

# 150 HEURES DE FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR DIESEL A HUILE DE PALME

## RAPPORT D'ESSAIS

Essais comparatifs de deux moteurs diesels, l'un alimenté à l'huile de palme et l'autre, au gasoil.

Gilles Deschepper, ing. ECAM, juin 2006



### Résumé

Deux moteurs diesel identiques sont alimentés, l'un avec du gasoil et l'autre, avec de l'huile de palme. Cette méthode permet d'avoir une comparaison continue du fonctionnement des moteurs grâce à une série de mesures effectuées régulièrement. Les analyses se concentrent sur l'évaluation de la durabilité du moteur fonctionnant à l'huile de palme.

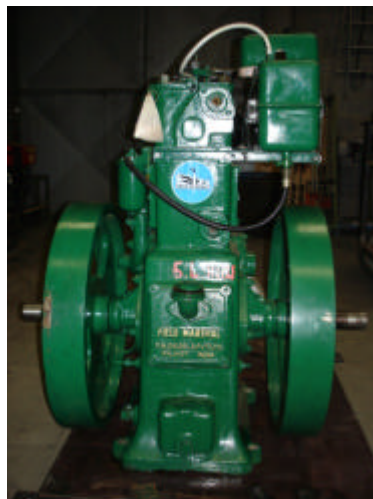
## Les conditions d'essai:

### Description du moteur utilisé:

Moteur copie LISTER 8/1 fabriqué en Indes et commercialisé par la société FLAMINGO OVERSEAS PVT. LTD, RAJKOT - 360 001, GUJARAT – INDIA

	<b>MOTEUR A (gasoil)</b>	<b>MOTEUR B (huile de palme)</b>
Prix d'un moteur	380€ transport inclus	
Marque	FIELDMARSHAL	
Modèle	FM-II (copie LISTER 8/1 c-à-d 8 chevaux / 1 cylindre)	
N° de série	AX 39901	AX 39903
Puissance	5,9 kW (8hp)	
Vitesse	850 rpm	
Cylindre	1	
Cylindrée	1432 cm <sup>3</sup>	
Diamètre du piston	114,3 mm	
Course du piston	139,7 mm	
Taux de compression	17:1	
Type d'injection	injection indirecte	
Injecteur	injecteur à un seul jet (lic. Bosch DL 30 S 1202)	
Pompe d'injection	pompe en ligne (lic. Bosch 9 410 032 032)	
Tarage de l'injecteur	140 bar	180 bar <sup>(1)</sup>
Mode de refroidissement	refroidissement par thermocirculation d'eau	
Filtre à air	filtre cartouche à papier (réf : FIAM FLI 6877 – 33,52€)	
Filtre à gasoil	filtre d'origine en feutre + préfiltre à gasoil	filtre d'origine en feutre
Filtre à huile de palme		filtre à gasoil common-rail (réf. : FIAM FP4935A - 8,45€) (réf. : support TP 024 - 33,1€)
Filtre à huile de lubrification	filtre d'origine en treillis métallique	
Huile de lubrification	huile monograde Shell RIMULA X30 (API CF) (73€ pour 20l)	

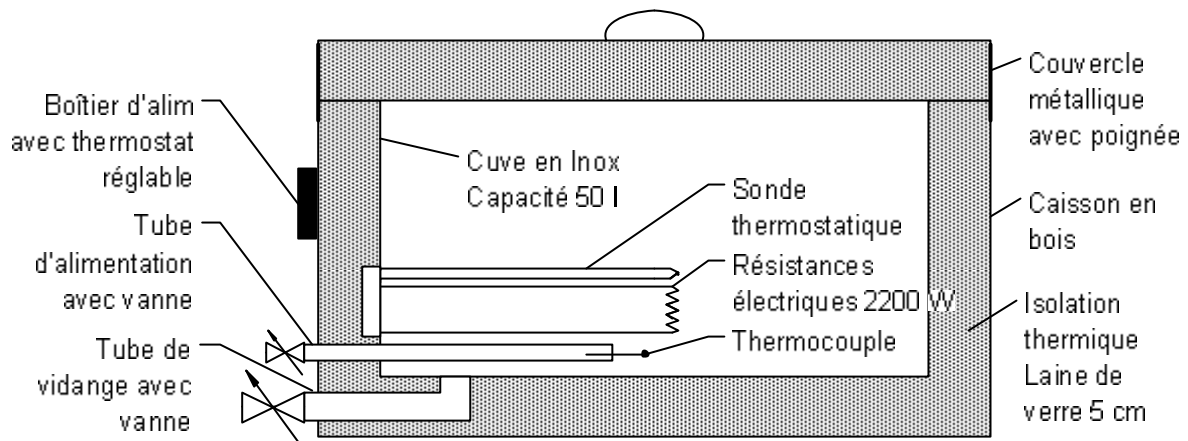
(1) pression généralement appliquée pour les véhicules utilisant de l'huile de colza



## Description du système de préchauffage de l'huile de palme :

Le chauffage de l'huile de palme se fait dans un réservoir chauffant d'une capacité de 50 l. Il est équipé d'un thermostat et d'une résistance chauffante de 2200 W. L'huile passe ensuite par un filtre, maintenu à environ 80°C par un fil chauffant et est amené jusqu'à la pompe d'injection par un tube en cuivre chauffé et isolé, de sorte qu'elle entre dans la pompe à une température de 80°C.

Schéma et photos:



