

Haute Ecole LEONARD de VINCI



A.S.B.L.

Institut Supérieur Industriel

Utilisation de l'huile de palme comme combustible dans les moteurs diesel

Année académique :

2003 – 2004

Travail de fin d'études présenté par
Barthélémy DE THEUX
en vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur industriel
Section Electromécanique.

Imprimé sur papier EVOLVE recyclé à 100%
www.evolve-papers.com

Résumé

Le projet de l'utilisation de l'huile de palme comme combustible dans les moteurs diesel, tout particulièrement des petits moteurs industriels ou groupes électrogènes, nous provient d'une demande des pays du Sud, et tout spécialement de la République Démocratique du Congo. Cet état est en étroite collaboration avec *ISF (Ingénieurs Sans Frontières)* et *CODEART (ONG belge du sise près de Aachen)*, à la base de ce projet.

L'élément initiateur de cette demande est inévitablement une question de coût. En effet, nous pouvons affirmer que le prix de l'huile de palme dans ces pays-là, tourne autour des 60% du prix du diesel.

Les procédés d'extraction de l'huile de palme, qu'ils soient artisanaux ou industriels, sont très simples et peu coûteux. L'huile de palme utilisée comme carburant ne demande pas de raffinage. Celui-ci est destiné uniquement aux besoins alimentaires. Le palmier à huile est le plus rentable des oléagineux : cela lui confère un atout supplémentaire.

L'utilisation de l'huile de palme dans un moteur diesel nécessite avant tout une connaissance de ses propriétés physico-chimiques. En les comparant avec celles du diesel et d'autres huiles végétales, transformées ou non, nous arrivons à en sortir des points importants afin de cerner les éventuelles difficultés que rencontrerait un moteur diesel fonctionnant à l'huile de palme. Il en résulte une analyse de cinq problèmes majeurs et de leurs éventuels remèdes : il s'agit de la **viscosité, du point d'éclair, de la polymérisation, des réactions chimiques et des réactions physico-chimiques**. Diverses solutions sont abordées, tant pour l'Europe, que pour l'Afrique plus spécialement.

Il s'ensuit l'analyse de différents essais effectués sur des moteurs à l'huile de palme et l'interprétation, par rapport au diesel, de ces résultats concluants. Nous constatons en général, un dépôt plus accentué au niveau des segments de compression et sur la soupape d'admission. Une brève étude sur les émissions des gaz d'échappement sortant du moteur à l'huile végétale, nous montre une tendance globale moins polluer, vu que la quantité de CO₂ rejeté est plus ou moins égale à celle que la plante a absorbé durant sa croissance.

Nous concluons l'étude en remarquant qu'un moteur à injection *indirecte* s'adapte plus aisément, à l'utilisation d'huile végétale, qu'un moteur à injection *directe*. Nous terminons par la proposition des diverses adaptations que nous allons apporter au moteur d'essai, chez *CODEART*. Un étudiant de l'ECAM poursuit ce mémoire et mènera ce projet à bien pour aboutir à l'objectif final, c'est-à-dire : proposer un choix de trois moteurs, se distinguant par leurs puissances et par leurs coût, pouvant fonctionner à l'huile de palme à l'aide d'un « kit de montage » fourni avec le moteur choisi.

Remerciements

Par ce travail, je souhaite remercier les membres d'*Ingénieurs Sans Frontières* et de *CODEART*. Je voudrais tout particulièrement formuler mes remerciements à l'égard de Monsieur Roger Loozen, mon promoteur, qui m'a accompagné dans mes démarches et mes déplacements tout au long de cette étude.

Je remercie aussi le Dr. Kampmann, directeur de la société *AAN*, pour son aimable accueil et pour les précieuses documentations inédites qui ont permis d'étoffer ce travail abondamment et en profondeur.

Pour sa disponibilité, son investissement, ses conseils judicieux et très avisés, je tiens à réitérer à Monsieur Paquet, mon tuteur, mes vifs remerciements. Je remercie tous les professeurs de l'ECAM pour les connaissances qu'ils m'ont permis d'acquérir tout au long de mon cursus, et tout spécialement Monsieur Dupont, professeur de Chimie à l'ECAM, pour sa grande aide et son importante documentation mise à ma disposition.

À mes proches, à l'AIECAM, aux divers organismes et sociétés qui n'ont pas hésité à m'apporter de l'aide et des renseignements, merci de m'avoir prodigué tant de conseils avec autant de bienveillance.

Table des matières

Résumé	2
Remerciements.....	3
Table des matières.....	4
Introduction.....	7
Chapitre 1 : Macroéconomie de l'huile de palme	9
1 Production, Exportation, Importation, Consommation et Prix	9
1.1 Production mondiale d'huile de palme	9
1.2 Exportations, importations et consommation d'huile de palme	12
1.3 Prix de l'huile de palme	16
2 Macroéconomie et microéconomie	18
2.1 Pourquoi alors utiliser l'huile de palme comme carburant ?.....	18
2.2 Conclusion.....	19
Chapitre 2 : Présentation, technologie d'extraction et raffinage de l'huile de palme	21
1 Présentation de l'huile de palme	21
1.1 Le palmier à huile	21
1.2 L'huile de palme	23
2 Technologie d'extraction et raffinage de l'huile de palme	25
2.1 Principes généraux.....	25
2.2 Procédé artisanal d'extraction de l'huile de palme.....	25
2.2.1 Egrappage	25
2.2.2 Stérilisation.....	25
2.2.3 Broyage.....	27
2.2.4 Réchauffage des fruits broyés.....	27
2.2.5 Pressurage	27
2.2.6 Clarification	28
2.3 Procédé industriel d'extraction de l'huile de palme	28
2.3.1 Stérilisation.....	28
2.3.2 Egrappage	28
2.3.3 Le malaxage.....	29
2.3.4 Le pressurage	29
2.3.5 La clarification.....	30
2.3.6 Finition de l'huile.....	30
2.3.7 Défibrage du tourteau.....	31
2.3.8 Conditionnement des noix	31
2.4 Extraction de l'huile de palmiste	31
2.4.1 Procédé traditionnel	31

2.4.2	Procédé industriel.....	31
2.5	Raffinage de l'huile de palme.....	32
2.6	Utilisations de l'huile de palme et palmiste	32
2.7	Conclusions	33
Chapitre 3 : Etude comparative et propriétés de l'huile de palme et d'autres carburants ...		35
1	Etude comparative entre l'huile de palme et d'autres carburants	35
1.1	Le Diesel	35
1.2	L'huile de Colza	35
1.3	Le Biodiesel (BD).....	39
1.4	Les huiles végétales non raffinées (SVO*).....	40
1.5	Le Jatropha	40
1.6	L'huile de palme	40
2	Propriété de l'huile de palme	41
2.1	Analyse.....	41
2.2	Conclusions sur l'huile de palme.....	42
Chapitre 4 : Fonctionnement d'un moteur diesel à l'huile de palme		45
1	Rappel des objectifs.....	45
2	Démarche à suivre	45
3	Les cinq problèmes majeurs existants et leurs remèdes	47
3.1	La Viscosité.....	47
3.1.1	Chauffage de l'huile	47
3.1.2	Mélange huile - diesel	50
3.1.3	Estérification.....	51
3.2	Le Point d'éclair	52
3.2.1	Approche	52
3.2.2	Avance à l'injection	53
3.2.3	Le piston ferrotherm.....	57
3.2.4	Réinjection de gaz brûlés.....	59
3.3	La Polymérisation.....	61
3.3.1	Bref aperçu	61
3.3.2	Aspect pratique	61
3.3.3	Conséquences.....	64
3.3.4	Remèdes	64
3.4	Les Réactions chimiques.....	65
3.4.1	Preliminaires	65
3.4.2	Cas de l'huile de palme	65
3.4.3	Problèmes rencontrés dans le moteur.....	66
3.4.3.1	Moteur fonctionnant au diesel	66
3.4.3.2	Moteur fonctionnant à l'huile de palme	66
3.5	Les réactions physico-chimiques.....	74
3.5.1	Causes.....	74
3.5.2	Conséquences.....	75
3.5.3	Remèdes	76

Chapitre 5 : Résultats de tests moteur à l'huile de palme.....	77
1 Aperçu de différents essais	77
1.1 Essai chez AAN.....	77
1.2 Essai à l'Université de Songkla.....	80
1.2.1 Résultats du test de courte durée	81
1.2.1.1 Consommation spécifique	81
1.2.1.2 Rendement thermique.....	82
1.2.1.3 Températures des gaz d'échappement.....	83
1.2.1.4 Densité des fumées noires	84
1.2.2 Résultats du test de longue durée.....	85
1.2.3. Conclusion de l'essai	90
1.3 Essai à l'huile de pourghère	91
2 Analyse des gaz d'échappement : pollution.....	92
Chapitre 6 : Adaptations apportées au moteur.....	95
1 Introduction.....	95
2 Calcul technico-économique.....	95
3 Conception d'un moteur à l'huile végétale	98
4 Principe d'adaptation d'un moteur à huile de palme.....	100
4.1 Filtres moteurs.....	100
4.1.1 Filtre à huile moteur.....	100
4.1.2 Filtre à air	100
4.1.3 Filtre à carburant.....	101
4.2 Système de préchauffe de l'huile de palme.....	102
4.2.1 Chauffage à source externe.....	102
4.2.2 Chauffage à source interne	103
4.2.2.1 Récupération de la chaleur de l'eau de refroidissement.....	103
4.2.2.2 Récupération de la chaleur des gaz d'échappement.....	103
4.3 Elévation de la température dans la chambre de combustion	105
4.4 Problèmes de polymérisation	108
4.5 Combattre les réactions chimiques	109
4.6 Problèmes liés aux réactions physico-chimiques	109
4.7 Conclusions	110
5 Adaptations proprement dites sur le moteur d'essai	112
Conclusion générale	114
Bilan personnel que m'a apporté l'ensemble de ce travail de fin d'étude.....	115
Bibliographie	116
Annexes	119

Introduction

Ce mémoire est mené en étroite collaboration avec *ISF (Ingénieurs Sans Frontières)* et l'ONG *CODEART* ; Ces deux organisations sont mises à contribution par les pays du Sud demandant leur aide. Il s'agit de faire une étude approfondie sur l'éventuelle utilisation de l'huile de palme en tant que combustible dans des moteurs diesel. Cette étude sera tout particulièrement axée sur l'emploi de cette huile comme combustible dans les pays Africains. Ayant de très bons contacts avec des autochtones congolais, c'est ce pays (République Démocratique du Congo) qui nous servira de guide. Il s'y trouve déjà un moteur diesel fonctionnant à l'huile de palme.

Le but du projet est de pouvoir alimenter des petits moteurs diesel (quelques kW) non plus au gasoil mais à l'huile de palme, qui localement est moins chère que le gasoil. Nous retrouvons ces moteurs diesel soit comme petits groupes électrogènes (une grande partie de l'Afrique ne dispose pas d'alimentation électrique !), soit comme petits moteurs dans l'industrie (entraînement par courroie par exemple).

Ce projet étant de type humanitaire, nous ne pouvons pas nous borner uniquement à analyser le comportement de cette huile de palme dans un moteur diesel, sans nous préoccuper de l'éventuelle durée de vie de ce projet, de son impact économique, du potentiel et des sources de production de cette huile.

C'est pourquoi nous nous voyons dans l'obligation d'introduire le sujet par une vue macro-économique de l'huile de palme dans le monde et tout spécialement en Afrique.

Par la suite, il sera aussi d'un grand intérêt de présenter l'huile de palme et d'exposer brièvement les procédés d'extraction de l'huile de palme et de palmiste. Nous verrons globalement les méthodes artisanales et industrielles en Afrique.

Enfin, nous pourrions étudier le fonctionnement de l'huile de palme dans un moteur diesel.

Une étude comparative avec d'autres combustibles nous permettra de découvrir les propriétés de notre huile et les conséquences que cela impliquera.

Ensuite, une analyse plus profonde de l'huile de palme sera abordée.

Finalement, nous disposerons de tous les éléments pour pouvoir mettre en évidence les différents problèmes que causera l'utilisation de l'huile de palme dans un moteur diesel.

Nous pénétrerons dans le vif du sujet, à savoir les remèdes que l'on pourra proposer pour résoudre les problèmes, tout spécialement pour l'Afrique.

L'étude s'achèvera par la mise en pratique des études réalisées, c'est-à-dire par la conception et la réalisation d'un « kit de montage » sur un moteur de faible puissance, qui est identique à ceux utilisés réellement en Afrique. Différents tests seront aussi exécutés.

Il reste à souligner qu'il s'agit d'un projet pour l'Afrique (en particulier le Congo, la Tanzanie, le Mali et le Ghana). La démarche et la façon de penser seront donc réalisées en fonction de ce cas particulier.

Chapitre 1 : Macroéconomie de l'huile de palme

1 Production, Exportation, Importation, Consommation et Prix

1.1 *Production mondiale d'huile de palme*

<i>Palm Oil Production (mt)</i>	Year	Year		Year	Year
	2001	2003		2001	2003
World	23.267,425	27.812,445			
Angola	56,000	58,000	Honduras	94,000	97,000
Benin	15,000	15,000	Indonesia	7.660,000	10.100,000
Brazil	110,000	120,000	Liberia	42,000	42,000
Burundi	1,760	1,760	Madagascar	3,500	3,500
Cameroon	145,000	144,000	Malaysia	11.200,000	13.180,000
Central African Republic	1,886	1,800	Mexico	8,500	20,900
China	217,000	217,000	Nicaragua	8,000	8,000
Colombia	547,571	580,000	Nigeria	903,000	905,000
Congo, Dem Republic of	167,230	175,000	Papua New Guinea	330,000	325,000
Congo, Republic of	16,700	16,700	Paraguay	2,750	2,760
Costa Rica	149,868	155,790	Peru	39,000	39,000
Côte d'Ivoire	204,863	276,000	Philippines	56,200	57,700
Dominican Republic	26,000	25,500	Sao Tome and Principe	2,025	2,025
Ecuador	320,262	243,500	Senegal	5,600	6,000
Equatorial Guinea	-	4,500	Sierra Leone	36,000	36,000
Gabon	6,400	6,400	Solomon Islands	36,000	34,000
Gambia	2,500	2,500	Suriname	220	220
Ghana	110,000	108,000	Tanzania, United Rep of	6,140	6,140
Guatemala	44,250	44,250	Thailand	550,000	620,000
Guinea	50,gggg	50,000	Togo	7,700	7,000
Guinea-Bissau	4,500	4,500	Venezuela, Boliv Rep of	80,000	70,000

(Figure : (1.1), [mt]:milliers de tonnes; FAOSTAT, FAO : Food and Agriculture Organisation of the United States)

Reprenons les chiffres les plus significatifs et les plus parlants :

<i>Palm Oil Production (mt)</i>	Year	Year
	2001	2003
World	23.267,425	27.812,445

<i>Palm Oil Production (mt)</i>	Year	Year
	2001	2003
Africa	1.787,804	1.871,825
Indonesia	7.660,000	10.100,000
Malaysia	11.200,000	13.180,000

(Figure : (1.2))

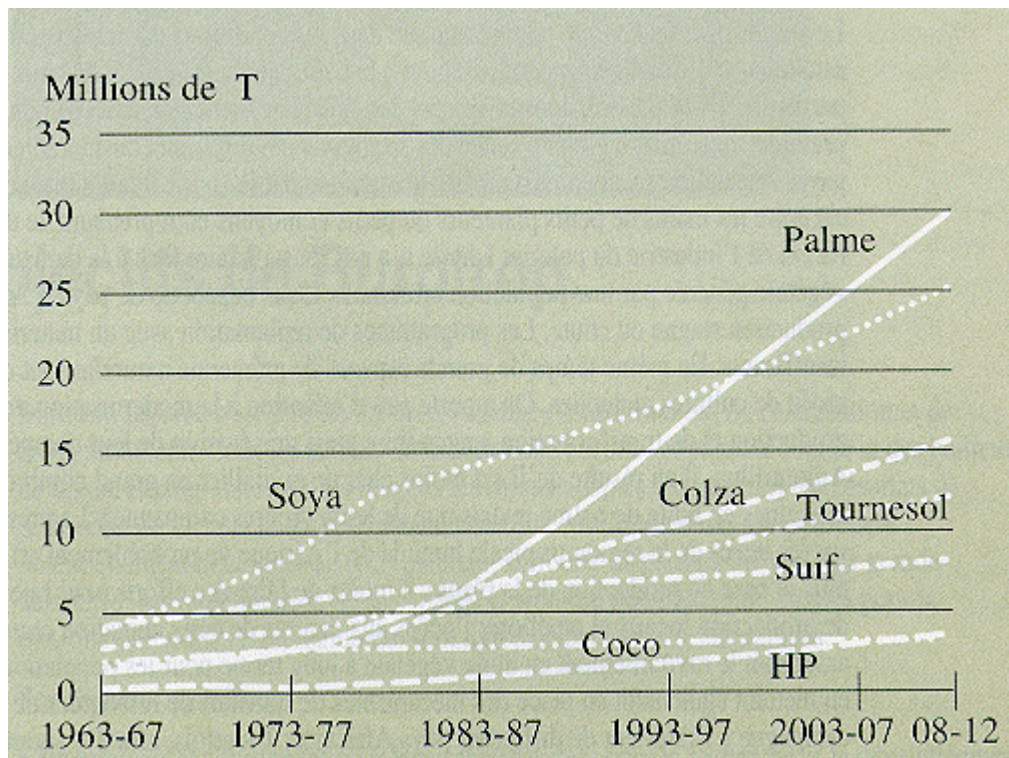
Nous remarquons que c'est la Malaisie le plus grand producteur d'huile de palme avec 47.4% de la production mondiale en 2003, elle est suivie de l'Indonésie avec 36.3%, et enfin l'**Afrique** avec **6.7% de la production mondiale**.

Nous pouvons déjà constater que la Malaisie a une production plus ou moins constante (elle ne perd que 0.7% par rapport à 2001). L'Indonésie par contre, ne cesse de croître sa production et gagne 3.4% sur la production mondiale. L'Afrique de son côté, perd un petit 1% par rapport à l'année 2001.

Retenons dès à présent que l'Indonésie voit croître sa production d'année en année et tente de rattraper la Malaisie, qui reste le producteur numéro un mondial. L'Afrique maintient sa troisième position avec une production plus ou moins constante, mais c'est un combat difficile ! Remarquons que la hausse de production mondiale entre 2001 et 2003 est quasi complètement due à la Malaisie et l'Indonésie.

Il y a lieu de préciser que nous sommes en train de parler de la production mondiale d'huile de palme, pour deux pays, comparée à celle d'un continent entier ! Cette remarque est illustrée par la figure (A.1) en annexe.

Voici encore une donnée que nous procure *Oil World*, où nous pouvons distinguer l'évolution et l'extrapolation de la production de différentes huiles entre 1963 et 2012 :



(Huiles et matières grasses : Production mondiale en millions de tonnes (HP Huile de Palmiste).
Source: *Oil World*. (Figure : (1.3))

Nous observons une hausse continue de la production d'huile de palme. Le fameux boum de production d'huile de palme dans les années 1980 y est bien représenté. Soyons tout de même attentifs à l'interprétation des prévisions futures de ce graphe. Il est à souligner que la production d'huile de soja est en ce moment toujours numéro un mondial, l'huile de palme la suit de très près, comme le montre le tableau suivant :

World	Year
<i>Production (mt)</i>	2003
<i>Oil of Soya Beans</i>	27.951,970
<i>Oil of Palm</i>	27.812,445

(Figure : (1.4), FAOSTAT)

Remarquons cependant que les données varient légèrement suivant les sources, mais que cela n'enlève rien à l'interprétation générale des graphiques et des données.

1.2 Exportations, importations et consommation d'huile de palme

Nous allons à présent comparer les *exportations, importations et la consommation propre* de la Malaisie, l'Indonésie et l'Afrique.

(Ultérieurement, seuls les résultats de l'année 2001 seront utilisés, puisque les données pour 2003 ne sont uniquement accessible que chez *Oil World* moyennant rétribution. Le but ici est seulement d'essayer de donner une image globale de la situation. Remarquons, cependant, que les chiffres entre 2001 et 2003 ont très peu évolué pour l'Afrique.)

<i>Palm Oil</i> Year 2001	<i>Production (mt)</i>	<i>Exports (mt)</i>	<i>Imports (mt)</i>	<i>Domestic Supply (mt)</i>
Africa	1.787,804	218,901	1.766,937	3.338,890
Indonesia	7.660,000	5.562,600	20,343	2.917,743
Malaysia	11.200,000	12.613,195	198,558	250,363*

(Figure : (1.5), FAOSTAT)

Définissons tout d'abord le '*Domestic Supply*' comme étant la somme de la production, des importations et de la diminution des stocks, dont on a soustrait les exportations. Nous l'appellerons tout simplement la '*consommation propre*' du pays en question.

Pour ne pas surcharger les tableaux, nous n'avons pas représenté les variations de stocks, celles-ci étant généralement négligeables. Les astérisques (*) signalent ce genre de report. Pour les mêmes raisons, nous n'avons également pas tenu compte des quelques pertes en tout genre dans la chaîne de production.

Nous constatons d'après ce tableau que la Malaisie produit essentiellement pour l'exportation, car sa production est énorme par rapport à sa population. En effet, la Malaisie ayant une population moyenne de 22.218.000 personnes, elle n'en consomme qu'environ 11,3 kg par personne par an. Nous prenons ceci comme point de comparaison afin d'y voir plus clair.

Nous ne discuterons pas des ses importations, qui sont ici très probablement liées à des raisons économiques.

Du côté de l'Indonésie, nous avons la même approche économique d'exportation. Le pays étant peuplé d'environ 212.000.000 habitants, la consommation est de 13,8 kg par personne par an. Notons qu'elle se trouve dans le même ordre de grandeur que son pays voisin, la Malaisie.

L'Afrique tout entière, par contre, importe quasi autant que ce qu'elle produit. On peut tout simplement dire qu'elle devrait doubler sa production pour ne plus devoir importer, toutes choses restantes égales. Sa consommation est de 4,3 kg par personne par an, en ne relevant que les pays africains consommateurs d'huile de palme, c'est-à-dire 777.970.000 de consommateurs potentiels sur les 848.735.000 habitants d'Afrique. Remarquons que la consommation moyenne par habitant de l'Afrique est trois fois plus petite que celle en Indonésie et en Malaisie.

Examinons en détail l'Afrique :

<i>Palm Oil</i>	<i>Production (mt)</i>	<i>Exports (mt)</i>	<i>Imports (mt)</i>	<i>Domestic Supply (mt)</i>
Year 2001				
<i>Africa</i>	1.787,804	218,901	1.766,937	3.338,890
Algeria	-	4,976	67,007	62,031
Angola	56,000	-	4,900	60,900
Benin	15,000	16,000	7,479	6,479
Botswana	-	27	644	617
Burkina Faso	-	-	17,729	17,729
Burundi	1,760	5	853	2,608
Cameroon	145,000	11,054	4,008	137,954
Cape Verde	-	-	244	244
Central African Republic	1,886	-	-	1,886
Chad	-	-	3,596	3,596
Comoros	-	-	250	250
Congo, Dem Republic of	167,230	100	8,000	175,130
Congo, Republic of	16,700	-	6,873	23,573
Côte d'Ivoire	204,863	90,346	35,715	185,232
Djibouti	-	-	13,359	13,359
Egypt	-	130	210,134	210,004
Ethiopia	-	-	22,403	22,403
Gabon	6,400	6,392	1,850	1,858
Gambia	2,500	-	2,200	4,700
Ghana	110,000	37,848	16,012	88,164
Guinea	50,000	101	3,851	53,750
Guinea-Bissau	4,500	10	340	4,830
Kenya	-	8,774	366,882	358,108
Liberia	42,000	5,500	400	36,900
Libyan Arab Jamahiriya	-	621	385	764*
Madagascar	3,500	130	1,788	5,158

<i>Palm Oil</i>	<i>Production (mt)</i>	<i>Exports (mt)</i>	<i>Imports (mt)</i>	<i>Domestic Supply (mt)</i>
Year 2001				
Malawi	-	-	970	970
Mali	-	-	8,699	8,699
Mauritania	-	-	12,309	12,309
Mauritius	-	-	3,211	3,211
Morocco	-	1,117	14,192	13,075
Mozambique	-	-	31,400	31,400
Namibia	-	3	72	69
Niger	-	-	29,935	29,935
Nigeria	903,000	8,000	186,990	1.081,990
Rwanda	-	-	6,685	11,685*
Sao Tome and Principe	2,025			2,075
Senegal	5,600	657	27,196	32,139
Seychelles	-	-	860	860
Sierra Leone	36,000	50	1,600	37,550
South Africa	-	8,397	283,948	290,551*
Sudan	-	-	50,919	50,919
Swaziland	-	1	90	89
Tanzania, United Rep of	6,140	14,918	178,653	111,875*
Togo	7,700	3,610	16,567	20,657
Tunisia	-	-	24,670	24,670
Uganda	-	34	39,381	39,347
Zambia	-	-	18,000	18,000
Zimbabwe	-	100	18,287	18,187

(Figure : (1.6), FAOSTAT)

Laissons le soin au lecteur de découvrir par lui-même les données qu'il désire analyser. Une carte d'Afrique se trouve en annexe à la figure (A.2).

Ci-dessus, le tableau parle de lui-même. Nous pouvons y découvrir les pays africains producteurs d'huile de palme ou non, et surtout la quantité qu'ils importent, qui peut être considérée en premier lieu par la hausse de production qu'ils devraient effectuer pour pouvoir subvenir à leurs 'besoins'. Il ne faut pas être étonné de voir certains pays avec une quantité d'importations assez conséquente malgré leur bonne production : il est parfois préférable et moins cher d'importer l'huile de palme que de la produire soi-même. Les faibles quantités exportées, mais tout de même bien présentes, se justifient d'une manière identique : revendre son huile de palme peut être quelquefois économiquement plus intéressant que de la consommer.

Nous remarquons que c'est le **Nigeria** qui **produit** la plus grande partie, près de la moitié de la quantité produite en Afrique ! Il est suivi par la Côte d'Ivoire, la République Démocratique du Congo, le Cameroun, et le Ghana.

Par contre, du point de vue de l'**exportation**, c'est la Côte d'Ivoire qui exporte le plus (un peu moins que la moitié de sa production !), suivie du Ghana, du Bénin, de la Tanzanie et du Cameroun.

En **importation** d'huile de palme, c'est le Kenya et l'Afrique du Sud qui sont en tête, tous deux ne produisant rien. (Le Kenya a entrepris une immense plantation de palmeraie depuis peu, les premières goûtes sortiront très prochainement). Mentionnons, par ailleurs, que le Nigeria, qui est le plus grand producteur, en importe une quantité assez élevée, égale à un cinquième de sa production.

Les plus grands **consommateurs** sont, en ordre décroissant le Nigeria, le Kenya, l'Afrique du Sud, l'Egypte, la Côte d'Ivoire, la République Démocratique du Congo, le Cameroun et la Tanzanie.

Ce qui a de l'importance ici, c'est de remarquer les pays qui consomment une quantité proche de leur propre production. Nous y retrouvons entre autres les cinq plus gros producteurs africains cités plus haut. On pourrait déjà dire qu'eux et d'autres qui se rajoutent à cette liste, sont dans la possibilité de s'autoalimenter, du point de vue d'huile de palme bien sûr.

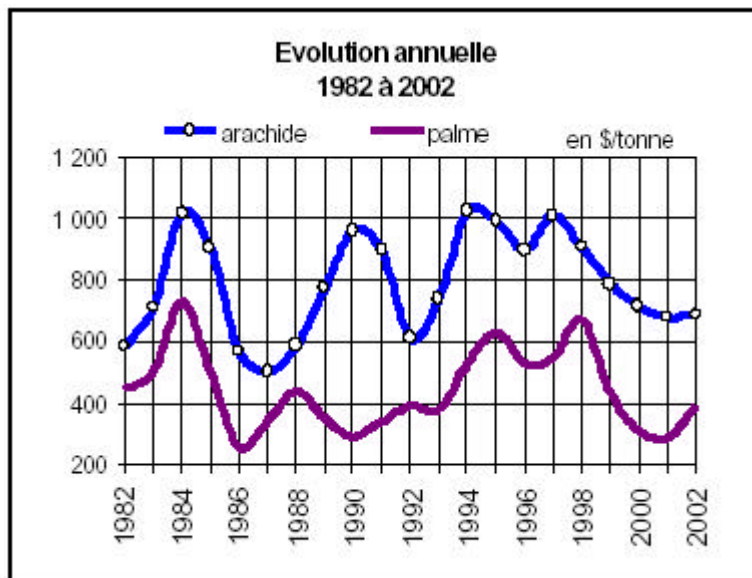
Nous retrouvons, en annexe, un tableau (A.3) qui ajoute les '**consommations annuelles par personnes**' pour tous ces pays dans le but de pouvoir faire apparaître une autre donnée. Parlons des pays avec une forte consommation annuelle par personne : le Djibouti avec 21,1 kg par personne par an, suivi de Sao Tome and Principe avec 15 kg par personne par an, le Liberia avec 12,7 kg par personne par an, le Kenya avec 11,7 kg par personne par an, puis la Côte d'Ivoire avec 11,6 kg par personne par an, et puis les Seychelles à 10,1 kg par personne par an, le Nigeria à 9,5 kg par personne par an, et enfin le Cameroun à 9,2 kg par personne par an. Le reste des pays africains, voit la consommation personnelle décroître, passant par 1 à 2 kg par personne par an, jusqu'à atteindre les 0,3 - 0,4 kg par personne par an (à l'exception de la Namibie qui est à 0,04 kg par personne par an !!!).

Rappelons la Malaisie avec une consommation de 11,3 kg par personne par an et l'Indonésie avec ses 13,8 kg par personne an.

L'information que nous désirons faire passer ici, n'est pas de coller des chiffres à des pays, mais bien de planter le décor et montrer au lecteur les différents pays africains, qu'il aura eu plusieurs fois sous les yeux, susceptibles de pouvoir s'intégrer au projet de ce mémoire.

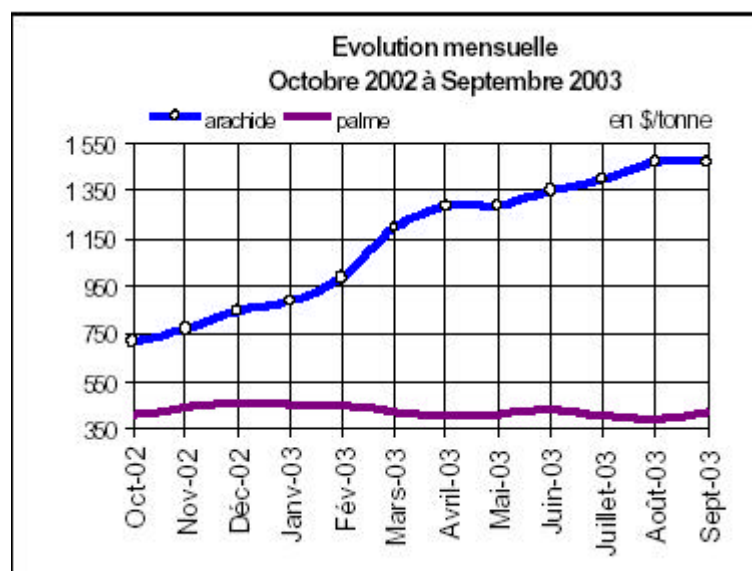
1.3 Prix de l'huile de palme

Question prix, nous avons pu obtenir les informations suivantes (d'après *Oil World*) :



(Figure : (1.7))

Remarquons que le prix de l'huile de palme a fortement fluctué les années écoulées. La figure (1.8) nous montre que le prix tente de se stabiliser. En effet, le cours moyen long terme de l'huile de palme sur le marché mondial, est de l'ordre de 350 à 450 US \$/tonne.



(Figure : (1.8))

A titre de comparaison, sachant que le baril de pétrole vaut environ 25-30 US \$, soit près de 180 US \$ la tonne, la tonne de gasoil (après raffinage) vaut alors environ 200 US \$/tonne.

Nous avons repris ci-après les données de *Worldbank* à fin de pouvoir visualiser les prix du pétrole, du soja et de l'huile de palme. Notons que l'huile de soja, numéro un mondial en production, est aussi nettement plus chère que l'huile de palme.

COMMODITY PRICE DATA

Commodity	Unit	Annual averages			Quarterly averages				Monthly averages			
		Jan-Dec	Jan-Dec	Jan-Jan	Oct-Dec	Jan-Mar	Apr-Jun	Jul-Sep	Oct-Dec	Nov	Dec	Jan
		2002	2003	2004	2002	2003	2003	2003	2003	2003	2003	2004
Crude oil, Brent	a/ \$/bbl	24.97	28.85	31.18	26.75	31.41	26.12	28.44	29.43	28.77	29.93	31.18
Soybean oil	b/ \$/mt	454.3	553.9	658.0	559.7	521.3	534.3	531.0	629.0	625.0	638.0	658.0
Palm oil	b/ \$/mt	390.3	443.3	496.0	438.3	445.3	419.7	408.7	499.3	503.0	510.0	496.0

(Figure : (1.9), Worldbank)

2 Macroéconomie et microéconomie

2.1 Pourquoi alors utiliser l'huile de palme comme carburant ?

Oui en effet, on pourrait se poser la question. Pourquoi essayons-nous alors de faire fonctionner un moteur diesel avec de l'huile de palme, et ce, tout spécialement pour les pays africains. Nous venons de voir que l'Afrique toute entière produit peu d'huile de palme comparativement aux deux pays les plus grands producteurs mondiaux, la Malaisie et l'Indonésie. On voit que l'Afrique exporte très peu et comme sa consommation propre est loin d'être satisfaite, elle doit importer une quantité égale à sa production.

Mais analyser tout un continent est chose difficile. C'est en analysant ces différents pays que l'on se rend compte que certains ont les capacités et les moyens de subvenir à leurs besoins. Nous citerons les pays à forte production et faible importation, tels que le Nigeria, la Côte d'Ivoire, la République Démocratique du Congo, le Cameroun, et le Ghana.

Pour ces pays, et certes d'autres encore à plus faible production, il serait tout à fait envisageable d'essayer de faire fonctionner des moteurs diesel à l'huile de palme, si toutefois le prix local de l'huile de palme est inférieur au prix local du gasoil, et c'est le cas !

Prenons l'exemple de la Tanzanie, qui produit peu d'huile de palme et en importe une grande quantité. Le prix du diesel y est de 0,6 – 0,7 €/l, comparativement à l'huile de palme qui revient 60% moins chère.

En République Démocratique du Congo, à Butembo notre village de correspondance, le diesel se vend en ce moment à 0,65 €/l, tandis que l'huile de palme s'achète à 0,30 €/l.

Pour donner un ordre de grandeur des prix relevés un peu partout en Afrique, retenons que le diesel se situe à 0,6 - 0,7 €/l, voir même 0,85 €/l, tandis que l'huile de palme revient toujours aux alentours de **60% du prix du diesel**, c'est-à-dire ± 0,3 - 0,5 €/l maximum.

Ce qui fait chuter le prix de l'huile de palme comme combustible en comparaison avec les prix sur le marché mondial, repris plus haut, est déterminé par les deux facteurs suivants :

- Tout d'abord il faut savoir qu'il est très simple de se procurer de l'huile de palme comme carburant. Il suffit de percer le fruit à la main avec de simples extracteurs, et l'huile ainsi obtenue, après quelques simples traitements supplémentaires, peut être immédiatement bonne pour l'utilisation en tant que carburant.
- Le deuxième facteur découle du premier, en ce sens que cette huile ne requiert pas de raffinage ou d'autres processus nécessaires à une destination alimentaire ou à la production de savon.

Ceci sera le sujet du prochain chapitre où ces différents aspects seront traités en vue d'avoir une brève idée sur le cheminement que subi l'huile de palme avant d'être injectée dans le moteur.

2.2 Conclusion

Pendant les années 1980 les coûts de production de l'huile de palme étaient inférieurs au prix du pétrole brut, sans subventions. Il y avait aussi beaucoup d'organisations étrangères, surtout allemandes, françaises et américaines, qui ont lancé des gros projets de réalisation de palmeraies en Afrique. La production d'huile de palme grimpait et les gains suivaient, la population avait du travail et donc des revenus. Malheureusement un certain relâchement s'est produit et les palmeraies ont été de moins en moins entretenues. Par conséquent les rendements diminuaient et les machines et outils utilisés se voyaient vieillir, provoquant un rendement encore plus faible.

Dès à présent, la France, l'Allemagne et l'Amérique rassemblent à nouveau leurs forces pour tenter de redresser la barre dans certains pays africains et financent de nouvelles palmeraies. En effet, il est grand temps que l'Afrique se ressaisisse et lance une politique de production en masse d'huile de palme.

Ce mémoire rentre justement bien dans cette optique-là. L'utilisation d'huile de palme comme carburant pourrait être à ce moment déjà un pas en avant dans ces pays africains qui peuvent se le permettre : nous entendons par là qu'il faut en premier lieu, indiscutablement utiliser l'huile de palme comme source alimentaire. (Nous verrons dans le prochain chapitre les différents atouts de l'huile de palme).

L'utilisateur d'huile de palme (produite sur place comme carburant), réalisera une économie substantielle puisqu'il ne devra pas acquérir du diesel. Le fait de pouvoir se décrocher de l'importation de diesel (et donc des pays producteurs de pétrole) et de favoriser la production interne d'huile de palme sera tout bénéfique pour le pays qui verra sa production d'huile de palme augmenter. De nouvelles perspectives s'offriront à ce pays avec de nombreuses conséquences favorables.

Ceci se trouve bien dans les prévisions de *Oil World*, qui prévoit qu'en 2012 la production mondiale d'huile de palme supplantera largement la production des autres huiles. Toujours selon *Oil World* la production d'huile de palme ne devrait cesser de croître et son prix devrait être de plus en plus attractif. Il est tout à fait indispensable que l'Afrique saisisse cette chance.

Pour l'instant, nous faisons l'impossible pour que cette étude et ce mémoire puissent être utilisés dans quelques pays africains. Il est alors à espérer que le fonctionnement d'un moteur diesel à l'huile de palme se répande et qu'il se produise un effet boule de neige, qui entraînera une plus forte demande d'huile de palme et par conséquent une hausse de production interne dans le pays utilisant l'huile de palme comme carburant.

