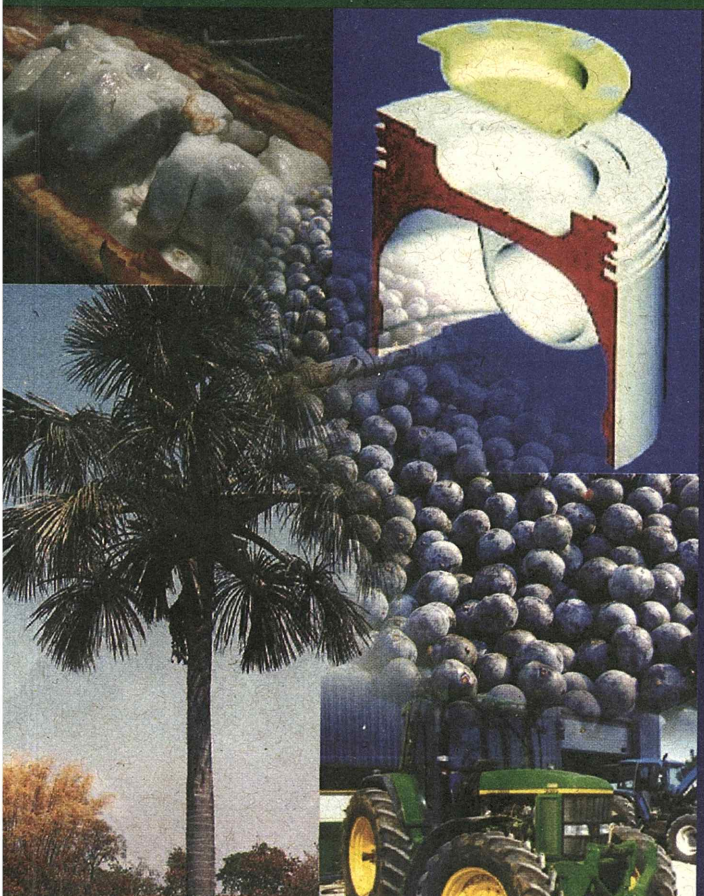
Guide technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales



SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO

CIRAD

Chapitre 2

Extraction, conditionnement et utilisation des Huiles Végétales Pures Carburant

Christian Bedrossian, Gilles Vaitilingom

Introduction

L'après pétrole, unique fournisseur de carburants liquides, est inéluctable parce que depuis la fin des années 80 les découvertes couvrent à peine l'augmentation de la demande mondiale. Dans l'état actuel de nos modes de consommation l'apparition de nouvelles sources de carburants renouvelables ou non est une nécessité. L'arrivée de biocarburants dans les fiouls et essences est fortement prévisible que ceux-ci soient issus de ressources nationales ou pas.

Le Brésil est un des pays pilote dans l'utilisation et la production de biocarburant. A lui seul, il produit déjà 34% de la production mondiale en bioéthanol.

Dans ce contexte de forte croissance des prix du baril de pétrole et de préoccupations environnementales, certains acteurs socio-économiques, issus notamment du monde agricole et para agricole, commencent à s'intéresser à l'utilisation des huiles végétales pures pour des usages énergétiques comme la carburation automobile, les moteurs fixes (pompes, groupes électrogènes), la combustion (chauffage de bâtiments, serres…), ou certaines applications industrielles (lubrifiants, solvants non toxiques, peintures, encres…).

Ces huiles sont produites à partir d'oléagineuses (Colza, Tournesol, Buriti, Babassu, Palme…) Cette production est fonction des contextes économiques et sociaux. Le secteur agricole leur accordent une attention de plus en plus importante et s'interrogent sur leur utilisation comme alternative partielle aux énergies d'origine fossile.

Depuis 2005, un des principaux objectifs du Brésil est de développer la production des biocarburants à partir des huiles végétales afin de :

- développer l'activité économique locale,
- favoriser l'inclusion sociale,
- produire un produit de qualité à prix compétitifs.

L'implication du Brésil dans cette démarche lui permettra de se diversifier autant dans la fabrication de biocarburants que dans la production des matières premières en ne négligeant aucune région.

1. Les Huiles végétales naturelles (ou pures[1]) carburants

1.1. Généralités :

Les substances à partir desquelles sont produites les huiles sont soit des graines ou des amandes soit des fruits. En fait, toutes les graines, tous les fruits et toutes les amandes contiennent de l'huile, mais seuls sont appelés oléagineux ceux qui servent à produire industriellement de l'huile et qui sont cultivés dans ce but.

Parmi les graines de plantes cultivées pour leur huile, les plus connues sont : l'arachide, le colza, le ricin, le soja et le tournesol. Il faut y joindre les graines de plantes cultivées pour fournir des fibres textiles - et subsidiairement de l'huile tel que le coton et le lin principalement. Quant aux fruits oléagineux et aux amandes, ils proviennent principalement du cocotier (noix de coco contenant le coprah), du noyer, du palmier à huile (palme et palmiste) et de l'olivier (olives).

1.2. Caractéristiques

La composition chimique des huiles végétales correspond dans la plupart des cas à un mélange de 95 % de triglycérides et 5 % d'acides gras libres, de stérols, cires, et autres composants minoritaires. Les triglycérides

---

[1] Le terme anglais Pure Vegetable Oil se traduit mal en français par : « Huile Végétale Pure ». En effet le mot « Pure » signifie « utilisée seule » alors que le sens désigne ici une huile végétale non modifiée chimiquement soit une huile végétale « Naturelle ». C'est sous le nom d'HVP (Huiles Végétales Pures) que celles-ci se diffusent en France.

sont des tri-esters formés par la réaction d'acides gras sur les trois fonctions alcools du glycérol (Figure 1). R, R', R", = C7H15, C9H19, C11H23, . . ., C17 H35, C17H33, C19H39

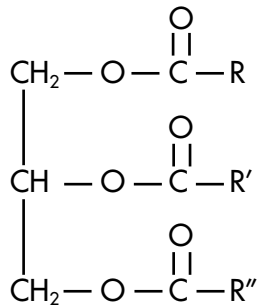


Figure 1 : Formule triglycéride

Classification :

Les huiles végétales peuvent se diviser en 4 grands groupes, l'indice d'iode servant à les discriminer :

- les huiles dites saturées de type : indices d'iode de 5 à 50
  - lauriques : coprah, palmiste, babassu,…
  - palmitiques : palme, buruti
  - stéariques : karité
- les huiles monoinsaturées (semi-siccatives) : indices d'iode de 50 à 100
  - oléiques : olive, arachide, colza, sésame, jatropha curcas, ricin
- les huiles di-insaturées (semi-siccatives) : indices d'iode de 100 à 150
  - linoléique : tournesol, coton, mais, soja,….
- Les huiles tri-insaturées (siccatives) : indices d'iode > 150
  - linoléniques : lin
  - éléostariques : huile de bois de chine

L'indice d'iode permet de se rendre compte de l'insaturation d'une huile : il varie entre 0 et 200g/100g. Il correspond au nombre de grammes d'iode fixés par 100g de corps gras (NF T60-203). Il est donc en rapport direct avec le degré d'insaturation d'un corps gras : plus une huile est insaturée, plus l'indice d'iode est élevé.

Cette mesure consiste à mettre en présence de grande quantité de diiode avec de l'huile (deux atomes d'iodes liés par un atome de chlore et de l'acide acétique, soit I2 (acide) + Cl (acide)). L'I2 coupe les doubles liaisons et se fixe à l'acide gras. Ensuite, on détermine combien d'ion I+ ont été capturés par les doubles liaisons. On peut ainsi en déduire le degré d'insaturation du corps gras analysé.

D'un point de vue « qualité » carburant, plus l'huile est saturée ou plus faible est son indice d'iode, meilleure elle est. En revanche les huiles saturées présentent des températures de solidification élevées et posent des problèmes pratiques d'utilisation . Il en est de même pour leurs esters éthyliques ou méthyliques (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques physiques et "carburant" des huiles végétales comparées au Diesel et à l'ester méthylique d'huile de colza

	Masse volumique (20 °C) $g.cm^{-3}$	Viscosité (20 °C) mm^2/s	Point	Point de trouble °C	Point éclair °C	Indice de cétane	Résidus de carbone %	Pouvoir calorifique MJ/kg
Diesel	0,836	6	-18	-9	93	50	< 0.01	43.8
Ester méthyliquede colza	0,880	7	-12	-4	183	52	0.02	41
Coprah	0,915	30*	23/26	28	230	43	0,5	37.1
Palme	0,945	60*	23/40	31	280	39	0.42	36.9
Buriti	0,912 à 25°C	138,3	-4	-		-	-	39,08
Ricin	0,955	850-1100	-10 à -20	-	265	-	0,1	37,20
Babassu	0,946	25,5 à 25°C	22/26	26	234	38	0,28	35,28
Coton	0,921	73	-2	1	243	34	0.49	36.8
Pourghère	0,920	75,7	-3	2	236	35	1.31	38.8
Arachide	0,914	85	-1	9	258	32	0.5	39.3
Colza	0,920	78	-6	-4	285	32	0.5	37.4
Soja	0,920	61	-4	-4	330	30	0.54	37.3
Tournesol	0,925	58	-6	-2	316	32	0.35	37.8

* viscosité cinématique à 40 °C

Les huiles végétales ont des caractéristiques similaires à celles du fioul. En particulier, un indice de cétane qui indique une aptitude au fonctionnement en cycle Diesel. Plus il est élevé, plus le carburant est apte à l'auto inflammation. Mais, si les valeurs présentées dans les tableaux permettent une classification en terme de qualité des huiles végétales, elles ne sont pas directement comparables à celles du fioul. En effet, l'huile de tournesol qui présente un indice de cétane de 32 se comporte mieux dans un moteur diesel que des fiouls de mêmes indices.

En fait, les spécifications actuelles des carburants pétroliers sont issues d'un passé, d'une histoire de l'industrie pétrolière liée étroitement au développement des moteurs à combustion interne. Les valeurs normalisées ou communément admises sont les fruits de données pratiques et empiriques. Beaucoup de ces spécifications sont des tests "pétroles" qui perdent leur sens comparatif dans certain cas.

- la température de distillation : la norme prévoit que 90 % du produit doit être distillé dans la fourchette 282-338°C. Or il n'y a pas de réelle distillation des huiles végétales mais seulement d'une partie des acides gras, puis décomposition thermique.
- le point de trouble : la norme prévoit 2°C, ce qui exclut l'huile de palme, par exemple, solide à 20°C alors qu'elle est considérée comme un bon biocarburant.
- Notons que les points éclairs élevés des huiles végétales garantissent une meilleure sécurité au stockage.

1.3. Historique :

L'intérêt des hui1es végétales en tant que carburant des moteurs à cycle Diesel n'est pas nouveau. Dans les années 1920, ingénieurs et chercheurs se sont consacrés à l'étude de carburants végétaux dans le souci de valoriser un carburant dont les caractéristiques se rapprochaient le plus des huiles de pétrole, ceci sans aucun préalable de non faisabilité ou d'excentricité de telles solutions. En effet, c'était une solution très attractive pour les zones coloniales, riches en oléagineux, qui avaient sur place une source d'énergie renouvelable les rendant indépendantes d'approvisionnements problématiques par leur isolement des métropoles.

Citons à ce propos une communication de M Rudolf Diesel (1858-1913) lui-même en 1911

"On ignore généralement que l'on peut employer directement dans les moteurs diesels les huiles animales ou végétales En 1900, la société OTTO avait exposé à l'Exposition Universelle de Paris un petit moteur qui, à la demande du gouvernement français marchait à l'huile d'arachide et fonctionnait tellement bien que très peu de gens s'apercevait du changement. Le moteur était construit pour employer les huiles* ordinaires et fonctionnait à l'huile végétale sans aucune modification. J'ai récemment recommencé ces essais sur une grande échelle avec plein succès et ils ont entièrement confirmé les résultats obtenus précédemment. Le gouvernement français avait en vue l'utilisation des grandes quantités d'arachide dont on dispose dans les colonies africaines et qui sont d'une culture facile. On pouvait ainsi doter les colonies d'usines de production de force motrice et d'établissements industriels, sans qu'il soit nécessaire d'y importer de la houille ou du combustible liquide.