Réservoir à huile de palme



Huile de palme qui fond dans le réservoir



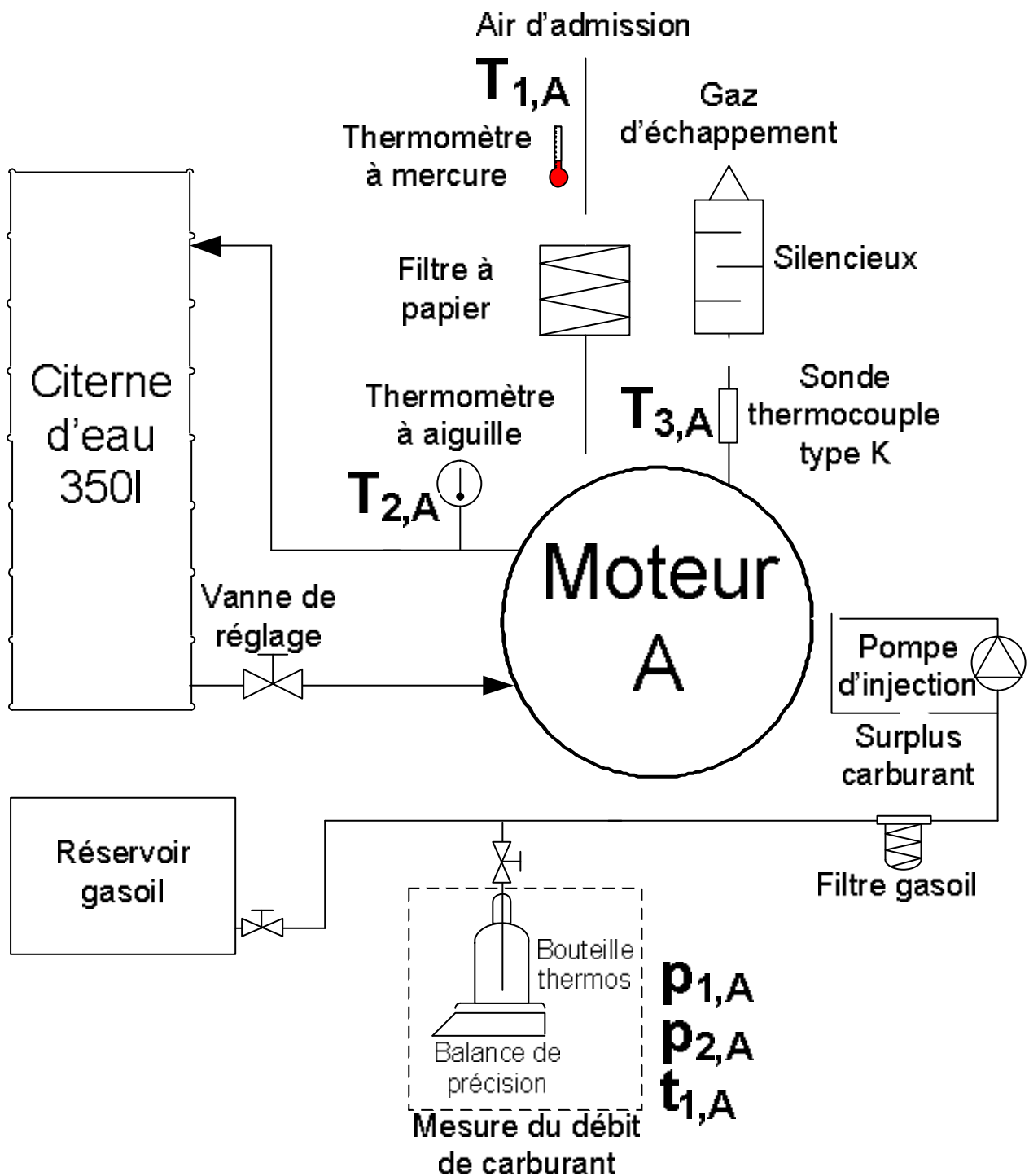
Filtre à huile de palme



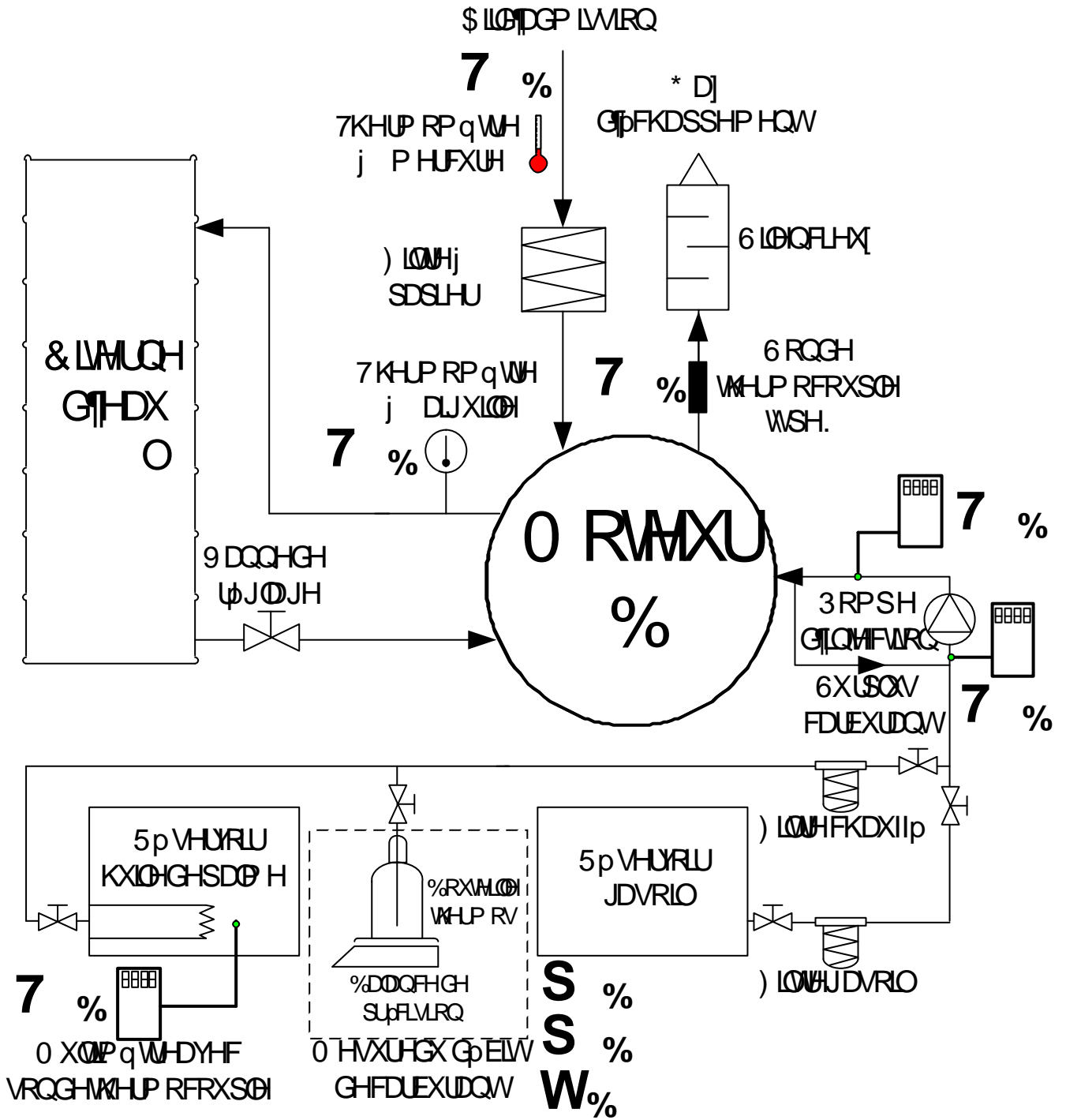
Circuit d'huile de palme chauffé et isolé

Description du système d'alimentation et de refroidissement du moteur :

**Moteur A fonctionnant au gasoil**



## Moteur B fonctionnant à l'huile de palme



### Description de la transmission de la puissance vers les consommateurs :

Le moteur entraîne un alternateur électrique par l'intermédiaire de 2 courroies trapézoïdales de type B. La mesure du glissement des courroies a indiqué qu'il était inférieur à 2 %. Cela prouve que le montage a été réalisé correctement. Selon le mémento Bosch de technologie automobile, on peut considérer que le rendement de la transmission par courroies trapézoïdales est de 95 %.

Comme l'alternateur fournit environ un quart de sa puissance nominale, son rendement est assez faible et égale à 76 % (voir fiche technique dans le mémoire).

Le rendement global de la transmission de puissance est donc  $0,76 * 0,95 = 0,722$ .

Le moteur doit tourner en produisant sa puissance nominale, soit 5,9 kW.

On devra donc charger l'alternateur à environ  $5,9 * 0,722 = 4,26 \text{ kW}$

<b>Transmission</b>		
	<b>Moteur A</b>	<b>Moteur B</b>
Poulie moteur	Poulie à 2 gorges Ø 355 mm	Poulie à 2 gorges Ø 450 mm
Courroies	2 courroies B de 1950 mm	2 courroies B de 1950 mm
Poulie réceptrice	Poulie à 2 gorges Ø 85 mm	Poulie à 2 gorges Ø 106 mm
Rapport	4,176 / 1	4,245 / 1



La mise en charge de l'alternateur est réalisée grâce à deux bancs de charge triphasés composés chacun de dix résistances chauffantes. On peut donc régler la charge de 0 à 6 kW par pas de 0,3 kW.