Le but de ce chapitre a été de sensibiliser le lecteur à la situation économique de l'Afrique, de bien faire la part des choses entre la macro et la microéconomie, et bien sûr de convaincre le lecteur qu'il y a un certain potentiel en Afrique, en commençant par quelques pays bien ciblés, qui pourront sans trop de problème se joindrent à ce projet...

|

|

Chapitre 2 : Présentation, technologie d'extraction et raffinage de l'huile de palme

1 Présentation de l'huile de palme

1.1 *Le palmier à huile*

Il existe plusieurs sortes de palmier à huile, mais celui qui nous intéresse ici, c'est l'*Elaeis guineensis*. Comme son nom l'indique, ce palmier de 20 mètres de haut est originaire de Guinée d'où il fut exporté, entre autres, vers l'Amérique. Son énorme atout est son rendement à l'hectare supérieur à n'importe quel autre oléagineux.

Quand il est planté dans la palmeraie, le jeune palmier (photo ci-dessous) forme des fleurs mâles. Les fleurs se forment à la base de chaque feuille. Pendant quelques mois, le palmier produit seulement des fleurs mâles. Ensuite, pendant quelques mois, il produit seulement des fleurs femelles.



(Figure : (2.1))

Les fleurs mâles sont groupées en épis.
Les fleurs femelles forment d'autres épis.
Les fleurs mâles fécondent les fleurs femelles.
Les fleurs femelles fécondées donnent un régime (photos ci-dessous)



RÉGIME
Les fleurs femelles fécondées
deviennent un régime

(Figure : (2.3))



(Figure : (2.2))

Le palmier à huile n'a pas de branches : il a un tronc et des feuilles.

Le tronc s'appelle un stipe. Au sommet du stipe, il y a un seul bourgeon : c'est le bourgeon végétatif, qui fait vivre et grandir le palmier. Si le bourgeon meurt, l'arbre meurt aussi.

Le bourgeon végétatif du palmier adulte produit en moyenne 20 à 25 feuilles par an.

Il est très important que le bourgeon produise beaucoup de feuilles. En effet, il y a une fleur à la base de chaque feuille. S'il y a beaucoup de feuilles, il y aura beaucoup de fleurs, et s'il y a beaucoup de fleurs, il y aura beaucoup de fruits, de régimes.

Le palmier se développe bien et produit beaucoup, dans les régions où :

?? il fait chaud,

?? le soleil est très fort,

?? il pleut beaucoup.

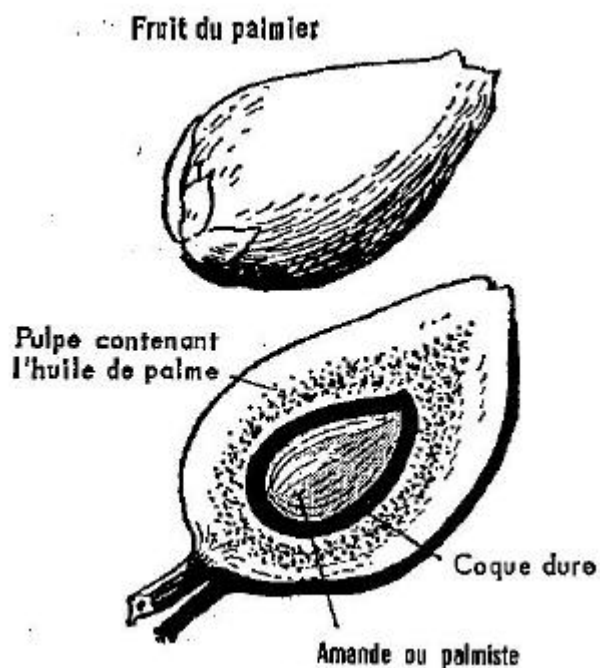


(Figure : (2.4), Régime d'un palmier adulte)

1.2 L'huile de palme

Les régimes sont formés d'épis. Les épis portent des fruits et ce sont ces fruits qui donnent de l'huile.

Avant de sortir l'huile des fruits, on sépare les fruits des épis.



(Figures : (2.5) et(2.6))

Les fruits du palmier sont composés :

- ?? d'une pulpe : la pulpe est jaune et quand on l'écrase, elle donne **l'huile de palme**.
- ?? d'une graine : quand on casse la coque de la graine, on trouve le palmiste (amande).
Quand on écrase le palmiste, il donne **l'huile de palmiste**.
Le palmiste contient aussi le germe.

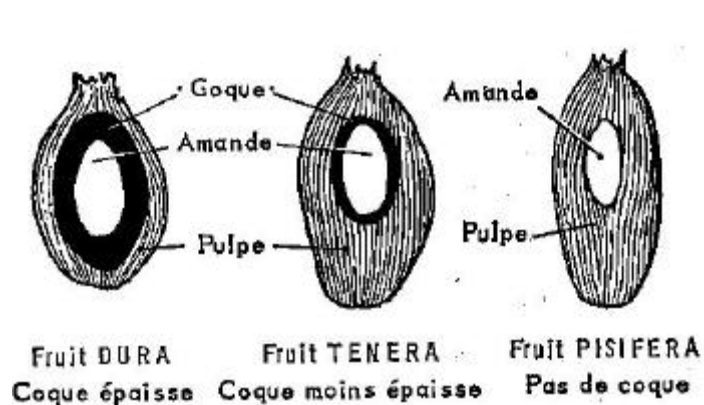
Mais tous les fruits des palmiers à huile ne se ressemblent pas :

- ?? ils n'ont pas tous la même grosseur.
- ?? l'épaisseur de la pulpe est différente.
- ?? l'épaisseur de la coque est différente.
- ?? certains fruits n'ont pas de coque.

En effet, il y a plusieurs variétés, on distingue :

- ?? le *dura* : les palmiers avec fruits à coque épaisse.
- ?? le *pisifera* : les palmiers avec des fruits sans coque.
- ?? le *tenera* : les palmiers avec fruits à coque moins épaisse.

Une représentation des ces différentes variétés est donnée ci-dessous.



(Figure : (2.7))

Il va de soit que, si les palmiers portent des régimes nombreux et gros, on obtient beaucoup d'huile. Mais on désire aussi que le fruit ait :

- ☒ beaucoup de pulpe
- ☒ une coque peu épaisse
- ☒ une grosse amande

Ainsi on obtient une grande quantité d'huile de palme (la pulpe) et d'huile de palmiste (l'amande). Cette dernière est facilement cassable grâce à la faible épaisseur de la coque.

Pour arriver à ce but, les chercheurs ont créé des variétés de palmiers qui produisent des fruits ayant ces caractéristiques. Il s'agit de **palmiers sélectionnés**. Ces palmiers ont vu le jour en fécondant les fleurs femelles d'un palmier *dura* avec le pollen d'un palmier *pisifera*. Après la fécondation, les fleurs femelles deviennent des fruits, qui sont de la variété *tenera*. Ces fruits répondent aux attentes voulues, et c'est ce type de variétés que l'on rencontrera le plus souvent. On parle de 4 à 5 tonnes d'huile par hectare pour un palmier adulte bien entretenu, durant sa vie productive qui est de 25 à 30 ans.

Cependant une autre variété se fait de plus en plus remarquer principalement dans les pays plus frais de l'Afrique, le Kenya par exemple. C'est un croisement entre la variété *dura*, qui est plus résistante au froid, et la variété *tenera*, qui a un haut rendement. On les appelle les *palmiers hybrides*. Leurs fruits peuvent être récoltés au bout de trois ans et les palmiers atteignent leur maturité à environ six ans. Les palmiers adultes donnent à peu près 20 tonnes de régimes de fruits frais l'hectare par an, soit, en gros, 4 tonnes d'huile.



(Figure : (2.8), huile de palme jaune)

2 Technologie d'extraction et raffinage de l'huile de palme

2.1 Principes généraux

La **qualité** de l'huile de palme produite dépend en grande partie de la **vitesse** avec laquelle sont traités les régimes. Par exemple, les fruits blessés, attendant plus d'une journée avant d'être traités, produiront une huile plus acide.

Nous allons brièvement décrire les traitements appliqués au régime qui ont pour objet de dissocier progressivement : les rafles, les fruits, les fibres, l'huile, les boues, les noix, les coques, et finalement les amandes.

Un schéma, en page suivante, résume les différentes étapes de transformation des régimes de palme (source : « Les communautés Africaines »). Précisons tout de même que la case 'combustible' n'est pas ici un carburant, mais rassemble tous les 'déchets' du régime qui peuvent servir de matière à brûler.

Nous allons maintenant analyser l'extraction d'huile de palme suivant deux méthodes différentes, à savoir les installations artisanales (à la main) et les usines semi-industrielles (les huileries industrielles). Dans les deux cas il s'agit bien évidemment d'une façon de travailler, il en existe bien d'autres. Celles présentées ci-dessous sont tout de même les plus courantes. Nous avons encore ajouté, en annexe la figure (A.4), un schéma reprenant une autre méthode d'extraction.

2.2 Procédé artisanal d'extraction de l'huile de palme

2.2.1 Egrappage

Le principe consiste à détacher les fruits des régimes. Les régimes peuvent être battus à la machette ou avec des bâtons pour détacher les fruits.

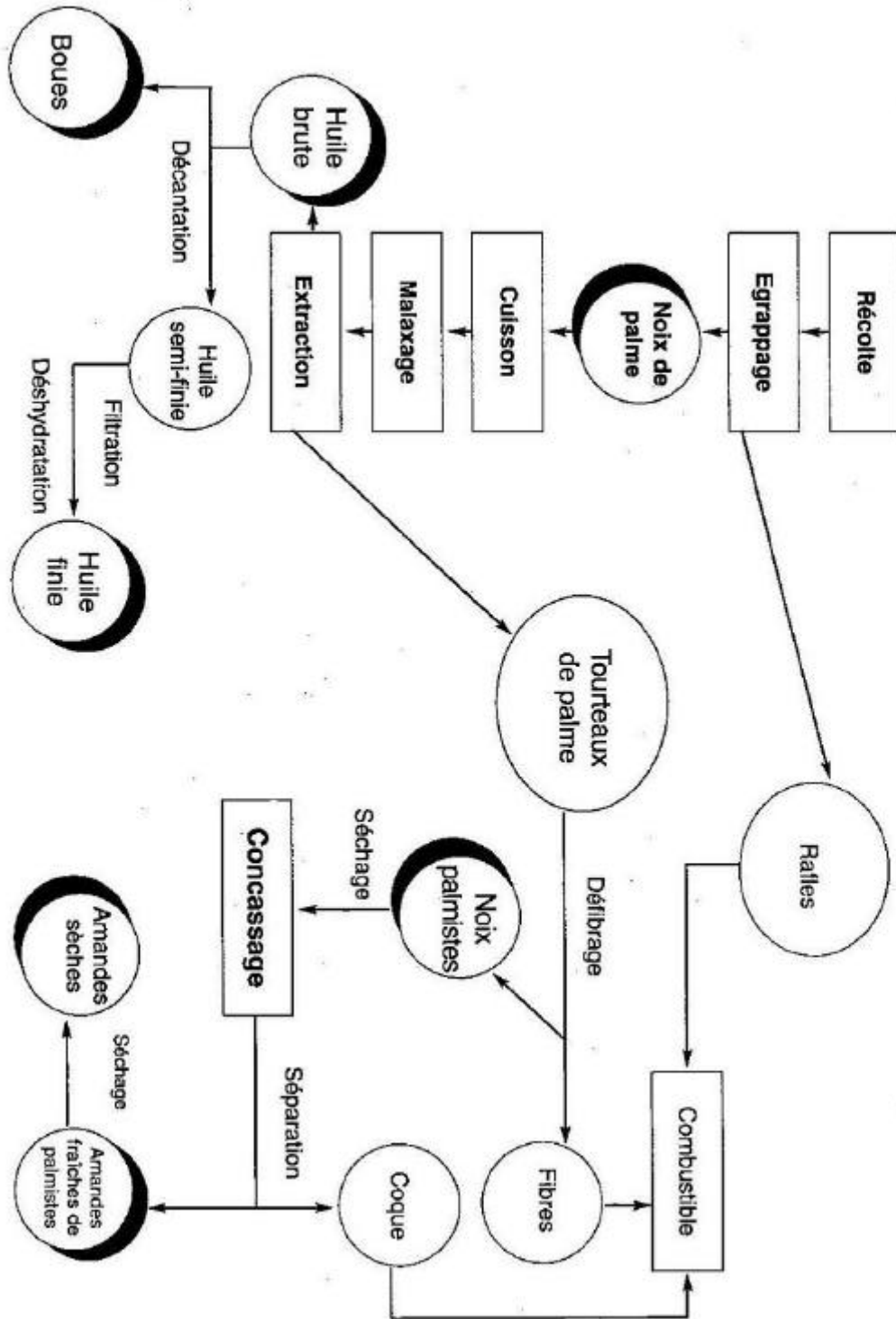
Une méthode traditionnelle consiste à laisser les régimes sous des feuilles pendant 2 à 4 jours afin de favoriser la séparation des fruits des régimes.

2.2.2 Stérilisation

La stérilisation a pour objet d'inactiver les enzymes responsables de la lipolyse et de l'oxydation.

Les fruits égrappés, sont stérilisés dans des fûts de 200 litres, remplis d'**eau** bouillante durant 15 à 20 minutes.

SCHEMA DE TRANSFORMATION DES REGIMES DE PALME



2.2.3 Broyage

Les fruits stérilisés sont broyés dans un mortier jusqu'à obtention d'une mixture à peu près homogène de pulpe et d'amande.

Une méthode traditionnelle consiste à placer cette mixture dans une fosse aux parois cimentées. L'huile qui surnage est extraite. Les fibres sont éliminées et les amandes mises à sécher.

2.2.4 Réchauffage des fruits broyés

Les fruits broyés peuvent être pressés. Ils subissent d'abord un léger chauffage afin d'accroître le taux d'extraction d'huile pendant le pressurage.

Pour effectuer ce chauffage, les fruits sont placés dans des fûts vidés régulièrement par le bas (système en continu).

2.2.5 Pressurage

Il existe trois grands types de presse qui diffèrent par leur mode de fonctionnement :

?? *Les presses à vis verticale* : Les fruits sont placés dans un cylindre perforé, un plateau ajusté à la taille du cylindre est progressivement descendu par un système de vis verticale. Un bras de levier est utilisé pour tourner la vis.

Les modèles les plus courants sont :

- ☞ la presse Liklik Buk (USA)
- ☞ la presse TTC (Ghana)
- ☞ la presse SODIZI (Cassamance)
- ☞ la presse KIT (Pays Bas)
- ☞ la presse mécanique moderne
- ☞ la presse « oleumette-oleum »

?? *Les pressoirs continus à vis (type COLIN)* : Ce type de pressoir est muni de deux vis sans fin à axe commun horizontal. La première pousse le produit vers une seconde vis qui tourne en sens inverse et qui presse le produit. Les taux d'extraction de ce type de matériel est d'environ 22%. Les presses SPEICHIM travaillent de cette manière.

?? *Les presses hydrauliques manuelles* : Elles fonctionnent avec un système de vérin vertical à la place de la vis. Les modèles les plus courants sont :

- ☞ la presse STORK (Pays Bas)
- ☞ la presse CENEMA (Cameroun)
- ☞ la presse KIVT (Pays Bas)
- ☞ la presse RVR
- ☞ la presse WECKER
- ☞ la presse NIFOR

A titre d'exemple, prenons l'équipement NIFOR (Nigeria) composé d'un cuiseur ou stérilisateur, d'un malaxeur, d'une presse hydraulique à commande manuelle et d'un clarificateur. La capacité horaire d'une telle presse est de 350 kg/h en moyenne sur fruit.

Différentes presses sont présentées en annexe à la figure (A.5).

2.2.6 Clarification

Il s'agit de séparer l'**huile**, l'**eau** et les boues en utilisant l'action de la chaleur. Traditionnellement, l'huile brute est bouillie dans des récipients ouverts. Les fibres et l'eau se déposent au fond, l'huile est écumée. Cette huile est ensuite frite dans des bassines peu profondes pour éliminer les dernières traces d'eau.

On peut également utiliser un clarificateur fonctionnant en continu. Un grand fût contient un autre fût plus petit. L'huile est introduite par le bas et, avec l'effet de la chaleur, le mélange se décante, les boues et l'eau vont au fond, l'huile surnage et passe dans le fût intérieur.

2.3 Procédé industriel d'extraction de l'huile de palme

Les opérations sont identiques mais le matériel employé est de grande capacité et permet d'obtenir un bon taux d'extraction d'huile.

2.3.1 Stérilisation

Ici, la stérilisation précède l'égrappage. La stérilisation est essentielle pour limiter l'apparition d'acides gras libres. (Nous en verrons par la suite les conséquences).

Les régimes sont placés dans de la vapeur d'**eau** sous pression (2,5 à 3 kg/cm²) durant 30 à 60 minutes.

Il existe des stérilisateurs horizontaux où les régimes sont placés dans des wagonnets (1,5 à 2 tonnes !) qui circulent dans un long cylindre.

Les stérilisateurs verticaux sont des récipients cylindriques placés verticalement avec chargement par le haut et vidage par une porte latérale en bas.

2.3.2 Egrappage

Cette opération sépare les rafles des fruits. Le détachement des fruits est obtenu par chocs répétés, les fruits passent à travers des barreaux interdisant le passage des rafles.

L'égrappoir à cage est constitué d'une cage cylindrique de grand diamètre, à axe horizontal, animée d'un mouvement lent (20 à 30 tours/min). Les régimes remontent le long de la paroi intérieure de la cage par frottement sur des cornières inclinées longitudinalement. Ils retombent en chute libre, le choc détache les fruits, les rafles sont évacuées.

L'efficacité de l'appareil dépend des dimensions de la cage, de la vitesse de rotation, des cornières,... Ce procédé est très efficace sur les régimes bien mûrs et encore chauds.

En annexe à la figure (A.6) sont représentées une égrappeuse manuelle et une autre motorisée.

Il existe aussi des égrappoirs à bras batteurs : les régimes placés dans une cuve en forme d'auge sont « frappés » par des pales tournantes qui détachent les fruits. Le réglage de ces appareils est difficile, mais ceux-ci conviennent bien pour des petites unités (3 tonnes à l'heure).

2.3.3 Le malaxage

Cette opération prépare les fruits à l'extraction de l'huile. La pulpe est détachée des noix, les cellules oléifères sont écrasées. Les fruits sont également chauffés pour améliorer l'efficacité du procédé.

Les malaxeurs sont des cuves cylindriques verticales réchauffées par la vapeur circulant dans une double paroi. Le brassage est opéré par des bras horizontaux disposés en 3 ou 5 paires sur un axe vertical. Des cornières et des bras fixes à l'intérieur du cylindre freinent les fruits.

Les fruits restent environ 20 à 40 minutes dans la cuve et sont chauffés à 90-92°C.

2.3.4 Le pressurage

Le pressurage permet d'obtenir l'huile de palme brute et les tourteaux. Les principaux procédés sont :

- ?? les presses hydrauliques 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.
- ?? lesessoreuses centrifuges qui conviennent bien aux fruits pauvres en pulpe.
- ?? le malaxage – lavage qui consiste à laver la pulpe par de l'eau très chaude pour entraîner l'huile. La récupération de l'huile dans les boues est difficile.

Ici nous prendrons l'exemple d'une presse motorisée CALTECH, qui est horizontale, continue et à une vis sans fin constituée de deux compartiments. Sa capacité horaire moyenne est de 800 kg/h sur fruit.

2.3.5 La clarification

L'huile brute issue des appareils d'extraction est constituée d'un mélange d'**huile**, d'**eau**, de matières colloïdales et d'impuretés solides.

La séparation de l'huile s'opère en deux temps. L'huile est rapidement séparée des autres impuretés, puis les boues sont traitées pour retirer ce qui reste d'huile. On peut encore renouveler ce traitement. Trois procédés sont employés :

?? *décantation statique discontinue* : L'huile brute est décantée pendant 12 heures dans des bacs. Les boues et l'huile sont séparées et subissent chacune un traitement complémentaire. Cette technique est employée dans les petites installations.

?? *décantation statique continue* : Ce procédé est pratiqué dans des grands réservoirs cylindriques maintenus à une température de 85-90°C. Les impuretés et les boues descendent, l'huile remonte à la surface (en 4 à 5 heures). Ce procédé est utilisé dans les grandes unités de traitement des régimes de palmier et est fréquemment combiné soit avec un second traitement de même nature, soit par un traitement centrifugeuse – boueuse.

Une présentation d'un tel clarificateur est donnée en annexe à la figure (A.7).

?? *décantation par centrifugation* : Ce procédé est intéressant s'il fonctionne directement sur la sortie de pressurage. Mais il est coûteux et donne des résultats nécessitant un traitement supplémentaire des boues.

2.3.6 Finition de l'huile

L'huile sortant de la clarification contient encore de l'eau et quelques impuretés. Il est indispensable de réduire la proportion d'eau à moins de 0,5% pour éviter l'hydrolyse catalytique qui réduit la durée de stockage de l'huile en favorisant l'apparition d'acides gras libres. L'huile doit contenir au maximum 3% d'acides gras libres.

Pour obtenir une huile très pure, on peut la chauffer au recuisseur. A 105°C, toute l'eau est progressivement éliminée et les dernières impuretés en suspension se déposent au fond de la cuve. Trop prolongé, ce procédé altère les constituants de l'huile.

Le séchage sous pression réduite nécessite un appareillage important. Le séchage à l'air chaud (chute de l'huile chaude dans un courant d'air chaud) élimine bien l'eau restante mais pas les impuretés.

Les filtres presses réalisent une filtration en continu sur une toile de coton. Les impuretés sont bien retenues mais il reste de l'eau.

A ce stade, le traitement de l'huile de palme est terminé si elle doit être utilisée comme **carburant**.

2.3.7 Défibrage du tourteau

Le tourteau sortant des presses est un mélange de noix et de fibres humides contenant encore un peu d'huile. On utilise des défibreurs pour séparer les noix des fibres.

2.3.8 Conditionnement des noix

Pour faciliter le concassage des noix, il faut descendre le taux d'humidité des noix entre 10 et 12% afin de décoller l'amande de la coque.

On peut procéder par séchage au soleil ou, dans le cas des grandes usines, par silos chauffants à ventilation forcée.

A partir d'ici, nous sommes en mesure d'extraire l'huile de palmiste.

2.4 Extraction de l'huile de palmiste

Les amandes contiennent encore de l'huile (environ 50% de leur poids) principalement utilisée pour la fabrication de savon.

La quantité d'huile de palmiste est de l'ordre de 10% de la quantité extraite d'huile de palme dont la production actuelle peut avoisiner les 4 à 5 T/ha pour 20 T de régimes.

2.4.1 Procédé traditionnel

Les noix peuvent être passées au four dans des pots. La noix se fend sous l'effet de la chaleur, les amandes sont pilonnées encore chaudes, l'huile est extraite à l'eau chaude.

Les noix sont concassées, puis les amandes sont mises à tremper dans de l'eau chaude avant d'être pilées. La mixture macère pendant une nuit, l'huile remontée à la surface, est récupérée et clarifiée en la chauffant.

Le produit ainsi obtenu, l'huile de palmiste de couleur jaune claire, est utilisé pour l'éclairage ou la fabrication de savon.

2.4.2 Procédé industriel

Les noix sont concassées, la coque est séparée des amandes, soit par l'action d'un souffle d'air chaud, soit par densité dans l'eau.

Les amandes sont broyées, pressées, l'huile obtenue est clarifiée et épurée.

Une image d'une presse de palmiste est reprise en annexe à la figure (A.8).

2.5 Raffinage de l'huile de palme

Toutes les huiles végétales destinées à l'industrie alimentaire subissent un processus de raffinage afin d'améliorer la saveur et la qualité physique de ses produits.

L'utilisation d'huile de palme comme carburant ne doit pas subir ces diverses étapes, c'est pourquoi on se contentera de les énumérer avec un petit mot d'explication.

Le raffinage passe par les opérations de *dégommage*, *raffinage à l'alcali en neutralisation*, *hydrogénation*, *fractionnement* et *désodorisation* :

- ?? Le *dégommage* élimine les impuretés solubles et non solubles qui donnent à l'huile une saveur et un parfum désagréables. Cette opération a lieu dans des cuves chauffantes où l'huile est mélangée à de l'eau et du sel. Les impuretés sont précipitées dans une couche aqueuse rejetée par la suite.
- ?? Le *raffinage à l'alcali* a pour objet d'éliminer les acides gras libres nocifs qui en s'oxydant peuvent entraîner le rancissement. Les acides gras sont combinés à un alcali (soude) pour donner une solution éliminée par la suite. Cette opération produit également une légère décoloration de l'huile.
- ?? L'*hydrogénation* consiste à introduire de l'hydrogène afin de rendre l'huile moins liquide et plus stable chimiquement parlant. Ceci permet ensuite de produire des huiles de margarine, des huiles culinaires, des huiles multi usages pour l'assaisonnement et la friture.
- ?? La désodorisation se fait par distillation à la vapeur sous vide. Cette opération produit également une décoloration de l'huile.

2.6 Utilisations de l'huile de palme et palmiste

☞ L'huile de palme est généralement toujours raffinée pour ses applications. Compte tenu de ses caractéristiques, elle est presque uniquement destinée à l'alimentation. Elle entre dans la composition des margarines et de nombreuses graisses végétales. Elle a des propriétés régénérantes grâce à sa teneur en insaponifiables (environ 1%). Elle est restructurante, elle renforce la barrière cutanée. Sa haute teneur en graisses mono insaturées, fait baisser les taux de LDL – le « mauvais » cholestérol – tout en maintenant le HDL ou « bon » cholestérol. C'est aussi une excellente source de vitamine A et E.

☞ L'huile de palmiste a sensiblement les mêmes utilisations que celles de coprah (extraite des amandes de coco). Après raffinage, ses principaux débouchés sont dans l'alimentation :

- margarines.
- graisses végétales culinaires.
- graisses à incorporer au chocolat (interdit en France) : stéarine de palmiste. On l'emploie souvent mélangée au beurre de cacao.
- savonnerie : savons de toilette moussants, savons en poudre.
- détergents.

2.7 Conclusions

Le palmier à huile est le plus rentable des oléagineux (par hectare, le palmier à huile produit **neuf** fois plus d'huile que le soja) et il a un avantage majeur sur tous les autres, qui est celui de fournir deux types d'huiles distincts, l'huile de palme et de palmiste, toutes deux faciles à extraire séparément et qui alimentent des marchés très différents. Ces deux types d'huiles ont envahi l'industrie de l'agro-alimentaire et des produits de lessives.

Un autre atout de l'huile de palme est sa plus longue durée de conservation, que la plupart des autres huiles alimentaires, en raison de son niveau élevé d'antioxydants qui la rend particulièrement résistante au rancissement. Insistons bien sur le fait que la rapidité du traitement subi par l'huile de palme est primordiale pour l'obtention d'une huile de bonne qualité. Ainsi, un temps d'égrappage réduit, permet de bloquer le phénomène d'hydrolyse des acides gras saturés par les lipases. A la fin de la transformation, l'huile obtenue contient moins d'acides gras.

Un autre avantage est le fait que tous les 'déchets' du processus d'extraction sont utilisables.

Les rafles, les fibres et les coques sont utilisées soit comme 'combustible' en les faisant brûler dans un feu ou l'autre, soit comme aliment pour bétail.

Les régimes vides peuvent aussi servir de paillis pour augmenter la rétention d'humidité, la teneur des sols en éléments nutritifs et en matières organiques.

En résumé, dans le cas de l'utilisation d'huile de palme comme combustible dans un moteur diesel, deux procédés d'extraction sont envisageables :

L'un est le plus simpliste, car il s'agit tout bêtement de presser le fruit à la main ou avec un extracteur primitif, et l'huile ainsi obtenue **doit** être **immédiatement** injectée dans le moteur, moyennant tout de même un filtrage élémentaire. Cette huile n'a pas eu le temps de subir des réactions chimiques, telles que l'hydrolyse, l'apparition d'acides gras, etc..., qui détérioraient les propriétés physico-chimiques de cette huile. Cette méthode est très peu utilisée, car son taux d'extraction est loin d'être optimal. Elle est toutefois illustrée ici, dans le but de percevoir l'éventuelle facilité d'obtention de l'huile de palme employée comme carburant.

L'autre façon de procéder, est l'emploi d'une technique plus évoluée afin d'obtenir un meilleur taux d'extraction. Il s'agit des procédés artisanaux et industriels, présentés ci-dessus, qui font tous deux appel à l'étape de **stérilisation** de l'huile, par adjonction d'**eau**, et à l'étape de **clarification**, pour extraire cette eau. L'huile de palme traitée de cette manière porte le nom d'huile de palme *blanchie*, qui tire son nom de sa couleur plutôt blanche après ce genre de procédé. Ces étapes sont effectuées dans l'objectif d'accroître le taux d'extraction et de conférer à cette huile une meilleure résistance aux réactions chimiques défavorables pouvant s'y produire. Cette méthode est donc la plus rencontrée, afin que l'huile de palme pressée puisse être **stockée** pendant un certain moment.

Chapitre 3 : Etude comparative entre l'huile de palme et d'autres carburants et propriétés de cette huile

1 Etude comparative entre l'huile de palme et d'autres carburants

Nous allons découvrir certaines caractéristiques de l'huile de palme à l'aide d'un tableau comparatif (qui se trouve en page suivante) des différents carburants judicieusement choisis. En effet grâce à ce tableau nous pouvons rapidement percevoir certaines propriétés de l'huile de palme comparée à d'autres carburants.

Nous y retrouvons le diesel, l'huile de colza, l'huile de palme, les huiles végétales non raffinées, le biodiesel, et le Jatropha. Voyons de plus près ces différents carburants un à un.

1.1 Le Diesel

Mentionnons tout d'abord la provenance de ces chiffres. Ils nous ont été communiqués par la firme pétrolière TOTAL. Ce diesel répond aux normes belges, revues en 2001. Nous y retrouvons les minima et maxima de la qualité requise. Ces données, tout à fait fiables, sont reprises en annexe (Figure : A.9) où les méthodes d'essais sont explicitées. Pour des raisons purement pratique, nous ne les avons pas mentionnées sur le tableau comparatif.

Les propriétés du diesel serviront de références pour les autres carburants, du fait qu'il s'agit d'utiliser un moteur de conception « diesel », avec d'autres carburants.

1.2 L'huile de Colza

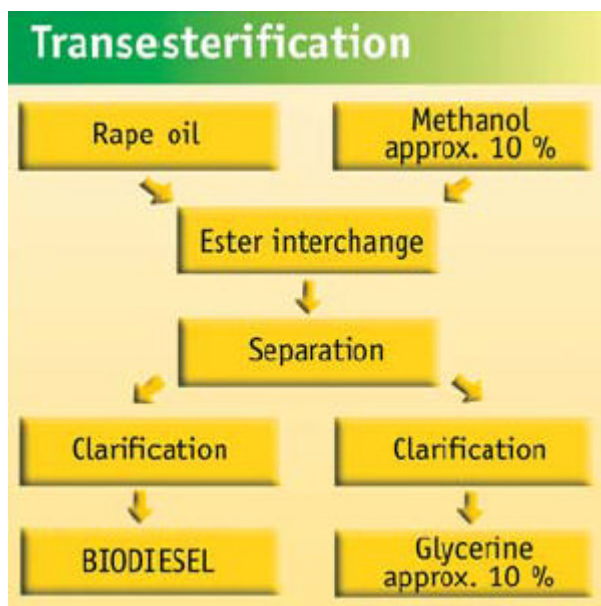
Nous remarquons dans le tableau deux propriétés distinctes, à savoir l'huile de colza 'naturelle' et l'EMC. L'huile de colza 'naturelle' désigne l'huile qui provient directement de la plante, ayant subie un simple filtrage et éventuellement un bain chaud (pour maintenir une acidité convenable), mais sans aucune modification chimique. L'EMC, est l'ester méthylique de colza.

L'huile de colza a une viscosité minimum dix fois supérieur à celle du diesel. Elle peut être utilisée dans un moteur diesel, avec toutefois des modifications à apporter au moteur pour, entre autres, abaisser la viscosité à un point de fonctionnement approprié. Disons tout de même que cette huile à l'état pur, est utilisée en Allemagne, grand producteur d'huile de colza, dans des moteurs agricoles et moteurs de véhicules routiers. Soulignons cependant qu'une modification plus ou moins importante du moteur est à prévoir. Par exemple, on vend des 'kits de montage' à partir de 500 – 800 €, tandis que VW adapte votre moteur pour la somme de 2.500 €

Certains disent que c'est une huile totalement non polluante. Soyons attentifs à ce genre d'affirmation, car une combustion produit indiscutablement du CO₂, du CO, et du NO_x. Il est tout de même vrai que le colza pur contient nettement moins de soufre, pouvant aller jusqu'à 100 fois moins, que le diesel. Le tableau nous le montre bien. L'huile de colza a des propriétés souvent fort semblables à huile de palme, nous y reviendrons par la suite.

Tableau comparatif	<u>DIESEL</u>			<u>COLZA</u>		<u>PALME</u>	<u>SVO</u>	<u>BD</u>	<u>Jatropha</u>
<i>Caractéristiques</i>	Unités	Qualité requise Min Max		Propriété Naturelle EMC		Propriété (raffinée)	Propriété		Propriété
PCI massique	kJ/kg	42.500		37.400	37.700	35.600			39.600-41.800
PCI volumique	kJ/dm ³	36.000		34.300	33.200	32.100			
Masse volumique à 15°	kg/m ³	820	845	916 (à 20°)	880 (à 20°C)	900-920	900-920	880	910-920
Stabilité à l'oxydation	g/m ³	-	25						
Indice de cétane « mesuré »	-	51,0	-	32 à 36	49-51	50			51,0
Indice de cétane « calculé »	-	46,0				(38-40)			
Pouvoir lubrifiant, diamètre de marque d'usure corrigée à 60°C	µm	-	460						
Viscosité à 40°C	mm ² /s	2,00	4,50	+/- 35	3,5-5	40	60-80	7-8 ?!	77 (à 20°C)
Corrosivité, essai à la lame de cuivre, (3h à 50°C)	classe		classe1		classe 1				
Point d'éclair	°C	> 55 (90)	-	325	> 120	280-300	> 220	135	110-240
Teneur en soufre	%		1,0-1,2	< 0,01					0,13
Diesel	mg/kg	-	350		< 10		< 10	<10	
Diesel -50S		-	50						
Teneur en Hydrocarbure de type : - Aromatiques Polycycliques	% (m/m)	-	11						
Teneur en cendres	% (m/m)	-	0,01	0,079	0,02	< 0,001			
Teneur en eau	mg/kg	-	200		500	< 500			
Teneur en phosphate	mg/kg				10		< 15	< 15	
Contamination totale	mg/kg	-	24		24				
Distillation									
- % (v/v) condensé à 250 °C	% (v/v)	-	< 65						
- % (v/v) condensé à 350 °C	% (v/v)	85	-						
- point 95 % (v/v) condensé à	°C	-	360						
Résidu de carbone (sur le résidu 10% de distillation)	% (m/m)	-	0,30		0,30	0,22			
Température limite de filtrabilité - Période d'été : classe B de mars à novembre compris - Période d'hiver : classe E décembre, janvier et février	°C		0 -15			35 (solidifie)			2 (solidifie)

L'ester méthylique de colza (EMC) a été transformé chimiquement. Voyons à l'aide d'un schéma élémentaire ce processus.



(Figure : (3.1), UFOP :Union zur Förderung von Öl -und Proteinpflanzen)

L'huile de colza (*Rape Oil*) mélangée à environ 10% de méthanol, se transforme en ester méthylique. Le procédé chimique consiste en une estérification des fonctions acides à l'aide du méthanol. Après une clarification, nous obtenons d'un côté l'EMC (*'biodiesel'*), et de l'autre, approximativement 10% de glycérine.

Cette transformation apporte une modification au niveau de la viscosité, de l'indice de cétane et de la masse volumique. Nous pouvons remarquer, à l'aide du tableau, que la viscosité a littéralement chuté et rejoint la viscosité du diesel. L'indice de cétane a augmenté et est comparable à celle du diesel. La masse volumique a quelque peu diminué. Son pouvoir calorifique inférieur (massique) n'a pas significativement changé et reste aux alentours de 37.500 kJ/kg, mais il perd en gros 5.000 kJ/kg par rapport au diesel.

L'EMC possède une teneur en soufre inévitablement aussi faible que celle du produit mère, l'huile de colza. Par contre on remarque une teneur en eau significative.

L'ester méthylique de colza peut être employé comme tel dans un moteur diesel sans aucune modification ! Alors pourquoi n'envahit-il pas le marché pétrolier... ? C'est tout simplement son coût de production qui est supérieur à celui du diesel. Selon les dernières analyses de la Commission Européenne concernant les carburants, le coût de production de l'EMC est momentanément 1,9 fois supérieur à celui du diesel. Mentionnons qu'il faudrait une superficie de champs de colza énorme afin de pouvoir produire une quantité concurrentielle au pétrole.

Un tableau en annexe (Figure : A.10) nous informe sur les différents tests de procédure suivant les normes spécifiées et reprend encore d'autres caractéristiques.

1.3 Le Biodiesel (BD)

Nous tenons tout d'abord à faire une remarque importante : nous trouvons dans la littérature le terme « biodiesel » utilisé avec deux définitions différentes. D'une part, on sous-entend l'ester méthylique de colza, d'autre part on parle du diesel avec adjonction d'huiles végétales. Ne sachant pas quel terme est le plus juste, nous emploierons par la suite le terme EMC (pour l'ester méthylique de colza) faisant partie de la famille des *biocarburants*, et nous entendrons par *biodiesel* un mélange de diesel conventionnel et d'huiles végétales.

Forcément il n'y a pas qu'un seul biodiesel. Premièrement, il faut toujours mentionner quelle huile végétale est additionnée au diesel et ensuite dans quelle proportion. En Europe, les huiles végétales utilisées dans les biodiesels, sont à bases d'huile de colza et de tournesol. Aux Etats-Unis, c'est le soja qui est employé et dans les pays tropicaux ou équatoriaux, ce sont les huiles de palme et de palmiste.