Des essais semblables, couronnés du même succès, ont également été faits à Saint Pétersbourg avec de l'huile de ricin. On a même essayé avec plein succès les huiles animales telle que l'huile de poisson."

* de pétrole (ndlr)

Exemples d'utilisations des HVP entre 1920 et 1950.

- Il y eut des essais isolés mais également des utilisations pratiques et de longue durée au début de la dernière guerre. Notamment dans le port d'Abidjan (Côte d'Ivoire) où le ravitaillement en carburants classiques devenant difficile, la Société de Construction du port utilisa, dans ses moteurs de 50 à 800 chevaux, de l'huile de palme filtrée à raison de 100 tonnes par mois.
- Durant la dernière guerre, 30 à 40 camions de l'armée française fonctionnant à l'huile d'arachide effectuaient chaque semaine la liaison Dakar-Alger (3 500 km)

Les essais et recherches, renforcés au cours de la dernière guerre, se poursuivirent jusqu'en 1952 dans plusieurs laboratoires spécialisés

français (Laboratoire de Mécanique physique de St Cyr ; UTAC Union Technique de l'Automobile et du Cycle; etc). La recherche connaît un regain d'engouement dans les années 1975, à la suite du premier et du second choc pétrolier. Les constructeurs de machines agricoles étudient la possibilité d'utiliser les huiles végétales comme substitut du fuel ou du gazole (JOHN DEERE, CATERPILLAR, INTERNATIONAL HARVESTER, VOLKSWAGEN, FIAT, MERCEDES,…), beaucoup d'essais sont alors réalisés jusqu'en 1984.

Photo 1 : Moteur à l'huile de palme (Photo Cirad)

1.4. Avantages des huiles végétales comme carburant :

Les huiles végétales naturelles ont des propriétés énergétiques proches de celles du fioul. Produites par l'agriculture, elles ne sont pas un substitut direct de l'essence mais bien du gazole qui est le principal carburant agricole. Par ailleurs, elles se mélangent très bien aux fiouls. Les huiles issues de cultures annuelles ou de plantations pérennes peuvent être produites directement sur l'exploitation. L'impact sur l'écosystème local est aisément évaluable. Les moyens de production s'appuient sur des techniques et des technologies disponibles et existantes en petites, moyennes ou grandes capacités. La qualité requise en tant que carburant n'est pas aussi exigeante que pour l'alimentation humaine. Les stockages et transferts, s'ils exigent de la propreté, ne nécessitent pas de matériaux alimentaires. Une huile impropre ou toxique à la consommation humaine peut être utilisée comme carburant comme par exemple l'huile de ricin (mamona). Enfin leur utilisation en tant que biocarburant peut se faire selon deux voies :

- en tant que carburant industriel : par trans-estérification à l'aide d'un alcool méthylique ou éthylique ou par cracking catalytique[2].

[2] Le cracking catalytique est une réaction effectuée à 400°C minimum, elle permet de séparer, sous forme de CO2, la partie oxygénée d'une huile végétale et de couper ses longues chaînes en molécules plus petites. Cela permet de se rapprocher de produits pétroliers tels que essence, gazole et gaz.

- en tant que carburant local en circuit court d'autoconsommation. Dans ce cas on privilégiera l'usage sous leur forme naturelle.

La première voie nécessite une transformation chimique sophistiquée si l'on ne veut pas générer trop de pertes lors de l'estérification. Cette voie s'applique généralement aux moyennes ou grandes productions industrielles, elle s'éloigne souvent des exploitations agricoles.

La seconde voie peut s'envisager sur les lieux de production de la matière première. Elle est rapidement applicable et peut ne pas nécessiter d'intrants souvent onéreux.

La production d'huiles végétales biocarburant[3] presente des avantages écologiques. Ainsi, l'agriculture produit de cinq à dix fois l'énergie qu'elle consomme. Cette énergie se présente sous la forme de produits alimentaires énergétiques et de sous-produits utilisables pour produire de l'énergie (bagasse de canne à sucre par exemple). Mais aujourd'hui l'agriculture moderne dépend de la mécanisation. Laquelle est totalement dépendante de carburant liquide. L'intérêt du circuit court d'autoconsommation d'huile végétale naturelle permet de produire le carburant nécessaire à la production agricole dans un rapport proche de l'idéal qui est de 1 pour 10. Autrement dit, un hectare de tournesol ou de colza peux produire 9 hectares d'oléagineux sans recours à du carburant pétrolier. Enfin, l'intérêt, pour des unités de production agricoles petites ou moyennes est de pouvoir produire localement l'huile alimentaire, le carburant nécessaire à la production, le sous-produit (tourteau) utilisable directement en alimentation animale.

Ce qu'il faut retenir:

Les huiles végétales présentent des caractéristiques proches de celles des fiouls et se révèlent de bons carburants pour les moteurs diesels. Alors, pourquoi aujourd'hui si peu d'applications carburant des huiles végétales ?

[3] L'utilisation d'huiles végétales bio carburant permet de ne pas augmenter le volume de CO2 rejeté dans l'atmosphère (la quantité rejetée pendant la combustion équivaut à la quantité stockée par l'activité photo synthétique des plantes), au contraire de l'utilisation de carburant fossile, et joue donc un rôle positif dans le contrôle de l'effet de serre. En circuit court, l'usage de 1000 litres d'huiles végétales permet d'atteindre 3,2 tonnes de CO2 évité.

L'histoire indique que M. Diesel, inventeur de ce type de moteur, les avait qualifié comme carburant dès 1900. C'est l'évolution économique et industrielle mondiale qui a spécialisé les moteurs vers le pétrole, ressource plus abondante et, hier, plus facile d'accès.

Comme toutes les « énergies vertes », l'huile végétale est en période normale et à moyen terme plus chère que le pétrole. Par ailleurs, les huiles ne respectent pas, par nature, les spécifications standards établies pour les produits pétroliers, ce qui pose des problèmes techniques à leur usage dans les moteurs courants et leur interdit des homologations d'usage dans beaucoup de pays développés (eux-mêmes constructeurs des moteurs).

Enfin, la compétition entre usages énergétique et alimentaire demeure un facteur de blocage fort.

2. Extraction et conditionnement des huiles végétales carburant

La production d'huiles végétales à destination carburant utilise les mêmes équipements que la production alimentaire traditionnelle que ce soit à l'échelle artisanale ou industrielle. Les différentes étapes de la récolte a l'obtention de l huile « carburant » sont données dans la figure 2.

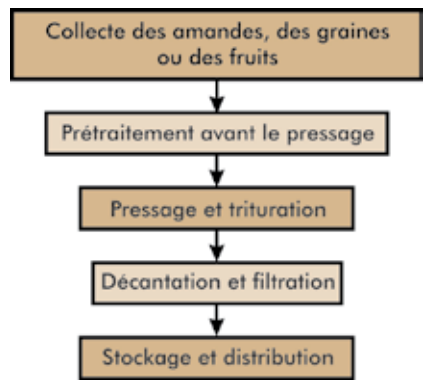


Figure 2 : Diagramme pour la production des huiles carburants

2.1. Collecte des amandes, des graines ou des fruits

La récolte peut s'éffectuer manuellement ou mécaniquement (cf fiches techniques). Dans certain cas, l'usage d'une machine peut entrainer une dégradation des fruits, des graines ou des amandes

Photo 2 : Récolte mécanisée (Photo David Nance. *www.diplomatie.gouv.fr/)*

augmentant l'acidité de l'huile. En généralisant, la récolte des graines se fait mécaniquement alors que celle des fruits s'effectue à la main.

Tableau 2 : origine de quelques huiles et type de récolte

	Origine de l'huile :	Mécanisation de la récolte :	Types de machine
Coprah	amande	non	
Palme	pulpe du fruit	non	
Buriti	Pulpe du fruit	non	
Ricin	amande	oui	Temo-ingrequip
Babassu	amande	non	
Coton	graine	oui	Cotton pickers ou cotton stripper
Pourghère	amande	non	
Arachide	graine	oui	Récolteuse à arachide
Colza	graine	oui	Moissonneuse batteuse
Tournesol	graine	oui	Moissonneuse batteuse

2.2. Prétraitement avant le pressage

Nous invitons le lecteur à se referer aux fiches techniques

2.3. Pressage et trituration

Elle s'effectue en trois étapes :

- le pressage/trituration à froid, sans modification chimique,
- la décantation,
- la filtration.

Pour produire l'huile, on peut installer les équipements de l'huilerie (silo de stockage des graines, presse, cuves de décantation et filtre) sous un abri ou dans un hangar.

Le pressage des fruits à pulpe peut etre realisé par extraction manuelle (Photo 1) ou extraction thermique/mécanique. Lorsque celle-ci est mécanisée, on parvient ainsi à un rendement nettement supérieur. Pour

cela, on peut utiliser le pressurage ce qui permet d'obtenir l'huile de palme brute et les tourteaux. L'extraction peut être mécanisée. Les principaux procédés sont :

- les presses hydrauliques, presses à vis sans fin ou à barreau, qui laissent 9 à 11% d'huile sur fibre sèche,
- les presses en continu qui laissent entre 8 à 9% d'huile sur fibre sèche mais qui cassent beaucoup les noix et qui extraient des huiles fortement chargées en boue,
- les essoreuses centrifuges qui conviennent bien aux fruits pauvres en pulpe,
- le malaxage/lavage qui consiste à laver la pulpe avec de l'eau très chaude pour entraîner l'huile mais sa récupération dans les boues est difficile.

Photo 3 : Presse manuelle à huile de palme. Amazonie (Photo Cirad)

Le pressage des amandes et graines oléagineuses est optimisé avec un taux d'humidité de graines ou amandes compris ente 5 et 8 % et un taux d'impuretés inférieur à 2 %. Pour ces différentes graines oléagineuses, on peut utiliser soit des presses manuelles soit des presses motorisées. Toutes les presses motorisées sont équipées d'une vis, mais la cage de presse et la forme de la vis sont différentes d'une marque à l'autre et aussi en fonction de l'amande traitée. Les presses manuelles font souvent appel à l'ingéniosité de leur concepteur qui cherche à appliquer une très forte pression à un lot d'amandes préparées pour l'extraction. Pressions par cric hydraulique, vis de vérin, bras de levier (voir photo ci-dessus) sont toutes efficaces. On peut obtenir de très bons taux d'extraction avec ces équipements le

plus souvent fabriqués artisanalement. En revanche les quantités horaires d'huile produite sont très réduites. Au delà de 10 litres d'huile par jour on préfèrera une presse motorisée.

Les presse à vis à barreaux (40kg/h à plus de 2 000 kg/h) :

L'huile passe à travers des barreaux ou des anneaux dont l'espacement est réglable en fonction du type de graines à presser. Un diamètre croissant de la vis augmente la pression sur les graines. L'espacement en sortie de presse est également réglable, les tourteaux sortent sous la forme de plaquettes ou écailles (Photo 2).

Photo 4 : Presse à barreaux (Photo Cirad)

Presse à vis à cage percée (< 50 kg/h) pour les petites capacités

Le corps de la presse est percé pour permettre l'écoulement de l'huile au fur et à mesure du pressage. La vis présente un diamètre croissant pour augmenter la pression en fin de parcours des graines. Les tourteaux passent dans des buses interchangeables dont ils épousent la forme. Une bague de réchauffement évite les blocages dans les buses au démarrage (Photo 3). Les tourteaux sortent sous forme de granulés.

Selon le type de presse et la manière dont on presse les graines, on obtient des tourteaux avec des teneurs en matières grasses différentes allant de 7 à 25 %. Par ailleurs, le rendement d'extraction est lié à la vitesse de rotation de la vis et au diamètre de la buse de sortie : plus la vitesse de rotation est faible et le diamètre de la buse réduit, plus le rendement d'extraction est élevé. Toutefois dans ce cas, le rendement horaire décroît.