<b>Alternateur</b>	
Marque :	LEROY-SOMER
Type :	LSA 37 M8
Fréquence :	60 Hz
Puissance :	18,5 kVA
Cosφ :	0,8
I phase :	28 A
U phase :	380V
Vitesse :	3600 tr/min

<b>Banc de charge</b>	
Marque :	CETEL
Puissance :	3 kW
U :	220 / 380
I :	7,9 / 4,55

## Caractéristiques de l'huile de palme utilisée :

Données du fournisseur : huile de palme brute

Finesse de filtration	10 microns
Température de filtration	60°C
Acidité	< 0.25%
Teneur en eau	< 0,05%
Contamination générale	exempt
Stabilité à l'oxydation	2 ans

Résultats d'analyse de l'huile en laboratoire<sup>1</sup> et comparaison avec la norme DIN 51605 pour l'huile de colza :

<b>Propriétés caractéristiques de l'huile de palme</b> (Suivant résultats de l'analyse réf. 124182 de l'huile de palme du 30/12/04 – même origine que l'huile utilisée pour les essais actuels)					
Paramètre	Unités	Méthode	Huile de palme	Huile de colza DIN 51605	
				Min	Max
Densité (15°C)	kg/m <sup>3</sup>	DIN EN ISO 3675	923,2	900	930
Point d'éclair	°C	DIN EN 22719	239	220	-
Pouvoir calorifique	kJ/kg	DIN 51 900-2	36711	36000	-
Viscosité cin. (40°C)	mm <sup>2</sup> /s	DIN EN ISO 3104	38,7	-	38
Indice de cétane	-	FIA 100/3	62,5	39	-
Carbone résiduel	%(m/m)	DIN EN ISO 10370	0,21	-	0,4
Indice d'iode	g/100g	DIN 53241-1	51	100	120
Teneur en soufre	mg/kg	prEN ISO 20884	2,2	-	10
<b>Propriétés variables de l'huile de palme</b> (Suivant résultats de l'analyse réf. 142281 de l'huile de palme du 12/04/06)					
Paramètre	Unités	Méthode	Huile de palme	Huile de colza DIN 51605	
				Min	Max
Contamination globale	mg/kg	EN 12662	462	-	24
Acidité	mgKOH/g	DIN EN ISO 660	7,8	-	2
Essai lame de cuivre	-	DIN EN ISO 2160	classe 1b <sup>2</sup>	-	-
Stabilité à l'oxydation	h	ISO 6886	4,8 <sup>3</sup>	6	-
Contenu en phosphore	mg/kg	EN 14107	15	-	12
Contenu en cendre	%(m/m)	DIN EN ISO 6245	<0,001	-	0,01
Contenu en eau	%(m/m)	EN ISO 12937	0,0203 <sup>4</sup>	-	0,075

Pour plus de détails concernant la qualité de l'huile de palme, voir chapitre 2 du travail de fin d'étude de Monsieur Gilles Deschepper.

<sup>1</sup> Analytik-Service Gesellschaft mbH Trentiner Ring 30 D-86356 Täferlingen Allemagne – [www.asg-analytik.de](http://www.asg-analytik.de)

<sup>2</sup> Provient du rapport ASG réf. 142453 du 13/04/06.

<sup>3</sup> Provient du rapport ASG réf. 124182 du 30/12/04.

<sup>4</sup> Provient du rapport ASG réf. 142811 du 05/05/06.

## Mesures effectuées

	Descriptions	Appareils de mesure
<b>Mesures de température</b>		
T <sub>1,A</sub> T <sub>1,B</sub>	température de l'air d'admission	thermomètre à mercure
T <sub>2,A</sub> T <sub>2,B</sub>	température de l'eau de refroidissement	thermomètre à aiguille <sup>5</sup>
T <sub>3,A</sub> T <sub>3,B</sub>	température des gaz d'échappements	sonde thermocouple type K <sup>6</sup>
T <sub>4,B</sub>	température de l'huile de palme dans le réservoir	multimètre avec sonde K
T <sub>5,B</sub>	température de l'huile de palme avant la pompe d'injection	multimètre avec sonde K
T <sub>6,B</sub>	température de l'huile de palme après la pompe d'injection	multimètre avec sonde K
<b>Mesures de consommation</b>		
p <sub>1,A</sub> p <sub>1,B</sub>	masse de carburant en t = 0	balance (précision : ± 1g)
p <sub>2,A</sub> p <sub>2,B</sub>	masse de carburant en t ~ 20'	balance (précision : ± 1g)
t <sub>1,A</sub> t <sub>1,B</sub>	durée de la mesure de consommation	chronomètre
<b>Mesures électriques</b>		
P <sub>A</sub> P <sub>B</sub>	puissance instantanée débitée par la génératrice	SOCOMEK A40 (précision : ± 0,01 kW)
F <sub>A</sub> F <sub>B</sub>	fréquence de la tension produite par la génératrice	SOCOMEK A40 (précision : ± 0,5 Hz)
<b>Ovalisation du cylindre au point mort haut</b>		
D <sub>1,A,L</sub> D <sub>1,B,L</sub>	diamètre du cylindre dans le plan du mouvement de la bielle	Vérificateur d'alésages (précision : 0,01 mm)
D <sub>1,A,T</sub> D <sub>1,B,T</sub>	diamètre du cylindre perpendiculaire au mouvement de la bielle	Vérificateur d'alésages (précision : 0,01 mm)
D <sub>2,A,L</sub> D <sub>2,B,L</sub>	idem après essais d'endurance	Idem
D <sub>2,A,T</sub> D <sub>2,B,T</sub>	idem après essais d'endurance	Idem

<sup>5</sup> Thermomètre à aiguille: un ressort en se dilatant sous l'effet de la température fait pivoter l'aiguille.

<sup>6</sup> Thermocouple type K: alliage : Nickel - Chrome / Nickel, plage de mesure : -270°C à 1370°C.



## Méthodes de mesure des différents paramètres analysés

### Système de mesure de l'énergie produite

L'alternateur débite sur des résistances électriques. Un appareil de mesure contrôle les paramètres principaux de ce circuit. Il s'agit de l'appareil SOCOMEC A40.

Les mesures relevées sont :

La fréquence (précision :  $\pm 0,5$  Hz), image de la vitesse du moteur

La puissance active débitée par la génératrice (précision :  $\pm 0,01$  kW)

La fiche technique de l'appareil est disponible dans le mémoire ainsi que le schéma du tableau électrique.

### Système de mesure de la consommation du moteur

La mesure de consommation se fait en isolant 1 litre de carburant dans un récipient isolé thermiquement et placé sur une balance (précision  $\pm 1$  g). Un tube souple n'entrant pas en contact avec ce récipient permet au moteur de pomper le carburant sans perturber la mesure.

A partir de la masse  $p$  de carburant pompée en 20 minutes par le moteur, on peut calculer la consommation horaire massique  $c$  du moteur avec une très petite erreur :

$$c = p / 20 \times 60 \quad \text{erreur : } ? p/p = 1/470 = 0,0021 = \mathbf{0,21 \%}$$

On peut ensuite calculer la quantité de carburant  $C$  nécessaire pour la production d'un kWh électrique en utilisant la mesure de la puissance instantanée  $P$ .

$$C = c / P \quad \text{erreur : } ? p/p + ? P/P = 1/400 + 0,01/4,15 \\ = 0,0021 + 0,0024 \\ = \mathbf{0,45 \%}$$

### Méthode de mesure de la température des gaz d'échappement

La mesure de la température des gaz d'échappement se fait à l'aide d'une sonde thermocouple type K (NiCr-Ni) placée dans le courant des gaz d'échappement, le plus près possible du moteur. L'étendue de mesure est de  $-200^{\circ}\text{C}$  à  $1372^{\circ}\text{C}$ .

Un indicateur JUMO di 32 disposant d'un affichage digital donne la valeur de la température avec une erreur inférieure ou égale à 0,4%, dans l'étendue de mesure.

### Mesure de la température de l'huile de palme

La mesure de température est réalisée grâce à un multimètre disposant d'une sonde thermocouple de type K. Cette sonde est placée juste à l'aspiration dans le réservoir d'huile de manière à mesurer la température de l'huile quittant le réservoir vers le moteur. Deux autres sondes sont placées respectivement juste avant la pompe d'injection et juste avant l'injecteur.

### Mesure de la température de l'air ambiant

La température ambiante est mesurée grâce à un thermomètre à mercure disposant d'une indication du maximum et du minimum atteint. La température de l'air d'admission influence la température interne et la consommation du moteur.

### Mesure de la température de l'eau de refroidissement

La température de l'eau de refroidissement est mesurée à l'aide d'un thermomètre à aiguille. Elle est mesurée afin de faire tourner le moteur dans des conditions optimales. Le constructeur précise qu'il est essentiel que l'eau en sortie du moteur soit maintenue entre 75 et 85°C. Il s'agit d'un moteur diesel, il doit donc tourner chaud. Nous avons prévu une vanne sur le circuit de refroidissement afin de limiter le débit naturel qui se crée par thermo-circulation.