Prenons l'exemple d'adjonction de colza dans le diesel. Encore ici, il subsiste deux possibilités : soit on ajoute de l'huile de colza, soit de l'ester méthylique de colza. Des recherches ont démontré qu'on peut mettre jusqu'à 40% d'huile de colza dans le diesel pour des vieux moteurs, et jusqu'à 20% pour les moteurs plus modernes. L'huile de colza s'incorpore bien dans le diesel et n'occasionnerait pas de dégradations au moteur. Tout ceci sans aucune modification du moteur, bien entendu. Si l'on mélange un diesel conventionnel avec l'EMC, on peut obtenir des résultats assez remarquables. Des essais ont démontré que son pouvoir lubrifiant est meilleur que le diesel conventionnel et que l'on constatait une diminution de formation de particules. Un inconvénient réside dans un phénomène plus accentué d'hydrolyse avec la conséquence d'une diminution du pH qui passe dans la zone acide. On préfère souvent ne pas mentionner un autre inconvénient non négligeable : une plus forte émission (légère) d'oxydes d'azote (NO_x).

Nous trouvons par exemple sur le marché allemand le biodiesel EMC5, composé de diesel conventionnel avec 5% d'EMC. Il est le plus souvent utilisé et se trouve déjà dans plusieurs stations service. Il coûte royalement le même prix que le diesel. Il se fera de plus en plus connaître en Europe, afin de remplir les objectifs de la Commission Européenne d'incorporer par pays européen, au minimum 2% de carburant végétal en 2005 et 5,75% en 2010.

Nous retrouvons aussi pour des flottes plus spécifiques (secteur agricole, véhicules municipaux, autobus, etc.) l'EMC30, l'EMC50, voir l'EMC100, dont les concentrations en ester sont respectivement 30%, 50%, et 100%. Nous avons évoqué précédemment qu'il était tout à fait faisable d'utiliser l'EMC pur (ou presque pur). Précisons que cela vaut pour les « bons vieux moteurs diesel » et non pour les moteurs diesel modernes qui ont parfois du mal à fonctionner avec cet ester pur.

Dans le tableau comparatif, on retrouve quelques chiffres, mais comme la composition de ce biodiesel n'a pas été mentionnée, nous ne pouvons en sortir des informations parlantes. Nous pouvons juste présumer qu'il s'agirait peut être d'un mélange de diesel avec une huile végétale et non un ester, car sa viscosité est supérieure à l'EMC.

1.4 Les huiles végétales non raffinées (SVO*)

Le terme *SVO provient de « straight vegetable oil », voulant donc dire une huile en provenance directe des végétaux. Il recouvre donc toute une gamme d'huiles végétales. Souvent on emploie ce terme lorsqu'il s'agit d'un mélange d'huiles végétales, par exemple l'huile dite de friteuse. Des tests moteurs ont déjà été effectués, et les résultats ont été assez concluants. Vu sa forte viscosité, il est indispensable d'adapter le moteur avec un système de préchauffe et certains réglages sont à prévoir comme l'avance à l'injection par exemple.

Nous n'irons pas plus loin ici, car cela fait l'objet du chapitre suivant où l'on abordera ce genre de problème en détail.

Le tableau comparatif nous donne quelques valeurs. Ne connaissant pas la composition exacte de cette SVO, nous nous contenterons de remarquer qu'elle a une viscosité importante et une masse volumique élevée par rapport au diesel.

1.5 Le Jatropha

En fait, il s'agit du **Pourghère**. Le Pourghère (*Jatropha curcas*), qui pousse également en Afrique, appelé localement "Tabanani", fait partie de la famille des Euphorbiacées. Il se présente sous forme d'un petit arbre de 4 à 5m de hauteur qu'il atteint au bout de 3 à 4 ans seulement. Sa durée de vie est de 30 à 35 ans environ. Le fruit est une capsule à 2 ou 3 loges qui atteint sa maturité après 3 mois.

Cette huile a déjà fait l'objet de recherches en Afrique comme combustible et, à notre connaissance, est actuellement utilisée, comme tel, dans quelques moteurs « d'essais » en Tanzanie, au Ghana et au Mali. Des projets allemands s'impliquent fortement dans ce genre de réalisation là-bas. Les moteurs diesel doivent être adaptés et d'autres dispositions doivent aussi être mises en œuvre. Nous aurons par la suite l'occasion de faire le parallèle de cette huile avec l'huile de palme.

Découvrons dans le tableau comparatif, son pouvoir calorifique inférieur (massique) qui est le plus élevé des huiles comparées ici. Elle possède une masse volumique équivalente à l'huile de palme, son indice de cétane est lui aussi à peu près égal à celui de l'huile de palme. Sa viscosité se situe aux alentours des 77 mm²/s à 20°C, comparée à celle de l'huile de palme qui avoisine les 70 mm²/s.

1.6 L'huile de palme

Comparons brièvement les propriétés de l'huile de palme avec celles du diesel, avant de rentrer en détail dans l'analyse de l'huile de palme.

Nous apercevons un pouvoir calorifique inférieur (massique) certes inférieur au diesel, mais tout de même intéressant. Elle possède une masse volumique plus importante que celle du diesel, mais du même ordre que les autres huiles. Son indice de cétane est tout à fait satisfaisant. Sa teneur en cendres est bien inférieure à celles du diesel et il en est de même pour le résidu de carbone. Sa teneur en eau reste acceptable. Son point faible réside dans la viscosité, qui est de dix à vingt fois supérieure à celle du diesel.

2 Propriété de l'huile de palme

2.1 Analyse

Dans le point précédent, nous avons comparé l'huile de palme avec le diesel de façon non chiffrée. Passons à présent en revue quelques chiffres de l'huile de palme (raffinée).

L'huile de palme possède un **pouvoir calorifique inférieur (PCI)** massique d'approximativement 35.600 kJ/kg (le diesel est à 42.500 kJ/kg) et un PCI volumique d'environ 32.100 kJ/dm³ (le diesel se trouve à 36.000 kJ/dm³).

La **masse volumique** de l'huile de palme se trouve entre 900-920 kg/m³, tandis que le diesel est à 820-845 kg/m³.

L'**indice de cétane** (mesuré) de l'huile de palme a été donné à 50 [-], en comparaison avec le diesel qui requiert un minimum de 51 [-].

La **viscosité** de l'huile de palme se situe à 40 mm²/s (à 40°C, normalisé), et la norme diesel préconise un intervalle de 2,00 à 4,50 mm²/s.

Jusqu'à présent, nous n'avons pas parlé du **point d'éclair**. Il est cependant trop tôt pour en discuter. A ce stade, nous n'avons pas encore les outils nécessaires pour interpréter cette valeur. Nous y attacherons donc de l'importance plus tard dans un point entièrement consacré à cette étude. Mentionnons tout de même que cette valeur indique la température à laquelle un fluide émet assez de vapeurs pour qu'elles puissent s'enflammer au contact d'une flamme. Ce point d'éclair est à 280-300°C pour l'huile de palme, tandis que le diesel impose un minimum de 55°C, mais en réalité proche de 90°C.

La **teneur en cendres** de l'huile de palme est inférieure à 0,001%, qui est toutefois nettement moindre que le maximum autorisé du diesel se situant à 0,01%.

La **teneur en eau** de l'huile de palme est limitée à 500 mg/kg. Le diesel accepte un maximum de 200 mg/kg.

Le **résidu de carbone** a été chiffré à 0,22% pour l'huile de palme et un maximum de 0,30% pour le diesel.

Ceci était une première approche comparative entre l'huile de palme et le diesel. Attachons-nous maintenant à d'autres caractéristiques propres à l'huile de palme.

La composition chimique, en poids, de l'huile de palme peut être donnée comme suit :

?? 76% C
?? 12,3% H
?? 11,5% O

L'huile de palme contient en moyenne 47% de l'ester de l'acide palmitique (chaîne en C₁₆). Les teneurs des différents acides gras exprimées en pourcentage sont les suivantes :

~~acide~~acide laurique : 0 à 1,2
~~acide~~acide myristique : 1 à 6
~~acide~~acide palmitique : 41,1 à 59,3
~~acide~~acide stéarique : 3,7 à 6
~~acide~~acide oléique : 27,6 à 53,3
~~acide~~acide linoléique : 4,4 à 10,1
~~acide~~acide linoléique : 0 à 1,5

A température ambiante (18-25°C) elle est semi solide. Son point de fusion se situe entre 35 et 42°C.

Sa couleur est jaune orangé à rouge orangé.

L'huile de palme est classée en fonction de son degré d'acidité, de sa couleur, de sa teneur en eau et en impuretés. On distingue cinq types :

- Type 1 : huile fine d'acidité inférieure à 4% (exprimée en acide palmitique), teneur en eau et en impuretés : moins de 0,5%.
- Type 2 : acidité entre 4 et 7%
- Type 3 : acidité entre 7 et 16%
- Type 4 : acidité entre 16 et 25%
- Type 5 : acidité supérieure à 25% (huiles dures).

Pour ces types, les teneurs en impuretés doivent être inférieures à 2%, l'huile doit être de couleur naturelle et sans mauvaise odeur.

Nous avons vu, jusqu'à présent, les caractéristiques fondamentales de l'huile de palme. Il nous paraît dès lors inutile d'aborder maintenant toutes les caractéristiques intéressantes de l'huile de palme. Elles seront analysées en détail lors de l'étude entièrement consacrée au fonctionnement du moteur diesel avec de l'huile de palme : cela fait l'objet du chapitre suivant.

2.2 Conclusions sur l'huile de palme

Grâce à ce chapitre s'appuyant sur le tableau comparatif des combustibles, nous avons pu déjà jeter un premier coup d'œil sur différentes propriétés de l'huile de palme. Celles-ci pouvant être interprétées par rapport aux propriétés du diesel et d'autres huiles végétales. Ainsi nous avons déjà réussi à situer l'huile de palme parmi d'autres combustibles et en tirer quelques premières constatations.

En effet, nous avons pu découvrir une viscosité assez élevée de l'huile de palme. On se doute déjà qu'il faudra agir sur ce facteur.

Etant donné un PCI inférieur au diesel, l'huile de palme aura incontestablement une consommation spécifique plus importante.

Sa teneur en cendres est faible et on n'aura donc plus à se préoccuper de ce problème. Il en est de même pour sa teneur en eau, tant qu'elle reste inférieure à 0,5% on n'aura pas de problème.

Nous ne parlerons plus, par la suite, de son indice de cétane puisqu'il est équivalent à celui du diesel.

Par contre, nous aurons encore à analyser son point d'éclair très élevé. Celui-ci nous posera problème.

Nous pouvons retrouver en annexe aux figures (A.11) et (A.12), deux tableaux supplémentaires.

Le premier tableau nous fournit encore d'autres données concernant plusieurs huiles végétales, dont l'huile de soja, de tournesol et de coprah. Nous pouvons remarquer que certains chiffres diffèrent de temps à autres. Ainsi, nous retrouverons pour l'huile de colza (*'Rapeseed'*) parfois une valeur de viscosité supérieure ou inférieure à l'huile de palme. Ceci s'explique par le fait qu'il existe différentes variétés d'huile de colza à longueurs de chaîne moléculaire différentes. Rappelons que c'est aussi le cas pour l'huile de palme et la majorité d'autres huiles végétales. Nous n'allons pas rentrer dans ce genre de détails ici, afin de limiter la complexité du problème. Le principe est de donner des ordres de grandeurs afin d'y voir plus clair.

Laissons le soin au lecteur de parcourir les données du deuxième tableau selon son souhait.

Le moment est donc venu de pénétrer dans le vif du sujet, à savoir l'étude et l'analyse de l'utilisation de l'huile de palme dans un moteur diesel.

Chapitre 4 : Fonctionnement d'un moteur diesel à l'huile de palme

1 Rappel des objectifs

Nous tenons tout de même à rappeler l'objectif premier de ce mémoire. Il s'agit de faire une étude sur l'éventuel emploi de l'huile de palme dans un moteur diesel. Cette étude étant axée sur cet emploi dans les pays africains, il était important de tout d'abord faire une **analyse économique** à ce sujet-là. Nous en avons donc conclu, que vu le moindre coût d'achat de l'huile de palme par rapport au diesel dans ces pays concernés, il serait peut être avantageux de pouvoir faire fonctionner des moteurs diesel à l'huile de palme. Certains pays africains ont une importante production d'huile de palme et leurs consommations personnelles nous laissent croire qu'ils arrivent à satisfaire leurs besoins. Pour ces pays-là, il est envisageable que ce projet puisse aboutir. Pour les autres pays africains, de plus faible production, et qui importent de l'huile de palme, le projet reste « valable » à la condition qu'il ne mette pas en péril la vie et la santé des gens, qui, pour la plupart, vivent dans la pauvreté, puisque l'huile de palme leur fournit un aliment très sain et localement bon marché. C'est sous cet aspect socio-économique que l'on devrait voir la chose.

Ensuite nous avons abordé les différents **procédés d'extraction** de l'huile de palme dans le but d'avoir une vision plus complète. Nous avons pu remarquer que dans le cas de l'éventuelle utilisation de l'huile de palme comme carburant, on pouvait s'arrêter à un stade précoce dans le traitement. Ceci est un avantage non négligeable et nous verrons ensuite s'il n'y a pas moyen de raccourcir encore le traitement.

Enfin, nous venons de découvrir certaines **propriétés** de l'huile de palme. En comparant celles-ci avec celles du diesel et d'autres huiles végétales, nous avons pu situer cette huile de palme et en sortir déjà quelques points intéressants.

2 Démarche à suivre

Il est impératif de bien cerner le problème dès le départ. Il s'agit de faire une analyse préalable des caractéristiques de l'huile de palme en vue d'observer le fonctionnement d'un moteur diesel tournant à l'huile de palme. Le but est donc d'essayer de faire fonctionner un moteur, conçu tout spécialement pour le diesel, avec une huile végétale. L'objectif premier ici dans ce projet pour l'Afrique, c'est de tenter de ne pas toucher à la base du moteur et à sa conception. Seuls des astuces externes au moteur pourront être mises en œuvre afin de pouvoir accueillir l'huile de palme comme carburant. Le tout, bien évidemment, avec un minimum de coût !

Ceci ne nous empêchera pas d'évoquer d'autres astuces, remèdes et réflexions qui ne s'appliquent pas pour l'Afrique. Nous essaierons de citer brièvement d'autres manières possibles de travailler, qui sont en général employées par des firmes allemandes.

Il nous reste encore une chose à mentionner : on retrouve très peu de documentation à propos de l'emploi de l'huile de palme comme combustible, celle-ci étant destinée particulièrement au secteur alimentaire et à la production de savon. Il est vrai que pendant les années 1980, des moteurs de types agricoles ont fonctionné à l'huile de palme, en Afrique. Mais ce fut de courte durée car divers problèmes moteurs ont surgi amenant une fin au projet. L'erreur est due à une totale absence de recherches théoriques à ce sujet. Mais à présent, des organismes français et allemands avec lesquelles nous avons pu établir des contacts, effectuent des recherches et des réalisations poussées dans ce domaine. La plupart du temps, ils travaillent avec l'huile de colza (en l'Europe), de Pourghère et de coprah (en Afrique).

Vu que très peu de recherches et d'expériences ont été réalisées dans le domaine de l'huile de palme comme carburant, nos sources viennent principalement d'une firme allemande **AAN** (Anlagen-und Antriebstechnik Nordhausen), située à Nordhausen en Allemagne de l'Est. Elle est tout particulièrement spécialisée dans la recherche et la réalisation de moteurs fonctionnant aux huiles végétales. La firme, composée d'une quinzaine de personnes, a aussi bien des projets en Allemagne, qu'à l'étranger et plus précisément en Afrique. Dans ce qui suivra, la majorité des données reprises sont propres à la firme et ne sont généralement pas publiées. Nous avons reçu personnellement l'autorisation du Dr. Kampmann, directeur de l'entreprise, de pouvoir utiliser ces données à bonne fin. Nous avons pu également acquérir des informations privilégiées lors d'un entretien avec lui.

De même pour la société française CIRAD, plus précisément Messieurs Noel, Pioch et Vaitilingom, nous ont procuré des informations importantes. Mentionnons aussi l'aide de la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) et du Dr. Henning chez BAGANI.

Une autre source, provient d'un essai effectué en Thaïlande par l'Université de Songkla.

Voilà, encore une toute dernière remarque concernant l'étude suivante. Certes, il s'agit bien d'analyser le comportement de l'huile de palme, mais toutefois nous parlerons d'huiles végétales en général. Effectivement, quand la propriété d'une huile est recherchée, nous mentionnerons tout simplement 'huile végétale' qui sera bien souvent l'huile de colza (en Europe) ou l'huile de Pourghère (en Afrique). En revanche, lorsque les caractéristiques propres à l'huile de palme sont visées, nous attirerons alors tout particulièrement l'attention sur cette huile. Ainsi nous pourrions facilement différencier ce qui est propre à l'huile de palme de ce qui vaut pour les huiles végétales en général.

Nous allons maintenant aborder la recherche fondamentale et l'apport scientifique personnel de ce travail de fin d'étude (TFE) qui consiste en l'étude des différents problèmes rencontrés lors de l'utilisation de l'huile de palme dans un moteur diesel. Plusieurs remèdes seront proposés, d'une part spécialement pour le projet en Afrique, d'autre part des remèdes qui sont déjà appliqués dans l'industrie Européenne ou même dans quelques importantes installations africaines.

Les remèdes techniques et leurs installations feront l'objet du chapitre 6.

3 Les cinq problèmes majeurs existants et leurs remèdes

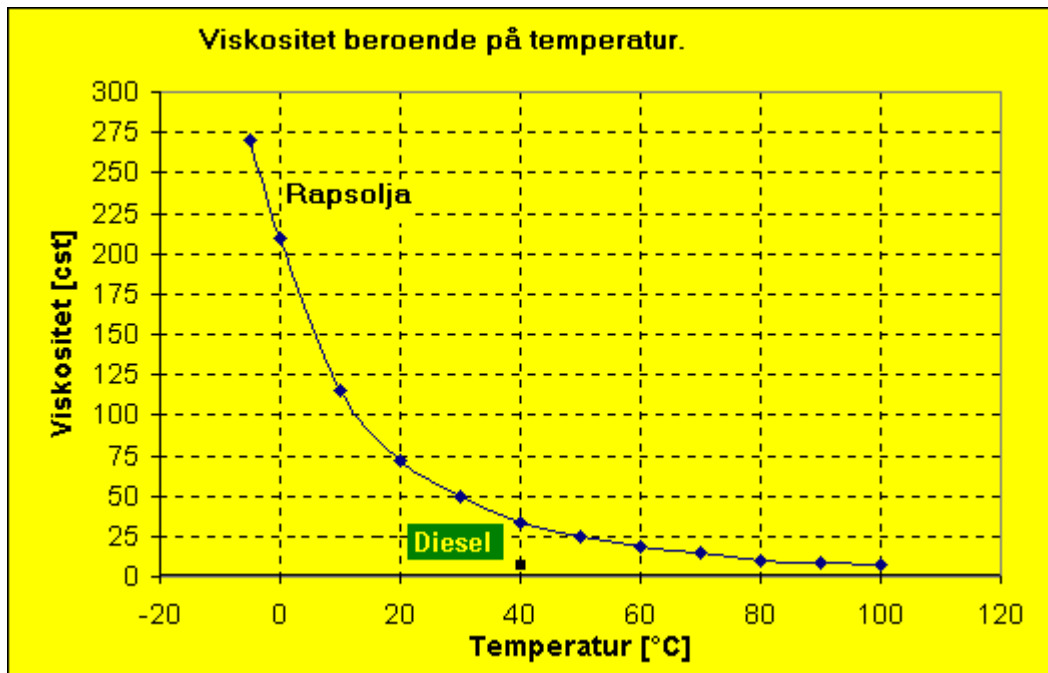
Citons les tout d'abord, avant de les analyser un à un :

- ☞ La Viscosité
- ☞ Le Point d'éclair
- ☞ La Polymérisation
- ☞ Les Réactions chimiques
- ☞ Les Réactions physico-chimiques

3.1 La Viscosité

3.1.1 Chauffage de l'huile

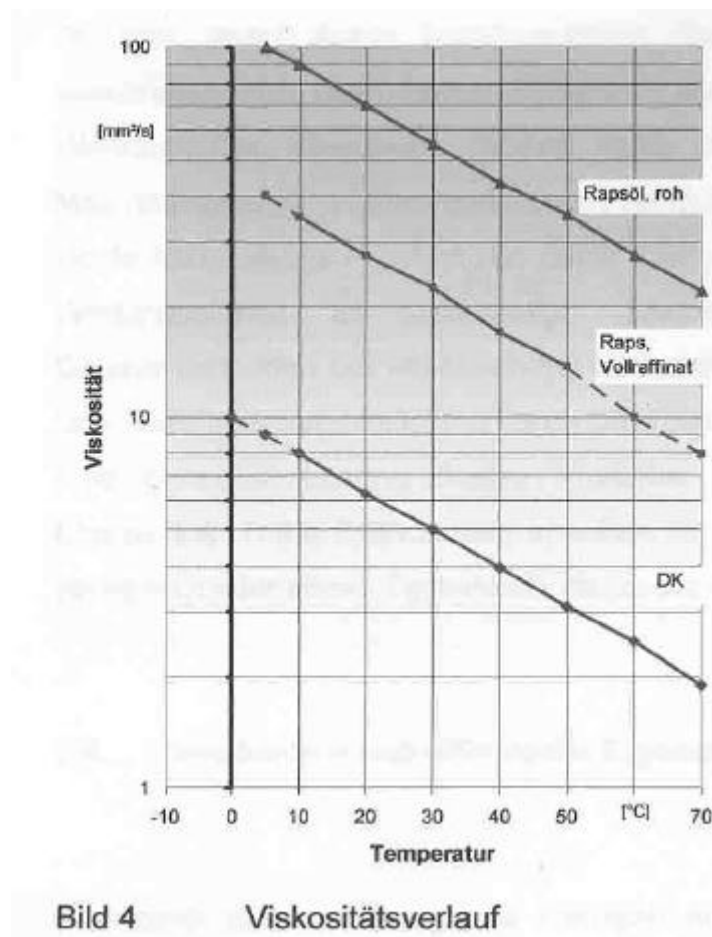
Nous avons préalablement constaté qu'une forte viscosité de l'huile de palme poserait problème. Comme la viscosité est fort dépendante de la température, voyons à l'aide d'un graphe ce qu'il en est :



(Figure : (4.1), 'oilpress DK')

Ceci n'est pas la courbe représentative de l'huile de palme, mais bien celle du colza ('Rapsolja'). Rappelons-nous que la viscosité du colza est proche de 35 mm²/s (à 40°C), tandis que celle de l'huile de palme tourne autour de 40 mm²/s (à 40°C). Ceci nous informe que la courbe de la viscosité de l'huile de palme est un rien décalée par rapport à celle du colza, mais pratiquement superposable. Ceci se vérifie par le fait qu'une autre information nous donne une valeur de la viscosité de l'huile de palme à 20°C, qui est de 70 mm²/s. Nous pouvons bien vérifier que cette valeur se confond avec celle du colza. C'est dans ce but que nous avons volontairement pris le graphe dans lequel est représentée la viscosité du colza et non l'huile de palme. Désormais, nous pouvons affirmer que la viscosité du colza est fort semblable à celle de l'huile de palme, nous ne ferons plus la distinction ensuite. Ceci nous facilitera la tâche, vu que le colza est souvent étudié dans la littérature.

Comparons à présent la courbe viscosité du diesel ('DK, *dieselmotorkraftstoff*'), à celle du colza raffiné ('vollraffinat') et non raffiné ('roh'), à la figure (4.2) ci-dessous :



(Figure (4.2), AAN)

Une des conditions, pour que l'huile de palme puisse être employée comme combustible dans un moteur diesel, sera d'avoir une viscosité qui soit proche de celle du diesel, soit un maximum de 4,50 mm²/s voir une limite de 5 mm²/s (à 40°C). Ce point de fonctionnement est représenté à la figure (4.1).

De prime abord, nous pouvons donc constater qu'il sera nécessaire de chauffer l'huile de palme à une température de l'ordre de 80-90°C. Mais est-il vraiment indispensable de grimper si haut en température pour préchauffer l'huile de palme ? La réponse à cette question a nécessité quelques expériences effectuées par la firme AAN. Voici les différents points qui ont été abordés afin d'éclaircir ce problème.

L'équipe d'AAN s'est penchée en premier lieu sur le phénomène de l'**oxydation**. En effet, ils ont constaté qu'une huile végétale était assez sensible au phénomène d'oxydation. Ce phénomène apparaît dans des conditions bien spécifiques et seulement à partir d'une température bien précise. Plusieurs examens ont pu démontrer que cette température critique était aux alentours des 110°C pour la plupart des huiles végétales. (La norme DIN 6886 décrit la procédure à suivre.)

L'oxydation que l'on observera lors d'un maintien de l'huile à une température trop élevée, se traduira par une polymérisation de l'huile. On obtiendra alors une graisse inutilisable pour l'injection dans le moteur. Le phénomène de polymérisation sera vu plus en détail ultérieurement.

Dès à présent, retenons qu'il est donc indispensable de chauffer l'huile de palme, pour obtenir une viscosité adéquate, à une température de 80-90°C, mais qu'il ne faut en aucun cas franchir cette température, pour éviter une oxydation. La viscosité à cette température de 80° à 90°C, est d'environ 8 mm²/s, que l'on s'est fixé comme maximum. Il est aussi fortement recommandé de ne pas maintenir l'huile trop longtemps à haute température, même à 80°C ou 90°C, ce qui risquerait de détériorer certaines propriétés de l'huile en question. Une réflexion de bon sens est de préchauffer la plus petite quantité d'huile, juste utile au bon fonctionnement du moteur.

Question pratique, le **système de préchauffe** sera soit par énergie externe, soit par énergie interne. Un système externe serait tout simplement un chauffage au charbon de bois ou tout autre combustible. C'est entre autres ce système qui est actuellement utilisé sur un moteur fonctionnant à l'huile de palme à Butembo, en République Démocratique du Congo (RDC).

Un autre système plus intéressant, serait d'employer l'énergie interne au moteur, par un échangeur de chaleur. Celle-ci provenant de la chaleur des gaz d'échappement ou du système de refroidissement d'eau.

Récupérer l'énergie au niveau du système de refroidissement d'eau, requiert bien entendu que le moteur soit effectivement refroidi à l'eau. Mais ce n'est pas toujours le cas, on retrouve en Afrique des moteurs aussi bien refroidis à l'eau qu'à l'air, suivant les applications rencontrées. Il est préférable de travailler à l'air si toutefois le milieu ambiant reste 'propre'. Il faut de toute façon disposer d'un filtre à air. Pour ce filtre à air, il est conseillé d'utiliser un filtre par passage de l'air dans un bain d'huile. Tous ces aspects techniques seront abordés en long et en large dans le chapitre 6.

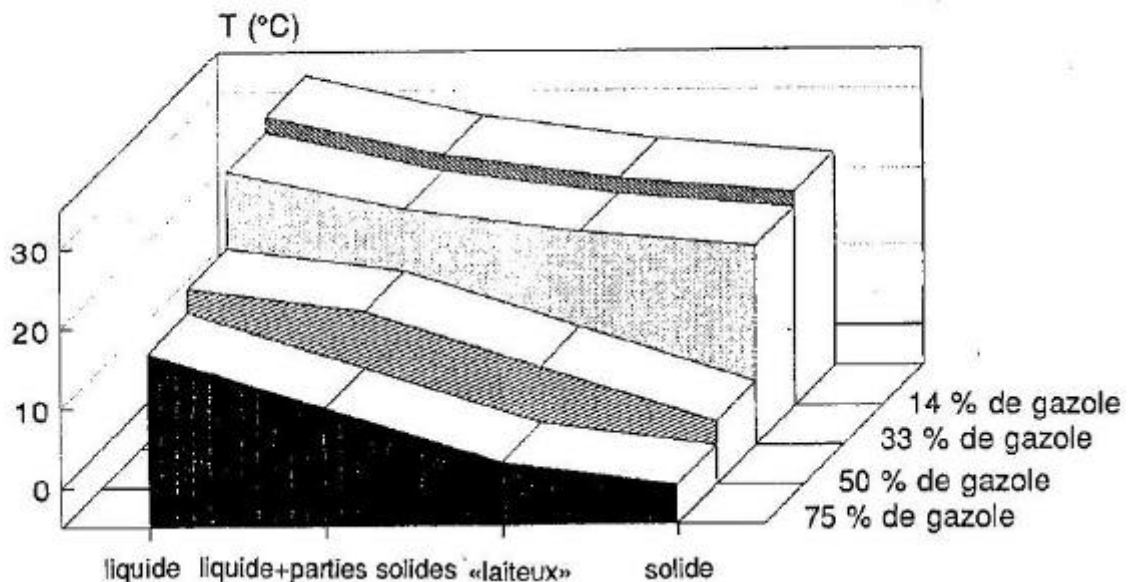
Si l'air ambiant est poussiéreux, alors il sera recommandé de travailler plutôt avec un système de refroidissement à l'eau. Il est crucial pour des moteurs fonctionnant en Afrique d'avoir un système en boucle fermée et totalement verrouillée. Ceci permet de s'assurer du bon fonctionnement du moteur à ce niveau.

3.1.2 Mélange huile - diesel

Une toute autre approche pour faire chuter cette forte viscosité, est de fluidifier l'huile végétale par l'**adjonction de gasoil**. Certes, le but ici reste d'essayer qu'un moteur diesel puisse fonctionner à 100% d'huile de palme, mais il est toutefois important d'évoquer d'autres pistes, qu'il faudrait approfondir. En effet, il serait de toute façon plus économique, pour les pays africains, de mélanger du diesel avec une quantité bien déterminée d'huile de palme. Tout comme en Europe où l'on pourrait aller jusqu'à l'adjonction de 40% d'huile de colza dans le diesel pour des 'vieux' moteurs, sans apporter de modifications, il en serait de même pour l'huile de palme vu sa viscosité fort semblable à celle du colza. Bien évidemment, une étude plus approfondie serait à envisager.

Mais l'adjonction de diesel dans l'huile de palme peut avoir un autre objectif, celui de rinçage. Il s'agirait par exemple d'une panne du moteur fonctionnant à l'huile de palme. Dans ce cas nous disposons d'environ 7 heures dans une atmosphère calme de 20°C, avant que l'huile ne se solidifie. La fluidité pourrait être assurée par rinçage du système d'injection avec du gasoil. Ce principe est illustré à la figure (4.3) où différentes proportions ont été envisagées.

Essais de refroidissement d'un mélange gazole/graisse de palme



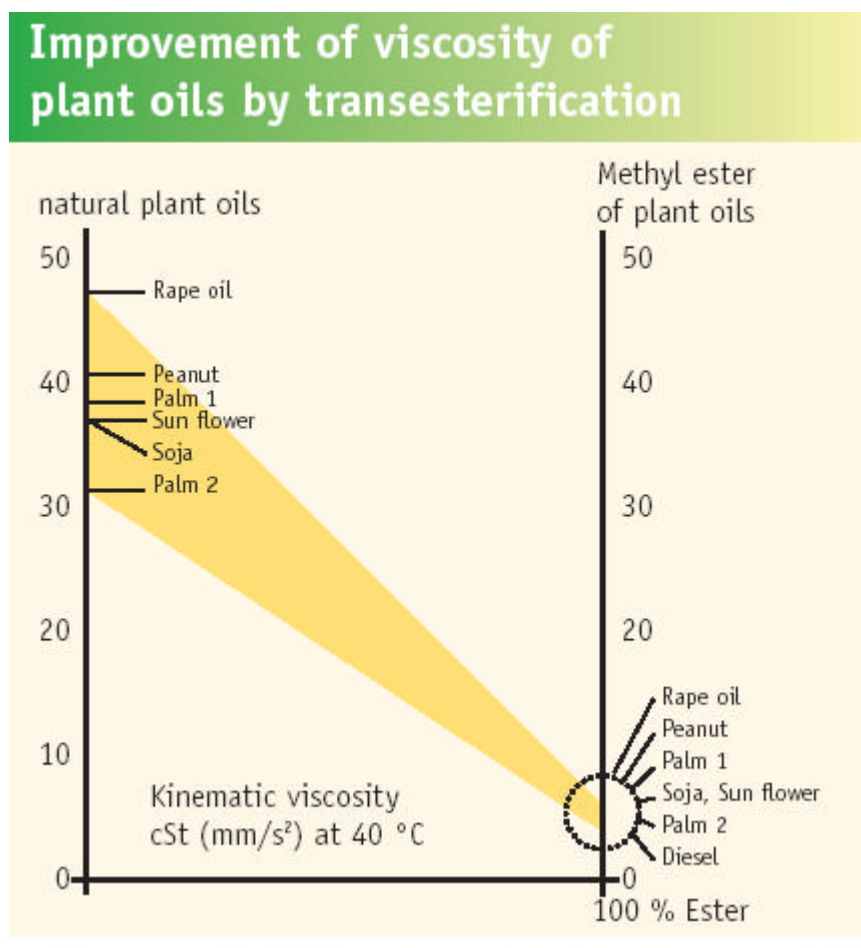
(Figure : (4.3), AAN)

3.1.3 Estérification

Un troisième moyen de diminuer la viscosité de l'huile de palme est de l'**estérifier**. La méthode est tout à fait identique à celle employée pour l'estérification de l'huile de colza décrite plus haut. Mais c'est toujours et encore une question de coût qui revient.

Nous pouvons remarquer, à la figure (4.4), la chute de viscosité de l'huile de palme ainsi que d'autres huiles végétales. C'est assez intéressant de constater que toutes ces huiles végétales après estérification, voient leurs viscosités se rapprocher l'une de l'autre.

Observons une viscosité de l'huile de palme raffinée (*Palm2*) et non raffinée (*Palm1*), qui sont toutes deux inférieures à celle de l'huile de colza non raffinée (*Rape oil*). Comme quoi d'une source à l'autre les données diffèrent.



(Figure : (4.4), UFOP)

3.2 Le Point d'éclair

3.2.1 Approche

Rappelons tout d'abord la signification du point d'éclair (flash point) : c'est la température à laquelle un fluide émet suffisamment de vapeurs pour qu'elles puissent s'enflammer au contact d'une flamme ou d'une étincelle. Rappelons que ce point se trouve à minimum 55-60°C et est souvent aux alentours de 90°C pour le diesel, tandis que pour l'huile de palme il se situe à 280-300°C. Dans le tableau comparatif des combustibles nous avons pu voir que l'huile de colza a ce point d'éclair dans les environs de 325°C. Dorénavant, nous dirons que l'huile de palme et de colza se comportent plus ou moins de la même manière à ce point de vue là.

Voyons de quelle façon cette propriété influence la combustion. Au vu des données précédentes, nous montrons que l'huile de palme (ou de colza) s'enflammera moins facilement que le diesel. Des études ont été réalisées et on a pu constater que la courbe de distillation était en lien direct avec ce point d'éclair. Une fois de plus, du fait que l'huile de colza et l'huile de palme ont un point d'éclair très proche, nous pouvons affirmer qu'elles ont aussi une courbe de distillation très semblable.

Voyons à présent à l'aide d'un graphe ces différentes données.

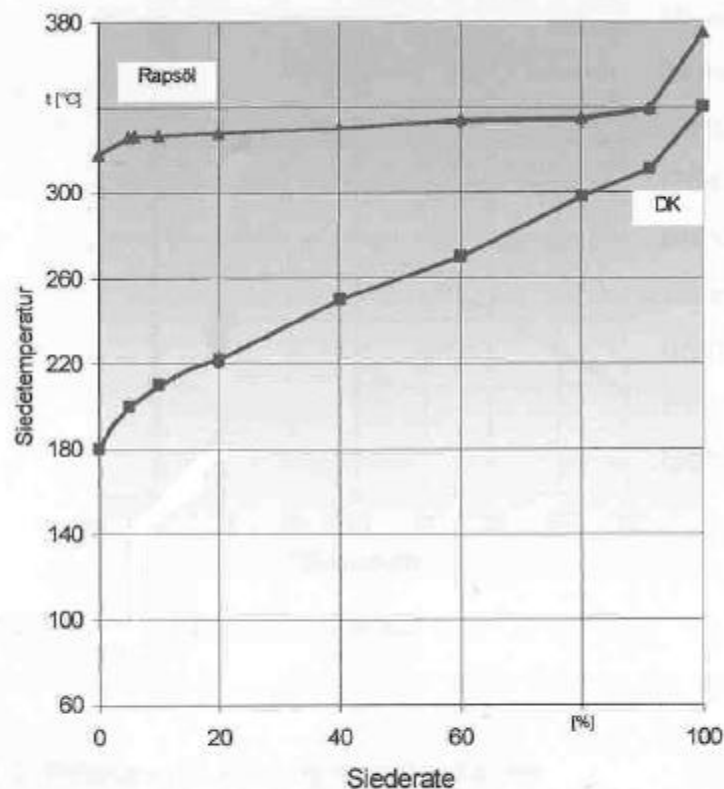


Bild 3 Siedeverhalten von Kraftstoffen

(Figure : (4.5), AAN)

Ce graphe nous présente les courbes de distillation du diesel (*DK*) et de l'huile de colza (*Rapsöl*).

Remarquons que la courbe débute à une température de 180°C pour le diesel, par contre pour l'huile de colza cette température se trouve aux alentours de 320°C. Toutefois, le point qui nous intéresse le plus ici, c'est la température pour laquelle 50% du fluide s'est évaporé. En allemand ce point porte le nom de « Siedekennziffer », voulant dire le point de référence sur la courbe de distillation. Ce point de référence a fait l'objet d'une étude approfondie et il en sortait cette constatation ci : la différence de température à ce point de référence, entre le diesel et l'huile végétale, devra être prise en compte par le fait qu'il faudra augmenter la température de fin de compression pour cette huile de ce même intervalle dans le but d'avoir une bonne combustion. Si ceci n'est pas respecté, on aura un moins bon rendement, une moins bonne combustion avec des légères fumées noires et une odeur typique de l'huile.