Photo 5 : Presse à vis pour huile de palme (Photo Cirad)

Le pressage industriel utilise le même type de matériels mais à plus grande échelle. L'industrie ajoute généralement une étape de raffinage des huiles. C'est une succession de traitements tels que : la désodorisation, la décoloration, la neutralisation, etc…

2.4. Traitements et qualité

Les exigences de « qualité carburant » sont différentes de celle des huiles alimentaires. Elles dépendent également du type d'oléagineux traité ; coprah et palme ne contiennent pas de cires comme le tournesol, lequel contient peu de gommes comparé au colza. Par ailleurs, elles sont liées au procédés d'extraction utilisé : les huiles brutes industrielles sont chargées de phosphore et de cires ce qui ne sera pas le cas des huiles artisanales. D'autre part, la qualité dépend de la manière dont on extrait l'huile mais aussi de la qualité de la graine ou du fruit récolté ainsi que de son stockage avant pressage.

Pour favoriser une certaine qualité de l'huile végétale carburant, il est nécessaire de ne pas laisser trop de temps entre la préparation et l'extraction. Il faut privilégier une pression à basse température. Un cisaillement trop important des graines produit une élévation de température de l'huile. Ce point est important, car une température élevée favorise la libération dans l'huile des phospholipides contenus dans les parois cellulaires des graines. Ces derniers sont des facteurs d'encrassement lors d'une utilisation dans des moteurs ou des brûleurs. Précisons que l'apparition de phospholipides en quantités indésirables est surtout liée au pressage du colza. Ce n'est généralement pas le cas pour les graines de tournesol qui, en revanche, génèrent des cires tout aussi indésirables. Il n'y a pas de cires non plus dans

les huiles de palme ou de babassu et leur contenu en phospholipides est généralement faible.

Pour améliorer la qualité des huiles végétales, on procède à une série de traitement. Pour les huiles naturelles carburant, les traitements sont simples mais les huiles doivent respecter les exigences citées ci-dessous:

- Elles doivent contenir peu de matières insolubles. Moins de 500 ppm après une filtration à 10 microns.
- Elles ne doivent pas contenir plus de 50 ppm de phosphore (révélateur des phospholipides. On mesure leur taux par le dosage du phosphore).
- Elles ne doivent pas contenir plus de 500 ppm de cires.

Pour répondre à ces différents critères et à la normalisation des huiles végétales carburants, on effectue une décantation puis une filtration afin d'éliminer les impuretés et de diminuer la teneur en phospholipides et en cire.

2.5. Décantation et filtration

Le procédé de décantation est simple (Figure 3). Il consiste à mettre en série des cuves et à introduire l'huile d'après pressage. Les matières les plus lourdes sont entraînées au fond des cuves. Le trop plein passe dans la cuve suivante et ainsi de suite jusqu'à clarifier suffisamment l'huile.

La figure ci-joint, nous montre un des procédés de décantation. Il a la particularité d'avoir des vannes afin d'éliminer les matières en fond de cuve. Les simples cuves en cascade sont efficaces mais elles ont l'inconvénient de devoir être nettoyées régulièrement.

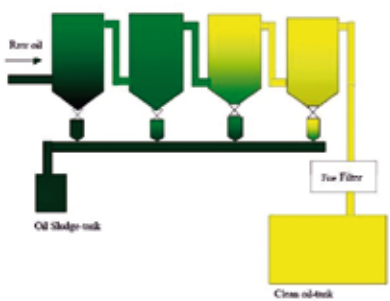


Figure 3 : Procédé de décantation schématisé

Pour utiliser l'huile dans un moteur ou comme combustible en chaudière, il est nécessaire de nettoyer l'huile par filtration soit directement en sortie de presse, soit après des phases de décantation. Il est préférable de l'effectuer après décantation afin de minimiser le temps de filtration et les problèmes rencontrés lors de la filtration d'une huile chargée en impuretés (obstruction des filtres, usure du matériel de filtration,..).

Dans le cas d'utilisation en chaudière une filtration à 10 µm est généralement suffisante. Mais pour éviter l'encrassement des filtres à gazole des moteurs, il faut une filtration minimum de l'huile de 5 µm, mais on peut affiner jusqu'à une porosité de 1 µm. Plus on utilisera un filtre de fine porosité plus on optimisera la qualité de l'huile mais avec un temps de filtration beaucoup plus long.

Il existe plusieurs systèmes de filtration :

- à cartouche. Les cartouches, qui doivent être changées tous les 6 000 à 8 000 litres, éliminent les particules supérieures à 1 µm. Ces filtres sont interdits pour les usages alimentaires en raison des composés utilisés pour leur fonctionnement mais sont utilisables pour de l'huile carburant.
- à plaque (Figure 4). Des cadres de filtration en coton ou en polypropylène retiennent les impuretés. L'huile est « recirculée » à travers le « gâteau » formé par les impuretés jusqu'à ce qu'on atteigne le degré de filtration souhaité (filtration par accumulation).. Une autre technique consiste à faire passer l'huile sous pression entre les cadres (filtration tangentielle). L'huile ne fait alors qu'un seul passage.
- à membrane. Des poches existent en différentes matières avec plusieurs grades de filtration (100 à 1 µm). La plupart sont lavables et peuvent être utilisées 3 à 4 fois. Ces poches sont adaptées aux petites productions (<1000 litres/jour) telles que celles des circuits courts.

Pour obtenir une huile carburant filtrée à 1µm, il est préférable de procéder à deux filtrations successives. La première filtration permet d'éliminer toutes les particules de tailles supérieures à la porosité du filtre choisi (par exemple 50µm) tout en gardant un débit suffisant. Ensuite, on effectue une seconde filtration avec le filtre de faible porosité (1µm) pour éliminer toutes les particules d'une taille supérieure à 1µm.

L'emploi d'une seule filtration entraîne des colmatages du filtre dont la fréquence est fonction du taux d'impuretés de l'huile à traiter. L'intérêt d'une bonne étape de décantation apparaît ici, même si cette dernière mobilise volumes et espaces dans les ateliers de production.

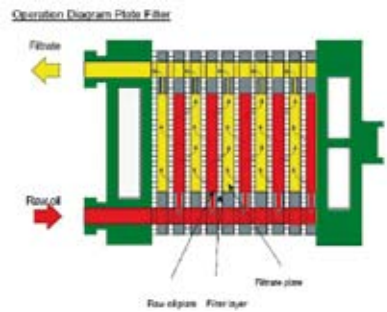


Figure 4 :Exemple de filtre à plaque(Photo CIRAD)

2.6. Stockage et distribution

Afin de minimiser la pollution d'une huile végétale, il est préférable de stocker les graines plutôt que l'huile car le stockage de l'huile reste un poste exigeant en terme de qualité et de propreté (citernes propres et réservées à l'huile végétale). Pour favoriser une bonne conservation de l'huile, des précautions de stockage devront être appliquées telles que:

- l'utilisation de cuves insensibles à l'acidité en raison de la présence d'acides gras libres. Les cuves en métal sont à éviter car le cuivre et le fer favorise l'oxydation de l'huile. Elles peuvent être en polyester par exemple (on évitera les PVC). Elles doivent être hermétiques pour protéger l'huile de la poussière et de l'oxygène de l'air,
- la conservation des cuves à une température constante pour éviter l'oxydation de l'huile, elles doivent être abritées de la lumière et de l'humidité,
- le nettoyage régulier des cuves.

Au cours de la distribution, il faut éviter de pomper au fond des cuves car la décantation se poursuit lors du stockage.

Ce qu'il faut retenir :

Produire de l'huile naturelle carburant peut s'envisager en utilisant les outils artisanaux ou industriels existants pour la filière alimentaire. Mais si les exigences de qualité sont moins grandes et moins coûteuses qu'en production alimentaire elles demeurent cependant obligatoires. Elles concernent essentiellement la filtration et le stockage. Néanmoins, le respect des teneurs en sédiments est parfois plus contraignant pour les huiles carburant que pour les huiles alimentaires en particulier dans les pays tropicaux.

3. Utilisation des huiles végétales pures dans les moteurs diesels

3.1. Introduction : fonctionnement des moteurs Diesel

Dans un moteur diesel, la combustion se déclenche par auto-inflammation : le combustible finement nébulisé par un injecteur est introduit dans une masse d'air suffisamment comprimée pour que sa température atteigne la valeur à laquelle le mélange s'enflamme. 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 diesels fonctionnent selon le principe du cycle à quatre temps qui comprend les phases suivantes : admission, compression, inflammation-détente et échappement (Figure 5).

Chaque cycle correspond à deux tours de vilebrequin. On exprime généralement le temps au cours d'un cycle en degrés angulaires de rotation du vilebrequin (°V). Ainsi, au régime de 3000 tr/mn par exemple, 1 °V représente 0.056 ms. Un cycle, soit 2 tours de moteur, s'effectue en 40 ms.

Couse du piston	Phases	Opérations	Schéma
Premier temps du P.M.H. au P.M.B.	Admission	Remplissage des cylindres avec de l'air à pression atmosphérique ou précomprimé.	
Deuxième temps du P.M.B. au P.M.H.	Compression	l'air est fortement comprimé et porté à une température supérieure à celle d'auto – inflammation du carburant (+ de 400 °C). Le rapport volumétrique est très élevé (15/1 à 22/1).	
Troisième temps du P.M.H. au P.M.B.	Inflammation – détente	le carburant est injecté sous pression (100 à 200 bars) en fin de compression. Il s'enflamme spontanément au contact de l'air échauffé. La combustion dure tant que dure l'injection.	
quatre temps du P.M.B. au P.M.H.	Echappement	évacuation des gaz brûlés	

Figure 5 : Fonctionnent du moteur diesel selon le principe du cycle à quatre temps

Délai d'inflammation : le carburant injecté doit s'auto enflammer sous l'effet de l'élévation de température résultant de la forte compression de l'air. En fait, il s'écoule un certain temps entre le début de l'injection et le début de la combustion. Cet intervalle de temps s'appelle le délai d'inflammation.

3.2. Les moteurs à injection directe et les moteurs à injection indirecte

Globalement, il existe deux familles de moteurs à cycle Diesel : les moteurs à injection direct et les moteur à injection indirecte (Figure 6).

- Les moteurs à injection directe. Ils équipent les tracteurs agricoles et routiers, et grand nombre de moteurs industriels de toute puissance : de 0,5kW jusqu'au mégawatt. Sans modifications, ceux-ci n'acceptent pas les huiles végétales naturelles. Alimentés avec des huiles végétales non estérifiées ils connaissent rapidement des problèmes de fonctionnement. Ces problèmes sont la formation de dépôts charbonneux à l'intérieur du moteur (Photo 4) et une forte *dispersion cyclique*[4] pouvant conduire à des dégâts mécaniques parfois importants.

a b

Photo 6 : a)Piston injection directe au fioul
b) aprés 21 heures fonctionnement à l'huile végétale (Photo Cirad)

L'utilisation de mélanges significatifs d'huile végétale et de fioul (contenant plus de 10 % d'huile) ne résout pas les problèmes. L'encrassement existera toujours, seul le temps de formation est fonction du taux d'huile végétale.

[6] Certains cycles connaissent des « ratées » d'allumage. Jusqu'à 1 cycle tous les 50, c'est inaudible sur un moteur 4 cylindres

- Les moteurs à injection indirecte. Ils équipent les véhicules automobiles, les gros moteurs industriels (supérieur au Mégawatt), mais aussi une gamme encore bien fournie de petits moteurs industriels. Ces derniers tolèrent les huiles végétales brutes mais filtrées efficacement.

  Un fonctionnement correct est même à signaler avec les moteurs à chambre de turbulence répandus dans les automobiles de type diesel. Mais les tendances des 20 dernières années les ont rendus minoritaires face aux injections directes moins “gourmands” en carburant.

