

SOMMAIRE

TABLE DES FIGURES.....	6
LISTE DES TABLEAUX	9
LISTE DES ABREVIATIONS.....	10
LISTE DES NOTATIONS	12
INTRODUCTION GENERALE.....	15
PARTIE I : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	19
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BIOCARBURANTS	20
INTRODUCTION.....	21
I.1 PRINCIPALES FILIERES DE VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE	21
I.2 APERÇU HISTORIQUE ET SITUATION ACTUELLE DES BIOCARBURANTS DANS LE MONDE	23
I.2.1 La filière éthanol	23
I.2.2 Les huiles végétales et leurs dérivés.....	26
I.3 PERSPECTIVES D'EVOLUTION DES FILIERES BIOCARBURANTS ET BIOCOMBUSTIBLES.....	29
I.3.1 Les biocarburants de « seconde génération »	29
I.3.2 L'hydrogène.....	30
I.4 ENJEUX ENERGETIQUES, ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DES BIOCARBURANTS	31
I.4.1 Enjeux et aspects énergétiques	31
I.4.2 Aspects Environnementaux.....	32
I.4.3 Aspects Economiques	35
I.5 PLACE DES BIOCARBURANTS DANS L'ECONOMIE DES PAYS EN DEVELOPPEMENT.....	36
I.6 PRODUCTION DE BIOCARBURANTS AU BURKINA FASO : ETAT DE L'ART.....	38
I.6.1 Situation actuelle	38
I.6.2 Enjeux et perspectives de production de biocarburants au Burkina Faso	39
CONCLUSION	41
CHAPITRE II : ETAT DES CONNAISSANCES SUR L'UTILISATION DES HUILES VEGETALES ET LEURS DERIVES COMME CARBURANTS	42
INTRODUCTION.....	43
II.1 PRODUCTION, COMPOSITION ET CLASSIFICATION DES HUILES VEGETALES	43
II.1.1 Composition et classification des huiles végétales.....	43
II.1.2 Production et traitement des huiles végétales	48

II.2	CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES HUILES VEGETALES ET LEUR QUALITE « CARBURANT »	51
II.2.1	Caractéristiques chimiques	51
II.2.2	Caractéristiques physiques.....	53
II.2.3	Caractéristiques liées à la combustion.....	56
II.3	UTILISATION DES HUILES VEGETALES PURES COMME CARBURANTS DANS LES MOTEURS DIESEL ET LES BRÛLEURS	59
II.3.1	Performances.....	59
II.3.2	Emissions polluantes	61
II.3.3	Endurance	68
II.3.4	Analyse des hypothèses sur la formation des dépôts.....	69
II.4	MODIFICATIONS DES MOTEURS ET DES BRÛLEURS.....	71
II.4.1	Modification des moteurs	71
II.4.2	Adaptations des brûleurs	72
II.5	UTILISATION DES CARBURANTS DERIVES D'HUILES VEGETALES DANS LES MOTEURS DIESEL ET SUR LES BRÛLEURS.....	72
II.5.1	Mélange d'huile végétale et de gazole (ou fioul domestique)	72
II.5.2	Les esters d'huiles végétales	73
II.5.3	Les microémulsions	75
II.5.4	Craquage thermique ou pyrolyse des huiles végétales.....	75
	CONCLUSION	76
	CHAPITRE III : EVAPORATION D'UNE GOUTTE ISOLEE DE COMBUSTIBLE LIQUIDE SANS COMBUSTION	78
	INTRODUCTION.....	79
III.1	DESCRIPTION DE LA THEORIE QUASI-STATIONNAIRE.....	79
III.1.1	Hypothèses fondamentales de la théorie quasi-stationnaire	79
III.1.2	La loi en D^2	81
III.1.3	Insuffisances de la loi en D^2	83
III.2.	INFLUENCE DE LA CONVECTION SUR L'EVAPORATION D'UNE GOUTTE ISOLEE	84
III.3	INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DE LA PRESSION	85
III.4	RESULTATS D'ETUDES SUR L'EVAPORATION D'HUILES VEGETALES.....	85
	CONCLUSION	86
	PARTIE II : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX	87
	CHAPITRE I : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX POUR LA CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE ET L'ETUDE DE L'EVAPORATION DES GOUTTES DE COMBUSTIBLES	88

I.1	DISPOSITIFS DE CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE	89
I.2	DISPOSITIFS POUR L'ETUDE DE L'EVAPORATION DES GOUTTES	90
I.2.1	<i>Le corps du dispositif</i>	90
I.2.2	<i>Le système de mesure et d'acquisition de la température</i>	92
I.2.3	<i>Le système d'acquisition et de traitement des images</i>	92
I.2.4	<i>Conditions et mode opératoire</i>	94
CHAPITRE II : BANCS D'ESSAIS		95
II.1	BANCS D'ESSAIS DES MOTEURS	96
II.1.1	<i>Description des moteurs</i>	96
II.1.2	<i>Freins dynamométriques et dispositifs de commande</i>	97
II.1.3	<i>Dispositifs d'analyse des gaz d'échappement</i>	97
II.1.4	<i>Dispositifs de mesure de la consommation et des températures</i>	98
II.2	BANCS D'ESSAIS DES BRÛLEURS	100
II.2.1	<i>Le banc du brûleur à fioul non modifié</i>	100
II.2.2	<i>Le banc du brûleur adapté à l'huile végétale</i>	103
PARTIE III : RESULTATS ET ANALYSE		108
CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET ANALYSE GRANULOMETRIQUE		109
INTRODUCTION		110
I.1	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES	110
I.1.1	<i>Résultats</i>	110
I.1.2	<i>Analyse des résultats</i>	114
I.2	ATOMISATION ET ANALYSE GRANULOMETRIQUE	118
I.2.1	Atomisation	118
a)	<i>Aspects théoriques</i>	118
b)	<i>Résultats et analyse</i>	120
I.2.2	Granulométrie	124
a)	<i>Aspects théoriques</i>	124
b)	<i>Résultats et analyse</i>	127
CONCLUSION		129
CHAPITRE II : ETUDE DE L'EVAPORATION DE GOUTTES D'HUILES VEGETALES ET DU FOD		131
INTRODUCTION		132
II.1	RESULTATS EXPERIMENTAUX	132
II.1.1	<i>Rappel des conditions expérimentales</i>	132
II.1.2	<i>Résultats et analyse sur l'évolution de la surface de la goutte</i>	132

II.1.3	Constantes d'évaporation.....	137
II.2	DESCRIPTION DU MODELE THEORIQUE UTILISE.....	140
II.2.1	Propriétés thermodynamiques et propriétés de transport	141
II.2.2	Nombres de transfert :.....	145
II.2.3	Prise en compte de la convection	146
II.2.4	Prise en compte de la période de chauffage de la goutte	147
II.2.5	Prise en compte cumulée de la convection naturelle et de la période de chauffage de la goutte	148
II.2.6	Durée de vie de la goutte	148
II.3	RESULTATS THEORIQUES ET COMPARAISON AUX RESULTATS EXPERIMENTAUX	149
II.3.1	Constantes d'évaporation.....	149
II.3.2	Temps de chauffage et temps total du processus d'évaporation	151
	CONCLUSION	152
	CHAPITRE III : RESULTATS ET ANALYSE SUR LES MOTEURS DIESEL.....	155
	INTRODUCTION.....	156
III.1	CONDITIONS EXPERIMENTALES	156
III.2.	RESULTATS DES ESSAIS SUR LE MOTEUR DIESEL A INJECTION INDIRECTE	158
III.2.1	Performances globales	158
a)	Présentation des résultats de performances.....	158
b)	Analyse	161
III.2.2	Emissions polluantes	162
a)	Présentation des résultats.....	162
b)	Analyse	166
III.3	RESULTATS DES ESSAIS SUR LE MOTEUR DIESEL A INJECTION DIRECTE	168
III.3.1	Performances globales	168
a)	Présentation des résultats de performances.....	168
b)	Analyse	170
III.3.2	Emissions polluantes	171
a)	Présentation des résultats d'émissions.....	171
b)	Analyse des résultats d'émissions	173
	CONCLUSION	176
	CHAPITRE IV : RESULTATS SUR LES BRÛLEURS	178
	INTRODUCTION.....	179
IV.1	CONDITIONS EXPERIMENTALES	179
IV.2	RESULTATS ET ANALYSE : BRÛLEUR A FIOUL NON MODIFIE	181

IV.2.1	Performances.....	181
a)	Présentation des résultats.....	181
b)	Analyse	182
IV.2.2	Emissions polluantes	183
a)	Présentation des résultats.....	183
b)	Analyse	186
IV.3	RESULTATS ET ANALYSE : BRÛLEUR ADAPTEE A L'HUILE VEGETALE.....	189
IV.3.1	Résultat et analyse sur l'inflammation du combustible	189
IV.3.2	Emissions polluantes	189
a)	Présentation des résultats.....	189
b)	Analyse	192
CONCLUSION		194
CONCLUSION GENERALE		196
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		200
ANNEXES		214

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Principales filières de production énergétique à partir de la biomasse	23
Figure 2 : Répartition de la production mondiale d'éthanol en 2005.....	25
Figure 3 : Répartition de la production mondiale d'ester méthylique d'huile végétale	29
Figure 4 : Consommation mondiale de pétrole à partir de 1990 et prévisions jusqu'en 2030	33
Figure 5 : (a) Prix moyen annuel du baril de pétrole ; (b) Prix moyen mensuel du baril de pétrole à New York	36
Figure 6 : Consommation mondiale de pétrole et celle de l'Afrique à partir de 1990 et prévisions jusqu'en 2030.....	38
Figure 7 : (a) Evolution de la consommation des produits pétroliers au Burkina Faso; (b) Répartition de la consommation des produits pétroliers au Burkina Faso en 2006	40
Figure 8 : Indice d'iode de quelques huiles végétales.....	52
Figure 9 : Démarche de l'étude.....	77
Figure 10 : (a) Echange de flux de chaleur entre la goutte et le milieu ambiant; (b) Champ de concentration et de température le long d'un rayon lors de l'évaporation d'un corps pur	81
Figure 11 : Le corps du dispositif expérimental.....	91
Figure 12 : Dispositif d'acquisition des images	92
Figure 13 : Dispositif du banc d'essai du moteur Diesel à Injection indirecte	99
Figure 14 : Dispositif du banc d'essai du moteur Diesel à Injection directe.....	100
Figure 15 : Banc d'essai du brûleur à fioul non modifié.....	101
Figure 16 : Schéma de principe du banc du brûleur adapté à l'huile végétale.....	105
Figure 17 : Schéma de principe du circuit du combustible avec réchauffage	105
Figure 18 : Dispositif d'analyse des produits de combustion avec piégeage de composés organiques	107
Figure 19 : Acides gras de l'huile de coton brute	111
Figure 20 : Acides gras de l'huile de coton dégommée	111
Figure 21 : Acides gras de l'huile de coton raffinée	112
Figure 22 : Acides gras de l'huile de colza brute	112
Figure 23 : Viscosité de l'huile de coton et ses mélanges au FOD en fonction de la température.....	118
Figure 24 : Régime de désintégration d'un jet issu d'un orifice circulaire	119
Figure 25 : Classification des différents régimes de désintégration du jet et critères de transition	120
Figure 26 : Conditions d'atomisation dans le moteur Diesel à injection indirecte	121
Figure 27 : Conditions d'atomisation dans le moteur Diesel à injection directe	121
Figure 28 : Conditions d'atomisation sur le brûleur à fioul non modifié.....	122
Figure 29 : Conditions d'atomisation sur le brûleur adapté à l'huile végétale.....	123
Figure 30 : Diamètre moyen de Sauter en fonction de la différence de pression (brûleur à fioul non modifié).....	128
Figure 31 : Diamètre moyen de Sauter du FOD et de l'huile en fonction de la température du combustible (brûleur adapté à l'huile)	128
Figure 32 : Influence de la température sur l'évaporation : (a) FOD; (b) HCR100; (c) HCD100; (d) HRB100 ; (e) Jatropha pur	134

Figure 33 : Influence du pourcentage d'huile incorporée au FOD à différentes températures : (a) 917 K; (b) : 873 K; (c) 773 K; (d) 684 K; (e) 578 K	135
Figure 34 : Constantes d'évaporation en fonction : (a) valeurs expérimentales de cette étude ; (b) comparaison de nos valeurs expérimentales et celles de la littérature.....	138
Figure 35 : Evolution de la surface (huile de coton) pour différents diamètres : (a) T=917 K; (b) : T = 873 K.....	139
Figure 36 : Constantes d'évaporation : (a)valeurs expérimentales et théoriques en utilisant le coefficient de diffusion binaire pour le FOD ; (b) valeurs théoriques pour le FOD et l'huile de coton en utilisant la conductivité thermique.....	149
Figure 37 : Constantes d'évaporation expérimentales et théoriques : (a) FOD ; (b) huile de coton	150
Figure 38 : Temps de chauffage : (a) illustration de la méthode de détermination des temps de chauffage et d'évaporation; (b) Temps de chauffage théoriques et expérimentaux	152
Figure 39 : Temps total du processus d'évaporation (durée de vie)	152
Figure 40 : Puissance en fonction du régime à pleine charge: (a) huile de coton et des dérivés ; (b) huile de palme et ses dérivés ; (c) huile de coprah et ses dérivés	159
Figure 41 : Rendement en fonction du régime à pleine charge: (a) huile de coton et des dérivés ; (b) huile de palme et ses dérivés ; (c) huile de coprah et ses dérivés	160
Figure 42 : CO en fonction du régime à pleine charge: (a) huile de coton et des dérivés ; (b) huile de palme et ses dérivés ; (c) huile de coprah et ses dérivés	163
Figure 43 : NO _x en fonction du régime à pleine charge: (a) huile de coton et des dérivés ; (b) huile de palme et ses dérivés ; (c) huile de coprah et ses dérivés	164
Figure 44 : CO ₂ en fonction du régime à pleine charge: (a) huile de coton et des dérivés ; (b) huile de palme et ses dérivés ; (c) huile de coprah et ses dérivés	165
Figure 45 : Couple : (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale	168
Figure 46 : Consommation spécifique : (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale	169
Figure 47 : Rendement : (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale.....	169
Figure 48 : Emissions de CO (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale.....	172
Figure 49 : Emissions de NO _x (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale.....	172
Figure 50 : Emissions de CO ₂ : (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale.....	173
Figure 51 : Emissions de CO en fonction du régime du moteur (pleine charge).....	176
Figure 52 : Performances : (a) Puissance thermique; (b) Consommation; (c) Rendement global	182
Figure 53 : Emissions de CO : (a) en fonction de la pression de pulvérisation ; (b) en fonction de la richesse à 20 bars	184
Figure 54 : Emissions de NO _x : (a) en fonction de la pression de pulvérisation ; (b) en fonction de la richesse à 20 bars	184

Figure 55 : Emissions de SO_2 : (a) en fonction de la pression de pulvérisation ; (b) en fonction de la richesse à 20 bars	185
Figure 56 : Emissions de CO_2 : (a) en fonction de la pression de pulvérisation ; (b) en fonction de la richesse à 20 bars	185

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Bilan énergétique de la production de différents carburants	32
Tableau 2 : Potentiel actuel de production de biocarburant	41
Tableau 3 : Composition en acides gras de quelques huiles végétales ou animales	46
Tableau 4 : Principales huiles végétales.....	51
Tableau 5 : Quelques caractéristiques physico-chimiques du gazole et des principales huiles végétales utilisées comme carburants	58
Tableau 6 : Quelques caractéristiques physico-chimiques de divers esters d'huiles végétales et le gazole	74
Tableau 7 : Forces et faiblesses en termes d'émissions de l'ester méthylique de colza par rapport au gazole	74
Tableau 8 : Méthodes et normes de détermination des caractéristiques physico-chimiques ...	89
Tableau 9 : Spécifications du moteur Diesel à injection indirecte	96
Tableau 10 : Spécifications du moteur Diesel à injection directe	96
Tableau 11 : Caractéristiques techniques de l'analyseur HORIBA PG250	98
Tableau 12 : Caractéristiques techniques de l'analyseur de gaz Quintox KM9106.....	98
Tableau 13 : Caractéristiques techniques du brûleur à fioul non modifié.....	102
Tableau 14 : Caractéristiques techniques de la chaudière et de l'échangeur de chaleur.....	103
Tableau 15 : Caractéristiques techniques du brûleur adapté à l'huile végétale.....	106
Tableau 16 : Caractéristiques physiques et caractéristiques liées à l'inflammation ou à la combustion	110
Tableau 17 : Composition en acides gras totaux des Triacylglycérols (% pondéral)	113
Tableau 18 : Caractéristiques chimiques, impuretés et altération des huiles et du FOD	114
Tableau 19 : Diamètres moyens de Sauter dans les conditions d'injection des deux moteurs	127
Tableau 20 : Constantes d'évaporation K (mm^2/s).....	138
Tableau 21 : Constantes d'évaporation de l'huile de coton pour deux diamètres différents à différentes températures	140
Tableau 22 : Composition de carburants utilisés en injection indirecte.....	157
Tableau 23 : Composition des carburants utilisés en injection directe:	158
Tableau 24 : Températures et viscosités correspondantes des différents combustibles.....	180
Tableau 25 : Emissions de gaz incondensables:.....	190
Tableau 26 : Résultats d'émissions de composés organiques condensables.....	191

LISTE DES ABREVIATIONS

AAPB	: Association Africaine pour la Promotion des Biocarburants
ASTM	: American Society for Testing and Material
CCD	: Charge Coupled Device
CFR	: Cooperative Fuel Research
CIRAD	: Centre de Coopération Internationale en recherche Agronomique pour le Développement
CO	: Monoxyde de carbone
CO₂	: Dioxyde de carbone
CSE	: Consommation Spécifique Effective
EEC	: Ester Ethylique de Coton
EMC	: Ester Méthylique de Colza
EMS	: Ester Méthylique de Soja
EN	: European Norme
ETBE	: Ethyl Tertio Butyl Ether
FFV	: Flex Fuel Vehicle
FOD	: Fioul Oil Domestique
FP	: Flash Point (Point éclair)
FWI	: First Wind Induced
GIEC	: Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat
GTZ	: Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (Coopération Technique Allemande)
HAP	: Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HC	: Hydrocarbures imbrûlés
HCB	: Huile de coton brute
HCD	: Huile de coton dégommée
HCR	: Huile de coton raffinée
HPR	: Huile de palme raffinée
HCpB	: Huile de coprah brute
HRB	: Huile de colza brute
ICC	: Indice de Cétane Calculé
IEEE	: Institute of Electronical and Electronic Engineers
2IE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (Ouagadougou)
IRSAT	: Institut de Recherche et Sciences Appliquées et Technologies (Ouagadougou)

ISO	: International Standardisation Organization
NDIR	: Non-Dispersive Infra Red
NF	: Norme Française
NO_x	: Oxydes d'azote (NO et NO ₂)
PCI	: Pouvoir Calorifique Inférieur
PE	: Point d'Ecoulement
PI	: Point initial de distillation (<i>initial Point</i>)
PRG	: Potentiel de Réchauffement Global
PT	: Point de Trouble
RC	: Résidu Conradson
RaM	: Raleigh Mechanism
RATP	: Régie Autonome des Transports Parisiens
SO₂	: Dioxyde de soufre
SOCOMA	: Société Cotonnière du Gourma (Burkina Faso)
SOF	: Soluble Organic Fraction
SOFITEX	: Société des Fibres et Textiles (Burkina Faso)
SOPAL	: Société de Production d'Alcool (Burkina Faso)
SOSUCO	: Société Sucrière de la Comoé (Burkina Faso)
SWI	: Second Wind Induced
TAP	: Toxic Air Pollutants
UEMOA	: Union Economique et Monétaire Ouest Africaine

LISTE DES NOTATIONS

B_M	: Nombre de transfert de masse
B_T	: Nombre de transfert thermique
C_p	: Chaleur spécifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
D	: Coefficient de diffusion binaire ($m^2.s^{-1}$)
d	: Diamètre de la goutte (m)
d_0	: Diamètre initial de la goutte (m)
d_{tr}	: Diamètre du trou de l'injecteur ou du gicleur (m)
\bar{D}_{32}	: Diamètre moyen de Sauter (μm)
E_a	: Energie d'activation (J)
FP	: Flash Point ($^{\circ}C$)
g	: Intensité de la pesanteur ($g.m^{-2}$)
Gr	: Nombre de Grashof
h	: Coefficient d'échange thermique par convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
I_a	: Indice d'acide (mgKOH/g)
IC	: Indice de cétane
ICC	: Indice de cétane calculé
k_0	: Constante de Boltzmann ($J.K^{-1}$)
K	: Constante d'évaporation ($mm^2.s^{-1}$)
K_{th}	: Constante d'évaporation, modèle quasi-stationnaire ($m^2.s^{-1}$)
K_{corr1}	: Constante d'évaporation avec prise en compte de la convection naturelle ($m^2.s^{-1}$)
K_{corr2}	: Constante d'évaporation avec prise en compte de la convection naturelle et du chauffage de la goutte ($m^2.s^{-1}$)
Le	: Nombre Lewis
L_v	: Chaleur latente de vaporisation ($J.kg^{-1}$)
M	: Masse molaire ($g.mol^{-1}$)
m	: Masse du carburant (kg)
\dot{m}	: Débit massique ($kg.s^{-1}$)
Nu	: Nombre de Nusselt
Oh	: Nombre de Ohnesorge
P	: Pression du milieu ambiant (Pa)
P_c	: Pression critique (atm)
PCI	: Pouvoir Calorifique Inférieur ($J.kg^{-1}$)

PE	: Point d'Ecoulement ($^{\circ}\text{C}$)
Pr	: Nombre de Prandtl
P _{sat}	: Pression de vapeur saturante (mmHg)
PT	: Point de trouble ($^{\circ}\text{C}$)
Q _{amb}	: Chaleur apportée par le milieu ambiant (J)
r	: distance radiale (m)
R	: Constante Universelle des gaz parfait ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
RC	: Résidu Conradson (%)
Re	: Nombre de Reynold
Sc	: Nombre de Schmidt
Sh	: Nombre de Sherwood
T	: Température (K)
T _∞	: Température du milieu ambiant (autour la goutte) (K)
T _c	: Température critique (K)
T _{éb}	: Température d'ébullition (K)
T _r	: Température de référence
t	: Temps (s)
V	: Vitesse relative de la goutte par rapport au milieu ambiant (m.s^{-1})
V _j	: Vitesse du jet de combustible (m.s^{-1})
V _r	: Vitesse radiale pour la goutte (m.s^{-1})
Y	: Fraction massique
Y _r	: Fraction massique de référence
We	: Nombre Weber

Symboles :

ν	: Viscosité cinématique (m^2/s)
μ	: Viscosité dynamique (Pa.s)
ρ	: Masse volumique (kg/m^3)
σ	: Tension Superficielle (mN/m)
λ	: Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
τ_c	: Délai chimique d'inflammation (s)
τ_p	: Délai physique d'inflammation (s)

τ_1	: Temps de chauffage de la goutte (s)
τ_2	: Temps d'évaporation pendant la phase stationnaire (s)
$\tau_{\text{év}}$: Durée de vie de la goutte (s)
Ω_v	: Intégrale de collision pour la viscosité
Ω_D	: Intégrale de collision pour la diffusion
ε	: Energie caractéristique de LENNARD-JONES (J)
θ	: Diamètre de collision (Angström)

Indices :

∞	: Se rapporte à l'ambiance
A	: Se rapporte à l'air
f	: Se rapporte au carburant (combustible)
g	: Se rapporte à la phase gazeuse
j	: Se rapporte au jet de combustible
l	: Se rapporte à la phase liquide du carburant
s	: Se rapporte à la surface de la goutte

INTRODUCTION GENERALE

Les besoins d'énergie sont en nette progression aussi bien dans les pays développés que dans les pays du sud. 80 % de l'énergie primaire mondiale est d'origine fossile. Malheureusement, les réserves mondiales de pétrole sont en baisse permanente et il n'existe de nos jours aucune solution de remplacement véritable. Par ailleurs, l'utilisation de cette énergie fossile contribue à l'accroissement sans cesse des émissions des gaz à effet de serre, en particulier le dioxyde de carbone dont les conséquences sont de nos jours bien établies (changements climatiques). Ainsi, les législations anti-pollution dans le monde sont de plus en plus sévères et s'inscrivent en général dans le cadre de l'objectif mondial de réduction des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone notamment) ou d'autres polluants classiques (oxydes d'azote, monoxyde de carbone, particules et hydrocarbures imbrûlés).

Des filières telles le gaz de pétrole liquéfié (GPL), le Gaz Naturel, les véhicules électriques sont envisagées pour leur « caractère écologique ». Cependant, la plupart de ces filières connaissent aujourd'hui une faible expansion dans le monde ; elles restent des solutions transitoires. Leur origine fossile et certains verrous technologiques constituent un handicap pour leur développement. De nos jours, les efforts surtout sont orientés dans :

- la recherche de l'efficacité énergétique
- la valorisation des sources d'énergie renouvelables existantes
- la recherche de nouvelles sources d'énergie renouvelables peu polluantes

Dans ce cadre, les biocarburants font l'objet d'une considération particulière. Cette considération tient du rôle qu'ils pourraient jouer dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Outre cet aspect environnemental, les biocarburants apparaissent comme un moyen d'assurer une certaine sécurité énergétique dans un contexte mondial marqué par la diminution des réserves mondiales de pétrole et la hausse des prix du baril de pétrole. Malheureusement, à l'échelle mondiale, les filières actuelles de biocarburants (première génération) qui connaissent un développement véritable apparaissent très insuffisantes. Mais, des travaux en cours sur des filières de production dites de seconde génération permettront aux biocarburants d'occuper une plus grande part dans la consommation totale d'énergie.

A l'échelle locale, les biocarburants actuels (première génération) peuvent se présenter comme un véritable facteur de développement. A ce titre, l'utilisation des huiles végétales comme carburant de substitution (partielle ou totale) au gazole ou au fioul domestique dans les moteurs Diesel et sur les brûleurs peut s'avérer intéressante pour des pays disposant d'un

potentiel permettant le développement de cette filière, en l'occurrence les pays en développement. Ces applications peuvent être de type « circuits courts » (motorisation agricole, production d'électricité) ou orientées dans les transports.

L'objectif global de cette étude est la détermination des conditions optimales d'utilisation d'huiles végétales disponibles dans la sous région Ouest africaine, ainsi que leurs dérivés, dans des moteurs Diesel et sur des brûleurs.

Plusieurs études sur l'utilisation des huiles végétales et leurs dérivés dans les moteurs Diesel ou sur les brûleurs ont été conduites ces trente dernières années. Les résultats varient très peu en termes de :

- consommation spécifique, elle augmente en général avec les huiles végétales
- problèmes rencontrés lors de l'utilisation des huiles végétales : formations de dépôts, en particulier dans les moteurs Diesel à injection directe et les brûleurs de petites puissances non adaptés avec de l'huile non transformée (huile pure)

Des propositions de solutions technologiques ont été formulées pour pallier ces problèmes : modification ou adaptation du moteur ou du brûleur, transestérification, mélange, craquage, microémulsions etc.

Cependant, les résultats sur les performances globales (couple, rendement), les émissions polluantes ainsi que les paramètres prépondérants dans la formation des polluants lors de la combustion des huiles végétales restent des sujets de nombreuses divergences. En effet, les mécanismes qui gouvernent la formation des émissions polluantes ou qui définissent les performances, dépendent en grande partie du type et des conditions de fonctionnement du moteur ou du brûleur et des propriétés physico-chimiques du carburant. Cette dépendance est très marquée avec les huiles végétales ; chaque huile végétale doit être considérée avec ses spécificités VAITILINGOM (1992). Toutes les huiles végétales ont un comportement global similaire mais chacune présente ses particularités liées à sa nature physico-chimique. Généralement, les moteurs Diesel et les brûleurs sont optimisés pour fonctionner avec des hydrocarbures tels le gazole ou le FOD. La substitution de ce combustible fossile par un combustible d'origine végétale nécessite la détermination de nouvelles conditions optimales de fonctionnement.

Face à l'intérêt croissant d'utiliser des huiles végétales dans les pays en développement et face aux divergences sur leur enjeu environnemental ou les réticences sur leur adaptabilité

réelle aux moteurs ou aux brûleurs actuels, il est apparu nécessaire d'étudier le comportement d'huiles végétales disponibles dans la sous région Ouest africaine (en particulier l'huile de coton) dans des moteurs ou sur des brûleurs.

La détermination des conditions optimales de combustion de ces huiles dans des moteurs Diesel et sur des brûleurs passe par une caractérisation en amont (caractérisation physico-chimique des huiles et de leurs « *sprays*¹ ») et une caractérisation en aval (caractérisation de leur combustion : quantification des principaux polluants émis lors de leur combustion et identification des facteurs prépondérants sur la formation de ces polluants).

Pour la caractérisation du « *spray* » d'huile végétale, l'étude théorique ou expérimentale de l'évaporation de gouttes isolées est très intéressante (surtout lorsque les taux de réactions sont très élevés, comme c'est le cas ici). La détermination théorique des taux d'évaporation nécessite la connaissance des propriétés thermodynamiques et des propriétés de transport de la phase gazeuse ou liquide du combustible. Cela est difficile dans le cas des huiles végétales : très peu de données existent ; il faut procéder par des calculs. Des études ont montré que la composition en acides gras d'une huile était l'une des caractéristiques déterminantes dans son comportement en tant carburant. L'approche utilisée ici pour l'étude théorique de l'évaporation, repose sur la détermination des propriétés de transport et des propriétés thermodynamiques des différentes phases de l'huile, en utilisant celles de ses acides gras majoritaires. Dans le cas de l'huile de coton, il s'agit de l'acide linoléique, oléique et palmitique.

Afin de parvenir à cette étude d'optimisation du fonctionnement des moteurs et des brûleurs alimentés par des huiles végétales et de réaliser la caractérisation de la combustion de celles-ci, ce travail s'attèlera à :

- réaliser une caractérisation physico-chimique de différentes huiles végétales et une détermination de leurs caractéristiques d'atomisation et granulométriques
- réaliser une étude théorique et expérimentale de l'évaporation de gouttes d'huiles végétales : la méthode de suspension de la goutte est utilisée pour l'étude

¹ Jet liquide atomisé : ensemble de gouttes formées dans une phase continue (généralement gazeuse). Les gouttes sont plus ou moins sphériques suivant l'importance des forces aérodynamiques et des forces de tension.

expérimentale, avec un système d'acquisition automatique pour le suivi de l'évolution du diamètre des gouttes

- réaliser des mesures expérimentales de combustion sur bancs moteurs : deux types de moteurs Diesel (injection indirecte et injection directe) ont été caractérisés avec plusieurs formulations de combustibles à base d'huiles végétales
- réaliser des études expérimentales de combustion sur deux types de brûleurs (brûleur à fioul et brûleur adapté à l'huile) alimentés par des huiles végétales

La première partie de cette étude est consacrée à l'étude bibliographique. Dans cette première partie, après avoir situé la place et les enjeux actuels des biocarburants, nous présentons l'état des connaissances actuelles sur l'utilisation des huiles végétales en tant que combustibles dans les moteurs Diesel et sur les brûleurs. Nous y présentons enfin, des éléments théoriques sur l'évaporation des gouttes de liquides.

Dans la deuxième partie, nous présentons les principaux dispositifs expérimentaux et les modes opératoires de l'étude. Il s'agit dans un premier temps, de la description des dispositifs et méthodes utilisés pour la caractérisation physico-chimique et la vaporisation des gouttes. En second lieu nous décrivons les bancs d'essais des brûleurs et des moteurs Diesel.

La troisième et dernière partie est consacrée à la présentation et à l'analyse des résultats. Les résultats expérimentaux sont présentés puis confrontés aux résultats théoriques et aux données de la littérature.

PARTIE I : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BIOCARBURANTS**INTRODUCTION****I.1 PRINCIPALES FILIERES DE VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE****I.2 APERÇU HISTORIQUE ET SITUATION ACTUELLE DES BIOCARBURANTS****DANS LE MONDE***I.2.1 L'éthanol**I.2.2 Les huiles végétales et leurs dérivés***I.3 PERSPECTIVES D'EVOLUTION DES FILIERES BIOCARBURANTS ET BIOCOMBUSTIBLES***I.3.1 Les biocarburants de « seconde génération »**I.3.2 L'hydrogène***I.4 ASPECTS ENERGETIQUES, ENVIRONNEMENTAUX ET ECONOMIQUES DES BIOCARBURANTS***I.4.1 Enjeux et aspects énergétiques**I.4.2 Aspects environnementaux**I.4.3 Aspects économiques***I.5 LA PLACE DES BIOCARBURANTS DANS L'ECONOMIE DES PAYS EN DEVELOPPEMENT****I.6 PRODUCTION DE BIOCARBURANTS AU BURKINA FASO : ETAT DE L'ART***I.6.1 Situation actuelle**I.6.2 Enjeux et perspectives de production de biocarburants au Burkina Faso***CONCLUSION**

INTRODUCTION

Le positionnement et la problématique des biocarburants dans le monde reposent essentiellement sur des questions d'ordre énergétique, économique, environnemental et géopolitique. Avant d'aborder dans le chapitre II l'état des connaissances actuelles sur l'utilisation des huiles végétales en tant que carburants, le présent chapitre décrira les principales filières de production des biocarburants. Une analyse des enjeux et des aspects énergétiques, économiques et environnementaux des biocarburants sera également abordée. Cela permettra d'appréhender le développement des filières actuelles de biocarburants et de situer leur place dans le monde et en particulier dans les pays en développement.

I.1 PRINCIPALES FILIERES DE VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE

La biomasse, une des formes de captation de l'énergie solaire, désigne au sens large l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale. Depuis les différents chocs pétroliers, ce terme désigne généralement l'ensemble des produits d'origine animale ou végétale utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques. Selon la Directive Européenne 2003/30/CE, la biomasse désigne : « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et de ses industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux ».

On distingue plusieurs voies de valorisation énergétique de la biomasse : la voie chimique, la voie biologique la voie thermochimique et la combustion directe de la biomasse. La figure 1 présente les principales filières de valorisation énergétique de la biomasse.

- **La combustion directe** : elle consiste à réaliser la combustion de la biomasse sans prétraitement où après une carbonisation, pour la production de chaleur (bois, paille, résidus agricoles etc.) ou pour la production de force motrice (cas des huiles végétales pures)
- **La voie chimique** : elle comprend plusieurs procédés qui conduisent à des produits finaux utilisés dans la production de la chaleur ou dans la production de force motrice. Ce sont principalement : l'hydrolyse, la liquéfaction, la pyrolyse, la gazéification, la transestérification.
- **La voie thermochimique** : On distingue principalement la pyrolyse et la gazéification qui sont aussi considérées comme des procédés chimiques.

- **La voie biologique** : Elle permet de produire directement des combustibles (méthane, éthanol) à partir de la biomasse grâce à des microorganismes. Elle donne l'avantage d'économiser des sources d'énergie traditionnelles pour obtenir certains combustibles, contrairement aux réactions chimiques classiques qui nécessitent très souvent un apport d'énergie considérable.

Ces différentes voies de valorisation énergétique de la biomasse sont destinées soit à la production de carburants appelés biocarburants, soit à la production de chaleur.

On distingue deux à trois groupes de biocarburants : les biocarburants de « première génération », les biocarburants de « seconde génération » et les biocarburants dits de « troisième génération ».

Seuls les biocarburants de « première génération » (l'éthanol produit à partir de matières sucrées et amylacées, les huiles végétales pures et le biodiesel) connaissent de nos jours un développement véritable.

Les autres filières biocarburants sont très peu développées soit pour des raisons de rentabilité économique, soit pour des raisons de maîtrise de la technologie de production etc. C'est le cas par exemple de l'éthanol cellulosique ou les carburants issus du procédé de gazéification. Le point I.2 donne un aperçu sur l'évolution de ces différentes filières.

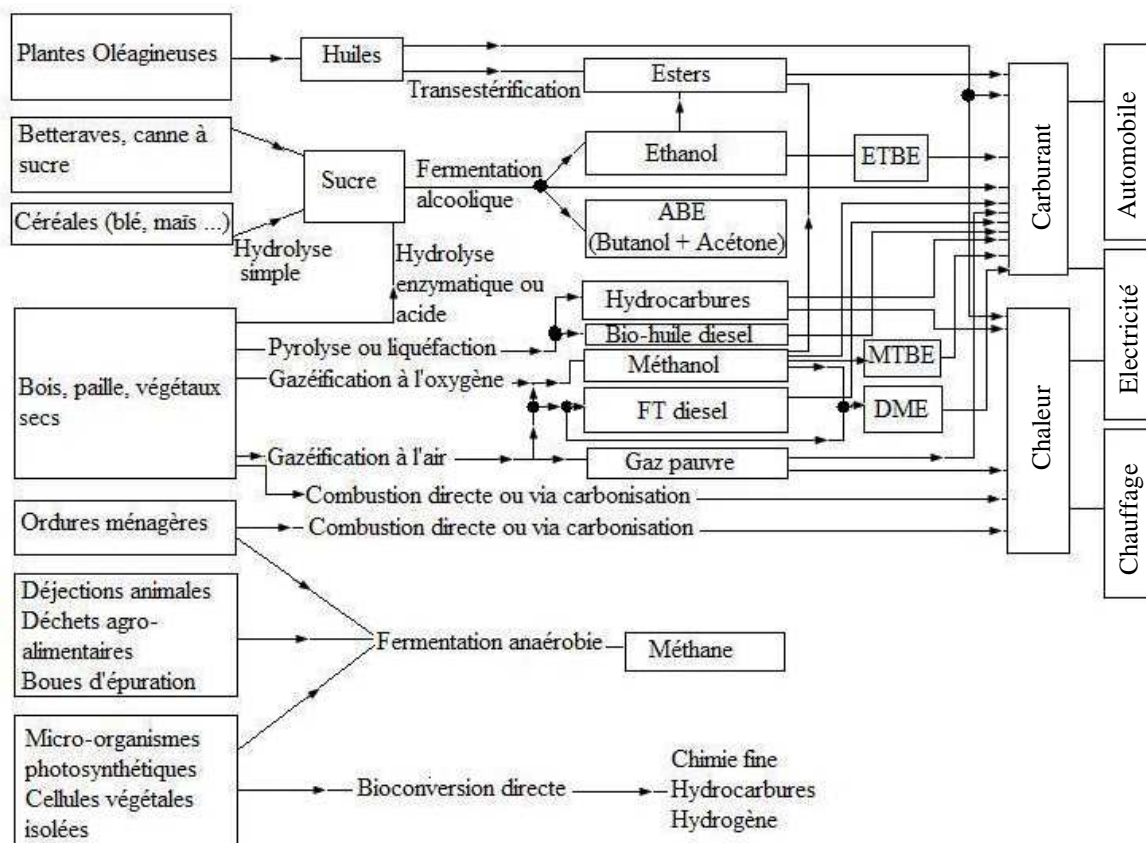


Figure 1 : Principales filières de production énergétique à partir de la biomasse (Martin et al. (1992))

I.2 APERÇU HISTORIQUE ET SITUATION ACTUELLE DES BIOCARBURANTS DANS LE MONDE

I.2.1 La filière éthanol

L'éthanol issu de la biomasse est fabriqué généralement à partir de matières sucrées, amylacées ou cellulosiques comme l'indique la figure 1. Seules les deux premières matières font de nos jours l'objet d'une exploitation industrielle.