Analysons ce point de référence dans le cas de l'huile de colza, qui sera représentative de l'huile de palme, comparée au diesel. Nous observons à ce point de référence une température de 260°C pour le diesel et d'approximativement 330°C pour l'huile colza, l'intervalle étant donc d'environ 70°C. Lors de l'utilisation de cette huile dans un moteur diesel, il serait donc préférable d'augmenter la température de fin de compression d'une septantaine de degrés. De cette façon nous obtenons aussi une température moyenne dans la chambre de combustion plus élevée.

Il y a plusieurs moyens d'augmenter la température de fin de compression d'un moteur, selon la qualité et le rendement que l'on désire avoir ainsi que le coût que l'on est disposé à investir. Passons en revue ces différentes méthodes en commençant par des artifices simples jusqu'aux plus complexes.

3.2.2 Avance à l'injection

La méthode la plus simple et non coûteuse consiste à jouer sur l'**avance à l'injection**. Ceci s'explique par le fait que si l'on retarde l'avance à l'injection, la durée de compression est plus longue, d'où une élévation de température en fin de compression.

On peut ainsi gagner facilement en température et atteindre jusqu'à 60°C d'élévation de température. Par contre, on observera une faible diminution du rendement. Voyons à l'aide de quelques expériences effectuées sur l'huile de palme, comment se chiffrent ces résultats à la figure (4.6) en page 44.

Nous y distinguerons les températures des gaz d'échappement et la densité de fumée en fonction de l'avance à l'injection et de la charge.

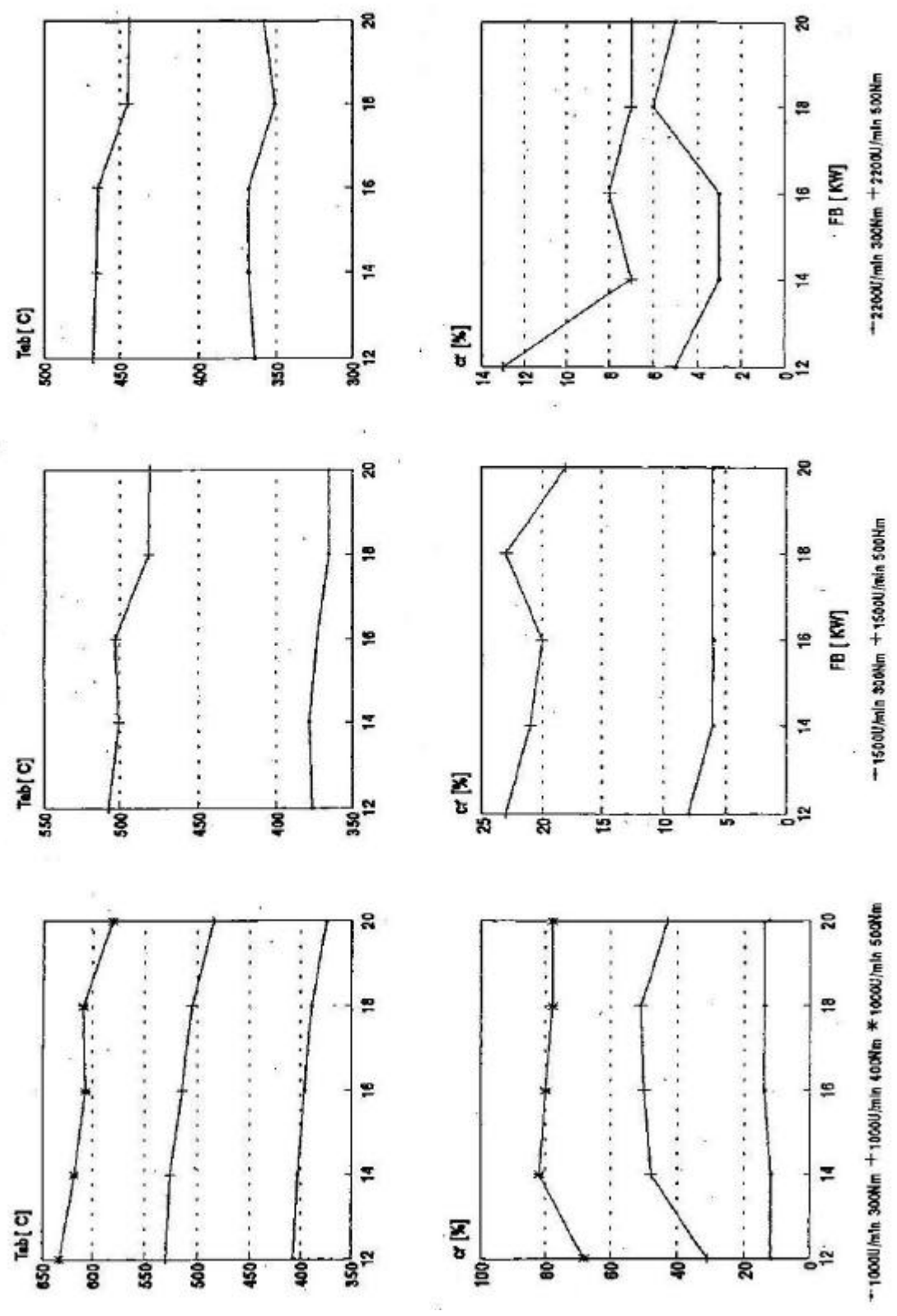
Nous remarquons sur ces graphes, que, plus lentement tourne le moteur dont la charge est élevée, plus chauds sont les gaz d'échappement, qui reflètent la température interne du moteur. Il apparaît donc qu'un moteur tournant lentement, a plus de capacité à garder la chaleur de combustion, vu que celle-ci stagne plus longtemps dans la chambre de combustion. D'où il serait déjà avantageux de tourner à bas régime et en pleine charge pour assurer une température interne du moteur suffisante pour une bonne combustion.

En guise de comparaison, mentionnons que l'avance à l'injection pour un moteur diesel fonctionnant au diesel est de l'ordre de 20°V (position angulaire du vilebrequin) pour un moteur tournant à 1.000 tr/min. Nous pouvons constater, sur les graphes qu'à 1.000 tr/min et à pleine charge, qu'une avance de 12° au lieu de 20° , donne une élévation de température des gaz d'échappement de l'ordre de 60°C . Par contre, la densité de fumée est beaucoup trop importante, due à une charge trop élevée à si bas régime. Si la charge diminue, on obtient à même régime une différence de 40°C , et la densité de fumée décroît fortement.

Nous observons aussi, qu'en toute logique d'ailleurs, que, plus vite tourne le moteur, plus on peut retarder l'avance à l'injection. Ceci se vérifie bien dans le graphe représentant la densité de fumée à 2200 tr/min à pleine charge. Nous percevons bien qu'une avance à l'injection, trop retardée, génère des fumées plus importantes.

D'ailleurs le réglage de cette avance se fera de manière très simple. On retardera l'avance à l'injection de façon qu'il tourne 'bien'. On se basera sur une densité minimale de fumées, non odorantes, et sur le bon ronronnement du moteur. En effet, ces trois paramètres vont toujours de paire, et sont faciles à observer. Il est donné à tout le monde de constater des fumées noires ou non, de sentir si ces fumées dégagent une odeur typique de l'huile, et d'entendre un moteur tourner correctement.

4P 13,5 AL (graisse de palme)
 Optimisation du début du refoulement (FB) selon la densité de fumée (Cr)
 et la température des gaz d'échappement (Tab)
 avec variateur d'avance automatique



(Figure : (4.6), AAN)

Nous pouvons donc conclure qu'un retard de l'avance à l'injection de 5 à 8°V par rapport au réglage du diesel, nous apportera un gain de température des gaz d'échappement de 40 à 60°C dans de bonnes conditions de fonctionnement, qui se reflèteront par un régime adapté à la charge en produisant un minimum de fumées. Nous faisons l'hypothèse ici que l'élévation de température des gaz d'échappement est le reflet de l'élévation de température en fin de compression, la chaleur de combustion étant supposée inchangée.

Par la suite, nous parlerons de moteur de petite puissance de 5 à 10 kW (un cylindre), de moyenne puissance avec une puissance de 20 à 50 kW (deux à quatre cylindres), et enfin de grosse puissance de plus de 50kW (quatre à six cylindres). Les petites puissances sont par exemple des petits groupes électrogènes portables. Les moyennes puissances sont semblables à des moteurs de voitures et les grosses puissances sont de véritables moteurs industriels. Des représentations sont reprises en annexe aux figures (A.13), (A.14) et (A.15).

A travers tout ce chapitre, nous donnerons des chiffres concernant le fonctionnement du moteur. Ces chiffres proviennent la plupart du temps des expériences et essais effectués dans les laboratoires AAN. Ils seront interprétés avec prudence et seront souvent évoqués dans le but d'avoir un bon ordre de grandeur.

Une des questions à se poser est de savoir si cette élévation de température ne nuira pas au moteur. C'est ici qu'il faut tout de même préciser que tout ce raisonnement est vrai à condition que nous ayons à faire à un moteur à **injection indirecte**. En effet, de part sa conception, ce type de moteur est pourvu d'une chambre de précombustion. C'est grâce à sa présence que l'on peut augmenter la température de fin de compression, car la préchambre est, de part sa construction, placée dans un endroit peu refroidi du moteur et est donc fort résistante. Sa température reste ainsi plus ou moins constante et permet d'amorcer la combustion qui se terminera dans la chambre de combustion. La température moyenne d'une préchambre est d'environ 500 à 600°C dès 10% de puissance délivrée. L'huile de palme y brûle donc quasi complètement vu que son point d'éclair se situe aux alentours de 280-300°C.

Mentionnons que la température des gaz d'échappement varie généralement entre 450 et 550°C selon la charge appliquée. La température de fin de compression peut se trouver aux alentours de 500-600°C. Ce ne sont donc pas ces 40 à 60°C d'élévation de température qui vont avoir une influence sur la résistance des matériaux.

Nous avons vu une première méthode pour augmenter la température de fin de compression, d'où une température moyenne dans le cylindre plus élevée, pour un moteur à injection indirecte, afin d'améliorer les conséquences engendrées par un point d'éclair de l'huile de palme plus élevé que celui du diesel.

Signalons que dans le cas d'un moteur à **injection directe**, une avance de 2 à 3°V est à prévoir. Toutefois cela ne suffit pas à augmenter suffisamment la température dans la chambre de combustion. Pour ce faire, voyons comment nous y prendre dans le prochain point.

Mentionnons dès à présent qu'un retard à l'injection de seulement 2 à 3°V, occasionne une certaine diminution d'émission de NO_x.

3.2.3 Le piston ferrotherm

Avant de passer à une deuxième méthode, qui peut servir d'ailleurs comme complément au réglage de l'avance à l'injection, jetons un coup d'œil sur les remèdes apportés sur un moteur à **injection directe**. Ces types de moteurs envahissent le marché agricole et les moteurs industriels (ou groupes électrogènes). C'est la raison pour laquelle nous aimerions analyser la méthode la plus utilisée en Allemagne.

L'énorme problème rencontré pour un moteur à injection directe fonctionnant à l'huile végétale, réside dans la température moyenne de la chambre de combustion avoisinant les 200-220°C. Pour le fonctionnement au diesel, il n'y a pas de problème vu le point d'éclair du diesel de $\pm 90^\circ\text{C}$. Par contre, une huile végétale, comme le colza et l'huile de palme, aura son point d'éclair vers les 300°C. Ce qui signifie qu'une part des gouttelettes d'huile ne va pas se vaporiser, mais va se « coller » aux parois du cylindre provoquant des dépôts goudronneux. Ces dépôts vont vite s'accumuler sur le nez des injecteurs perturbant ainsi la délicate pulvérisation et dégradant le fonctionnement du moteur. Ils vont également se loger dans la gorge du premier segment lui modifiant son élasticité, ce qui mènera à des grippages et à une usure rapide de celui-ci. Il y aura perte de compression, difficultés de démarrage à froid et détérioration du rendement moteur avec une augmentation anormale de la consommation.

Pour augmenter la température de fin de compression, et donc essayer d'atteindre une température moyenne dans la chambre de combustion plus élevée, les ingénieurs ont tout d'abord pensé à augmenter le rapport de compression. Mais ceci engendrait des pertes à la source chaude non négligeables, avec une chute du rendement en conséquence. L'utilisation d'un moteur à injection directe est justement favorisée à cause de son meilleur rendement. Ce serait donc une aberration de réfléchir ainsi.

Alors ils ont pensé d'une manière similaire à l'injection indirecte : *où et par quel moyen pouvons nous garder la température de fin de compression la plus constante possible ?* Leurs recherches ont abouti à la conception d'un piston dans un matériau spécial. On le désigne par « ferrotherm ». Deux photos prises au laboratoire chez AAN sont représentées en annexe aux figures (A.16) et (A.17). Ce matériau spécial permet de garder une température suffisamment élevée pour garantir une combustion optimale, également à bas régime. Nous apercevons à la figure (A.17) la chambre de combustion interne au piston. En voici une représentation schématique où l'on distingue les températures du « ferrotherm » ('*Warmarbeitsstahl*') comparées à celles d'un piston en Aluminium et à celles d'un autre enrobé d'un alliage de Nickel-Fer :

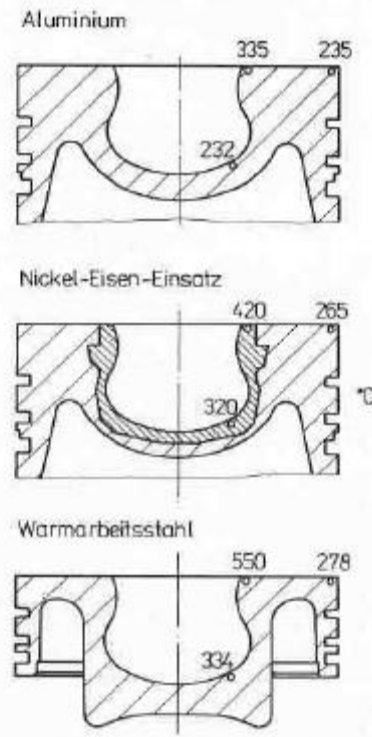


Bild 3: Kolbenbrennraumtemperaturen für 132 kW am 6 D 13,5 (Dieselmotor)

Fig. 3: Combustion chamber temperature by 132 kW at the Diesel engine

(Figure : (4.7), AAN)

Ces températures ont été prises par des sondes Templogs. L'expérience s'est déroulée à même charge et avec la même huile végétale. Nous constatons dans le cas du « ferrotherm » une nette hausse de la température à la paroi et au fond de la chambre de combustion interne. Ces matériaux ont permis de garder des températures très élevées pour le fonctionnement aux huiles végétales.

Nous aimerions encore mentionner quelques chiffres à l'aide des quatre graphes suivants (Figure :(4.8)). Il s'agit des valeurs limites en températures moyennes à des endroits stratégiques, en fonction de la charge à une vitesse de rotation donnée. En effet, travaillant avec des moteurs à injection directe, modifiés et à haut rendement, ces valeurs reflètent les maxima, en température, acceptables pour la tenue des matériaux.

On y constate des températures aux parois internes à la chambre de combustion ('*Brennraumrandkolben*'), allant jusqu'à 550°C, le « ferrotherm » pouvant supporter une température jusqu'à maximum 650°C. Les températures des gaz d'échappement ('*Abgas*') atteignent 630°C, il est recommandé de rester en dessous de 650°C. Le fond de la chambre de combustion interne au piston (*Steg Zyl.-kopf*) atteint des températures de l'ordre de 340°C, lui pouvant résister à 450°C. Et pour terminer, les températures maxima admises par les têtes d'injecteurs (*Einspritzdüsen spitze*) sont de l'ordre de 220°C, protégées de l'échange de chaleur entre la culasse et l'injecteur par les rondelles de pare-feu ou pare-flammes.

Nous terminerons ce bref aperçu sur le « ferrotherm » en disant que c'est bien évidemment la méthode idéale pour augmenter la température de fin de compression et par conséquent aussi la température moyenne régnant dans la chambre de combustion. Il peut sans aucun doute être placé dans les moteurs diesel à injection indirecte, en ne modifiant rien d'autre. Ce type de piston est momentanément utilisé dans des projets allemands, soit pour l'Europe, soit pour l'Afrique, pour des installations plus ou moins coûteuses mais où la fiabilité et le rendement sont grandement souhaités.

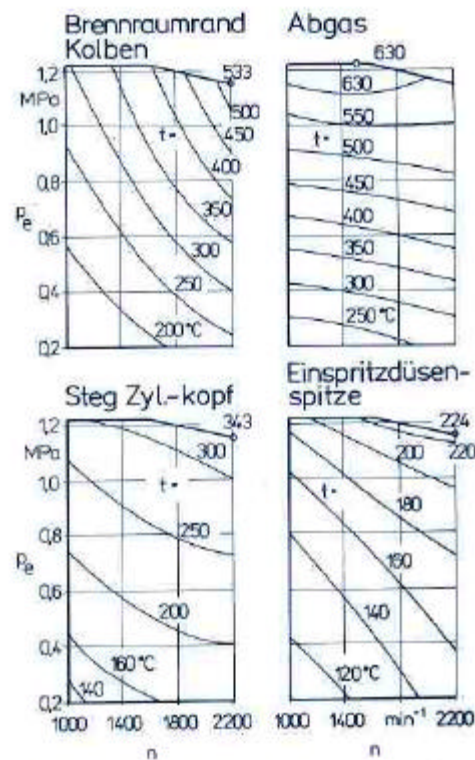


Bild 5: Temperaturfelder des Pflanzenölmotors 4 P 13,5 AL

Fig. 5: Temperatur maps of the plant oil engine

(Figure : (4.8), AAN)

3.2.4 Réinjection de gaz brûlés

Une deuxième méthode que nous pourrions utiliser afin d'augmenter la température en fin de compression, se base entre autres sur les températures des gaz d'échappement. Le principe de l'enrichissement du diesel dans un moteur, se fait par le rapport air/diesel.

Reprenons le graphe ci-dessus à droite ('Abgas'), qui nous informe sur les températures des gaz d'échappement. Nous pouvons remarquer qu'à une température des gaz de 250-300°C, le diesel utilise environ sept fois trop d'air, d'où une température assez faible. Aux alentours de 450°C, nous sommes encore à un rapport de 3 à 1. Vers les 630°C, la combustion se fait pratiquement à la stœchiométrie.

Nous nous basons sur ce principe pour affirmer que l'on peut **réincorporer une quantité de gaz brûlés, chauds, dans l'air frais d'aspiration**. Ceci dans le but d'assurer une température plus élevée lors de la fin de compression, et d'obtenir une température moyenne dans la chambre de combustion plus importante.

Cette technique pourrait choquer certains, mais elle a fait ses preuves sur nombre de véhicules **diesel** de série dans les années 90. Elle est connue sous le nom de « EGR » (Exhaust Gas Recirculation).

Des ingénieurs de la société CIRAD ont effectué des essais d'EGR appliqués aux **huiles végétales** dès 1992, mais les résultats n'ont pas abouti aux effets souhaités pour encore améliorer la combustion bien qu'ils réduisaient les délais d'inflammation. Ils ont d'ailleurs étudié des injections directes et des injections indirectes. Aujourd'hui l'avantage de l'EGR (réduction des émissions d'imbrûlés) est très concurrencé par les systèmes de "contrôle moteur" développés pour les common-rail et les HDI, que l'on retrouve dans les véhicules modernes, couplés aux traitements des gaz d'échappement (CatalDenox). Nous ne parlerons pas de ces deux systèmes « contrôle moteur » car ils ne sont pas envisagés lors du fonctionnement à l'huile végétale.

En résumé, selon CIRAD, l'EGR ne permet pas d'éliminer totalement les problèmes de formation de dépôts lors de l'utilisation d'huile végétale naturelle dans les diesels à injection directe.

Par contre, des essais dans les laboratoires AAN ont été plus fructueux. À titre d'exemple, pour un moteur de 30 kW à pleine charge, on réincorpore environ 20% des gaz brûlés si l'on développe à peu près 20 kW. Quand le moteur ne donnera qu'une dizaine de kW, on réinjectera des gaz brûlés dans une proportion de 50%. De cette façon, on assurera un fonctionnement plus optimal du moteur à faible charge. Le fonctionnement sera donc plus proche des conditions d'un moteur marchant à pleine charge, avec toutes les conséquences qui s'ensuivent : meilleure combustion, température des gaz brûlés plus constante (intéressant dans le cas d'un échangeur de chaleur gaz d'échappement – huile de palme),...

Comme cette méthode varie un peu d'un moteur à l'autre, on ne peut définir des règles et des proportions bien déterminées. C'est pour cela que des tests moteur devront être effectués afin d'en sortir des résultats convaincants. Comme toujours, ce réglage se fera de manière simple, à savoir un minimum de fumées noires, pas d'odeur d'huile, et un bon bruit de moteur.

Il est bien entendu qu'un moteur, fonctionnant toujours à pleine charge, ne nécessite pas indispensablement ce genre de dispositif, *si sa température de fin de compression est suffisante (ce sera le cas d'un moteur à injection indirecte)*, vu le léger réglage à effectuer à l'avance à l'injection. Par contre, un moteur fonctionnant souvent avec des carburants différents (plusieurs types d'huiles végétales, le diesel,...), sera plus polyvalent, par cette méthode de réinjection des gaz brûlés, que par un réglage d'avance à l'injection propre à chaque carburant.

Nous verrons ensuite de quelle façon adapter au mieux un moteur fonctionnant à l'huile de palme dans le cas de l'Afrique.

3.3 La Polymérisation

3.3.1 Bref aperçu

Une huile végétale, contenant des doubles liaisons, est assez fort sensible à ce phénomène de polymérisation. En effet l'huile de palme à tendance, en présence de l'oxygène comme initiateur, d'additionner ses doubles liaisons et de former des plus longues chaînes hydrocarbonées.

Rappelons d'une manière très schématique un principe de polymérisation (par voie radicalaire).

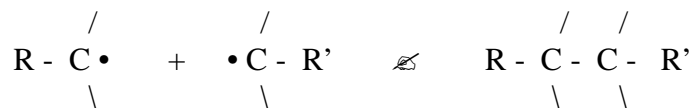
?? Initiateur :



?? Polymérisation :



?? Terminaison :



Une huile végétale en présence d'un initiateur, dans notre cas l'**oxygène** et la **chaleur**, réagit suivant le schéma ci-dessus.

3.3.2 Aspect pratique

Soyons néanmoins conscients que la polymérisation ne se réalise que si une substance contient des liaisons doubles. Rappelons que la composition de l'huile de palme varie en fonction des variétés de palmiers à huile. Analysons les composants de l'huile de palme, toutes variétés confondues :

Acide laurique : 0 à 1,2 %	(chaîne en C ₁₂)	saturée
Acide myristique : 1 à 6 %	(chaîne en C ₁₄)	saturée
Acide palmitique : 41,1 à 59,3 %	(chaîne en C ₁₆)	saturée
Acide stéarique : 3,7 à 6 %	(chaîne en C ₁₈)	saturée
Acide oléique : 27,6 à 53,3 %	(chaîne en C ₁₈)	mono insaturée
Acide linoléique : 4,4 à 10,1 %	(chaîne en C ₁₈)	bi insaturée
Acide linoléique : 0 à 1,5 %	(chaîne en C ₁₈)	tri insaturée

Voici une représentation de la structure de différents acides gras :

Plant Species	Amount of Total (%)	Predominant Fatty Acid	Fatty Acid Structure and Chain Length
<i>Cuphea pulcherrima</i>	94	Caprylic acid	
<i>Cuphea lanceolata</i>	83	Capric acid	
<i>Elaeis guineensis</i> (kernel)	49	Lauric acid	
<i>Cuphea palustris</i>	64	Myristic acid	
<i>Elaeis guineensis</i> (mesocarp)	47	Palmitic acid	
<i>Theobroma cacao</i>	34	Stearic acid	
<i>Brassica napus</i> (00)	62	Oleic acid	
<i>Gossypium hirsutum</i>	53	Linoleic acid	
<i>Linum usitatissimum</i>	60	Linolenic acid	
<i>Ricinus communis</i>	90	Ricinoleic acid	
<i>Vernonia roxburghii</i>	75	Vernolic acid	
<i>Gnetum gnomen</i>	39	Mulvalic acid	
<i>Sterculia foetida</i>	65	Sterculic acid	
<i>Brassica napus</i> (++)	49	Erucic acid	

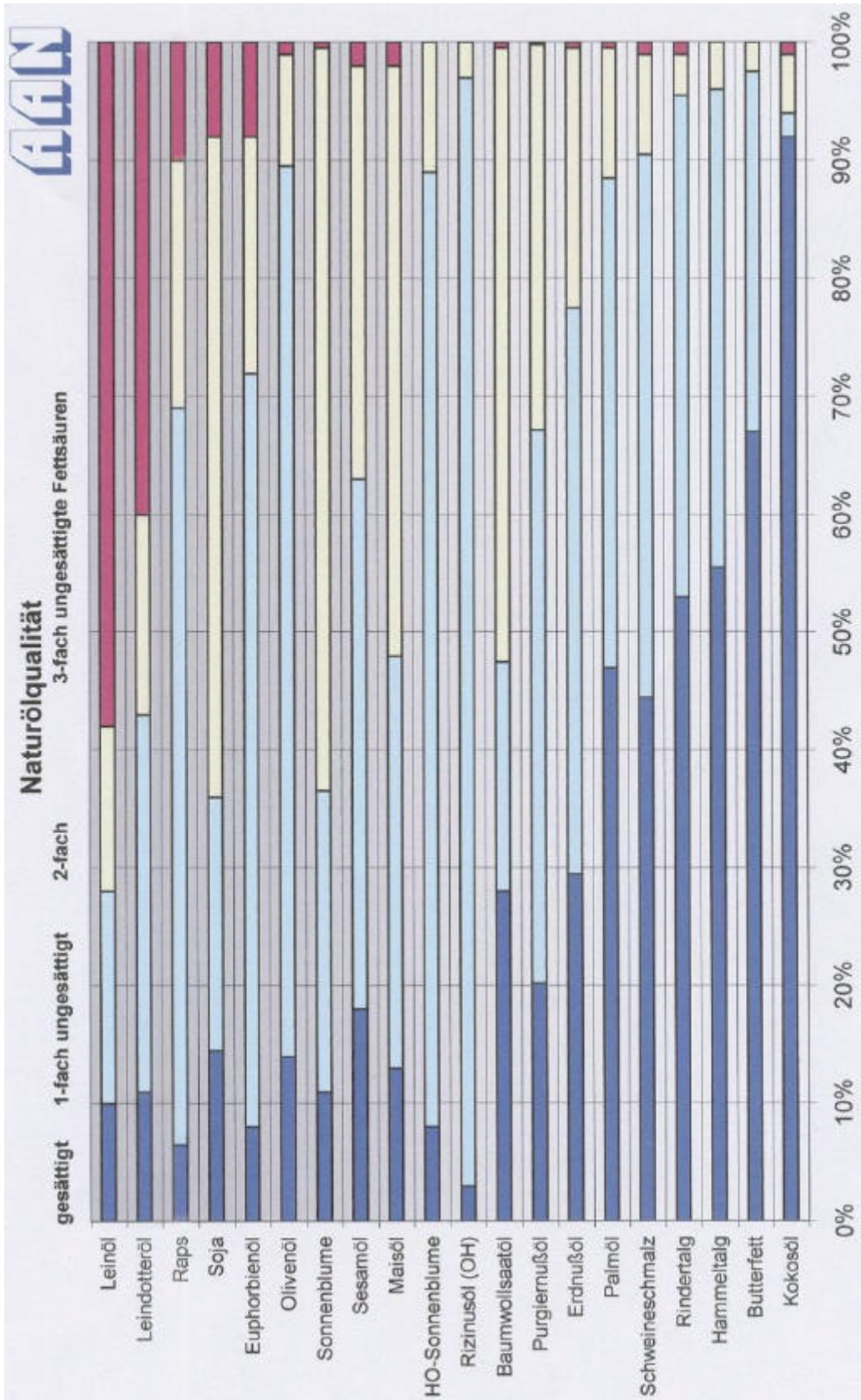
(Figure : (4.9), Max-Planck-Institut, Norbert Martini)

Nous voyons que ce sont principalement les acides *oléique et linoléique* qui interviendront dans la réaction de polymérisation.

Mr Kampmann de la firme AAN nous a aimablement communiqué un superbe tableau qui reprend une synthèse de la composition de nombreuses huiles. Vous le visualiserez en page suivante (Figure : (4.10)).

Ce tableau permet de classer l'huile de palme par rapport aux autres huiles, principalement en fonction des pourcentages de liaisons saturées, mono-insaturées, bi-insaturées et tri-insaturées. L'huile de palme se situe dans la partie du tableau favorable au point de vue des liaisons saturées. Elle aura donc une faculté de moins polymériser que la majeure partie des autres huiles, cela lui confère un atout supplémentaire dans son utilisation comme carburant.

Une autre représentation des liaisons chimiques se fait par le biais de l'indice d'iode, reflétant la quantité de liaisons insaturées. Un tableau à la figure (A.18) y est donné en annexe. La figure (A.19) en annexe, nous montre un tableau récapitulatif des diverses huiles et de leur indice d'iode.



(Figure : (4.10), AAN)

3.3.3 Conséquences

La plus importante des conséquences d'une polymérisation de l'huile, se situe à l'endroit de l'**injecteur**. Il s'y produit le phénomène de **cocking** : il s'agit de la formation de dépôts au nez des injecteurs, lors de l'usage d'une huile végétale naturelle comme carburant, à cause d'une température des têtes d'injecteurs inférieures au point d'éclair (c'est-à-dire une température maximum de 220°C à la tête d'injecteur par rapport à un point d'éclair pour l'huile de palme de minimum 280°C). Ce dépôt a bien sûr une influence sur le jet et, à son apparition, il peut se former des « **trompettes** » qui dévient les jets et détruisent la qualité de la combustion. Une trompette est une boule de dépôt qui se manifeste lors d'une combustion incomplète, due à une obturation partielle de l'injecteur, avec formation de carbone libre et dépôt de celui-ci au niveau de la culasse. De plus, cette formation est d'autant plus accentuée que la charge appliquée est faible, vu une température dans la chambre de combustion plus faible aussi. Il est donc recommandé de travailler à pleine charge (cfr. § 3.2.3 à la figure (4.8))

Des photos prises au laboratoire AAN vous sont présentées en annexe aux figures (A.20), (A.21) et (A.22).

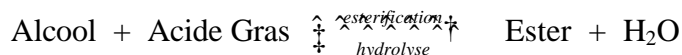
3.3.4 Remèdes

Pour combattre ce désagrément de polymérisation, divers essais ont été effectués. Il s'agissait, entre autres, d'observer le fonctionnement d'un moteur tournant à l'huile végétale, en fonction d'une panoplie de têtes d'injecteurs. Ces expériences ont pu démontrer que **l'injecteur à un seul jet**, était le plus adapté pour ce genre d'application. De plus, les recherches ont abouti à un calibre idéal de l'injecteur aux alentours de 0,2 à 0,3 mm². Ce calibre préconisé, évite ainsi la formation de « trompette » due au phénomène de « cocking ».

Mentionnons aussi que le rinçage au diesel évite la formation d'un dépôt trop important, d'où l'avantage de démarrer et d'arrêter le moteur au diesel.

3.4 Les Réactions chimiques

3.4.1 Préliminaires



(Réaction équilibrée)

En ce qui nous concerne, l'ester est le triglycéride de l'acide palmitique pour l'huile de palme chimiquement pure.

Précisons qu'une huile chimiquement pure n'est pas acide. Par contre, elle devient acide lorsque l'ester s'hydrolyse pour régénérer ses constituants de départ. Dans le cas présent, c'est l'acide gras qui sera responsable de l'acidité de l'huile qui aura subi une hydrolyse partielle. Nous avons déjà évoqué ce problème dans les procédés d'extraction et de raffinage de l'huile de palme.

Dans les conditions pratiques de stockage et d'utilisation de l'huile de palme, il sera difficile d'éviter la présence d'eau ou d'humidité. En conclusion, une huile contiendra toujours une faible proportion d'acides gras libres.

3.4.2 Cas de l'huile de palme

Comme déjà évoqué plus haut (cfr. chap. 4 § 3.3.2), l'huile de palme est composée de nombreux triglycérides. *De quelle manière et en quelle proportion vont-ils intervenir dans l'acidification de l'huile ?*

D'une manière générale, à longueur de chaîne égale, un acide gras présentera un caractère plus acide s'il contient des liaisons doubles. En effet, la délocalisation des électrons favorisée par les doubles liaisons, renforcera le caractère acide.

De même, plus la chaîne aliphatique sera courte, plus le degré d'acidité sera marqué.

Observons, à la figure (4.9) (cfr. chap.4 § 3.3.2) que c'est principalement les acides *oléique et linoléique* (représentant ± de 30 à 60% de la composition), qui seront responsables du degré d'acidité de l'huile de palme.

Il serait intéressant en génie biogénétique de pouvoir produire des variétés de palmier à huile dont les proportions en acides *oléique et linoléique* soient beaucoup plus faibles. Cela permettrait de résoudre les problèmes de la polymérisation et de l'acidité.

3.4.3 Problèmes rencontrés dans le moteur

3.4.3.1 Moteur fonctionnant au diesel

Jusqu'à présent, les carburants habituels tels que le diesel et l'essence, sont de composition chimiquement neutre. Cela a conduit à construire des moteurs de type « basique », voulant désigner le caractère basique (alcalin) de l'huile lubrifiante. Ceci dans le but de remédier au problème suivant.

Lors de la combustion, le diesel, s'il contient du soufre, dégagera en plus des habituels CO, CO₂ et NO_x, du SO₃. Dans le cas d'un dégagement de SO₃, celui-ci génère, avec de l'eau, de l'acide sulfurique H₂SO₄. L'acide présent lors de la combustion peut se retrouver dans l'huile de lubrification du moteur. Comme les huiles moteurs ont un caractère basique, elles neutraliseront l'acide, le cas échéant, pour former un dépôt dans le carter moteur. C'est une des raisons pour laquelle une vidange est régulièrement nécessaire.

3.4.3.2 Moteur fonctionnant à l'huile de palme

3.4.3.2.1 Causes

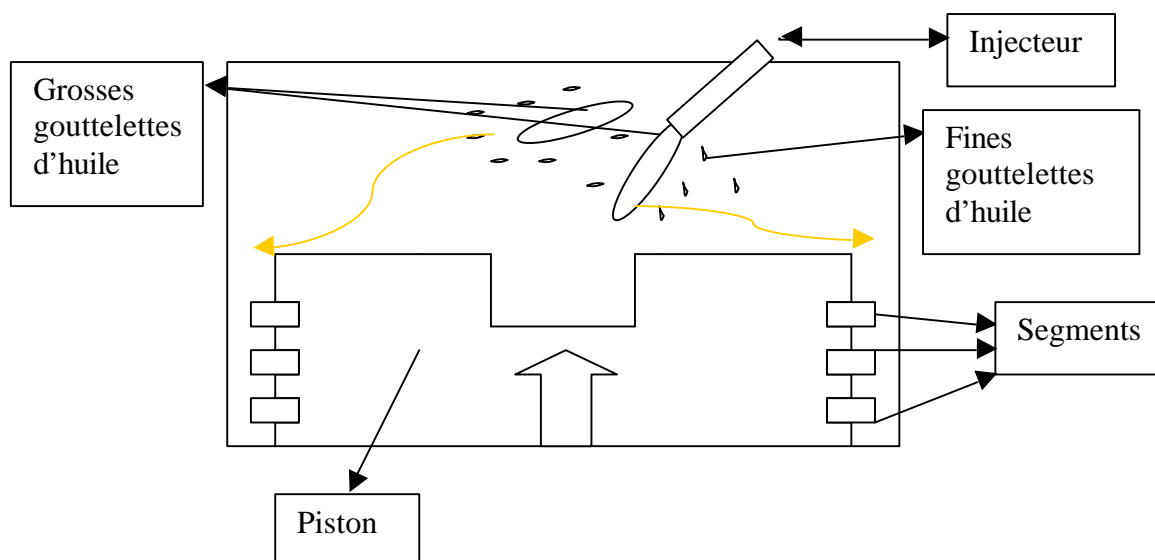
Dans le cas de l'huile de palme, un autre phénomène s'y produit. L'éventuelle interaction entre le soufre présent dans l'huile de palme et l'huile lubrifiante peut être complètement négligée car la teneur en soufre est de dix à cent fois plus faible que dans le diesel.

Nous avons vu précédemment que l'huile de palme dans les conditions habituelles de stockage et d'utilisation, présentait **toujours un caractère acide vu l'hydrolyse incontournable**. Ce degré d'acidité a déjà été classifié selon différents types (cfr. chap. 3 § 2.1). Lors d'utilisation d'huile de palme dans un moteur diesel, il est fortement recommandé de travailler avec de l'huile du type n°1 qui a un degré d'acidité < 4% d'acide palmitique et une teneur en eau et impuretés de moins de 0,5%. Le pourcentage de l'ester de l'acide palmitique dans l'huile de palme se trouve en moyenne aux alentours de 50%, d'où un degré d'acidité d'environ 2% pour l'huile de palme.

Nous pouvons aussi définir le degré d'acidité directement par la méthode expérimentale avec du KOH. Ainsi une huile végétale de bonne qualité, voit son degré d'acidité entre 0 et 2 mg KOH/g.

En quoi consiste alors le problème rencontré lors de l'utilisation d'une huile végétale dans un moteur ?

Il se fait qu'une maigre quantité d'huile végétale se retrouve inévitablement d'une manière ou d'une autre, dans l'huile lubrifiante. La plus grande partie de l'huile végétale (acide) qui passe à travers les segments, pour venir se mélanger à **l'huile lubrifiante (basique)**, se produit lors du démarrage du moteur à froid avec l'huile végétale. En effet, à ce moment, les **segments** sur le piston ne procurent **pas une étanchéité suffisante** pour éviter le passage de l'huile végétale vers le carter. Voyons à l'aide d'un schéma simpliste comment visualiser ce phénomène :



(Figure : (4.11), passage du carburant vers le carter lors du démarrage à froid)

Au démarrage à froid, les segments ne procurant pas une étanchéité suffisante, le carburant non brûlé passe sans peine la barrière des segments et rejoint ainsi l'huile lubrifiante dans le carter. On parle approximativement de $2,5 \text{ cm}^3$ (ou ml), pour les moteurs de puissance moyenne (20 à 50 kW), et de $1,5 \text{ cm}^3$ pour les moteurs de plus petite puissance (5 à 10 kW), d'huile carburant qui passe dans l'huile lubrifiante à chaque démarrage à froid. Ces chiffres sont considérables et s'expliquent non seulement par le fait que les segments n'apportent pas une étanchéité suffisante lors du démarrage, mais également par une mauvaise combustion au démarrage. Précisément, lors de la mise en marche du moteur, la chambre de combustion est encore à température ambiante, ce qui ne favorise pas la combustion. Mais, au démarrage, on injecte beaucoup trop de carburant et de plus on travaille à vide. Il s'agit d'une quantité parfois même dix fois supérieure à la stoechiométrie demandée par la combustion. Ce principe est présenté à la figure (4.11), où l'on distingue bien les fines gouttelettes de carburant réellement nécessaire à la combustion, des grosses gouttelettes de carburant qui sont en trop et donc se retrouveront en partie dans le carter.