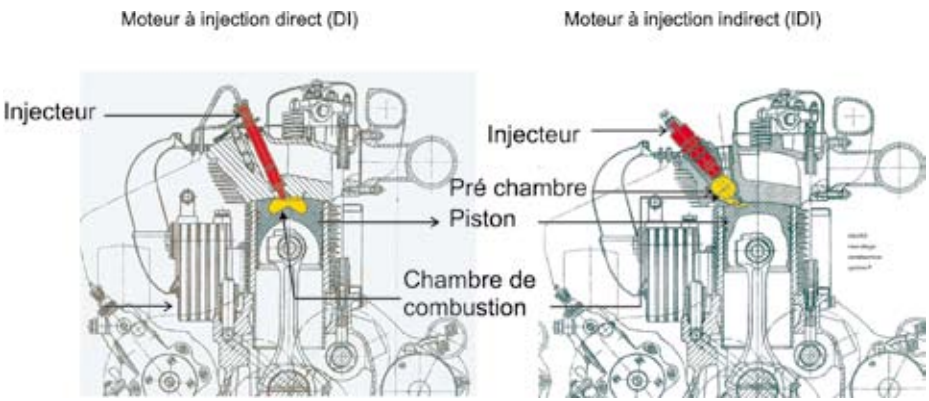


Figure 6 : Shémas des moteur a injection directe et indirecte

L’huile végétale naturelle dans des tracteurs non modifiés : réalité ou mythe ?

Les huiles végétales brutes ou raffinées ne sont pas utilisables en l’état dans des moteurs diesels à injection directe. Ces derniers équipent les tracteurs agricoles depuis plus de 25 ans, or on entend dire que nombre d’utilisateurs emploient depuis longtemps, dans la plus grande discrétion, des huiles de colza ou de tournesol dans leurs propres tracteurs n’ayant subi aucune modification. Qu’en est-il de ces informations ?

Faute de pouvoir accéder à des témoignages vérifiables, rappelons les raisons qui obligent à modifier les moteurs à injection directe.

Lorsqu'ils délivrent jusqu'à la moitié de leur puissance nominale, ces moteurs présentent des températures moyennes de chambre inférieures à 200°C. Or, l'huile de tournesol possède une température de point éclair largement supérieure à celle du fioul : 316°C pour l'huile contre 96°C pour le fioul. Ce qui signifie qu'une part de gouttelettes d'huile ne va pas se vaporiser mais va se « coller » aux parois provoquant des dépôts « goudronneux » semblables à ceux bien connus des friteuses de cuisine. Ces dépôts vont vite s'accumuler sur le nez des injecteurs perturbant ainsi la pulvérisation et dégradant le fonctionnement. Ils vont également se loger dans la gorge du premier segment lui interdisant son élasticité ce qui mène à des grippages et/ou une usure rapide de celui-ci. Il y a perte de compression, difficultés de démarrage à froid et détérioration du rendement (augmentation anormale de la consommation). Si alors la dilution d'huile végétale dans le lubrifiant dépasse 3% il peut y avoir une rapide polymérisation de l'huile de graissage provoquant le grippage total du moteur.

Dans les moteurs diesels à injection indirecte de type « chambre de turbulence », la température moyenne de la préchambre* est d'environ 500 à 600°C dès 10 % de puissance délivrée. Les huiles végétales brûlent complètement.

Enfin, et c'est ce dernier point qui peut faire douter de la véracité des témoignages, les pompe à injection rotatives (Lucas CAV rotodiesel et Stanadyne) qui équipent un très grand nombre de tracteurs agricoles, cassent par temps froid quand le pourcentage d'huile dépasse 35%. Voilà qui aurait dû engendrer une toute autre réputation à l'huile naturelle avant de décourager les plus fanatiques compte tenu des coûts élevés des pompes à injection en pièce détachée.

*: ici il s'agit de chambre « divisée ».

3.3. Problèmes rencontrés lors de l'utilisation de l'huile végétale pure carburant

Parmi les caractéristiques physico-chimiques particulières des huiles végétales, deux d'entre elles influencent directement le bon fonctionnement des moteurs diesels : la viscosité élevée qui pose des problèmes d'ordre

pratique et la composition chimique en acides gras qui entraîne une chaleur élevée d'évaporation et ne permet pas une distillation complète des huiles végétales.

3.3.1. La viscosité

La viscosité des huiles est significativement plus élevée que la viscosité des gazoles à température ambiante ce qui pose des problèmes de pompage et d'écoulement à travers les tuyaux et les filtres. Mais également une détérioration des caractéristiques du jet injecté dans la chambre du moteur. Dans la Figure 7, la zone verte figure la zone de viscosité normalisée pour les équipements diesels. Il est à noter qu'à partir de 83°C l'huile de colza (courbe a) respecte les exigences techniques établies. Un constat similaire peut être fait pour les autres huiles (sauf le ricin qui nécessite des températures supérieures à 150°C). Les températures de réchauffage à atteindre sont fonction de la viscosité de l'huile ou du mélange fioul/huile en présence. Par exemple, le mélange 50 % fioul et 50 % colza (courbe b) ne devra être réchauffé qu'à 62 °C « seulement ».

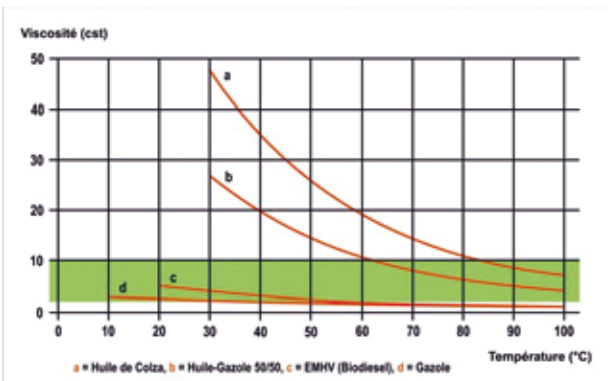


Figure 7 : Viscosité du carburant en fonction de la température (www.huilecarburant.free.fr)

L'ajout d'un réchauffeur et d'une pompe dans le circuit d'alimentation permettra de limiter les problèmes liés à la viscosité des huiles végétales.

3.3.2. Influences de la composition chimiques des huiles

Le délai d'inflammation est plus long pour une majorité des huiles quand la température de la chambre de combustion est inférieure à 500°C (Figure 9). Par ailleurs, la combustion de l'huile, même réchauffée, purifiée et raffinée, ne s'effectue pas complètement ce qui entraîne des pertes de puissance et de rendement et des rejets en CO, NOx et HC plus importants que pour le gazole. Il se produit également une dégradation et un encrassement des nez d'injecteurs, des segments et des cylindres conduisant à des détériorations mécaniques.

Pour des températures de chambre supérieures à 500°C, il est constaté une nette amélioration de comportement de l'huile. Le délai d'inflammation est quasi-identique à celui du gazole. La combustion est complète et les rejets observés peuvent être moins importants que ceux du gazole (Figure 8). Le fonctionnement est proche du fonctionnement au gazole avec des performances équivalentes et des rendements globaux parfois meilleurs.

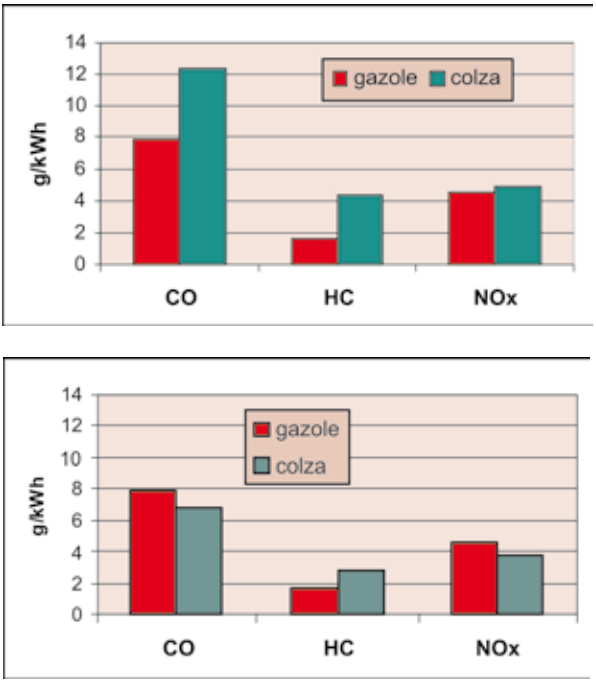


Figure 8 : Gaz rejeté avec a) T<500°C et b) T>500°C, (CIRAD)

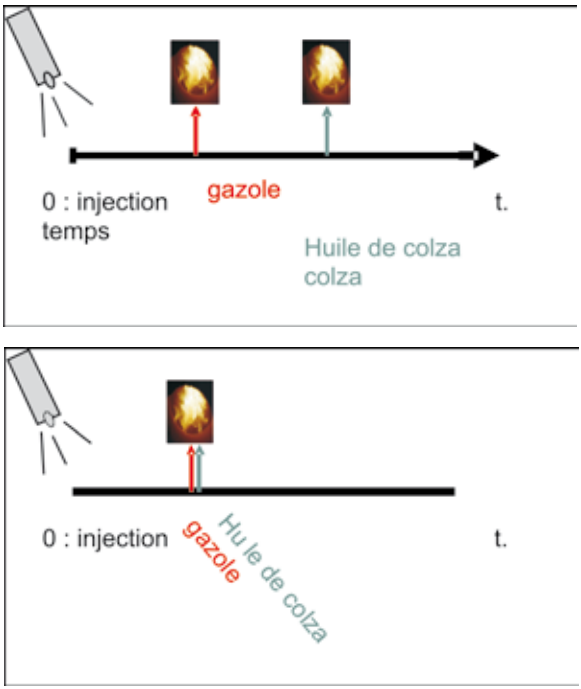


Figure 9 : Délai d'inflammation en fonction du carburant : a) T<500°C et b) T>500°C (CIRAD)

3.4. Modifications des chambres de combustion des moteurs à injection directe:

Si l'on ne veut pas modifier le carburant (estérification par exemple), on peut agir sur les chambres de combustion afin que les conditions de températures lors du fonctionnement permettent une combustion complète des huiles végétales. Mais ces modifications doivent respecter simultanément la conception et l'architecture interne du moteur et les matériaux et les jeux fonctionnels mécaniques. Il faut alors que les températures maximales atteintes restent raisonnables. Ce type de modifications, développées au CIRAD depuis 1990, permet toujours l'usage du fioul et du mélange d'huile/fioul sans pertes de puissance et sans interventions mécaniques supplémentaires. Cet aspect est important et représente un des avantages forts de cette solution. A tout moment les utilisateurs peuvent remplir le

réservoir indifféremment avec de l'huile et/ou du fioul. Les pistons sont modifiés pour recevoir une chambre de forme spéciale en acier réfractaire Après 500 heures de fonctionnement à l'huile de colza, le piston est intact ce qui permet d'augmenter la longévité des pieces du moteur (Photo 5).

Photo 7 : a)Conception CAO des modifications. b)Exemple de réalisation. c)Piston modifié après 500 heures à huile de colza (Photo Cirad)

3.5. Adaptation type « bicarburation » sur les moteurs à injection directe:

Une autre voie sans modifications internes des moteurs est l'adaptation d'un circuit d'alimentation en bicarburation. Ce procédé a été mis en place et appliqué par le CIRAD sur des tracteurs, des camions et des groupes électrogènes. Il consiste à installer un second circuit d'alimentation pour l'huile végétale pure en parallèle à celui du gazole. Sur ce circuit, on trouve en série (Figure 10) :

- un filtre à carburant adapter à l'huile végétale,
- un réchauffeur, pour réduire la viscosité de l'huile et se rapprocher de celle du gazole
- 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 véhicule de fonctionner soit au gazole soit à l'HVP.