### Mesure de l'usure du cylindre et des segments

On mesure, avant et après les essais, le diamètre du cylindre au point mort haut avec un vérificateur d'alésage (précision au centième de mm). Cette mesure est réalisée dans deux directions, l'une dans le plan du mouvement de la bielle et l'autre, perpendiculairement à ce plan. Si une ovalisation devait se produire, c'est au point mort haut qu'elle serait le plus visible.

### Appréciation de l'usure générale du moteur

On réalisera, au terme des essais, des prélèvements dans l'huile de lubrification des moteurs, qui seront ensuite analysés en laboratoire. La comparaison des analyses des échantillons permettront de voir si des usures différentes apparaissent dans les deux moteurs.

### Appréciation de l'usure des éléments de la pompe d'injection

Les éléments susceptibles de subir une attaque corrosive sont démontés et photographiés sur les deux moteurs après les essais. La comparaison des deux pompes et l'avis d'un diéséliste professionnel permettent de constater une éventuelle usure anormale.

### Appréciation de l'usure de l'injecteur

L'usure de l'injecteur est constatée visuellement par un diéséliste professionnel. L'injecteur est monté sur une pompe à tarer les injecteurs. On observe la qualité de la pulvérisation, la forme du jet ainsi que la pression d'injection.

### Appréciation de l'encrassement du moteur

L'appréciation de l'encrassement se fait par démontage, observation et comparaison des chambres de combustion, injecteurs et culasses des deux moteurs. On photographie ces éléments avant et après les essais de manière à pouvoir comparer l'évolution de l'encrassement dans les deux moteurs.

## Appréciation de la longévité du moteur à huile de palme

### 1. Evolution de la quantité d'huile nécessaire pour fournir 1 kWh mécanique.

A partir de la consommation horaire massique du moteur et de la mesure de la puissance électrique débitée par la génératrice, nous déduisons la quantité d'huile nécessaire pour la production d'un kWh mécanique. L'évolution dans le temps de cette valeur comparée au moteur tournant au diesel nous permettra d'apprécier la longévité du moteur tournant à l'huile de palme.

### 2. Usure des éléments d'injection :

L'acidité ou le manque de viscosité de l'huile de palme risque de provoquer une usure prématurée de certains éléments de la pompe d'injection ou de l'injecteur. Le démontage et la comparaison de ces éléments sur les moteurs A et B permettront de déterminer si l'usage d'huile de palme comme combustible pose réellement un problème à ce niveau.

### 3. Qualité de la combustion dans le moteur

La qualité de la combustion s'apprécie avant tout par l'opacité des fumées. Elles doivent être incolores. La température de ces fumées constitue également une information intéressante. Ensuite, le démontage de la culasse et de l'injecteur sur les deux moteurs et la comparaison de leur encrassement permet de déterminer si l'huile de palme pose des problèmes au niveau de la combustion.

### 4. Usure du moteur

L'ovalisation du cylindre constitue l'information la plus parlante. En la mesurant avant et après les essais et en comparant les valeurs mesurées sur les moteurs A et B, on peut déterminer si l'emploi d'huile de palme entraîne oui ou non une usure plus rapide dans le moteur. Ensuite, les analyses d'échantillons d'huile lubrifiante pris dans les deux moteurs au terme des essais permettront de compléter cette information.

# Essai préliminaire

## Consommation de gasoil des moteurs A et B à différentes charges

L'essai est réalisé à vitesse constante (850 rpm) et charge variable.

Les moteurs sont démarrés un quart d'heure avant le début des mesures de manière à leur laisser le temps de se mettre en régime. De même, on attendra cinq minutes après chaque modification de la charge avant de prendre les mesures.

Le moteur B a été équipé avec un injecteur taré à 180 bar. C'est la pression généralement appliquée aux véhicules équipés pour l'huile de colza.

Tableaux de mesures :

	<b>Moteur A - gasoil</b>			
	¼ charge	½ charge	¾ charge	pleine charge
T <sub>1,A</sub> [°C]	10	10	10	10
T <sub>2,A</sub> [°C]	45	50	55	65
T <sub>3,A</sub> [°C]	220	260	310	380
p <sub>1,A</sub> [g]	0	0	0	0
p <sub>2,A</sub> [g]	- 240	- 294	- 363	- 457
t <sub>1,A</sub> [min]	18' 30''	18' 30''	19'	19'
P <sub>A</sub> [kW]	1,16	2,06	2,94	4,14
F <sub>A</sub> [Hz]	58,5	58,5	58,5	57,5
consommation par kWh électrique [g/kWh]	671	463	390	349

	<b>Moteur B – huile de palme</b>			
	¼ charge	½ charge	¾ charge	pleine charge
T <sub>1,A</sub> [°C]	8	8	8	8
T <sub>2,B</sub> [°C]	55	60	65	70
T <sub>3,B</sub> [°C]	220	260	315	390
p <sub>1,B</sub> [g]	0	0	0	0
p <sub>2,B</sub> [g]	- 247	- 292	- 357	- 450
t <sub>1,B</sub> [min]	18' 30''	18'	18'	18'
P <sub>B</sub> [kW]	1,21	2,08	2,96	4,15
F <sub>B</sub> [Hz]	60	59,5	59,5	59,5
consommation par kWh électrique [g/kWh]	662	468	402	361

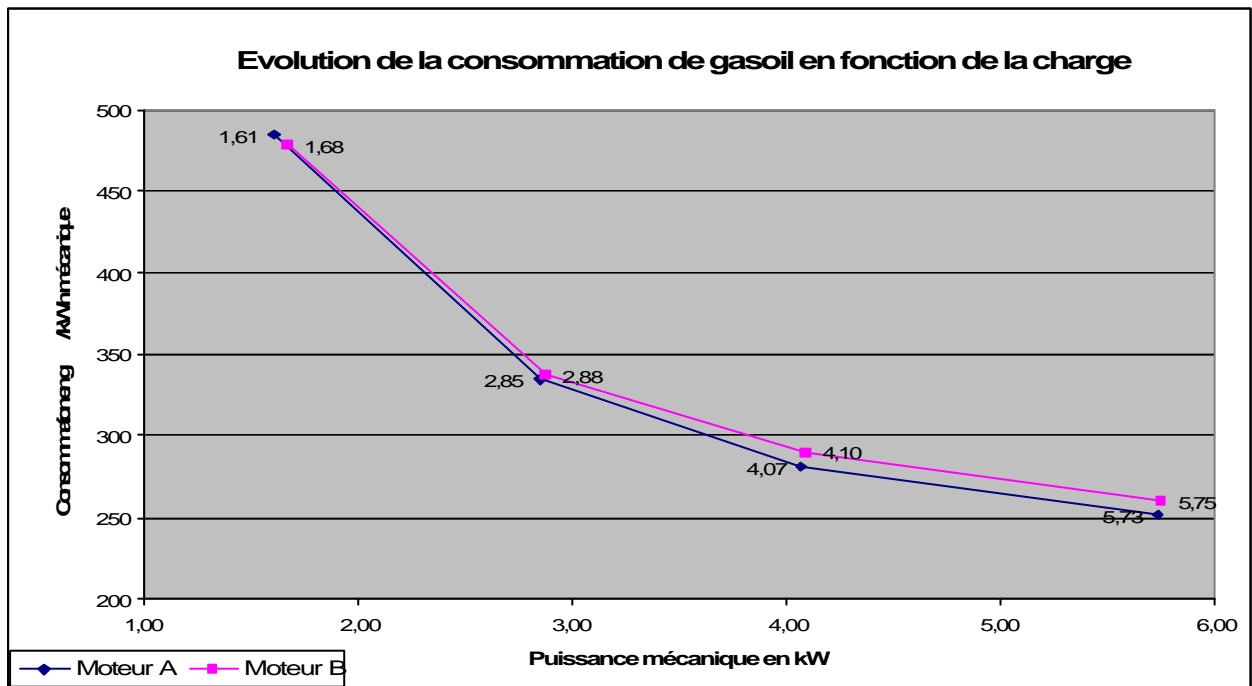
### Exemple de calcul :

Le moteur A a consommé 240 g de gasoil en 18 min 30. En une heure, il consomme donc :  $457 / 19 \times 60 = 1443$  g/h.