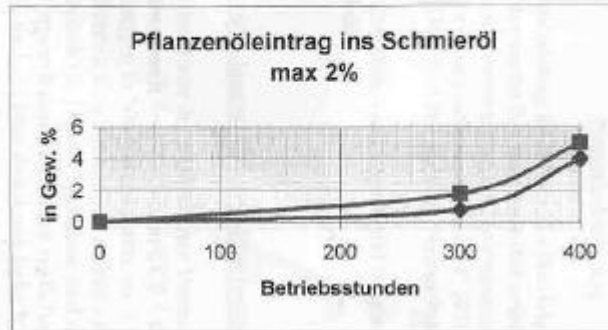
Pour donner une idée de la quantité d'huile carburant qui passe à travers les segments lors du fonctionnement du moteur à chaud, les recherches chez AAN indiquent une quantité approximativement de 5 mm^3 à vide, et de 50 mm^3 par heure en pleine charge pour un moteur de moyenne puissance.

3.4.3.2 Conséquences

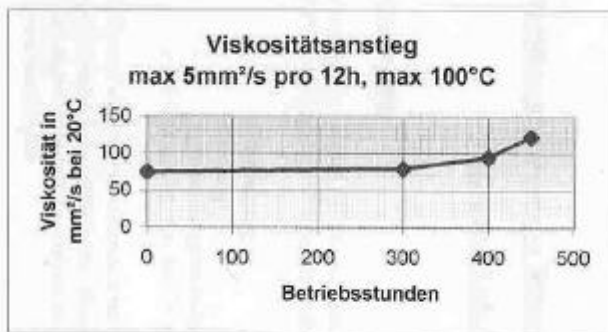
Nous venons de voir comment une partie de l'huile de palme en tant que combustible se voit inévitablement mélangée à l'huile lubrifiante dans le carter du moteur. Analysons dès à présent les conséquences de ce mélange d'huile végétale avec l'huile lubrifiante.

Comme énoncé précédemment, l'huile lubrifiante est basique à l'origine. Lors d'un mélange de cette huile basique avec une autre huile acide, en l'occurrence le carburant, il se produit une **réaction chimique** avec formation **irréversible** d'un « savon » ou plutôt dans le jargon on parle de « mayonnaise ». Cette réaction chimique, assez forte et rapide, est d'allure exponentielle et se produit aussi bien lors du fonctionnement du moteur, mais aussi lorsque le moteur est au repos. Cette réaction est d'autant plus rapide que la température est élevée.

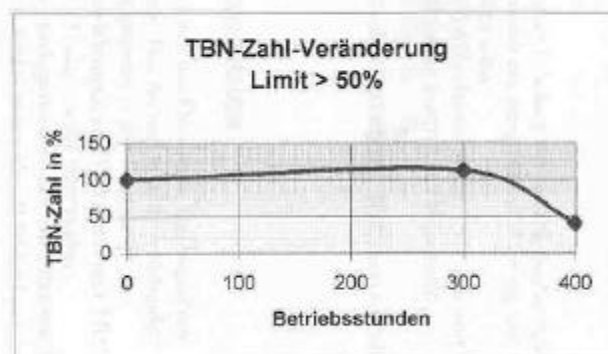
Passons en revue quelques graphes afin d'observer ces diverses conséquences en fonction du temps de marche d'un moteur de moyenne puissance (20 à 50 kW) :



(Figure : (4.12), AAN ; quantité d'huile végétale (carburant) mélangée à l'huile lubrifiante en fonction du temps)



(Figure : (4.13), AAN ; augmentation de la viscosité de l'huile lubrifiante (moteur) en fonction du temps)



(Figure : (4.14), AAN ; pourcentage du degré basique de l'huile lubrifiante en fonction du temps)

Mentionnons que ces tests ont été effectués avec une huile végétale quelconque, ce qui importe peu d'ailleurs car ce sont les caractéristiques de l'huile lubrifiante qui nous intéressent. Analysons maintenant chacun de ces graphes.

A la figure (4.12), nous pouvons remarquer deux courbes. La courbe inférieure représente la quantité d'huile de carburant, en pourcentage du poids de l'huile lubrifiante non contaminée, qui se retrouve dans le carter pendant le fonctionnement lors un cycle intermittent normalisé d'un moteur, reflétant le mode de fonctionnement d'un moteur dans la plupart des applications courantes. La courbe supérieure nous montre la même chose, mais le moteur s'y trouve en permanence en pleine charge avec un à deux démarrages par jour.

Nous pouvons donc constater qu'un moteur fonctionnant par intermittence, atteindra une quantité de 2% de la masse de l'huile lubrifiante après environ 350 heures de marche, tandis qu'un moteur soumis à pleine charge y parviendra déjà en 300 heures.

A la figure (4.13), le graphe nous indique l'évolution de la viscosité de l'huile lubrifiante en fonction du temps de marche du moteur à cycle intermittent. Nous observons une viscosité plus ou moins constante de 75 mm²/s à 20°C, jusqu'à 300 heures de fonctionnement du moteur. Après cette période, la viscosité de l'huile lubrifiante grimpe en flèche.

A la figure (4.14), c'est le degré basique de l'huile lubrifiante qui est représenté. Au début la référence est à 100% de degré basique. L'alcalinité de l'huile croît légèrement jusqu'à 300 heures de fonctionnement intermittent pour ensuite chuter dans l'acidité et ainsi perdre la moitié de son degré basique après les 400 heures de marche.

3.4.3.2.3 Tests

Ces trois graphes nous montrent de trois manières différentes, la détérioration des propriétés de l'huile lubrifiante. Ce sont trois méthodes de détection pour tirer le signal d'alarme lorsque le moment est venu de changer l'huile lubrifiante.

Nous constatons que dans les trois graphes, c'est aux alentours des 300 heures de marche du moteur que les propriétés de l'huile lubrifiante commencent à se détériorer. Le pourcentage d'huile carburant atteint alors 1 à 2% de l'huile lubrifiante, la viscosité de l'huile moteur est toujours optimale, et le degré basique n'a pas encore chuté. Il serait donc préférable de remplacer l'huile lubrifiante à ce moment là. Les limites de fonctionnement ont été placées vers les 400 heures de marche. À ce stade, le pourcentage d'huile carburant atteint les 4 à 5% d'huile moteur, la viscosité de l'huile moteur affiche 100 mm²/s à 20°C, et le degré basique a perdu 50%.

Un autre test, pour avoir une image des propriétés de l'huile lubrifiante, est d'effectuer une mesure de sa viscosité (par exemple en début de journée) et puis une autre mesure 12 heures après (en fin de journée). Si la viscosité a augmenté de plus de 5 mm²/s (à condition que l'huile n'ait pas dépassée les 100°C), la limite de fonctionnement de l'huile lubrifiante est alors franchie.

Il est indispensable d'effectuer le remplacement de l'huile lubrifiante une fois ces limites atteintes.

Nous venons de voir de quelles façons l'huile carburant pouvait détériorer les propriétés de l'huile lubrifiante et comment on arrive à détecter l'instant à partir duquel il est crucial de remplacer l'huile moteur au risque de séquelles graves et irréversibles au moteur.

Ces méthodes encore assez simples, sont entre autres utilisées en **Europe**. Mais en **Afrique**, on ne dispose pas toujours d'appareils de titrage et d'acidité, ni de viscosimètre. Il faut dès lors trouver un moyen très simple pour déterminer le moment où il est indispensable de vidanger le moteur. Voici ce que nous proposons :

Il suffit tout simplement de disposer d'un plan incliné, muni de deux canaux, dans un matériau ni trop rugueux, ni trop lisse. La méthode consiste à comparer, simultanément et côte à côte, l'écoulement de l'huile moteur usagée avec une huile de lubrification neuve. Si l'huile usagée coule un peu plus vite que la nouvelle huile, elle est encore utilisable. Cela veut dire qu'il y a présence d'huile carburant dans l'huile moteur, car dans la plupart des cas la viscosité de l'huile carburant est inférieure à la viscosité de l'huile moteur, mais les propriétés de lubrification sont encore respectées. Par contre, si l'huile moteur usagée coule beaucoup moins vite que l'huile neuve, cela veut dire que la réaction chimique est en cours et que les propriétés de lubrification du moteur ne sont plus assurées. Il est donc indispensable de procéder au remplacement de cette huile moteur. Cette méthode semble empirique, mais aura l'avantage de visualiser facilement la viscosité de l'huile d'une manière comparative, plutôt que de donner des valeurs absolues qui dans le cas présent, n'apporteront rien de plus.

3.4.3.2.4 Remèdes

Existent-ils des remèdes à ce problème de mélange d'acidité de l'huile carburant avec l'huile moteur qui est basique ?

Ils n'en existent pas vraiment, car il est inévitable que, lors du démarrage à froid, les segments du piston n'assurent une étanchéité parfaite. D'ailleurs ce passage a aussi lieu lors du fonctionnement du moteur, mais en moindre quantité.

Le premier remède avant tout, est une question de **discipline**. Il est capital de maîtriser ce problème, car c'est lui, en premier lieu, qui sera la cause d'une casse moteur ! Certains disent même que le plus gros problème de faire fonctionner un moteur à l'huile végétale n'est pas spécialement toutes les adaptations à apporter au moteur pour qu'il puisse accueillir cette huile, mais tout simplement d'entretenir ce moteur, en l'occurrence ici : surveiller l'huile de lubrification.

Nous savons tous que la maintenance et l'entretien sont des impératifs durs à respecter, même chez nous en Europe. Alors qu'en adviendra-t-il pour l'Afrique ?

De toute façon, soyons bien conscients que le meilleur carburant à utiliser dans un moteur diesel est le diesel lui-même, car le moteur a été conçu pour cela. Un autre carburant apportera nécessairement des problèmes supplémentaires.

Penchons nous, dès à présent, sur ce problème d'huile de lubrification pour l'Afrique. Le meilleur des choix à faire est d'imposer de **démarrer le moteur au diesel**. Ceci permettra de limiter le passage de l'huile carburant dans le carter et nous facilitera d'ailleurs la tâche pour d'autres applications. Ce deuxième remède est évidemment à prendre en considération avec le premier remède, une discipline intransigeante.

Le fait de démarrer le moteur au diesel, réduit considérablement le passage de l'huile carburant dans le carter, car ce passage ne se fera que lors du fonctionnement à chaud du moteur fonctionnant à ce moment à l'huile végétale. Rappelons les chiffres mentionnés ci-dessus qui étaient de 1,5 à 2,5 cm³ d'huile carburant qui passe dans le carter lors du démarrage à froid, et seulement de 5 à 50 mm³, respectivement à vide et en pleine charge, lors d'une heure de marche.

Faisons un bref calcul afin d'en sortir des conclusions claires. Dans le cas d'un moteur de moyenne puissance (2 cylindres, 20 kW), la capacité d'huile lubrifiante dans le moteur est d'environ cinq litres. Admettons que ce moteur fonctionne pendant 320 heures, 8 heures par jour, avec un seul démarrage à froid par jour. Cela nous fait donc quarante démarrages pour le cycle entier. En multipliant ceci par 2,5 cm³ (ou ml) d'huile carburant qui passe dans le carter à chaque démarrage à froid, on obtient bien 100 cm³ (ou ml) d'huile carburant dans le carter en fin de cycle. En faisant l'hypothèse que la masse de l'huile moteur est la même que l'huile utilisée comme carburant et en négligeant les fuites lors du fonctionnement, le résultat nous donne bien une quantité de 2% en masse d'huile carburant mélangée à l'huile moteur, après 320 heures de cycle intermittent. Ce résultat coïncide bien avec les données citées plus haut (voir figure (4.12)).

En revanche, dans le cas où ce moteur démarre au diesel, en fonctionnant par la suite à l'huile végétale, nous tenons uniquement compte des fuites lors du fonctionnement. Maximisons la valeur de ces fuites 50 mm³ par heure. Cela nous fait après calcul, une quantité de 16 cm³ d'huile carburant dans l'huile moteur, soit un pourcentage de 0.32%. Remarquons que cette quantité est six fois moindre que lors du démarrage à l'huile. Nous pouvons donc en conclure que, théoriquement, nous pourrions changer l'huile moteur non pas après 300 heures, mais après 1.800 heures. Il est évident que ce ne sera pas le cas, puisque la dégradation des propriétés de l'huile lubrifiante, causée par la durée de vie de celle-ci, déterminera le moment opportun d'effectuer la vidange du moteur.

Le point important pour nous, c'est de pouvoir éviter partiellement ce problème de pénétration d'acidité dans l'huile lubrifiante, par l'astuce de démarrer le moteur au diesel, et qu'une fois le moteur chaud, de passer à l'huile végétale. Ainsi, la durée de vie de l'huile moteur ne sera pas déterminée par ce problème, mais le sera par le mode de fonctionnement du moteur et de la qualité de l'huile lubrifiante.

Cependant soyons conscients qu'il est recommandé, malgré tout, d'effectuer le test de l'huile moteur « sur plan incliné » afin de s'assurer de la qualité lubrifiante de l'huile moteur.

Par rapport à l'huile de palme plus précisément, soulignons encore le fait suivant : dans l'analyse chimique de l'huile de palme nous avons fait remarquer qu'un acide gras présentera un caractère plus acide s'il contient des liaisons doubles. Comme déjà vu plus haut (cfr. figure (4.10)), nous avons pu observer que l'huile de palme en comparaison avec les autres huiles végétales traditionnelles, contenait nettement moins de liaisons doubles, d'où une moins grande facilité à produire des acides libres. C'est une fois de plus un avantage non négligeable pour l'utilisation de l'huile de palme comme combustible.

Signalons que les chiffres et résultats cités ci-dessus, proviennent des expériences du laboratoire AAN effectuées sur leurs propres moteurs. Selon la construction du moteur, la qualité de l'huile lubrifiante, et d'autres, ces chiffres pourront quelque peu varier. L'objectif ici était de donner des ordres de grandeur représentatifs de la majorité des moteurs susceptibles d'être rencontrés dans la petite industrie.

Pour conclure ce point il serait intéressant de s'informer des remèdes sur lesquels travaille la firme **AAN**. Ils sont présentés ici pour ouvrir quelques pistes et élargir les perspectives.

Rappelons avant tout, les objectifs visés par une huile de lubrification dans le cas du diesel :

- ☒ Lubrification
- ☒ Refroidissement
- ☒ Transport des particules libres
- ☒ Fixation des produits acides

Ce dernier point à propos de la fixation des produits acides (en faible quantité), concerne principalement la réaction avec le SO_3 comme évoqué plus haut dans le cas du diesel.

Les ingénieurs chez AAN ont fait des recherches pour savoir s'il n'y avait pas moyen de favoriser l'introduction de l'acide dans l'huile lubrifiante qui est alcaline. Ils se sont alors penchés vers **l'adjonction d'agents tensioactifs** dans l'huile moteur. Ceci donne des résultats favorables à la captation des particules acides.

Des essais sont en cours et des résultats plus précis sont attendus.

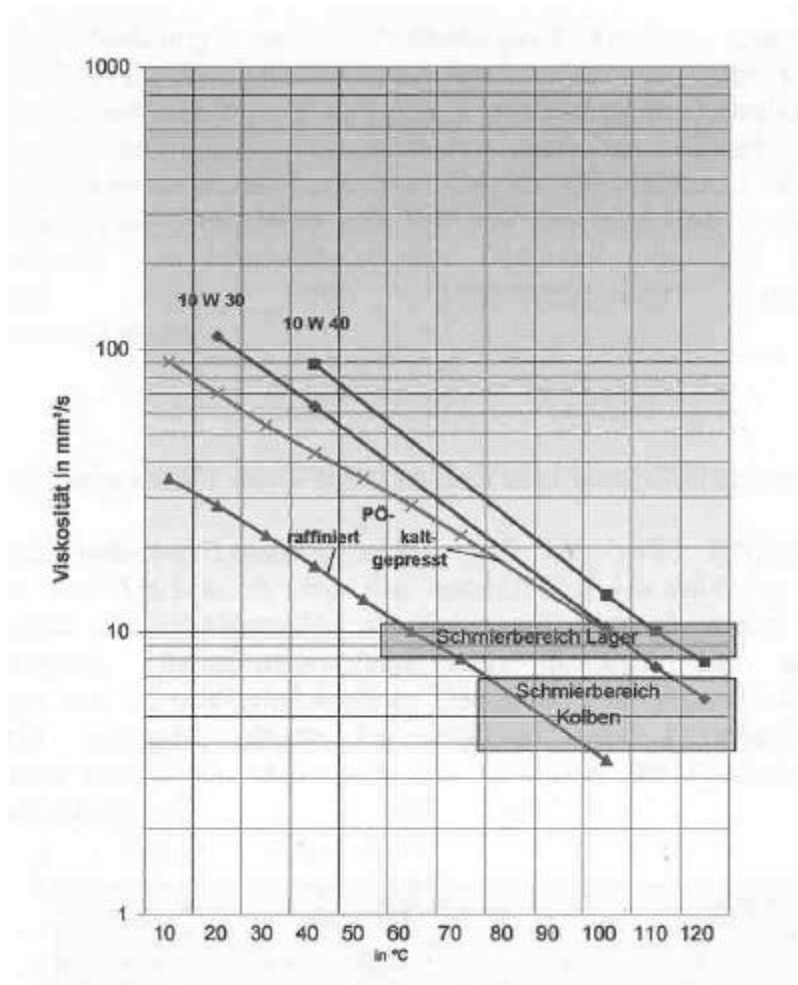
Les ingénieurs chez AAN se sont alors posés la question de savoir s'il ne serait pas possible de fabriquer une **huile de lubrification à caractère acide**. Ainsi, pourrait-on éviter les réactions chimiques entre l'huile carburant et l'huile moteur, toutes deux étant alors acides. Les essais sont en cours et les éventuels problèmes liés au caractère acide de l'huile moteur sont étudiés. De toute façon, ce type d'huile moteur s'avère nécessaire dans le cas où l'on désire démarrer le moteur à l'huile végétale. Nous pouvons présumer que cette huile lubrifiante sera probablement plus chère sur le marché, vu sa nouveauté et son application bien spécifique.

Les ingénieurs chez AAN ont alors poussé la réflexion encore plus loin : pourquoi ne pas **utiliser la même huile végétale qui sert de carburant, comme huile de lubrification ?** Ainsi, le passage de l'huile carburant vers l'huile lubrifiante ne posera plus de problème, vu que cela revient à introduire de l'huile végétale dans la même huile végétale.

Ils ont ainsi réalisé des tests de viscosité d'huile lubrifiante et d'huile végétale. Voici ce que l'on remarque dans la figure (4.15) :

Nous observons deux types d'huile lubrifiante les plus utilisées, la 10 W 30 et la 10 W 40, en comparaison à une huile végétale (*PÖ*, ici le colza), l'une raffinée et l'autre pressée à froid (*'kalt gepresst'*). Nous y distinguons aussi deux zones : une zone qualifiant la viscosité requise pour la lubrification des paliers (*'Schmierbereich Lager'*), et une autre zone qualifiant la viscosité requise pour la lubrification des pistons (*'Schmierbereich Kolben'*).

Ainsi les ingénieurs chez AAN ont défini pour leurs applications une viscosité se situant dans la zone de 10 à 12 mm^2/s pour la lubrification des paliers, et une zone de 5 à 8 mm^2/s pour la lubrification des pistons. Cela leur permet de ne pas dépasser les 100-110°C pour l'huile lubrifiante.



(Figure : (4.15), AAN)

Mais ils ne se sont pas arrêtés là : après avoir expérimenté ces propriétés lubrifiantes de l'huile végétale, ils en ont conclu que son utilisation comme huile de lubrification serait envisageable si l'on ne dépasse pas les 20 à 40 heures de travail. Ils sont ainsi arrivés à concevoir tout un système assez complexe dans lequel l'huile végétale sert d'abord de lubrifiant moteur pour passer ensuite dans un échangeur de chaleur après avoir été en contact avec les parties chaudes du moteur et atteindre ainsi les 100-110°C. Dans cet échangeur de chaleur l'huile, qui a servi pour la lubrification, réchauffe l'huile fraîche entrante, et se voit donc refroidir à une température avoisinant les 75-80°C, avant de passer dans la pompe d'injection. En théorie l'huile est employée dans le cycle 250 fois comme lubrifiant et une fois comme carburant.

Ceci résume très largement le processus, sans parler des différentes pompes de circulation à installer, des niveaux d'huiles, des sondes de températures,...

Cette méthode de fonctionnement du moteur est forcément la plus favorable. Elle permet de résoudre pas mal de problèmes. Certes, elle nécessite des adaptations importantes au moteur, d'où un coût élevé. Cette méthode s'avère intéressante pour des moteurs de grosses puissances, démarrant à l'huile végétale, et fonctionnant à des régimes plutôt variés. Pour les plus petites puissances, il serait préférable de démarrer au diesel et d'attacher un suivi intransigeant aux propriétés de l'huile de lubrification.

3.5 Les réactions physico-chimiques

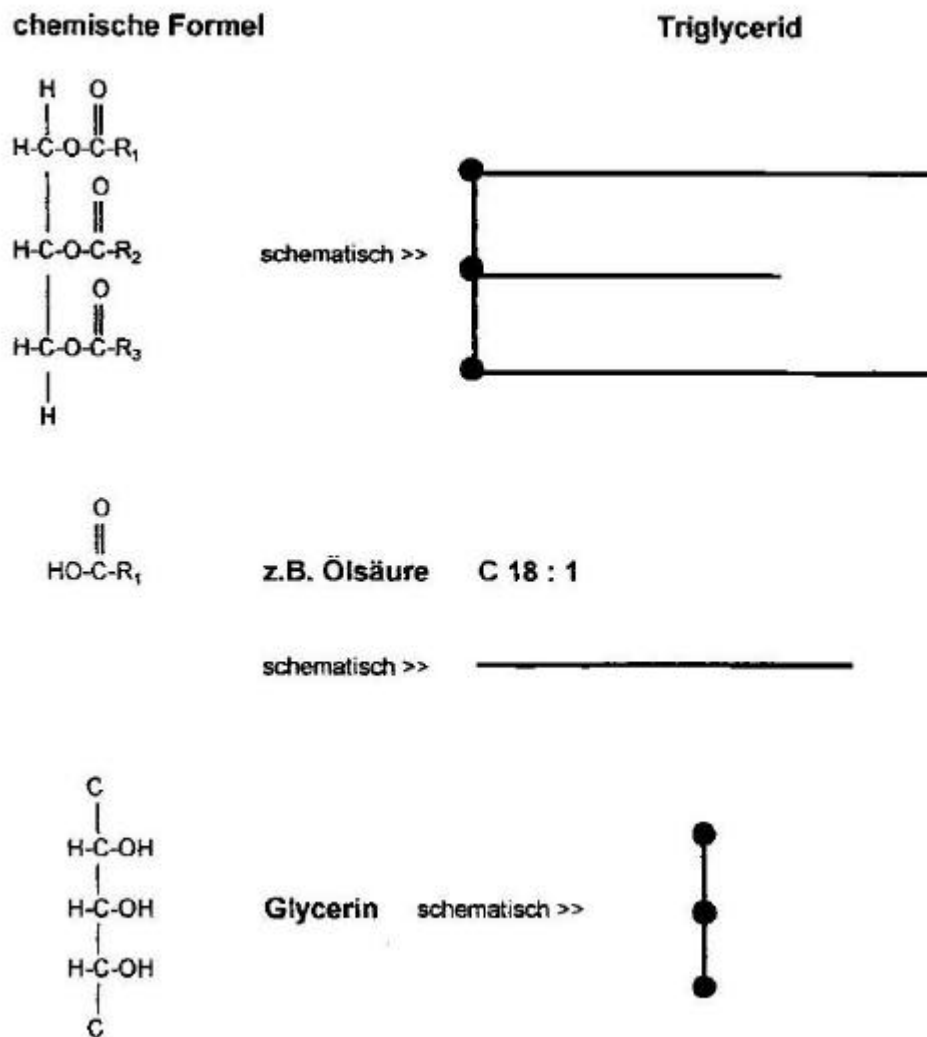
3.5.1 Causes

Il s'agit en fait de différents phénomènes qui résultent d'une période de stagnation de l'huile végétale.

Nous avons vu précédemment le problème de la **polymérisation** qui débute lorsque l'huile végétale rentre en contact avec un initiateur, dans notre cas : l'oxygène et la chaleur. Ce phénomène se produit aussi lorsqu'une huile végétale se trouve au repos.

Ensuite, nous avons parlé du problème de l'**acidité** d'une huile végétale. Nous avons pu voir qu'une huile végétale en présence d'eau subit une hydrolyse avec apparition d'acides gras libres.

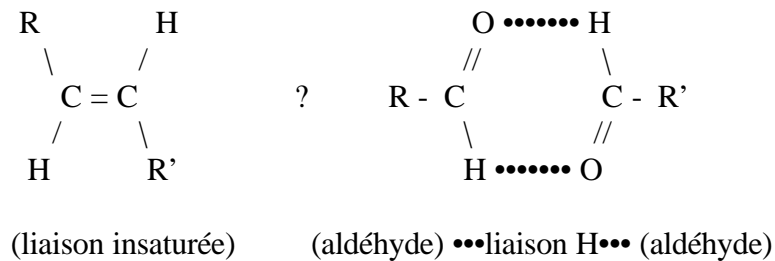
La figure (4.16) nous montre ce phénomène de décomposition du Triglycéride (l'huile végétale) en Glycérine et en Acides gras libres ('Ölsäure').



(Figure : (4.16), AAN)

Ne perdons pas de vue qu'une huile végétale peut aussi donner lieu à un phénomène de **rancissement** qui est toujours complexe et est provoqué par des enzymes ou par oxydation. Les huiles non saturées peuvent, sous l'action des oxydants, se transformer en aldéhydes qui sont la cause du goût rance.

Voyons à l'aide d'un schéma comment ce phénomène de rancissement peut influencer l'utilisation d'une telle huile comme carburant :



Les aldéhydes peuvent donc se polymériser spontanément et d'autant mieux sous l'action de la chaleur. On peut ainsi trouver des polymères cycliques et des polyoxyméthylène glycols dont voici la représentation : $n\text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HO} - \text{CH}_2 - \text{O} (\text{CH}_2\text{O})_{n-2} - \text{CH}_2\text{OH}$

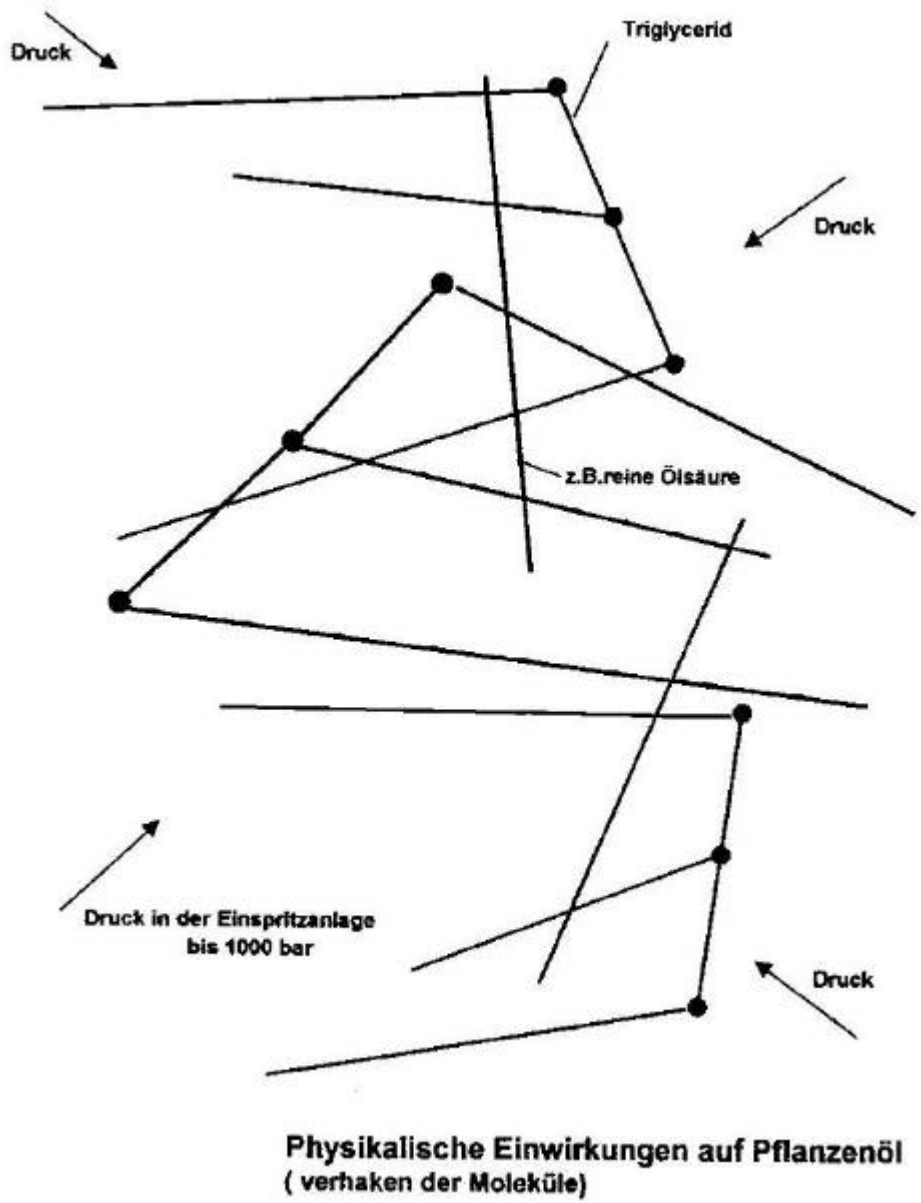
3.5.2 Conséquences

Une huile insaturée étant restée au repos pendant une trop longue période, ne pourra plus être utilisée comme carburant dans un moteur.

Premièrement, cette huile devenue très acide attaquera les éléments (dans le moteur) en cuivre et chrome. Il s'en suivra une corrosion chimique qui détériorera inévitablement ces éléments.

Deuxièmement, cette huile, contenant de nombreux acides gras libres et des aldéhydes, donnera naissance à des croisements entre molécules avec comme conséquence une formation de « gelée » ou de « beurre ».

Ceci est illustré à la figure (4.17) , dans le cas où ce « beurre » se trouve soumis à une pression élevée dans le système d'injection. Il sera totalement impossible que ce « beurre » soit transporté vers l'injecteur, aucune combustion ne sera dès lors possible.



(Figure : (4.17), AAN)

3.5.3 Remèdes

C'est à l'utilisateur de veiller à ce que l'huile végétale choisie comme carburant ait un caractère acide acceptable. Une huile qui traîne depuis quelques mois dans une cuve ou même dans un bidon, aura une teneur en acide élevée et un degré de polymérisation certain. Son utilisation dans un moteur engendrera des dommages importants et irréversibles.

L'optimum reste l'utilisation d'une huile végétale venant d'être pressée, ayant subi une réchauffe de la plus courte durée possible (mais suffisamment pour éliminer la plus grande partie en eau) et d'un chauffage rapide pour l'amener à une viscosité suffisante. Cette huile aura une tendance à avoir une faible teneur en acides gras libres permettant de réduire toutes les conséquences indésirables qui s'ensuivent.

Chapitre 5 : Résultats de tests moteur à l'huile de palme

Nous allons maintenant étayer notre étude scientifique personnelle qui corrobore les résultats obtenus par la société AAN d'une part, et par l'Université de Songkla (Thaïlande) d'autre part.

Nous venons de voir différents points importants qui génèrent des difficultés lors du fonctionnement d'un moteur à l'huile végétale en général. Nous allons maintenant parcourir divers essais qui ont été effectués à l'huile végétale, afin de découvrir le véritable potentiel de l'huile de palme comme carburant.

1 Aperçu de différents essais

Il s'agit tout particulièrement de deux tests effectués à l'huile de palme et un autre effectué à l'huile de pourghère (*Jatropha curcas*).

Les tests à l'huile de palme proviennent de la société AAN et de l'Université de Songkla. Le test à l'huile de pourghère a été réalisé à l'Université de Köln par le Dr. Pak.

Analysons ces résultats un à un, en commençant par l'essai chez AAN, puis celui à l'Université de Songkla, et pour terminer, le test à l'huile de pourghère.

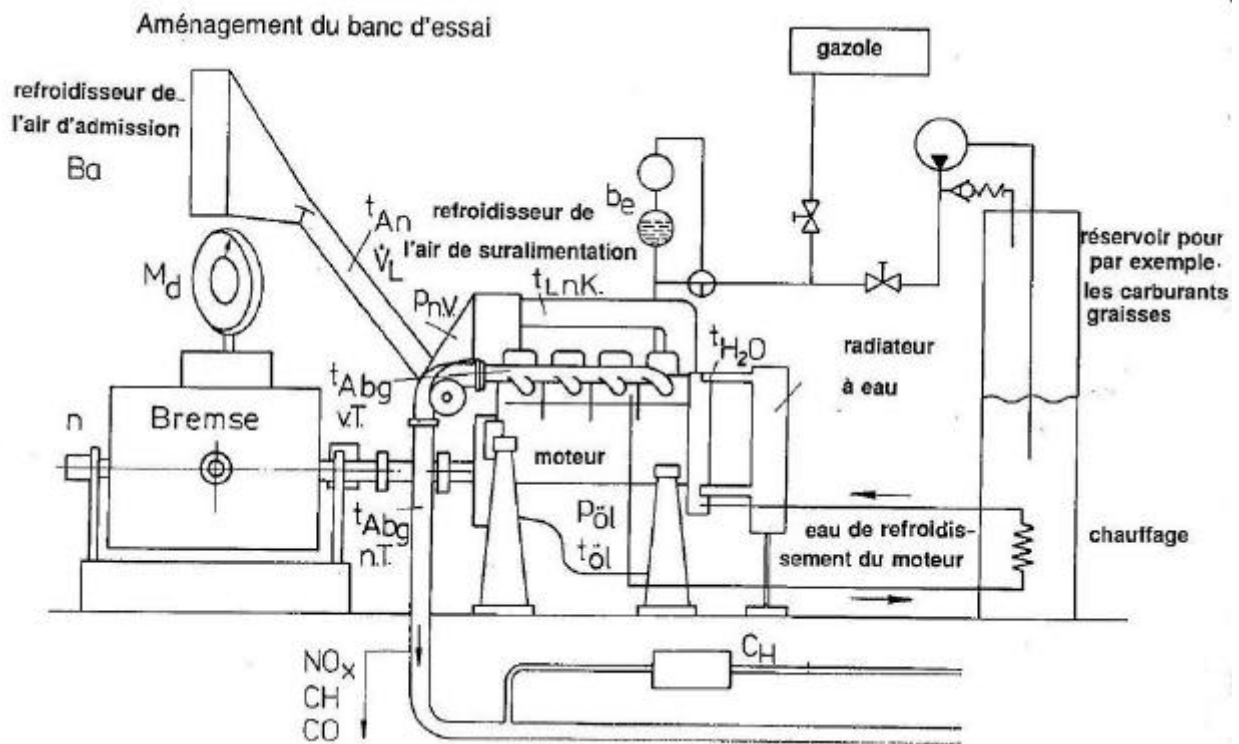
1.1 *Essai chez AAN*

L'essai se fait sur un moteur à quatre cylindres, de 5,9 dm³ de cylindrée avec une course de 135 mm et un diamètre de piston de 118 mm. Il est à injection indirecte, suralimenté et refroidi par air. Il est défini comme le type 4 P 13,5 AL, adapté à l'huile végétale. Une image est disponible en annexe à la figure (A.15).

Durant l'essai on lui fait subir un cycle par intermittence pendant 150 heures, repris à la figure (A.23) en annexe.

L'aménagement du banc d'essai est représenté à la figure (5.1). Nous apercevons un réservoir de 123 litres dans lequel l'huile de palme est chauffée par l'eau de refroidissement du moteur. On atteint ainsi une huile aux alentours de 70 à 75°C. Cet échangeur est repris, en annexe, à la figure (A.24). On y constate qu'une fois que l'huile atteint la température souhaitée, elle reste à l'état liquide plus de 7 heures après l'arrêt du moteur. On peut penser qu'il s'agit peut-être d'un phénomène de surfusion.

Par contre, nous pouvons remarquer à la figure (A.25) en annexe, les différentes températures atteintes par l'huile de palme et par le circuit d'eau de refroidissement. Avec une eau de refroidissement du moteur à 80°C, l'huile de palme reste aux alentours de 70 – 75°C.