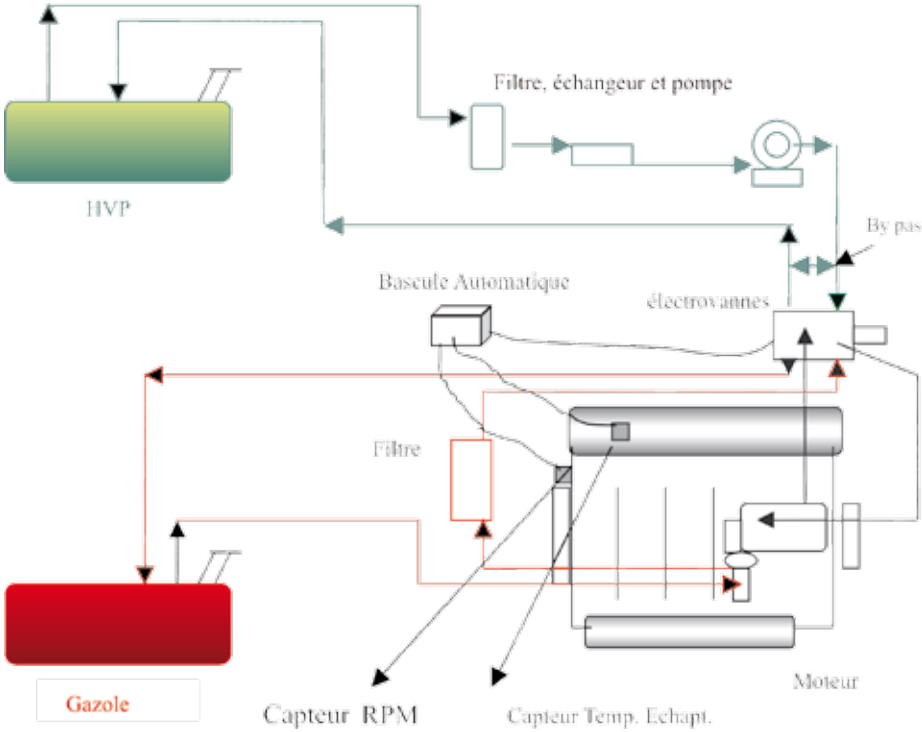


Figure 10 : Schéma des modifications du circuit d'alimentation

3.5.1. Contrôle des conditions de bascule gazole/huile végétale

Le principe de la bicarburation est simple : tant que les chambres de combustion n'ont pas les niveaux de température suffisants pour une bonne combustion de l'huile végétale, le moteur reste alimenter en gazole. Dès que la température des chambres est suffisante le système de bascule pilote l'électrovanne qui alimente alors le moteur grâce au circuit huile végétale.

Le pilotage du système de bascule peut s'effectuer en contrôlant ces deux paramètres ;la température d'échappement et la vitesse de rotation du moteur

- La température de l'échappement

La température des gaz d'échappement est proportionnelle à la température moyenne des chambres de combustion. On peut la mesurer

en plaçant une sonde au niveau de la sortie des chapelles d'échappement dans le flux gazeux.

- La vitesse de rotation du moteur

Elle se mesure grâce à des capteurs de rotation qui seront connectés au système de bascule automatique. Il est à noter que pour des applications à vitesse constante (groupes électrogènes, certains groupes de pompage,…) ce capteur est inutile. La valeur de la vitesse est directement programmée comme constante dans le système de bascule.

3.5.2. Importance de la charge[5] du moteur sur la bascule gazole/ huile végétale

La figure 11 présente les courbes de puissances mesurées sur un moteur diesel à injection directe.

- La courbe supérieure relie les points de puissance maximale pour différentes vitesses de rotation du moteur, elle est appelée « courbe enveloppe à pleine charge ».
- La courbe inférieure relie les points de puissances intermédiaires pour différentes vitesses de rotation, elle est appelée « courbe de puissances à charge partielle ». Il est possible de tracer de nombreuses « courbes à charges partielles » qui s'intercaleront entre puissance « nulle » et « l'enveloppe à pleine charge ». Mais celle-ci est particulière : elle relie des points de puissance à différentes vitesses où la température d'échappement en sortie de culasse est d'environ 500°C. Pour chaque vitesse de rotation, tout point en dessous de cette courbe affichera une température d'échappement inférieure à 500°C car la quantité de carburant brûlée sera insuffisante pour l'atteindre.
- Par contre, tout point compris entre les deux courbes correspondra à des températures supérieures à 500°C où il sera donc possible d'injecter de l'huile végétale sans souci de combustion.

Pourcentage de la puissance d'un moteur pour une vitesse de rotation donnée.

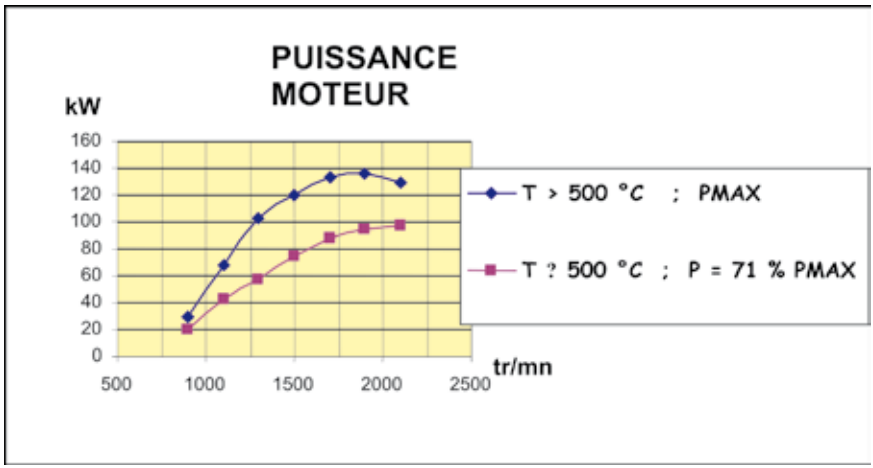


Figure 11 : Enveloppe de pleine charge et courbe à charge partielle sur un moteur à injection directe. Graphique CIRAD

Par exemple, une vitesse de rotation égale à 1800 tours par minutes represente 71 % de la puissance maximale (ou 71 % de charge). Ce qui signifie que le moteur ne fonctionnera à l'huile végétale que lorsque la puissance demandée au moteur dépassera 71 % du maximal de puissance à cette vitesse de rotation (à 1500 tr/mn, c'est à 65 % de la puissance maximale que le passage à l'huile s'effectuera).

Ce qu'il faut retenir :

Il est possible de résoudre les difficultés d'usage pratiques des huiles végétales en les réchauffant afin de ramener leur viscosité dans des valeurs proches de celles des produits pétroliers.

Une fois la viscosité de l'huile ou du mélange ramenée dans les valeurs acceptées par les équipements d'alimentation des moteurs, il demeure les problèmes de combustion incomplète dus à la nature chimique différente des huiles vis-à-vis des fiouls et gazoles.

Il apparaît que si la température moyenne de la chambre de combustion est suffisamment élevée, les huiles végétales courantes brûlent complètement avec de bons rendements globaux et des niveaux d'émissions polluantes similaires à celles des gazoles.

Il y a plusieurs façons de s'assurer d'un niveau de température suffisant des chambres de combustion dans les moteurs à injection directe.soit par modifications mécaniques des pistons et de pièces internes au moteur, soit sans modifications mécaniques mais en utilisant un fonctionnement en bicarburation.

4. Performances et pollution comparées entre huile végétale et fioul dans les moteurs diesels modifiés

La quasi-totalité des tracteurs agricoles et des moteurs à poste fixe sont à injection directe. Il conviendra donc de les modifier pour qu'ils puissent utiliser de l'huile végétale naturelle comme biocarburant en circuit court d'autoconsommation. Ces modifications ont un impact sur les performances et la pollution des gaz d'échappement. Des tests comparatifs ont été réalisés sur deux tracteurs modifiés de marque New Holland et John Deere. Les résultats montrent une augmentation de la longévité des moteurs fonctionnant à l'huile de tournesol et l'entretien est le même qu'au fioul. Ceci a été vérifié par plusieurs cotations effectuées selon la procédure CEC M-02-A-78 à la demande du Cirad.

Photo 8 : Tracteurs avec moteur à injection direct modifié. Huile de tournesol, France, 2001 (Photo Cirad)

4.1. Performances comparées

Les puissances obtenues sont très proches (Figure 12) . A puissance égale on observe une augmentation de la consommation horaire de 5 % en volume. Ceci est directement dû au plus faible pouvoir calorifique de l'huile de tournesol. Les rendements des moteurs sont améliorés avec le tournesol.

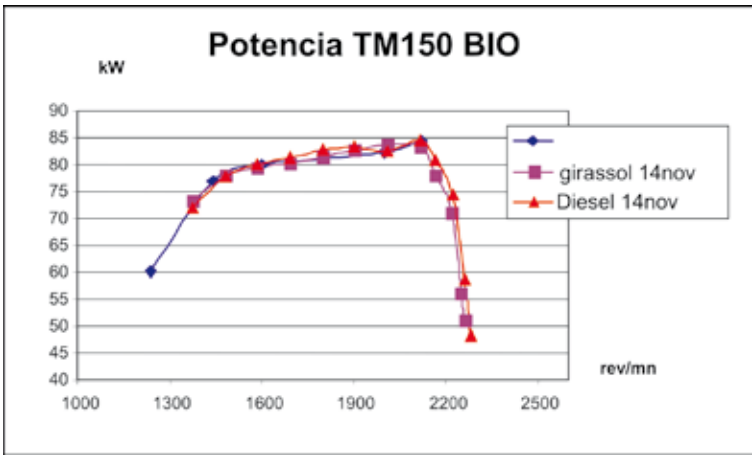


Figure 12 : Puissance comparée entre fioul et huile de tournesol Tracteur New Holland TM150.

4.2. Pollution comparée

Deux tracteurs modifiés et deux tracteurs non-modifiés sont comparés. Les analyses des produits toxyques CO, HC et NOx ont été réalisées sur les deux tracteurs modifiés. Les resultats sont comparables et très proches de ceux obtenus avec le fioul (Tableau 3). Les tracteurs respectent les limites de polluants imposées par les normes européennes d'homologation définis par les directives de l'ISO 8178 et les facteurs de pondération du cycle C1.

Tableau 3 : Comparaison des émissions gazeuses au couple maximal et régime correspondant pour le tracteur New Holland TM 150 modifié.

Tracteur N°	TM150 orig. fioul	TM150 BIO tournesol
N tr/mn	1350	1456
Puissance. kW	81.4	75.4
Puissance ch	110.6	102.4
Consommation en carburant l/h	23.4	24.0
Température air admis °C	21	22
Température échappement °C	383	435
CO ppm	1218	960
CO2 %	8.6	8.0
HC ppm	53	82
O2 %	9.1	10.0
NOx ppm	1530	1450
Excès air	0.79	0.93

Tableau 4 : Comparaison des émissions gazeuses au couple maximal et régime correspondant pour le tracteur John Deere 7710 modifié.

Tracteur N°	JD 7710 orig. fioul	JD 7710 BIO tournesol
N tr/mn	1304	1302
Puissance. kW	110.2	102.2
Puissance ch	149.7	138.9
Consommation en carburant l/h	27.8	25.9
Température air admis °C	20	22
Température échappement °C	608	609
CO ppm	2143	692
CO2 %	10.1	9.7
HC ppm	53	59
O2 %	7.3	7.8
NOx ppm	1246	1324
Excès air	0.54	0.59

Ce qu'il faut retenir :

- L'utilisation des huiles végétales carburants nécessite parfois des modifications importantes sur les moteurs et les circuits d'alimentation. La modification des moteurs à injection directe rend possible l'utilisation d'huiles végétales pure en substitution des fiouls. Il est aussi possible d'adapter des systèmes de bicarburation permettant l'utilisation d'une part significative d'huile végétale sans avoir à modifier les parties internes des moteurs. Il faut rappeler que le bon fonctionnement du moteur dépend également de la qualité du carburant.
- Les performances sont identiques et les emissions gazeuses respecte les limites imposées par les normes européennes d'homologation définis par les directives de l'ISO 8178 et les facteurs de pondération du cycle C1.
- La longévité des moteurs est accrue quand ils utilisent les huiles végétales naturelles.

5. Utilisation des huiles végétales pures dans les brûleurs

5.1. Utilisation des HVP dans les brûleurs :

Les caractéristiques énergétiques des huiles végétales sont suffisamment proches de celles du fioul pour que l'on puisse s'attendre à une substitution aisée dans un brûleur.