La puissance électrique instantanée produite par le moteur A est de 1,16 kW. En une heure, il produit donc 1,16 kWh électrique. Sa consommation par kWh électrique produit est de  $1443 / 4,14 = 348,5$  g/kWh.

En multipliant cette valeur par les rendements de l'alternateur et de la transmission, on obtient la consommation par kWh mécanique :  $348,5 \times 0,76 \times 0,95 = 252$  g/kWh.

### Résultat sous forme graphique :



### Interprétation des résultats :

Les mesures effectuées nous indiquent que les deux moteurs ont une consommation sensiblement la même. On constate par ailleurs que les deux courbes de consommation en fonction de la charge ont bien même allure.

On remarque cependant que le moteur B consomme 3% de plus que le moteur A lorsqu'ils tournent à 3/4 charge et à pleine charge. Il se peut que cela soit dû à l'injecteur taré à 180 bar.

Les autres paramètres sont sensiblement identiques pour les deux moteurs.

### Conclusions :

Les deux moteurs donnent des résultats tout à fait comparables. Lors de l'essai d'endurance, nous pourrions exploiter ces résultats pour comparer les moteurs par rapport à eux-mêmes. De plus, la similitude de fonctionnement des deux moteurs nous autorise à en faire une comparaison continue et à l'exploiter pour mettre en évidence les problèmes et les différences de fonctionnement découlant de l'emploi d'huile de palme comme carburant.

# Essai d'endurance (150h)

## Résumé de l'essai

L'essai a été mené à vitesse constante (850 rpm) et charge constante durant 150 heures. Les moteurs ont été démarrés le mardi 11 mars 2006 à 21h00. L'huile de palme avait été réchauffée à l'avance de sorte que, cinq minutes après son démarrage au gasoil, le moteur B a pu passer à l'huile de palme. Les premières mesures ont été prises une demi-heure plus tard. Ces mesures ont été répétées matin et soir jusqu'à la fin de l'essai, le mardi 18 mars à 9h00. En même temps, on procédait au remplissage des réservoirs ainsi qu'au graissage des culbuteurs et des tiges de culbuteurs.

### Remarque préliminaire :

Comme les moteurs avaient peu tourné avant de commencer l'essai d'endurance, certaines pièces se sont rodées au cours des 150 heures d'essai. Cela a posé problème au niveau des tiges de culbuteurs qui se sont maté aux extrémités et ont légèrement raccourci. Les jeux existant entre les culbuteurs et les tiges de soupape, qui doivent normalement être de 0,4 mm à froid, se sont donc accrus. Nous les avons mesurés au terme de l'essai et voici les résultats :

		jeu d'origine	jeu après 150h
<b>Moteur A</b>	soupape d'admission	0,4 mm	0,4 mm
	soupape d'échappement	0,4 mm	0,7 mm
<b>Moteur B</b>	soupape d'admission	0,4 mm	1,0 mm
	soupape d'échappement	0,4 mm	1,2 mm

On constate un dérèglement important des soupapes, surtout au moteur B. Nous pensons que cela est dû au fait que le moteur B avait beaucoup moins tourné que le moteur A, ce dernier ayant servi à la mise au point des bancs d'essai et auxiliaires. Nous pensons que le dérèglement n'est certainement pas imputable à l'emploi d'huile de palme dans le moteur B.

Il se peut que le dérèglement des soupapes ait perturbé le bon fonctionnement des moteurs (voir interprétations des résultats ci après). Certaines mesures ont donc pu être affectées elles aussi. Il serait intéressant de réaliser un nouvel essai avec des culbuteurs bien réglés et en contrôlant les jeux toutes les 50 heures.

Nous avons fait contrôler la dureté des tiges de culbuteurs afin de voir si l'usure est imputable au manque de dureté du matériau. La mesure a révélé 60 HRC, ce qui correspond à une dureté suffisante pour ce type de pièces. La seule explication au dérèglement des soupapes est que les pièces avaient besoin d'être rodées. On ne devrait donc plus rencontrer ce problème à l'avenir.

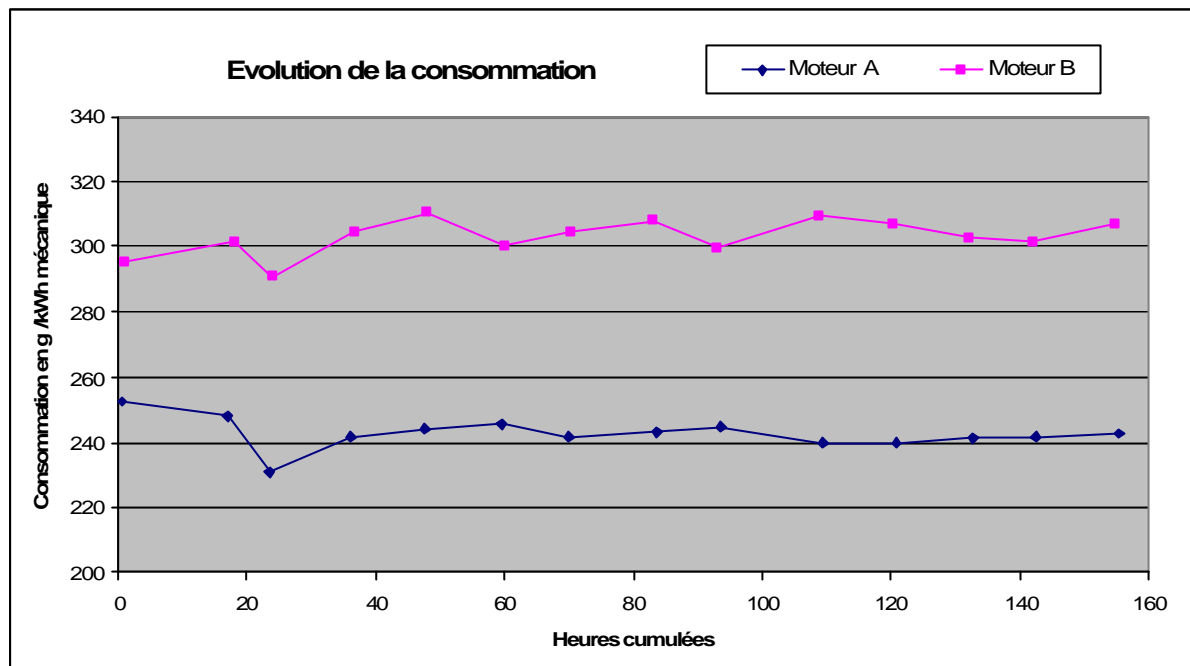
## Résultats :

### Tableaux de mesures :

Moteur A										
heures cumulées	p <sub>1,A</sub> (g)	p <sub>2,A</sub> (g)	t <sub>1,A</sub> (min)	P <sub>A</sub> (kW)	F <sub>A</sub> (Hz)	consommation		T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2,A</sub> (°C)	T <sub>3,A</sub> (°C)
						(g/kWh <sub>élec</sub> )	(g/kWh <sub>méca</sub> )			
00 h 30	0	-363	15'	4,15	57,5	350	253	7	80	390
17 h 00	0	-476	20'	4,15	57,5	344	248	12	65	380
23 h 30	1500	1079	19'	4,15	57,5	320	231	9	80	382
36 h 00	1500	1035	20'	4,16	57,5	335	242	6	85	388
47 h 30	1470	998	20'	4,19	57	338	244	10	85	401
59 h 30	1450	940	21' 30''	4,19	57	340	245	10	90	410
70 h 00	1520	1052	20'	4,19	57	335	242	10	90	404
83 h 30	1530	1057	20'	4,21	57	337	243	9	85	400
93 h 30	1460	1105	15'	4,19	56,5	339	245	15	90	415
109 h 30	1480	1002	20' 30''	4,21	57,5	332	240	10	90	400
121 h 00	1510	1044	20'	4,21	56,5	332	240	12	90	400
133 h 00	1500	1125	16'	4,21	56,5	334	241	10	90	405
142 h 30	1540	1140	17'	4,21	56	335	242	13	90	405
155 h 30	1540	997	23'	4,21	56,5	336	243	8	85	400