En France, son expérimentation dans les moteurs thermiques commença dès 1892. Entre 1899 et 1901, les voitures de course et de rallye utilisèrent de l'éthanol avec de bonnes performances. En 1922, un carburant national incorporant de l'éthanol naissait. Cela a été suivi en 1931 par l'incorporation obligatoire de 25 à 35% d'éthanol dans l'essence destinée aux véhicules poids lourds. En 1935, les taux d'incorporation de l'éthanol dans les véhicules automobiles atteignaient 11 à 15%. Son utilisation dans les moteurs continue jusque dans les années 1960 avec l'utilisation d'un mélange ternaire constitué de 75 % d'essence, 15 % d'éthanol anhydre et 10% de benzol (mélange d'hydrocarbures très riches en aromatiques et provenant des cokeries). Entre 1950 et 1956, les recherches portaient notamment sur les

risques de démixtion de tels mélanges. L'utilisation de l'éthanol comme carburant est freinée de 1960 à 1973 avec l'apparition d'un pétrole moins cher et en abondance. Entre 1956 à 1970, seule la RATP² utilise un carburant constitué d'un tiers de chacun des composés que sont l'essence, l'alcool et le benzol.

Au Brésil, la recherche sur l'utilisation de l'éthanol comme carburant commença dans les années 1920. Mais, les premières mesures incitatives du gouvernement en faveur de l'éthanol « carburant » furent prises en 1931. Comme dans le cas de la France, il n'y a pas eu d'utilisations massives de l'éthanol comme carburant jusque dans les années 1970.

L'intérêt pour l'éthanol en tant que carburant apparaît avec le premier choc pétrolier dans les années 1973. Ainsi, l'on assista à :

- l'utilisation du « gasohol » (90% d'essence et 10% d'éthanol anhydre issu du maïs) aux Etats-Unis à partir de 1973.
- l'instauration en 1975 du programme « proalcool » par le gouvernement brésilien. Deux modes d'utilisation de l'éthanol produit à partir de canne à sucre sont prévus par ce programme : utilisation de 20% environ d'éthanol anhydre dans l'essence classique pour les moteurs du parc automobile existant et utilisation d'éthanol hydraté (8% d'eau environ) dans des véhicules spécialement conçus à cet effet.

En 1979, apparaissaient les premières voitures roulant avec 100% d'éthanol. En 1985, plus de 85 % des véhicules immatriculés (voitures particulières) au Brésil utilisaient de l'éthanol. La consommation annuelle d'éthanol « carburant » au Brésil est passée de 3,6 millions de m³ en 1982 à plus de 12 millions de m³ en 1989. A partir de 1990, la découverte de pétrole au Brésil, l'abaissement des cours mondiaux de pétrole vont freiner le programme « proalcool ».

L'éthanol constitue de nos jours le biocarburant qui connaît une plus grande expansion en termes de quantités consommées. Les deux principaux marchés de bioéthanol sont : le Brésil, les Etats-Unis. La figure 2 donne la répartition de la production mondiale d'éthanol.

² Régie Autonome des Transports Parisiens

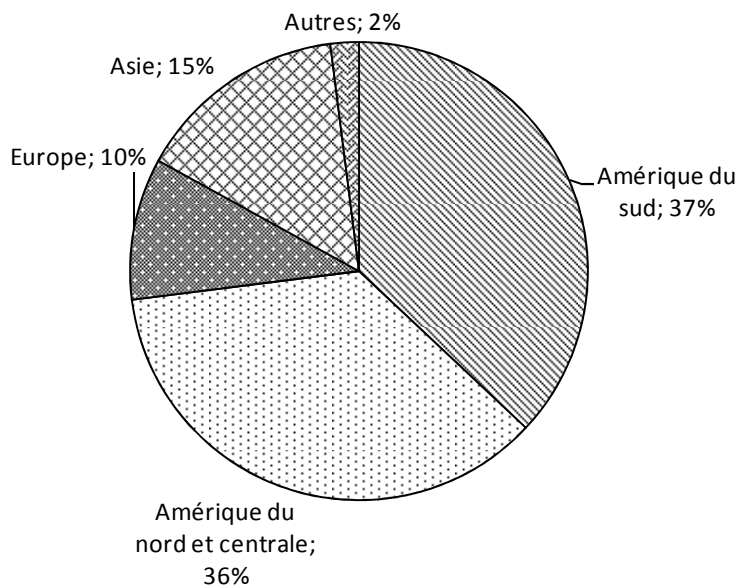


Figure 2 : Répartition de la production mondiale d'éthanol en 2005 (PRIEUR et al. (2007))

Cet éthanol est produit principalement à partir de canne à sucre, de betteraves et de céréales (maïs, blé).

Au Brésil, depuis 2000, l'éthanol connaît une nouvelle expansion du fait principalement de la hausse des cours mondiaux de pétrole et l'introduction de véhicules dits « Flex Fuel Vehicle » (FFV) en 2003. Cette nouvelle technologie qui permet l'utilisation, soit de mélanges, soit de l'éthanol pur ou de l'essence pure, a provoqué une croissance remarquable de la consommation d'éthanol au Brésil. En 2005, la part des véhicules FFV était environ 21% de la flotte de véhicules à allumage commandé. Les projections indiquent que la part des FFV en 2010 représentera 25% de la flotte de véhicules à allumage commandé. Ainsi, la consommation totale d'éthanol « carburant » au Brésil qui était d'environ 13,7 millions de m³ en 2005, atteindra 21,1 millions de m³ en 2010. Le Brésil développe aujourd'hui des stratégies visant à exporter l'éthanol vers des pays comme le Japon, les États-Unis et les pays européens. Avec 2,4 millions de m³ d'éthanol exportés en 2005, les exportations totales d'éthanol atteindront 5,2 millions de m³ en 2010. En effet, sur 320 millions d'hectares de terres arables dont 60 millions d'hectares sont actuellement exploitées pour l'ensemble des cultures et 2,66 millions d'hectares pour la production d'éthanol, le Brésil dispose d'un énorme potentiel de production supplémentaire d'éthanol.

Les Etats-Unis constituent avec le Brésil les plus grands producteurs et consommateurs d'éthanol « carburant » au monde. Mais, la part de l'éthanol dans la consommation des carburants routiers reste très faible aux Etats-Unis (moins de 2%). Cette consommation d'éthanol « carburant » devra augmenter dans les prochaines années avec la nouvelle orientation de la politique énergétique américaine qui comporte un plan de promotion des biocarburants (*Energy Policy Act*). Ce plan prévoit le passage de la production nationale d'éthanol de 12 millions de tonnes en 2005 à 22,5 millions de tonnes en 2012.

En Europe, même si la production et la consommation d'éthanol connaissent une augmentation ces dernières années, elles restent encore très faibles par rapport à celles du Brésil et celles des Etats-Unis. En 2006, la consommation de bioéthanol ne représentait que 16,3% de la consommation totale des biocarburants en Europe, soit environ 1,7 million de m³. L'Allemagne, la France, l'Espagne, la Suède sont actuellement les principaux producteurs européens d'éthanol. L'éthanol, à l'exception de la Suède est très souvent utilisé sous forme d'Ethyl tertio butyl Ether (ETBE) en Europe, cela pour des raisons de spécifications principalement. Toutefois, des programmes de développement de la technologie « *Flex Fuel* » commencent à se mettre en place comme c'est le cas en France avec le E85 (85% d'éthanol et 15% d'essence). La place de l'éthanol dans la consommation européenne de biocarburants pourrait prendre une importance avec la Directive Européenne 2003/30/CE (articles 1 et 3 de la directive).

Des pays émergents tels la Chine, l'Inde et certains pays d'Amérique latine, développent de plus en plus de programmes nationaux en faveur du bioéthanol.

1.2.2 Les huiles végétales et leurs dérivés

L'utilisation des huiles végétales comme combustibles date du néolithique (9000 ans avant J.C.). Leur utilisation dans les moteurs Diesel est plus récente. C'est à l'exposition universelle de Paris de 1900 que la société OTTO alimenta le premier moteur Diesel avec de l'huile d'arachide (GUIBET et *al.* (1997)). Les raisons de l'utilisation des huiles végétales dans les moteurs à l'origine étaient d'ordre stratégique. En effet, c'était une solution très attractive pour les zones coloniales, riches en oléagineux, qui avaient sur place une source d'énergie renouvelable les rendant indépendantes d'approvisionnements problématiques par leur isolement des métropoles. Les études alors menées l'étaient aussi dans le souci de valoriser un carburant dont les caractéristiques se rapprochaient le plus des huiles de pétrole.

Les huiles végétales sont alors utilisées dans des applications spécifiques et de nombreuses recherches furent entreprises entre 1920 et 1950. Plusieurs utilisations et recherches sont entreprises durant la seconde guerre mondiale. Les recherches sont poursuivies dans plusieurs laboratoires jusqu'en 1952. Déjà dans les années 1945, des procédés de traitement de l'huile brute telle la transestérification (pour la production d'esters) étaient préconisés. Mais l'abondance du pétrole et le développement de l'industrie pétrolière dans les années 1950 a réduit l'intérêt pour les carburants alternatifs.

Les recherches sur les huiles végétales sont reprises dans les années 1970 en Europe, aux Etats-Unis et en Afrique (Afrique du Sud notamment) aussi bien par les universités que par les constructeurs (JOHN DEERE, CATERPILLAR, INTERNATIONAL HARVESTER, VOLKSWAGEN, FIAT, MERCEDES...). Cela était lié, d'une part au besoin de diversifier les sources d'énergie de substitution aux produits pétroliers après les crises pétrolières de 1973 et 1978 et au besoin de développer une certaine autonomie énergétique dans l'agriculture. D'autre part, cet intérêt pour les huiles végétales était lié aux besoins de trouver de nouveaux débouchés pour l'agriculture excédentaire en Europe et de trouver des solutions d'approvisionnement des pays en développement dépourvus de pétrole mais possédant un potentiel important de production d'huiles végétales. A cela s'ajouteront par la suite, les préoccupations environnementales dans un contexte de développement durable, concept créé dans les années 1980. Toutes ces recherches ont conduit à un large éventail de données bibliographiques sur les huiles végétales en tant que carburants. La première rencontre internationale sur les huiles végétales « carburants », tenue en août 1982 aux Etats-Unis, a permis de faire le point de l'ensemble de ces résultats de recherche.

Les huiles végétales sont de nos jours utilisées sous deux formes essentielles comme l'indique la figure 1. Elles sont utilisées sous forme pure ou sous forme d'esters méthyliques ou éthyliques (biodiesel). L'utilisation des huiles végétales sous forme d'esters reste toutefois, la plus répandue à travers le monde. Les huiles les plus utilisées sont les huiles de colza, de tournesol, de soja, de coton, de palme, de coprah, de jatropha, d'arachide, de ricin. La figure 3 montre la répartition de la production mondiale d'esters méthyliques d'huiles végétales dans le monde. On peut noter une prédominance de la production européenne.

Si le développement de l'éthanol « carburant » reste faible en Europe, la filière biodiesel connaît un plus grand succès (71,6% de la consommation totale de biocarburants en Europe, soit environ 4,8 millions de m³). Cela s'explique en grande partie par le succès plus important

en Europe de la motorisation Diesel et par l'augmentation de la consommation en gazole ces dernières années. Cette tendance ira croissante. En 2020, la demande en gazole en Europe devrait atteindre 2,5 fois celle de l'essence.

Le biodiesel européen est produit à partir d'huile de colza et de tournesol principalement. L'essentiel de la production européenne de biodiesel est concentrée dans les pays comme l'Allemagne, la France, l'Autriche, l'Italie, le Royaume Uni. Ce biodiesel (norme EN 14214), est utilisé dans des proportions ne dépassant pas 5% dans le gazole. On rencontre cependant des utilisations à des proportions plus élevées (20 à 100%) dans certains véhicules utilitaires.

Pour l'ensemble des biocarburants, la Directive Européenne 30/CE/2003 prévoyait un objectif de 2% de remplacement (calculé sur la base de la valeur énergétique de la quantité totale d'essence et de gazole mise en vente sur le marché à des fins de transport) pour le 31 décembre 2005 au plus tard. Mais en 2006, la part des biocarburants était de 1%. Cette même Directive prévoit un objectif de remplacement de 5,75% d'ici 2010 et 10% à l'horizon 2020. Ainsi, la production européenne de biodiesel pourrait connaître une croissance dans les années à venir à condition que des mesures adaptées soient prises au niveau de chaque pays de l'Union.

Quant à l'huile végétale pure, la directive Européenne 30/CE/2003 autorise l'utilisation de celle-ci dans les cas où son utilisation est compatible avec le type de moteur et les exigences en matière d'émissions. Son utilisation s'effectue ainsi dans des applications de type « circuits courts » dans certains pays européens (Allemagne, Autriche).

Les Etats-Unis et le Brésil, longtemps orientés dans la production d'éthanol « carburant », commencent à s'intéresser depuis ces dernières années au biodiesel. Ce dernier est produit essentiellement à partir de l'huile de soja. Ces deux pays sont respectivement le premier et le deuxième producteur mondial de soja. Au Brésil, 2% de biodiesel est incorporé au gazole. Aux Etats-Unis, le biodiesel est incorporé le plus souvent à 20% dans le gazole (dénommé B20).

En Asie, des pays comme la Malaisie, l'Indonésie, grands producteurs d'huile de Palme, envisagent la production de biodiesel. Il en de même en Inde et en Chine avec l'huile de jatropha³

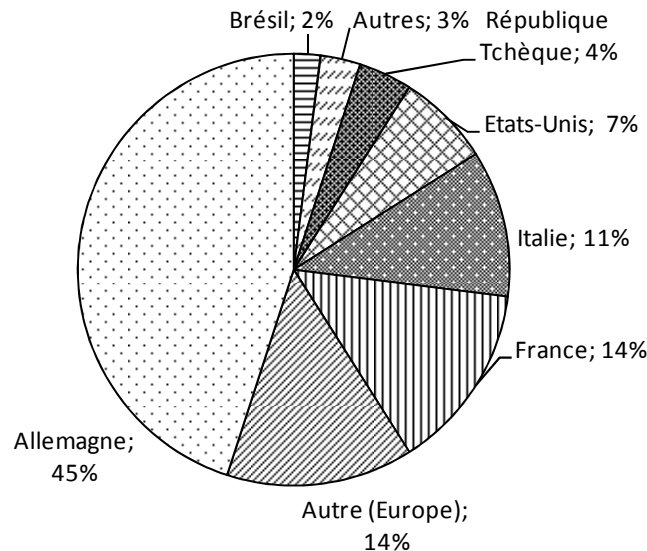


Figure 3 : Répartition de la production mondiale d'ester méthylique d'huile végétale (PRIEUR et al. (2007))

I.3 PERSPECTIVES D'EVOLUTION DES FILIERES BIOCARBURANTS ET BIOCOMBUSTIBLES

I.3.1 Les biocarburants de « seconde génération »

De nombreuses recherches sont aujourd'hui conduites en vue de développer et d'optimiser des procédés de production de bioéthanol, de biodiesel ou d'autres biocarburants à partir de la biomasse lignocellulosique. Le potentiel actuel de la biomasse lignocellulosique est assez important (≈ 6 milliards de tep (énergie primaire) contre 3,7 milliards de tonnes de pétrole consommé en 2006). La production de biocarburants à partir de celle-ci permettrait d'augmenter la masse et leur part dans la production et la consommation totale d'énergie. En outre, il existe une compétitivité moindre avec la filière alimentaire et l'on obtient un meilleur

³ Aussi appelé pourghère, c'est une plante oléagineuse de la famille des Euphorbiaceae. Il est originaire d'Amérique du sud. Son rendement en huile varie entre 200 et 800 kg à l'hectare selon les conditions de culture. Son utilisation comme biocarburant suscite beaucoup d'intérêt du fait de sa résistance et du fait que son huile n'est pas alimentaire.

rendement à l'hectare (valorisation de la plante entière). Les deux principales voies actuellement envisagées sont soit des voies biochimiques, soit des voies thermochimiques.

Le procédé biochimique envisagé, comprend en général un prétraitement de la biomasse suivi d'une hydrolyse enzymatique, d'une fermentation et d'une distillation conduisant à la production d'éthanol cellulosique. Quant aux procédés thermochimiques, la pyrolyse et la gazéification sont les principales voies envisagées. La pyrolyse de la biomasse conduit aux huiles de pyrolyse dont le raffinage donne des carburants (bio-huile, hydrocarbures). La gazéification quant à elle, produit des gaz (CO , H_2 ...) qui, par une synthèse Fischer Tropsch donne des carburants. Ces différents procédés connaissent actuellement certains verrous d'ordre technologique et économique. Pour l'éthanol cellulosique, il s'agit de l'optimisation des opérations de prétraitement et de fermentation, de la rentabilité économique globale de production. Pour la gazéification, il s'agit des difficultés techniques de purification des gaz avant la synthèse, la dispersion et la variété de la matière première, le coût global de production. Enfin, pour la pyrolyse, il s'agit des coûts élevés du raffinage. La plupart des installations actuelles utilisant de la biomasse sont généralement des pilotes de démonstration.

I.3.2 L'hydrogène

L'hydrogène est considéré comme le plus propre des carburants. Il est classifié comme un carburant de troisième génération. Il dégage principalement de la vapeur d'eau lors de sa combustion; il n'accroît pas l'effet de serre. En plus, il est très énergétique. Cependant, deux obstacles majeurs entravent son exploitation actuellement : il faut recourir aux hydrocarbures pour le produire et son caractère explosif pose des problèmes de stockage. En effet, les hydrocarbures assurent actuellement plus de 90% de la production de ce gaz. Contrairement aux énergies fossiles et aux sources comme le vent le soleil, l'hydrogène n'est pas une source primaire. Il est généralement lié à l'oxygène ou au carbone. Il faut donc une source d'énergie pour produire l'hydrogène à partir d'autres composés. Si l'énergie nucléaire constitue une option dans la fabrication d'hydrogène, les polémiques liées à la sécurité des installations nucléaires et au caractère fini des ressources d'uranium constituent un frein à cette option. Il est envisagé de nos jours, la production du biohydrogène à partir de la biomasse ou de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, à partir de l'énergie solaire photovoltaïque. Cependant, la production d'hydrogène à grande échelle à partir de sources renouvelables, à des coûts acceptables, reste encore difficile. Cela constitue un défi dans le développement de cette filière dans les années à venir.

I.4 ENJEUX ENERGETIQUES, ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DES BIOCARBURANTS

I.4.1 Enjeux et aspects énergétiques

La biomasse représente 10 à 14% de la consommation mondiale totale d'énergie, avec une faible part de biocarburants, contre 70% pour les produits d'origine fossile. Devant une forte décroissance des réserves mondiales de pétrole et l'accroissement des besoins en énergie (la nature produit 150 litres de pétrole par seconde, mais on en consomme 150000 litres par seconde), la nécessité de trouver des sources alternatives s'impose. De nos jours, il n'existe aucune solution de remplacement des produits pétroliers ; seules des alternatives de diversification de sources d'énergie sont envisagées afin de réduire leur consommation. A ce titre, les biocarburants se présentent comme une alternative intéressante. Leur part actuelle reste cependant très faible, en particulier dans le secteur des transports, plus grand consommateur de produits pétroliers. En effet, les productions mondiales annuelles d'huiles végétales et d'éthanol sont respectivement de 110,9 millions de tep et 0,0208 millions de tep contre environ 4529 tep de pétrole. Ces productions d'huiles et d'éthanol comprennent les productions destinées aux autres usages (alimentaire entre autre). Les échelles sont donc très différentes mais l'utilisation locale de biocarburants peut être intéressante.

A l'Horizon 2015, l'usage des biocarburants dans les principales zones actuelles de consommation de biocarburants serait un peu plus de 3% de la consommation mondiale de carburants routiers contre 1,3% actuellement.

Les raisons majeures du faible niveau actuel des biocarburants dans la consommation totale d'énergie sont d'une part, la quasi inexistence de cultures dédiées (sauf au Brésil) aux biocarburants et les faibles rendements à l'hectare des principales filières de production. Ils sont de 1 tep/ha pour l'ester méthylique issu de l'huile de colza ou du tournesol, de 1 à 2 tep/ha pour l'éthanol issu des céréales et 3 à 4 tep/ha pour l'éthanol issu de betterave ou de canne à sucre. D'autre part, des contraintes agronomiques empêchent la culture ou réduisent la productivité de certaines matières premières sur certaines terres. Cela limite les superficies disponibles pour des cultures énergétiques.

Le principal défi énergétique actuel des biocarburants se situe dans l'augmentation de leur part dans la consommation mondiale d'énergie au détriment de celle des produits pétroliers. En particulier, les projections sur le développement des biocarburants de seconde et de troisième génération devraient contribuer à cela.

Cet enjeu énergétique des biocarburants reste très variable selon l'échelle considérée. L'enjeu peut devenir très important lorsque nous effectuons une analyse à l'échelle locale. C'est le cas des pays en développement dont le potentiel de production de biocarburants est souvent très important par rapport à leurs besoins énergétiques. Ces aspects seront discutés au point I.5.

L'un des aspects importants de l'analyse énergétique des biocarburants est le bilan énergétique de leur production. Ce bilan peut être effectué essentiellement suivant deux méthodes et varie selon la méthode, la filière, le mode et le contexte de production. Le tableau 1 donne pour différentes filières, le rapport de la quantité d'énergie brute restituée par tonne de produit à la quantité d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'une tonne de ce produit. On désigne par R_1 ce rapport. On peut noter un bilan énergétique favorable aux biocarburants, par cette méthode (le bilan énergétique est encore meilleur surtout lorsque le procédé de production du biocarburant est artisanal).

$$R_1 = \frac{\text{Energie brute restituée}}{\text{Energie non renouvelable mobilisée}}$$

- Energie brute produite : énergie brute disponible par tonne de produit (sans tenir compte des dépenses énergétiques liées à la production)
- Energie non renouvelable mobilisée : dépense énergétique intermédiaire pour la production d'une tonne de produit

Tableau 1 : Bilan énergétique de la production de différents carburants (VALBIOM (2006), VAITILINGOM *et al.* (2006 b))

	Essence	Gazole	Ethanol betterave	HVP* colza	HVP* Tournesol	Biodiesel
R_1	0,873	0,905	2,05	4,5	5,8	2,96

* : filière artisanale

I.4.2 Aspects Environnementaux

De nos jours, les sources et les conséquences de l'augmentation des niveaux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, principal gaz à effet de serre, sont bien identifiées par les experts du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC). Le GIEC, dans ses différents rapports (1990, 1995, 2001, 2007) a établi l'existence des phénomènes de changements climatiques ainsi que le rôle des émissions de gaz à effet de serre dans ces

changements climatiques. Par ailleurs, l'augmentation sans cesse de la consommation mondiale des énergies fossiles est la principale source de l'augmentation des niveaux de dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique. A titre indicatif, la consommation mondiale de pétrole est passée de 66,5 millions de barils par jour en 1990 à environ 87 millions de barils par jours en 2008. Avec une augmentation moyenne annuelle de 1,4 à 1,6%, les prévisions indiquent une consommation d'environ 117,6 millions de barils par jour (figure 4). La recherche de solutions de réduction des niveaux de CO_2 atmosphérique s'impose et s'avère donc urgente.

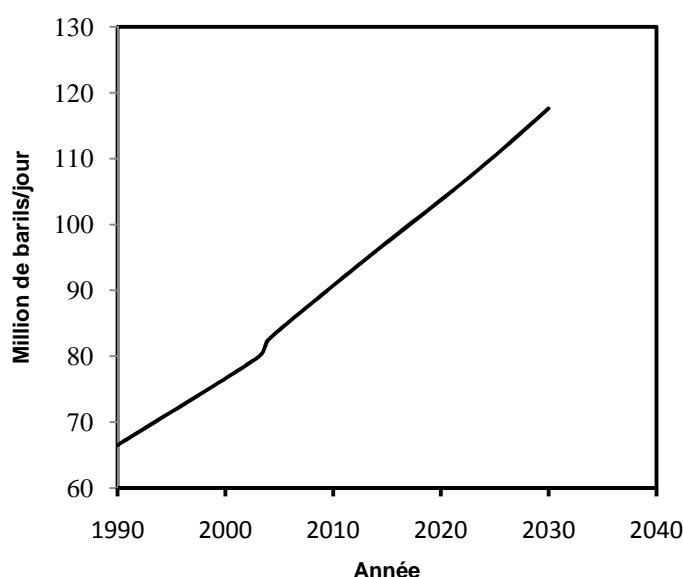


Figure 4 : Consommation mondiale de pétrole à partir de 1990 et prévisions jusqu'en 2030 (EIA (2007))

A l'échelle internationale, le protocole de Kyoto constitue le plan global de réduction des gaz à effets de serre. Pour respecter les objectifs de ce protocole, la plupart des pays signataires misent sur la recherche de solutions de piégeage du CO_2 « fossile » émis (stockage géologique par exemple), le développement de programmes visant à réduire la consommation des produits pétroliers et à augmenter celle de carburants renouvelables tels les biocarburants. L'une des raisons des initiatives en faveur des biocarburants repose sur leur potentiel de réduction des niveaux de dioxyde de carbone atmosphérique. En effet, le terme source de CO_2 émis par la combustion de la biomasse est compensé par le terme puits de CO_2 correspondant à l'élaboration de cette biomasse par la photosynthèse. Pour les énergies fossiles, ce carbone a été stocké depuis plusieurs millions d'années. Un usage de ce carbone fossile, dont la capacité

de recyclage sous une forme durable reste limitée, entraîne à terme un accroissement important de la concentration du CO₂ atmosphérique.

Dans une analyse spécifique à une filière, comme c'est le cas des filières utilisant des engrais azotés ou d'autres produits chimiques il faut tenir compte de la formation éventuelle des composés tels le protoxyde d'azote (N₂O). Le potentiel de réchauffement global (PRG) de ce gaz est 310 fois plus élevé que celui du CO₂. Mais d'une façon générale, le gain en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre peut atteindre 60 à 90 % pour les meilleures filières biocarburants (GUIBET et al (1997), PRIEUR et al. (2007)). La très faible teneur en soufre de la biomasse constitue un avantage supplémentaire en termes d'émissions de dioxyde de soufre.

Les autres émissions polluantes (classiques et spécifiques) dont l'impact sur la qualité de l'air (ozone), la santé (cancers etc.), les sols (pluies acides) est important, restent variables (réduction pour certains gaz et augmentation pour d'autres) quand on passe des produits pétroliers aux huiles végétales.

L'enjeu environnemental de l'utilisation des biocarburants est donc très important. Cependant, seules les technologies de production des biocarburants de première génération sont aujourd'hui bien maîtrisées. Cela donnera une place encore très importante aux produits pétroliers vue la part actuelle des biocarburants. Seul le développement des biocarburants de seconde et de troisième génération permettrait à terme une contribution notable dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Aujourd'hui encore, des réticences existent au niveau de certaines organisations de la société civile en ce qui concerne les enjeux environnementaux de l'utilisation des biocarburants. Les raisons de ces réticences sont multiples : risques de déforestation accrue liés aux besoins d'espace pour les nouvelles cultures énergétiques, perte de la biodiversité etc.

Les pays en développement, bien qu'ils soient concernés par les enjeux environnementaux liés à l'utilisation des biocarburants (réduction des émissions de gaz à effet de serre, menace de la biodiversité, vulnérabilité plus importante aux phénomènes de changements climatiques), ne les vivent pas de la même manière que les pays du nord. Ce point sera abordé dans le point I.5.

I.4.3 Aspects Economiques

Les biocarburants, (bioéthanol et biodiesel), sont longtemps restés très peu compétitifs par rapport aux produits pétroliers (gazole et essence) du fait de leurs coûts de productions 2 à 3 fois plus élevés. De nos jours, avec l'augmentation des cours du pétrole, les coûts de production des biocarburants sont très comparables à ceux des produits pétroliers. Ainsi, dans certains pays comme le Brésil, l'éthanol devient souvent plus compétitif que l'essence. Avec un prix du baril à plus de 130 dollars, le bioéthanol et le biodiesel sont devenus encore plus compétitifs. L'augmentation du prix du pétrole semble être un phénomène irréversible. En effet, la dépendance et la demande actuelle des produits pétroliers sont très croissantes et sans aucune solution véritable de remplacement couplé à des réserves limitées. Les figures 5a et 5b donnent respectivement l'évolution du prix moyen annuel du baril de pétrole entre 1989 et 2007 et l'évolution du prix moyen mensuel du baril de pétrole à New York (avril 2007 à juin 2008 (Le prix du baril a dépassé en juillet 2008 : 145 \$ US)). Cela devrait conduire à une compétitivité croissante des biocarburants face aux produits pétroliers. Mais, une hausse de la demande des biocarburants conduirait à terme à un surenchérissement de leurs coûts et une hausse des coûts des produits alimentaires.

Aujourd'hui, dans la majorité des cas encore, l'utilisation des biocarburants nécessite un soutien important afin de les rendre compétitifs : détaxation totale ou partielle, politique agricole favorable. Au niveau Européen, cela est formalisé par la Directive 2003/96/CE et la Politique Agricole Commune (PAC). Aux Etats-Unis, le *Clean Air Act* de 1970 modifié en 1990, l'*Energy Policy Act* de 1978 et la politique agricole américaine sont les bases de la politique de l'éthanol carburant.

La mise en place d'une politique de vulgarisation des biocarburants à l'échelle locale, implique des recettes non perçues importantes. Néanmoins, le manque à gagner lié à la défiscalisation serait récupéré à plus de 80% par les bénéfices indirects générés en amont et en aval par l'activité de la production et de l'utilisation des biocarburants (BERGANS et *al.*, (1992)) : la création d'emplois, le soutien au monde rural, l'équilibre de la balance commerciale, la création de nouvelles recettes fiscales, les taxes sur le dioxyde de carbone etc. Certains auteurs pensent cependant que ces incidences globales restent faibles, voire négatives dans les pays du nord (GUIBET et *al.* (1997)). Ceci peut être très différent dans les pays du sud.

Enfin, il faut noter que l'analyse effectuée ci-dessus repose sur des filières industrielles. Dans le cas des huiles végétales, une production artisanale orientée vers une utilisation énergétique spécifique locale peut être assez intéressante. Les échelles de calcul deviennent différentes. Les coûts de production sont relativement réduits du fait du faible nombre d'opérations requises pour un usage énergétique. Il faut ajouter à cela, le contexte dans lequel l'on effectue l'analyse économique (cas des pays en développement dépourvus de ressources fossiles). Ainsi, une analyse économique globale de l'utilisation des biocarburants serait hasardeuse compte tenu de sa complexité. En revanche, une analyse économique spécifique à chaque cas est plus judicieuse.

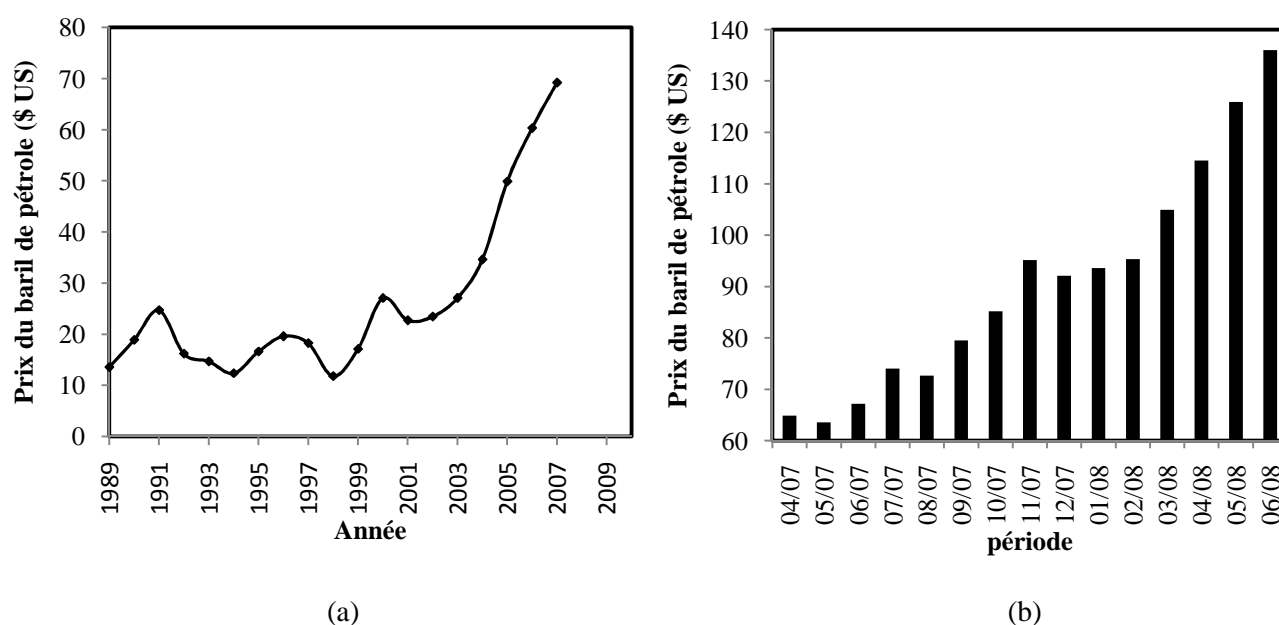


Figure 5 : (a) Prix moyen annuel du baril de pétrole (EIA, 2008) ; (b) Prix moyen mensuel du baril de pétrole à New York (Bourses les échos, 2008)

1.5 PLACE DES BIOCARBURANTS DANS L'ECONOMIE DES PAYS EN DEVELOPPEMENT

Dans les pays en développement, bien que les enjeux environnementaux soient importants, les premiers enjeux de développement des biocarburants sont surtout d'ordre énergétique et économique. En effet, la part de la consommation de pétrole dans ces pays est très faible dans

la consommation mondiale totale. La figure 6 donne une illustration de cette situation, si nous prenons le cas de l'Afrique où la plupart des pays sont des pays en développement (3 à 4% de la consommation mondiale de pétrole).

La consommation d'énergie dans les pays en développement est en grande partie assurée par la biomasse (80 à 90%) pour des applications traditionnelles de cuisine et de chauffage ; la part des biocarburants est négligeable. Des considérations environnementales « démesurées » pour développer les biocarburants dans ces pays seraient très peu réalistes. Les enjeux environnementaux des biocarburants dans ces pays sont surtout locaux. L'utilisation des biocarburants surtout dans les grandes villes des pays en développement peut avoir un avantage dans la réduction de la pollution atmosphérique locale qui y est croissante. Cependant, à l'échelle mondiale, l'incidence reste très négligeable compte tenu des échelles de consommation d'énergie.

La couverture des besoins en énergie, l'accroissement de la production agricole, la croissance économique sont les enjeux réels des biocarburants dans ces pays. En effet, la plupart de ces pays ont une économie qui repose sur l'agriculture dont le développement passe par une mécanisation. Les initiatives de mécanisation du secteur agricole (en amont et en aval) dans ces pays connaissent aujourd'hui un développement très lent du fait du coût élevé de l'énergie fossile. Cela est encore plus remarquable pour les pays enclavés et dépourvus de ressources fossiles. Les prix des produits pétroliers sont très élevés dans les zones rurales de ces pays où le pouvoir d'achat est très faible. Par ailleurs, ces pays disposent en général de potentiels importants de production de biocarburants qui permettraient une mécanisation rapide de l'agriculture. L'une des perspectives de la mécanisation de l'agriculture dans ces pays est l'utilisation de biocarburants en circuit court d'autoconsommation. Cette option offre la possibilité de produire le carburant nécessaire à la production agricole à partir de la production agricole elle-même et cela dans un rapport très intéressant. En effet, l'agriculture peut produire cinq à dix fois l'énergie qu'elle consomme. Ainsi, les unités de production agricoles petites ou moyennes, peuvent produire sur place le produit alimentaire, le carburant nécessaire à la production et le sous-produit (tourteau) utilisable directement en alimentation animale. De telles options contribueraient à couvrir d'une part les besoins en énergie dans ces pays et d'autre part à augmenter leur production agricole. Le problème de compétition entre l'usage alimentaire et l'usage énergétique se pose donc très peu dans ces pays.

Même si l'intérêt des pays du nord pour les biocarburants entre 1980 et 1986 a suscité une prise de conscience dans les pays africains de leurs potentialités de production de

biocarburants, l'engouement pour ces derniers est longtemps resté faible en dehors des pays comme l'Afrique du Sud. Toutefois, certains pays entreprirent des recherches sur les biocarburants à partir des années 1980 : Mali, Burkina Faso, Kenya Malawi etc.

De nos jours des initiatives sont prises aussi bien au niveau local que régional en faveur des biocarburants en Afrique : création de l'Association Africaine pour la Promotion des Biocarburants (AAPB) en 2006, conférences internationales sur les biocarburants en Afrique (Ethiopie, juillet-août 2007 et Ouagadougou Novembre 2007) etc.