(Figure : (5.1), AAN)

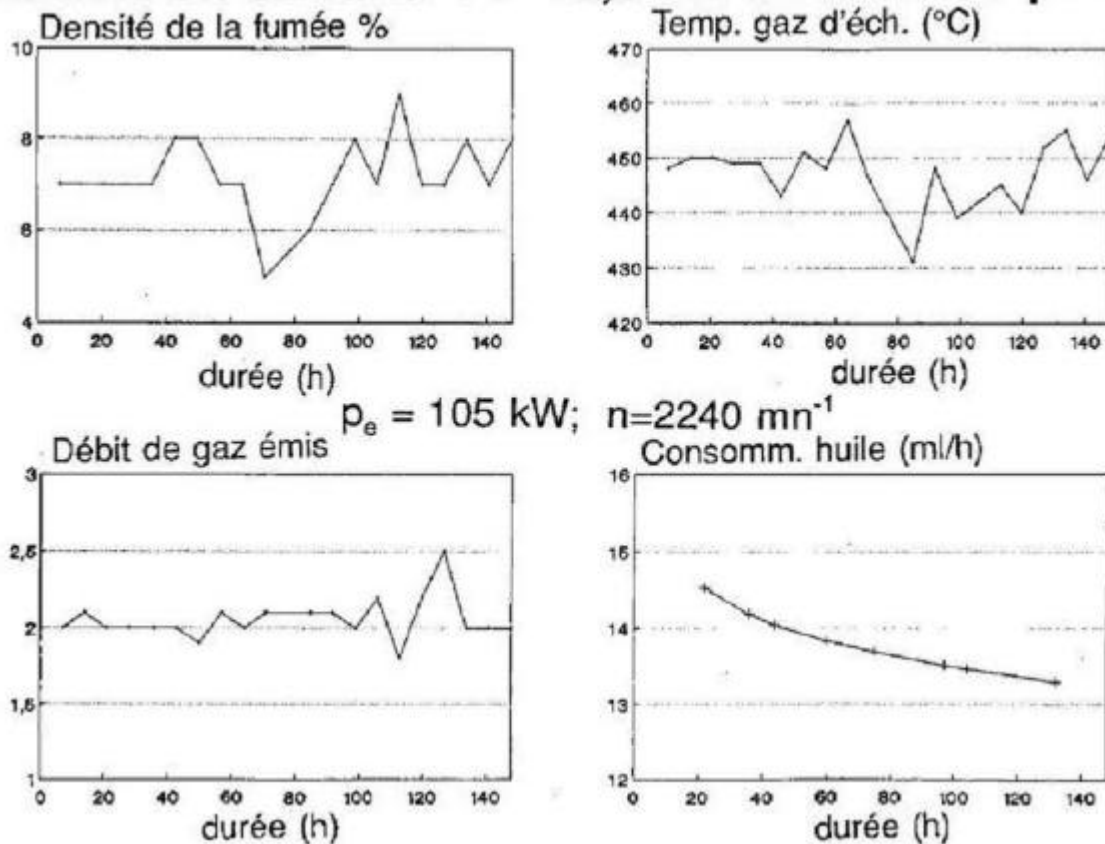
Relevons, à présent, différents résultats intéressants :

Avant d'entamer le test de longue durée à intermittence, les ingénieurs ont joué sur l'avance à l'injection. Le critère d'optimisation choisi pour déterminer le début de refoulement est la densité de la fumée. Nous avons constaté qu'à 1.000 tours/min, le début de refoulement se situait à 10-12°V (degré vilebrequin). Pour des vitesses supérieures à 1.500 tours/min, ce début apparaissait vers les 14-16°V. Ces chiffres correspondent bien à ce qui avait été annoncé précédemment, c'est-à-dire une valeur allant de 5 à 8°V d'avance à l'injection.

Ces réglages permettent d'obtenir une combustion dans des conditions les plus favorables. Il s'ensuit des fumées ayant une densité aux alentours des 7%, une température des gaz d'échappement autour des 450°C, un débit des gaz émis de 2,1 m³/s en moyenne, et une consommation d'huile moteur de 13,5 ml/h en moyenne. Il serait peut être intéressant d'approfondir cette dernière valeur. Il s'agit donc de la quantité d'huile lubrifiante qui n'est pas raclée par les segments et se voit donc carburée. Rappelons-nous de la valeur de la « quantité d'huile végétale qui traversait ces mêmes segments » dans le sens contraire, qui était de 50 mm³/h ou 0,05 ml/h. Ceci s'explique tout simplement par le fait que l'huile végétale est à l'état pulvérisé, tandis que l'huile lubrifiante est bel et bien à l'état liquide.

Ces différentes valeurs se retrouvent à la figure (5.2) :

Marche en continu 4 P 13,5 AL à l'huile de palme



(Figure : (5.2), AAN)

Les résultats enregistrés après ce cycle de 150 heures permettent de dire que le moteur à huile végétale convient, de part sa construction et sa conception, à l'emploi de l'huile de palme si l'on installe un dispositif de chauffage de l'huile. Un examen visuel confirme cette conclusion : un conduit d'admission propre, un injecteur propre sans formation de « trompette » en culasse, et un fond de culasse noirci de façon homogène.

On observe des dépôts charbonneux mous sur la soupape d'admission qui ne nuisent cependant pas au bon fonctionnement du moteur. Le piston coulisse normalement et la sollicitation des gorges des segments est comparable à celle constatée avec l'huile de colza.

Cet examen visuel est comparé à ceux observés pour d'autres huiles végétales, et nous montre que dans la zone de la chambre de combustion, l'huile de palme donne des meilleurs résultats que les autres huiles végétales étudiées au laboratoire AAN (ici le soja et le colza), en raison vraisemblablement de la moindre longueur des chaînes moléculaires.

Les émissions de gaz d'échappement sont d'un ordre de grandeur comparable à celles des autres huiles végétales et correspondent à celles de l'huile de colza.

La consommation est de 241 à 243 g/kWh à une vitesse de 1.500 tours/min et à une pression effective P_e de 1,22 MPa. En raison du pouvoir calorifique moins élevé de l'huile de palme, ce chiffre correspond pour du gasoil à une consommation équivalente d'environ 207 g/kWh.

1.2 Essai à l'Université de Songkla

Cet essai a été effectué durant l'année 2003 par le professeur Gumpon Prateepchaikul à l'Université de 'Prince of Songkla' (Thaïlande).

La qualité de l'huile de palme pour cet essai est reprise en annexe à la figure (A.26) où diverses propriétés sont exposées.

L'essai se déroule à l'aide de deux moteurs neufs KUBOTA (modèle ET80 ou aussi appelé OC80) à un cylindre et injection indirecte. La course ainsi que le diamètre du piston est de 84 mm. Il débite une puissance maximum de 5,88 kW à 2.200 tours/min. Son taux de compression est de 23 :1.

L'essai dure 2.000 heures et se déroule en deux parties : un test de longue durée et un test de courte durée. Après avoir rodé les deux moteurs au diesel pendant 50 heures selon les spécifications du constructeur, les moteurs sont entièrement démontés et chaque pièce est analysée et pesée.

Ensuite, un moteur est alimenté au diesel, l'autre à l'huile de palme raffinée. Celui à l'huile de palme est aussi muni d'un système de préchauffe de cette huile par le passage de la tuyauterie des gaz d'échappement dans le réservoir de 200 litres. Une illustration se trouve en annexe à la figure (A.27) où l'on aperçoit bien cette tuyauterie rentrant dans le bas du réservoir du moteur de devant.

Le premier essai de courte durée de 3 heures et demie, est effectué selon la procédure reprise en annexe à la figure (A.28). Les moteurs sont alors accouplés à un dynamomètre.

Cet essai a pour but de déterminer les performances du moteur, à savoir la consommation spécifique, le rendement thermique, la température des gaz d'échappement, et la densité des fumées noires.

Vient alors le premier test de longue durée de 500 heures en accouplant chaque moteur à un générateur de 7,5 kW, 230 V, 32,2 A , 50 Hz, à 80% du rendement électrique, débitant dans un jeu d'ampoules. Le test se fait alors à 2.200 tours/min à 75% de la charge maximum. Toutes les 100 heures, l'huile du moteur est changée et des échantillons sont prélevés pour l'analyse.

Après cet essai de longue durée, les moteurs subissent alors le test de courte durée et sont ensuite à nouveau entièrement démontés et inspectés de fond en comble. Cette manœuvre est ainsi répétée après les 1.000, les 1.500 et les 2.000 heures de fonctionnement.

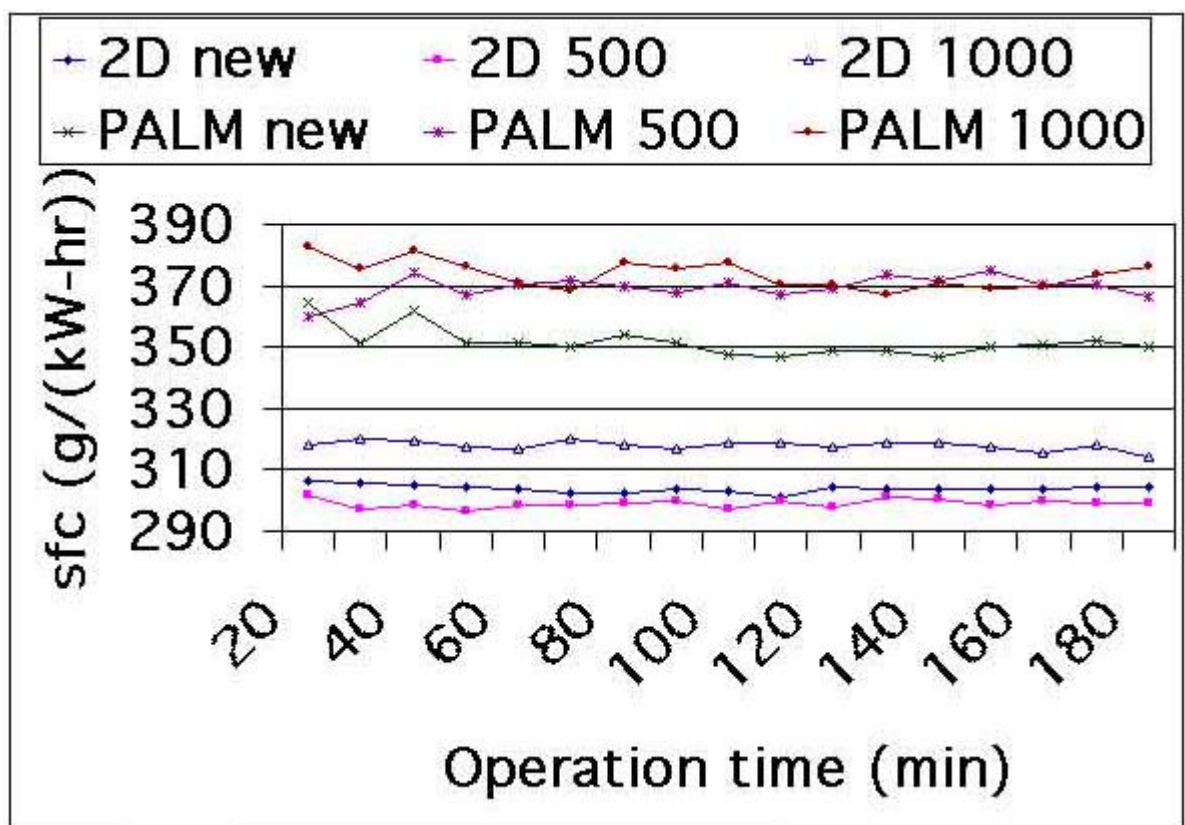
Analysons maintenant les résultats de cet essai en deux parties. La première partie concerne le test de courte durée où les performances du moteur sont recherchées, et la deuxième partie aborde le test de longue durée où la longévité du moteur est interprétée par l'usure de celui-ci en analysant les échantillons de l'huile moteur.

1.2.1 Résultats du test de courte durée

1.2.1.1 Consommation spécifique

Nous constatons que la consommation spécifique [g/kWh] du diesel ('2D') est de 14,2 à 19,0% moindre comparée à l'huile de palme ('Palm') pendant la première heure de fonctionnement ('new'). Après, cette consommation du diesel évolue vers une valeur de 19,3 à 25,8% moindre comparée à l'huile de palme lors des 500 premières heures, puis cette valeur se situe entre 15,1 et 20,3% au stade des 1.000 heures de fonctionnement.

Cette consommation spécifique supérieure pour l'huile de palme se justifie par son pouvoir calorifique inférieur au diesel.



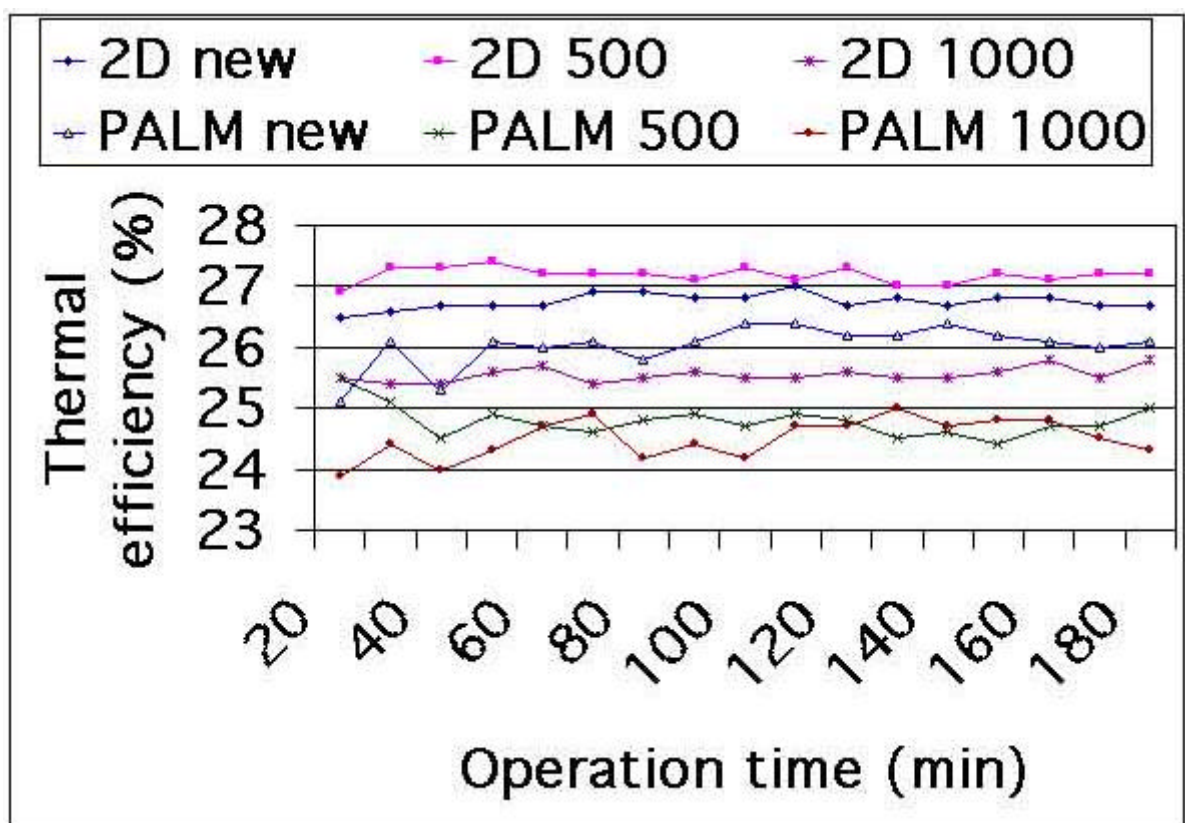
(Figure : (5.3), Université de Songkla)

1.2.1.2 Rendement thermique

Le rendement thermique du moteur tournant au diesel est 0,5 à 1,4% supérieur au moteur fonctionnant à l'huile de palme pendant la première heure de mise en marche, il devient alors 1,5 à 2,8% supérieur après 500 heures, pour terminer de 0,5 à 1,6% toujours supérieur lors des 1000 heures.

Ceci s'explique, entre autres, par une combustion parfois incomplète de l'huile de palme dans la chambre de combustion.

Ces données se retrouvent à la figure (5.4) ci-dessous :



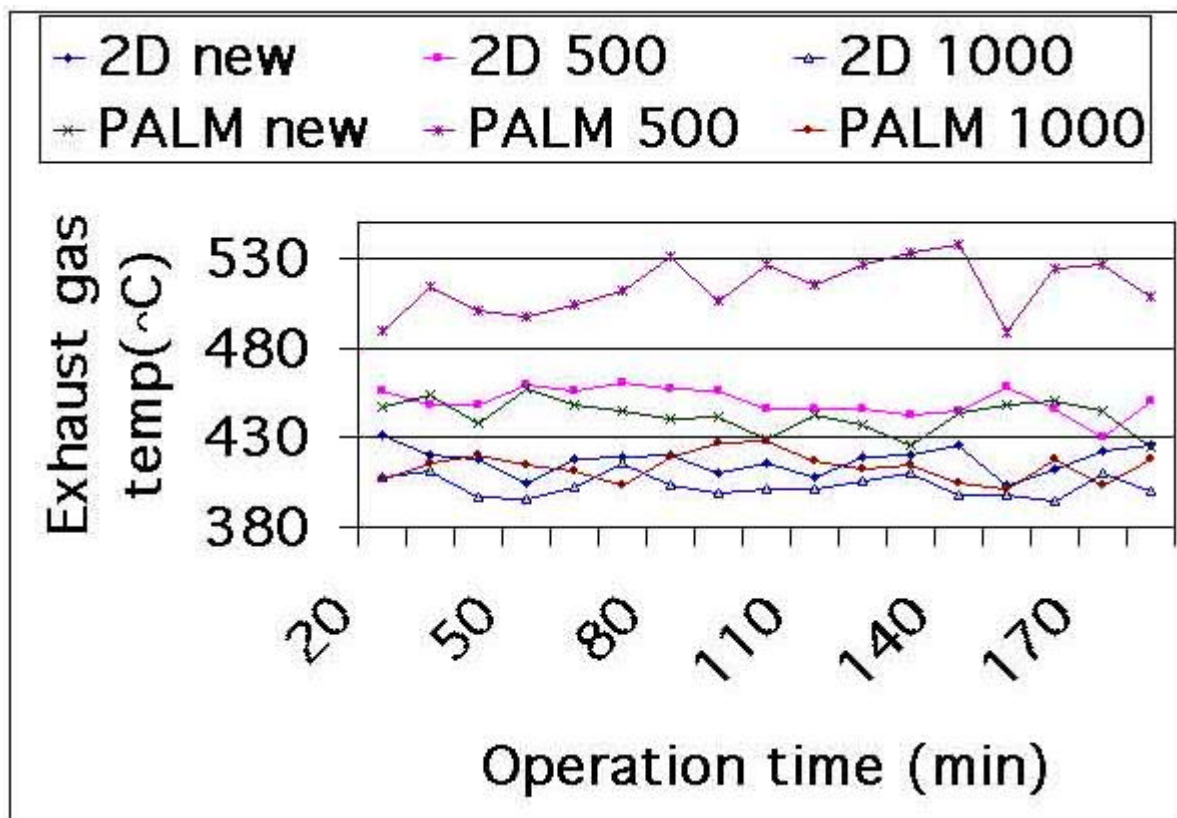
(Figure : (5.4), Université de Songkla)

1.2.1.3 Températures des gaz d'échappement

Nous apercevons bien une température des gaz d'échappement provenant du moteur à l'huile de palme, toujours supérieure à celle du moteur au diesel.

Cela est dû à une combustion quelque peu incomplète de l'huile de palme qui dégage alors du combustible imbrûlé vers le collecteur d'échappement où une autre combustion prend place.

Passons en revue ces valeurs à la figure (5.5) :



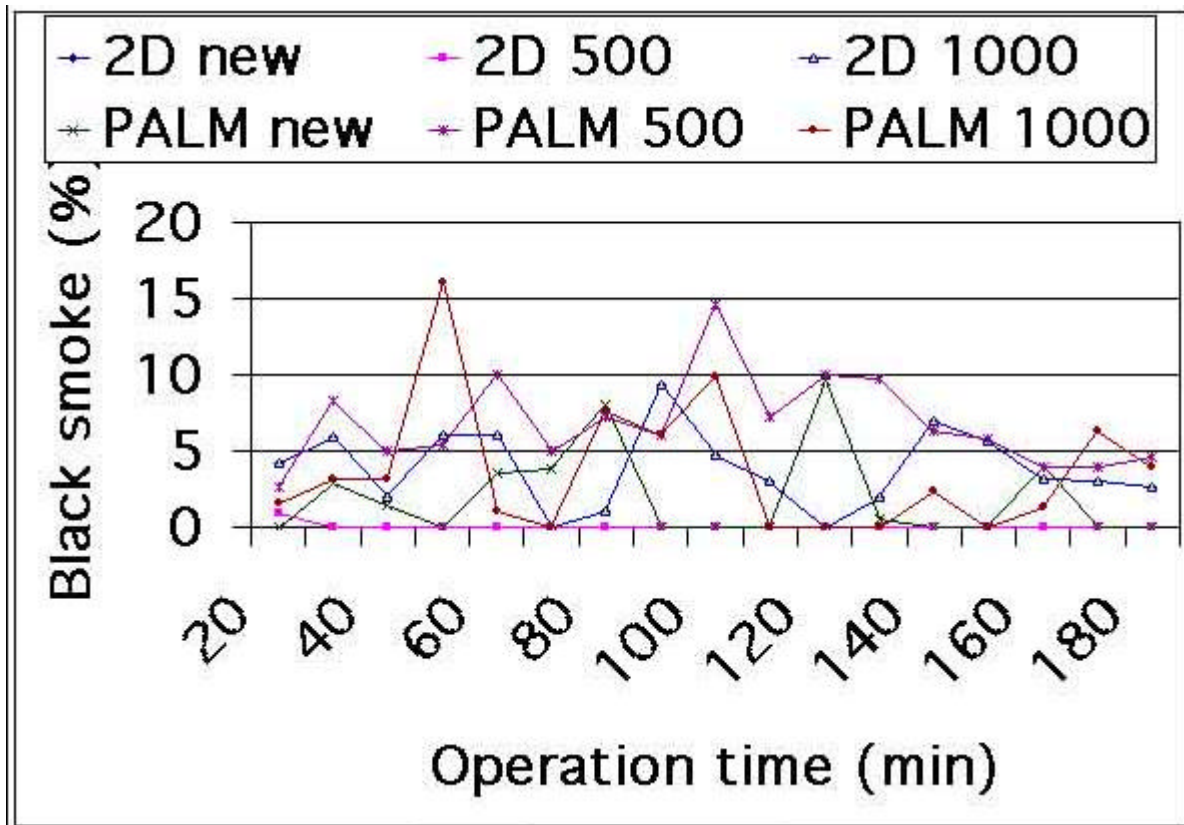
(Figure : (5.5), Université de Songkla)

1.2.1.4 Densité des fumées noires

La densité des fumées noires du moteur à l'huile de palme et au diesel est pratiquement semblable pendant la première heure et après les 1.000 heures de fonctionnement. Par contre nous enregistrons une valeur pour l'huile de palme d'environ 5% supérieure au diesel une fois les 500 heures atteintes.

Ceci s'explique, une fois de plus, par une combustion plus ou moins incomplète de l'huile de palme.

Retrouvons quelques valeurs à la figure (5.6) :

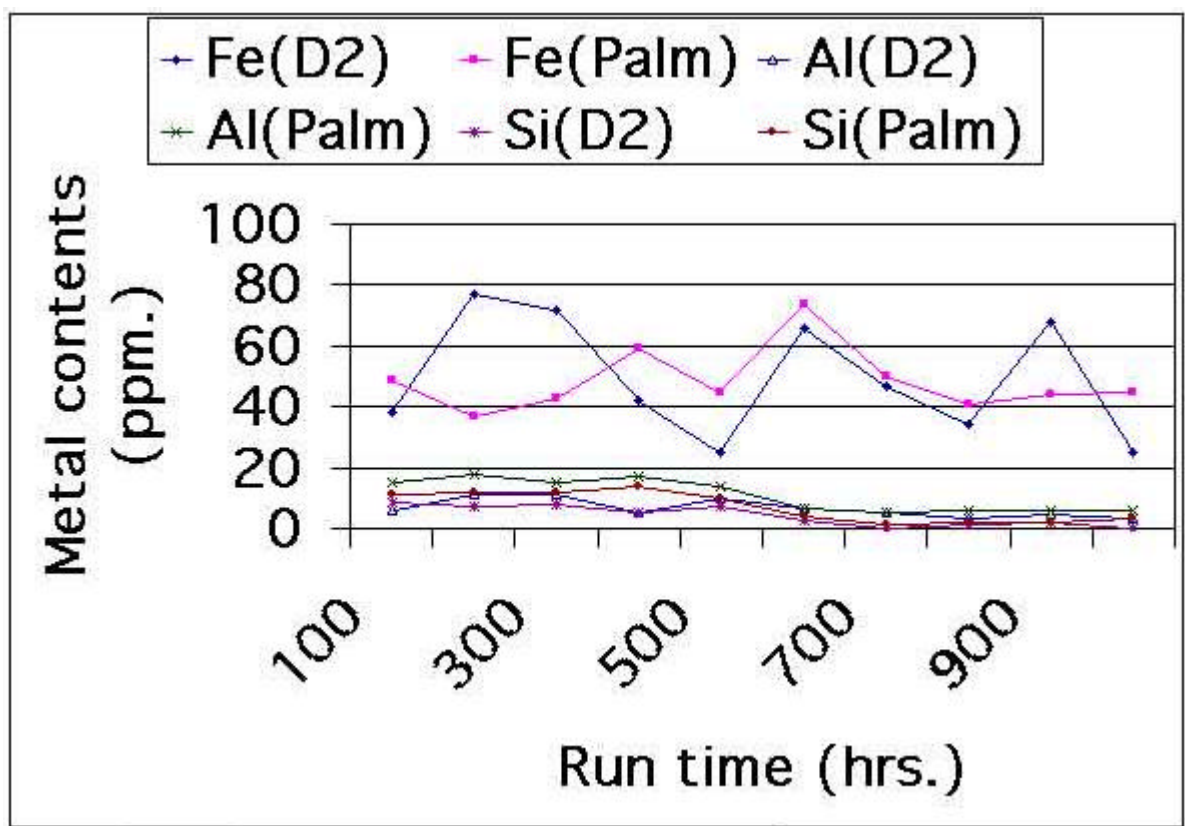


(Figure : (5.6), Université de Songkla)

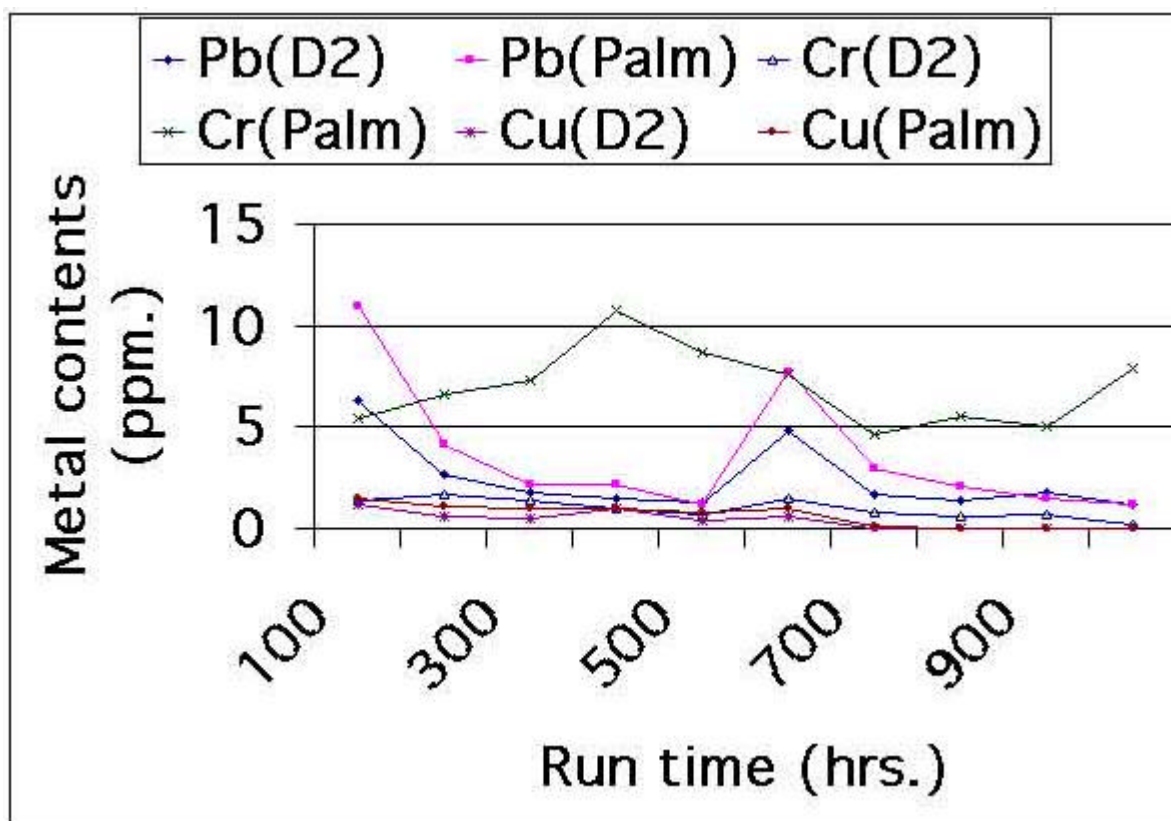
1.2.2 Résultats du test de longue durée

Cet essai de 2.000 heures a pour but d'observer l'usure du moteur à l'huile de palme en comparaison avec le moteur au diesel. Cette usure peut être représentée par l'image des particules de toutes sortes, rencontrées dans l'huile moteur qui est relevée toutes les 100 heures. Nous allons nous concentrer sur les particules de fer, d'aluminium, de silicium, de plomb, de chrome, et de cuivre.

Regardons ces résultats à l'aide des figures (5.7) et (5.8) :



(Figure : (5.7), Université de Songkla)

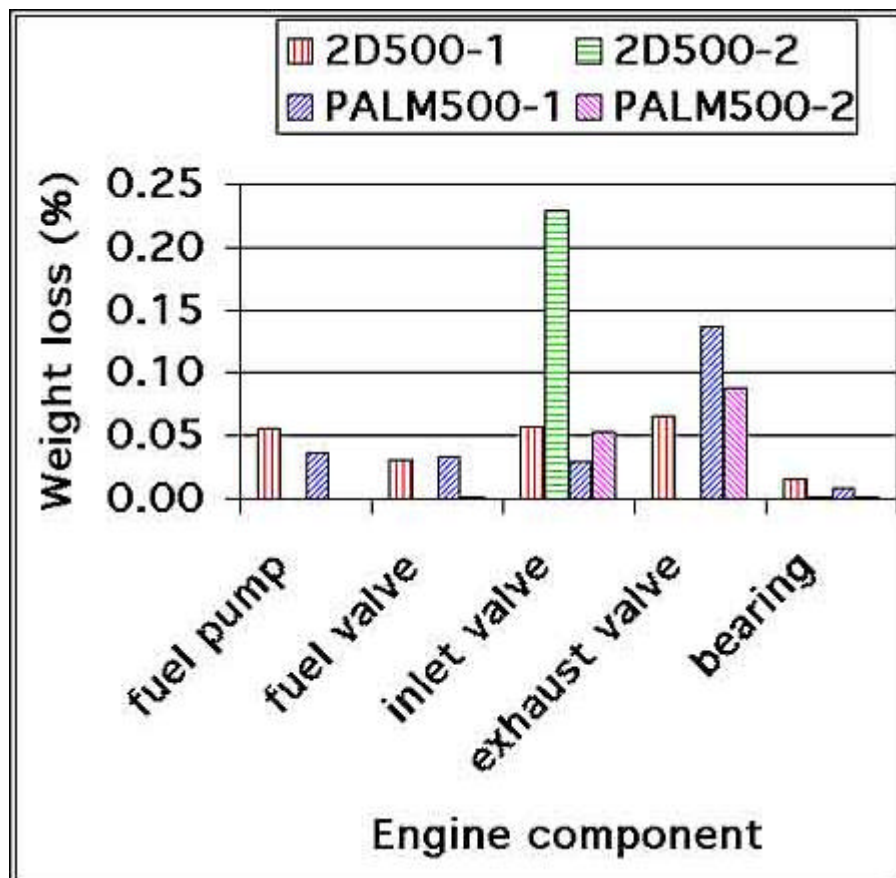


(Figure : (5.8), Université de Songkla)

Ces graphes nous indiquent une usure légèrement plus marquée du moteur à l'huile de palme, à l'exception des particules de fer presque identiques dans les deux cas. Mais nous pouvons constater que la différence est très faible et donc souvent insignifiante.

L'usure peut aussi être interprétée par la pesée des éléments constitutifs du moteur au début de l'essai, et ensuite être comparée après les 500 premières heures ('500-1') et les 500 heures suivantes ('500-2').

Voyons à présent ces données tirées de la pesée de certains éléments du moteur, à savoir la pompe d'injection, la valve d'injection, la soupape d'admission, la soupape d'échappement et le palier de la bielle (figure (5.9)) :



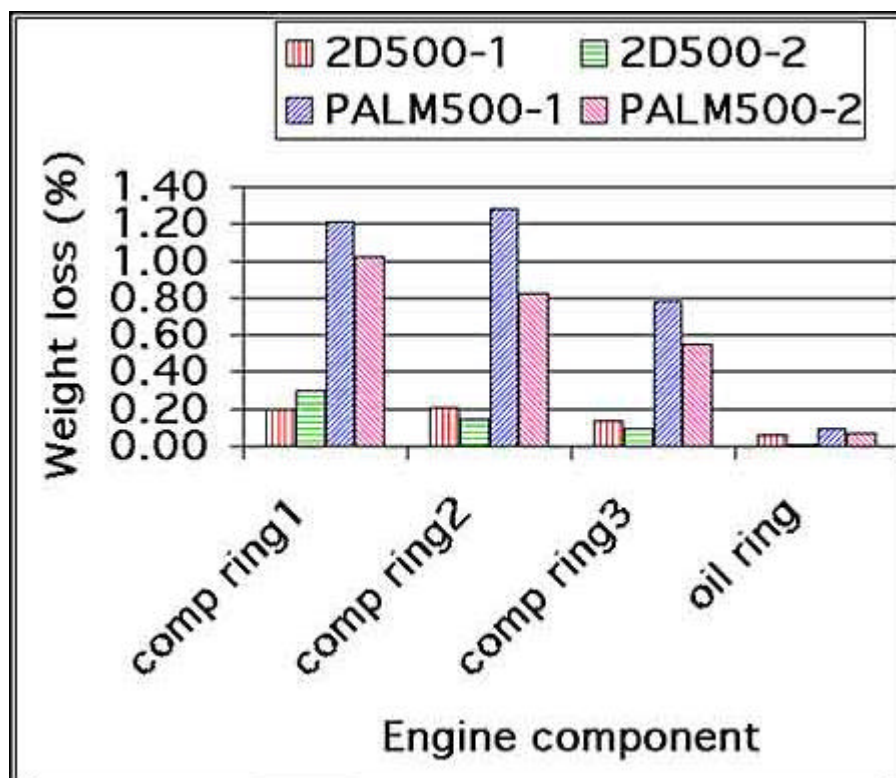
(Figure : (5.9), Université de Songkla)

Nous observons que l'usure des éléments de la pompe d'injection, aux premières 500 heures et aux secondes 500 heures, est fort semblable pour les deux moteurs. Nous apercevons une usure de la soupape d'admission du moteur au diesel plus importante : pourtant cette donnée paraît fort suspecte car dans la plupart des cas c'est le phénomène contraire que l'on constate. Pour terminer, on constate une faible usure supérieure de la soupape d'échappement et du palier de la bielle du moteur à l'huile de palme.

Retenons dès à présent que l'usure globale des deux moteurs est de même échelle et ne prête donc pas à des conséquences néfastes.

En revanche, l'usure la plus importante du moteur à l'huile de palme se situe à l'endroit des segments de compression du piston. En effet, nous observons une perte de poids des segments de compression plus de 6 fois plus importante dans le moteur à l'huile de palme que dans le moteur au diesel après les 500 premières heures. Ce rapport diminue ensuite jusqu'à 4,4 fois lors de la pesée après les 500 heures suivantes.

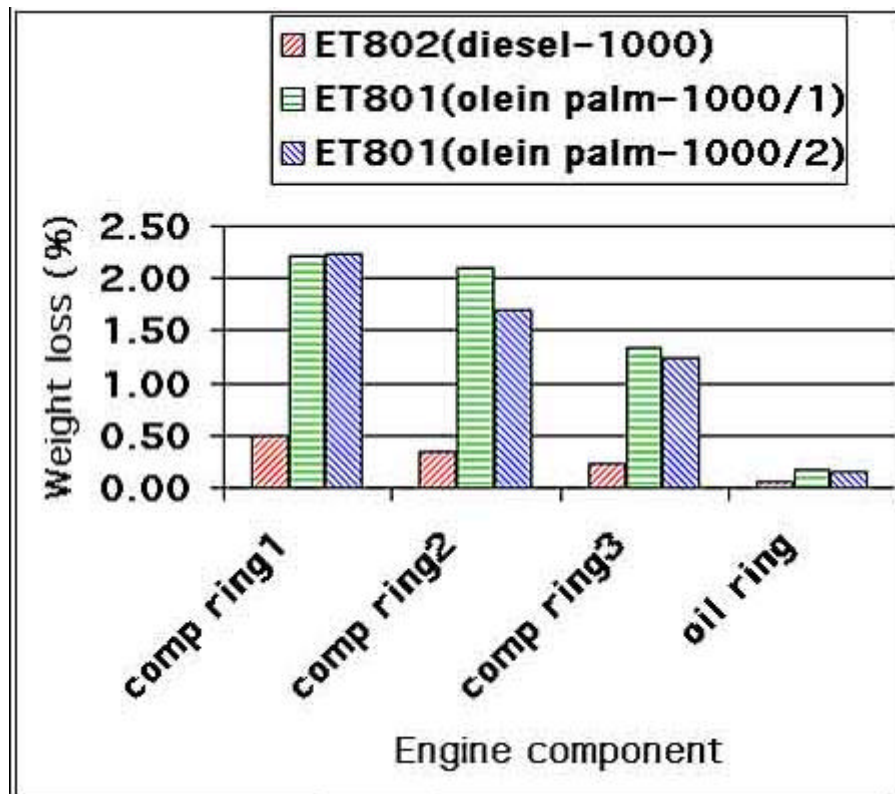
Jetons un coup d'œil sur l'usure des quatre segments du piston, à savoir trois segments de compression et un segment racleur d'huile lubrifiante (figure : (5.10)) :



(Figure : (5.10), Université de Songkla)

Nous pouvons aussi visualiser cette usure, après 1.000 et 2.000 heures de fonctionnement.