Moteur B													
heures cumulées	p <sub>1,B</sub> (g)	p <sub>2,B</sub> (g)	t <sub>1,B</sub> (min)	P <sub>B</sub> (kW)	F <sub>B</sub> (Hz)	consommation		T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2,B</sub> (°C)	T <sub>3,B</sub> (°C)	T <sub>4,B</sub> (°C)	T <sub>5,B</sub> (°C)	T <sub>6,B</sub> (°C)
						(g/kWh <sub>élec</sub> )	(g/kWh <sub>méca</sub> )						
01 h 00	0	-482	17'	4,16	59	409	295	7	80	422	78	80	65
18 h 00	0	-551	19'	4,16	59,5	418	302	12	80	414	70	80	70
24 h 00	2130	1599	19'	4,16	60	403	291	9	90	415	70	75	65
36 h 30	2100	1514	20'	4,16	59,5	422	305	6	90	450	70	76	68
48 h 00	2190	1595	20'	4,15	59,5	430	310	10	85	450	70	77	69
60 h 00	2180	1603	20'	4,16	59,5	416	300	10	90	450	70	80	70
70 h 30	2190	1605	20'	4,16	58,5	422	305	10	85	450	70	75	65
83 h 00	2180	1588	20'	4,16	59	427	308	9	85	460	70	80	70
93 h 00	2170	1580	20' 30''	4,16	59,5	415	300	15	90	460	70	80	70
109 h 00	2170	1575	20'	4,16	59	429	310	10	90	470	70	80	70
120 h 30	2170	1610	19'	4,16	59	425	307	12	90	470	70	80	70
132 h 30	2150	1552	20' 30''	4,17	58,5	419	303	10	90	460	70	80	70
142 h 00	2160	1580	20'	4,16	59	418	302	13	90	460	70	80	70
155 h 00	2180	1410	26'	4,18	58,5	425	307	8	85	470	70	80	70

## Evolution de la quantité d'huile nécessaire pour fournir 1 kWh mécanique :



En observant l'évolution de la consommation des moteurs A et B au cours des 150 heures d'essai, on constate qu'elles sont constantes en moyenne.

Cette première constatation nous permet déjà d'affirmer que le moteur B n'a pas subi d'encrassement ni d'usure au point de voir sa consommation augmenter.

Ce graphique nous permet ensuite de constater que le moteur B consomme, en poids, nettement plus que le moteur A. En effet, la consommation moyenne du moteur B, sur les 150 heures d'essai, est de 303 g/kWh contre 243 g/kWh pour le moteur A.

Cette augmentation s'explique en partie par la différence de pouvoir calorifique entre les deux carburants, mais pas uniquement:

$$\text{moteur A : } 0,243 \text{ kg/kWh} \times 42500 \text{ kJ/kg} = 10327,5 \text{ kJ/kWh}$$
$$\text{rendement}^7 = 3600 / 10327,5 = \mathbf{34,8 \%}$$

$$\text{moteur B : } 0,303 \text{ kg/kWh} \times 36700 \text{ kJ/kg} = 11120,1 \text{ kJ/kWh}$$
$$\text{rendement} = 3600 / 11120,1 = \mathbf{32,4 \%}$$

Le moteur a donc un rendement légèrement inférieur lorsqu'il tourne à l'huile de palme. Il se peut que cette diminution soit due à la différence d'allumage entre les deux carburants. Il serait intéressant d'essayer d'optimiser l'avance à l'injection sur base de la consommation du moteur B lorsqu'il tourne à pleine charge.

<sup>7</sup> 1 kWh = 3.600.000 J (joules) ou 3.600 kJ. Le moteur a donc utilisé dans ce cas 10.327,5 kJ d'énergie présente dans le combustible pour produire 3.600 kJ d'énergie mécanique. On peut donc déterminer le rendement du moteur.

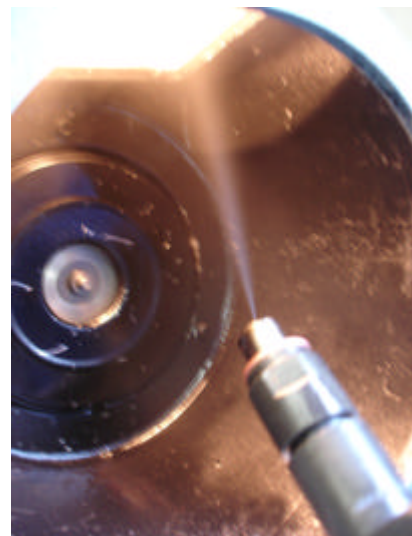


### Usure des éléments d'injection :

Au terme de l'essai, les deux injecteurs et les deux pompes d'injection ont été démontés des moteurs et amenés chez un diéséliste pour être contrôlés.



Les injecteurs ont été montés sur une pompe à tarer. Aucune usure particulière n'a été constatée. Ils pulvérisent normalement et l'on entend bien le bruit caractéristique de « ronflement » de l'injecteur.



Cette première observation nous permet de déduire que l'emploi d'huile de palme n'a pas affecté le mécanisme interne de l'injecteur et ce, malgré une qualité médiocre de l'huile au point de vue de son acidité et de sa teneur en eau.

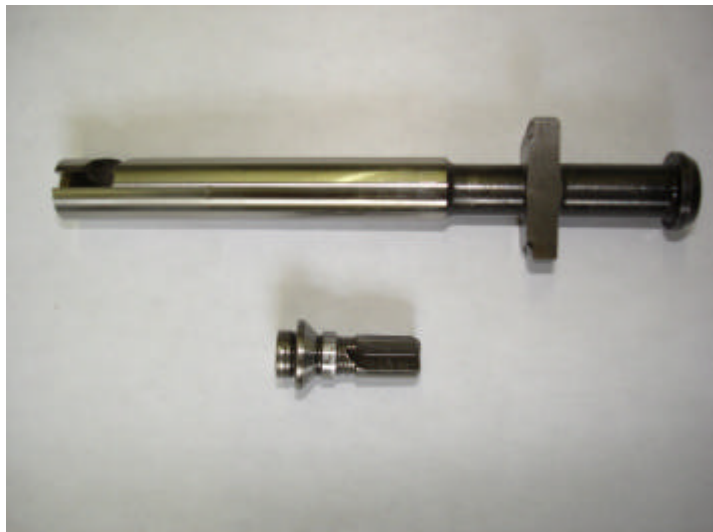
Il faut tout de même signaler que l'injecteur B n'était plus taré qu'à 160 bar, au lieu de 180 bar avant de commencer l'essai. Le diéséliste pense que cela est dû au fait que nous ayons utilisé un injecteur neuf. La diminution de pression de tarage serait due au « rodage » de l'injecteur et de son ressort.

Il serait donc intéressant de réaliser un nouvel essai avec un injecteur déjà rodé et taré à 180 bar pour voir s'il conserve sa pression de tarage.

Les deux pompes d'injection ont été entièrement démontées et les éléments sensibles à l'usure (élément de pompage et clapet de refoulement) ont été observés à l'aide d'une loupe.

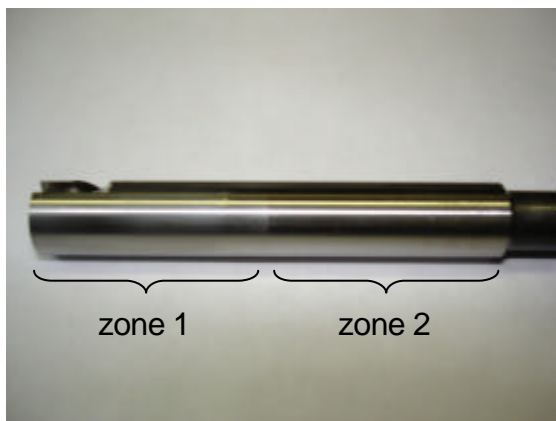


Pompe B démontée



Élément de pompage et clapet de refoulement

Le diéséliste a pu constater une différence entre les éléments de pompage A et B.