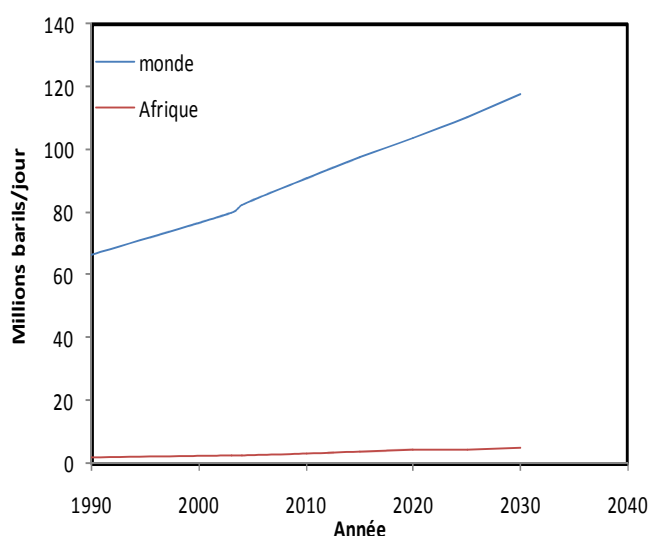


Figure 6 : Consommation mondiale de pétrole et celle de l'Afrique à partir de 1990 et prévisions jusqu'en 2030 (EIA, 2007)

I.6 PRODUCTION DE BIOCARBURANTS AU BURKINA FASO : ETAT DE L'ART

I.6.1 *Situation actuelle*

Les principales matières premières disponibles au Burkina Faso pour la production de biocarburants sont : la canne à sucre et les oléagineux

- **La canne à sucre** : elle est produite par la Société nationale de production de sucre dénommée SOSUCO (Société Sucrière de la Comoé). La production actuelle de canne est destinée à la production de sucre. La mélasse, sous produit, quant à elle, est utilisée par la Société de Production d'Alcool (SOPAL) pour la production d'alcool pharmaceutique ou pour d'autres usages industriels. Aucun usage carburant n'est effectué actuellement.
- **Les oléagineux** : Les principales matières oléagineuses utilisées au Burkina Faso pour la production d'huiles végétales sont la graine de coton (712 707 tonnes de coton-

graine), l'arachide (220 525 tonnes), le sésame (25 060 tonnes) et le karité. Seule la graine de coton fait l'objet d'une exploitation industrielle, semi-industrielle ou artisanale véritable actuellement.

La graine de coton est fournie par les différentes sociétés de fibres et de textiles du Burkina (SOFITEX, SOCOMA, FASO-COTON). De ce fait, la grande partie des unités de production d'huiles végétales sont implantées dans les zones de grande production de coton à proximité des unités d'égrenage. Les productions actuelles de graines de coton sont estimées à plus de 350 000 tonnes.

La plus grande partie de l'huile est produite de façon industrielle. Quelques unités semi-industrielles ou artisanales existent et contribuent de plus en plus à l'augmentation de la capacité de production. L'huile produite est destinée à l'alimentation. Elle est de ce fait produite suivant les procédés classiques de production d'huile de coton alimentaire : nettoyage, décorticage, broyage-laminage de la graine, cuisson, pression on non, extraction totale ou partielle, raffinage (dégommage, neutralisation, lavage, centrifugation, séchage, décoloration, désodorisation, filtration). Ces différentes étapes de production de l'huile alimentaire sont décrites dans le chapitre suivant. Pour les productions artisanales, la pression s'effectue à froid sans décorticage et sans extraction au solvant à la suite de la pression. Aucune utilisation véritable des huiles végétales comme biocarburants à grande échelle n'existe à ce jour. Seules des utilisations isolées existent et des projets de production de biodiesel sont en cours.

1.6.2 Enjeux et perspectives de production de biocarburants au Burkina Faso

Le Burkina Faso, en plus d'être un pays enclavé, ne dispose pas de ressources fossiles connues à ce jour. Son économie subit la hausse et l'instabilité sans cesse des prix des produits pétroliers ainsi que toutes ses conséquences. Avec un secteur industriel en pleine construction, une croissance démographique rapide, un faible accès de la population à l'électricité (1% de taux d'électrification en zone rurale où l'on trouve plus de 85% de la population du pays) les défis énergétiques sont énormes. Les besoins énergétiques, déjà croissants connaîtront une croissance encore plus rapide, avec une augmentation de la consommation des produits pétroliers. Les figures 7a et 7b donnent respectivement l'évolution de la consommation nationale des produits pétroliers (1993-2006) et la part de chaque produit dans la consommation totale de ces produits. Cette consommation est dominée par des produits utilisés pour le transport et les industries.

Une forte dépendance des pétroliers dans de telles conditions, constituent un véritable frein à la réduction de la pauvreté, au développement du secteur privé et au développement économique d'une façon générale. Cela nécessite le développement de filières alternatives afin de réduire la consommation des produits pétroliers.

Par ailleurs, le Burkina Faso, comme les autres pays en développement, a une économie très dépendante de l'agriculture (plus de 85% de la population). Le développement de cette agriculture passe nécessairement par la mécanisation, laquelle dépend des carburants liquides. Les aspects déjà abordés dans le point I.5 sur le rôle des biocarburants dans cette mécanisation reste valables dans le cas du Burkina Faso.

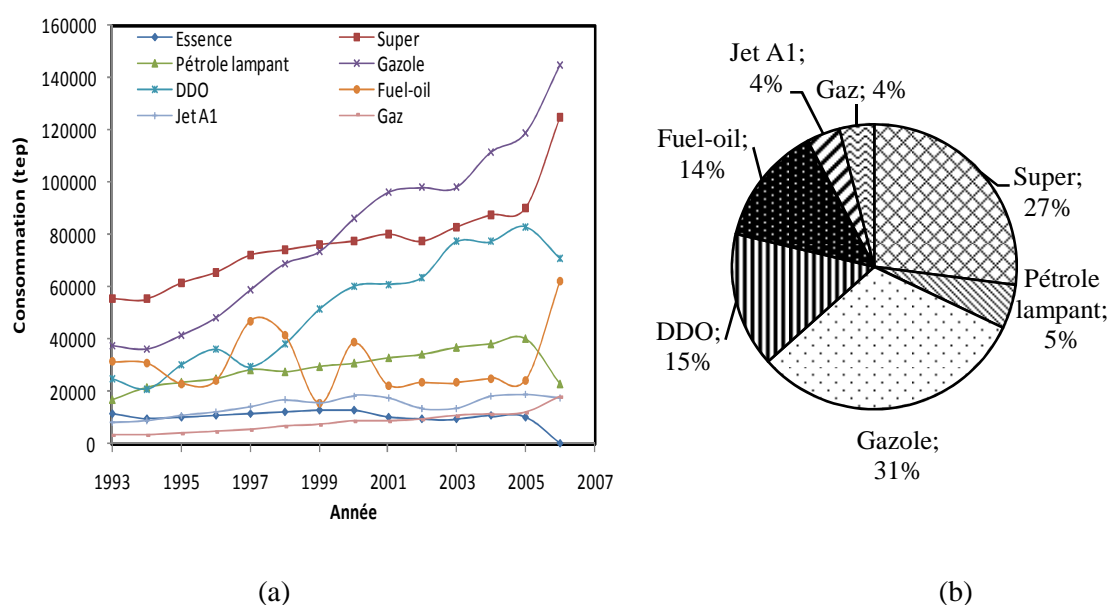


Figure 7 : (a) Evolution de la consommation des produits pétroliers au Burkina Faso; (b) Répartition de la consommation des produits pétroliers au Burkina Faso en 2006 (en tep) ; (MMCE, 2007)

Le potentiel actuel de production de biocarburants à partir des principales matières premières disponibles est donné par le tableau 2. Ce potentiel peut être augmenté mais il reste à déterminer le potentiel réel.

(Le développement de la filière jatropha en particulier, pourrait permettre la recolonisation de certaines terres dégradées).

Tableau 2 : Potentiel actuel de production de biocarburant (source : BLIN (2007))

Matière première	Graine de coton	Huile de jatropha	Canne à sucre
Potentiel actuel en biocarburant	21 000 tonnes	25 000 litres	2 700 000 litres

Les premières recherches et initiatives de production de biocarburants au Burkina Faso ont commencé dans les années 1980 avec la création de la Société de Production d'Alcool (SOPAL) en 1981 et les recherches sur le jatropha à l'Université de Ouagadougou et à l'IRSAT depuis 1983 (OUEDRAOGO, (2000)).

De nos jours, de nombreux projets de production de biodiesel ou d'huiles végétales pures (utilisation en circuit court) à partir de graines de coton ou de jatropha sont en gestation au niveau du secteur privé (Green oil, Dagris, etc.), du public, des institutions et ONG (CIRAD, 2IE, Tii Paalga ...). Il en est de même pour l'éthanol (UEMOA, GTZ, ETAT, BIOENERGY-ITALIA, Coopération danoise etc.)

CONCLUSION

Ce chapitre a permis de situer la place des biocarburants dans le monde et de présenter les enjeux énergétiques, économiques et environnementaux liés à leur production et leur utilisation. Deux principales filières de biocarburants connaissent de nos jours un développement véritable : le bioéthanol (issue de matières sucrées et amylacées), les huiles végétales et leurs dérivés. Ces biocarburants représentent actuellement environ 1,3% de la consommation mondiale des carburants routiers. Les projections sont d'environ 3% à l'horizon 2015. Ces valeurs sont très faibles mais devraient augmenter rapidement avec le développement des filières biocarburants telles les filières de seconde et de troisième génération dans les années à venir.

Les enjeux des biocarburants varient selon que l'on effectue une analyse à l'échelle mondiale ou à l'échelle locale. Ainsi, les enjeux énergétiques et économiques peuvent devenir très importants pour certains pays en développement.

Le cas du Burkina Faso est l'exemple typique des pays en développement où les biocarburants apparaissent presque comme une nécessité.

CHAPITRE II : ETAT DES CONNAISSANCES SUR L'UTILISATION DES HUILES VEGETALES ET LEURS DERIVES COMME CARBURANTS

INTRODUCTION

II.1 PRODUCTION, COMPOSITION ET CLASSIFICATION DES HUILES VEGETALES

II.1.1 Composition et classification des huiles végétales

II.1.2 Production et traitement des huiles végétales

II.2 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES HUILES VEGETALES ET LEUR QUALITE EN TANT QUE CARBURANTS

II.2.1 Caractéristiques chimiques

II.2.2 Caractéristiques physiques

II.2.3 Caractéristiques liées à la combustion

II.3 UTILISATION DES HUILES VEGETALES PURES COMME CARBURANTS DANS LES MOTEURS DIESEL ET LES BRÛLEURS

II.3.1 Performances globales

II.3.2 Emissions polluantes

II.3.3 Endurance

II.3.4 Analyse et synthèse des principales hypothèses sur l'origine des problèmes rencontrés lors de l'utilisation des huiles végétales dans les moteurs Diesel et sur les brûleurs

II.4 ADAPTATION ET MODIFICATION DES MOTEURS ET DES BRÛLEURS

II.4.1 Modification des moteurs

II.4.2 Adaptation des brûleurs

II.5 UTILISATION DES CARBURANTS DERIVES D'HUILES VEGETALES DANS LES MOTEURS ET LES BRÛLEURS

II.5.1 Mélange d'huile végétale et de gazole (ou fioul domestique)

II.5.2 Les esters d'huiles végétales

II.5.3 Les émulsions d'huiles végétales et d'eau

II.5.4 Les produits de craquage d'huile végétale

CONCLUSION

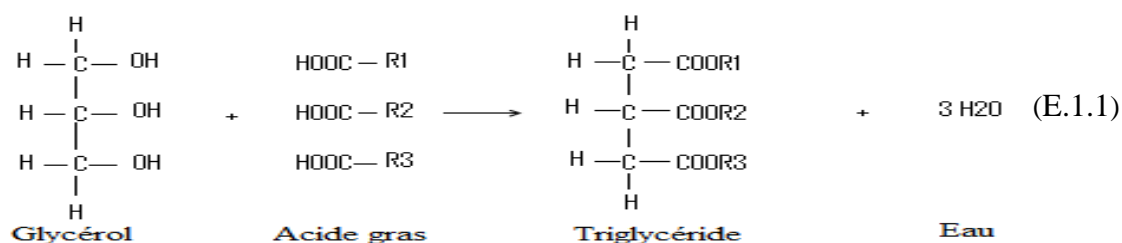
INTRODUCTION

Ce chapitre fait l'état des connaissances sur l'utilisation des huiles végétales comme carburant dans les moteurs Diesel et les brûleurs. Les huiles végétales y sont utilisées sous différentes formes (pures ou transformées) avec adaptation ou non de ceux-ci. Leur comportement global en tant que carburant ainsi que les principaux problèmes rencontrés lors de leur utilisation ont fait l'objet de plusieurs études. Des divergences existent à plusieurs niveaux. Ce chapitre, permet de présenter et de discuter ces questions.

II.1 PRODUCTION, COMPOSITION ET CLASSIFICATION DES HUILES VEGETALES

II.1.1 *Composition et classification des huiles végétales*

Les huiles végétales sont constituées principalement de corps gras (environ 95%). Le reste est un mélange d'acides gras libres, de mucilages, de savons, de stérols, de cires, d'eau, de cendres, d'impuretés... Ces corps gras sont des molécules de triglycérides d'acides gras (triacylglycérol) formées de trois acides gras estérifiés par leur groupe carboxyle à une molécule de glycérol. Ces triglycérides sont formés au cours de réactions de condensation suivant l'équation (E.1.1) :



Où R1, R2, R3 sont des chaînes hydrocarbonées linéaires à nombre pair d'atomes de carbone, compris entre 6 et 22. Les acides gras qui entrent dans la constitution des triglycérides peuvent être saturés ou insaturés. Sur environ 500 acides gras répertoriés dans le monde végétal seulement six (laurique, palmitique, stéarique, oléique linoléique et linolénique) représentent 95 % des acides gras commercialisés (OUEDRAOGO (2000)).

a) *Composition en acides gras des triglycérides*

On distingue quatre grandes familles d'huiles végétales (VAITILINGOM (1992))

- les huiles saturées comprennent :

- Les huiles lauriques (coprah, palmiste...) : Les acides gras qui prédominent (lauriques) sont riches en groupement $C_{12:0}$ (12 atomes de carbone et 0 double liaison).
- Les huiles palmitiques (palme) : Les acides gras dominants sont riches en groupement $C_{16:0}$ (16 atomes de carbone et 0 double liaison).
- Les huiles stéariques (karité) : les acides stéariques sont prédominants et les groupements sont en $C_{18:0}$ (18 atomes de carbone et 0 double liaison).
- **les huiles mono-insaturés** (olive, arachide, colza, pourghère, sésame...) : les acides dominants sont du type oléique $C_{18:1}$ (18 atomes de carbone et une double liaison localisée en C_9). Ces huiles sont dites semi-siccatives (grande tendance à l'oxydation).
- **les huiles di-insaturées ou de type linoléique** (coton, tournesol, soja, maïs...) : les acides gras majoritaires sont riches en $C_{18:2}$ (18 atomes de carbone et 2 doubles liaisons localisées en C_6 et C_9). Ces huiles sont aussi dites semi siccatives
- **Les huiles tri-insaturées ou de type linoléique** (lin, bois de chine...) : les acides gras prédominants (linoléique et éléostérique) sont riches en $C_{18:3}$ (18 atomes de carbone et 3 doubles liaisons localisées en C_3 , C_6 et C_9). Ces huiles sont dites siccatives (tendance très élevée à l'oxydation).

Le tableau 3 donne la composition en acides gras des principales huiles végétales. Cette composition est en général influencée par la variété génétique de la plante, le climat, le type de sol, le lieu de culture, la maturité de la plante, certaines bactéries, les conditions d'extraction et de stockage de l'huile (VANHEMELRYCK (1997)).

b) Autres composés et impuretés contenus dans les huiles végétales

- ***L'eau***

Elle est naturellement présente dans la graine. L'huile brute peut ainsi en contenir à des proportions variables de même que l'huile raffinée. Une teneur en eau élevée de l'huile peut provoquer des réactions d'hydrolyse qui conduisent à la formation d'acides gras libres, de glycérides partielles et de glycérol. Cette eau peut aussi constituer des « pieds » (d'eau) dans les réservoirs lors du stockage. Pour un usage « carburant » des huiles, l'eau naturellement présente ne constitue pas un obstacle majeur. Des études rapportent que l'eau contenue dans l'huile se présente comme un émulsifiant favorisant la vaporisation, la réduction des températures des gaz d'échappement et des NO_x (VANHEMELRYCK (1997) ; FORSON et al. (2004)). Cependant, des teneurs en eau très élevées (cas d'une huile neutre mal séchée par

exemple) dans une huile contribuent à réduire davantage le PCI. Ainsi, certaines normes limitent la teneur en eau de l'huile destinée à un usage « carburant » à 750 ppm.

- ***Les mucilages***

Les mucilages sont un ensemble d'impuretés naturelles de l'huile, partiellement solubles dans l'huile à l'état anhydre, mais précipitées par simple hydratation. Ils sont constitués essentiellement de phospholipides. Ces derniers sont des composés constitués d'une molécule de glycérol estérifiée en 1 et 2 par des acides gras et en 3 par un phosphate. Ils sont presque absents dans les huiles concrètes (palme, coprah, palmiste) tandis qu'ils peuvent représenter 2% dans l'huile de soja. Sa valeur dépend du type de graine et de la technique de pressage (pression à froid⁴ ou à chaud). En effet, la teneur en mucilage de l'huile brute dépend en partie de la température de pressage des graines. Plus elle est élevée, plus la teneur en phospholipides de l'huile est élevée. Ces phospholipides sont polaires (solubilité dans des solvants polaires, hygroscopicité, liaison avec les cations) et ils ont des propriétés émulsifiantes et tensio-actives. Ils déterminent la stabilité de l'huile et augmentent sa teneur en ions métalliques. Ils sont connus pour leur participation à la formation des dépôts dans les moteurs (PRYDE (1982) ; VAITILINGOM (1992)). Des études ont montré la présence de fortes concentrations de phosphore dans les dépôts issus de la combustion des huiles, même à des teneurs en phosphore d'environ 20 ppm dans l'huile (GATEAU (1983)). Sa valeur est limitée à une valeur maximale dans la plupart des spécifications de l'huile végétale « carburant ».

- ***Les stérols et les tocophérols***

Ces composés sont présents en faible quantité dans les huiles. Ils sont constitués de molécules légères, responsables en grande partie des odeurs dans les huiles végétales. Leur présence dans les huiles végétales n'a pas une influence connue sur l'utilisation de celles-ci dans les moteurs ou sur les brûleurs.

⁴ Pression sans passer par l'étape de cuisson. La pression est dite « à chaud » dans le cas contraire

Tableau 3 : Composition en acides gras de quelques huiles végétales ou animales (% masse pour chaque groupement), (WOLF (1968))

Groupe	double liaison	Coprah	Palmiste	Palme	Olive	Arachide	Colza	Coton
C ₄	-							
C ₆	-	1,6						
C ₈	-	9,7	4,0					
C ₁₀	-	6,3	3,0					
C ₁₂	-	45,4	47,0					
C ₁₄	-	18,2	16,0	1,5		0,3		0,8
C ₁₆	-	8,7	8,0	47,1	11,5	9,6	4,8	23,1
C ₁₈	-	1,8	3,0	5,2	2,8	3,7	1,5	2,2
C ₂₀	-			0,5	0,5	1,8		0,3
C ₂₂	-					3,5		
C ₂₄	-					1,6		
C ₁₆	C ₇				0,8	0,1		0,6
C ₁₈	C ₉	6,9	16,0	35,7	75,1	55,0	60,3	17,8
C ₁₈	C ₆ , C ₉	1,8	3,6	9,3	8,5	23,0	21,5	55,0
C ₁₈	C ₃ , C ₆ , C ₉			0,5	0,8	1,4	7,6	0,2
C ₂₀	C ₉						2	
C ₂₂	C ₉			0,2			2,3	

Tableau 3 : suite

Groupe	double liaison	Maïs	Tournesol	Soja	Lin	Suif	Saïndoux
C ₄	-						
C ₆	-						
C ₈	-						
C ₁₀	-					0,2	
C ₁₂	-					4,0	0,5
C ₁₄	-			0,1		32,4	29,6
C ₁₆	-	12,0	6,5	10,5	5,0	22,4	12,0
C ₁₈	-	2,1	3,8	3,9	3,5	0,5	
C ₂₀	-	0,6	0,6	0,7	0,2		
C ₂₂	-		0,8	0,4			
C ₂₄	-						
C ₁₆	C ₇	0,2	0,1	0,1	0,1	3,5	3,0
C ₁₈	C ₉	30,0	28,0	22,0	13,0	38,6	46,3
C ₁₈	C ₆ , C ₉	53,6	59,5	53,3	17,5	1,6	8,5
C ₁₈	C ₃ , C ₆ , C ₉	1,5	0,3	9,0	60,5	0,4	0,7
C ₂₀	C ₉						
C ₂₂	C ₉				0,2		

- **Les sédiments**

La teneur en sédiments détermine la contamination totale de l'huile. Elle dépend de la technique de filtration utilisée, du type de graines, des conditions de transports de l'huile. Sa valeur est donc très variable. C'est un paramètre très important lors d'une utilisation de l'huile comme carburant. En effet, une teneur élevée en sédiments provoquerait une obstruction rapide des filtres ou du circuit d'alimentation en combustible. Une valeur limite est imposée en général.

- **Les cires**

Ce sont des esters d'acides gras et des alcools gras à longue chaîne (pouvant aller jusqu'à 46 atomes de carbone); elles sont présentes naturellement dans certaines huiles (tournesol, olive). La teneur en cires peut varier en fonction de l'origine de la graine et de sa maturité, de la température d'extraction etc. Aux basses températures, elles peuvent boucher les filtres à carburant et les canalisations d'alimentation. On distingue deux catégories de cires selon leur longueur de chaîne. Si celle-ci est inférieure à 42 atomes de carbone, les cires ne cristallisent pas dans l'huile à température ambiante et sont dites non cristallisables. Elles ne sont pas responsables de la mauvaise tenue au froid. En revanche, si la longueur de chaîne est supérieure à 42 atomes, les cires sont alors cristallisables à température ambiante et sont responsables de la mauvaise tenue au froid de l'huile. Des additifs sont utilisés dans les fiouls et les gazoles afin d'éliminer ce phénomène. Ces additifs ne sont pas efficaces dans le cas des huiles végétales, il faut « décirer » ces dernières ou ne pas dépasser des taux limites lors de la production des huiles. La teneur des cires dans les huiles végétales « carburants » ne devrait pas excéder 500 ppm (VAITILINGOM (2006 a)).

- **Les hydrocarbures**

Les huiles végétales contiennent des n-alcanes de C_8 à C_{35} , dont les plus abondants vont de C_{21} à C_{35} . On y trouve aussi de faibles quantités de composés aliphatiques insaturés, des composés aromatiques à faible masse moléculaire (du benzène au tetramethylbenzène) et des composés aromatiques polycycliques (principalement à faible masse molaire). Ces derniers sont présents dans les huiles à des proportions inférieures à 100 $\mu\text{g/kg}$ avec une plus forte proportion de HAP légers. Leur origine dans les huiles n'est pas bien connue, ils peuvent provenir de plusieurs sources dont la pollution atmosphérique, la contamination des sols, la contamination à partir du solvant d'extraction. La présence d'hydrocarbures dans une huile est

plutôt positive en termes de combustion, toutefois, la présence de composés aromatiques et des HAP en quantité notable peut conduire à une augmentation des émissions d'oxydes d'azote et de HAP lors de leur combustion (RAKOPOULOS (2006)).

- **Composés métalliques**

Il existe de nombreux métaux à l'état de traces, généralement liés à des composés organiques. Ce sont notamment le fer et le cuivre qui sont des puissants catalyseurs d'oxydation. L'élimination des phospholipides réduit leur action oxydative.

II.1.2 Production et traitement des huiles végétales

Toutes les graines et tous les fruits contiennent de l'huile. Cependant, la teneur en corps gras varie selon les graines et les fruits. On appelle plantes oléagineuses, celles qui sont cultivées pour leur huile et qui font l'objet d'une exploitation industrielle (VAITILINGOM (1992)). A celles-là s'ajoutent les plantes exploitées pour la production de fibres textiles et qui produisent subsidiairement de l'huile (coton, lin). Il existe de part le monde plus de 2000 plantes oléagineuses. Le tableau 4 présente les principales huiles végétales. La production et le traitement de toutes les huiles végétales comportent les mêmes grandes opérations. Quelques différences peuvent exister selon la nature de la matière première. Par ailleurs, selon l'usage envisagé certaines étapes peuvent ne pas être nécessaires.

a) La trituration

Elle désigne l'ensemble des opérations qui permettent l'obtention de l'huile et du tourteau à partir des graines oléagineuses. Elle se décompose en deux opérations majeures : la pression et l'extraction.

La pression comporte les phases de : séchage, nettoyage, décorticage, broyage-laminage, cuisson et pression. On obtient l'huile brute et le tourteau de pression.

L'extraction quant à elle, consiste à extraire l'huile résiduelle contenue dans le tourteau de pression à l'aide d'un solvant. Le solvant couramment utilisé est l'hexane. Ce dernier se mélange à l'huile d'extraction puis séparée de celle-ci par distillation. Certains procédés industriels d'extraction de l'huile s'effectuent par une extraction totale à l'hexane. Dans ces cas, après la phase de cuisson de la pâte, celle-ci passe à travers une extrudeuse avant l'extraction totale de l'huile à l'hexane. L'hexane est séparé du tourteau issu de l'extraction grâce à un « dessolvantiseur ».

b) Le raffinage de l'huile

L'huile brute peut subir différentes opérations selon la matière première dont elle est issue et l'usage auquel elle est destinée. Ces différentes opérations ont pour but d'améliorer la qualité et la stabilité de l'huile. Les opérations suivantes sont généralement effectuées pour l'huile végétale alimentaire :

- **Le dégomme ou démucilagination**

Il consiste à éliminer les mucilages contenus dans l'huile brute. Le procédé de démucilagination peut être continu ou discontinu. Le principe repose sur la précipitation des composés phosphorés grâce à l'eau pure ou l'eau acidulée. Il est possible aussi d'utiliser des terres de tonsil. Les mucilages sont ensuite séparés par décantation ou par centrifugation avant ou après l'opération de neutralisation.

- **La neutralisation**

Cette opération permet d'éliminer les acides gras libres présents dans les huiles végétales. Elle consiste à transformer les acides gras libres en savons grâce à la soude. Ce savon est séparé de l'huile grâce à un lavage à l'eau, suivi d'une décantation ou d'une centrifugation. On obtient ainsi une huile « neutre ». Des études ont montré qu'une neutralisation sans démucilagination préalable conduisait à des pertes beaucoup plus importantes de triglycérides. Aussi, une séparation des phospholipides, précipités au cours de l'opération précédente, avant l'étape de neutralisation conduit à des pertes importantes. Ces deux opérations sont toutes indispensables pour limiter les pertes lors de ces premières étapes et aussi lors des opérations suivantes. Cependant, les mucilages et les savons doivent être séparés de l'huile en même temps.

- **Le séchage**

L'huile « neutre » obtenue est déshydratée afin d'éliminer l'eau résiduelle issue du lavage. On obtient alors une huile dite « sèche ».

- **La décoloration**

Afin d'éliminer les pigments et certaines matières colorantes de l'huile, on utilise des terres décolorantes (tonsil). Des composés tels le carotène ou la chlorophylle sont éliminés lors de cette opération.

- ***La filtration***

L'huile subit une ou plusieurs filtrations pour éliminer les terres décolorantes et d'éventuelles particules restées après les opérations précédentes.

- ***La désodorisation***

L'huile est portée à une température d'environ 200 °C sous vide. Les substances odorantes, très souvent constituées de matières volatiles, sont alors extraites. Les composés comme les stérols et les tocophérols sont éliminés en grande partie au cours de cette opération.

- ***Le décirage***

Cette opération consiste à éliminer les cires contenues dans l'huile. On distingue les procédés de décirage par :

- refroidissement et filtration ou « winterisation »
- centrifugation
- démucilagination à froid
- refroidissement après neutralisation
- neutralisation partielle et refroidissement

A l'issu de ces différentes opérations de traitement de l'huile, on obtient une huile raffinée. Cette qualité (huile raffinée) est requise pour un usage alimentaire. Cependant, certaines opérations (décoloration, désodorisation...) ne sont pas nécessaires pour un usage « carburant ».

Tableau 4 : Principales huiles végétales (VAITILINGOM (1992))

	Famille	Nom botanique	Nom commun	H/G (%)
Monocotylédones	Graminée	Zea mays	Maïs	
	Palmacée	Cocos nucifera	Cocotier	60
	Palmacée	Elaeis guineensis	Palme et palmiste	20 et 50
	Palmacée	Orbignya speciosa	Babassu	60
Dicotylédones	juglandacée	Juglan regia	Noix	
	Crucifère	Brassica campestris	Colza	41
	papilionacée	Arachis hypogaeasis	Arachide	50
	Linacée	Linum usitatissimum	Lin	38
	Composée	Carthamus tinctorius	Carthame	35
	Euphorbiaceae	Aleurites fordii	Tung	60
	Euphorbiaceae	Ricinus communis	Ricin	49
	euphorbiaceae	Jatropha curcas	Pourghère	30
	Malvacée	Gossypium hirsutum	Coton	36
	Buxacée	Simmondsia chinensis	Jojoba	60
	Sapotacée	Butyrospermum parkii	Karité	30
	Oléacée	Olea europa	Olive	
	Pedaliacée	Sesamum indicum	Sésame	52
	Composée	Heliantus annuus	Tournesol	40
	papilionacée	Glycine max	Soja	25

A : Alimentaire, NA : Non Alimentaire, H/G : Huile/Graine, P : palme, Pa : palmiste

II.2 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES HUILES VEGETALES ET LEUR QUALITE « CARBURANT »

II.2.1 Caractéristiques chimiques

a) Nature des acides gras de l'huile

La nature et les teneurs en acides gras des huiles déterminent pour une grande part leur aptitude à brûler correctement dans un moteur. L'influence de la nature des acides gras sur leur qualité en tant que carburant a été mise en évidence. Les huiles saturées présentent une meilleure qualité de combustion (faible temps d'évaporation, faible délai d'inflammation, moins de dépôts) que les huiles insaturées. La qualité de combustion décroît avec l'insaturation. La teneur en acides gras saturés n'est pas cependant un critère suffisant pour définir la qualité « carburant » d'une huile végétale. Par ailleurs, la nature des acides gras des huiles végétales détermine leur tendance à la polymérisation. Ce phénomène qui intervient le

plus souvent avec les huiles insaturées, peut causer le colmatage des crémaillères pilotant l'injection du carburant.

b) Indice d'iode

C'est le nombre de grammes d'iode fixé par 100 g de corps gras. Il caractérise l'insaturation de l'huile (nombre de doubles et de triples liaisons). Plus l'huile est insaturée, plus son indice d'iode est élevé. Un indice d'iode faible (huile saturée) est favorable à une bonne combustion. Cependant un indice d'iode trop faible peut conduire à des caractéristiques à froid défavorables pour un usage « carburant ». La figure 8 donne les indices d'iodes de quelques huiles végétales.

c) Indice de saponification

C'est la quantité de potasse, exprimée en milligrammes, nécessaire pour saponifier un gramme de corps gras.

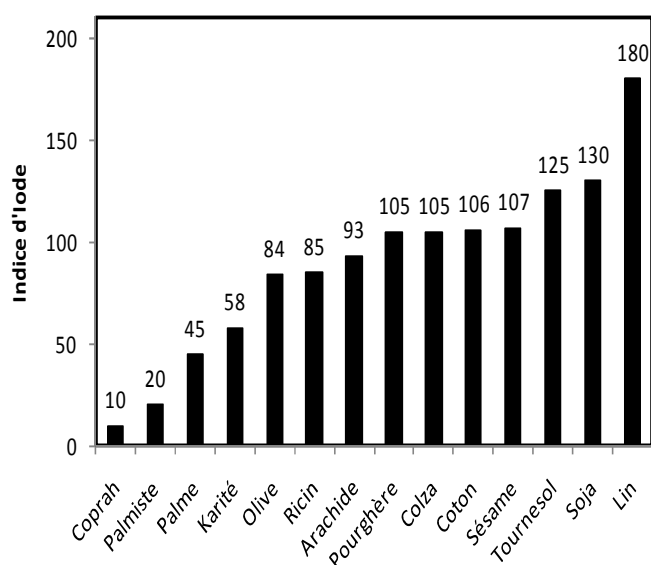


Figure 8 : Indice d'iode de quelques huiles végétales (VAITILINGOM, (1992))

d) Indice d'acide

Il détermine la teneur en acides gras libres et l'altération d'une huile. C'est le nombre de milligrammes de potasse nécessaire pour neutraliser l'acidité d'un gramme de matière grasse. La teneur en acides gras libres d'un corps gras est souvent exprimée par l'acidité. En plus des acides gras libres, naturellement présents dans les huiles (éliminés au cours du raffinage en

général), les corps gras s'altèrent naturellement par hydrolyse en donnant naissance à des acides gras libres et du glycérol. Certaines études rapportent une influence positive de l'acidité de l'huile sur le délai d'inflammation (PRYDE (1982), VAITILIGOM (1992)). Plus l'acidité de l'huile est élevée, plus son délai tend vers celui du gazole. Il faut cependant, tenir compte du caractère corrosif des acides.

e) Indice de peroxyde

Il permet d'apprécier le degré d'oxydation d'une huile. Plus une huile est insaturée, plus elle est sensible à l'oxydation ; Il croît avec l'insaturation de l'huile. Des études indiquent qu'il existe pour certaines huiles, une plage d'indice de peroxyde où l'indice de cétane augmente avec l'indice de peroxyde (VAN GERPEN (1996)).

II.2.2 Caractéristiques physiques

a) Masse volumique

La masse volumique des huiles végétales est supérieure à celle du gazole (environ 10%). Mais cela n'a que peu d'effet sur le comportement du moteur ou du brûleur. Toutefois, le réglage du débit de carburant devra s'effectuer en prenant en compte cette différence de masse volumique et le fait de sa variation avec la température. Les corrélations suivantes sont données respectivement pour le gazole et pour l'huile de colza (VANDER et *al.* (1988); VANHEMELRYCK (1997)) :

$$\rho = 835 - 0,74 * (T - 20) \quad (\text{E.1.2})$$

$$\rho = 916 - 0,67 * (T - 20) \quad (\text{E.1.3})$$

T, température du combustible (°C)

b) Viscosité

Elle dépend en grande partie de la nature du fluide et de sa température. Les huiles végétales et le gazole se comportent tous comme des fluides Newtoniens. Leur viscosité en fonction de la température évolue suivant une loi de type puissance (VANHEMELRYCK (1997)).

$$\mu = AT^B \quad (\text{E.1.4})$$

Avec A et B des constantes (μ en mPas, T en °C)

La viscosité a des incidences sur le fonctionnement du moteur Diesel ou du brûleur, notamment l'injection, l'atomisation, la vaporisation et la combustion. Une forte viscosité du

carburant, comme c'est le cas avec les huiles végétales (10 à 15 fois plus élevée que celle du gazole), provoque des pertes de charge importantes dans la pompe d'injection ainsi que dans les filtres, les injecteurs ou le gicleur. Aussi, on obtient souvent des problèmes de lubrification sur certaines pompes d'injection à basse température entraînant des pertes mécaniques importantes. La forte viscosité des huiles végétales est attribuée à leur masse molaire plus élevée (au moins trois fois plus élevée) par rapport à celle du gazole (SRIVASTAVA et *al.* (2000)). Une réduction de la viscosité des huiles végétales avant l'injection est alors indispensable.

c) Volatilité

Les caractéristiques de volatilité des carburants sont déterminées par leur courbe de distillation, leur tension superficielle et leur point éclair.

• La courbe de distillation

La courbe de distillation d'un produit donne l'évolution du volume du produit évaporé en fonction de sa température ou l'inverse suivant une procédure normalisée (norme ASTM D86-123 ou EN ISO 3405 est utilisée pour les produits pétroliers). Les paramètres caractéristiques de distillation déterminent l'inflammabilité du produit ainsi que sa tendance à la formation de dépôts lors de sa combustion dans le cas des produits pétroliers. De ce fait, les valeurs limites des points caractéristiques de la courbe de distillation sont fixées par des spécifications. La température maximale de distillation pour le gazole se situe autour de 350 °C. Cette méthode pétrolière est inadaptée dans le cas des huiles végétales. Celles-ci ne distillent pratiquement pas à la pression atmosphérique. Elles se comportent comme des corps purs, avec des températures de distillation à la pression atmosphérique proche de 350 °C. Aux environs de cette température, on observe une décomposition thermique des huiles végétales de sorte qu'au cours de l'opération de distillation à la pression atmosphérique, le volume évaporé se situe autour de 10 % du volume total initial (VAITILINGOM (1992) ; GUIBET et *al.* (1997) ; VANHEMELRYCK (1997)). Bien que les conditions de vaporisation dans le moteur Diesel ou dans le brûleur soient différentes des conditions de distillation atmosphérique et que la méthode soit inadaptée pour les huiles végétales, ce comportement donne une tendance de la qualité de vaporisation du « spray » d'huile.

- **La tension superficielle**

C'est l'une des caractéristiques du carburant qui détermine, les critères de transition entre les différents régimes de désintégration du jet de carburant. Une valeur relativement élevée de la tension superficielle est défavorable à l'obtention du régime atomisation. Sa valeur est plus élevée pour les huiles végétales comparée à celle du gazole. Elle décroît avec la température. Les équations E.1.5 et E.1.6 donnent les corrélations entre la température et les tensions superficielles respectives du gazole et de l'huile de coton.

$$\sigma = 22,5 - 0,0813(T - 373) \quad (\text{E.1.5})$$

$$\sigma = 28,1 - 0,0573(T - 373) \quad (\text{E.1.6})$$

T en Kelvin, σ en mN/m

- **Le point éclair**

C'est la température minimale à laquelle les vapeurs émises par un produit, dans des conditions normalisées, s'enflamment en présence d'une flamme. Une valeur minimale est exigée pour limiter les risques d'incendie. Sa valeur n'a pas d'influence particulière directe sur les rendements de combustion ou sur les performances des moteurs et des brûleurs, c'est plutôt un paramètre de sécurité. Pour le gazole, sa valeur est généralement inférieure à 100 °C tandis que pour les huiles végétales, les valeurs de points éclair sont en général supérieures à 200 °C, ce qui est à l'avantage de celles-ci.

d) Les points de trouble et d'écoulement

Ces deux caractéristiques déterminent principalement le comportement à froid du carburant.

Le point de trouble (ou *Cloud Point*, en anglais) est la température à laquelle, un produit refroidi dans des conditions normalisées commence à présenter des cristaux. Sa valeur détermine la tendance du produit à colmater les filtres.

Quant au point d'écoulement (ou *Pour Point* en anglais), il représente la température la plus basse à laquelle un produit refroidi dans des conditions normalisées est susceptible de couler encore. Il détermine les conditions de stockage, de transport, de « pompage » du carburant. Plus une huile végétale est saturée, plus ces deux caractéristiques présentent des valeurs élevées. C'est le cas de certaines huiles saturées (palme, coprah), solides à température ambiante (en général). A l'opposé, des huiles insaturées telles les huiles de colza et de coton ont des points de trouble et d'écoulement relativement bas.