Ainsi la figure (5.11), nous montre l'usure cumulative de ces segments aux premières 1.000 heures pour les deux moteurs ('1000/1'), et aux 2.000 heures suivantes uniquement pour le moteur à l'huile de palme ('1000/2') :



(Figure : (5.11), Université de Songkla)

Nous y remarquons bien une nette tendance à l'usure de ces segments pour un moteur fonctionnant à l'huile de palme, à vrai dire 5,2 fois plus importante qu'un moteur au diesel. Toutefois, cette usure semble plus ou moins constante au fil du temps et n'engendre pas de problème grave à ce stade.

Un autre moyen de se rendre compte de cette usure des segments, est donné à la figure (5.12), où le jeu de ces segments est analysé :

Piston ring	Standard new ring (mm)	Maximum allowable value (mm)	Diesel oil at 1000 hours (mm)	Refined palm oil at 1000 hours (mm)	Refined palm oil at 2000 hours (mm)
Compression ring #1	0.2-0.4	1.2	0.4	0.7	1.0
Compression ring #2	0.2-0.4	1.2	0.5	0.7	1.2
Compression ring #3	0.2-0.4	1.2	0.5	0.8	1.2
Oil ring	0.2-0.4	1.2	0.3	0.4	0.6

(Figure : (5.12), Université de Songkla)

Nous y voyons qu'après 2.000 heures de fonctionnement du moteur tournant à 2.200 tours/min à 75% de la charge maximum, les segments de compression sont à la limite d'usure préconisée par le constructeur.

1.2.3. Conclusion de l'essai

Le fonctionnement du moteur KUBOTA avec l'huile de palme pendant 2.000 heures a permis d'en sortir des résultats fort intéressants :

La consommation spécifique du moteur à l'huile de palme est 15 à 20% supérieure au moteur au diesel, dû à un pouvoir calorifique plus faible de l'huile de palme. Son rendement thermique est un peu plus faible, la température d'échappement sensiblement supérieure (ce qui ne dérange en rien) et la densité des fumées noires dans le même ordre de grandeur que le moteur au diesel.

L'usure des différents matériaux du moteur est identique dans les deux cas.

Le seul véritable point faible, se situe dans l'**usure des segments de compression**. Cette usure atteint déjà une valeur limite après 2.000 heures de fonctionnement. Mentionnons que dans le cas de la plupart des moteurs de ce type, on tâche de pousser la durée de vie du moteur jusqu'aux 8.000 heures de fonctionnement, au diesel bien évidemment.

Il faudra donc être très vigilant à ce problème d'usure des segments de compression, et en tenir compte lors d'un achat d'un moteur diesel voulant tourner à l'huile végétale. Inutile de rappeler que l'emploi d'une huile végétale dans un moteur diesel, nécessitera impérativement le choix d'un moteur robuste et de bonne qualité. L'élévation substantielle de température que nous préconisons dans la chambre de combustion sera donc bénéfique puisqu'elle limitera les dépôts charbonneux qui réduisent l'élasticité des segments de compression.

1.3 Essai à l'huile de pourghère

Cet essai a été effectué à l'Université de Köln par le Dr. Pak sur un moteur Hatz (modèle E89) fonctionnant à l'huile de pourghère, prise comme exemple pour les huiles végétales. Si nous citons cet essai ici, c'est parce que le Dr. Pak a analysé méticuleusement les diverses pièces du moteur rentrées en contact avec cette huile. Nous nous contenterons de les citer et de brièvement décrire leur état.

Après 420 heures de fonctionnement du moteur, le Dr. Pak a pu constater ceci :

- La tête de cylindre est sèche et propre, un dépôt de carbone homogène dans les canalisations d'entrée et de sortie au cylindre, et une assise de soupape propre.
- Il y a un dépôt de carbone plus important sur la **soupape d'admission**. Selon l'expérience d'aujourd'hui, nous pensons que c'est dû au mélange de l'huile végétale non carburée avec l'huile moteur, qui s'y dépose vu la température inférieure de la soupape d'admission comparée à la soupape d'échappement nettement plus chaude et qui reste propre.
- L'état du cylindre et du piston ne présente aucune différence à celui observé dans un moteur diesel.

Ces mêmes constatations se retrouvent dans la littérature parlant de l'utilisation d'huile végétale comme carburant. Retenons que dans le cas d'un moteur fonctionnant à l'huile végétale, il se produira inmanquablement un faible dépôt de carbone sur la **soupape d'admission**. Jusqu'à présent nous n'avons pas encore trouvé de remèdes à ce sujet, bien que ce faible dépôt ne soit pas néfaste au moteur s'il n'est pas trop important. Rappelons aussi l'usure marquée des **segments de compression** et l'éventuelle formation de « trompette » (cfr. chap. 4 § 3.3.3) Ce problème est grandement résolu par l'usage d'un injecteur à un seul jet.

2 Analyse des gaz d'échappement : pollution

Nous allons parcourir certaines données concernant les émissions des gaz d'échappement et leurs conséquences sur l'effet de serre. Nous comparerons, de ce fait, les émissions des moteurs au diesel conventionnel avec des moteurs fonctionnant à l'huile végétale. Soyons cependant attentifs à ce que l'on peut retrouver dans la littérature, car certaines sources osent même affirmer que l'utilisation d'huile végétale comme carburant ne pollue pas du tout. Restons bien les pieds sur terre, nous savons tous que toute combustion produit inévitablement du CO₂ et du NO_x, principales causes de l'effet de serre. Par contre, il est vrai que ces émissions peuvent être moindres, tout autant que le CO et les hydrocarbures imbrûlés HC.

Il est clair que la contribution des biocarburants aux émissions de NO_x, HC et de CO, dépend en partie de l'équipement des moteurs et de la température de fonctionnement des moteurs. Ainsi l'emploi d'un catalyseur réduit fortement les émissions de CO, pouvant aller jusqu'à 25% et au-delà. Ici, nous allons faire abstraction de ce genre d'équipement, dans le but d'analyser les émissions sortant du moteur à l'huile végétale et de pouvoir les comparer avec un moteur au diesel. De toute manière, ce genre d'équipement ne pourra être prévu pour les pays du sud, vu son coût élevé.

La **différence fondamentale** entre les biocarburants et les carburants d'origine fossile est que, lors de leur combustion, les carburants fossiles créent une accumulation de CO₂, tandis que la quasi-totalité du CO₂, dégagé lors de la combustion d'un biocarburant, n'est autre que celui que la plante a prélevé dans l'atmosphère au cours de sa période de végétation et qui est donc quasi totalement recyclé. Ceci confère aux huiles végétales un énorme avantage par rapport aux carburants fossiles.

Mais soyons honnête, n'oublions pas que dans la phase de production des biocarburants, il y a dépense d'énergie. Malgré celle-ci, les biocarburants en général, **réduisent** le dégagement de CO₂ de plus de **60%** par rapport à l'essence et au gasoil. Ce chiffre est une très bonne approximation des biocarburants en général, certaines sources mentionnent même une réduction totale de CO₂ de 75%.

Un autre gros problème, posé par les carburants d'origine fossile, est leur teneur en **soufre**. Ce soufre retombe sous forme d'acide sulfurique et agresse les toitures et dégrade notamment les façades des monuments. Il joue également un rôle important dans la formation des pluies acides, néfastes pour les forêts. Conscientes de cet important problème, les sociétés pétrolières ont dû investir, et investissent encore des milliards, dans des nouvelles installations permettant d'éliminer en grande partie ce soufre des carburants fossiles.

Mais, vu que les biocarburants contiennent **très peu** (100 fois moins) ou **pas** de **soufre**, ce problème ne se pose pas. Une fois de plus, ceci donne un autre avantage à l'emploi d'huiles végétales comme carburants.

Par ailleurs, nous pouvons affirmer que le niveau d'émission probable des polluants à l'échappement, à savoir le monoxyde de carbone **CO**, les oxydes d'azote **NO_x**, et les hydrocarbures imbrûlés **HC**, lors de l'utilisation des biocarburants est du **même ordre de grandeur** que celui imputable à l'usage des carburants pétroliers.

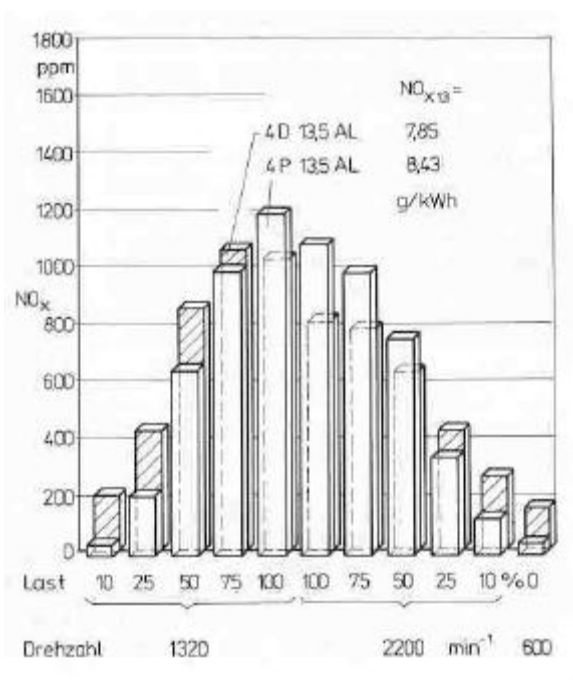
Voyons à l'aide de la figure (5.13) quelles sont ces valeurs pour le diesel et d'autres huiles végétales :

	CO (ppm)	Hydrocarbons (ppm)	NO _x (ppm)
Diesel fuel	655	253	1270
<i>Jatropha Curcas</i>	601	231	1280
Rapeseed oil	910	235	1235
Rapeseed methyl ester	555	295	1180

(Figure : (5.13), CIRAD ;Composition of exhaust gases measured in the modified 1D80 Hatz direct-injection engine.(Full load - torque 36 Nm at 1800 rpm))

Remarquons que les émissions des huiles végétales ne sont pas toujours inférieures à celles du diesel. Ce qu'elles gagnent d'une part, elles le perdent bien souvent de l'autre.

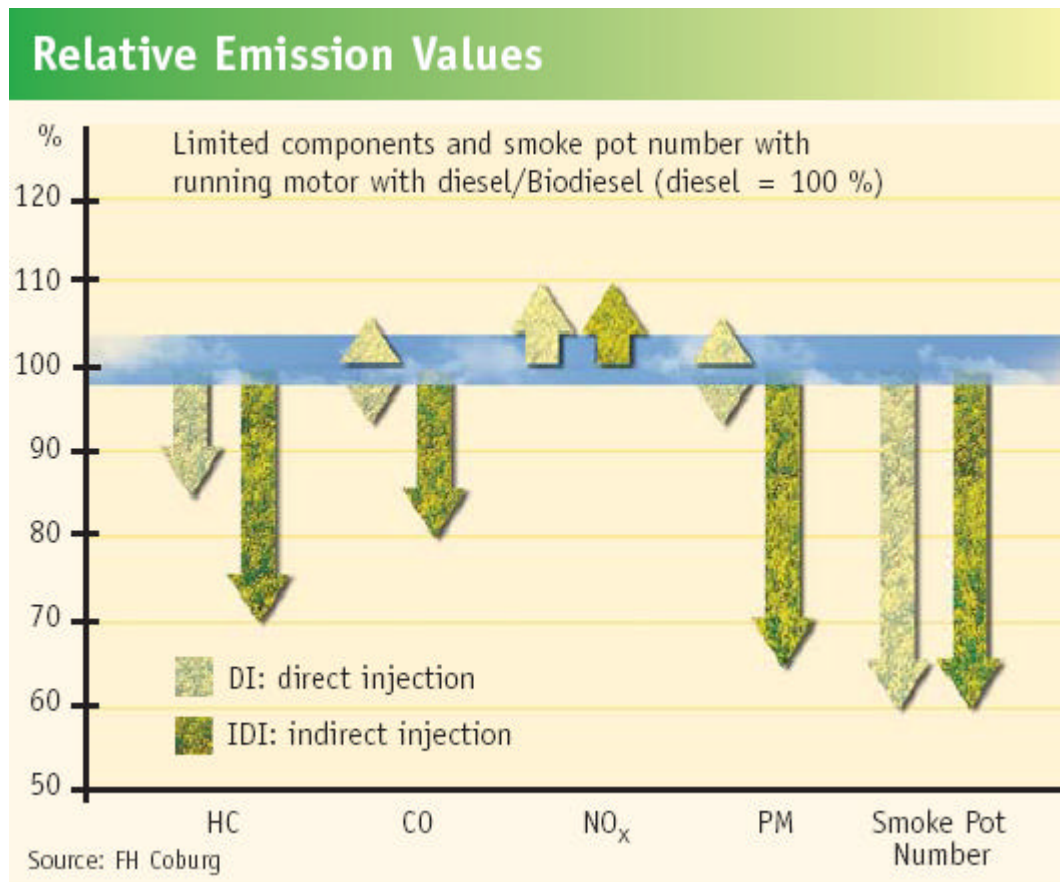
Voyons à présent comment ces émissions évoluent aussi suivant la charge appliquée et la vitesse de rotation. Prenons ici comme exemple les émissions de NO_x d'un moteur tournant au diesel ('4 D 13,5 AL', rayée en arrière plan), comparées à celles d'un moteur à l'huile végétale ('4 P 13,5 AL', plein en avant plan) :



(Figure : (5.14), AAN)

Nous apercevons qu'à faible charge, le moteur à l'huile de palme émet moins de NO_x que celui au diesel, et ceci est d'autant plus accentué que le moteur tourne à bas régime.

Nous pouvons aussi comparer la conception des moteurs entre eux, du point de vue des émissions. Ainsi à la figure (5.15), nous comparons les émissions d'un moteur au diesel ('100%') à celles d'un moteur au biodiesel, pour l'injection directe et indirecte.



(Figure : (5.15), UFOP)

Nous remarquons une tendance nettement plus faible ou du moins égale, des émissions occasionnées par le moteur à injection indirecte.

Par ces différentes valeurs, nous avons voulu démontrer que les émissions des gaz d'échappement dépendent entre autres du moteur utilisé et du mode de fonctionnement de ce moteur.

En résumé, l'utilisation d'une huile végétale comme carburant, apporte en général une diminution des émissions des gaz d'échappement par rapport aux carburants pétroliers. En effet, la quantité de CO₂ rejeté est plus ou moins la même quantité que la plante a absorbée durant sa croissance. Les huiles végétales ne contiennent pas ou très peu de soufre. Les émissions du CO, NO_x et des HC sont du même ordre de grandeur mais pas nécessairement plus faibles.

Nous avons donc tout à gagner en utilisant les huiles végétales comme carburant, qui globalement sont moins polluantes.

Chapitre 6 : Adaptations apportées au moteur

1 Introduction

Après avoir vu quelques résultats de moteur fonctionnant à l'huile végétale, et tout particulièrement à l'huile de palme, nous allons nous intéresser aux différentes adaptations que l'on pourra mettre en œuvre afin qu'un moteur diesel puisse tourner à l'huile végétale, et tout particulièrement à l'huile de palme. Dans notre cas, il s'agira d'un moteur de petite puissance, plus aisé à adapter.

Avant de proposer ces adaptations proprement dites, nous commencerons par un bref **calcul technico-économique** d'un moteur fonctionnant à l'huile de palme.

Ensuite, nous parlerons d'un **moteur idéal spécialement conçu pour les huiles végétales**, construit par AAN.

Pour terminer, nous parlerons des diverses **adaptations à envisager**, de **façon générale**, et conclurons avec les **adaptations réellement appliquées** sur le moteur choisi pour cet essai.

2 Calcul technico-économique

Nous allons faire un bref calcul du coût moindre lors de l'utilisation d'huile de palme au lieu du diesel dans un moteur diesel.

Si nous le faisons seulement à ce stade-ci, c'est parce que maintenant nous sommes complètement aptes et préparés pour bien interpréter ce calcul.

Nous avons déjà vu précédemment, en fin du premier chapitre concernant la microéconomie, le prix du diesel en Afrique qui varie entre 0,6 – 0,7 €/l, tandis que l'huile de palme est aux alentours des 0,3 – 0,5 €/l maximum. Nous pouvons donc déjà affirmer que l'on gagne entre 0,1 €/l (dans le cas le plus défavorable) à 0,4 €/l. La valeur habituelle de l'**avantage financier** se situe souvent entre **0,2-0,3 €/l**.

Restons cependant prudents dans ce genre de calcul. Il faudrait tenir compte des pouvoirs calorifiques inférieurs (PCI) du diesel et de l'huile de palme. (Un calcul plus détaillé se trouve en annexe (A.29))

Comme le **PCI volumique** du diesel est aux alentours des 36.000 kJ/dm³ et que celui de l'huile de palme tourne autour de 32.100 kJ/dm³ (cfr. tableau comparatif de combustibles), il faut 1,12 litre d'huile de palme et seulement 1 litre de diesel pour obtenir la même capacité d'énergie (c'est le rapport de conversion). Ou en terme de kWh, en sachant que 1 kWh = 3.600 kJ, il s'en suit que 1 litre de diesel produit 10 kWh, tandis qu'un litre d'huile de palme ne produira que 8,9 kWh. Ainsi en terme de puissance, vu que l'injection est volumique, un moteur fonctionnant à l'huile de palme développe environ **90%** de la puissance que ce même moteur donnerait avec du diesel.

Nous pouvons aussi travailler avec le **PCI massique**. Sachant que le PCI massique du diesel est approximativement de 42.500 kJ/kg et que celui de l'huile de palme donne à peu près 35.600 kJ/kg, nous pouvons évaluer la consommation spécifique, en g/kWh, qui est inversement proportionnel au PCI massique et au rendement global. En faisant l'hypothèse d'un rendement identique dans les deux cas, nous trouvons une consommation spécifique de l'huile de palme de plus ou moins 15% supérieure au diesel. En faisant sauter l'hypothèse, car le rendement d'un moteur à l'huile de palme est un peu plus faible, on obtient bien une consommation spécifique pour l'huile de palme dans une fourchette de 15 à 20% supérieure au diesel, ce qui avait été annoncé précédemment.

Prenons dorénavant quelques exemples afin d'illustrer le gain économique du remplacement du diesel par de l'huile de palme :

Nous renvoyons le lecteur intéressé à un document constitué par la GTZ ayant comme titre : « *Etude de rentabilité concernant la substitution du gazole par l'huile de palme chez Palminindustrie, Côte d'Ivoire.* » ; Rütger Conzelmann, 60p.

Le gain en remplaçant le diesel par l'huile de palme y est bien annoncé dans un intervalle de 0,1 €l à 0,6 €l suivant les prix fluctuant du diesel et de l'huile de palme.

Prenons comme simple exemple un seul moteur Perkins de 125 kW. On espère en tirer une durée de vie d'un million de kilomètres ou 20.000 heures de service (si 1 heure équivaut à 50 km). Ce moteur consomme 18 litres de diesel au 100 km, ce qui correspond alors à 9 l/h, soit 180.000 litres de carburant diesel pour sa durée de vie. Si nous tenons encore compte du rapport de conversion de 1,12, dû au PCI plus faible de l'huile de palme, cela nous fait alors 201.600 litres d'huile de palme pour procurer la même quantité d'énergie. Le résultat nous donne une économie théorique allant de 36.000 € à 54.000 € pour respectivement 0,2 et 0,3 €l de différence de coût entre diesel et huile de palme. Nous constatons un gain de parfois plus de 10 fois le prix d'achat du moteur, vu qu'un moteur de ce type vaut entre 3.000 et 5.000 €. Nous nous doutons bien que le coût des adaptations apportées au moteur sera très largement inférieur à cette valeur.

Pour terminer, prenons l'exemple du moteur d'essai que nous avons choisi. Ces caractéristiques seront données ultérieurement dans un prochain point. (Un calcul plus détaillé se retrouve en annexe (A.30)).

Relevons ici uniquement les données intéressantes, telle qu'une puissance donnée à 11 kW (pour le combustible diesel), d'où une puissance développée d'environ 10 kW pour l'huile de palme (= 90% de la puissance avec le diesel) et une consommation de 3,4 l/h. à 3.000 tours/min et à pleine charge. La durée de vie du moteur espérée est de 8.000 heures. En République Démocratique du Congo, où ce moteur est destiné, le prix du diesel est de 0,65 € et celui de l'huile de palme est de 0,3 €. Cela nous donne après calcul en arrondissant, une différence de 9.500 € économisés sur la durée de vie du moteur. Sachant que ce moteur nous coûte royalement 1.400 € (normalement équipé) et en maximisant les adaptations (valant 200 €), l'achat complet du moteur adapté à l'huile de palme est rentabilisé dès les 1.350 heures de fonctionnement, soit à 1/6 de sa durée de vie espérée. Nous pouvons donc cyniquement affirmer que si le moteur lâche à ses 1.350 heures de fonctionnement à l'huile de palme, nous n'avons rien perdu par rapport l'utilisation de ce moteur au diesel. Dans le cas de l'utilisation de ce même moteur à 1.500 tours/min et à pleine charge, la consommation est quasi réduite de moitié, de même que la quantité totale de carburant et a fortiori le gain financier. Par conséquent, la durée de revient est aussi presque doublée, et donc le moteur est rentabilisé après 1/3 de sa durée de vie espérée.

Cette réflexion est importante et doit être présente à l'esprit de tout à chacun.

Si nous avons fait ces quelques calculs c'est dans le but de montrer le véritable potentiel de l'huile de palme comme carburant au point de vue du gain financier par rapport au diesel.

A long terme, les perspectives des prix mondiaux de l'huile de palme risquent d'être à la baisse vu sa production en croissance et ses coûts de production relativement stables. Par contre, nous observons depuis longtemps une tendance générale à la hausse du prix des produits pétroliers. Nous n'aborderons pas ici la diminution prévisible des gisements connus et les réserves à découvrir qui ne seront pas illimitées.

Signalons aussi que la Malaisie tente de favoriser l'utilisation de l'huile de palme comme carburant. Des tentatives ont été réalisées dans ses plus grandes centrales d'énergie, mais n'ont pas été fructueuses. Des problèmes ont surgi lors de son utilisation pour des très grosses puissances. Ils sont donc retournés à l'emploi du pétrole lourd, qui n'est pas tellement plus coûteux que leur propre huile de palme. Cependant le ministre des Industries primaires de la Malaisie encourage maintenant les plus petites installations énergétiques à s'alimenter en huile de palme. L'huile de palme pourrait être consommée à l'état brut, mais aussi en tant que mélange d'oléine d'huile de palme raffinée et de carburant diesel. Ils ont aussi élaboré un additif à base d'huile de palme qui, ajouté au carburant diesel, augmente la puissance du moteur, et réduit la consommation et les émissions de fumées noires. Pour accroître davantage la consommation d'huile de palme, ils ont également élaboré une huile de carter qui conserve ses propriétés jusqu'à six fois plus longtemps que la plupart des produits actuellement utilisés.

Des informations plus précises, ne sont pas encore accessibles, mais les pistes sont désormais ouvertes.

3 Conception d'un moteur à l'huile végétale

Jetons un coup d'œil sur la conception et la construction d'un moteur quatre cylindres fonctionnant à l'huile végétale. Il a été conçu en 2003 par AAN et a été proposé comme moteur pouvant être utilisé dans une voiture. Il est évident que sa conception se base sur le moteur diesel traditionnel, à quelques adaptations près. Son coût de production ne serait pas tellement plus élevé qu'un moteur diesel classique, mais étant donné qu'il n'est pas produit en grande série, son prix de revient est supérieur.

Visualisons cette conception à la figure (6.1) :

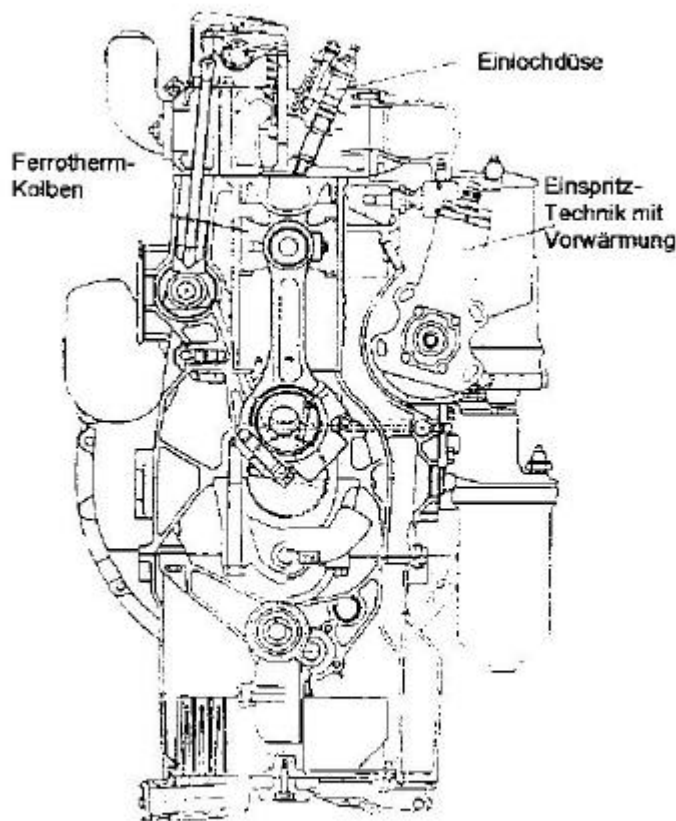
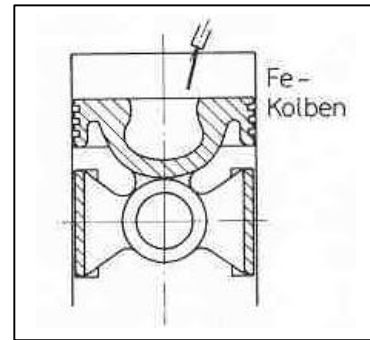


Bild 5 Pflanzenölmotor

(Figure : (6.1), AAN)

Ce moteur diffère de la conception d'un moteur diesel classique par :

- ✍ un piston en fer (le fameux « ferrotherm »), doté d'une chambre de combustion interne (figure (6.2), ci-contre et en annexe (A.16) et (A.17))
- ✍ un injecteur à un seul jet (plusieurs injecteurs par chambre de combustion sont envisageables)
- ✍ un canal d'admission favorisant l'effet tourbillonnaire de l'air
- ✍ des segments revêtus de molybdène
- ✍ certains paliers recouverts de Nickel
- ✍ une pompe d'injection avec système de préchauffe en amont



(Figure : (6.2), AAN ; piston ferrotherm en H)

Ces modifications sont apportées au moteur pour en assurer une plus grande fiabilité et visent un rendement comparable à un moteur fonctionnant au diesel.

En annexe, nous retrouvons à la figure (A.31) un tableau reprenant la qualité de l'huile végétale (ici le colza) requise pour fonctionner correctement dans ce type de moteur modifié.

Dans notre cas, nous ne cherchons pas spécialement un rendement optimum. Nous nous contenterons d'adapter le moteur en question pour qu'il puisse fonctionner à l'huile de palme, tout en ayant une durée de vie raisonnable.

Nous allons maintenant parcourir les différentes modifications envisageables à apporter à un moteur diesel voulant fonctionner à l'huile végétale, et tout spécialement à l'huile de palme.

4 Principe d'adaptation d'un moteur à huile de palme.

Nous allons ici lancer les grandes idées des modifications à apporter à un moteur pouvant utiliser de l'huile de palme, et ce tout spécialement pour les pays africains.

4.1 Filtres moteurs

4.1.1 Filtre à huile moteur

Ce filtre à huile moteur est dans la logique des choses, livré avec le moteur. Dans la plupart des cas, ce filtre a des dimensions standard et peut donc être trouvé dans la majorité des endroits vendant ce type de pièces.

Rappelons qu'un test de qualité de cette huile devra être réalisé assez fréquemment, afin de s'assurer de sa propriété lubrifiante suffisante. Pour ce faire, nous avons déjà abordé la technique de comparaison avec une nouvelle huile lubrifiante sur plan incliné.

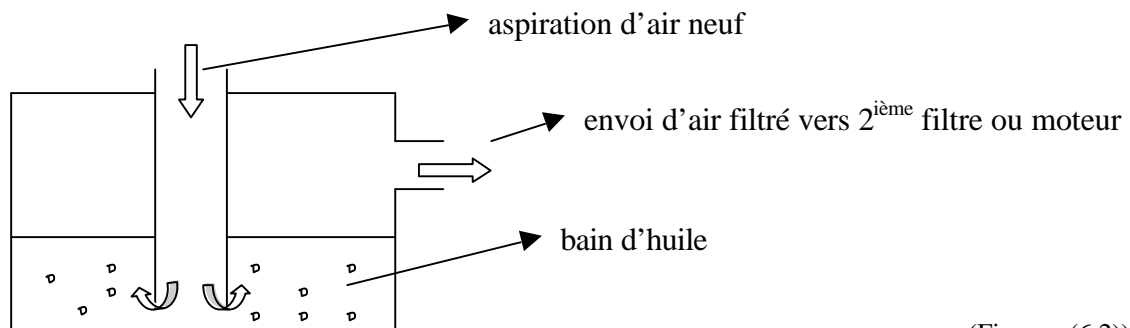
4.1.2 Filtre à air

Ce filtre est aussi généralement livré avec le moteur. Toutefois, afin de le préserver en vue d'une plus longue durée d'utilisation, nous conseillons d'y rajouter préalablement un filtre à bain d'huile.

En effet, les endroits, où le moteur fonctionnera, seront parfois fort poussiéreux. Comme le filtre à air s'encrasse assez rapidement dans ce genre d'application, il en résultera un débit d'air qui sera probablement freiné avec toutes les conséquences qui s'ensuivent. Sans oublier qu'un éventuel lavage de ce filtre par secousses ou jet d'air, etc... risquerait de détériorer ce filtre tout de même fragile.

Par contre, si l'on branche en amont de ce filtre, un autre filtre (à bain d'huile par exemple), nous préserverons ainsi ce premier filtre d'origine.

Le concept est assez simple et la fabrication aisée. Voyons à l'aide d'un simple schéma le principe du **filtre à air à bain d'huile**.



(Figure : (6.2))

L'air passant à travers l'huile se purifie de toutes ses particules.

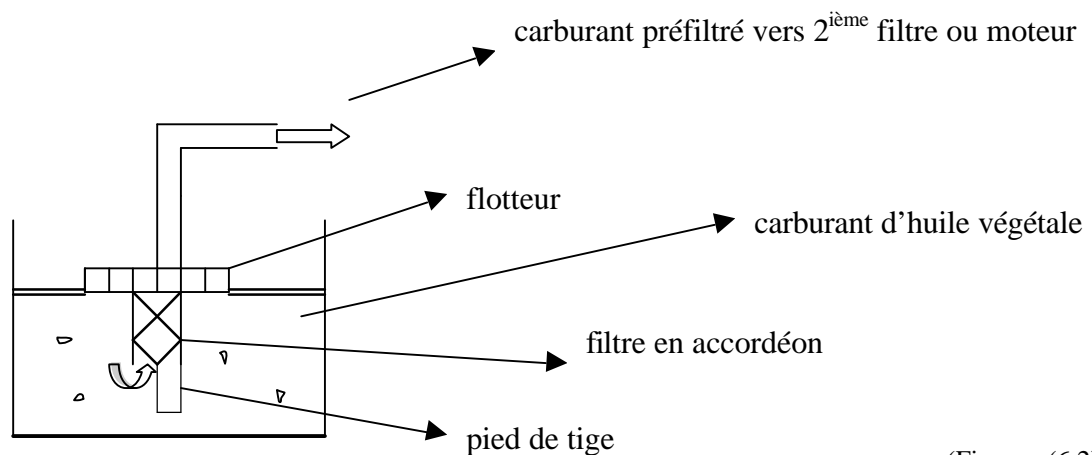
Ce filtre est très simple et ne nécessite pas de coût supplémentaire : on aura toujours un peu d'huile moteur usagée ou même de l'huile végétale qui alimente le moteur en carburant.

4.1.3 Filtre à carburant

Ce filtre est livré avec le moteur. Mais pour des raisons de durabilité et pour en assurer un bon fonctionnement, il est préférable d'y associer un autre filtre en début d'aspiration du carburant qui est l'huile de palme.

Etant donné que l'huile se trouve dans un réservoir, c'est à cet endroit là que nous nous proposons d'y installer un petit dispositif de préfiltrage.

Voyons dès à présent une représentation d'un tel procédé :



(Figure : (6.2))

La tige est fixée à un flotteur de façon à imposer une hauteur de prise d'huile par rapport à la surface du liquide. De la même manière, on prévoit un pied sous la prise d'huile. A faible niveau d'huile, le pied vient buter contre le fond du réservoir et évitera que la prise du combustible se fasse trop près du fond du réservoir.

Ce système permet d'éviter la prise de particules légères qui flottent au-dessus du réservoir, et des particules plus lourdes qui se déposent au fond du réservoir.

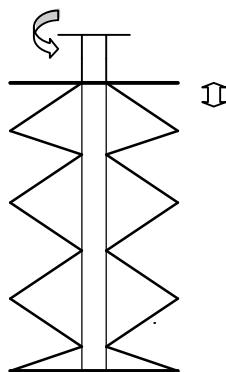
Il faudra donc de temps en temps extraire les particules légères, et rincer le fond du réservoir afin d'éliminer les particules lourdes.

Le filtre utilisé est en accordéon, dont le média filtrant est en métal. Lors du colmatage du filtre, on doit effectuer une rotation afin de le nettoyer. Lorsqu'il est complètement colmaté, on peut alors le laver au gasoil ou à l'essence de nettoyage. De cette façon nous obtenons un filtre réutilisable.

Son principe est donné à la figure (6.5).

Il est recommandé de travailler avec un filtre dont les ouvertures sont de 27μ (contre 5μ pour le diesel). Cette dimension provient des dimensions standard américaines ou anglaises, disponibles sur le marché.

Filtre en accordéon :



(Figure : (6.2))

4.2 Système de préchauffe de l'huile de palme

Afin de diminuer la viscosité de l'huile de palme, nous allons installer un système de chauffage de cette huile. Ce sera sans doute l'adaptation la plus importante à apporter au moteur.

Comme déjà annoncé au point traitant le problème de viscosité, nous pouvons travailler soit avec un système de chauffage à source externe, soit à source interne.

4.2.1 Chauffage à source externe

Une source de chauffage externe est par exemple un feu de charbon de bois, placé sous le réservoir d'huile. Ce système actuellement utilisé sur un moteur à l'huile de palme en République Démocratique du Congo, apporte l'avantage d'être simple mais onéreux et peu précis. En effet, il oblige l'emploi d'une source d'énergie externe, que l'on doit de toute évidence se procurer. De plus, ce système n'est pas des plus précis au niveau du réglage de la température souhaitée de l'huile et sa régulation est faite au jugé.

Toutefois, cette manière de travailler ne doit pas être rejetée. Dans certaines conditions, tel qu'un dépannage ou autre, cette méthode pourrait être utile. La mesure de température étant souvent impossible dans ces pays, le réglage de température se fait d'une façon approximative en comparaison avec la fluidité du diesel.

Il est clair que ce n'est pas la meilleure méthode à utiliser ni la plus sûre dans l'optique du bon fonctionnement du moteur.

4.2.2 Chauffage à source interne

La méthode la plus avantageuse, à tous points de vue, est d'utiliser l'énergie perdue, sous forme de chaleur, du moteur. Encore ici, nous pouvons travailler selon deux manières différentes : soit on travaille avec la chaleur de l'eau de refroidissement du moteur, soit avec celle en provenance des gaz d'échappement. Analysons ces deux cas de figures.

4.2.2.1 Récupération de la chaleur de l'eau de refroidissement

Ce principe est peut être bien le plus aisé et le plus performant. Il est bien connu, qu'un échangeur de chaleur liquide - liquide est le plus performant.

Nous retrouvons l'essai effectué par AAN (cfr. chap. 5 § 1.1, figure (5.1)) avec un échangeur eau de refroidissement – huile de palme. Les résultats, donnés en annexe aux figures (A.24) et (A.25), nous indiquent qu'à une température d'eau de refroidissement entrante de plus ou moins 80°C, on se trouve aux alentours de 75°C en sortant de l'échangeur en régime établi. L'huile de palme passe ainsi de 19°C à 70°C.

Remarquons que pour cet essai, il faut environ 15 minutes pour que l'eau de refroidissement atteigne sa température de régime permanent, et il faut attendre encore 15 minutes de plus pour que les 123 litres soient réchauffés à la température acceptable de 70°C, ce qui est assez rapide tout de même.

Dans l'exemple précédent, la technique adoptée est de chauffer toute l'huile de palme comprise dans le réservoir. D'une part il faut être certain d'employer toute cette quantité chauffée, qui peut subir une oxydation importante, et d'autre part on est obligé d'attendre un certain temps avant que l'huile de palme soit assez fluide pour l'injecter dans le moteur.

C'est pourquoi, il serait peut être préférable de travailler avec un échangeur de chaleur uniquement en contact avec une faible quantité d'huile prête à rentrer dans la pompe d'injection. On imagine un échangeur de chaleur tubulaire concentrique où le fluide chaud, dans notre cas l'eau de refroidissement, circule dans le tuyau interne et le fluide froid, ici l'huile, circule alors en sens contraire dans le tube extérieur enveloppant le tuyau interne chaud.

C'est un échangeur assez simple à réaliser et très performant en écoulement à contre-courant.

4.2.2.2 Récupération de la chaleur des gaz d'échappement

Puisque tous les moteurs ne sont refroidis par eau, la récupération de chaleur de l'eau de refroidissement n'est pas toujours possible. Remarquons que parmi les moteurs industriels, il y en aura plusieurs qui seront refroidis par air, et pas nécessairement les plus petits de faible puissance. Nous trouvons en annexe à la figure (A.13) un exemple d'un moteur Hatz 4 cylindres refroidi par air, développant 50 kW à 2.200 tours/min et proche des 60 kW à 3.000 tours/min.

C'est pourquoi notre étude se dirige plutôt vers l'adaptation d'un échangeur de chaleur au niveau des gaz d'échappement. Cet échangeur gaz – liquide est peut être moins performant

qu'un échangeur liquide – liquide, mais ce qui importe est d'atteindre la température souhaitée de l'huile de palme.

