergétique de la biomasse. Cette collaboration soutenue par l'Union Européenne et la Coopération française s'est concrétisée par la création en 2008 d'un laboratoire commun : le laboratoire Biomasse Energie Biocarburants.

Ce guide est le fruit du savoir-faire et de l'expérience accumulée par ce laboratoire et par les 2 partenaires depuis plus d'une dizaine d'année. Il a pour objectif de décrire la problématique de l'utilisation des huiles végétales dans un moteur diesel stationnaire sous un angle technique. Il ambitionne d'expliquer dans quels cas et sous quelles conditions il est possible de le faire et de décrire les adaptations nécessaires ainsi que les solutions techniques existantes. Il est destiné plus particulièrement aux utilisateurs de ce type de moteurs et a ceux qui se posent la question de la faisabilité technique de cette substitution. Il se veut le plus simple et opérationnel possible, avec des illustrations pour aider à comprendre et à mettre en œuvre les solutions proposées.