Élément de pompage B



Éléments de pompage A et B

On voit bien sur la photo de gauche que la matière est devenue blanchâtre et a perdu de sa brillance dans la zone 1. On dit qu'elle est matée.

La différence est encore plus flagrante sur les clapets de refoulement (voir photos). On voit très nettement, sur le clapet B, la marque du siège sur lequel il vient s'appuyer. Sur le clapet A, cette marque n'est pratiquement pas visible.

Le diéséliste pense que ces différences d'usure entre les pièces des pompes A et B s'explique par le fait que l'huile de palme est sans doute un peu plus agressive que le carburant diesel.

Rappelons également que l'huile de palme entraine à 80°C dans la pompe d'injection. Or on sait que l'augmentation de température s'accompagne aussi d'une augmentation du caractère corrosif.



Clapet de refoulement B



Clapets de refoulement A et B

Aucune trace de griffes n'a été constatée sur les éléments de pompage, ce qui indique que la filtration des deux carburants a été efficace. Cette constatation nous conforte dans notre choix du mode de filtration et du type de filtre choisi pour l'huile de palme.

Il n'y a pas eu non plus de grippage ou de trace de rouille dus à la présence d'une trop grande quantité d'eau dans l'huile.

Malgré l'usure légèrement plus marquée dans la pompe B, le diéséliste nous assure qu'elle a parfaitement rempli sa fonction. Il pense que la pompe pourrait sans doute accomplir 1000 heures sans rencontrer de problèmes. Ceci reste à confirmer par un essai.

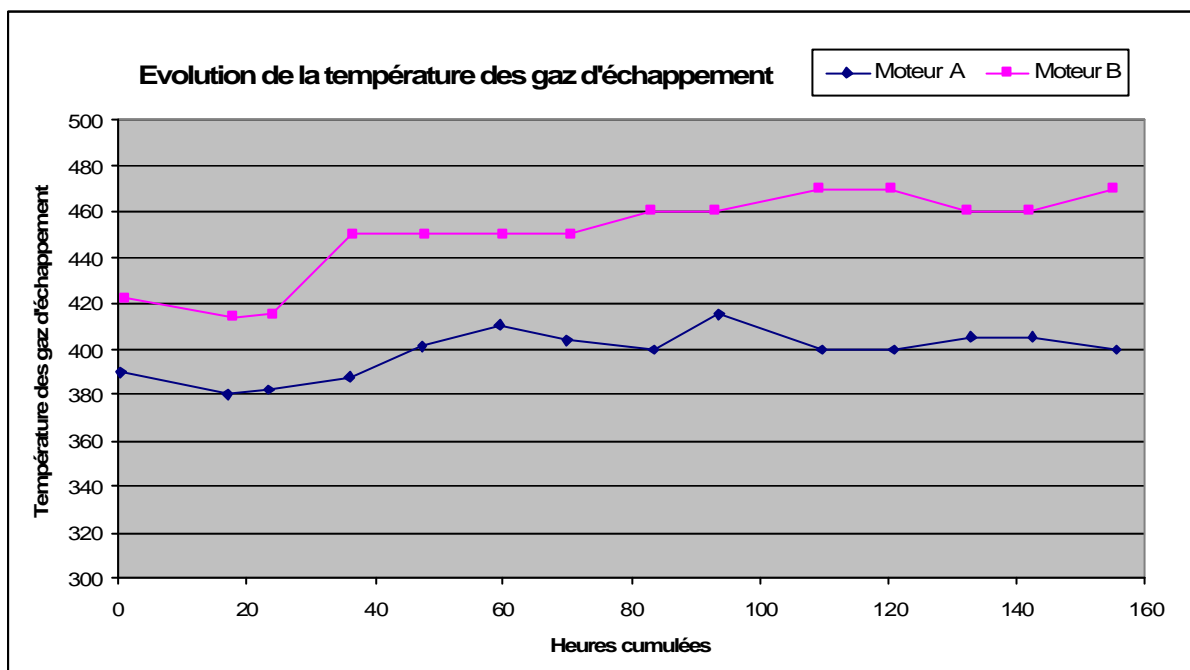
Il serait intéressant de réaliser un essai de 500 ou 1000 heures. Cela permettrait de voir si, malgré l'emploi d'huile de palme ne répondant pas tout à fait aux critères de qualités, les éléments d'injection sont capable de remplir leur fonction de façon durable.

## Qualité de la combustion dans le moteur

La qualité de la combustion dans le moteur peut être évaluée en première approche par la couleur des fumées. Celles-ci doivent être incolores et donc à peine visibles. Nous avons observé les fumées tout au long de l'essai et nous avons pu constater que les fumées dégagées par le moteur B étaient sensiblement identiques à celles dégagées par le moteur A. Tout au plus nous avons pu constater une teinte un peu plus blanchâtre rappelant la vapeur d'eau. Nous avons aussi pu constater que la production de suie était la même dans les deux moteurs.

Cette première information nous permet de penser que le moteur que nous avons choisi brûle bien l'huile de palme et ce, même sans modification des réglages d'origine, si ce n'est le tarage de l'injecteur à 180 bar.

Une deuxième information intéressante est la température des gaz d'échappement.



Ce graphique nous permet de constater que la température des gaz d'échappement émis par le moteur B sont 30 à 40°C plus chaud que ceux émis par le moteur A. Cette constatation est en concordance avec la différence de rendement observée entre les deux moteurs. En effet, si le rendement du moteur B est plus faible, c'est qu'une partie de l'énergie contenue dans l'huile de palme n'a pas pu être transformée en travail moteur. Cette énergie est en partie perdue sous forme de chaleur et évacuée dans les gaz d'échappement. Ceci explique la différence de température des gaz d'échappement observée dans les deux moteurs.

Il semble donc que la combustion de l'huile de palme ne soit pas tout à fait optimale, mais néanmoins satisfaisante. Comme nous l'avons déjà dit, il serait intéressant d'essayer d'optimiser l'avance à l'injection pour améliorer la combustion de l'huile dans le moteur.

D'autre part, le graphique révèle une augmentation progressive de la température des gaz d'échappement du moteur B au cours des 150 heures. Nous pensons que ce phénomène n'est pas lié à l'emploi d'huile de palme comme combustible mais plutôt qu'il découle du dérèglement progressif des soupapes par suite de l'usure des tiges de culbuteurs.

Une bonne manière d'apprécier la qualité de la combustion de l'huile de palme dans le moteur B consiste simplement à comparer l'encrassement des deux moteurs au terme des 150 heures d'essai.



Injecteur A



Injecteur B

Commençons par les têtes d'injecteur. On observe une couche uniforme de calamine sur les deux injecteurs. Toutefois, les abords des trous d'injection sont différents. Le dépôt est un peu granuleux sur l'injecteur A. Sur l'injecteur B, il est plus charbonneux et plus haut. Il faudrait voir si, à la longue, ce dépôt ne pourrait pas détériorer la qualité du spray. Au nettoyage, la calamine présente sur l'injecteur B s'est révélée plus solide et mieux accrochée que sur l'injecteur A.



Piston A



Piston B

En observant les deux pistons, on constate un encrassement plus net dans le moteur ayant tourné à l'huile de palme.

Le piston A présente en effet une fine couche uniforme de suie avec un peu de calamine à proximité des soupapes d'admission et de refoulement.

Le piston B présente aussi une zone couverte d'une fine couche uniforme de suie mais elle est moins étendue. On observe des dépôts de calamine plus importants à l'embouchure de la préchambre de combustion et sous les soupapes d'admission et de refoulement.

Il faudrait s'assurer que cet encrassement n'a pas été causé par le dérèglement des soupapes en réalisant un nouvel essai. D'autre part, le mécanicien ayant effectué le démontage nous a affirmé que l'encrassement du moteur B était tout à fait raisonnable et qu'il aurait pu tourner 1000 heures sans problèmes.



Culasse A



Culasse B

L'encrassement des culasses est assez semblable dans les deux moteurs. On remarque toutefois des dépôts plus importants au niveau des soupapes du moteur B.