II.2.3 Caractéristiques liées à la combustion

a) L'indice de cétane

Il caractérise l'aptitude du carburant à s'enflammer spontanément dans la chambre de combustion. Plus l'indice de cétane d'un carburant est élevé, plus son délai d'inflammation est court. Il est déterminé conventionnellement pour les produits pétroliers par une méthode normalisée (ASTM D 613) utilisant un moteur à taux de compression variable appelé moteur CFR (Cooperative Fuel Research) DIESEL. Il consiste à déterminer le pourcentage de n-cétane dans un mélange constitué de 2-méthylnaphtalène et de n-cétane qui présente le même délai d'inflammation que le carburant testé dans le moteur CFR et ce, dans des conditions normalisées. Les indices 100 et 0 sont attribués respectivement au n-cétane et au 2-méthylnaphtalène.

L'indice de cétane peut aussi être estimé à l'aide de corrélations utilisant les caractéristiques physico-chimiques (masse volumique et caractéristiques de la courbe distillation) : indice de cétane calculé.

Les corrélations les plus utilisées sont données par les expressions ci-dessous (KLOPFENSTEIN, (1982) ; GUIBET et *al.* (1997)) :

$$ICC = 454,74 - 1641,416\rho_{15} + 774,74\rho_{15}^2 - 0,554T_{50} + 97,803(\log T_{50})^2 \quad (E.1.7)$$

$$ICC = 45,2 + 0,0892(T_0 - 215) + (0,131 + 0,901B)(T_{50} - 260) + (0,0523 + 0,420B)(T_{90} - 310) + 0,00049[(T_0 - 215)^2 - (T_{90} - 310)^2] + 107B + 60B^2 \quad (E.1.8.)$$

Avec :

$$B = \exp[-3,5(\rho_{15} - 0,85)] - 1$$

T_{10} , T_{50} , T_{90} les températures respectives à 10%, 50% et 90 % de produit distillé.

ρ_{15} , la masse volumique à 15°C (kg/l)

Des études sur des esters d'acides gras ont montré qu'il existe une corrélation entre l'indice de cétane et le nombre d'atomes de carbone, le nombre de double liaisons (KLOPFENSTEIN (1982) ; KRISNANGKURA (1986)). Ces corrélations montrent que l'indice de cétane augmente avec la saturation de l'huile. Ce même résultat a été obtenu avec les huiles végétales (FREEDMAN et *al.* (1990) ; VAITILINGOM (1992)).

La mise en œuvre de la procédure normalisée, utilisée pour les produits pétroliers, n'est pas toujours strictement possible, voire inadaptée avec les huiles végétales. Il en est de même

pour les corrélations utilisées (distillation quasi impossible). Ainsi, la mesure des délais d'inflammation dans des moteurs ou des chambres spécifiques est très souvent effectuée dans le cas des huiles végétales (moteurs MWM, BASF ou chambres à volume constant ; (VAITILINGOM (1992), KNOTHE (2003)). Les indices de cétane sont déduits grâce à des corrélations entre le délai d'inflammation et l'indice de cétane. Ces corrélations sont discutées dans la littérature (HEYWOOD (1988)).

Les indices de cétane obtenus pour la plupart des huiles végétales se situent entre 29 et 43 contre 45 à 55 pour le gazole ou le FOD. Toutefois, la mesure de ces délais dépend des conditions de fonctionnement du moteur. En effet, des conditions de température supérieure à 500°C conduisent à des délais d'inflammation des huiles végétales et du gazole quasi-identiques. Cela pose le problème de la pertinence de la caractérisation des huiles végétales par leur indice de cétane, déterminé suivant des méthodes pétrolières.

b) Le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI)

Il détermine la consommation en carburant et en grande partie le taux de dégagement de chaleur ainsi que le rendement du moteur ou du brûleur. Les valeurs de PCI des huiles végétales sont inférieures à celle du gazole. L'écart entre les PCI massiques des huiles végétales et celui du gazole est de l'ordre de 15 % (GUIBET et *al.* (1997)). Cependant, en raison de la masse volumique élevée des huiles végétales, leur PCI volumique est en moyenne inférieure de 5 à 6 % à celui du gazole.

Une bonne indication du PCI massique des huiles végétales peut être obtenue en utilisant la corrélation suivante :

$$PCI = \frac{393,6 + 102,2y - (111,2 + 102,2y) \frac{x}{1 + y/2}}{12 + 1,008y + 16x} \quad (E.1.9)$$

Avec CH_yO_x désignant la formule générale de l'huile (MARTIN, (1989))

c) Le résidu de carbone Conradson

Il est souvent utilisé pour caractériser la tendance des carburants pétroliers à provoquer des dépôts au nez des injecteurs et l'encrassement des chambres de combustion. Les huiles végétales ont des valeurs de résidu Conradson souvent plus élevées que celui du gazole. Cependant, les conditions de détermination du résidu Conradson sont différentes du processus de formation des dépôts lié à la combustion des huiles végétales. Ainsi, sa mesure ne permet

pas d'évaluer la tendance des huiles végétales à provoquer la formation des dépôts. Des huiles végétales avec des valeurs de résidu plus élevées ne provoquent pas nécessairement plus de dépôts que des huiles dont les valeurs de résidu sont plus faibles (VAITILINGOM (1992)).

Tableau 5 : Quelques caractéristiques physico-chimiques du gazole et des principales huiles végétales utilisées comme carburants (GOERING, et al. (1982) ; VAITILINGOM (1992) ; RAMDHAS et al. (2004) ; RAKOPOULOS et al. (2006) ; MURUGESAN (2008))

Huile	ρ à 20 °C	FP	IC	RC	PCI	v à 20 °C	PT
gazole	836	93	50	0,08	43800	3 à 7,5	<-5
Coton	921	243	35-40	0,49	36780	73	-1
Palme	915	280	38-40	0,42	36920	95-106	31
Coprah	915	-	40-42	-	37100	30-37	20-28
Colza	915	320	32-36	0,50	37400	77	-11
Tournesol	925	316	35-37		37750	55-61	-5
Soja	920	330	36-38	0,54	37300	58-63	-4
Arachide	914	258	39-41	0,50	39330	85	9
Pourghère	920	240	45	1,31	38850	55	3
Lin	940	241	35	-	39307	45-50	1,7
Maïs	915	277	38	-	39500	60-64	-1,1

L'analyse des propriétés physico-chimiques des huiles végétales révèle l'importance de celles-ci sur leur comportement en tant que carburant. On peut noter des écarts plus ou moins importants entre certaines caractéristiques des huiles végétales et celles du gazole (Tableaux 3 et 5). Ces écarts sont à la base de la plupart des différences de comportement observées entre les huiles végétales et le gazole dans certaines conditions.

Si certaines caractéristiques varient peu pour un type d'huile donnée (viscosité, masse volumique, acides gras, etc.), d'autres sont très variables (indice d'acide, phosphore etc.) et peuvent avoir des incidences notables sur le fonctionnement du moteur ou du brûleur.

Vu les spécificités des huiles végétales, leur comportement dans les moteurs Diesel et les brûleurs présentent certaines particularités. Le point II.3 fait l'analyse des résultats de la littérature, sur le comportement des huiles végétales et leurs dérivés dans les moteurs et sur les brûleurs en termes de performances, d'émissions polluantes et d'endurance. Ces comportements sont liés à la nature des moteurs ou des brûleurs. La description des moteurs Diesel et des brûleurs est donnée en Annexe A et dans le chapitre II de la partie II.

II.3 UTILISATION DES HUILES VEGEETALES PURES COMME CARBURANTS DANS LES MOTEURS DIESEL ET LES BRÛLEURS

II.3.1 Performances

a) Démarrage

Il faut distinguer ici le démarrage à froid (démarrage après un long temps d'arrêt) et le démarrage par temps froid (conditions de faible température ambiante). Dans des conditions de température ambiante normale, le démarrage à froid aux huiles végétales reste aisé dans la plupart des cas avec les huiles insaturées. Les huiles saturées par contre, sont solides à la température ambiante normale. Un préchauffage est indispensable pour permettre un démarrage à froid ou même à chaud dans ces conditions.

Par temps froid, en plus des huiles saturées, certaines huiles végétales présentent des difficultés lors du pompage compte tenu des phénomènes de cristallisation des acides gras saturés contenus dans ces huiles et de l'augmentation de la viscosité. Un préchauffage de l'huile est indispensable pour obtenir un démarrage aisé dans ces conditions.

Dans les brûleurs (petite puissance), le démarrage à l'huile pure reste très difficile sans un préchauffage de celle-ci avec des réglages spécifiques (augmentation de la pression de pulvérisation) (VAITILINGOM et *al.* (2006 b). Nous avons pu mettre cela en évidence lors de nos essais.

b) Couple et puissance

Les résultats sont variables. Certaines études s'accordent sur une faible baisse de couple et de puissance (environ 10%) avec les huiles végétales comparées au gazole (KAUFMAN et *al.* (1981) ; VANHEMELRYCK (1997), ALTIN et *al.* (2001)). Cela serait lié selon ces auteurs au fait que le PCI des huiles végétales est inférieure à celui du gazole. D'autres études ont montré toutefois, que la puissance ou le couple restent inchangées, avec parfois une augmentation de l'ordre de 5 à 10% lorsque les huiles végétales sont utilisées selon des réglages particuliers du moteur (avance à l'injection, préchauffage de l'huile, augmentation de la pression d'injection, suralimentation du moteur etc.), (PISCHINGER et *al.* (1981) ; AMBA et *al.* (2003) ; VAITLINGOM (2006)). La disparité de ces résultats réside dans la variété des moteurs et des conditions de fonctionnement des moteurs utilisés ainsi que dans la variété des caractéristiques des huiles utilisées.

En effet, certaines pompes d'injection ne permettent pas une bonne injection de l'huile végétale. Cela peut entraîner des pertes de puissance. De même, une viscosité plus ou moins

élevée de l'huile peut conduire à des pertes de puissances plus ou moins importantes selon la nature des pompes et selon la perméabilité des filtres. Avec les pompes en lignes on obtient un mauvais remplissage des pistons de la pompe dû à la viscosité élevée des huiles. Cela conduit à une puissance maximale plus faible qu'au gazole. Avec les pompes rotatives on obtient un meilleur rendement volumétrique conduisant à une puissance maximale plus grande qu'au fioul.

c) Consommation spécifique

On note une consommation spécifique plus élevée avec les huiles végétales comparées au gazole compte tenu de la surconsommation volumique (WAGNER *et al.* (1982); TAHIR *et al.* (1982); JOHANSON *et al.* (1982)). Cette surconsommation volumique peut atteindre 8% (VAITILINGOM, 2006 a) compte tenu du PCI volumique plus faible des huiles végétales. Il est souvent plus intéressant de comparer les huiles végétales et le gazole en termes de consommation en utilisant la notion de consommation spécifique effective corrigée (VANHEMELRYCK (1997)).

$$CSE_{corr} = CSE \left(\frac{PCI_{m,H}}{PCI_{m,G}} \right) \quad (E.1.10)$$

CSE_{corr} : CSE corrigée

$PCI_{m,H}$: PCI massique de l'huile

$PCI_{m,G}$: PCI massique du gazole

CSE_{corr} varierait entre -10 et +10% par rapport à celle du gazole.

d) Combustion

Les délais d'inflammation sont plus longs avec les huiles végétales étant donné leurs indices de cétane plus faibles que celui du gazole, (BARANESCU (1982) ; VAITILINGOM (1992); NWAFOR *et al.* (1996); VANHEMELRYCK (1997); NARAYANA *et al.* (2006)). Néanmoins, les écarts entre ces délais et ceux du gazole ne sont pas aussi élevés malgré les écarts souvent importants entre les indices de cétane. D'autres études au contraire, ont trouvé des délais d'inflammation plus courts avec les huiles végétales comparées au gazole (FORT *et al.* (1982) ; JALINIER (1988)). La disparité de ces résultats pourrait résider dans les conditions de détermination différentes de ces délais d'inflammation. Pour des températures supérieures à 500°C, les huiles végétales peuvent avoir les mêmes caractéristiques d'évaporation et les mêmes délais d'inflammation que le gazole (VAITILINGOM (1992)). Ainsi, selon les conditions dans lesquelles ces délais sont mesurés, les écarts peuvent être plus

ou moins importants. Les durées de combustion quant à elles, sont comparables, avec une combustion moins brutale des huiles végétales comparées au gazole, (HIGELIN (1992)).

II.3.2 *Emissions polluantes*

Les résultats sur les émissions polluantes liées à la combustion des huiles végétales ainsi que la description des phénomènes mis en jeu sont très variés. Cela est dû à la diversité de la qualité des huiles végétales utilisées et aux conditions de fonctionnement variées des moteurs ou des brûleurs. Les résultats sur la combustion des huiles végétales dans les brûleurs restent rares. En effet, les comparaisons sont généralement faites entre un gazole avec des spécifications standards et des huiles végétales de qualité « arbitraire » dans des conditions de fonctionnement défavorables aux huiles végétales.

Les émissions polluantes à l'échappement sont classifiées en deux catégories : les polluants dits « classiques » (réglementés dans le monde depuis 1970) et ceux dits « spécifiques » dont les niveaux d'émissions sont en général faibles mais qui font l'objet d'une attention particulière compte tenu de leur caractère toxique ou leur effet néfaste sur l'environnement. On a aussi les polluants apportés par les impuretés et les additifs.

a) Les polluants dits « classiques »

- Le monoxyde de carbone (CO)

Le mécanisme conduisant à la formation du CO fait intervenir essentiellement des hydrocarbures, des radicaux hydrocarbonés, et les radicaux OH° , O° , H° . La température du milieu réactionnel, la concentration en radicaux libres (O° , OH° , H°) et la richesse jouent un rôle primordial dans la vitesse des réactions intervenant dans le mécanisme de formation du CO. Plusieurs études ont montré l'influence de la température sur la formation du CO et le taux de conversion de celui-ci en CO_2 (FARAVELLI *et al.* (2003); DUPONT *et al.* (2003))

Les hétérogénéités de richesse dans chaque cylindre et entre les cylindres, l'oxydation partielle des hydrocarbures dans la tubulure d'échappement sont les causes principales des émissions de CO dans le moteur Diesel. Les émissions de CO, observées avec les huiles végétales pures sont en général plus élevées que celles du gazole selon certaines études. Cette augmentation peut atteindre 50 à 100% (HEMMERLEIN *et al.* (1991), MURAYAMA (1994); VANHEMELRYCK (1997), SENDZIKIENE (2006)). Elle serait le résultat d'une mauvaise combustion de l'huile végétale liée à sa viscosité élevée. D'autres auteurs montrent que l'on peut obtenir des niveaux de CO proches ou inférieurs à ceux du gazole en

réchauffant l'huile végétale (60 à 70 °C) (BARI *et al.* (2002) ; KALAM (2004)) ou en effectuant un choix optimal de l'avance à l'injection (NWAFOR *et al.* (2000) ; BARI *et al.* (2003) ; ROBIN (2007)). Cela confirme l'effet bénéfique d'une bonne atomisation et de la qualité du mélange air-huile.

Les observations faites sur le moteur Diesel en termes d'émissions de CO avec les huiles végétales restent valables pour les brûleurs dans des conditions de réglages standards au fioul domestique. Cependant, le préchauffage et des conditions de réglages spécifiques conduisent à des niveaux de CO comparables à ceux du gazole (HOLT (2004) ; VAITILINGOM, (2006 a))

- Les oxydes d'azote

Il s'agit principalement des NO_x (monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO₂)) et l'oxyde nitreux (ou protoxyde d'azote (N₂O)). Le NO et le NO₂ jouent un rôle important dans la pollution atmosphérique (pluies acides, irritation, précurseurs d'ozone troposphérique). Quant au N₂O, il était considéré comme inoffensif il y'a quelques années mais de nos jours, il lui est reconnu un rôle important dans le réchauffement de la terre par effet de serre (potentiel de réchauffement global = 310). Des trois oxydes d'azote, seul le NO est susceptible de se former en quantité importante aux conditions rencontrées dans le moteur Diesel (GUIBET *et al.* (1997)). L'oxydation de NO en NO₂ se produit dans les zones de refroidissement des gaz en présence de l'oxygène (O₂) mais elle est cinétiquement limitée. Ainsi, le NO₂ peut se former par oxydation du NO lors de l'échappement jusqu'à ce que l'équilibre de la conversion soit atteint : le rapport [NO₂]/[NO] est de l'ordre de 0,1 à 0,2. Le protoxyde d'azote (N₂O) peut se former en faibles quantités lors des traitements catalytiques des gaz d'échappement (PRINGENT *et al.* (1989)).

Il existe trois mécanismes identifiés à ce jour conduisant à la formation du NO lors de la combustion : le mécanisme du « NO précoce », le mécanisme du « NO du combustible », et le mécanisme du « NO thermique ». De ces trois mécanismes de formation du NO, c'est le mécanisme du « NO thermique » dit de Zeldovich qui est prépondérant lors de la combustion dans un moteur Diesel (GUIBET *et al.* (1997)). Ce mécanisme fait intervenir l'azote et l'oxygène de l'air, réagissant l'un et l'autre sous forme atomique et moléculaire, dans la zone des gaz brûlés, en aval du front de flamme. Les équations (E.1.11), (E.1.12) et (E.1.13) résument les équations qui conduisent à la formation du « NO thermique ».



(ZELDOVICH (1946) ; LAVOIE *et al.* (1970)).

Les constantes de réaction (k) des trois réactions sont de la forme :

$$k = AT^\beta \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (E.1.14)$$

Avec A, et β des constantes et T, la température. Les constantes A et β des différentes réactions sont données dans la littérature HEYWOOD (1988)).

E_a : Energie d'activation

R : Constante des gaz parfaits

T : Température

Le taux de formation du NO est donné par l'équation (E.1.15) :

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1^+[O][N_2] \frac{1 - [NO]^2 / (K[O_2][N_2])}{1 + k_1^-[NO] / (k_2^+[O_2] + k_3^+[OH])} \quad (E.1.15)$$

$$K = (k_1^+ / k_1^-) / (k_2^+ / k_2^-)$$

k_i^+ désigne la constante de la réaction i (avec i les réactions des équations E.1.11 à E.1.13) de la gauche vers la droite et k_i^- , la constante de la réaction inverse.

[O], [O₂], [N₂], [NO], [OH], les concentrations respectives des espèces O, O₂, N₂, NO, OH.

La vitesse de formation du NO « thermique » est donc régie principalement par la température, les concentrations en oxygène et en azote (atomique et moléculaire) et la concentration en radicaux OH. Les émissions de NO_x, observées avec les huiles végétales, sont généralement inchangées ou plus faibles que celles observées avec le gazole (RAKOPOULOS (2006) ; McCORMICK (2003) ; HEMMERLEIN *et al.* (1991) ; VANHEMELRYCK (1997) ; CROOKES *et al.* (1997) ; ALTIN (2001) ; SILVIO *et al.* (2002) ; VAITILINGOM (2006)). Cela serait dû à des pics de températures, dans la chambre de combustion, plus faibles ou à la teneur plus faible en composés aromatiques (précurseurs des NO_x) des huiles végétales. D'autres études montrent au contraire, des émissions de NO_x plus élevé comparées au gazole (BARI *et al.* (2002, 2003) ; KALAM *et al.* (2004)). Cela est attribué aux dépôts dans la chambre de combustion qui provoqueraient une augmentation de sa température (faible conductivité des dépôts) et à l'oxygène contenu dans l'huile végétale.

Par ailleurs, la teneur en NO_x dans les gaz d'échappement croît linéairement avec la baisse de l'indice de cétane (CUNNINGAM et al. (1990) ; YAKUP et al. (2003)). En effet, des longs délais conduisent à une phase de combustion rapide plus longue, phase au cours de laquelle les NO_x sont formés majoritairement. Avec des indices de cétane relativement bas, il est possible d'observer des émissions de NO_x plus élevées avec les huiles végétales que le gazole dans certaines conditions.

Dans les brûleurs, les NO_x restent très comparables si les conditions de réglages sont adaptées aux huiles végétales (HOLT (2004) ; VAITILINGOM, (2006 a)).

- Les hydrocarbures imbrûlés (HC)

Ils désignent l'ensemble des composés hydrocarbonés retrouvés dans les gaz d'échappement et constitués des composés du carburant lui-même et des produits issus de réactions complexes. On regroupe souvent sous la même appellation les produits d'oxydation incomplète (aldéhydes, cétones, acides organiques etc.). Les sources de rejets d'hydrocarbures imbrûlés sont multiples :

- le coincement de la flamme au voisinage des parois (*quenching*), ce phénomène intervient peu sur les moteurs modernes (LORUSSO et al. (1981))
- le piégeage par les dépôts de combustion
- la pénétration du combustible dans les interstices et volumes « morts » au voisinage du piston et de la culasse
- la transformation chimique du combustible qui a échappé à la combustion.
- l'adsorption et la désorption des hydrocarbures dans le film d'huile moteur (GATELLIER et al. (1992))
- La transformation chimique du carburant ayant échappé à la combustion et qui se retrouve dans les gaz d'échappement.

D'autres paramètres liés au déroulement de la combustion, les paramètres d'ordre géométrique, aérodynamique et thermique peuvent avoir une influence sur les émissions des HC.

Les niveaux d'émissions des HC dans les produits de combustion, lorsque les huiles végétales sont utilisées dans les moteurs ou les brûleurs, sont en général plus élevés que ceux observés avec le gazole (HEMMERLEIN et al. (1991) ; SILVIO et al. (2002); RAKOPOULOS et al. (2006); VAITILINGOM (2006 a)). Les causes des émissions de CO recoupent en partie celles

qui provoquent la formation des HC. Tout comme le CO, l'extinction de la flamme à certains endroits (parois, volumes morts...), la présence de zones trop riches (mauvaise pulvérisation) entraîne la formation plus élevée des HC. Par ailleurs, lors de la pyrolyse et l'oxydation des huiles végétales, précédant leur combustion, plusieurs composés hydrocarbonés peuvent se former en quantité relativement importante (aromatiques, alcanes, alcènes, dioléfines) (SCHWAB *et al.* (1987)). Ces composés peuvent se retrouver dans les produits de combustion. De plus, les risques de dépôts plus élevés et de forte pénétration des huiles végétales pourraient favoriser la formation des HC.

Il est à prendre en compte la spécificité de la technique couramment utilisée pour déterminer la teneur en HC totaux (*Flamme Ionization Detector* : FID). Cette technique a été optimisée pour la moyenne des hydrocarbures rencontrés dans les émissions du gazole et non ceux issus de la combustion des huiles végétales et leurs dérivées (SCHOLL *et al.* (1993)). Il peut en résulter des disparités entre les résultats d'émissions en HC des huiles végétales entre elles et avec le gazole en plus des conditions de réglages spécifiques. Ainsi, certaines études indiquent des niveaux d'émissions des HC plus faibles, relevés avec les huiles végétales, comparés au gazole (VANHEMELRYCK (1997) ; KALAM *et al.* (2003, 2004)).

- *Les particules*

C'est un ensemble de « grains » de suie de très faible diamètre (0,1 à 0,3 μm pour la majorité) et constitués d'une fraction soluble appelée SOF (*Soluble Organic Fraction*) et d'une fraction insoluble dite « fraction sèche ». Ils sont issus principalement de la pyrolyse et de l'oxydation des produits et se retrouvent dans les produits de combustion. Les SOF sont composés d'hydrocarbures lourds (aliphatiques, aromatiques et polynucléoaromatiques) tandis que la fraction insoluble est composée d'acide sulfurique et de résidu solide qui constitue la suie véritable. La toxicité des grains de suie suscite une attention particulière sur les niveaux d'émission des particules. Leur inhalation peut se révéler dangereuse pour les voies respiratoires (DOCKERY *et al.* (1992, 1994)). La répartition entre les différents composants des particules varie en fonction des caractéristiques du carburant (teneur en soufre, comportement lors de la combustion), des conditions de fonctionnement (faible ou forte charge), de la conception et du réglage du moteur. Dans les meilleures conditions de réglage, les niveaux d'émission de particules sont en général favorables aux huiles végétales comparés au gazole pur (KALAM *et al.* (2004) ; RAKOPOULOS (2006) ; VAITILINGOM *et al.* (2000)), en raison de l'absence de soufre dans les huiles végétales.

b) Les polluants « spécifiques » et les polluants apportés par les impuretés

Certains produits rencontrés dans les gaz d'échappement ne sont pas en général réglementés mais font l'objet d'une attention particulière compte tenu de leur toxicité ou de leur impact environnemental. Ce sont les aldéhydes, les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et certains hydrocarbures spécifiques tels le benzène, le buta-1,3-diène. Le dioxyde de carbone (CO₂), les anhydrides sulfureux et sulfuriques, font aussi partie de ces polluants spécifiques.

- Les aldéhydes

Ils sont parmi les composés organiques oxygénés les plus abondants rencontrés dans les produits de combustion issus des moteurs Diesel ou des brûleurs et les plus gênants (irritation). Ils sont d'autant plus gênants que leur masse molaire est faible et le nombre de doubles liaisons élevé. Les teneurs maximales admises lors d'une exposition continue sont pour le formaldéhyde, l'acétaldéhyde et l'acroléine respectivement de 2 ppm, 100 ppm et 0,1 ppm (MORIN (1999)). Ils sont formés par des processus d'oxydation lente comprenant les étapes suivantes :



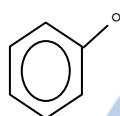
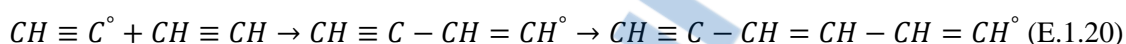
Quatre aldéhydes (formaldéhyde, acétaldéhyde, acroléine, butyraldéhyde) représentent 80% des émissions totales d'aldéhydes. L'existence de chaînes carbonées insaturées dans la molécule d'huile végétale est un facteur favorable à la formation d'aldéhyde de toute nature (MORIN (1999)). Par ailleurs, pendant les phases de pyrolyse et d'oxydation des huiles végétales, les aldéhydes sont parmi les produits qui se forment majoritairement. Ces derniers peuvent se retrouver dans les produits de combustion. On obtient ainsi, en général des niveaux d'émissions d'aldéhydes plus importants avec les huiles végétales qu'avec le gazole. Cette augmentation par rapport au gazole peut atteindre 300% (VANHEMELRYCK (1997), GEYER et al. (1984)). Une étude sur des brûleurs a cependant abouti à des quantités d'aldéhydes inférieures à celles obtenues avec du fioul domestique lorsque l'huile de colza est utilisée (LIENNARD et al. (1996)).

- Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Les HAP regroupent des composées aromatiques comportant plus de deux noyaux benzéniques condensés. On admet qu'ils sont formés au sein de la flamme à partir de radicaux vinyle qui se transforme par déshydrogénation en acétylène.



A l'issue de réactions d'addition entre l'acétylène et le radical éthényle ($CH \equiv C^\circ$), il apparaît par cyclisation un radical phényle, point de départ de structures polycondensées.



Radical phényle

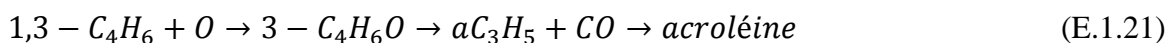
Les principaux HAP rencontrés dans les produits de combustion sont le naphthalène, l'acénaphthylène, le fluorène, le phénanthrène, le fluoranthène, le benzo(a)anthracène, le benzo(k)fluoranthène, le benzo(a)pyrène, le benzo(b)fluoranthène, le dibenzo(ah)anthracène, l'indeno(123cd)pyrène et le Benzo(ghi)pérylène. Ces composés ont un caractère cancérigène. Lors de la pyrolyse des huiles végétales, des composés précurseurs de la formation des HAP ont été identifiés, ce sont : les alcènes et les composés aromatiques (SCHWAB et *al.* (1987)). Des niveaux plus élevés de HAP ont été obtenus sur des moteurs ou sur des brûleurs avec les huiles végétales (VANHMELRYCK, (1997) ; LIENNARD et *al.* (1996)). Cependant, d'autres études présentent les huiles végétales comme de faibles émetteurs de HAP comparées au gazole du fait de leur plus faible teneur initiale en composés aromatiques et en HAP (MILLS et *al.* (1983), GUIBET et *al.* (1997), KALAM et *al.* (2003)) par rapport au gazole. En effet, les composés aromatiques peuvent représenter 17% (en masse) du gazole (MORIN (1999)) tandis qu'ils sont des composés minoritaires dans les huiles végétales (moins de 1%).

- Les hydrocarbures spécifiques

Certains hydrocarbures font l'objet d'un suivi en raison de leur caractère particulièrement très toxique. Ce sont principalement le benzène et le buta-1,3-diène.

Ces deux composés font partie de la liste des polluants appelés TAP (*Toxic Air Pollutants*). Ils sont considérés comme nocifs et soumis à une vigilance particulière. On pourrait s'attendre à des émissions plus importantes de buta-1,3-diène et de benzène avec certaines huiles

végétales. En effet, la présence de chaînes carbonées insaturées dans certaines huiles végétales est un facteur favorable à la formation de ces composés. Par ailleurs, les émissions d'acroléine, plus importantes avec les huiles végétales, sont proportionnelles aux émissions du buta-1,3-diène par un mécanisme de type (BREZINSKY (1984)) :



- ***Les polluants apportés par les impuretés et autres polluants « non réglementés »***

La production d'oxydes de soufre est une fonction croissante de la teneur en soufre dans le combustible. Les huiles végétales et leurs dérivés ne contiennent pratiquement pas de soufre. Cela conduit à des niveaux d'émission d'oxydes de soufre pratiquement nuls, observés avec celles-ci (VANHEMELRYCK (1997)). Ceci n'est pas le cas du gazole qui peut contenir des quantités de soufre importantes.

Quant au dioxyde de carbone, gaz à effet de serre, sa production provient d'une manière générale de l'oxydation du CO. La vitesse d'oxydation du CO en CO₂ est influencée par la présence des composés H₂O, H₂, OH° et RH (hydrocarbures) et la température (BROKAW, (1967) ; WESTBROOK *et al.* (1984)). Les conditions favorables à l'oxydation du CO en CO₂ sont en général réunies dans le cas des huiles végétales lorsque les conditions de fonctionnement sont adaptées. Dans ce cas, les niveaux de CO₂ restent en général très comparables entre les huiles végétales et le gazole (ALTIN (2001) ; SILVIO (2002) ; (VAITILINGOM (2006)). Cependant, des taux d'émissions plus importants de CO et des HC dans des conditions de réglage standard des moteurs Diesel (favorables au gazole) constituent des facteurs limitants de la conversion du CO en CO₂.

II.3.3 ***Endurance***

L'utilisation des huiles végétales pures dans certains moteurs Diesel et sur certains brûleurs sous certaines conditions conduit à moyen ou à long terme à la formation de dépôts, et à l'encrassement. Un autre point de dysfonctionnement est la dilution de l'huile de lubrification par l'huile végétale dans le cas des moteurs. Ces résultats ont été obtenus par la plupart des études (KORUS (1982) ; VAN DER WALT (1982) ; (VAITILINGOM (1992) ; FANGRUI *et al.* (1999) ; DARNAKO (2000); SAKA (2001) ; KOMERS *et al.* (2001) ; RAKOPOULOS (2006)). Cependant, seules quelques études précisent les conditions de fonctionnement dans lesquelles se forment les dépôts (VAITILINGOM (1992) ; HIGELIN (1992)). Ils se forment

d'abord aux nez des injecteurs ; on observe un effet cumulatif de ces dépôts qui détériore la qualité de la pulvérisation. Les dépôts s'observent ensuite sur les parois de la chambre de combustion (volume mort), la culasse, les segments et leur gorge etc. L'intensité de ces dépôts est liée entre autre à la qualité de pulvérisation et à la nature de l'huile. Ces phénomènes de dépôts interviennent surtout dans les moteurs Diesel à injection directe.

Sur les brûleurs, des problèmes d'allumage, « d'égouttage » du combustible et d'encrassement des parties froides apparaissent dans des conditions de fonctionnement standard au fioul domestique.

Le colmatage des filtres et des circuits d'alimentation est l'un des problèmes que l'on peut rencontrer lors d'une utilisation prolongée de l'huile végétale lorsqu'elle ne satisfait pas la qualité « carburant » requise.

Ces différents problèmes rencontrés lors de l'utilisation des huiles végétales pures ont d'une part une origine chimique (composition en acides gras, polymérisation et donc nature de l'huile) et d'autre part une origine physique (faible volatilité et viscosité élevée). A ces deux raisons s'ajoutent les conditions de température dans la chambre de combustion.

II.3.4 Analyse des hypothèses sur la formation des dépôts.

Plusieurs hypothèses ont été formulées sur l'origine des dépôts observés. Ces hypothèses sont basées sur la nature physico-chimique des huiles végétales et des conditions thermiques régnant dans les chambres de combustion.

a) Origine physique

Les paramètres physiques pris en compte dans l'explication de la formation des dépôts sont principalement la viscosité et la volatilité.

- *Viscosité*

La viscosité plus élevée de l'huile végétale par rapport à celle du gazole, entraîne une mauvaise atomisation et une forte pénétration du jet de carburant. Le contact du jet contre les parois froides conduit à la formation des dépôts. Plusieurs études retiennent la viscosité élevée des huiles comme étant la cause principale de la formation des dépôts (HARWOOD (1984) ; RYAN et al. (1984) ; VANHEMELRYCK (1997) ; FANGRUI et al. (1999) ; RAKOPOULOS et al. (2006)). Toutefois, les solutions adoptées pour réduire la viscosité de l'huile n'empêchent pas systématiquement la formation des dépôts. Ce sont notamment, le

préchauffage de l'huile, la dilution de l'huile par le gazole, la transestérification. On pourrait dire que la réduction de la viscosité est nécessaire pour réduire les phénomènes de contact du jet d'huile contre les parois et améliorer la qualité de la combustion sans que cela soit une condition suffisante pour empêcher la formation des dépôts.

- ***Volatilité et conditions thermiques dans la chambre de combustion***

La faible volatilité de l'huile a pour effet une vaporisation difficile et incomplète de l'huile. Les gouttes d'huile sur les parois froides, consécutive à la forte pénétration, conduisent à la formation des dépôts suite aux phénomènes de décomposition thermique. Les phénomènes de décomposition thermique des huiles végétales avec la température ont amené certaines études à conclure qu'un niveau thermique élevé (fortes charges et fortes températures des nez d'injecteurs) provoquerait des dépôts (KORUS(1982); VAN DER WALT (1982)). Cependant, des études entreprises à la suite de ces études indiquent que des niveaux de températures élevées dans la chambre de combustion permettent d'éviter la formation « anormale » de dépôts (VAITILINGOM (1992); HIGELIN (1992); CHARLET (1994)). Les dépôts sont plus importants à faible charge sur les parties froides du moteur. Ce phénomène a été mis en évidence lors de l'évaporation des gouttes de différentes huiles végétales dans plusieurs conditions de températures. Au delà de 500 °C, toutes les huiles végétales s'évaporent sans laisser de dépôts avec des constantes d'évaporation voisines. L'utilisation des moteurs Diesel à injection directe (à faible charge surtout) et les brûleurs de petite puissance provoque, dans la plupart des cas, la formation des dépôts. Les dépôts se forment surtout sur les parties froides. Dans un moteur Diesel à injection indirecte, plusieurs études s'accordent sur l'absence de dépôts lors de l'utilisation des huiles végétales (PISCHINGER (1981); GUIBET et *al.* (1987); VAITILINGOM (1992); VANHEMELRYCK (1997)). Il en est de même sur les brûleurs de moyenne puissance où les conditions de température sont favorables pour une bonne vaporisation et une bonne combustion des huiles végétales.

b) Origine chimique

- ***Nature de l'huile***

La formation des dépôts est très souvent attribuée aux triglycérides et donc à la nature même des huiles végétales. En effet, des esters contenant des traces de triglycérides peuvent provoquer des dépôts importants tandis que des esters purifiés ne provoquent pas plus de dépôts que le gazole (GATEAU et *al.* (1983, 1984); VAITILINGOM (1992)). Par ailleurs,

les huiles saturées semblent former peu de dépôts comparées aux huiles insaturées qui subissent plus facilement des réactions de polymérisation et d'oxydation.

- **Degré de traitement de l'huile**

Le degré de traitement de l'huile peut avoir un effet important sur la formation des dépôts. En effet, les mucilages contenus dans certaines huiles brutes contribuent à la formation des dépôts. Lors des opérations de raffinage ou de dégommage simple de l'huile, ces mucilages sont éliminés en grande partie. Cependant, cette élimination des mucilages n'empêche pas la formation des dépôts dans certains cas. D'autres paramètres relatifs au degré de traitement de l'huile tels que, la teneur en impuretés, cendre, savons, et l'acidité n'ont aucune corrélation établie avec la formation des dépôts. Ainsi, l'influence du degré de traitement de l'huile semble se traduire principalement par la participation des mucilages à la formation des dépôts (VAITILINGOM (1992)).

De l'analyse de ces hypothèses et du comportement global des huiles végétales en tant que carburant, seule la nature chimique différente de celles-ci semble constituer un handicap majeur à l'utilisation directe de certaines huiles végétales dans certains types de moteurs et de brûleurs. En effet, une huile semi raffinée (dégommée, filtré et « décirée ») s'adapte au circuit d'alimentation, une fois réchauffée. Cependant, il subsiste des problèmes de combustion incomplète et de décomposition thermique liés à la nature chimique différente de l'huile.

Pour pallier ces difficultés, deux options se présentent : la modification ou l'adaptation des moteurs ou des brûleurs pour obtenir des niveaux de température de chambre, suffisante pour une bonne combustion des huiles végétales et les procédés de transformation de celles-ci pour obtenir des carburants proches du gazole ou du fioul.

II.4 MODIFICATIONS DES MOTEURS ET DES BRÛLEURS

II.4.1 Modification des moteurs

Elle consiste à apporter, soit des modifications mécaniques aux pistons et aux pièces internes au moteur, soit des systèmes de « bicarburation » sans modifications mécaniques. Cela concerne les moteurs Diesel à injection directe, les moteurs Diesel à injection indirecte ne nécessitant qu'une simple adaptation de l'huile au circuit d'alimentation compte tenu des conditions de températures élevées dans la chambre même à faible charge. La modification du

piston, la mise en place d'un circuit d'alimentation ainsi que le principe de la « bicarburation » sont décrits en annexe B.