Tableau 5 : Caractéristiques physico-chimiques utiles à la prédiction des performances globales

	Gazole	Huile de coton	Huile de coprah
Densité (kg/dm3) 20°	0.836	0.921	0.915
Pouvoir Calorifique Inférieur (kJ/kg)	43800	36400	37950
Indice de Cétane	50	34	41
Composition chimique (% masse)			
C	85.1	76.7	73.1
H	14.9	11.8	12.0
O	-	11.4	14.8
Formule globale	C21H44	C17.94H33.1802	C13.17H2602

Les caractéristiques physico-chimique des HVP vis à vis du fioul impose une adaptation des chaudières et/ou une modification des brûleurs afin d'optimiser la combustion et éviter l'encrassement dans les parties "froides". Les brûleurs pour fioul "lourd" se prêtent mieux à l'usage des HVP. Mais on ne les trouve généralement que dans des puissances comprises entre 300 kW et 1000 kW. Des études en conditions réelles de brûleurs de moyenne puissance (de 150 à 400 kW) modifiés pour les HVP ont été réalisées par le Cirad. Les résultats ont montré qu'il est possible de les utiliser jusqu'à 100 % d'HVP. Quelques constructeurs ont déjà commencé à s'engager sur ce créneau de moyenne puissance. Dans les petites puissances (< 50 kW), les résultats sont plus dispersés et moins fiables. Seuls quelques modèles ont faits leur preuve mais dans des puissances de 50 kW et plus. Dans la gamme 20 à 30 kW, ce qui correspond aux installations domestiques individuelles, il y a peu d'unité en fonctionnement.

5.2. Principe de fonctionnement des brûleurs modernes :

Un jet pulvérisé de carburant est assuré grâce à une pompe volumétrique mécanique, il est accompagné d'un flux d'air de combustion contrôlé respectant la quantité d'air nécessaire à la combustion complète de la quantité de carburant augmenté d'un excès d'air prédéterminé (3 à 5 % d'oxygène supplémentaire).

Tableau 6 : Pouvoirs comburivores comparés (sans excès d'air).

	Gazole ou FOD	Huile de coton	Huile de coprah
Pco pouvoir comburivore g.air/g.carb.	14.84	12.35	11.86

Le jet est assuré par un gicleur choisi pour son débit à une pression déterminée et en fonction de la géométrie de la chambre de combustion. Généralement, un moteur électrique entraîne la pompe de pression et le ventilateur d'air de combustion. Un système de contrôle/commande assure le fonctionnement et les mises en sécurité du brûleur. La plupart des brûleurs, en particulier les petits brûleurs domestiques, utilisent les mêmes organes (pompes, ventilateurs, boîtiers de contrôle) provenant de quelques équipementiers.

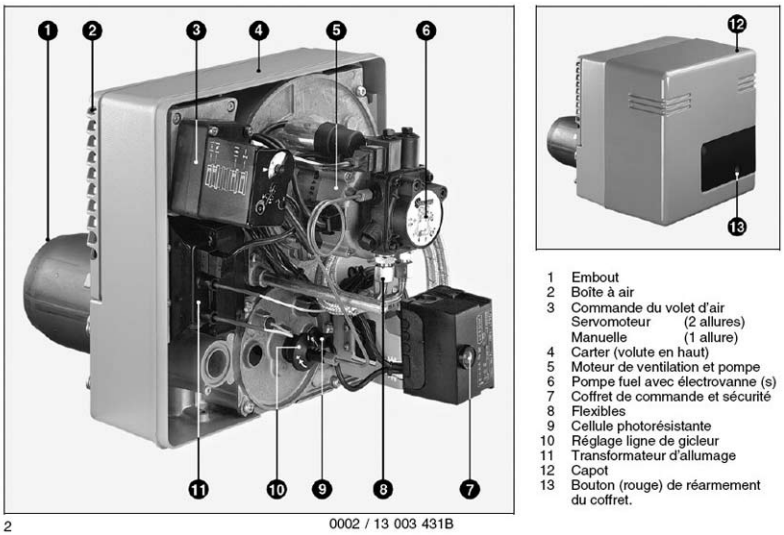


Photo 9 : Bruleur de chaudière (Document Cuenod)

5.3. Adaptations des brûleurs pour utiliser des HVP :

La viscosité des huiles végétales a une forte influence sur le fonctionnement des brûleurs. Ceci a pour conséquence la nécessité de régler spécialement ces derniers voire de changer certains éléments tels que les gicleurs. Mais, quelle que soit la taille du brûleur, il reste à vérifier, une fois les exigences technologiques remplies, si la combustion des huiles végétales est complète et quelles sont les performances globales et la pollution émise, comparées au fonctionnement gasoil.

5.3.1. Exemple avec l'huile de Palme Brute et brûleurs : problèmes rencontrés et modifications à effectuer

- Pour une incorporation de 25 à 30% d'HVP, il faut réchauffer le mélange sinon l'allumage ne se produit lors de l'injection.
- Les mélanges jusqu'à 50% sont utilisables s'ils sont réchauffés à 80 °C et homogénéisés. La pression de pulvérisation en sortie de pompe doit être augmentée de 10-11 à 15-16 bars.

- Pour des mélanges de 50 à 75 % d'huile de palme il est nécessaire de réchauffer le combustible à 100°C. La pression de pulvérisation en sortie de pompe doit être remontée à 18-20 bars.
- Pour des taux supérieurs à 75 % et jusqu'à 90 % d'huile, il est possible d'obtenir un fonctionnement correct avec une température de mélange de 120°C et une pression de pulvérisation de 20 bars.
- A 100 % d'huile, la température doit être de 140°C et la pression de pulvérisation en sortie de pompe de 25 à 30 bars. Il apparaît généralement qu'après la seule intervention en réglages (140 °C pour l'huile et 30 bars de pression), les premiers essais à 100 % montrent un démarrage totalement fiabilisé, des teneurs en polluants des fumées bien en dessous des normes admises en Europe avec cependant un encrassement rapide du foyer et un « gouttage » de la tête de combustion. Il faut alors redéfinir un modèle de gicleur mieux adapté, re-concevoir le déflecteur d'air et redéfinir les réglages d'admission d'air.

5.3.2. Les problèmes d'encrassement :

Sur la plupart des modèles de brûleurs, le déflecteur d'air (partie froide car ventilée en permanence) s'encrasse. Le détecteur de flamme (cellule photoélectrique) n'est plus sensible à la lumière émise par la flamme et arrête le fonctionnement du brûleur par sécurité d'absence de flamme. Pour exemple, ces arrêts se produisent tous les 4 à 5 jours avec un mélange 50/50 colza/fioul (Photo 7).

Photo 10 : Déflecteur d'air après 4 jours à 50/50, tournesol/fioul (à droite : après nettoyage) (Photo Cirad)

Par ailleurs, si trop de gouttelettes échappent à la combustion on va les retrouver sous forme de produits partiellement polymérisés sur les parois les plus « froides » des échangeurs de chaleur (les tubes de fumées par exemple) ce qui va rapidement diminuer leur capacité d'échange. On retrouve ici les problèmes rencontrés dans les chambres des moteurs diesels quand ils sont utilisés à des charges insuffisantes.

5.4. Performances et pollution comparées entre fioul et Huiles végétales

Nous avons reporté dans le Tableau 6 les résultats comparés, après optimisation des réglages, des performances et des émissions sur brûleurs de petite et moyenne puissance.

Tableau 7 : Brûleur Riello N10 (34 à 100 kW), 100% coton (essais Cirad 2007)

Type de Combustible	100% Coton	Fioul
CO2 %	8.3	9.3
CO mg/kWh	13	1
O2 %	9.9	8.3
NO mg/kWh	125	113
NOx mg/kWh	130	118
SO2 ppm	0	74
TEMP. FUMEES °C	705	662
TEMP. AMBIANTE °C	22	22

Pression en sortie de pompe :18 bars. Température du mélange : 40°C

Des essais ont porté sur un brûleur C22.2 (160 à 240 kW) modifié par le Cirad et Iribiom. Des locaux de la mairie d'Orléans ont été chauffés pendant 3 mois uniquement à l'huile de colza..

Tableau 8 : brûleur Cuenod C22.2, application en chauffage collectif, 100 % huile de colza (essais Cirad/Iribiom 1996).

Type de Combustible	100 % Colza	Fioul
CO2 %	11.2	10.7
CO mg/kWh	4.8	1.3
O2 %	6.2	6.4
NO mg/kWh	71	93
NOx mg/kWh	74	98
SO2 ppm	0	21
TEMP. FUMEES °C	228	236
TEMP. AMBIANTE °C	23	19

Pression en sortie de pompe :30 bars. Température de l'huile de colza : 140°C

Rappel : les limites selon EN267 sont : CO < 110 mg/kWh ; NOx < 185 mg/kWh.

5.5. Aperçu des brûleurs HVP disponibles sur le marché :

- Riello : modèles adaptés aux HVP et garanti de 34 à 1000,kW, http://www.riello.fr
- Raps Heizung (HPO) : modèles de 40 à 90 kW, http://www.raps-heizung.de
- Kroll : modèles de 50 à 200 kW, http://www.kroll.de

Photo 11 : Brûleur spécial huiles végétales Riello/Cirad ; 300 à 1100 kW
Huile de palme brute, Cameroun, 2007.
(Photo Cirad)

Photo 12 : Brûleur spécial Riello/Cirad ; 34 à 110 kW
Huile de coton brute, 2007.
(Photo Cirad)

Ce qu'il faut retenir :

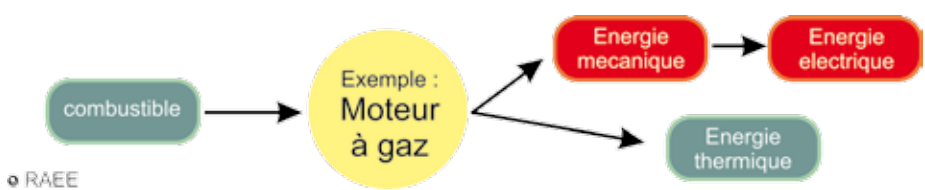
- Les caractéristiques physico-chimique des HVP vis à vis du fioul impose une adaptation des chaudières et/ou une modification des brûleurs afin d'optimiser la combustion et éviter l'encrassement dans les parties "froides".
- Les brûleurs pour fioul "lourd" se prêtent mieux à l'usage des HVP.
- La viscosité des huiles végétales a une forte influence sur le fonctionnement des brûleurs. Il faut alors redéfinir un modèle de gicleur mieux adapté, re-concevoir le déflecteur d'air et redéfinir les réglages d'admission d'air.

6. La petite cogénération à l'huile végétale

6.1. Principe

La cogénération, n'est pas une invention récente puisqu'elle date de 1824. Elle est le résultat des avancées remarquables réalisées dans le secteur de la thermodynamique et de l'électricité qui ont eu lieu à cette époque.

La cogénération est la production simultanée de chaleur et d'énergie mécanique, généralement transformée en électricité, à partir d'une même source d'énergie primaire. Prenons l'exemple d'une installation de cogénération utilisant un moteur à combustion interne (technologie la plus répandue pour les installations de petite cogénération). Il s'agit d'un moteur classique, dérivant directement de ceux des véhicules « routiers » pour les cogénérations de petite puissance, alimenté au diesel ou au gaz naturel. Celui-ci entraîne un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en électricité. La chaleur contenue dans les gaz d'échappement, dans l'eau de refroidissement et dans l'huile de lubrification, est récupérée pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire.