Dans un cas de figure, nous avons l'échauffement de la petite quantité d'huile destinée directement à être injectée dans le moteur. Dans l'autre cas de figure, nous nous retrouvons avec un système de préchauffe du réservoir complet contenant l'huile, comme présenté à la figure (A.27) en annexe. L'essai à l'Université de Songkla a utilisé ce type de chauffage. Nous pensons qu'il est préférable et prudent d'avoir un système de chauffage le plus indépendant possible comme la réchauffe de la maigre quantité d'huile juste avant l'injection. Dans le cas d'une chauffe complète du réservoir, le fait d'y rajouter de l'huile fraîche refroidira l'huile s'y trouvant déjà à bonne température. Le réchauffement d'une petite quantité d'huile est beaucoup plus sûr et ne nécessite pas d'attention particulière.

Le concept est aussi simple qu'un échangeur d'eau de refroidissement – huile. Nous imaginons un caisson au-dessus de la tuyauterie des gaz d'échappement, dans lequel serpente le tuyau d'arrivée de carburant. De cette façon, l'huile est très rapidement chauffée le long de son parcours et est ensuite directement injectée dans le moteur. Dans cette optique, l'huile n'a pas le temps de s'oxyder et toute huile chauffée est immédiatement employée.

La phase de démarrage qui se fait au diesel, est nettement plus courte que pour un échangeur eau de refroidissement – huile, vu que la température des gaz d'échappement s'établit rapidement, entraînant une température dans le caisson acceptable pour réchauffer la maigre quantité d'huile se trouvant dans le serpent.

Pour ce faire, il est indispensable que la température des gaz d'échappement soit plus ou moins constante autour d'une valeur idéale, procurant à l'huile de palme la fluidité adéquate. C'est le cas pour un moteur tournant toujours à la même vitesse et à charge constante. Un petit groupe électrogène tourne toujours à même vitesse et sa puissance absorbée varie peu dans la plupart des cas. Par contre, un moteur industriel peut voir sa vitesse varier et sa charge est souvent fluctuante.

Une des méthodes pour résoudre cet éventuel problème, est la procédure de la réinjection de gaz brûlés dans le cylindre (expliqué au chapitre 4 § 3.2.4 concernant le point d'éclair). Cette méthode consiste d'une part à assurer une température suffisamment élevée en fin de compression pour résoudre le problème d'un point d'éclair de l'huile végétale supérieur à celui du diesel. D'autre part, la méthode procure de cette façon un fonctionnement au moteur plus proche des conditions à pleine charge, avec toutes les conséquences qui s'ensuivent : une meilleure combustion, mais aussi une température des gaz d'échappement plus constante. C'est bien cela que nous recherchons.

Nous verrons dans la pratique, par des mesures, comment évolue la température de l'huile en fonction d'une variation plus ou moins grande du débit et de la température des gaz d'échappement.

Signalons encore une petite **astuce** fort bien utile. Il s'agit d'une manière très subtile d'augmenter la température de l'huile d'une 20^{aine} de degrés : le surplus de carburant venant du système d'injection (pompe et injecteurs) n'est pas renvoyé vers le réservoir, comme cela se passe le plus souvent, mais il est renvoyé juste devant la pompe d'injection et sera repris par celle-ci. L'huile atteindra ainsi une température plus élevée d'une 20^{aine} de degrés.

Par conséquent, nous pouvons nous permettre de chauffer l'huile de palme par le système d'échangeur de chaleur choisi, à une température avoisinante les 70°C. Par la suite,

cette huile atteint alors les 90°C, pendant un bref instant, ce qui lui procure une viscosité propice à l'injection dans le cylindre.

4.3 Elévation de la température dans la chambre de combustion

Nous avons déjà parlé de jouer sur **l'avance à l'injection** dans le chapitre traitant le point d'éclair plus élevé des huiles végétales. Cela consiste donc à retarder l'injection afin d'obtenir une plus haute température en fin de compression. Le réglage de l'avance à l'injection est propre à chaque moteur, mais le principe reste toujours identique : décaler le moment d'injection à la pompe d'injection par rapport au point mort haut du piston concerné. Ce réglage est normalement aisé en jouant sur les réglages prévus au mécanisme d'accouplement de la pompe d'injection.

L'avance à l'injection ne constitue pas une adaptation proprement dite au moteur, c'est pourquoi nous n'en dirons pas plus. Mis à part le fait qu'un calage, effectué pour l'huile végétale, n'est pas idéal pour le diesel qui sera utilisé au démarrage du moteur. Pourtant, il n'y aura pas de problèmes majeurs à ce que le moteur fonctionne avec ces calages au démarrage. Nous constatons un rendement moteur un rien plus faible, une puissance maximum développée plus faible, et à la limite une combustion moins bonne, comme tout démarrage même au diesel, mais sans aucune conséquence grave pour le moteur. Il s'agit d'une courte période de démarrage avant que le moteur n'atteigne sa température.

Il existe bien évidemment des réglages à avance automatique, mais ce genre de dispositif requiert une électronique qu'on essaie à tout prix d'éviter dans les pays africains, bien entendu.

Par contre la méthode de **réinjection de gaz brûlés**, rappelée il y a peu, sera bien une adaptation à effectuer au moteur. Le but ici est d'essayer de réinjecter une certaine quantité de gaz brûlés dans le moteur, proportionnelle à la charge appliquée au moteur. Nous passerons par une image reflétant la charge, qui est la température des gaz d'échappement. Comme nous avons pu le constater à la figure (4.8) (cfr. chap.4 § 3.2.3) détaillant le problème du point d'éclair, la température des gaz d'échappement est dépendante de la charge à laquelle est soumise le moteur. Nous nous trouvons dans une situation un peu compliquée : plus la charge appliquée au moteur est petite, plus la température en fin de compression est faible, et donc plus il faudra réinjecter de gaz brûlés, qui sont aussi moins chauds. C'est à faible charge que nous avons besoin de plus de gaz brûlés et les plus chauds possible. Par contre, à une charge plus importante, mais inférieure à la pleine charge, il faut réinjecter une quantité plus faible, car la température des gaz brûlés est déjà plus élevée. Ainsi nous verrons la quantité des gaz brûlés à réinjecter, varier avec la charge.

La conception et le réglage d'un tel dispositif ne seront pas une tâche facile. Il faudra procéder à des essais itératifs afin de déterminer la quantité exacte des gaz brûlés réinjectés pour une charge fixée, et ce pour le moteur en question.

Il n'est pas nécessaire de rentrer plus dans les détails à ce stade, vu la complexité du problème. La pratique nous réservera certainement quelques petites surprises.

Rappelons que cette adaptation n'est pas toujours indispensable :

- Dans le cas d'un moteur à **injection indirecte** travaillant souvent à pleine charge, la température en fin de compression dans la chambre de combustion sera proche de l'idéal, si toutefois le simple réglage de l'avance à l'injection a été effectué. La température moyenne de la préchambre atteignant déjà les 500-600°C dès 10% de la charge, c'est la température moyenne de la chambre de combustion qui est déterminante, vu que la majeure partie de l'huile brûle dans la préchambre. Les quelques résidus d'huile qui n'ont pas brûlés et se retrouvent sous forme de dépôt dans la chambre de combustion (cylindre, tête de piston, segments, soupape d'admission...) finissent petit à petit par brûler, d'autant plus facilement que la température dans cette chambre est élevée, et par moment supérieure au point d'éclair de l'huile de palme ($\pm 300^\circ\text{C}$). Pour ce faire un moteur tournant à bas régime et à la charge maximum correspondant à ce régime, arrivera à brûler les derniers résidus.

Dans le cas où le moteur fonctionne à charge réduite, la réinjection de gaz brûlés permet alors uniquement d'augmenter la température moyenne de la chambre de combustion et d'approcher les conditions de fonctionnement à pleine charge.

- Dans le cas d'un moteur à **injection directe**, il est préférable d'adopter ce dispositif de réinjection des gaz brûlés. En effet, c'est dans ce type de moteur que l'on retrouve des températures moyennes dans la chambre de combustion, inférieures au point d'éclair de l'huile de palme (respectivement 200-220°C contre 280-300°C). L'utilisation d'un tel type de moteur à l'huile végétale, procure des meilleures conditions de fonctionnement en adaptant ce dispositif de réinjection de gaz brûlés ou en lui fournissant un piston ferrotherm, ce qui est le cas idéal bien évidemment, mais fort coûteux. L'entreprise AAN demande pour la conception (et pour la première fabrication) d'un piston ferrotherm pour un moteur déterminé près de 50.000 €(cfr. chap.4 § 3.2.3 aux figures (4.7) et (4.8)).

Quelles seront les conséquences si l'on n'effectue pas cette adaptation ? Nous pouvons nous attendre à une combustion moins bonne avec comme effet secondaire, un risque de dépôt charbonneux plus important sur les parties sensibles de la culasse, telles que la soupape d'admission, la tête d'injecteur et le premier segment. Il serait plus prudent de ne pas se prononcer plus à ce sujet, car seule la pratique nous dira ce qu'il en est. Signalons tout de même que lors des essais effectués par AAN ou par l'Université de Songkla, ce genre de dispositif n'a pas été utilisé. Les résultats sont assez concluants, jusqu'à 2.000 heures. La durée de vie d'un moteur de petite puissance étant prévue pour 8.000 heures minimum.

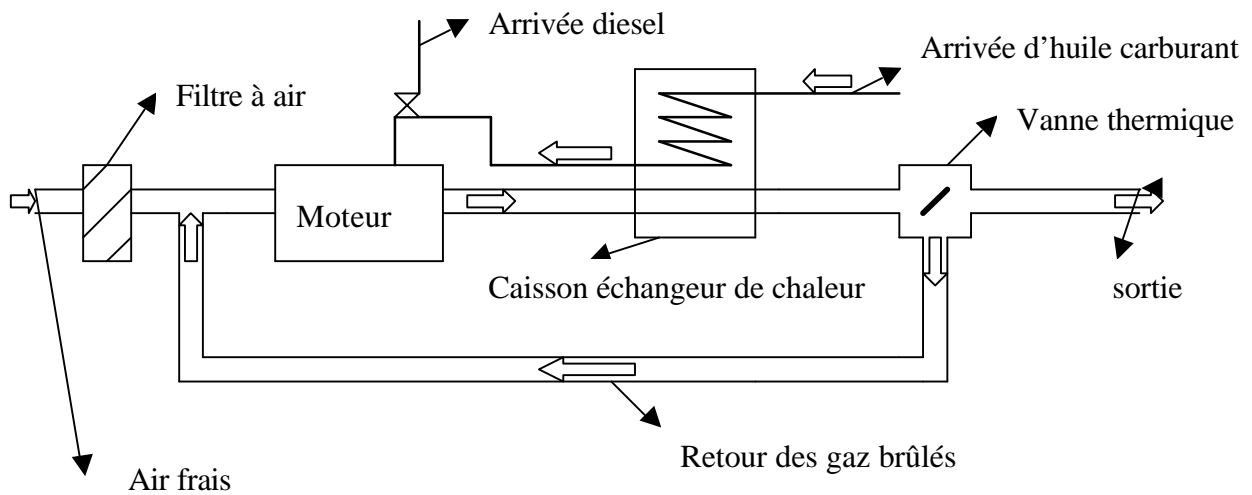
Le fait d'adapter un moteur avec un dispositif de réinjection de gaz brûlés devrait favoriser la durée de vie du moteur, quelque soit son type d'injection.

Concluons dès à présent que, dans le projet pour les pays africains, il est recommandé de travailler avec des moteurs à injection indirecte. Ceux-ci sont généralement plus robustes et ne nécessitent pas obligatoirement un système de réinjection de gaz brûlés. Les moteurs à injection directe requièrent ce système, mais l'idéal restera l'emploi d'un piston ferrotherm. Signalons aussi que la pression dans l'injecteur d'un moteur à injection directe sera beaucoup plus élevée que dans l'injecteur d'un moteur à injection indirecte. Ceci peut favoriser l'apparition d'une éventuelle polymérisation. L'usage d'un moteur à injection directe permet

aussi d'obtenir un meilleur rendement. Nous convenons bien que ce n'est pas l'objectif premier recherché dans notre cas.

Voyons à présent un schéma simplifié d'un tel dispositif (figure : (6.6)). Nous y avons représenté une vanne « thermique à trois voies ». C'est l'orientation que nous aimerions donner à la conception du réglage du débit retour de gaz brûlés. Cette vanne « thermique » réagit à la chaleur des gaz brûlés, donc à la charge, et elle dévie les gaz brûlés davantage vers la réinjection en fonction de l'abaissement de la température des gaz brûlés.

Dans le schéma ci-dessous, nous avons aussi représenté un échangeur de chaleur : gaz d'échappement - huile carburant et une vanne d'arrivée du diesel pour le démarrage et l'arrêt du moteur.



(Figure : (6.2))

4.4 Problèmes de polymérisation

Le problème de polymérisation de l'huile se fait essentiellement ressentir au niveau des injecteurs. Ce problème peut être atténué par l'utilisation d'**injecteur à un seul jet** (cfr. chap.4 § 3.3.4). Pourtant ce type d'injecteur ne peut être utilisé que dans les moteurs à **injection indirecte**. En effet, son emploi est limité à ce type de moteur vu la présence d'une préchambre de combustion (ou chambre de turbulence) qui cause l'effet tourbillonnaire souhaité afin d'obtenir une bonne combustion.

Dans le cas d'une **injection directe**, son utilisation est inappropriée. Afin de créer l'effet tourbillonnaire, il faut inmanquablement recourir à un **injecteur multitrous**. La conception d'un piston creusé avec précision permet d'obtenir une combustion des plus favorables. L'utilisation d'un injecteur à un seul jet dans un moteur à injection directe, mènerait droit à la catastrophe : d'une part l'effet tourbillonnaire serait quasi inexistant, d'autre part le seul orifice de l'injecteur serait mal calibré, vu qu'il devrait reprendre la superficie totale des multi trous en un seul trou, ce qui laisserait donc passer trop de carburant au moment de l'injection, vu la très haute pression d'injection.

Dans le cas de l'utilisation de l'huile de palme comme carburant dans un moteur diesel à injection directe, il est donc indispensable de **démarrer et d'arrêter le moteur au diesel**, afin de procéder à un **rinçage** des têtes d'injecteur multitrous.

Dans le cas du projet en Afrique, nous démarrons et arrêtons le moteur au diesel, avec l'avantage non seulement de rincer les injecteurs mais de plus, en phase de démarrage, nous réduirons considérablement le passage de l'huile carburant vers l'huile moteur et donc les réactions chimiques dans l'huile moteur y seront moindres (cfr. chap.4 § 3.4).

Nous équipons donc le moteur d'une vanne qui oriente soit le passage de **diesel**, lors du **démarrage et de l'arrêt du moteur**, soit le passage de l'huile carburant, une fois le moteur suffisamment chaud pour avoir une température de fin de compression acceptable et pour céder assez de chaleur au niveau des gaz d'échappement afin de réchauffer cette huile carburant.

Soyons attentifs au moment du passage d'un carburant à l'autre. Une fois le moteur suffisamment chaud, la vanne, activée manuellement, coupe l'arrivée de diesel et ouvre l'arrivée de l'huile. Comme il y a encore une certaine quantité de diesel dans les canalisations et dans la pompe à injection, l'huile se mélange quelque peu avec le diesel. C'est un effet tout bénéfique qui apporte au moteur une transition plus douce d'un carburant à l'autre. D'ailleurs, grâce à cette vanne, nous pouvons même imaginer de faire fonctionner le moteur avec mélange constant d'huile de palme et de diesel. Ceci peut s'avérer intéressant dans certaines situations. Rappelons que l'huile végétale et le diesel sont parfaitement miscibles.

Par contre, il faut être vigilant à la phase d'arrêt du moteur. Lorsque nous désirons couper le moteur pour un certain temps, il faut repasser au carburant diesel, car l'huile de palme restant trop longtemps au repos dans le moteur finira par reprendre sa viscosité d'origine à l'état ambiant. Mais ce passage de l'huile carburant vers le diesel aura évidemment une certaine durée avant que les canalisations et la pompe d'injection ne soient purgées de l'huile et remplacées par le diesel qui servira d'ailleurs ultérieurement au démarrage. Il est impératif de laisser tourner le moteur pendant quelques minutes après le passage au diesel. Ce temps dépendra en grande partie de la longueur du tuyau de carburant entre la vanne de carburant et la pompe d'injection. Nous essayerons de réduire cette distance au minimum.

4.5 *Combattre les réactions chimiques*

Ceci concerne principalement les réactions chimiques se produisant lors du passage de l'huile carburant vers l'huile moteur au fond du carter. Nous avons déjà abondamment parlé de ce sujet et sommes venus à la conclusion de **démarrer le moteur au diesel** afin de réduire ce passage gênant.

Il n'y pas d'autres remèdes à ce problème. Il faudra faire preuve d'une discipline intransigeante afin d'éviter le fonctionnement du moteur avec une huile moteur qui a perdu ses capacités lubrifiantes. La durée de vie du moteur en est l'enjeu principal.

Pensons ici, au principe de comparaison de l'huile usagée avec une huile nouvelle sur un plan incliné.

Ainsi, une adaptation proprement dite pour régler ce problème, se trouve dans la vanne de carburant, dont il était question dans le point précédent.

Afin d'encourager la procédure de maintenance et d'entretien, nous préconisons l'utilisation d'un tableau d'entretien. Ce tableau reprend les différentes démarches à effectuer et les différentes pièces à tester et/ou remplacer en fonction d'une certaine durée de fonctionnement du moteur.

Ce tableau sera finalisé lorsque les différentes adaptations et le véritable « kit de montage » seront réalisés. Afin de donner une idée d'un tel tableau d'entretien, un exemple venant de AAN est repris en annexe à la figure (A.32).

4.6 *Problèmes liés aux réactions physico-chimiques*

Ici, il s'agit tout simplement de faire attention de ne pas employer une huile stockée trop longtemps. Elle subira inévitablement un phénomène d'hydrolyse, de rancissement et de polymérisation, rendant l'huile inutilisable dans le moteur.

Il n'y a pas de modification à apporter au moteur à ce sujet.

4.7 Conclusions

Nous avons donc vu comment modifier le moteur par des adaptations externes à celui-ci, afin de résoudre les problèmes liés à l'utilisation de l'huile de palme comme carburant. Ces diverses adaptations sont telles qu'elles nécessitent un minimum de coût dans le but d'être les plus accessibles possible dans les pays africains.

Nous concluons, qu'un moteur diesel à **injection indirecte**, équipé d'injecteurs à un seul jet, voulant fonctionner à l'huile de palme, devra dans tous les cas être muni d'un **système de chauffage** de cette huile. Ce système peut se résumer à une chauffe d'environ 40-60°C de l'huile de palme, uniquement en amont de la pompe d'injection, afin que l'huile obtienne une viscosité suffisante pour y être comprimée. Avec la **reprise du surplus de carburant** vers la pompe d'injection, cette huile atteindra une température d'environ 60-80°C, étant donné la température de la pompe d'injection et la compression qui s'y produit. La fluidité de l'huile de palme à cette température est suffisante pour franchir le seul trou de l'injecteur.

Le moteur n'exige pas d'être démarré au diesel, si l'huile reste à l'état liquide dans les canalisations et dans la pompe d'injection.

La réinjection de gaz brûlés dans le(s) cylindre(s) est une option, mais pas forcément nécessaire.

Un moteur diesel à **injection directe**, muni d'injecteurs à multitrous, voulant fonctionner à l'huile de palme devra en tout cas subir des modifications : un **système de chauffage** de cette huile, un **démarrage et arrêt** forcément au **diesel**, et la **réinjection de gaz brûlés** dans le(s) cylindre(s). La **reprise du surplus de carburant** vers la pompe d'injection est une astuce pratique et intéressante à conseiller.

Le **système de chauffage** de l'huile est plus complexe que dans le cas de l'injection indirecte. En effet, ici il faut prévoir une chauffe d'environ 40-60°C de l'huile de palme en amont de la pompe d'injection. Accompagnée de la reprise du surplus de carburant, cette huile atteint les 60-80°C, et il faut encore procéder à une deuxième chauffe de l'huile entre la pompe d'injection et l'injecteur afin d'amener cette huile vers les 90-100°C. La cause de ces deux chauffages est d'une part d'obtenir une fluidité suffisante dans la pompe d'injection et d'autre part d'éviter d'amener l'huile à 90-100°C dans la pompe d'injection, car celle-ci étant déjà soumise à de fortes températures sera refroidie par la « fraîcheur relative » de l'huile qui y entre pour la maintenir à température acceptable.

Nous voyons bien la complexité croissante de l'emploi de l'huile de palme dans un moteur diesel à injection directe comparé à l'injection indirecte.

Dans notre cas, nous réaliserons ces quatre adaptations citées ci-dessus, d'abord sur plans et ensuite nous effectuerons ces modifications proprement dites sur un moteur à **injection directe**.

Seulement après, nous serons aptes à dresser une liste des différents composants afin d'aboutir à l'objectif de cette recherche, « **un kit de montage** » pour un moteur bien défini.

Nous retrouvons en annexe aux figures (A.33) et (A.34) des exemples de plans et de listes de composants effectués par AAN dans le cadre de projets de grosses installations comprenant des moteurs à l'huile végétale.

Dernier conseil final : essayer de faire tourner le moteur à son régime le plus bas possible, mais suffisant pour obtenir la puissance voulue. Ainsi la température dans la chambre de combustion sera plus élevée (cfr. chap.4 §3.2.2, figure 4.6), ce qui limitera les dépôts charbonneux, entre autres. Par ailleurs il est fort probable que l'on réduise de cette façon la consommation. Soyons attentifs que ce n'est pas parce que le moteur fonctionne à bas régime qu'il consomme le moins, comme nous le prouve le graphe de la consommation spécifique du moteur d'essai *Hatz* à la figure (A.42) en annexe : en effet nous constatons qu'à bas régime le moteur consomme plus qu'aux environs des 2.000 tours/min, le point minimum. L'allure générale de cette courbe se retrouvera pour tous les autres types de moteurs.

5 Adaptations proprement dites sur le moteur d'essai

L'acquisition d'un moteur d'essai n'a pas été une tâche facile, loin de là. Nous allons brièvement d'écrire cet aspect afin de bien cerner le pourquoi du comment.

Dès le départ de l'étude de l'utilisation de l'huile de palme comme combustible, il apparaissait déjà qu'un moteur à injection indirecte s'adapterait le mieux à ce type d'application. C'est bien la conclusion à laquelle nous sommes arrivés. Le moteur à injection indirecte, de part sa conception, est plus approprié à l'emploi d'huiles végétales :

- ✍️ son démarrage est possible à l'huile si toutefois celle-ci se trouve à l'état liquide (>< *injecteur un seul jet*)
- ✍️ une meilleure résistance à la polymérisation de l'huile et des conséquences non souhaitées que cela engendre (>< *injecteur un seul jet et pression d'injection moindre*)
- ✍️ une température élevée dans la chambre de précombustion (>< *point d'éclair*)

Il serait donc tout à fait logique d'effectuer les adaptations pour l'huile de palme sur un moteur à injection indirecte. Et pourtant, comme déjà annoncé, il s'agit en premier lieu de modifier un moteur diesel à injection directe. Les raisons étant multiples, en voici un bref descriptif :

Une des raisons majeures d'avoir choisi un moteur à injection directe, tient tout simplement dans une question d'offre sur le marché mondial. Nous avons été très surpris à la fin de cette étude, de découvrir la faible quantité de moteur à injection indirecte encore produite de nos jours. Les causes principales de ce retrait en masse, de ce type de moteur, sont les suivantes : il s'agit des restrictions assez fortes concernant les émissions des gaz d'échappements (*Kyoto, Clean Air Act,...*) d'une part, et d'un rendement global du moteur d'autre part. De nos jours, les moteurs à injection directe remplissent les conditions de restrictions d'émissions de gaz brûlés. De plus, ils apportent un meilleur rendement global que les moteurs à injection indirecte.

Néanmoins, nous retrouvons sur le marché des moteurs à injection indirecte. Nous avons trouvé plusieurs moteurs *PERKINS*, et quelques moteurs *KUBOTA* à injection indirecte. Mais dans le projet pour les pays du sud, nous avons encore quelques impératifs supplémentaires : des moteurs de faibles puissances, donc des mono- ou bicylindres. Il se fait que les plus petits moteurs sont nettement moins nombreux sur le marché. Ensuite, une condition annexe, que nous nous fixons, est la possibilité de démarrage manuel du moteur.

Dans ce projet, il serait intéressant que les moteurs soient démarrés manuellement, par système de manivelle ou de corde enroulée. Ce choix nous amène incontestablement vers une sélection très limitée. Les moteurs *PERKINS* ne sont hélas plus fabriqués avec démarrage manuel. Dans la marque *KUBOTA*, nous avons pu retrouver le modèle *EA 300 N* à injection indirecte, monocylindre, et à démarrage manuel, seulement il ne développe que 6 kW à 3.000 tours/min. Vu sa très faible puissance, il ne sera réservé que pour des applications très légères. Nous le tenons toutefois à l'œil et sommes toujours en quête d'autres moteurs potentiels. Pour l'histoire, le moteur *KUBOTA* utilisé lors de l'essai à l'Université de Songkla, le modèle *ET 80* ou *OC 80*, est à démarrage électrique. Cependant, il reste un moteur très intéressant dans notre cas.

Pratiquement, le choix du moteur *Hatz* (1D81 ; 11 kW ; 667 cm³) à injection directe et refroidi par air, à démarrage manuel possible, a été fait pour des raisons de qualité, de fiabilité et de simplicité du moteur, mais aussi pour cause d'aspect financier vu que *CODEART*, l'entreprise auteur de ce projet, est revendeur de moteurs *Hatz*.

Ce moteur fera l'objet d'une étude approfondie, et les différents plans en vue d'une adaptation complète du moteur à l'huile de palme sont à réaliser. En effet, un double système de chauffage de l'huile (un avant et l'autre après la pompe d'injection) est à prévoir, ainsi qu'un démarrage et arrêt au diesel, de même que la réinjection de gaz brûlés et la reprise du surplus de carburant vers la pompe d'injection. Nous avons repris en annexe (A.35 à A.40) quelques clichés du moteur photographié dans l'entrepôt chez *CODEART*. Nous les avons brièvement commentés en vue de l'adaptation à effectuer.

Ce moteur d'essai servira de base pour apporter des adaptations, et pour un test de longue durée qui sera effectué sur place à Butembo, en République Démocratique du Congo. Ce moteur, servira en quelques sortes « de test » afin d'évaluer les différents problèmes éventuels qui surgiront lors de son utilisation. L'objectif premier sera de déterminer le temps de fonctionnement total d'un moteur à injection directe, adapté de la façon la plus simple possible et avec le moindre coût.

Les différentes caractéristiques de ce moteur sont données en annexe (A.41), (A.42), (A.43) et (A.44).

Vu l'ampleur du sujet, je laisse le soin à *Quentin Saussez*, étudiant en 3 EM à l'ECAM, de mener à bien ce projet l'année prochaine. Il se chargera de mettre en pratique les différentes adaptations sur ce moteur *Hatz*. Deux autres achats de moteurs sont prévus prochainement pour pouvoir les modifier. Un moteur à injection indirecte fera partie du lot. Il y aura plus de facilité à l'adapter et sa durée de vie sera probablement supérieure à un moteur à injection directe. Nous nous doutons qu'un tel moteur sera de plus grosse puissance et probablement à démarrage électrique.

L'objectif de *CODEART* est de pouvoir proposer trois types de moteurs se distinguant par leurs prix et par leurs puissances. Ainsi, l'acheteur potentiel aura le choix entre trois moteurs de caractéristiques différentes, dont il obtiendra le fameux « kit de montage » afin d'adapter le moteur choisi, au fonctionnement à l'huile de palme.

Conclusion générale

Nous avons vu qu'il existe un **potentiel** d'utilisation de l'huile de palme - comme carburant - dans de nombreuses parties du monde.

Dans certaines régions, et plus particulièrement en Afrique, le **prix** de revient de l'huile de palme sera inférieur au prix d'achat du diesel qui est grevé de taxes multiples.

La **production** et l'obtention de cette huile est aisée : elle peut presque passer du fruit du palmier au réservoir de carburant.

Le protocole de Kyoto impose des restrictions, concernant les **émissions** de CO₂, qui peuvent être satisfaites, puisque le CO₂ rejeté a déjà été absorbé lors de la croissance du palmier, contrairement à l'utilisation des produits fossiles.

L'emploi généralisé d'huiles végétales - comme carburant – permettra de réduire la **dépendance** énergétique de certains pays qui pourront produire sur place leur propre carburant « vert ». Cette idée rejoint la nouvelle approche actuelle de l'utilisation de l'énergie.

Les **moteurs** les plus adaptés sont de type diesel. Les transformations à apporter aux moteurs de base ne sont pas conséquentes. Elles seront d'un coût moindre pour les moteurs à injection *indirecte* que pour les moteurs à injection *directe*.

Il ne faut peut-être pas espérer une longévité du moteur aussi élevée lors de l'utilisation de l'huile de palme à la place du diesel, si l'on n'investit pas suffisamment dans les adaptations et la maintenance plus fastidieuse du moteur.

Ce projet s'inscrit bien dans une vision du futur.

Bilan personnel que m'a apporté l'ensemble de ce travail de fin d'étude

Le savoir

Une manière d'aborder un problème, d'en faire une analyse succincte, de faire le tri entre les éléments essentiels, importants et accessoires, et puis d'en faire une synthèse.

Le savoir-faire

La planification de l'ordre des opérations, c'est-à-dire récolter des informations aux sources les plus variées, les confronter, et les incorporer dans le travail. La rédaction sur base d'un plan logique. Faire la liaison entre la théorie et la pratique qui a ses propres exigences.

Pouvoir échanger les points de vue, pour en tirer les options les plus appropriées.

Le savoir être

Lors des contacts : d'une manière générale, la nécessité de susciter l'intérêt chez l'interlocuteur qui répondra d'autant plus favorablement et longuement.

Entre autres :

✉✉épistolaires (E-Mail) : Fédération Pétrolière Belge (*FPB*), Commission Européenne, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (*CIRAD*- France.), Développement rural intégré & énergie renouvelables (*BAGANI*- Allemagne), Conservation of clean air and water in Europe (*CONCAWE*- Belgique)

✉✉téléphoniques : Dr. Kampmann (*AAN*- Allemagne), *Hatz* (Allemagne), Ir. Willy (République Démocratique du Congo)

✉✉de visu : Mr. Wolff (*Energiebau*- Allemagne), Dr. Kampmann

Le travail en entreprise, chez CODEART, a permis d'appréhender l'aspect humain d'une activité en collaboration.

Bibliographie

Ouvrages

- ✂ JACQUEMARD J.C., Le palmier à huile, Maison neuve Larose, Paris, 1963.
- ✂ Le point sur l'extraction des huiles végétales : les presses à l'huile, GRET, Paris.
- ✂ RYCKMANS H., La sueur, l'huile et le fromager, Environnement africain.
- ✂ Palmier à huile : Technologie d'extraction des huiles, raffinage et caractéristiques des huiles, BDPA-SCETAGRI, 1995.
- ✂ PRATEEPCHAIKUL G., Palm oil as fuel for Agricultural diesel engines : Comparative testing against diesel oil, Journal of science and technology Vol.25 Nr 3 May-June 2003, Prince of Songkla University (Thaïlande).
- ✂ CONZELMANN R., Etude de la rentabilité concernant la substitution du gazole par l'huile de palme chez Palmindustrie, Côte d'Ivoire, GTZ, Berlin, 1993.
- ✂ LIENNARD A., Energy generation from « neat » vegetable oils, CIRAD, Montpellier.
- ✂ MIRABI M., KRÄMER Klaus, Einsatzmöglichkeit des Sojaöls als Kraftstoff in Dieselmotoren, Fachhochschule Köln, 1988.
- ✂ PAK M., Nutzung pflanzlicher Öle als Kraftstoff, GTZ, Köln, 1993.
- ✂ SCHUR H. & H.P., Schur-Process, Bad Urach (Allemagne), 1993.
- ✂ MARTINI N., Genetic Engineering of Brassica napus Seeds for Oil Quality and Yield with Toxicological and Motor-Technical Aspects of Biodiesel in Mind, Max-Planck-Institut, Köln.
- ✂ Codex Alimentarius (Palm Oils), 1992.
- ✂ PERSIN T., Utilisation rationnelle de l'énergie : les biocarburants, ECAM-ISI, 1995.
- ✂ MARTENS A., Les biocarburants : potentiel – impact écologique, Adecarba, 1990.
- ✂ BORCHARD A., Les biocarburants : une nouvelle voie pour les agriculteurs, COPA/COGECA.
- ✂ BRUYLANTS A., JUNGERS J.C., VERHULST J., Chimie générale organique, Dunod, Paris, 1962.
- ✂ JUNGERS J.C., Cinétique chimique appliquée, Publication de l'institut français du pétrole, Technip, Paris, 1958.
- ✂ GUIBET J.-C. : Carburants et moteurs, Publication de l'institut français du pétrole, Technip, 1997, Paris.
- ✂ REYNAUD J., BABILLON C., Le véhicule automobile, Delta Press, Marseille, 2002.
- ✂ FRITTE A., Machines Motrices, ECAM, 2001.
- ✂ Techniques de l'ingénieur.
- ✂ Les différents ouvrages de chez AAN écrit par Dr. KAMPMANN, non publiés, ou encore portant le nom :
- ?? Pflanzenölmotor im Betrieb mit Palmfett, Nordhausen, 1993.
 - ?? Pflanzenölmotoren als Kernstück regenerativer Energiezeugungsanlagen, Nordhausen, 2003.
 - ?? Viskositätsverhalten von Schmieröl in Verbrennungsmotoren mit Pflanzenöl als Kraftstoff, Nordhausen, 2003.
 - ?? Pflanzenöldurchlaufschmierung an Dieselmotoren, Nordhausen, 2003.
 - ?? Dieselmotor mit Direkteinspritzung für Pflanzenöl, Nordhausen, 2003.

Revue et périodiques

- ✂ VANNECK CH., LONCIN M., Considérations sur l'altération de l'huile de Palme, Bulletin Agricole du Congo Belge, Bruxelles, 1951.
- ✂ KELLENS E., Contribution à l'étude de l'huile de palme, Bulletin Agricole du Congo Belge, Bruxelles, 1956.
- ✂ Agri Service Afrique, petit bulletin africain.
- ✂ Extraction de l'huile de palme : bravo pour le presseur caltech, Communautés Africaines, Oct., Nov., Dec., 2000.
- ✂ LOPEZ-PORTZERT A., Oléagineux : soja et huile de palme à la hausse, Produidoc - bulletin des matières premières, AFD- RGS/AGC, 2003.
- ✂ Huile végétale : situation et perspectives, AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada), le bulletin bimensuel, 31 mars 2000, 24 août 2001 et 25 octobre 2002.
- ✂ JOSSART J.M., Les biocarburants en Wallonie, Valbiom, UCL, 2003.
- ✂ PEERS C.-A., Après l'or noir, le carburant vert ?, La Libre Belgique, vendredi 19 mars 2004.
- ✂ Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, Concawe ; Commission Européenne ; Eucar, Janvier 2004.

Contacts

- ✂ KAMPMANN H.-J. (info@aan-energie.de).
- ✂ TAQUET Michel (Taquet@Gret.org).
- ✂ HENNING Reinhard (henning@bagani.de).
- ✂ WOLFF Bernd (b.wolff@energiebau.de).
- ✂ ALLEXI Arnulf (arnulf.allexi@fh-koeln.de).
- ✂ DIETZ Martin (dietz.probenin@gmx).
- ✂ VAN DE WERVE Gaëtan (Secrétaire générale de la Fédération Pétrolière Belge, g.werve@petrolfed.de).
- ✂ VANKEERBERGHEN Jacques (TotalFinaElf, Jacques.Vankeerberghen@total.be).
- ✂ HERMANS Jacques (jacques.hermans@schell.com).
- ✂ JOSSART Jean-Marc (jossart@valbiom.be).
- ✂ RIVAL Alain (Rival@cirad.fr).
- ✂ PIOCH Daniel (pioch@cirad.fr).
- ✂ VAITILINGOM Gilles (gilles.vaitilingom@cirad.fr).
- ✂ NOEL Jean-Marc (noel@cirad.fr).
- ✂ LARIVE Jean François (jeanfrancois.larive@concauwe.org).
- ✂ LE JOLY J. (ULB, jlejoly@ulb.ac.be).
- ✂ EDWARDS Robert (Commission Européenne, robert.edwards@jrc.it).
- ✂ HEYLANDS Luc (info@europowergenerators.com).
- ✂ DELOBEL (*Hatz*).
- ✂ Centre de documentation COTA, Bruxelles (<http://www.cota.be>).
- ✂ L'Université de Gembloux (fsagx@fsagx.ac.be).

Sites Web

~~☞~~ <http://www.petrolfed.be>
~~☞~~ <http://www.cirad.fr>
~~☞~~ <http://www.Gret.org>
~~☞~~ <http://www.GTZ.de>
~~☞~~ <http://www.jatropa.org>
~~☞~~ <http://www.bagani.de>
~~☞~~ <http://www.valbiom.be>
~~☞~~ <http://www.ademe.fr>
~~☞~~ <http://www.idrc.ca>
~~☞~~ <http://journeytoforever.org>
~~☞~~ <http://www.fao.org>
~~☞~~ <http://www.burotrop.org>
~~☞~~ <http://www.ufop.de>
~~☞~~ <http://www.worldbank.org>
~~☞~~ <http://www.faostat.com>
~~☞~~ <http://www.oilworld.org>
~~☞~~ <http://www.geocities.com>
~~☞~~ <http://www.songhai.org>
~~☞~~ <http://www.agro-ind.com>
~~☞~~ <http://www.ecoparis.org>
~~☞~~ <http://www.cenbio.org>
~~☞~~ <http://www.fedichem.be>
~~☞~~ <http://www.iterg.com>
~~☞~~ <http://www.oleon.com>
~~☞~~ <http://www.energiebau.de>
~~☞~~ <http://www.Hatz-diesel.de>
~~☞~~ <http://www.europowergenerators.com>
~~☞~~ <http://www.matermaco.be>
~~☞~~ <http://www.engine.kubota.ne.jp>
~~☞~~ <http://www.diesel-therm.de> [ATG]
~~☞~~ <http://www.man.de>
~~☞~~ <http://www.duetz.de>
~~☞~~ <http://www.newtonmeter.de>

Annexes