Les pistons sont modifiés pour recevoir une chambre de forme spéciale en acier réfractaire afin d'obtenir des niveaux de température suffisants qui permettent une combustion complète des huiles végétales. Ce type de modification a été développé dans des études antérieures (HIGELIN (1992)) et au Cirad depuis 1990. Il présente l'avantage de permettre aussi l'usage du gazole sans pertes de puissance et sans interventions mécaniques supplémentaires.

Le système de « bicarburation » consiste à installer un second circuit d'alimentation pour l'huile végétale pure en parallèle à celui du gazole.

II.4.2 Adaptations des brûleurs

Les adaptations du brûleur consistent à intégrer dans le circuit d'alimentation du brûleur, un dispositif de réchauffage permettant d'obtenir des températures d'environ 140 °C lors de la pulvérisation et à adapter le gicleur.

Les réglages spécifiques du brûleur concernent la pression de pulvérisation et le débit d'air. Une description détaillée est donnée dans le chapitre II de la partie II.

II.5 UTILISATION DES CARBURANTS DERIVES D'HUILES VEGETALES DANS LES MOTEURS DIESEL ET SUR LES BRÛLEURS

II.5.1 Mélange d'huile végétale et de gazole (ou fioul domestique)

Dans le but de réduire la viscosité et de faciliter l'inflammation de l'huile végétale, celle-ci peut être diluée avec du gazole ou de l'alcool (méthanol, éthanol). D'après certaines études, les essais de performances avec des mélanges à faibles teneurs d'huile végétale (en général inférieure à 30%) donnent en général des résultats similaires à ceux obtenus avec le gazole pur (KALAM et al. (2003) ; PRAMANIK (2003) ; FORSON et al. (2004) ; RAKOPOULOS et al. (2006)). Mais en général, les performances et les émissions polluantes observées avec les mélanges d'huiles végétales et de gazole varient entre celles du gazole et celles des huiles végétales pures (KALAM et al. (2003) ; RAKOPOULOS et al. (2006) ; WANG et al. (2006)).

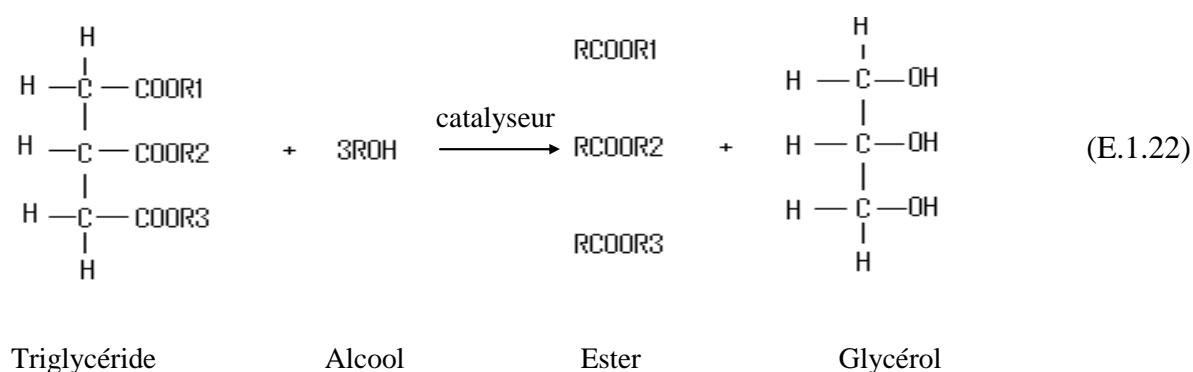
Le comportement en endurance reste le même que celui de l'huile pure ou le gazole sur un moteur à injection indirecte. Sur les moteurs à injection directe, des études indiquent que des mélanges contenant moins de 20 à 30 % d'huile végétale présentent le même comportement

en endurance que le gazole (PISCHINGER (1981) ; ADAMS (1983) ; HARWOOD (1983)). Toutefois, des mélanges contenant seulement 20% d'huile de colza semi-raffinée ou 25% d'huile de tournesol ont provoqué la formation de dépôts sur des moteurs Diesel à injection directe (ZIEJEWSKI (1983, 1986) ; GATEAU (1985)) ; seul le temps de formation des dépôts est plus long. Les problèmes de dépôts observés avec les huiles pures demeurent si les conditions de température ne sont pas réunies.

Si l'utilisation de mélanges d'huiles végétales et de fioul est envisageable sur les brûleurs à fioul, la proportion maximale d'huile végétale admissible sans réchauffage est très limitée (inférieure à 25 %), (VAITILINGOM (2006 b)). Au-delà de ces proportions, une adaptation reste nécessaire comme dans le cas de l'huile pure.

II.5.2 Les esters d'huiles végétales

L'ester d'huile végétale est obtenu par une réaction de transestérification entre l'huile végétale et un alcool (en général du méthanol ou de l'éthanol) en présence d'un catalyseur. La transestérification peut s'effectuer également sans catalyseur dans des conditions supercritiques (pression et température). On obtient des esters méthyliques ou éthyliques selon le type d'alcool (méthanol ou éthanol) utilisé, et du glycérol (glycérine). La réaction E.1.22 présente la transestérification de l'huile végétale par l'alcool. Les propriétés physico-chimiques des esters obtenus sont proches de celles du gazole (tableau 6)



Ces esters sont utilisables dans tout type de moteur Diesel (injection directe et injection indirecte). Les puissances obtenues sont très proches de celles obtenues avec le gazole, avec les mêmes écarts que ceux observés entre l'huile végétale pure et le gazole. On observe un bon comportement en endurance de l'ester. Les dépôts sont très faibles, généralement inférieurs à ceux observés avec le gazole (VANHEMELRYCK (1997)). Toutefois, l'ester doit être bien purifié. Une synthèse des résultats de la littérature en termes d'émissions de CO, de HC, de particules, de HAP etc., sont en général favorables aux esters d'huiles végétales ;

tandis que, les émissions de NO_x et d'aldéhydes leurs sont défavorables (GUIBET et *al.* (1997)). Le tableau 7 donne un résumé de ces résultats. La comparaison est faite par rapport au gazole.

Parmi les problèmes rencontrés ou les inconvénients liés à l'utilisation d'esters purs d'huiles végétales dans les moteurs Diesel, on peut citer la corrosion de certains composants, notamment les matériaux en caoutchouc. Aussi, ces esters se comportent comme des solvants pour les peintures et les revêtements. Par ailleurs, ils sont hygrophiles, avec une faible stabilité à l'oxydation (RAKOPOULOS et *al.* (2006)).

Tableau 6 : Quelques caractéristiques physico-chimiques de divers esters d'huiles végétales et le gazole (VAITILINGOM (1992); RAKOPOULOS (2006) ; BAGBY(1996))

Caractéristique	Gazole	EMC	EEC	EMS
Masse volumique à 20 °C (kg/m ³)	837	880	885	885
Viscosité à 40 °C (mm ² /s)	3	6,7	4	4,1
PCI (kJ/kg)	43800	37700	37500	37300
Point éclair (°C)	93	171	110	171
Indice de cétane	50	49	52	51
Point de trouble (°C)	<-5	-3	1	2

Tableau 7 : Forces et faiblesses en termes d'émissions de l'ester méthylique de colza par rapport au gazole (GUIBET et *al.* (1997))

Polluant	Ester méthylique de colza
CO	0 (+)
NO	-
HC	0 (+)
Particules	+
Evaporation	+
Formaldéhyde	0 (-)
HAP	0 (+)
CO ₂	+

(+) : favorable ; (-) : défavorable ; (0) : varie peu

II.5.3 *Les microémulsions*

Dans le but de réduire la viscosité de l'huile végétale et d'améliorer sa qualité de vaporisation, des émulsions huile végétale-alcool ou huile végétale-eau sont souvent utilisées. Des microémulsions (1 à 150 nm) sont réalisées en incorporant de l'alcool ou de l'eau à l'huile végétale en présence d'un émulsifiant (savon par exemple dans le cas de l'eau). Ces microémulsions provoquent des explosions, entraînant ainsi une meilleure vaporisation du jet de carburant (PRYDE (1984) ; VANHELMELRYCK (1997)). Les résultats obtenus (en termes de performances) sont très proches de ceux obtenus avec le gazole. Cependant, des essais d'endurance révèlent dans l'ensemble, des dépôts plus importants que le gazole (VANHELMELRYCK (1997)). Les microexplosions au sein du jet de carburant se produisent souvent tardivement, de sorte qu'ils n'ont pas d'effet bénéfique sur la formation des dépôts. Ces microexplosions permettent néanmoins une réduction des NO_x suite à une réduction de la température des gaz.

II.5.4 *Craquage thermique ou pyrolyse des huiles végétales*

La pyrolyse, au sens strict, est un procédé de conversion thermochimique d'une substance en d'autres composés sous l'effet de la chaleur en l'absence d'oxygène. Cette transformation peut être effectuée à l'aide d'un catalyseur ou non (SONNTAG (1979)). On parle aussi de craquage thermique. L'objectif du craquage thermique des huiles végétales est de produire des composés hydrocarbonés de même nature que ceux rencontrés dans les carburants pétroliers. Les produits de pyrolyse sont notamment : les alcanes, les alcènes, les acides carboxyliques, les composés aromatiques. Parallèlement à la production de ces hydrocarbures, le craquage thermique de l'huile végétale conduit à la formation d'autres composés tels le CO, le CO₂, l'hydrogène, l'eau etc. L'influence du catalyseur, de la température (en général, entre 400 °C et 850 °C) sur la nature et les proportions des produits issus du craquage de différentes huiles végétales a été étudiée (GROSSLEY et al. (1962) ; SCHWAB et al. (1988) ; PIOCH et al. (1993) ; BILLAUD et al. (1995)). Les hautes températures de pyrolyse conduisent à des teneurs élevées en hydrocarbures légers dans les produits. La nature complexe du mélange d'hydrocarbures (large intervalle de distillation) issus de ce craquage ainsi que la présence d'autres composés nécessitent un raffinage pour obtenir des carburants spécifiques. Les coûts du raffinage rendent très souvent cette option peu viable, comparée à des filières comme la transestérification.

CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter l'influence des caractéristiques physiques et chimiques des huiles végétales sur leur qualité en tant que carburant dans les moteurs Diesel et sur les brûleurs. Les différences de caractéristiques avec celles des carburants pétroliers sont à la base de la plupart des écarts de comportement observés entre les huiles végétales et le gazole dans certaines conditions. La caractérisation de celles-ci est donc une étape incontournable. Les huiles végétales restent encore mal caractérisées d'un point de vue de leur qualité « carburant ». En effet, la plupart des méthodes utilisées pour la détermination des caractéristiques des huiles végétales sont des méthodes pétrolières qui apparaissent très souvent inadaptées. Cela nécessite l'élaboration de procédures normalisées et des critères de qualité des huiles végétales qui prennent en compte leur spécificité par rapport aux carburants pétroliers.

L'étude et l'optimisation de la combustion des huiles végétales ou leurs dérivés dans les moteurs ou sur les brûleurs reposent principalement sur la détermination de leurs caractéristiques physico-chimiques, la nature des moteurs ou des brûleurs et les conditions de fonctionnement de ces derniers (charge, richesse etc.).

Les études portant sur le comportement des huiles végétales en tant que carburant présentent des résultats divergents en termes de performances globales, d'émissions polluantes et de mécanismes qui gouvernent la formation de ces polluants. Cela est lié principalement

- à la variété des caractéristiques des moteurs utilisés lors des différents essais. En effet, le moteur est très sensible aux réglages effectués (charge, avance etc.)
- au type de moteur ou de brûleur
- à la variété et la nature exacte des huiles utilisées lors des différents essais.
- à la diversité des méthodes d'évaluation. Certains essais sont des essais normalisés.

D'autres par contre, sont des essais suivant des protocoles « hors normes »

Il apparaît donc que, la combustion des huiles végétales restent encore mal caractérisée, en particulier leur combustion sur les brûleurs.

Au cours de ce travail, nous nous efforçons d'une part de déterminer les conditions optimales de combustion des huiles dans des moteurs Diesel et sur des brûleurs et d'autre part de quantifier les principaux polluants émis lors de leur combustion et d'identifier les facteurs prépondérants sur la formation des principaux polluants (CO , CO_2 , NO_x , SO_2) et les HAP.

Aussi, pour mieux appréhender les caractéristiques et la combustion du « spray » d'huile végétale dans un moteur Diesel ou sur un brûleur, nous étudierons le comportement d'une

goutte isolée dans différentes conditions de température. Ces résultats peuvent alors être extrapolés dans des situations réelles sur moteurs et brûleurs.

La démarche suivie dans cette étude peut être résumée et schématisée par la figure 9 ci-dessous :

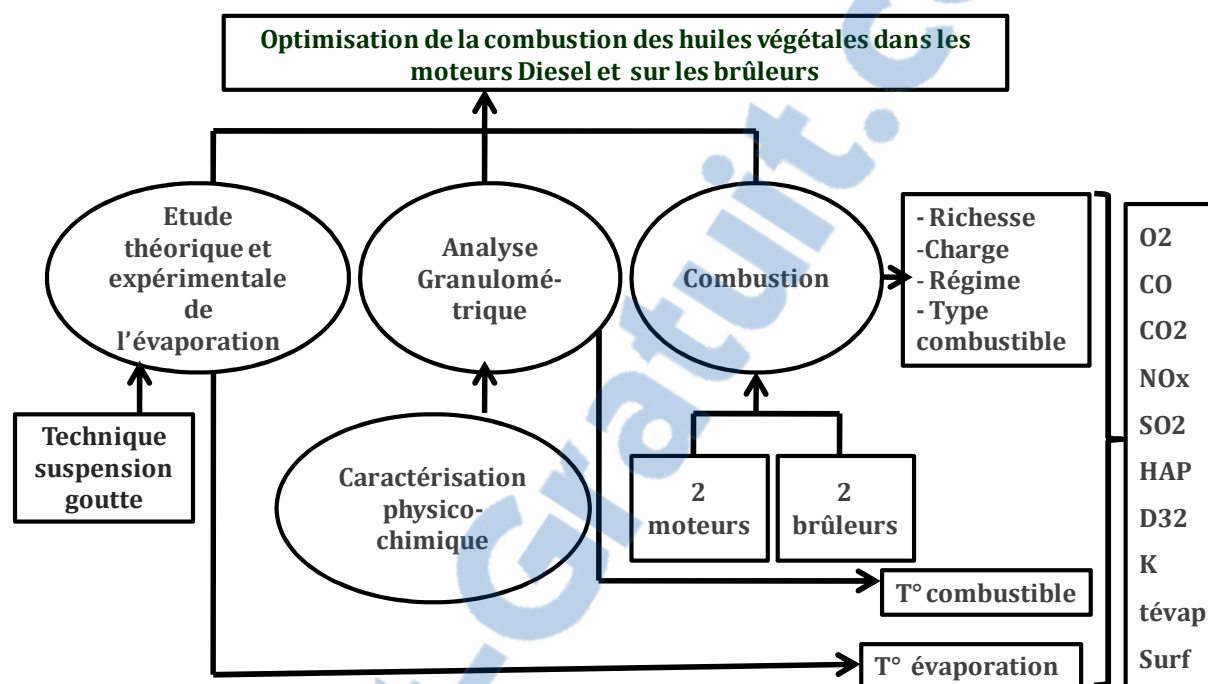


Figure 9 : Démarche de l'étude

CHAPITRE III : EVAPORATION D'UNE GOUTTE ISOLEE DE COMBUSTIBLE LIQUIDE SANS COMBUSTION

INTRODUCTION

III.1 DESCRIPTION DE LA THEORIE QUASI-STATIONNAIRE

III.1.1 Hypothèses fondamentales de la théorie quasi-stationnaire

III.1.2 La loi en D^2

III.1.3 Insuffisances de la loi en D^2

III.2 INFLUENCE DE LA CONVECTION SUR L'EVAPORATION D'UNE GOUTTE ISOLEE

III.3 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

III.4 INFLUENCE DE LA PRESSION

CONCLUSION

INTRODUCTION

La vaporisation du « spray », son inflammation et sa combustion dans un moteur Diesel ou dans un brûleur dépendent d'un nombre important de facteurs. Aussi, pour mieux comprendre les comportements obtenus sur des moteurs ou des brûleurs utilisant un combustible donné, il est intéressant d'isoler et d'étudier chacun des phénomènes mis en jeu : la vaporisation, l'inflammation et la combustion. Les résultats obtenus sont alors extrapolés dans le moteur ou dans le brûleur. Des études antérieures indiquent que l'étude de la vaporisation du combustible est presque suffisante surtout lorsque les taux de réaction chimiques sont très élevés comme c'est le cas dans les moteurs (MCCREATH *et al.* (1973) ; CHIN *et al.* (1983)). Dans ce cas, la combustion est contrôlée principalement par les taux de vaporisation. Le mécanisme prédominant dans la vaporisation, (déterminant dans le cas des huiles), est le transfert de chaleur et de masse entre le carburant et le milieu ambiant. La chaleur nécessaire au processus d'évaporation des gouttes est transférée de l'ambiance à la surface des gouttes par conduction et par convection et les vapeurs de carburant sont transférées de la surface des gouttes à l'ambiance par convection et diffusion. Les figures 10 a et b donnent une illustration des phénomènes en jeu lors de l'évaporation d'une goutte. Les paramètres qui interviennent dans ce mécanisme sont la température, la pression, la vitesse relative des gouttes par rapport à l'ambiance, les propriétés de transport et thermodynamiques des gaz etc.

Compte tenu de la complexité de l'étude de la vaporisation des gouttes dans un « spray », l'une des approches utilisée est l'étude de l'évaporation d'une goutte isolée du carburant dans différentes conditions. On néglige les interactions entre les gouttes. Ce chapitre présente les principes fondamentaux de l'évaporation d'une goutte isolée ainsi que les résultats de la littérature portant sur l'évaporation des huiles végétales.

III.1 DESCRIPTION DE LA THEORIE QUASI-STATIONNAIRE

III.1.1 *Hypothèses fondamentales de la théorie quasi-stationnaire*

La plupart des études, expérimentales ou numériques, sur l'évaporation et la combustion d'une goutte sont basées sur la théorie quasi-stationnaire. Cette théorie repose sur plusieurs hypothèses présentées et discutées dans la littérature (GODSAVE (1953) ; SPALDING (1953) ; WILLIAMS (1960, 1973) ; HUBBARD (1975) ; LAW (1982) ; HIGELIN (1992) ; CHESNEAU (1994) ; VANHEMELRYCK (1997) ; MORIN (1999)). Nous présentons les principales hypothèses de cette théorie.

- i. On néglige les effets de la convection naturelle et forcée (convection radiale), cela conduit à une symétrie sphérique pour la goutte, permettant une analyse unidimensionnelle du système. Le transfert de chaleur ne s'effectue que par conduction (le rayonnement est négligé).
- ii. La goutte est constituée d'un corps pur.
- iii. Les phénomènes sont quasi-stationnaires dans la phase liquide. Ainsi, la phase de préchauffage de la goutte est négligée.
- iv. Les processus sont considérés comme spatialement isobares, du fait des faibles nombres de Mach relatifs à la vitesse radial du fluide.
- v. La diffusivité thermique et la diffusivité massique du gaz sont identiques, autrement dit, le nombre de Lewis, Le (rapport du nombre de Schmidt au nombre de Prandtl) vaut l'unité.

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{\lambda}{\rho c_p D} = 1 \quad (E.1.23)$$

- vi. La phase gazeuse est quasi-stationnaire : l'écoulement s'adapte aux conditions limites locales et aux dimensions de la goutte. Les propriétés de transport de la phase gazeuse sont constantes. On évalue, les propriétés à une température et une fraction massique de référence (respectivement $(T_r$ et $Y_{fr})$). Les meilleurs résultats sont obtenus généralement en utilisant la règle du « tiers » (SPARROW et *al.* (1958)).

$$T_r = T_s + \frac{(T_\infty - T_s)}{3} \quad (E.1.24 a)$$

$$Y_{fr} = Y_{fs} + \frac{(Y_{f\infty} - Y_{fs})}{3} \quad (E.1.24 b)$$

- vii. Le taux de transport de la phase gazeuse est inférieur au taux de changement de phase liquide-vapeur, de sorte qu'il existe un équilibre thermodynamique entre le liquide et la vapeur à la température de la surface de la goutte à chaque instant.
- viii. On néglige les effets d'inertie de la phase gazeuse.
- ix. Les gaz ambiants ont une solubilité négligeable dans la phase liquide, seul le combustible diffuse à partir de la surface de la goutte.
- x. Les phénomènes d'oxydation et de décomposition dans la phase gazeuse sont négligés.
- xi. Les effets Soret (diffusion massique provenant d'un gradient de température) et Dufour (flux de chaleur produit par un gradient de concentration) ainsi que le rayonnement sont négligés.

Cette théorie, à travers ces hypothèses permet de déterminer une loi simple de l'évolution du carré du diamètre de la goutte en fonction du temps.

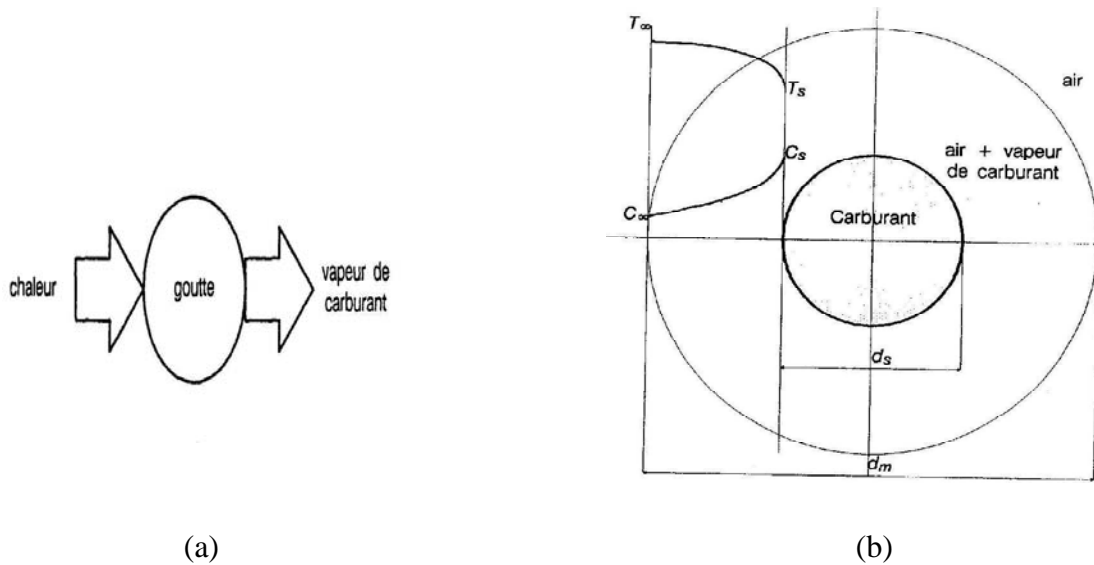


Figure 10 : (a) Echange de flux de chaleur entre la goutte et le milieu ambiant; (b) Champ de concentration et de température le long d'un rayon lors de l'évaporation d'un corps pur (HIGELIN (1992))

III.1.2 La loi en D^2

Les équations de conservation (masse, énergie, espèces), dans le cas de l'évaporation pure, en prenant en compte les hypothèses ci-dessus conduisent aux relations suivantes :

- **Equation de continuité**

$$\frac{d\dot{m}}{dr} = 0 \quad (\text{E.1.25})$$

- **Equation de conservation de l'énergie**

$$r^2 \cdot \rho_{fg} \cdot v_r \cdot c_{pg} \cdot \frac{dT}{dr} = \frac{d}{dr} \left(r^2 \cdot \lambda_g \cdot \frac{dT}{dr} \right) \quad (\text{E.1.26})$$

- **Equation de conservation des espèces**

$$\rho_{fg} \cdot v_r \cdot \frac{dY_i}{dr} - \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \cdot \rho_{fg} \cdot D \cdot \frac{dY_i}{dr} \right) \quad (\text{E.1.27})$$

(i : combustible ou oxydant)

- **Conditions aux limites et à l'interface liquide-gaz**

A la surface de la goutte on a :

$$T(r = r_s) = T_s$$

$$Y_f(r = r_s) = Y_{fs}$$

$$4\pi \cdot r_s^2 \cdot \lambda_g \cdot \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_s} = \dot{m} \cdot L_v \quad (\text{E.1.28})$$

$$4\pi \cdot r_s^2 \cdot \rho_{fg} \cdot D \cdot \left. \frac{dY_f}{dr} \right|_{r=r_s} = \dot{m} \cdot (1 - Y_{fs}) \quad (\text{E.1.29})$$

Loin de la goutte, on a :

$$T(r \rightarrow \infty) = T_\infty \text{ et } Y(r \rightarrow \infty) = Y_{f\infty} = 0 \quad (\text{E.1.30})$$

Les équations E.3.27 à E.3.30 permettent d'obtenir les profils de la température dans la phase gazeuse ($T(r)$), de la fraction massique de combustible évaporé (Y_f) avec ($r_s \leq r \leq r_m$; $r_m - r_s$ étant l'épaisseur de la couche superficielle de la goutte où nous considérons l'existence de gradients de concentration et de température). Le débit massique de combustible évaporé est donné par les équations E.3.33 a et b.

$$T(r) = \frac{(T_s - T_\infty)}{\exp\left(\frac{-\dot{m} \cdot c_{pg}}{4\pi \cdot \lambda_g \cdot r_s}\right) - 1} \left[\exp\left(\frac{-\dot{m} \cdot c_{pg}}{4\pi \cdot \lambda_g \cdot r}\right) - 1 \right] + T_\infty \quad (\text{E.1.31})$$

$$Y_f(r) = \frac{Y_{fs}}{\exp\left(\frac{-\dot{m}}{4\pi \cdot \rho_{fg} \cdot D \cdot r_s}\right) - 1} \left[\exp\left(\frac{-\dot{m}}{4\pi \cdot \rho_{fg} \cdot D \cdot r}\right) - 1 \right] \quad (\text{E.1.32})$$

Le débit de combustible évaporé s'écrit alors :

$$\dot{m} = 4\pi \cdot \rho_{fg} \cdot D \cdot r_s \cdot \ln(1 + B_M) \quad (\text{E.1.33 a})$$

Ou

$$\dot{m} = 4\pi \cdot \frac{\lambda_g}{c_{pg}} \cdot r_s \cdot \ln(1 + B_T) \quad (\text{E.1.33 b})$$

Avec

B_T : Nombre de transfert thermique

B_M : Nombre de transfert de masse

$$B_M = \frac{Y_{fs} - Y_{f\infty}}{1 - Y_{fs}} \quad (\text{E.1.34 a})$$

$$B_T = \frac{c_{pg}(T_\infty - T_s)}{L_v} \quad (\text{E.1.34 b})$$

Etant donnée les hypothèses de la théorie quasi-stationnaire (en particulier l'hypothèse i) on a :

$$\dot{m} = 4\pi\rho_{fl}r^2 \frac{dr}{dt} \quad (\text{E.1.35})$$

Des équations E.1.33 a, E.3.34 b et E.1.35, on obtient une expression donnant la régression du carré du diamètre de la goutte dite « loi en D^2 »

$$d^2(t) = d_0^2 - K \cdot (t - t_0) \quad (\text{E.2.36})$$

d : Diamètre de la goutte

d_0 : Diamètre initiale de la goutte (à $t = t_0 = 0$)

t : Temps

K : Constante d'évaporation

$$K = 8 \cdot \frac{\rho_{fg}}{\rho_{fl}} \cdot D \cdot \ln(1 + B_M) \quad (\text{E.1.37 a})$$

Ou

$$K = 8 \cdot \frac{\lambda_g}{c_{pg} \cdot \rho_{fl}} \cdot \ln(1 + B_T) \quad (\text{E.1.37 b})$$

III.1.3 Insuffisances de la loi en D^2

Les résultats expérimentaux de l'évaporation de gouttes de combustibles liquides, effectuée dans des conditions définies par la théorie quasi-stationnaire, montrent en général que « la loi en D^2 » est vérifiée (FAETH (1977) ; CHAUVEAU (1990) ; CHESNEAU (1994)). Toutefois, on peut noter que :

- la période de préchauffage (phase transitoire) de la goutte sur le temps total d'évaporation (négligée dans la théorie quasi-stationnaire) n'est pas négligeable, surtout dans le cas des combustibles peu volatiles.
- La pression a une influence sur les propriétés thermophysiques, de sorte que les écarts avec la théorie quasi-stationnaire peuvent être importants. Des études ont montré que les résultats sont conformes aux prévisions de la théorie quasi-stationnaire si l'on tient compte des effets de la pression sur les propriétés thermophysiques (SAVERY et *al.* (1971)). Par ailleurs, la théorie quasi-stationnaire reste valable tant que les conditions critiques (température et pression) de la goutte ne sont pas atteintes (LAW (1982)).
- Les effets convectifs, négligés dans la théorie quasi-stationnaire, sont importants dans les moteurs ou sur les brûleurs et même dans la plupart des études expérimentales entreprises sur l'évaporation des gouttes de combustibles.

Plusieurs approches ont été utilisées pour l'étude numérique de l'évaporation de gouttes de combustibles liquides : les modèles à conductivité infinie (LAW et *al.* (1976)), les modèles à conductivité finie (HUBBARD et *al.* (1975)), les modèles utilisant le concept de couche limite (PRAKASH et *al.* (1980)) et les modèles basés sur la résolution des équations complètes de transfert (DWYER et *al.* (1988)). Ces modèles, dont certains sont basés sur la loi en D^2 (modèles à conductivité finie et à conductivité infinie) prennent en compte certains ajustements nécessaires pour améliorer la loi en D^2 . Le modèle à conductivité finie prend en compte le caractère transitoire du transfert conductif dans la goutte tout en négligeant les effets convectifs dans la goutte. Les deux derniers modèles (couche limite, équation complètes de transfert) prennent en compte les transferts convectifs dans la phase liquide. La reconsidération de certaines hypothèses de la théorie quasi-stationnaire prend ainsi en compte le caractère instationnaire de la phase liquide et la variation des propriétés de transport

III.2. INFLUENCE DE LA CONVECTION SUR L'EVAPORATION D'UNE GOUTTE ISOLEE

L'influence de la vitesse relative de l'écoulement autour de la goutte a fait l'objet de plusieurs études (RENKISZBULUT et *al.* (1983) ; SCHERRER (1987)). Un écoulement convectif intense de la phase gazeuse induit des mouvements de convection au sein de la phase liquide qui peuvent modifier le temps de vaporisation. L'utilisation de facteurs correctifs dans les expressions issues de la théorie quasi-stationnaire permet de calculer les grandeurs caractéristiques du transfert de masse et de chaleur. Cela fait intervenir les nombres adimensionnels suivants : Les nombres de Reynolds (Re) de Grashof (Gr), de Prandtl (Pr), de Schmidt (Sc), de Nusselt (Nu) et de Sherwood (Sh).

Plusieurs corrélations ont été formulées pour prendre en compte l'effet de la convection (FRÖSSLING (1938) ; RANZ et MARSHALL (1952), LAW et WILLIAMS (1972) ; FAETH (1977) ; SATO et *al.* (1990)) sur l'évaporation ou la combustion de gouttes de combustibles. Celle de RANZ et MARSHALL (1952) est décrite ci-dessous :

En convection naturelle :

$$Nu_0 = 2 + C \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Gr^{\frac{1}{4}} \quad (E.1.38)$$

$$Sh_0 = 2 + C \cdot Sc^{1/3} \cdot Gr^{1/4} \quad (E.1.39)$$

En convection Forcée, on obtient :

$$Nu_0 = 2 + C.Pr^{1/3}.Re^{1/2} \quad (E.1.40)$$

$$Sh_0 = 2 + C.Sc^{1/3}.Re^{1/2} \quad (E.1.41)$$

Nu_0 , Sh_0 sont les nombres de Nusselt et de Sherwood sans facteur de correction prenant en compte l'effet de l'évaporation sur le transfert de chaleur et de masse.

C : Constante

On obtient, en utilisant les facteurs de correction qui prennent en compte l'effet de l'évaporation sur la convection (BARATA (2008)) :

$$Nu = 2 + \frac{(Nu_0-2)}{F_T} \quad (E.1.42)$$

$$Sh = 2 + \frac{(Sh_0-2)}{F_M} \quad (E.1.43)$$

Avec

$$F_T = F(B_T); F_M = F(B_M); \quad F(B) = (1 + B)^{0,7} \frac{\ln(1+B)}{B} \quad (E.1.43)$$

III.3 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DE LA PRESSION

Plusieurs d'études numériques et expérimentales ont été menées sur l'influence de la pression et de la température sur l'évaporation de combustibles liquides (WILLIAMS et al. (1973) ; LAW (1982) ; FAETH (1977) ; (CHESNEAU, (1994)). Dans les conditions subcritiques, l'hypothèse de la quasi-stationnarité est utilisée et reste valable. Cependant, lorsque la pression critique est atteinte et que la température est proche de la température critique du liquide, la tension superficielle de la goutte et sa chaleur latente de vaporisation sont proches de zéro. Les phénomènes deviennent instationnaires ((CHESNEAU, (1994)).

III.4 RESULTATS D'ETUDES SUR L'EVAPORATION D'HUILES VEGETALES

Si les études portant sur l'évaporation ou la combustion de gouttes isolées d'hydrocarbures liquides (n-heptane, n-décane...) sont nombreuses, celles portant sur des gouttes d'huiles végétales ou leurs dérivés sont plus rares. Les études menées sur l'évaporation ou la combustion de gouttes d'huiles de pyrolyse, d'huiles végétales pures ou de dérivés d'huiles végétales (esters, émulsions) sont généralement des études expérimentales ou théoriques

(ARAYA et *al.* (1988) ; VAITILINGOM (1992) ; HIGELIN (1992) ; CHIRAT (1996) ; VANHEMELRYCK (1997) ; CROOKES (1997) ; MORIN (1999)).

En ce qui concerne l'évaporation de gouttes d'huiles ou leurs dérivés, Les résultats montrent que les huiles végétales ne s'évaporent pratiquement pas aux faibles températures (inférieures ou égales à 440 °C). Il se forme des résidus liquides sur les supports des gouttes. Cependant, pour des températures élevées (> 500 °C) les huiles s'évaporent complètement sans formation de résidus pour des températures d'environ 600 °C ; la loi en D^2 est vérifiée (VAITILINGOM (1992) ; HIGELIN (1992)). De plus, les taux d'évaporation sont semblables pour l'ensemble des huiles entre elles (comportement unique) et aussi à celui du gazole, pour des températures supérieures à 540 °C. Des résultats similaires sont obtenus avec des esters méthyliques d'huile de colza et de tournesol (MORIN (1999)).

CONCLUSION

Ce chapitre a permis de montrer que la théorie quasi-stationnaire est la base de la plupart des études (numériques et expérimentales) d'évaporation de gouttes de combustibles liquides. Il ressort que les résultats expérimentaux sur l'évaporation de gouttes d'huiles végétales ou leurs dérivés suivent la loi en D^2 défini par la théorie stationnaire. Toutefois, très peu d'études théoriques pour la prédiction du comportement des huiles végétales en évaporation existent. En effet, la prédiction théorique des coefficients d'évaporation repose sur une bonne connaissance des propriétés de transport et des propriétés thermodynamiques des phases liquides et gazeuses du combustible. Cela est délicat dans le cas des huiles végétales. Dans le chapitre II de la partie III de cette étude, cette question sera examinée suivi d'une étude expérimentale de l'évaporation de gouttes d'huiles végétales.

PARTIE II : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

**CHAPITRE I : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX POUR LA
CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE ET L'ETUDE DE
L'EVAPORATION DES GOUTTES DE COMBUSTIBLES**

I.1 CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE

I.2 DISPOSITIFS POUR L'ETUDE DE L'EVAPORATION DES GOUTTES

I.2.1 Le corps du dispositif

I.2.2 Le système de mesure et d'acquisition de la température

I.2.3 Le système d'acquisition et de traitement des images

I.2.4 Conditions et mode opératoire

I.1 DISPOSITIFS DE CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE

Les caractéristiques physico-chimiques déterminées sont : la composition en acides gras, la teneur en phospholipides, la composition chimique élémentaire, l'indice d'acide, les teneurs en magnésium, calcium, sédiments et eau, la masse volumique, la viscosité, le point éclair, le PCI, la tension superficielle, l'indice de cétane, le résidu Conradson, le point de trouble, le point d'écoulement. La plupart de ces mesures ont été effectuées suivant des méthodes normalisées. Nous ne décrivons pas les dispositifs et les protocoles utilisés pour ces essais normalisés de caractérisation physico-chimique. Nous donnons les références des normes utilisées pour ces différents essais.

Le tableau 8 donne un résumé des méthodes utilisées pour la détermination des propriétés physico-chimiques.

Tableau 8 : Méthodes et normes de détermination des caractéristiques physico-chimiques

Caractéristique	Méthode/Norme
Acides gras totaux	ISO 5508
C	Combustion
H	Combustion
O	Pyrolyse
N	Combustion
S	Combustion/NFT 60 106
Viscosité cinématique	NF EN ISO 3104
Teneur en eau	NF EN ISO 12937
Indice d'acide	ASTM D 664
Masse volumique	NF EN ISO 12185
Sédiments	NF EN 12662
Phosphore	NFT 60 106
Résidu de carbone Conradson	NF EN ISO 10370
Magnésium	NFT 60 106
Calcium	NFT 60 106
PCI	ASTM D 240
Indice de cétane	NF EN ISO 4264
Tension superficielle	NF EN 14 370

Tableau 8 (suite): Méthodes et normes de détermination des caractéristiques physico-chimiques

Caractéristique	Méthode/Norme
Point éclair	NF EN ISO 2719
Point de trouble	NF T60 105 (ISO 3016)
Point d'écoulement	NF T60 105 (ISO 3016)

I.2 DISPOSITIFS POUR L'ETUDE DE L'EVAPORATION DES GOUTTES

Il existe plusieurs méthodes expérimentales pour l'étude de l'évaporation et de la combustion de gouttes de combustibles liquides : la méthode de la sphère poreuse, la méthode de la goutte en chute libre et la méthode de la goutte suspendue. La description de ces différentes méthodes est donnée dans la littérature (CHESNEAU (1994) ; MORIN, (1999)). Dans cette étude, la méthode de la goutte suspendue a été utilisée. Le dispositif expérimental est constitué de trois principaux ensembles :

- Le corps du dispositif (système de chauffage et de canalisation du flux de gaz chaud, système de suspension de la goutte)
- Le système de mesure et d'acquisition de la température
- Le système de mesure et de traitement des images.