6.2. Les champs d'application de la cogénération :

Les applications de la cogénération concernent aussi bien le secteur industriel que les collectivités ou le secteur tertiaire. La chaleur peut être utilisée sous forme de vapeur ou d'eau chaude, pour des usages industriels ou collectifs (par exemple chauffage urbain par réseau de chaleur, production de « froid » par systèmes frigorifiques à absorption) ou sous forme d'air chaud (par exemple des processus industriels de séchage). Cependant, il faut que les installations de cogénération soient proches des sites de consommation de chaleur, du fait des difficultés liées au transport de celle-ci, qui ne peut se faire que sous forme de fluide à haute température. L'électricité et la chaleur produites peuvent être consommées pour les besoins propres du site et/ou commercialisées. Le champ d'application de la cogénération est très vaste et on peut citer entre autres :

- Industrie : besoin d'eau chaude ou d'air chaud important et forte consommation d'électricité (unités de séchage pour l'agroalimentaire, papeterie, chimie,…)
- Tertiaire (banques, immeubles de bureaux, centres commerciaux, …)
- Secteur para-public (hôpitaux, maisons de retraite, habitat collectif, aéroports …)
- Collectivités (piscines, réseaux de chaleur, bâtiments des communes, …)

6.3. La petite cogénération à l'huile végétale

Le pétrole et le gaz naturel sont des énergies fossiles et leur consommation entraîne un rejet direct de CO2 dans l'atmosphère. Ces ressources sont limitées et leur coût va croître irrémédiablement dans les décennies à venir. Parmi les sources d'énergies alternatives, l'huile végétale figure en bonne position. Produite à partir de graines oléa-gineuses (colza ou tournesol par exemple), elle s'inscrit dans un cycle naturel durable puisque le CO2 émis lors de la combustion est fixé par la plante lors de sa croissance. Le bilan global d'émission de CO2 (culture, pressage et transport compris) est 6 fois moindre que pour le mazout de chauffage. La cogénération, par son rendement combiné très élevé (jusqu'à 92%) permet

de valoriser cette précieuse énergie en chaleur et en électricité de manière optimale.L'huile "qualité carburant" doit répondre à la norme allemande DIN51605 ou RK Standard 02/2000.

Les défis liés à l' HVP sont ceux décrit précédemment :

- Diminuer la viscosité de l'huile (pré chauffage), augmenter la température de combustion (choix moteur, réglages, régime de fonctionnement)
- Optimiser l'injection (forme des injecteurs, pression d'injection)
- Eviter la polymérisation de l'huile de lubrification (choix d'une huile de lubrification à base végétale
- Faire tourner une cogen à l'huile végétale quelques centaines d'heures est facile. En garantir la disponibilité pendant 70.000 heures demande une véritable maitrise technologique, non seulement du moteur, mais également des tous les composants annexes

Le Tableau 8 donne les valeurs des emissions de gaz polluants pour une unité de 20 kW avec pot catalytique: niveau d'émission Ta Luft 2002 équivalent à vlarem 2

Tableau 9 : emissions de gaz polluants pour une unité de 20 kW (COGENGreen)

Valeurs	ecoGen 20 AH	Ta Luft 2002
NOx (mg/m3)	960	< 1000
CO (mg/m3)	40	< 300
Particules (mg/m3)	15	< 20

Exemple de fiche technique du module ecoGEN25-AH, Fabricant : COGENGREEN

Puissances

Module avec alternateur asynchrone pour la production de courant triphasé 400 V, 50 Hz , d'eau chaude à 90/70 °C, à partir d'huile végétale répondant à la norme DIN51605. Respect du niveau d'émissions de la norme TA-Luft (2002) .Puissances pour une altitude d'installation de 400 m et une

température de l'air de de 20 °C. Les valeurs de puissance sont diminuées de 1% tous les 100m d 'altitude et de 2% tous les 5°C au dessus des valeurs de référence. Les rendements annoncés sont susceptibles de diminuer de 2% sur la période allant de la mise en service à la révision complète (25.000 heures).

Puissance électrique – couplé réseau :	P=25 kW (+/- 1%)
Puissance thermique :	P=44 kW (+/- 2,5 %)
Consommation :	8,1 l/h (PCI =9,528 kWh/litre) (+/- 2,5 %)
Puissance élec. consommée par les périphériques :	P=800W (+/- 5 %)

Moteur avec accessoires:

• Type de moteur :	KUBOTA V 3300 T BG
• Procédé de combustion :	moteur diesel à combustion interne
• Mode de fonctionnement :	4 temps
• Nombre de cylindres :	4 en ligne
• Alésage, course :	98/110 mm
• Cylindrée :	3,318 dm3
• Vitesse :	1500 tours/minute
• Rapport de compression :	22 : 1
• Puissance continue svt. ISO3046 :	32,1 kW

Description du moteur : (y compris modifications)

- soupapes mécaniques disposées suspendues, pour chaque cylindre une soupape d'admission et une soupape d'échappement.
- guides de soupapes d'échappement graissés à l'huile sous pression, tige de commande de soupapes en métal dur.
- un collecteur des gaz d'échappement et un turbocompresseur sur les gaz d'échappement refroidi à l'eau (intercooler eau/air) .
- pompe à engrenages pour graissage par circulation sous pression, filtre à huile tandem sur le courant principal et refroidissement par refroidisseur d'huile .

- dispositif automatique de maintien du niveau de l'huile de graissage.
- aspiration d'air dans la salle des machines à travers des filtres secs.
- circuit fermé de refroidissement à eau glycolée avec pompe de circulation monophasée 230V (consommation 190 W), soupape de sûreté et vase d'expansion , pour le refroidissement du moteur.
- collecteur de gaz d'échappement et conduite de gaz d'échappement refroidie à l'eau vers l'échangeur de chaleur des gaz d'échappement.
- démarreur électrique 12 V, 2,5 kW.
- pompe d'injection en ligne BOSCH 4M Mini pump.

Alimentation en huile végétale

- Pompe électrique à engrenages. Débit max : 12 litre/h.
- Diamètre des conduites d'alimentation : DN12
- consommation en 220V : 35 W

Emissions polluantes

TA Luft 2002 pour moteurs stationnaires à combustibles liquides. Valeurs d'émission rapportées à 5 % de O2 dans les gaz d'échappement, pour la puissance nominale:

NOx < 1000 mg/Nm3 et CO < 300 mg/Nm3

Carburant

Caractéristiques de l'huile végétale :

- suivant DIN51605

Production de chaleur

Données de dimensionnement pour installations de chauffage à eau chaude:

- Puissance thermique modulante 22 / 44 kW
- Température retour vers le module min./max. 50/70 °C

• Débit variable piloté par la régulation :	0 / 2,2 m3/h
• Pression de service maximum admissible :	6 bar
• Perte de charge de l'échangeur à plaques intégré :	0.5 bar

Capacités de remplissage

• Capacité en huile de lubrification :	25 litres
• Réservoir d'huile d'appoint :	15 litres
• Eau de refroidissement du circuit primaire :	19 litres

Dimensions et poids

• Longueur	2070 mm
• Largeur :	800 mm
• Hauteur :	1370 mm
• Poids en service :	1400 kg
• Admission et retour de chauffage :	R 1 1/4''
• Gaz d'échappement (bride) :	DN 54
• Huile végétale	DN 12

Liste de fabricants Européens de modules HVP: non exhaustive

KW Energie Technik , Germany, www.kw-energietechnik.de

NET Neue Energie Technik , Austria, www.neue-energie-technik.net

COGENGREEN, Belgique, www.cogengreen.com

Ce qu'il faut retenir :

La technique de cogénération, qui consiste à récupérer cette chaleur via des échangeurs thermiques, augmente l'efficacité énergétique de l'installation.

Elle permet ainsi d'exploiter au maximum le potentiel énergétique du combustible et d'atteindre des rendements globaux (électricité + chaleur) de 80 à 90 % contre 35 à 40 % pour une installation classique de production d'électricité et 55% pour un cycle combiné au gaz.

Les défis liés à l' HVP sont

- Diminuer la viscosité de l'huile et augmenter la température de combustion
- Optimiser l'injection
- Eviter la polymérisation de l'huile de lubrification
- Garantir et maitriser la technologie

7. Exemples de réalisations et perspectives

Les huiles végétales et leurs dérivés (Biodiesel,…) font partie des solutions de remplacement et de complément des produits pétroliers. Elles sont par nature des substituts des fiouls et gazoles. Les rendements globaux sont plutôt meilleurs que les gazoles. Leur champs d'application est actuellement essentiellement local et/ou régional car les quantités d'huiles produites ne représentent que quelques pourcents des quantités de carburants pétroliers consommés. L'huile de palme, par exemple, voit sa production croître de 8 % chaque année à des fins alimentaires avec 38 millions de tonnes annuelles (Figure 13)

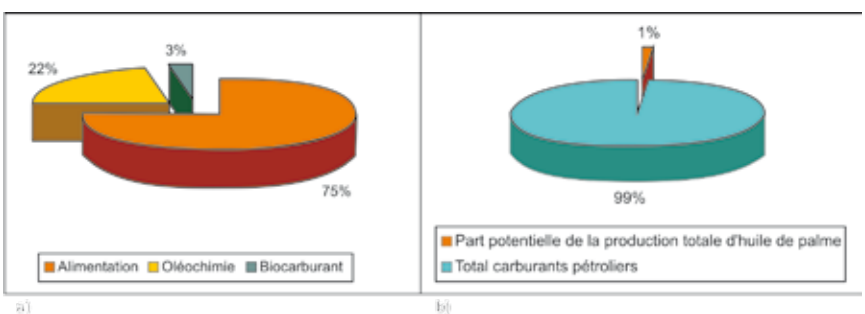


Figure 13 : a) Production annuelle mondiale d'huile de palme et de palmiste37,6 millions de tonnes b) Consommation annuelle mondiale de pétrole pour les transports2 482 millions de tonnes équivalent pétrole

7.1. Exemples d'utilisation

Plusieurs exemples peuvent illustrer l'intérêt des HVP en usage local : l'utilisation en agriculture pour une autonomie en combustible, la relance d'activités alliée à une indépendance énergétique dans un contexte insulaire.

- **L'utilisation d'huile de tournesol comme carburant des tracteurs agricoles** a été évoquée et illustrée dans les chapitres précédents. L'opération menée dans le sud-ouest de la France consistait à produire de la graine de tournesol, à en extraire l'huile ceci avec des engins et des équipements utilisant cette même huile comme seule source de carburant. Les bilans sur trois années sont les suivants :

  Par hectare de tournesol :

  - Quantité d'huile végétales produite en moyenne : 1000 litres
  - Quantité d'huile végétales carburant utilisée pour le cycle cultural* : 100 litres
  - Quantité d'huile végétale carburant utilisée pour sécher les graines** : 9 litres
  - Quantité d'huile végétale carburant utilisée pour produire l'huile*** : 26 litres

  Le bilan moyen exprime la possibilité de produire 866 litres d'huile de tournesol alimentaire par hectare en toute autonomie en carburant.

  ** : tracteurs modifiés et alimentés avec l'huile de tournesol,*

  *** : séchoir équipé d'un brûleur modifié et alimenté avec l'huile de tournesol,*

  **** : presse et chauffoir électrique alimentés grâce à un groupe électrogène utilisant l'huile de tournesol produite.*

a)

b)

c)

Photo 13 : a)Tracteur 150 Hp. modifié, b)Flamme de combustion dans le séchoir, c) groupe 9 KVA alimentant la presse à huile : tous utilisant l'huile de tournesol comme seul carburant. (Photos Cirad)

- **L'exemple d'Ouvéa, Iles Loyauté, Nouvelle Calédonie.**

En général, les petites îles ne possèdent pas le marché intérieur suffisant pour initier une production locale qui puisse bénéficier d'une économie d'échelle. Sur l'île d'Ouvéa, l'activité traditionnelle de production de coprah a été abandonnée à la fin des années quatre vingt. Elle a repris grâce à l'installation d'une huilerie Coopérative en fin 1991. L'huile produite sert à la fabrication de savons mais aussi à :

- un groupe électrogène de 80 KVA, fonctionnant à l'huile de coprah, qui alimente l'huilerie en électricité. Sa consommation horaire est de 15 litres quand l'huilerie produit 150 litres d'huile par heure.
- deux motopompes de 5 kW modifiées en fonctionnant à l'huile de coprah pour la distribution publique d'eau potable.
- un véhicule municipal à l'huile de coprah.
- un groupe de puissance de 200 KVA fonctionnant à l'huile de coprah et fournissant l'électricité à l'usine de déssalement d'eau de mer de l'Ile.
- un groupe de 45 KVA alimentant des installations municipales,
- un groupe de 300 KVA installé dans la centrale de production d'électricité de l'Ile et fonctionnant à l'huile de coprah depuis 2004 selon le principe de bi-carburation exposé au chapitre 3.