Pour conclure, nous pouvons dire qu'un encrassement plus marqué a bel et bien été constaté dans le moteur B au terme de cet essai de 150 heures. Toutefois, cet encrassement n'a pas posé de problèmes de combustion ni entraîné une augmentation de la consommation. Seul un nouvel essai de plus longue durée permettrait de déterminer si l'emploi d'huile de palme pose réellement un problème d'encrassement dans le moteur.

## Usure du moteur

Pour évaluer l'usure du moteur, nous mesurons l'ovalisation du cylindre au terme des 150 heures d'essai. Cette ovalisation, si elle existe, se produit dans le plan de bielle et se marque surtout au point mort haut et au point mort bas du piston. Pour la facilité de la mesure, nous mesurons uniquement au point mort haut. Pour rappel, les mesures indicées L sont prise dans le plan de la bielle et les mesures indicées T, transversalement au plan de la bielle.

<b>Cylindre neuf</b>	$D_L$	114,28 mm	
	$D_T$	114,28 mm	
<b>Moteur A</b>	$D_{1,A,L}$	114,31 mm	usure : 0,04 mm
	$D_{2,A,L}$	114,35 mm	
	$D_{1,A,T}$	114,28 mm	usure : 0,03 mm
	$D_{2,A,T}$	114,31 mm	
<b>Moteur B</b>	$D_{1,B,L}$	114,31 mm	usure : 0,05 mm
	$D_{2,B,L}$	114,36 mm	
	$D_{1,B,T}$	114,30 mm	usure : 0,04 mm
	$D_{2,B,T}$	114,34 mm	

On constate que, pour les deux moteurs, l'usure est quasi identique dans les deux directions. On ne peut donc pas vraiment parler d'ovalisation des cylindres.

D'autre part, l'usure du moteur B est quasi identique à l'usure du moteur A. Ceci nous permet de conclure que l'emploi d'huile de palme comme carburant n'a pas entraîné d'usure anormale dans le cylindre du moteur B.

A titre indicatif, on peut parler d'usure importante à partir de 0,1 - 0,2 mm.

Une autre méthode couramment utilisée pour évaluer l'usure dans un moteur consiste à analyser l'huile lubrifiante. C'est ce que nous avons fait, au terme des 150 heures d'essai, avec les huiles lubrifiantes des moteurs A et B et avec de l'huile neuve. Les résultats <sup>8</sup> sont présentés à la page suivante.

Le phosphore, le soufre, le calcium et le zinc sont présents en grande quantité dans l'huile neuve. Ces éléments sont des additifs couramment employés dans les huiles lubrifiantes. Il ne faut pas en tenir compte pour analyser l'usure du moteur.

Le soufre, par exemple, sert de stabilisateur d'oxydation dans l'huile lubrifiante. La diminution de certaines teneurs par rapport à l'huile neuve est imputable à la dilution de l'huile lubrifiante par le gasoil ou l'huile de palme.

Le silicium présent dans l'huile lubrifiante peut provenir d'impuretés présentes dans le carburant et/ou des poussières qui entrent dans le moteur avec l'air d'admission. L'aluminium, le chrome, le fer, le cuivre et le plomb sont des éléments considérés comme étant de bon indicateur d'abrasion et/ou de corrosion.

L'analyse de l'échantillon d'huile lubrifiante provenant du moteur B indique justement des teneurs plus élevées dans ces éléments là, comparativement au moteur A. On remarque particulièrement la teneur en chrome de 246 mg/kg, ce qui est beaucoup. Le chrome provient surtout des paliers du moteur. Nous pensons que la teneur en cuivre a pu être influencée par la présence d'un tube en cuivre chauffé entre le réservoir d'huile de palme et la pompe d'injection.

Ces résultats nous indiquent clairement que le moteur B a subi une usure importante par rapport au moteur A, par abrasion et/ou corrosion. La corrosion est vraisemblablement causée par les acides gras libres présents dans l'huile de palme.

Toutefois, nous pensons que les teneurs importantes en aluminium, fer, chrome, cuivre et plomb observées dans l'huile lubrifiante du moteur B sont en partie imputable au manque de rodage de ce moteur avant les essais.

Nous suggérons donc de réaliser un nouvel essai de 500 heures, en prélevant toutes les 100 heures un échantillon d'huile lubrifiante. Les analyses de ces échantillons permettront de compléter les informations ci-dessus et nous aideront dans la détermination de la teneur maximale acceptable d'acides gras libres dans l'huile de palme carburant.

---

<sup>8</sup> Proviennent du rapport ASG réf. 142647 du 05/05/06.



Paramètres	Huile neuve SHELL Rimula X30	Moteur A Gasoil	Moteur B Huile de palme	Unités
Sodium	9	31	22	mg/kg
Magnésium	27	40	66	mg/kg
Aluminium	<1	7	21	mg/kg
Silicium	29	59	84	mg/kg
Phosphore	1020	990	1110	mg/kg
Soufre	4280	4640	4040	mg/kg
Chlore	17	17	27	mg/kg
Calcium	3340	3250	3870	mg/kg
Chrome	<1	72	246	mg/kg
Fer	<1	200	316	mg/kg
Cuivre	<1	5	33	mg/kg
Zinc	1210	1160	1290	mg/kg
Molybdène	98	70	99	mg/kg
Plomb	<1	61	98	mg/kg

Nous avons également analysé la viscosité de l'huile lubrifiante des moteurs A et B et de l'huile neuve. Les résultats <sup>9</sup> sont présentés dans le tableau ci-dessous. On relève 1,1% d'huile végétale diluée dans l'huile lubrifiante du moteur B, ce qui est tout à fait acceptable. Il n'est pas possible de déterminer la quantité de gasoil diluée dans l'huile du moteur A.

Echantillon	ID	Paramètres	Méthode	Résultats	Unités
Huile neuve SHELL Rimula X30	85461	Viscosité cin. (40 °C)	DIN EN ISO 3104	88,4	mm <sup>2</sup> /s
Moteur A Gasoil	85462	Viscosité cin. (40 °C)	DIN EN ISO 3104	93,1	mm <sup>2</sup> /s
Moteur B Huile de palme	85463	Viscosité cin. (40 °C)	DIN EN ISO 3104	93,13	mm <sup>2</sup> /s
		Contenu en huile végétale	IR	1,1	%(m/m)

Ces résultats nous permettent simplement d'affirmer que la viscosité de l'huile lubrifiante dans le moteur B n'a pas été affectée au terme des 150 heures d'essai et ce, malgré 1% d'huile de palme d'acidité 7,8 mg KOH/g diluée dans l'huile lubrifiante.

<sup>9</sup> Proviennent du rapport ASG réf. 142647 du 05/05/06.

## Conclusions :

Au terme de ces 150 heures d'essai, nous pouvons affirmer que l'emploi d'huile de palme dans le moteur B n'a pas posé de problème majeur.

On a constaté globalement une consommation un peu plus importante et un rendement légèrement plus faible que pour le moteur au gasoil.

Au point de vue usure et encrassement, des différences par rapport au moteur A ont pu être mises en évidence mais elles étaient toujours très légères. Le moteur B aurait pu sans problème continuer à fonctionner plus longtemps que 150 heures.

Les analyses de l'huile lubrifiante des moteurs A et B laissent soupçonner un problème de corrosion dans le moteur B, qui serait dû aux acides gras libres présents dans l'huile de palme. De nouveaux essais devront venir compléter cette information.

Tous ces résultats nous encouragent et nous confirment que le choix du moteur FIELDMARSHALL FM-II pour l'utilisation d'huile de palme comme carburant est un très bon choix.

Il faudrait encore réaliser de nouveaux essais pour être débarrassés des incertitudes relatives au rodage du moteur B, notamment au niveau des tiges de culbuteurs et de l'injecteur.

Un véritable essai d'endurance, de 500 ou 1000 heures, permettrait de compléter les résultats obtenus grâce à l'essai de 150 heures et d'évaluer avec plus de précision la durabilité du moteur B et ses auxiliaires.

Il serait aussi intéressant d'essayer d'optimiser l'avance à l'injection du moteur B pour améliorer la combustion de l'huile de palme et réduire la consommation.