Les figures 11 et 12 donnent respectivement le schéma global du corps du dispositif expérimental et le dispositif d'acquisition des images.

I.2.1 *Le corps du dispositif*

Il comporte le système de chauffage et de canalisation du flux de gaz chauds et le système de suspension de la goutte. Le flux de gaz chauds est obtenu à l'aide d'un brûleur à gaz (MEKER comportant une grille en sortie) alimenté en butane. Les gaz brûlés sont dilués par l'air ambiant dans lequel est placée la goutte. La température des gaz chauds est régulée par le réglage de la pression d'alimentation en gaz butane à l'aide d'un manodétendeur précis fixé sur la bouteille d'alimentation. La canalisation du flux de gaz chauds est effectuée grâce à un conduit de section carré (25 cm^2), longue de 50 cm, placé au dessus du brûleur. Ce conduit comporte une grille d'homogénéisation placée au dessus de celui-ci et qui permet (avec la grille du brûleur) d'obtenir un champ de températures uniforme autour de la goutte et une vitesse d'écoulement uniforme et faible. La vitesse de l'écoulement, mesurée dans la gamme des températures étudiées (300 °C à 650 °C) avec un tube de Pitot, est négligeable ($<0,1 \text{ m/s}$).

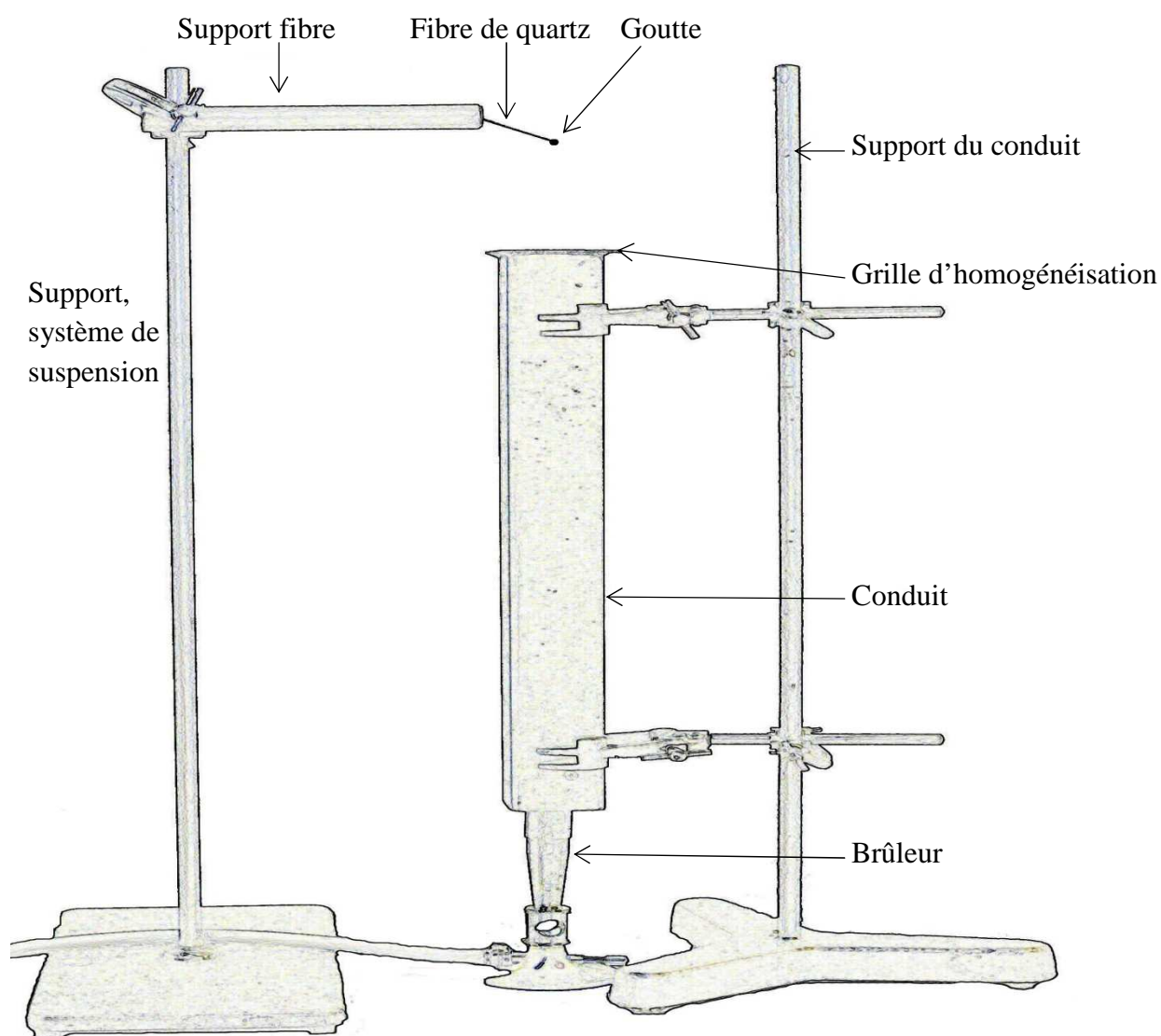


Figure 11 : Le corps du dispositif expérimental

Quant au dispositif de suspension de la goutte, il est constitué d'une fibre de quartz (choisie pour sa faible conductivité thermique) de diamètre 0,2 mm à 0,3 mm fixé sur un support. La fibre est située à 10 cm environ au dessus du conduit de façon centrée. L'aiguille est inclinée d'environ 30° vers le bas par rapport à l'horizontale pour éviter le décrochage de la goutte lorsque la température augmente (forces de viscosité et de tension superficielle réduites). Une plaque permet de dévier le flux de gaz chaud lors de la suspension de la goutte sur la fibre. La goutte est suspendue à l'aide d'une seringue de diamètre 0,4 mm.

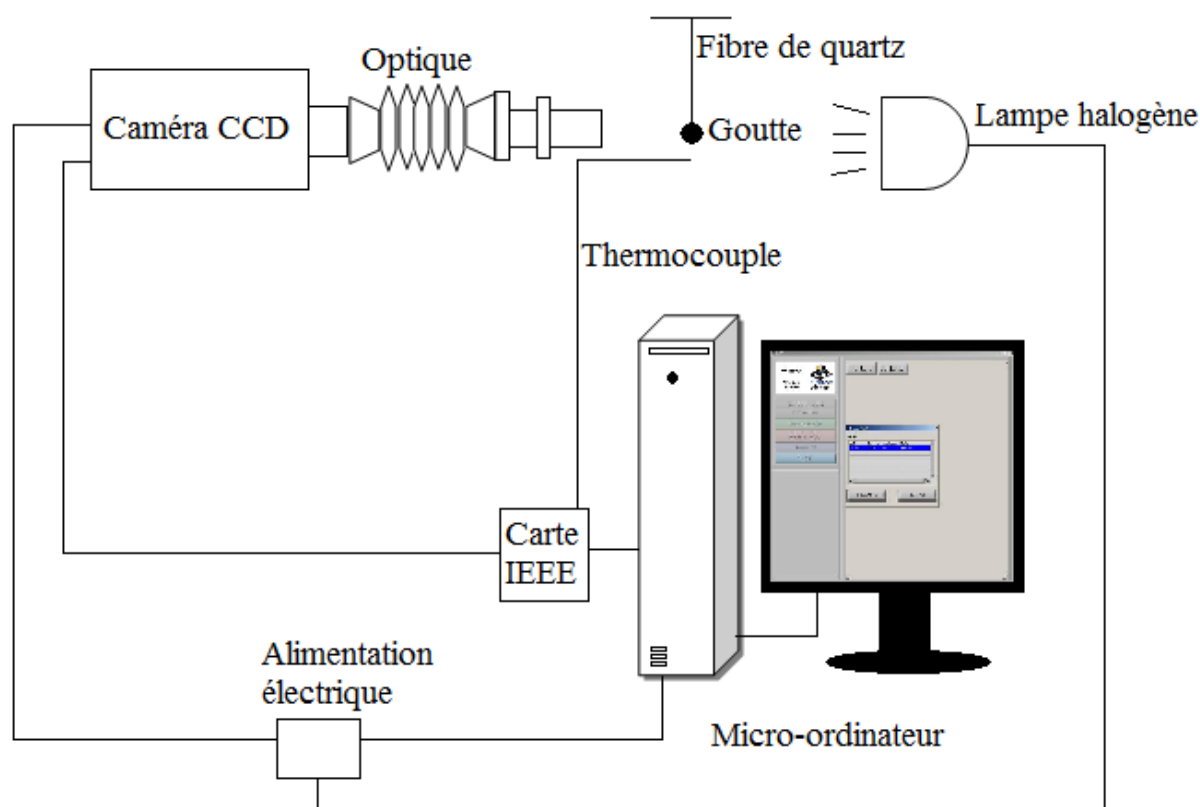


Figure 12 : Dispositif d'acquisition des images

1.2.2 Le système de mesure et d'acquisition de la température

Un thermocouple de type K de diamètre 0,25 mm permet la mesure de la température au voisinage immédiat de goutte (1 cm de la goutte). Avec les deux grilles (celle du brûleur et celle placée au dessus du conduit), des essais préliminaires ont montré que la température est uniforme au voisinage de la goutte dans un tel rayon autour de la goutte (1 cm). Ce thermocouple, du fait de sa faible inertie (0,25 mm de diamètre) et de son temps de réponse très faible (quelques millisecondes) permet une estimation assez précise de la température une fois le flux de gaz rétabli après la suspension de la goutte. Le faible diamètre du thermocouple permet aussi d'éviter la perturbation du flux de gaz au voisinage de la goutte. L'acquisition de la température est effectuée grâce à un convertisseur qui à une entrée « thermocouple » et une sortie « USB ».

1.2.3 Le système d'acquisition et de traitement des images

Pour obtenir les caractéristiques d'évaporation des gouttes, il nous faut suivre l'évolution du diamètre de la goutte en fonction du temps. Cela est réalisé par l'acquisition des contours des gouttes et par la détermination du diamètre équivalent à chaque instant pendant l'évaporation

de la goutte. Les échelles de temps d'évaporation étant en général faibles, surtout dans des conditions de températures élevées, un système rapide d'acquisition automatique des images est indispensable pour une précision des mesures du diamètre. Le système utilisé dans cette étude est composé essentiellement d'une caméra CCD⁵ (Charge Coupled Device) d'une carte d'acquisition IEEE, d'un ordinateur performant et d'un logiciel d'acquisition.

a) Acquisition des images

La caméra CCD utilisée ici est de type XCD SX90 monochrome avec une résolution en niveau de gris sur 8 bits (256 niveaux de gris). Sa résolution horizontale est de 1280 pixels et celle verticale est de 960 pixels. Elle permet une acquisition de 30 images par seconde. Elle est munie d'une optique comportant trois parties : une lentille 0,25x, un objectif 300-370 mm et un multiplicateur 2x. La caméra est reliée à un micro-ordinateur par une carte IEEE 1394 (FWB-PCIE1X20, 2 ports).

Cette carte IEEE est installée dans un micro-ordinateur équipé essentiellement d'un processeur core 2 duo E6550 (2,33 GHz), d'un disque dur de 250 Go, de 3 Go de RAM et d'un écran LCD.

b) Le traitement des images

Il est effectué à l'aide du logiciel NI (National Instrument) Vision Acquisition Software, développé spécialement dans le cadre de cette étude pour gérer le traitement des images des gouttes et réaliser la synchronisation entre l'acquisition et le traitement des images et la mesure de température. La goutte est éclairée par l'arrière (du côté opposé à la caméra, figure 12) par une lampe électrique pour créer un fort contraste entre la goutte et le fond de l'image. L'acquisition et le traitement des images sont initiés à partir d'une température seuil prédéfinie par l'utilisateur. L'image étant déjà numérisée, le logiciel permet de réaliser les opérations de seuillage (à partir de l'histogramme de l'image), d'extraction du contour de la goutte en temps réel, de calcul de la surface projetée de la goutte et de stockage des données

⁵ Une caméra CCD est composée d'une matrice de photodiodes. L'impact de photons libère des électrons qui chargent la capacité des photodiodes. La tension mesurée aux bornes de la capacité est proportionnelle à l'intensité lumineuse. Chaque photodiode représente un point de l'image (pixel), la résolution spatiale est donc proportionnelle au nombre de pixels par ligne et par colonne.

dans un fichier. Le principe global de calcul de la surface projetée de la goutte est donné en annexe C.

1.2.4 Conditions et mode opératoire

L'évaporation a lieu dans une ambiance « ouverte ». Le mélange gazeux (air + vapeurs du combustible) est tel que les phénomènes de combustion sont négligeables (évaporation pure). La procédure expérimentale adoptée pour réaliser l'évaporation des gouttes d'un combustible donné peut être décrite de la façon suivante :

1. Vérification, réglage de la veine expérimentale et des appareils de mesure (caméra, thermocouples)
2. Allumage et réglage de la température en sortie du conduit en ajustant la pression du gaz à l'aide du manodétendeur : fixation de la température à 650 °C
3. Préparation de 0,5 µl, 1 µl et de 1,5 µl du combustible à l'aide de la seringue
4. Déviation du flux de gaz chauds à l'aide d'une plaque
5. Suspension de la goutte sur la fibre de quartz
6. Rétablissement du flux de gaz chaud vers la goutte (l'acquisition est alors déclenchée à partir d'une température seuil lorsque le flux est rétabli vers la goutte). Attente de la fin de l'évaporation
7. Reprise des points 3 à 6 plusieurs fois (au moins cinq fois) pour le même combustible
8. Reprise des points 3 à 7 pour les autres combustibles à tester à la même température de 650 °C
9. Passage successif aux températures de 600°C, 500 °C, 400 °C et 300°C en reprenant les points 3 à 8.

CHAPITRE II : BANCS D'ESSAIS**II.1 BANCS D'ESSAIS DES MOTEURS**

II.1.1 Description des moteurs

II.1.2 Freins dynamométriques et dispositifs de commande

II.1.3 Dispositifs d'analyse des gaz d'échappement

II.1.4 Dispositifs de mesure de la consommation et des températures

II.2 BANCS D'ESSAIS DES BRÛLEURS

II.2.1 Le banc du brûleur à fioul non modifié

II.2.2 Le banc du brûleur adapté aux huiles végétales

II.1 BANCS D'ESSAIS DES MOTEURS

Deux bancs d'essais sont utilisés. Chaque banc comporte un moteur Diesel, un frein dynamométrique à courant de Foucault, un dispositif d'analyse des gaz d'échappement, un dispositif de mesure de la consommation, des capteurs de température, un dispositif de contrôle du banc. L'un des bancs utilise un moteur Diesel à injection indirecte et l'autre, un moteur Diesel à injection directe.

II.1.1 Description des moteurs

Les caractéristiques techniques des deux moteurs sont décrites dans les tableaux 9 et 10. La particularité de chaque type de moteur est décrite dans l'annexe A.

Tableau 9 : Spécifications du moteur Diesel à injection indirecte

Caractéristique	Spécification
Type	Mercedes 190 diesel, quatre temps, refroidissement à eau
Combustion	Injection indirecte, injecteurs à tétons tarés à 125 bars
Pompe d'injection	BOSCH (pompe en ligne)
Nombre de cylindres	4
Alésage	87 mm
Course	84 mm
Cylindrée	1997 cm ³
Puissance maximale	53 kW à 4600 tr/min
Couple maximal	123 Nm à 2800 tr/min

Tableau 10 : Spécifications du moteur Diesel à injection directe

Caractéristique	Spécification
Type	HATZ 1D80, quatre temps, refroidissement à air
Combustion	Injection directe, injecteur à 4 trous taré à 250 bars
Pompe d'injection	BOSCH
Nombre de cylindres	1
Alésage	100 mm
Course	85 mm
Cylindrée	667 cm ³
Couple maximal	38,5 Nm à 1850 tr/min
Puissance maximale	11 kW

II.1.2 Freins dynamométriques et dispositifs de commande

Les freins utilisés sur les deux bancs sont des freins à courant de Foucault. Ce type de frein comporte un corps de frein (constitué de deux chambres de refroidissement avec des canaux de refroidissement concentriques) et un rotor à forme de disque situé à l'intérieur du corps de frein sur lequel se fixe l'arbre du moteur. Une bobine d'excitation, traversée par un courant continu, génère un champ magnétique dans lequel tourne le rotor. Des courants de Foucault sont alors générés dans la paroi interne du carter de refroidissement. Ce sont les champs magnétiques de ces courants qui sont à l'origine du freinage. La chaleur produite, consécutive au freinage, est dissipée par le circuit de refroidissement du frein. Dans le dispositif de la figure 14, quatre aérothermes placés à l'extérieur de la cellule de mesure sont utilisés pour le refroidissement du frein. Le montage en pendulaire du carter de frein et son logement, par l'intermédiaire d'un bras de levier, sur un dispositif dynamométrique permettent la mesure du couple de freinage. Un disque polaire de 60 pôles, placé sur l'extrémité de l'arbre du frein dynamométrique, génère dans un capteur tachymétrique des impulsions de tension selon le nombre de tours. Cette tension (10 V maximum) sert à l'affichage numérique ou analogique du nombre de tours. La puissance est déduite sur la base du couple et de la vitesse mesurée. Le dispositif de commande du frein et celui du moteur permettent de faire varier la vitesse et le couple dans la plage des points de fonctionnement définis par la cartographie de chaque moteur. Chaque dispositif de commande comporte un écran permettant l'affichage du couple et de la vitesse de rotation de l'arbre du moteur.

II.1.3 Dispositifs d'analyse des gaz d'échappement

Pour le moteur Diesel à injection indirecte, l'analyse des gaz d'échappement est réalisée à l'aide d'un analyseur de gaz HORIBA PG250 muni d'un pré-échantillonneur PS200. Les principaux gaz mesurés par cet analyseur sont le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde soufre, l'oxygène (O_2) et le dioxyde de carbone (CO_2). Le principe de la mesure des NO_x repose sur la chimiluminescence, celle de CO, SO_2 et CO_2 repose sur la méthode de l'infrarouge non-dispersif (*Non-Dispersive Infra Red, NDIR*). Enfin, la mesure de O_2 se fait grâce à une cellule galvanique. Les caractéristiques techniques de l'analyseur PG250 sont indiquées dans le tableau 11.

Pour le moteur Diesel à injection directe, un analyseur de gaz Quintox KM 9106 est utilisé. Cet analyseur est équipé de cellules électrochimiques. Il permet de mesurer les teneurs en O_2 , NO, NO_x , CO, SO_2 dans les fumées sèches. Le taux de CO_2 est calculé en fonction des

caractéristiques du combustible et de l'oxygène résiduel mesuré dans les fumées. Les fumées humides passent à travers une canne puis un conduit réchauffé à 115 °C pour éviter la condensation et la dissolution de certains gaz (SO_x , NO_x). Les gaz passent ensuite dans un conditionneur de gaz de combustion (KM9008) permettant un refroidissement brusque des fumées humides. Le passage brusque en dessous du point de rosée de la vapeur d'eau permet de réduire le temps de condensation et de minimiser la dissolution des gaz. Les fumées « quasi-sèches » passent enfin dans l'analyseur de gaz. L'acquisition est effectuée à l'aide d'un boîtier de contrôle qui permet par la suite, le transfert des données sur un ordinateur grâce à une connexion RS232 et un logiciel dénommé FIREWORKS. Les caractéristiques techniques des cellules sont données dans le tableau 12

Tableau 11 : Caractéristiques techniques de l'analyseur HORIBA PG250

Composé	Détection	Résolution	Echelle	Répétabilité
CO	Infrarouge	1 ppm	0-5000 ppm	$\pm 0,5\%$ ($\text{CO} < 1000 \text{ ppm}$)
CO_2	Infrarouge	0,1%	0-20%	-
O_2	Cellule galvanique	0,1%	0-25%	-
NO_x	Chimiluminescence	1 ppm	0-5000 ppm	$\pm 0,5\%$ ($\text{NO}_x < 1000 \text{ ppm}$)

Tableau 12 : Caractéristiques techniques de l'analyseur de gaz Quintox KM9106

Paramètre	Gamme de mesure	Précision	Résolution
Température des fumées	0 – 1100 °C	$1,0 \pm 0,3\%$ du relevé	0,1 °C
Oxygène (O_2)	0 – 25%	-0,1% +2%	0,1%
Oxyde de carbone (CO)	0 – 10000 ppm	$\pm 20 \text{ ppm} < (400 \text{ ppm})$ 5% du relevé ($< 2000 \text{ ppm}$) $\pm 10\%$ du relevé ($> 2000 \text{ ppm}$)	1 ppm
Oxyde Nitrique (NO)	0 – 5000 ppm	$\pm 5\%$ du relevé ($> 100 \text{ ppm}$) $\pm 5 \text{ ppm} (< 100 \text{ ppm})$	1 ppm
Dioxyde d'azote (NO_2)	0 – 1000 ppm	$\pm 5\%$ du relevé ($> 100 \text{ ppm}$) $\pm 5 \text{ ppm} (< 100 \text{ ppm})$	1 ppm
Dioxyde de soufre (SO_2)	0 – 5000 ppm	$\pm 5\%$ du relevé ($> 100 \text{ ppm}$) $\pm 5 \text{ ppm} (< 100 \text{ ppm})$	1 ppm
Dioxyde de carbone	0 – valeur combustible	$\pm 0,3\%$	0,1%

II.1.4 Dispositifs de mesure de la consommation et des températures

Dans le cas du moteur à injection indirecte, le débit volumique de carburant est déterminé grâce à une jauge portant deux graduations qui servent de repère. Le temps de vidange de la jauge (lorsque la vanne de communication du réservoir au reste du circuit d'alimentation est

fermée) permet d'évaluer le débit volumique du carburant. Le carburant passe du réservoir ou de la jauge au moteur via le filtre par gravité.

Quant au moteur à injection directe, la consommation est mesurée grâce à une balance et un chronomètre. Une pompe à carburant électronique de gavage (FACET-PUROLATOR) assure le passage du carburant entre le réservoir et la pompe d'injection entre lesquels est placé un filtre.

Chaque banc comporte des thermocouples de type K, placés dans le conduit des gaz d'échappement, dans le carburant, dans la cellule de mesure et dans le conduit de l'air d'admission. Une centrale (CR-1000) et un logiciel (Loggernet) d'acquisition permettent le transfert des données en temps réel sur un ordinateur dans le cas de l'injection directe. Dans le cas de l'injection indirecte, les températures sont lues grâce à des afficheurs numériques.

Les figures 13 et 14 donnent les schémas de principe des deux bancs d'essai.

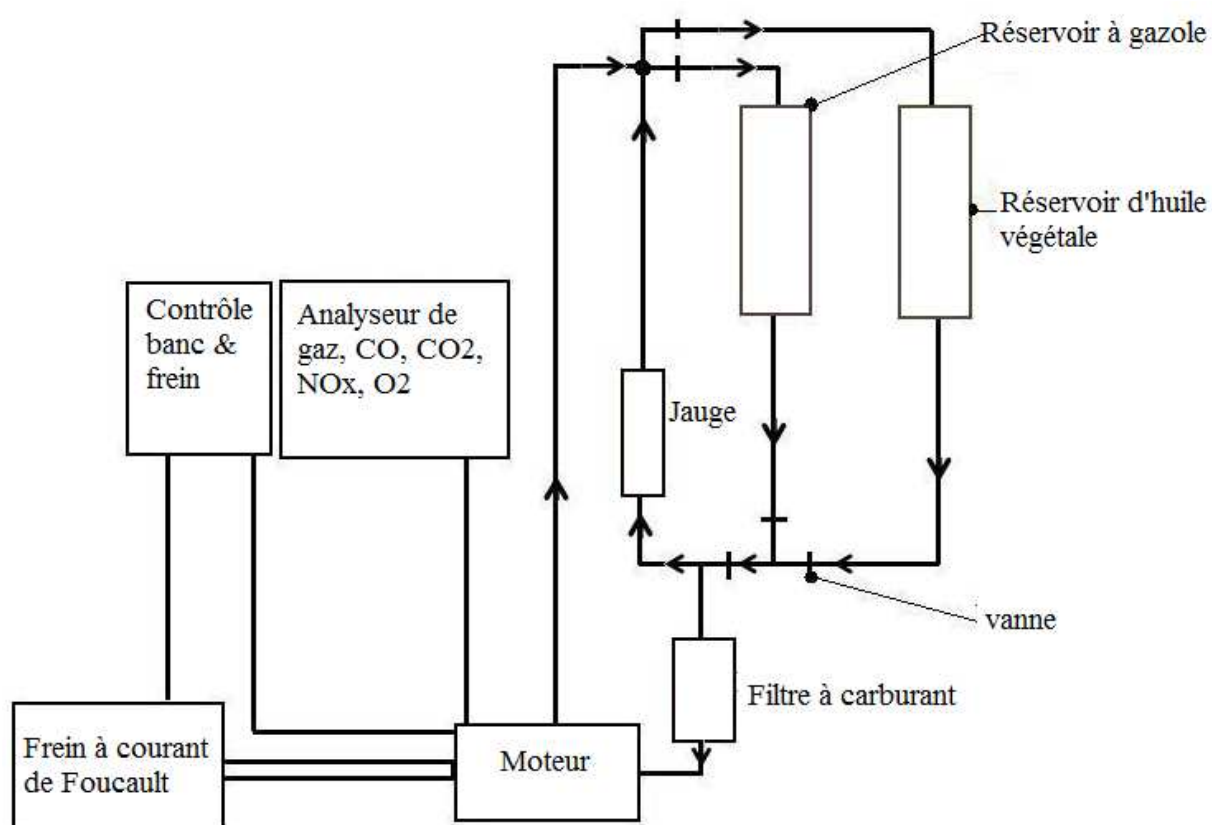


Figure 13 : Dispositif du banc d'essai du moteur Diesel à Injection indirecte

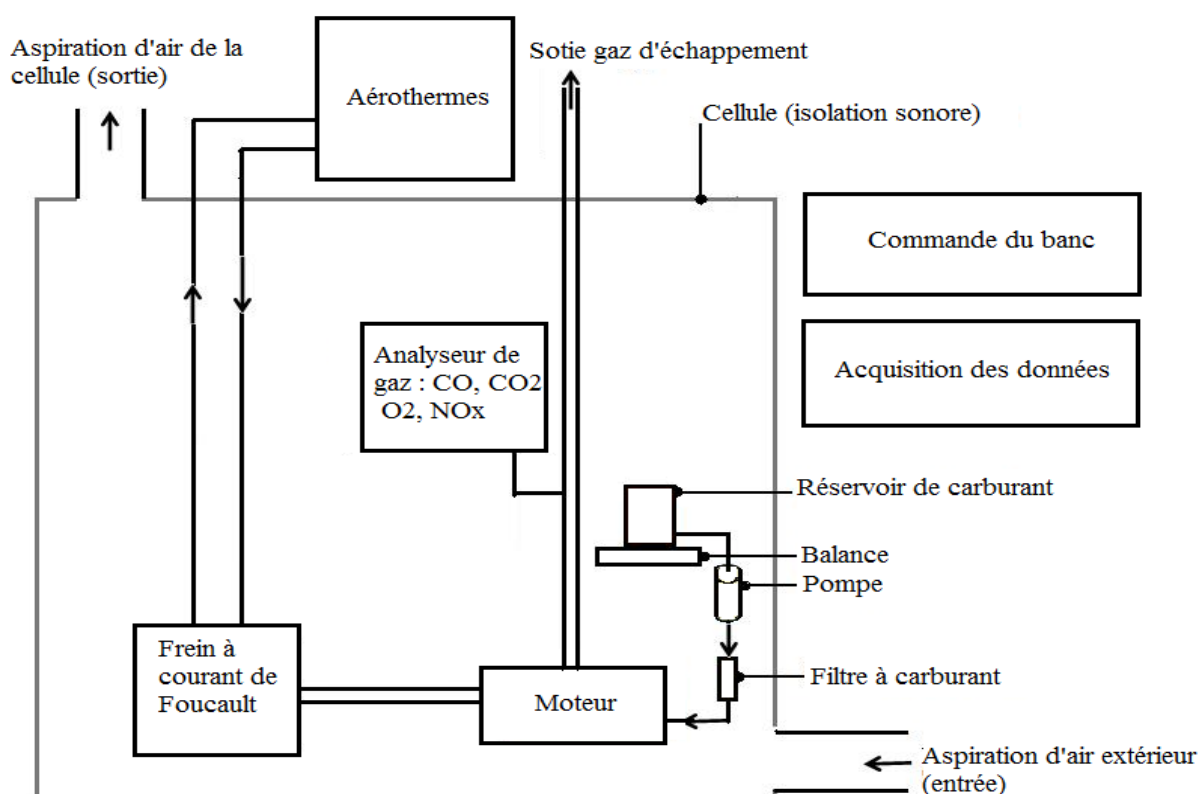


Figure 14 : Dispositif du banc d'essai du moteur Diesel à Injection directe

II.2 BANCS D'ESSAIS DES BRÛLEURS

II.2.1 Le banc du brûleur à fioul non modifié

Les principales composantes de ce banc sont : le brûleur, une chaudière, un échangeur de chaleur et des dispositifs d'analyse des produits de combustion, de mesure de la consommation et de la puissance thermique. La figure 15 donne le schéma du banc d'essai.

a) Le brûleur

Le brûleur utilisé est un brûleur CUENOD de type NC4. Ses caractéristiques techniques sont indiquées dans le tableau 13.

Un moteur électrique entraîne la pompe de combustible et le ventilateur d'air de combustion. La pompe volumétrique et un gicleur assurent la production d'un jet pulvérisé ou « spray » dans un flux d'air (en excès) apporté par le ventilateur d'air pour l'amorçage de la combustion. Le choix du gicleur repose sur les caractéristiques du combustible (viscosité, volatilité), la géométrie de la chambre et la pression de pulvérisation ; la granulométrie du jet en dépend. A une pression de pulvérisation donnée, pour un gicleur, correspondent un débit

de combustible, un angle de cône de pulvérisation et une forme du jet (plein, creux, semi plein etc.). Le gicleur utilisé est de type B (cône plein avec concentration plus élevée du combustible au centre du jet) avec un angle de cône de pulvérisation de 60° .

Le réglage de l'air primaire est effectué grâce à l'ouverture ou à la fermeture d'un volet d'air (graduée de 0 à 18). Celui de l'air secondaire est effectué grâce à un déflecteur dont la position est repérée par une réglette (graduée de 0 à 10 mm). Le réglage de la pression de pulvérisation quant à elle, est effectué grâce à une vanne placée sur le raccord de retour du combustible.

Lors de la mise en marche du brûleur, deux électrodes produisent un arc électrique pour permettre l'amorçage de la combustion. Une cellule photoélectrique établit ou interrompt le courant nécessaire à la production de l'arc électrique aux électrodes selon l'intensité lumineuse dans la chambre de combustion. De même qu'elle autorise le démarrage ou stoppe le brûleur selon la présence ou l'absence de flamme dans la chambre de combustion.

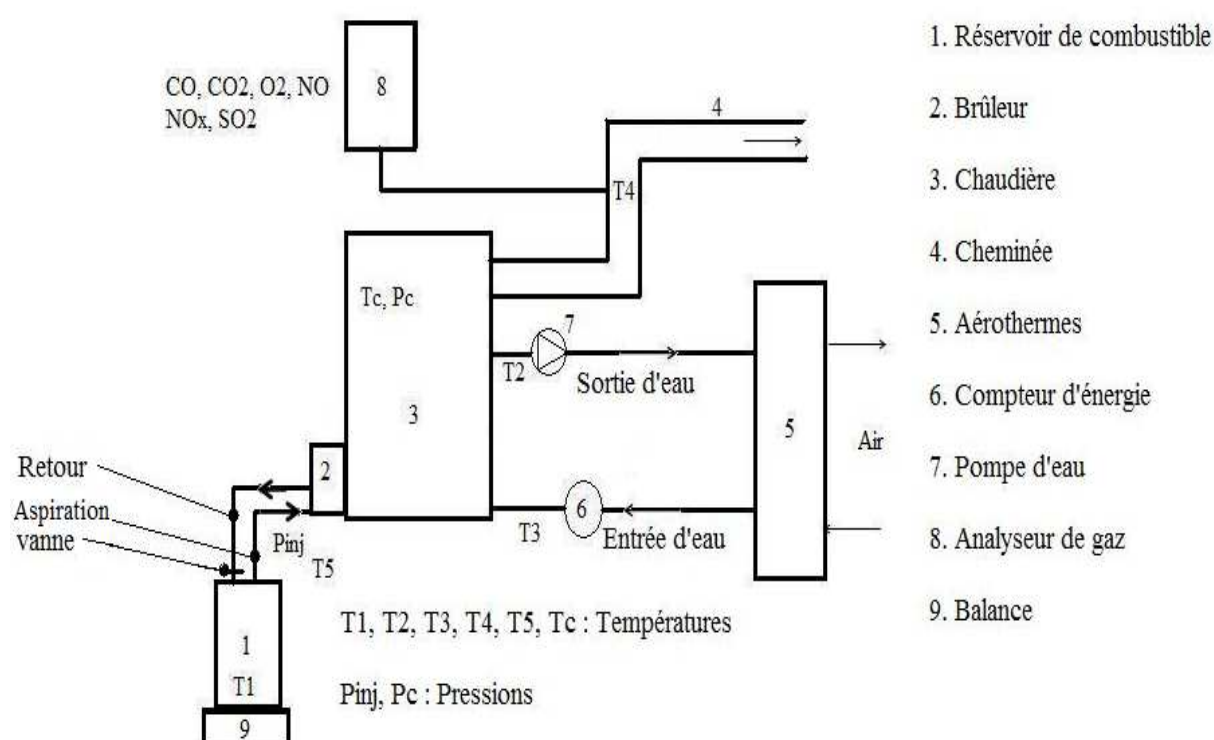


Figure 15 : Banc d'essai du brûleur à fioul non modifié

Tableau 13 : Caractéristiques techniques du brûleur à fioul non modifié

Défecteur : conique Ø 63/16 - 4 fentes
Gicleur : 0,5 USgal/h-60°B HAGO
Puissance : 18 à 40 kW
Débit : 1,5 à 3,4 kg/h
Pression de sortie du combustible : 6 à 25 bars

b) La chaudière et l'échangeur de chaleur

La chaudière et l'échangeur de chaleur représentent « la charge » du brûleur. Le tableau 14 donne les caractéristiques techniques de la chaudière et de l'échangeur de chaleur. Le système de commande du brûleur est couplé à celui de la chaudière. Un régulateur de température permet le contrôle de la température maximale de l'eau de la chaudière de même que le fonctionnement du brûleur (marche et arrêt). Pour des températures de l'eau de la chaudière inférieures à 60°C, l'eau circule à travers l'échangeur uniquement grâce à la différence de température et de pression entre l'entrée et la sortie de la chaudière. Au-delà de cette température, une pompe placée à la sortie de la chaudière, permet d'avoir un débit d'eau d'environ 1 m³/h. Un compteur d'énergie, permet de déterminer la puissance thermique échangée par convection (forcée) avec l'ambiance grâce à la mesure du débit d'eau et la différence de température entre la sortie et l'entrée de la chaudière.

Ce dispositif (chaudière+brûleur) présente deux intérêts importants. Premièrement, ce système correspond à un usage classique (chauffage domestique, séchage etc.), deuxièmement, on se place dans des conditions où la température moyenne de la chambre de combustion est relativement faible (transferts thermiques importants entre les produits de combustion et l'eau de la chaudière) permettant d'évaluer l'influence de la température de la chambre sur la qualité de combustion des huiles. En effet, des différences de comportement des huiles selon les conditions de température de la chambre, ont déjà été observées avec les moteurs diesels (injection directe et injection indirecte) ou lors de l'évaporation de gouttes d'huiles.

Tableau 14 : Caractéristiques techniques de la chaudière et de l'échangeur de chaleur

Chaudière	Fabricant	UNICAL
	Puissance thermique utile	39 – 48 kW
	Contenance en eau	25,5 litres
	Pression maximale	3 bars
	Température maximale	90 °C
Echangeur de chaleur	Fabricant	CIAT
	Puissance électrique	2x90 W
	Rpm	940
	Pression maximale	16 bars
	Fluide colporteur	Eau-huile
Pompe d'eau	Puissance électrique	30 – 65 W
Compteur d'énergie	ΔT_{\max}	20 – 40 °C

ΔT_{\max} : Différence maximale de température de l'eau entre l'entrée et la sortie de la chaudière

c) Dispositif de mesure de la consommation

Le réservoir de combustible est muni d'une résistance chauffante. Une balance électronique permet de déterminer la consommation du combustible.

d) Dispositif d'analyse des produits de combustion

Les gaz issus de la combustion sont analysés à l'aide d'un analyseur de gaz, le Quintox KM9106. Cet analyseur a déjà été décrit dans les paragraphes précédents. L'analyseur est placé dans la cheminée à une distance d'environ 2 fois le diamètre de la cheminée, comptée à partir de la sortie de la chambre de combustion.

II.2.2 Le banc du brûleur adapté à l'huile végétale

Ce banc comporte un brûleur adapté à l'huile végétale, une chambre de combustion et deux dispositifs d'analyse des produits de combustion. Les figures 16 et 17 donnent respectivement le schéma du banc et celui du circuit de réchauffage du combustible.

a) Le brûleur et la chambre de combustion

Le brûleur utilisé est un brûleur RIELLO de type N10 comportant un système de réchauffage du combustible. Son principe global de fonctionnement est le même que celui du brûleur NC4 non modifiée décrit ci-dessus. Les modifications apportées concernent principalement le circuit du combustible. Les caractéristiques techniques principales du brûleur sont indiquées dans le tableau 15. Une résistance chauffante et un circuit de recirculation du combustible sont installés en aval de la pompe (figure 17). L'huile peut être réchauffée à des températures comprises entre 50 et 200 °C. En raison de la viscosité élevée de l'huile végétale, le préchauffage de l'huile à des températures atteignant 120 à 140°C est indispensable pour permettre une bonne atomisation de celle-ci. A la mise en marche du brûleur, la température de la résistance chauffante augmente progressivement pour atteindre la température fixée par la consigne. Une fois cette température atteinte, la pompe assure un « balayage » et une recirculation du combustible à travers le circuit de réchauffage (chemin 1, 4 et 5 de la figure 17) sans aucune pulvérisation, portant ainsi la température du combustible à une température proche de celle régnant dans l'enceinte de la résistance chauffante.