Le bilan fait ressortir que le total d'huile de coprah consommé par ces groupes et engins représente 400 tonnes de coprah par an ce qui amène des revenus à 120 coopérateurs et leurs familles tout en évitant l'importation de 200 000 litres de gasoil et la production de 640 tonnes de CO2 fossile.

7.2. Perspectives :

Face au développement obligatoire de nouveaux carburants renouvelables comme les de « seconde génération » issus de procédés de gazéification suivi de catalyse, quelle place restera-t-il aux HVP ? Ces dernières, longtemps considérées comme des solutions « historiques » donc du passé, ont-elles des perspectives face à la modernisation des motorisations

Diesel et à une compétition annoncée entre cultures énergétiques et cultures alimentaires ?

- En matière de recherche d'une meilleure qualité d'huiles végétales carburant, des travaux sont entrepris pour étendre les spécifications établies pour le colza aux autres huiles et en particuliers aux huiles tropicales. En effet, la prénorme Allemande DIN 51 605 sur la qualité de l'huile de colza comme carburant fixe, comme pour les produits pétroliers, une teneur maximale en sédiments de 24 ppm. Il est alors nécessaire d'établir un protocole permettant de définir avec précision les teneurs en sédiments des HVP.

  Les protocoles ISO 663 (analyse des corps gras d'origines animales et végétales) et ISO 12 662 (analyse des produits pétroliers liquides) montrent des lacunes dans l'analyse des huiles végétales pour moteur diesel. Les résultats n'étant pas fiables, le Cirad travaille à la mise en place d'un nouveau mode opératoire tenant compte de la viscosité plus importante de la plupart des huiles par rapport aux produits pétroliers et des points de fusion très élevés de certains acides gras. Ceci pourrait déboucher sur un « cahier de spécifications » incluant différentes fiches par groupes d'huiles végétales ou animales.

- Les nouveaux systèmes de contrôle d'injection Diesel rendent plus exigeante la « préparation » du carburant : tolérance de filtration abaissée à 1 μm, viscosité faible. Les plus répandus sont les « common rail »(Figure 14). Les réglages ajustés pour les fiouls et gazoles ne sont plus adéquats pour les huiles plus visqueuses à température égale. Il faut soit augmenter significativement la température des HVP, soit modifier les paramètres de pilotage électroniques. En revanche, si ces adaptations sont faites, les hautes pressions d'injection des systèmes « common rail » ajoutées au pilotage des masses injectées sont plus favorables aux HVP que les systèmes classiques d'injection. Pour ces applications, les systèmes de bicarburation décrits précédemment s'adaptent bien. Il faut s'assurer d'un bon préchauffage des HVP et de la présence d'une pompe de gavage permettant des pressions de 3 à 6 bars avec des débits en accord avec le système « common rail » installé (exemple : 300 litres/heures pour du 200 kW Bosch). Le pilotage des passages de gazoles à HVP se faisant correctement grâce à un système de bascule électronique.

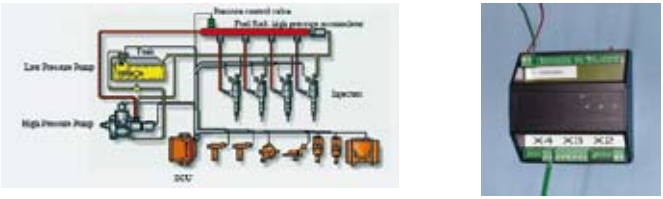


Figure 14: Système Common Rail Bosch
(doc. Bosch)

Le développement d'autres sources d'huiles végétales que celles utilisées pour le marché alimentaire et agroindustriel classique pourrait ouvrir de nouvelles perspectives aux « HVP carburant » produites et utilisées localement.

- Le Jatropha curcas qui produit une huile non alimentaire, car contenant une toxine, pourrait faire l'objet de sélection et d'amélioration variétale. Car si cette plante s'accommode bien en conditions semi-arides sa production décroît avec les quantités d'eau disponibles annuellement. Des pays comme l'Inde, le Bukina Faso et d'autres entament des travaux plus orientés vers l'agronomie et les systèmes de culture du Jatropha que vers les utilisations de l'huile qui par ailleurs ont été étudiés en détails par le Cirad dans les années 90.

- La production de biocarburants lipidiques par des microalgues. Produire un biocarburant sous forme d'huiles ou d'ester de méthyl à partir de microalgues autotrophes est possible. Ces microorganismes peuvent accumuler des acides gras jusqu'à 80% de leur poids sec permettant d'envisager, en théorie, des rendements à l'hectare supérieurs d'un facteur 30 aux espèces oléagineuses terrestres.

  On estime entre 200 000 et plusieurs millions le nombre d'espèces d'algues existantes, une telle diversité non exploitée constitue un réel potentiel pour la recherche et l'industrie. Comparativement aux espèces oléagineuses terrestres, ces microalgues présentent de nombreuses caractéristiques favorables à une production d'acides gras :

- Rendements de croissance et par conséquent des productions à l'hectare supérieurs aux espèces oléagineuses terrestres (de 20 à 75 m3 d'huile par hectare et par an selon les sources).
- Rendement photosynthétique beaucoup plus élevé
- Plasticité métabolique bien plus importante permettant plus facilement d'orienter la bioproduction vers certains acides gras
- Maîtrise du cycle de l'azote et du phosphore en contrôlant le recyclage des éléments nutritifs
- Pas d'apport de phytosanitaires
- Nombreux sous-produits valorisables
- Technologie exploitable dans les pays en voie de développement

Le succès de ce type de production pourrait contribuer à l'usage des HVP tout en ménageant les terres vivrières traditionnelles. L'autre intérêt est la possibilité de sélectionner les algues en fonction de la composition en acides gras attendue. Ces recherches se développent dans les pays développés et le Cirad est partenaire d'un projet de l'Agence Nationale de la Recherche intitulé : « Shamash ».

Références Bibliographiques

- Ouvrages et publications :

BATTAIS Liliane, DEFAYE Serge et VAITILINGOM Gilles
« Perspectives de développement de l'utilisation des huiles végétales pures hors utilisation biocarburant », Ademe Aquitaine, France, juin 2006.

BIGOGNO C., KHOZIN-GOLDBERG I., et al.
"Lipid and fatty acid composition of the green oleaginous alga Parietochloris incisa, the richest plant source of arachidonic acid." Phytochemistry 60(5): 497-503. 2002.

BORREDON Marie-Elisabeth, MOULOUNGUI Zéphirin
« Chimie pour le développement durable – Les biotensioactifs », LCA, Toulouse, France, octobre 2006.

CENTRE TECHNOLOGIQUE DU MINAS GERAIS / CETEC
« Produção de combustíveis liquidos a partir de óleos vegetais »
Volume 1 : « Estudo das oleaginosas nativas de Minas Gerais », 1983
Volume 2 : « Transesterificação de óleos vegetais », 1983

CHIRAT Nathalie
Thèse de doctorat : « Etude de la qualité de carburants dérivés des huiles végétales - Approche méthodologique », Université de Montpellier 2, France, décembre 1996.

DE THEUX Barthélémy
Rapport de fin d'étude : « Utilisation de l'huile de palme comme combustible dans les moteurs diesel », ECAM, Belgique, 2003-2004.

EIER ETSHER
Rapport de la journée énergie sur la biomasse énergie organisée par le groupe EIER ETSHER, mai 2006 : « Formation sur la biomasse énergie », Burkina Faso, mai 2006.

F. FUHRER, A. LIMACHER, H. MIKLE, M. TRUTTMANN, R. FRIEDLI, M. PASQUIER, H. PFEFFERLI, R. SCHNELLER, G. GREMAUD
« Graisses comestibles, huiles comestibles et graisses émulsionnées », chapitre 7. Manuel suisse des denrées alimentaires MSDA, Suisse, 2005.

Guide pratique : « La Transformation Artisanale des plantes à huile - Expérience et procédés »
GRET, France, 1995.

E. GUIRAL et C. SAINT-CYR
« Voyage d'étude sur les huiles végétales pures », Rhonalpénergie-Environnement, France, mars 2005

GACHE Mélody, CIRAD
Rapport : « Etude de la teneur en sédiments dans les huiles végétales destinées aux moteurs diesels. IUT, Université de Perpignan, France, juillet 2007.

HENNING Reinhard, SIDIBE Yaya et SANANKOUA Oumou
Rapport intermédiaire du Projet Pourghère DNHE – GZT
« Production et utilisation de l'huile végétale comme carburant », Mali, novembre 1994.

LE CHIEN Hoang, Directeur Division Oléochimie VALAGRO - France
Compte rendu de la rencontre Franco-Brésiliennes sur les biocarburants – 27,28, 29 novembre 2006 Brasilia, Brésil.

LIENNARD Alain,
Thèse de doctorat : « Analyse de la durabilité socio-économique d'un processus de développement insulaire : La Nouvelle-Calédonie », Université de Montpellier 1, France, 2003

LIENNARD Alain, VAITILINGOM Gilles
« Etude sur les condition technico-économiques de l'utilisation des huiles végétales pures dans les moteurs de navires de pêche professionnelle », Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, France, janvier 2007.

MARTIN Georges, GRAILLE Jean, MAYEUX Alain, DOUMERGUE Christine
« Possibilités d'emploi de diverses Huiles tropicales dans les moteurs Diesel-Recensement et caractérisation », CIRAD, France, octobre 1983.

PIOCH Daniel, VAITILINGOM Gilles
"Palm oil and derivatives: fuels or potential fuels?" OCL vol. 12 n°2, March-April 2005.

PRANKL Heinrich, KÖRBITZ Werner, MITTELBACH Martin, WÖRGETTER Manfred
« Review on biodiesel standardization world-wide », Mai 2004.

K. REINHARD et TIANASOA RAMORAFENO
« Le manuel Jatropha », Novembre 2005

TRAN Gilles
« Le coton et ses co-produits en alimentation animale » - Revue de l'Alimentation Animale n°482, Novembre 1994.

VAÏTILINGOM Gilles
Thèse de doctorat : Huiles végétales - Biocombustible diesel « Influence de la nature des Huiles et en particulier de leur composition en acides gras sur la qualité-carburant », Université d'Orléans, janvier 1992.

VAITILINGOM Gilles, LIENNARD Alain
"Various vegetable oils as fuel for Diesel and burners: Jatropha curcas particularities". Biofuels and industrial products from J. curcas. Ed. Teschnische Universitat Graz, Austria.1997. p 98-109.

VAITILINGOM Gilles, PERILHON Christelle, LIENNARD Alain, Gandon Michel.. Development of rape seed oil burners for drying and heating. Industrial Crops and Products, Elsevier. Vol. 7, p. 273-279, 1998.

VAITILINGOM Gilles, LIENNARD Alain
« Expérimentation d'un groupe fonctionnant à l'huile de coprah sur l'île d'Ouvéa – bilan après 2500 heures ». CIRAD, Nouvelle Calédonie, 1998.

VAITILINGOM Gilles
« Les huiles végétales biocarburants pour les moteurs diesels », CIRAD, France, novembre 2004

VAITILINGOM Gilles
« Performances globales théoriques des moteurs diesels alimentés perde l'huile de Tournesol ou de colza », CIRAD, France, janvier 2005.

VAITILINGOM Gilles
« Utilisations énergétiques de l'huile de coton », Cahiers Agricultures Vol. 15, n°1, janvier-février 2006

- Sites Internet :

www.acces.inrp.fr/

www.europeus.org

www.treehugger.com

www.bioking.nl

www.ifp.fr

www.uidaho.edu/bioenergy/

www.bcmad.com

www.institut.hvp.free.fr

www.canola-council.org

www. peracod.net/.../moteur-a-huile-Inde.htm.

www.cirad.fr/

www.trame.org

www.cogen-challenge.org