Dans ces conditions de température du combustible, l'électrovanne « VR » permet alors la pulvérisation du combustible à travers l'orifice du gicleur et son retour par le chemin 3 (chemin 1, 3 et 5). La combustion se produit ensuite dans la chambre de combustion qui est une enceinte cylindrique horizontale en acier. A la base de la chambre, une enceinte de la taille de l'embout du brûleur, solidaire à un support, permet de maintenir le brûleur. Un cône comportant des ouvertures surmonte la chambre de combustion en aval (figure 17). Une telle chambre, destinée à une utilisation de la chaleur de combustion pour un séchage direct ou indirect de produits alimentaires ou non, a l'intérêt d'avoir des parois chaudes.

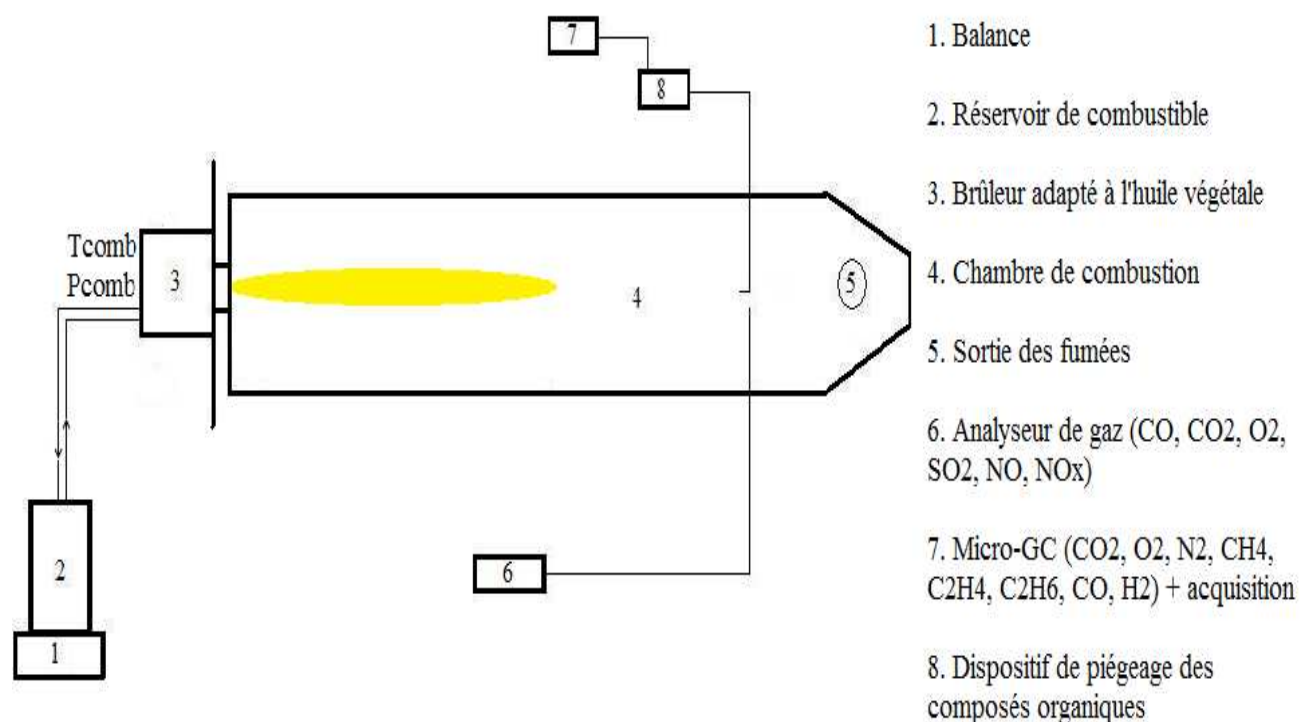


Figure 16 : Schéma de principe du banc du brûleur adapté à l'huile végétale

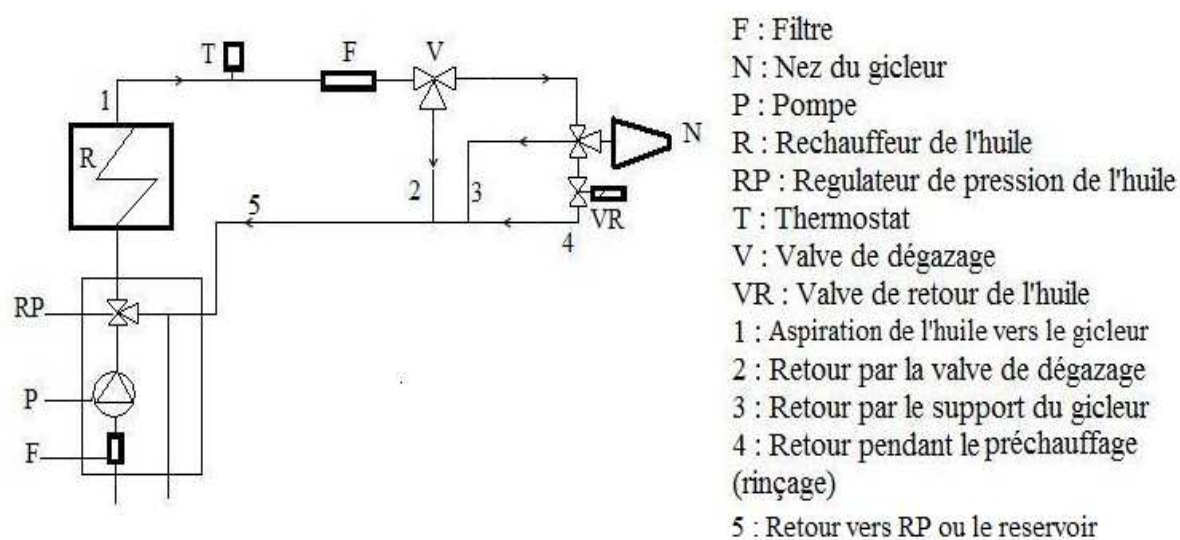


Figure 17 : Schéma de principe du circuit du combustible avec réchauffage

Tableau 15 : Caractéristiques techniques du brûleur adapté à l'huile végétale

Caractéristique	Spécification
Puissance thermique (kW)	34-102
Pression (bars)	16-28
Gicleur	Type HAGO, 1 gal/h - angle 45° CF JV

b) Dispositif de mesure de la consommation

Le dispositif de mesure de la consommation est le même que celui décrit dans le cas du brûleur NC4. Toutefois, dans ce cas, le réservoir de combustible ne comporte pas de résistance chauffante.

c) Dispositif d'analyse des produits de combustion

Deux dispositifs d'analyse des produits de combustion sont utilisés. L'un est l'analyseur de gaz Quintox KM9106 décrit en II.1.3 a et l'autre est un dispositif comportant un bain de piégeage des composés organiques dans les fumées et un micro chromatographe (micro-GC) dont le schéma est donné par la figure 18.

Dans ce dernier dispositif, les gaz prélevés barbotent dans une série de flacons contenant de l'isopropanol et qui plongent dans un bain réfrigérant (-5 °C). Les gaz passent ensuite dans la micro-GC pour l'analyse des gaz incondensables (H₂, O₂, N₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, CO₂, CO), (figure 18). La détection et la quantification de ces gaz s'effectuent par un détecteur à conductivité thermique. Les composés organiques dissous dans l'isopropanol sont analysés à posteriori, grâce un chromatographe Agilent 6890 et un spectromètre de masse Agilent 5975. La température du four du chromatographe Agilent varie entre 45°C et 270°C et celle de l'injecteur est de 250°C. Les caractéristiques de la colonne utilisée sont les suivants :

- type : DB-1701
- longueur : 60 m
- diamètre intérieur : 250 µm
- épaisseur de film : 0,25 µm.

Un microlitre (1 µl) d'un mélange de 1 ml de l'échantillon et de 1 ml de phénanthrène (étalon interne, concentration : 25 mg/l) est injecté dans le chromatographe. Il s'en suit l'identification et la quantification des composés organiques présents.

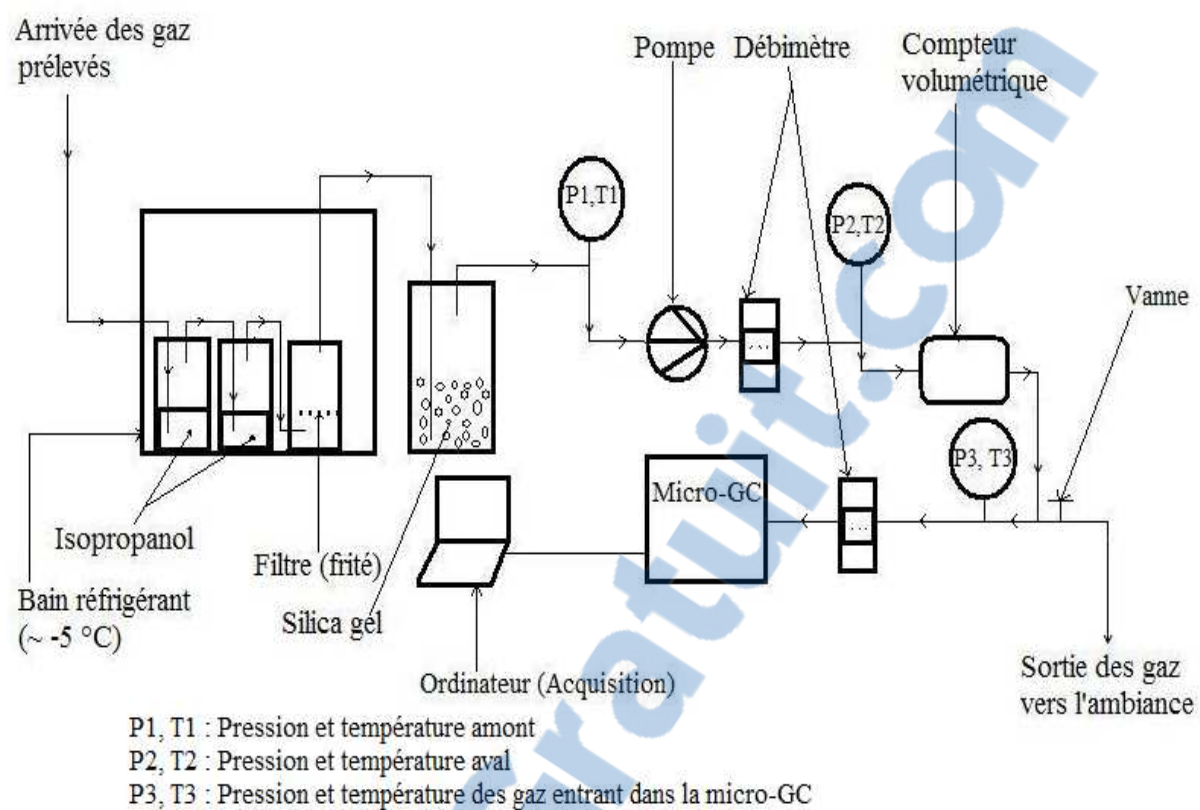


Figure 18 : Dispositif d'analyse des produits de combustion avec piégeage de composés organiques

PARTIE III : RESULTATS ET ANALYSE

CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET ANALYSE GRANULOMETRIQUE

I.1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

I.1.1 Résultats

I.1.2 Analyse

I.2 ATOMISATION ET ANALYSE GRANULOMETRIQUE

I.2.1 Atomisation

I.2.2 Granulométrie

INTRODUCTION

La partie I de ces travaux a porté en grande partie sur l'influence des caractéristiques physico-chimiques des carburants fossiles et des huiles végétales sur leur comportement dans les moteurs et sur les brûleurs.

La connaissance de ces caractéristiques est très fondamentale pour l'analyse des résultats relatifs à la combustion des carburants dans la suite de notre travail.

Aussi, l'atomisation et la granulométrie du jet de carburant sont des aspects qui influencent l'inflammation et la combustion.

Ce chapitre présente les résultats et l'analyse de la caractérisation physico-chimique et granulométrique des différents types de combustibles.

I.1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

I.1.1 Résultats

Les caractéristiques physico-chimiques intrinsèques ou celles relatives à l'inflammation et à la combustion et aux impuretés des différents carburants, mesurées lors de ces travaux sont présentées dans les tableaux 16, 17 et 18.

Tableau 16 : Caractéristiques physiques et caractéristiques liées à l'inflammation ou à la combustion

	Carburant						
	HRB100	HCpB100	HCB100	HCD100	HCR100	HPR100	FOD
ρ (kg/m ³) ⁽¹⁾	920	918	929	926	922	918	844
ν (mm ² /s) ⁽²⁾	35,7	43	37	34	35,7	39	3,3
PT (°C)	-11	20-28	-	-1	0	31	<-6
PE (°C)	ND	-	0	-3	-3	24	-9
FP (°C)	>200	-	241	>250	230	280	63
σ (mN/m)	32,2	-	31,5	32,4	32,4	-	28,6
PCI (kJ/kg)	36800	34300	34500	36000	36400	36100	43700
IC	32-36	40-42	-	-	35-40	38-40	47,3
RC (%)	0,41	-	1,27	0,43	0,41	0,42	0,08

⁽¹⁾ : masse volumique à 15 °C

⁽²⁾ : Viscosité à 40°C

ND : Non déterminé dans cette étude

Italique : (GOERING (1982), VAITILINGOM (1992))

HRB100 : Huile de colza brute sans mélange au FOD

- HCpB100 : Huile de coprah brute sans mélange au FOD
 HCB100 : Huile de coton brute sans mélange au FOD
 HCD100 : Huile de coton dégommée sans mélange au FOD
 HCR100 : Huile de coton raffinée sans mélange au FOD
 HPR100 : Huile de palme raffinée sans mélange au FOD

Les chromatogrammes des mesures de la composition en acides gras des différents types d'huile sont fournis par les figures 19, 20, 21 et 22.

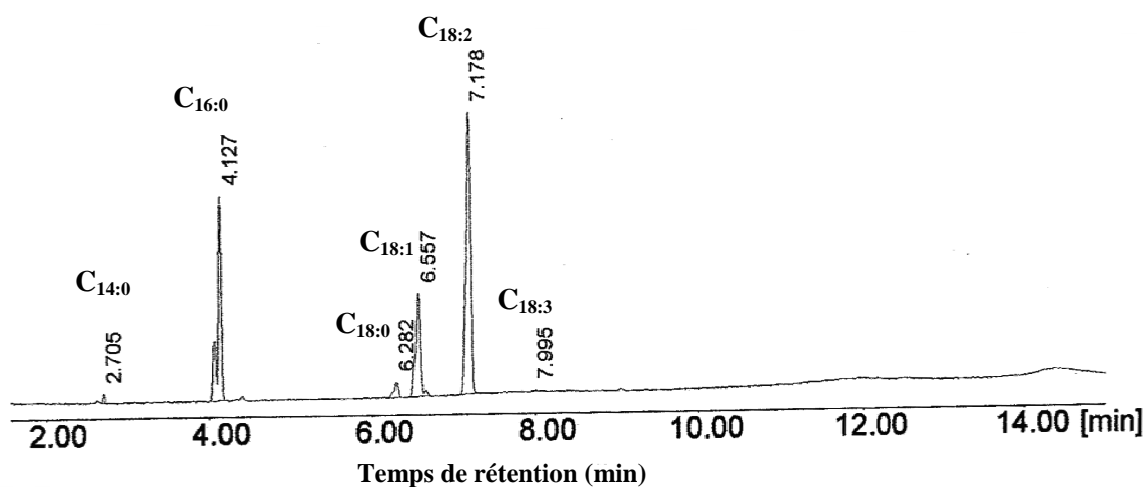


Figure 19 : Acides gras de l'huile de coton brute

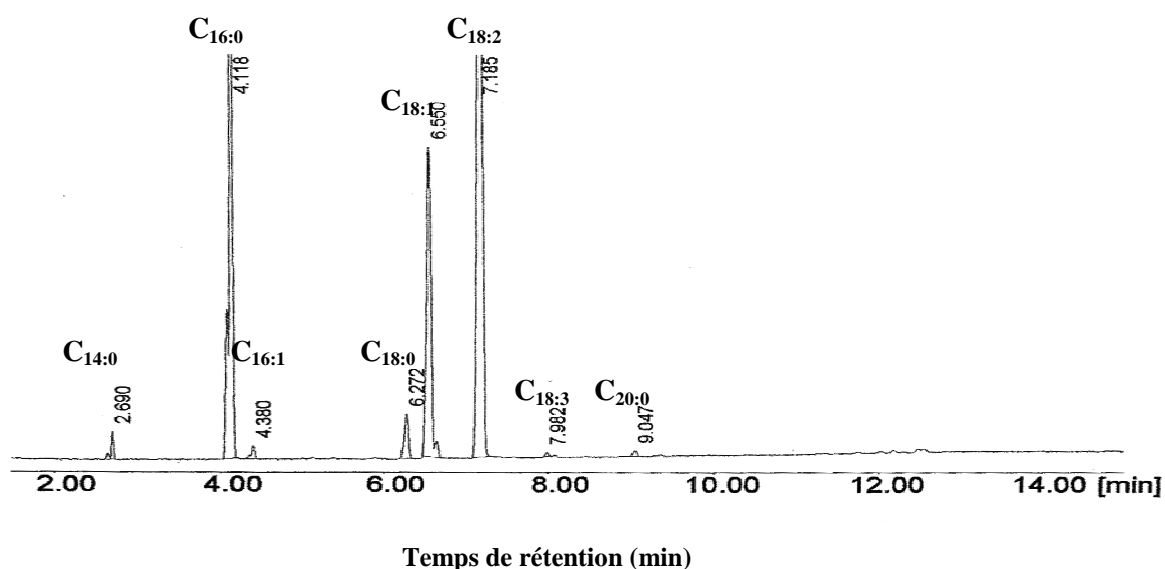


Figure 20 : Acides gras de l'huile de coton dégommée

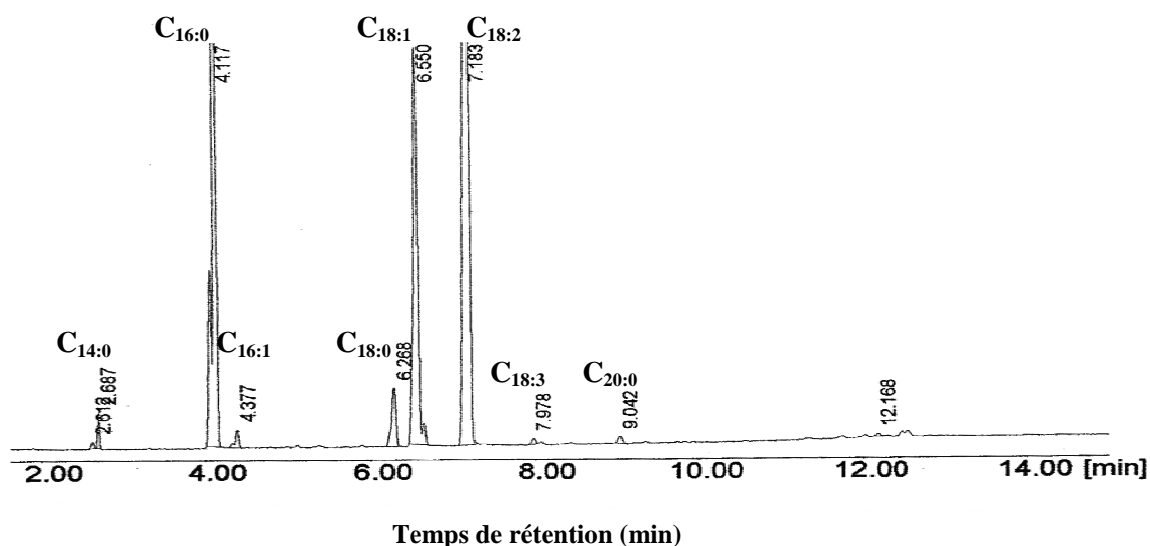


Figure 21 : Acides gras de l'huile de coton raffinée

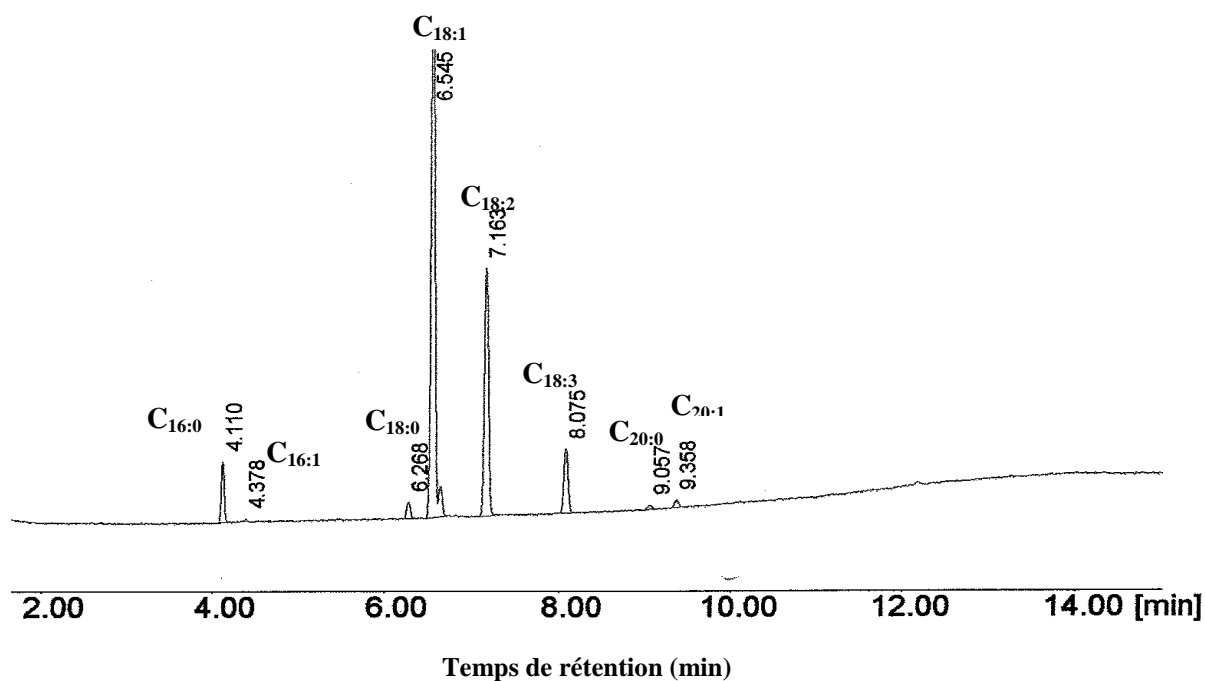


Figure 22 : Acides gras de l'huile de colza brute

L'exploitation de ces résultats a permis la détermination de la composition en acides gras des huiles de coton et de colza (tableau 17); celles des huiles de coprah et de palme sont issues de la littérature (VAITILINGOM, (1992)).

Tableau 17 : Composition en acides gras totaux des Triacylglycérols (% pondéral)

Acides gras	Nom de l'acide	Huiles					
		HRB100	HCpB100	HCB100	HCD100	HCR100	HPR100
6:0	Caproïque	-	0-5	-	-	-	-
8:0	Caprylique	-	5-10	-	-	-	-
10:0	Caprique	-	5-10	-	-	-	-
12:0	Laurique	-	45-50	-	-	-	0,1
14:0	Myristique	0,0	18-20	0,5	0,8	0,8	1
16:0	Palmitique	4,6	8-10	26,4	26,0	25,7	42-48
16:1	Palmitoléique	-	-	0,1	0,6	0,5	0,2
18:0	Stéarique	1,7	1-3	2,5	2,4	2,4	5-6
18:1	Oléique	59,1	5-7	18,6	18,2	18,2	36-45
18:2	Linoléique	25,8	1,8	52,0	51,5	51,3	6-10
18:3	Linolénique	6,9	-	0,1	0,2	0,3	0,2
20:0	Arachidique	0,5	-	-	0,3	0,2	0,3
20:1	Euricique	0,9	-	-	-	-	-

Les caractéristiques chimiques (composition chimique élémentaire, indice d'acide) et la teneur en impuretés, mesurées sur les différents combustibles d'origine végétale et fossile, sont présentées dans le tableau 18.

Tableau 18 : Caractéristiques chimiques, impuretés et altération des huiles et du FOD

	Carburant						
	HRB100	HCpB100	HCB100	HCD100	HCR100	HPR100	FOD
C (%)	77,73	73,39	77,90	76,71	77,39	76,92	86,89
H (%)	11,92	11,93	11,62	11,84	11,90	11,79	12,98
O (%)	10,76	14,68	11,46	11,47	11,10	11,28	0,45
N (%)	<0,10	-	<0,10	<0,30	<0,30	-	<0,3
S (%)	0	-	0	0	0	-	<0,20
eau (ppm)	599	ND	756	1156	656	ND	100
I _a (mgKOH/g)	1,03	ND	6,29	0,18	0,17	ND	-
Sédiments (ppm)	38	ND	28	33	23	ND	-
P (ppm)	1,6	ND	203	0,5	0,2	ND	-
Mg (ppm)	0,4	ND	70,3	0,3	0,2	ND	-
Ca (ppm)	3,7	ND	29,8	2,2	2,1	ND	-

1.1.2 Analyse des résultats

L'analyse de ces résultats, laisse apparaître des différences liées au niveau de traitement de l'huile (en particulier celui de l'huile de coton) et au type d'huile (coton, colza, palme, coprah).

a) Influence de la nature du traitement de l'huile :

- La plupart des caractéristiques intrinsèques sont peu sensibles au traitement subi par l'huile au regard des incertitudes : masse volumique, PCI, viscosité, point de trouble, point d'écoulement, point éclair, composition en acides gras et composition chimique élémentaire (tableaux 16, 17 et 18, cas de l'huile de coton). En effet, ces caractéristiques (dans l'ensemble) dépendent très peu des impuretés qui représentent la différence fondamentale entre les huiles de niveau de traitement différent.

Mais certaines caractéristiques sont très variables selon le traitement subi par l'huile : la teneur en eau et en sédiments, l'indice d'acide, le taux de phosphore, les teneurs en magnésium et calcium, le résidu Conradson. En effet, ces paramètres dépendent entre

autre des conditions de stockage et de transport des matières premières, du procédé de trituration, des opérations successives d'élimination des impuretés dans les huiles et du type d'huile.

Le PCI qui est une propriété intrinsèque du combustible semble varier légèrement avec le traitement de l'huile. La teneur plus élevée en impuretés incombustibles de l'huile brute, comme l'indique le tableau 18, semble conduire à un PCI plus faible (huile de coton brute et huile de coprah brute).

- Les paramètres qui sont très variables selon la nature du traitement de l'huile sont généralement ceux relatifs aux impuretés de l'huile comme indiqué précédemment :

Les Phospholipides

La teneur en phospholipides des différentes huiles, déterminée par la mesure du taux de phosphore, indique une forte variation selon le niveau de traitement de l'huile de coton. Les phospholipides, sont les principaux constituants des cellules des membranes des graines. L'huile brute de coton utilisée ici est extraite de graines de coton non décortiquées et est obtenue à l'issue d'une pression à froid des graines, ce qui est favorable à une faible teneur en phospholipides. Toutefois, les températures de trituration assez élevées (supérieures à 100 °C) sont favorables à des teneurs élevées en phospholipides dans l'huile brute. L'utilisation de cette huile brute de coton dans un moteur ou sur un brûleur, pourrait favoriser la formation des dépôts et des encrassements dans le système d'alimentation en combustible et dans la chambre de combustion. Quant aux huiles de coton dégommées et raffinées, les mucilages ont été en grande partie éliminés lors du dégommage. On obtient ainsi, des teneurs très faibles de phospholipides dans ces deux huiles de coton.

Autres impuretés

Les résultats de mesure des teneurs en magnésium, en calcium, en sédiments et en eau, de l'indice d'acide indiquent que le dégommage ou le raffinage ont permis d'éliminer les impuretés tels le magnésium et le calcium en plus des phospholipides et de diminuer l'acidité libre de l'huile brute de coton (élimination des acides gras libres). Cela diminue les risques d'oxydation et de corrosion liés à l'utilisation des huiles de coton dégommées et raffinées.

Le raffinage semble réduire la teneur en sédiments ; cependant, la méthode (NF EN 12662) utilisée pour la détermination de ces derniers est une méthode pétrolière qui se prête mal aux huiles végétales. En effet, la valeur de la masse des sédiments dans le cas des huiles, déterminée par cette méthode est très souvent entachée de la masse résiduelle de l'échantillon

d'huile analysée. Néanmoins, on peut noter que les teneurs en sédiments plus élevées dans l'huile brute de coton conduit à un résidu Conradson plus élevé par rapport aux huiles raffinées et dégommees. Si le Résidu Conradson, qui est une mesure de la tendance des produits pétroliers à former des dépôts, n'est pas un bon descripteur de la tendance des huiles végétales à former les dépôts, il permet dans une certaine mesure une évaluation qualitative de leur teneur en matières incombustibles.

b) Influence de la nature des huiles :

Les résultats indiquent que les principales caractéristiques qui varient selon la nature de l'huile végétale sont : les caractéristiques d'écoulement ou de tenue à froid (viscosité, point de trouble, point d'écoulement) et la composition en acides gras.

On peut noter des points de trouble, des points d'écoulement et des viscosités plus élevés des huiles saturées (coprah et palme) comparativement aux huiles insaturées (colza et coton). En effet, les acides gras saturés, acides gras majoritaires dans les huiles de palme et de coprah (tableau 17), ont des points de fusion relativement élevés contrairement aux acides gras insaturés qui ont des points de fusion relativement bas (le point de trouble croît de façon linéaire avec la saturation de l'huile (ZALIHA et *al.* (2003)). Aussi, la viscosité croît légèrement avec la saturation de l'huile. On obtient ainsi des points de trouble, des points d'écoulement et des viscosités plus faibles dans le cas des huiles de coton et de colza (huiles linoléique et oléique respectivement).

Quant à la composition en acides gras, on peut classer par ordre décroissant de teneur en acides gras saturés totaux : l'huile de coprah, l'huile de palme, l'huile de coton et l'huile de colza. En termes de qualité de combustion le même classement reste valable. Cependant, en termes de stockage ou de la tenue du circuit d'alimentation, les trois huiles de coton présentent des risques plus importants de colmatage compte tenu de leur siccativité plus élevée que celle de l'huile de colza et les huiles de coprah et de palme.

Les résultats montrent par ailleurs, une teneur élevée en acides gras saturés totaux des huiles de coton utilisés (tableau 17) en comparaison aux valeurs présentées dans la littérature (WOLF (1968) ; VAITILIGOM (1992)). Cela est intéressant en termes de combustion de l'huile. En effet, comme déjà indiqué dans la partie I, plus une huile végétale est riche en acides gras saturés, mieux sera son aptitude à l'évaporation, à l'inflammation et à la combustion.

Enfin, les résultats indiquent que l'huile de colza contient très peu de phospholipides. En effet, Les procédés actuels de trituration à froid de l'huile de colza donnent des teneurs en phosphore inférieures à 10 ppm.

Les caractéristiques telles, la composition chimique élémentaire varie très peu selon la nature des huiles (tableau 18). On obtient ainsi des PCI du même ordre de grandeur pour les différentes huiles.

c) Différences entre les caractéristiques physiques et de combustion des huiles et celles du FOD

Les résultats obtenus sur les caractéristiques physico-chimiques des différentes huiles confirment les différences généralement observées entre ces caractéristiques et celles du FOD : masses volumiques plus élevées des huiles végétales, viscosités 10 à 15 fois plus élevées, PCI massiques inférieures (environ 15%), composition et nature chimique différentes de celles du FOD, etc. L'une des conséquences directes de ces différences de viscosité avec le FOD est la nécessité d'un réchauffage de l'huile végétale (condition nécessaire mais pas suffisante) pour permettre une bonne pulvérisation du combustible comme nous le verrons dans le point I.2. La figure 23 donne les variations de la viscosité de l'huile de coton et du FOD suivant la température et suivant le taux de dilution de l'huile au FOD. On peut noter qu'un réchauffage de l'huile pure de coton à des températures supérieures à 100 °C est indispensable pour obtenir une viscosité comparable à celle du FOD.

Aussi l'une des différences fondamentales liées à la nature chimique du FOD (gazole) et des huiles végétales est l'oxygène présent dans les huiles conduisant à des PCI plus faibles. Enfin, le soufre présent dans le FOD (gazole) et sa teneur quasi-nulle dans les huiles aura pour conséquence des différences de comportement en termes d'émission d'oxydes de soufre.

L'ensemble de ces résultats rappellent la nécessité d'utiliser les huiles végétales dans des conditions spécifiques.

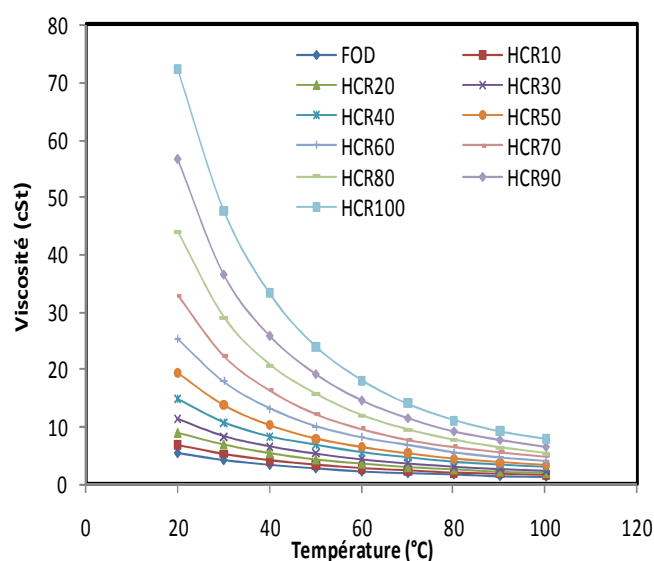


Figure 23 : Viscosité de l'huile de coton et ses mélanges au FOD en fonction de la température

I.2 ATOMISATION ET ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Dans la combustion Diesel ou sur un brûleur, l'atomisation et la granulométrie du « *spray* » sont deux aspects fondamentaux. Nous présentons dans cette section, les résultats relatifs à ces deux caractéristiques ainsi que leur analyse.

I.2.1 Atomisation

Dans le souci de vérifier que les réglages définis par les installations utilisées pour ces travaux correspondent à des points d'atomisation correcte, nous avons basé notre démarche sur le mécanisme de désintégration du jet et la classification des différents régimes des jets établis par REITZ (1979) et HIROYASU (1990).

a) Aspects théoriques

L'atomisation se déroule en deux phases : l'atomisation primaire, au cours de laquelle les gouttes sont générées à partir du jet (désintégration du jet) et l'atomisation secondaire qui est régie par les interactions des gouttes entre elles et avec le milieu ambiant.

On s'intéresse ici à l'atomisation primaire qui elle, dépend en grande partie des caractéristiques physiques et chimiques du carburant (viscosité, tension superficielle et masse volumique du combustible).

Les nombres de Reynolds et de Ohnesorge du jet, définis par les équations E.3.1 et E.3.2, permettent de caractériser en première approximation le régime de désintégration du jet de carburant.

$$Re_j = \frac{\rho_{fl}.v_j.d_{tr}}{\mu_{fl}} \quad (E.3.1)$$

$$Oh_j = \frac{\mu_{fl}}{\sqrt{\rho_{fl}.\sigma_{fl}.d_{tr}}} \quad (E.3.2)$$

La classification des différents régimes de désintégration d'un jet et les critères de transition entre ces régimes sont donnés par les figures 24 et 25 (REITZ et *al.* (1979) ; LEFEBVRE (1989) ; HIROYASU (1990)).

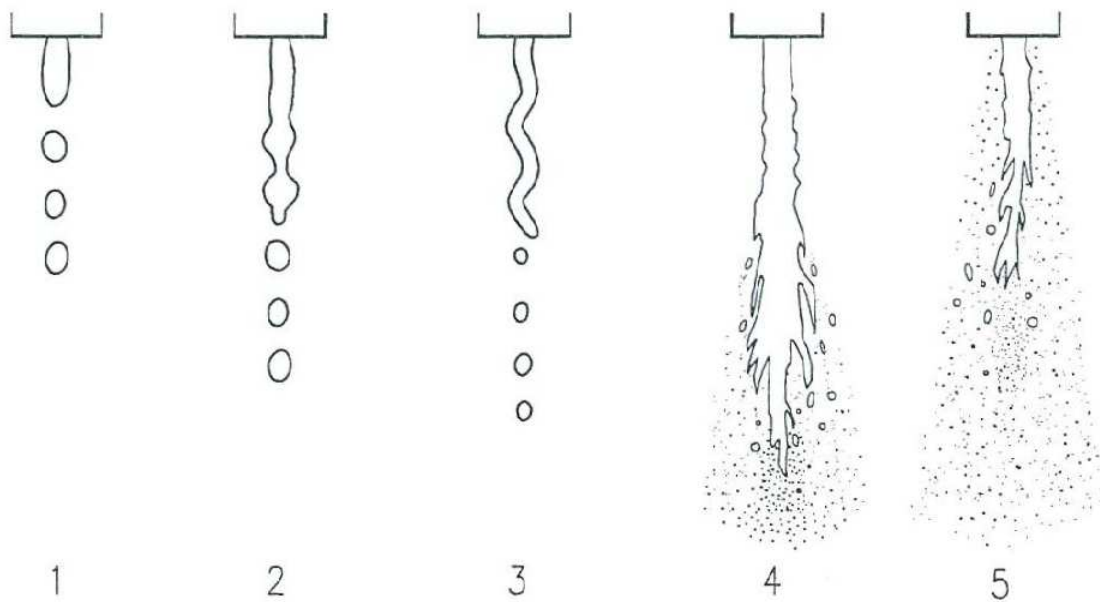


Figure 24 : Régime de désintégration d'un jet issu d'un orifice circulaire (HIROYASU (1990))

Sur la figure 24, les cinq régimes désignent respectivement :

- (1) : le régime de goutte à goutte
- (2) : le régime de Rayleigh (RaM)
- (3) : le régime de première interaction aérodynamique (First-wind-Induced (FWI) regime)
- (4) : le régime de seconde interaction aérodynamique ou régime de « spray » incomplet (Second-Wind-Induced (SWI) regime) : L'atomisation ne commence qu'à une certaine distance (L_c) de la sortie du jet, qui décroît à vitesse d'éjection croissante. L'atomisation

commence à la périphérie du jet tandis qu'au centre, il subsiste un noyau qui ne s'atomise qu'à une certaine distance (L_b) appelée longueur de rupture

(5) le régime d'atomisation ou régime de « spray » complet : l'atomisation commence dès la sortie du jet ($L_c = 0$). Un noyau liquide subsiste au centre au delà duquel se trouve la zone de développement du « spray » et la zone de « spray » développé.

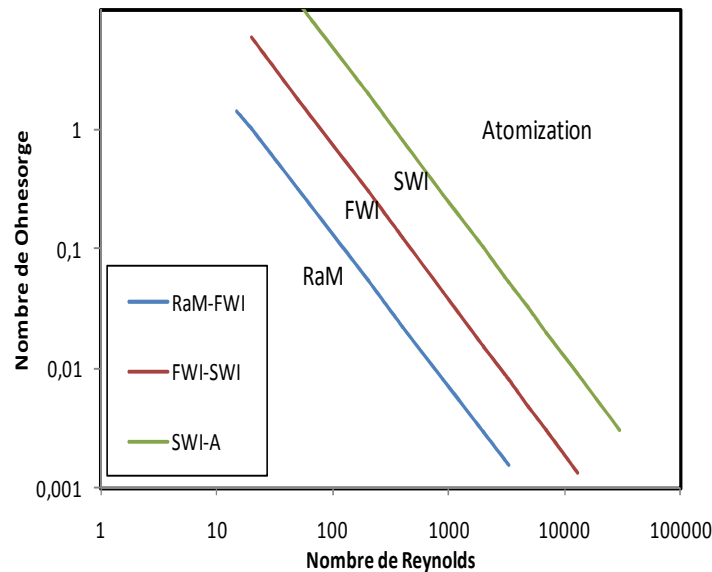


Figure 25 : Classification des différents régimes de désintégration du jet et critères de transition (LEFEBVRE (1989))

b) Résultats et analyse

L'évaluation des nombres de Reynolds et de Ohnesorge en fonction des caractéristiques physiques établies pour les carburants utilisés et des conditions de fonctionnement sur les moteurs et les brûleurs a permis de déterminer le régime d'atomisation (figures 26 à 29). L'huile de coton raffinée (HCR100) est prise comme référence pour les huiles végétales, les caractéristiques physiques mises en jeu variant peu pour l'ensemble des huiles pour observer une différence entre celles-ci.

- Conditions d'atomisation dans le cas des moteurs

Les paramètres physiques (masse volumique, viscosité et tension superficielle) des carburants sont déterminés à 85 °C, moyenne des températures au nez d'injecteur lors de l'injection.

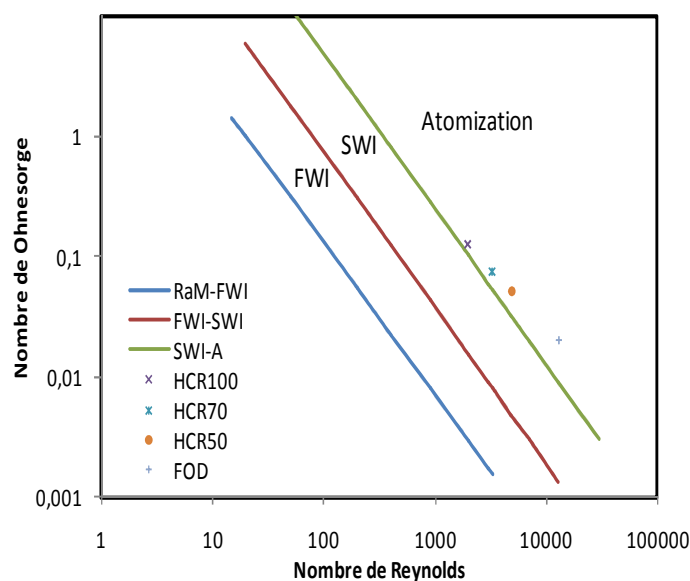


Figure 26 : Conditions d'atomisation dans le moteur Diesel à injection indirecte

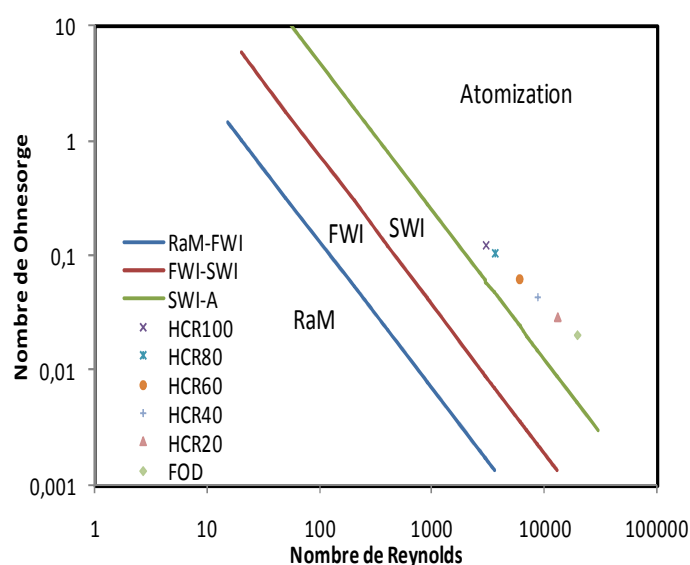


Figure 27 : Conditions d'atomisation dans le moteur Diesel à injection directe

HCR10, HCR20, HCR30, HCR40, HCR50, HCR60, HCR70, HCR80 : mélanges de FOD et respectivement 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% et 80% d'huile de coton raffinée.

L'analyse des résultats obtenus indique que dans les deux moteurs, tous les carburants atteignent le régime d'atomisation (figures 26 et 27). Cependant, plus la proportion d'huile végétale augmente dans le carburant, plus l'on est proche de la zone de transition entre le régime de seconde interaction aérodynamique et le régime d'atomisation. Cela est beaucoup plus marqué dans le moteur à injection indirecte compte tenu des pressions d'injection plus

faibles (faible nombre de Reynolds). Dans le moteur Diesel, c'est le régime d'atomisation (spray complet) qui est recherché. Ainsi, l'utilisation de HCR100 ou des mélanges tels HCR80 ou HCR70 dans des conditions standards du fioul risquerait de conduire à un « spray » plus ou moins incomplet.

- Conditions d'atomisation dans le cas des brûleurs

Pour les deux brûleurs, les paramètres physiques utilisés pour le calcul des nombres de Reynolds et de Ohnesorge sont déterminés aux différentes températures et pressions d'utilisation spécifiées dans la partie II (chapitre II).

Pour le brûleur à fioul non modifié, les combustibles utilisés sont placés dans des conditions telles qu'ils présentent des caractéristiques physiques voisines (tension superficielle viscosité et masse volumique). Les conditions d'atomisation sont donc quasi identiques à une pression donnée. Dans ces conditions le paramètre essentiel qui détermine l'atomisation est la pression de pulvérisation. Nous avons donc présenté les conditions d'atomisation en choisissant l'un des combustibles utilisé sur ce brûleur (par exemple FOD, HCR10 HCR20 etc.) suivant la pression de pulvérisation (figure 28).

Pour le brûleur adapté à l'huile végétale, les conditions d'atomisation sont présentées pour les différentes températures d'utilisation de l'huile de coton sur ce brûleur (figure 28).

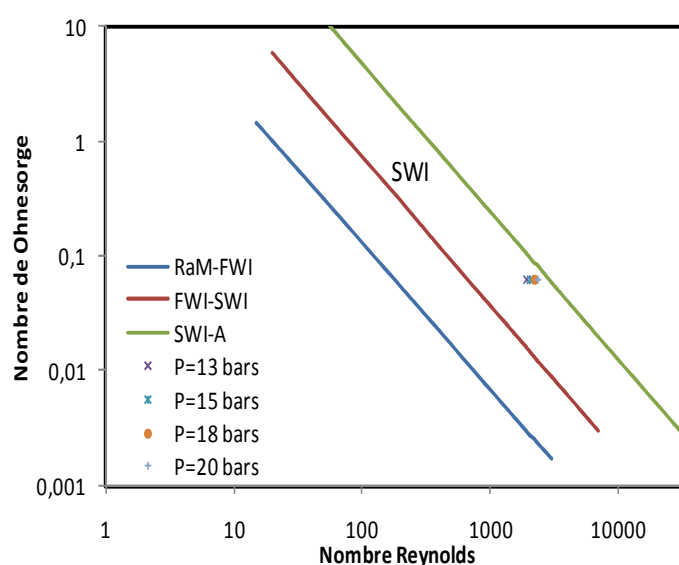


Figure 28 : Conditions d'atomisation sur le brûleur à fioul non modifié

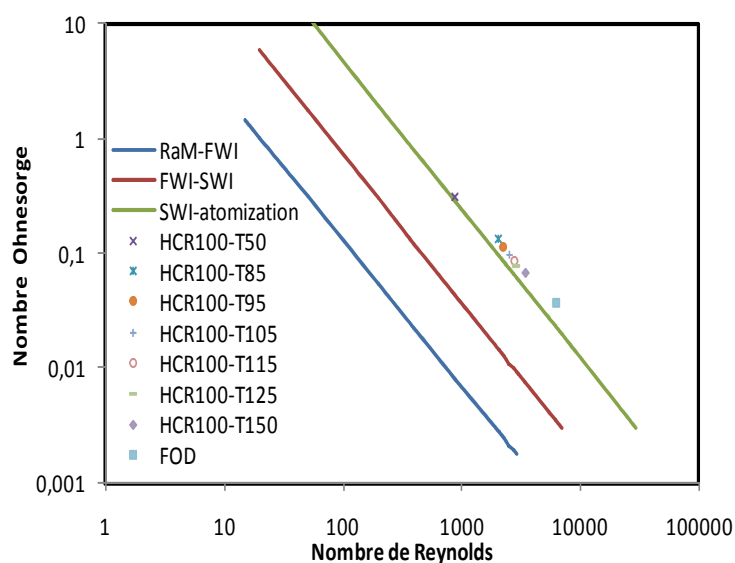


Figure 29 : Conditions d'atomisation sur le brûleur adapté à l'huile végétale

T50, T85, T95, T105, T115, T125, T150 correspondent aux températures de 50 °C, 85 °C, 95 °C, 105 °C, 115 °C, 125 °C et 150 °C pour l'huile de coton pure.

Sur le brûleur à fioul non modifié, pour des faibles pressions de pulvérisation, on se situe dans la zone de seconde interaction aérodynamique (SWI). Toutefois l'augmentation de la pression de pulvérisation conduit à l'augmentation du nombre de Reynolds (augmentation de la vitesse de pulvérisation) sans variation du nombre de Ohnesorge. Cependant, le nombre de Reynolds du jet varie faiblement dans cette gamme de pression, de sorte que l'influence sur le régime d'atomisation reste très faible. On se situe près de la zone de transition entre les régimes de « spray » incomplet et de « spray » complet. On peut dire d'ores et déjà que ce type de brûleur se prête mal aux carburants visqueux comme c'est le cas des huiles végétales, utilisées dans les conditions du FOD.

Quant au Brûleur Adapté à l'huile, le réchauffage de l'huile couplé à une forte pression de pulvérisation conduit à un spray complet pour la plupart des températures de réchauffage. Seule la température de 50 °C conduit à un régime proche de la zone de transition entre les régimes de « spray » complet et « spray » incomplet. L'utilisation des carburants visqueux, comme c'est le cas des huiles végétales, dans ce type de brûleur pour des conditions spécifiques semble donc très intéressante en termes d'atomisation.

I.2.2 Granulométrie

a) Aspects théoriques

La granulométrie d'un « spray » de carburant indique les caractéristiques des gouttes qui le composent (taille, vitesse et position, dispersion des tailles des gouttes). La distribution de la taille des gouttes doit être telle que la proportion des gouttes de diamètre faible soit importante pour augmenter la surface de contact avec l'air et favoriser la vaporisation du carburant.

Pour déterminer la granulométrie d'un « spray », on utilise en général, soit une fonction de distribution des diamètres, soit des diamètres moyens uniques caractéristiques de la taille des gouttes.

Les fonctions de distribution permettent de déterminer les courbes de répartition des diamètres ou des vitesses des gouttes et de rendre compte de leur dispersion. Pour cela, on utilise des expressions mathématiques avec des paramètres dont la détermination repose sur des ajustements à partir de mesures expérimentales.

Les fonctions les plus utilisées sont résumées comme suit (VANHEMELRYCK (1997)) :

- la loi de Rosin Rammler

$$V(d) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{\delta} \right)^N \right] \quad (\text{E.3.3})$$

δ et N les paramètres, $V(d)$ la distribution volumique cumulée des diamètres des gouttes. d , ici désigne le diamètre des gouttes

- la loi de Nukiyama-Tanasawa

$$n(d) = \frac{a \cdot b^{3/a}}{\Gamma(3/a)} \cdot d^2 \cdot \exp(-b \cdot d^a) \quad (\text{E.3.4})$$

a , b les paramètres et $n(d)$ la distribution numérique des diamètres des gouttes

- la loi de Li et Tankin

$$v(d) = 3 \cdot a \cdot d^2 \cdot \exp(-a \cdot d^3) \quad (\text{E.3.5})$$

a , le paramètre et $v(d)$ la distribution volumique des gouttes

- la loi Normale

$$v(d) = \frac{1}{N \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left(- \frac{(d-X)^2}{2 \cdot N^2} \right) \quad (\text{E.3.6})$$

X et N les paramètres

- la loi log-normale

$$v(d) = \frac{1}{\ln(N) \cdot \sqrt{2\pi} \cdot d} \exp\left(-\frac{(\ln(d) - \ln(X))^2}{2(\ln(N))^2}\right) \quad (\text{E.3.7})$$

X et N les paramètres

- la loi *Upper-limit*

$$v(d) = \frac{1}{\ln(N) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\left[\ln\left(\frac{a \cdot d}{X-d}\right)\right]^2}{2(\ln N)^2}\right) \quad (\text{E.3.8})$$

a, X et N les paramètres

- la loi en χ^2

$$\frac{dv}{v}(d) = \frac{1}{\frac{\phi}{2^{\frac{\phi}{2}} \cdot \Gamma(\frac{\phi}{2})}} \cdot (\chi^2)^{\frac{\phi}{2}-1} \cdot \exp\left(-\frac{\chi^2}{2}\right) d(\chi^2) \quad (\text{E.3.9})$$

b et ϕ les paramètres

Quant aux diamètres moyens uniques, utilisés pour caractériser la granulométrie des « sprays », ils ne rendent pas compte de la dispersion des diamètres mais ils sont plus faciles à traiter. Les diamètres moyens peuvent être exprimés par plusieurs types d'expressions du genre (MUGELE et al. (1951)) :

$$\phi_{qp}^{q-p} = \frac{\int_0^\infty \phi^q \frac{dn}{d\phi} d\phi}{\int_0^\infty \phi^p \frac{dn}{d\phi} d\phi} \quad (\text{E.3.10 a})$$

$$\phi_{pq}^{q-p} = \frac{\sum n_i \cdot \left(\frac{\phi_i + \phi_{i+1}}{2}\right)^q}{\sum n_i \cdot \left(\frac{\phi_i + \phi_{i+1}}{2}\right)^p} \quad (\text{E.3.10 b})$$

q et p $\in \mathbb{N}$ et $q > p$.

ϕ étant le diamètre de la goutte dans les équations E.3.10 a et b.

L'un des diamètres les plus utilisés pour caractériser le diamètre moyen des gouttes est le diamètre moyen de Sauter (\bar{D}_{32} ; $p = 2$ et $q = 3$). C'est le diamètre équivalent à celle d'une goutte qui a le même rapport surface/volume que l'ensemble du « spray ». Il est très utilisé car il caractérise à la fois la pénétration des gouttes dans l'air ainsi que les transferts de chaleur et de masse.

Plusieurs corrélations ont été formulées. Les plus utilisées sont données par les équations ci-dessous (ELKOTB et al. (1982) ; HIROYASU et al. (1989,1990)) :

$$\bullet \quad \bar{D}_{32} = 47 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{d_{tr}}{V_j}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{fl}}{\rho_a}\right)^{0,25} \cdot g^{0,2} \cdot \left(1 + 33,1 \cdot 10^{15} \cdot \frac{\mu_{fl}}{\sqrt{\sigma_{fl} \cdot \rho_{fl} \cdot d_{tr}}}\right) \quad (E.3.11)$$

$$\bullet \quad \bar{D}_{32} = A \cdot \Delta P^{-0,135} \cdot \rho_a^{0,121} \cdot V_i^{0,131} \quad (E.3.12)$$

A = 25,1 pour un injecteur à têtton

A = 23,9 pour un injecteur à trous

A = 22,4 pour un injecteur à têtton et étranglement

ΔP est la différence entre la pression d'injection et la pression dans la chambre au moment de l'injection (MPa)

V_i : volume de carburant injecté par cycle et par cylindre ($\text{mm}^3/\text{cycle}/\text{cylindre}$)

d_{tr} : diamètre du trou de l'injecteur

V_j : vitesse du jet

ρ_a : masse volumique de l'air

μ_{fl} : viscosité dynamique du combustible

g : intensité de la pesanteur

σ_{fl} : tension superficielle du combustible

ρ_{fl} : masse volumique du combustible

$$\bullet \quad \frac{\bar{D}_{32}}{d_{tr}} = \max\left(\frac{\bar{D}_{32}^{LS}}{d_{tr}}, \frac{\bar{D}_{32}^{HS}}{d_{tr}}\right) \quad (E.3.13 \text{ a})$$

Où

$$\frac{\bar{D}_{32}^{LS}}{d_{tr}} = 4,12 \cdot Re_j^{0,12} \cdot We_j^{-0,75} \cdot \left(\frac{\rho_{fl}}{\rho_a}\right)^{0,18} \cdot \left(\frac{\mu_{fl}}{\mu_a}\right)^{0,54} \quad (E.3.13 \text{ b})$$

(spray incomplet)

$$\frac{\bar{D}_{32}^{HS}}{d_{tr}} = 0,38 \cdot Re_j^{0,25} \cdot We_j^{-0,32} \cdot \left(\frac{\rho_{fl}}{\rho_a}\right)^{-0,47} \cdot \left(\frac{\mu_{fl}}{\mu_a}\right)^{0,37} \quad (E.3.13 \text{ c})$$

(spray complet)

Avec We_j , le nombre de Weber du jet définit par l'équation E.3.14

$$\bullet \quad We_j = (Re_j \cdot Oh_j)^2 \quad (E.3.14)$$

$$\bullet \quad \bar{D}_{32} = 6156 \cdot \nu_{fl}^{0,385} \cdot (\rho_{fl} \sigma_{fl})^{0,737} \cdot \Delta P^{-0,54} \cdot \rho_a^{0,06} \quad (E.3.15)$$

Dans l'équation E.3.15 on a : ν_{fl} (viscosité cinématique) en m^2/s , σ_{fl} en N/m, ρ_a et ρ_{fl} en kg/m^3 et P en bar

Dans les équations E.3.13 b et E.3.13 c, les exposants LS et HS sont utilisés respectivement pour « sprays » incomplets et pour « sprays » complets.

Nous n'effectuons pas ici une analyse de distribution granulométrique. Pour déterminer la granulométrie des « sprays » dans les deux moteurs et sur les deux brûleurs utilisés, nous utilisons la corrélation de ELKOTB pour le diamètre moyen de Sauter. Les résultats sont indiqués dans le tableau 19 et les figures 30 et 31.

b) Résultats et analyse

- Cas des moteurs

Tableau 19 : Diamètres moyens de Sauter dans les conditions d'injection des deux moteurs

	Carburant	$\bar{D}_{32}(\mu m)$
Injection Indirecte	FOD	34
	HCR50	55
	HCR70	66
	HCR100	86
Injection directe	FOD	21
	HCR20	25
	HCR40	31
	HCR60	37
	HCR80	47
	HCR100	53

Dans des conditions d'utilisation standard du FOD (température du carburant et pression d'injection), on peut remarquer que le diamètre moyen de Sauter des gouttes augmente lorsque le pourcentage d'huile de coton dans le carburant augmente. Cela est dû à l'augmentation de la viscosité et de la tension superficielle avec le pourcentage d'huile. Cette augmentation détermine la différence entre la pression d'injection et la pression de la chambre, conditionnée en partie par les pertes de charge liées à l'augmentation de la viscosité. Cela est beaucoup plus marqué dans le cas de l'injection indirecte où la pression d'injection

est plus faible (ΔP plus faible). Des diamètres de gouttes plus élevés pour des carburants contenant une proportion élevée d'huile par rapport au FOD impliquent des temps d'évaporation plus longs (long délais d'inflammation) du fait du temps d'évaporation plus long de chaque goutte et du fait de la réduction de la surface totale d'échange.

- *Cas des brûleurs*

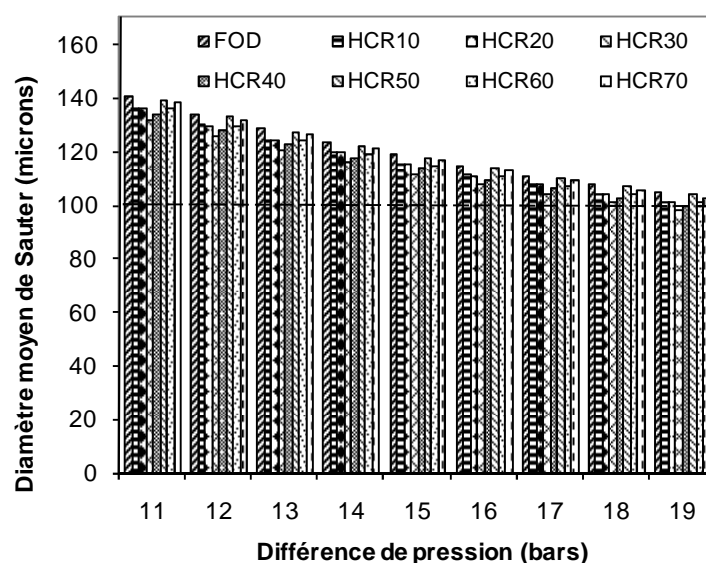


Figure 30 : Diamètre moyen de Sauter en fonction de la différence de pression (brûleur à fioul non modifié)

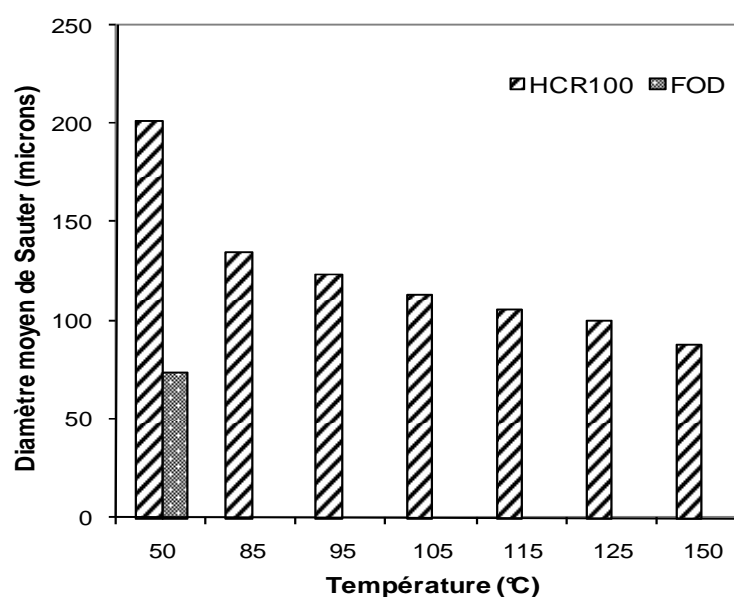


Figure 31 : Diamètre moyen de Sauter du FOD et de l'huile en fonction de la température du combustible (brûleur adapté à l'huile)

Avec le brûleur à fioul non modifié, tous les combustibles présentent des diamètres moyens de Sauter du même ordre de grandeur pour une même pression de pulvérisation. Cela est dû aux caractéristiques physiques (masse volumique, tension superficielle et viscosité) quasi identiques des différents combustibles dans les conditions d'utilisation décrites dans le chapitre II de la partie II.

En général, dans les brûleurs, les diamètres moyens de Sauter des gouttes conduisant à une bonne combustion du FOD varieraient entre 50 et 100 μm avec une dispersion telle que les gouttes de diamètre élevé (200 à 300 μm) constituent une faible fraction de la masse du jet. Les résultats (figure 30) indiquent donc que dans ce brûleur, une augmentation de la pression de pulvérisation, telle que la différence de pression (ΔP dans l'équation E.3.15) atteigne 19 bars est indispensable. Cette augmentation de pression doit être effectuée dans les conditions de température de réchauffage spécifique à chaque combustible, telle que données dans la partie II. Cela est indispensable pour permettre l'obtention des diamètres moyens de Sauter favorables à une bonne combustion. La suite des résultats relatifs à la combustion de ces combustibles dans ce brûleur permettra d'analyser l'influence de ces valeurs de diamètres des gouttes obtenus.

Quant au brûleur adapté à l'huile, tous les combustibles étant utilisés à une même pression de pulvérisation avec une différence de pression ΔP de l'ordre de 27 bars, les résultats indiquent que le réchauffage de l'huile à une température supérieure à 115 °C est indispensable pour obtenir des diamètres moyens de Sauter inférieurs ou égaux à 100 μm (figure 31).

CONCLUSION

Au regard des résultats de caractérisation physico-chimique des différentes huiles et en prenant en compte les relations entre leurs caractéristiques et celles des moteurs ou des brûleurs, on pourrait dire que le dégommage de l'huile de coton peut suffire à obtenir une bonne qualité de l'huile en tant que carburant pour les moteurs Diesel et les brûleurs. Cependant, pour l'ensemble des huiles, des précautions doivent être prises pour réduire leur viscosité avant tout autre ajustement.

Par ailleurs, les différentes caractéristiques mesurées (PCI, viscosité, masse volumique, tension superficielle etc.) lors de ce travail sont en bon accord avec celles données dans la littérature (GOERING *et al.* (1982) ; VAITILINGOM (1992) ; RAMDHAS *et al.* (2004) ; RAKOPOULOS *et al.* (2006)).

Toutefois, il est à noter que la plupart des méthodes de détermination des caractéristiques des produits pétroliers est inadaptée pour les huiles végétales. De plus, certaines caractéristiques (résidu Conradson, points de distillation...) ne paraissent pas pertinentes pour apprécier la qualité « carburant » des huiles végétales. Il est nécessaire d'élaborer des procédures normalisées et des critères de qualité des huiles végétales qui prennent en compte leurs spécificités par rapport aux carburants pétroliers.

Quant à l'atomisation, l'analyse des résultats permet de dire que l'utilisation de l'huile pure ou ses mélanges au FOD dans un type de moteur ou de brûleur donné, impose des conditions spécifiques (pression d'injection ou de pulvérisation, température du combustible) pour obtenir une granulométrie proche de celle du FOD. C'est seulement dans ces conditions que l'on peut effectuer une comparaison entre les carburants.

Le processus consécutif à l'atomisation est la vaporisation du « spray » obtenu. La vaporisation et la combustion de ce « spray » dépendent en grande partie des propriétés physico-chimiques du carburant, du « swirl⁶ », de la température et de la pression du milieu ambiant. Le phénomène prépondérant mis en jeu est le transfert de chaleur et de masse entre les gouttes constituant le « spray » et le milieu en contact avec ces gouttes. Cet aspect sera analysé dans le chapitre II de cette partie à travers l'étude de l'évaporation d'une goutte isolée des différents carburants utilisés.

⁶ Mouvement d'air à l'origine qui devient en général circulaire. Sa forme dépend en grande partie de la géométrie de la chambre de combustion

CHAPITRE II : ETUDE DE L'EVAPORATION DE GOUTTES D'HUILES VEGETALES ET DU FOD

INTRODUCTION

II.1 RESULTATS EXPERIMENTAUX

II.1.1 Rappel des conditions expérimentales

II.1.2 Résultats et analyse sur l'évolution de la surface de la goutte

II.1.3 Constantes d'évaporation

II.2 DESCRIPTION DU MODELE THEORIQUE UTILISE

II.2.1 Propriétés thermodynamiques et propriétés de transport

II.2.2 Nombres de transfert :

II.2.3 Prise en compte de la convection

II.2.4 Prise en compte de la période de chauffage de la goutte

II.2.5 Prise en compte cumulée de la convection naturelle et de la période de chauffage de la goutte

II.2.6 Durée de vie de la goutte

II.3 RESULTATS THEORIQUES ET LEUR COMPARASON AUX RESULTATS EXPERIMENTAUX

II.3.1 Constantes d'évaporation

II.3.2 Temps de chauffage et temps total du processus d'évaporation

CONCLUSION

INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats théoriques et expérimentaux des caractéristiques d'évaporation de différents carburants. L'approche utilisée pour la détermination des propriétés de transport et des propriétés thermodynamiques des différentes phases des huiles végétales est basée sur l'utilisation des propriétés de leurs acides gras majoritaires. Pour l'huile de coton, il s'agit des acides linoléique, oléique et palmitique. Les résultats expérimentaux sont obtenus avec le dispositif décrit dans le chapitre I de la partie II.

II.1 RESULTATS EXPERIMENTAUX

II.1.1 *Rappel des conditions expérimentales*

Le dispositif et le protocole expérimental décrivant l'évaporation de gouttes de combustibles ont déjà été présentés dans la partie II (chapitre I).

La gamme de températures de travail se situe entre 578 K et 917 K (température du voisinage immédiat de la goutte, rayon de 1 cm). La pression de travail est la pression ambiante. Les vapeurs de combustibles sont diluées dans l'écoulement autour de la goutte. La composition du mélange gazeux (air + vapeurs du combustible) est telle que les phénomènes de combustion sont négligeables (évaporation pure).

La goutte de combustible a un diamètre qui varie entre 1 mm et 1,42 mm. C'est le diamètre équivalent à celui d'un cercle dont la surface est équivalente à l'ellipse représentant la surface projetée de la goutte. Le principe de calcul de la surface par le logiciel utilisé est donné dans l'annexe C. Pour chaque combustible, les essais sont effectués au moins cinq fois pour vérifier la répétabilité des mesures. L'écart type est de l'ordre de 4%.

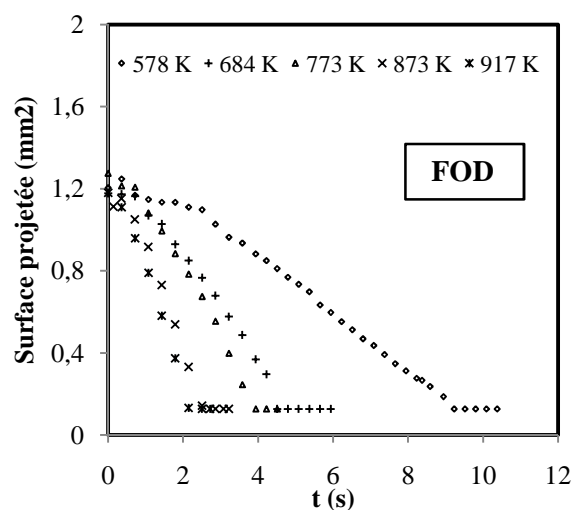
Les combustibles utilisés lors de cette étude d'évaporation sont le FOD, les huiles de coton (brute dégommée et raffinée), les huiles de colza et de jatropha ainsi que des mélanges d'huile de coton et de FOD.

Le temps de réponse assez faible du thermocouple utilisé (quelques millisecondes) permet une bonne estimation des paramètres d'évaporation dans la gamme de températures étudiées.

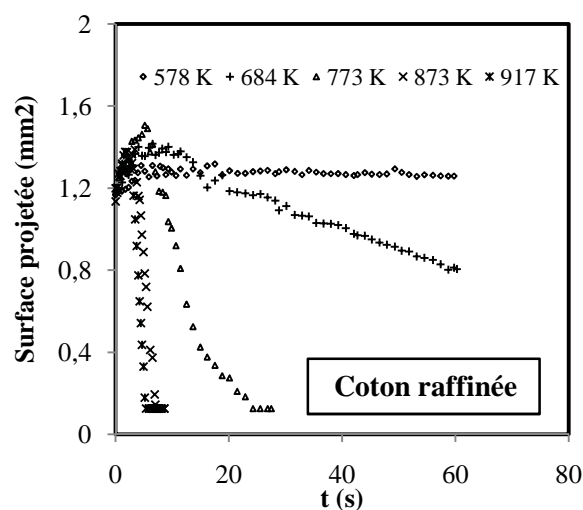
II.1.2 *Résultats et analyse sur l'évolution de la surface de la goutte*

Les figures 32 et 33 donnent respectivement l'évolution de la surface des gouttes des différents combustibles et l'évolution de la surface des gouttes suivant le pourcentage d'huile de coton dans le fioul. Les courbes sont présentés pour des gouttes de diamètre 1,23 mm

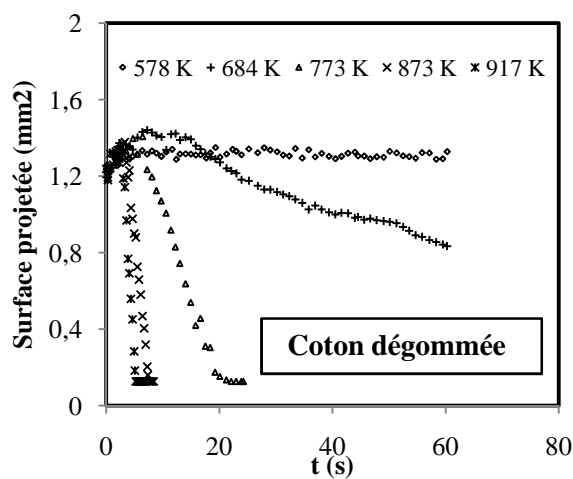
environ. Les mesures portant sur l'huile brute sont inexploitable en raison d'une forte dispersion des points de mesure vraisemblablement liée à la forte teneur en impureté de cette huile (cf. tableau 18).



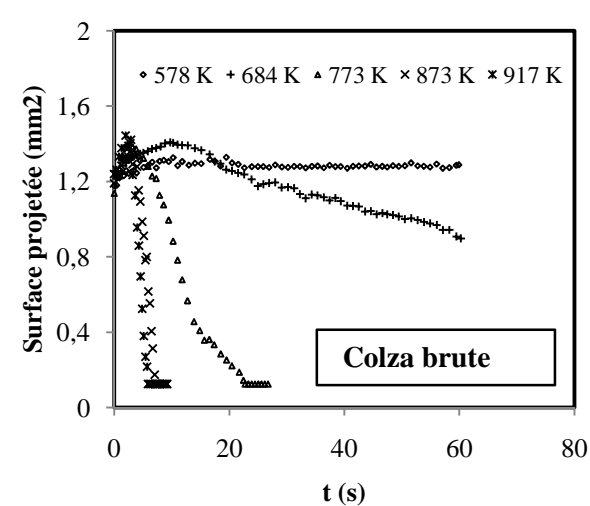
(a)



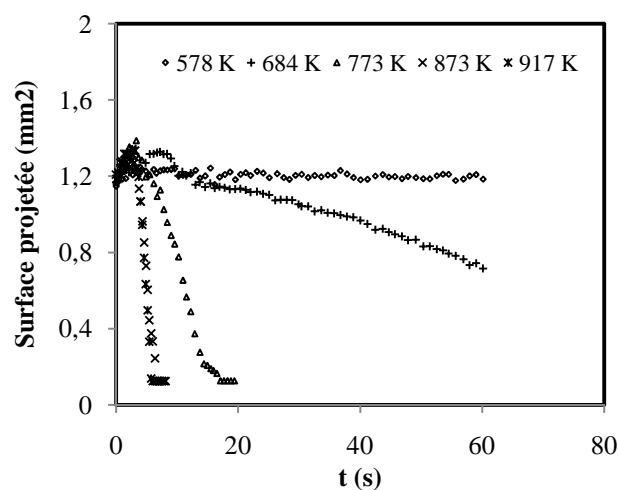
(b)



(c)

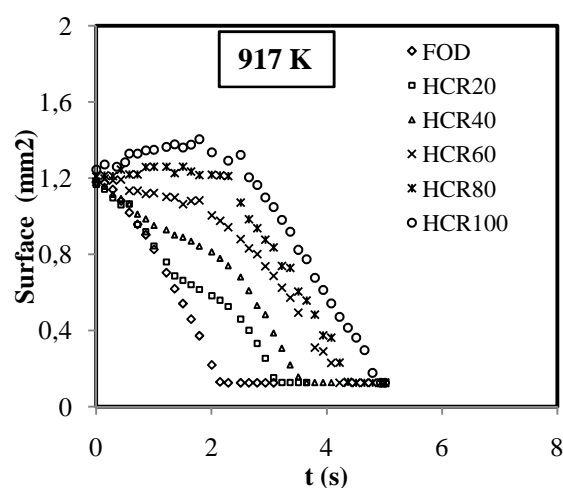


(d)

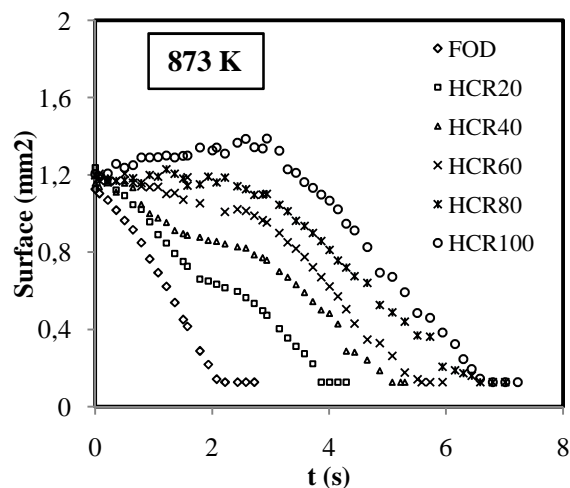


(e)

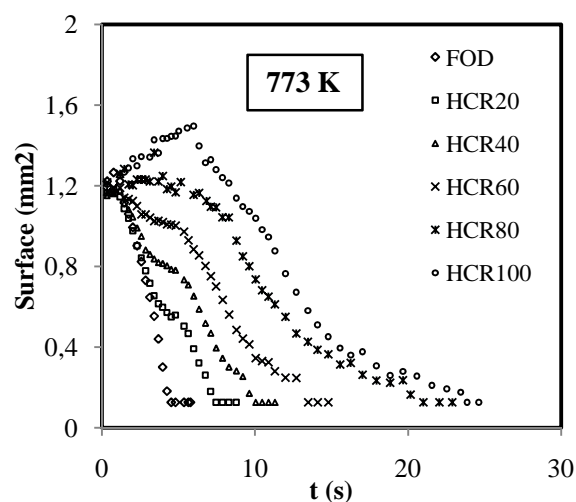
Figure 32 : Influence de la température sur l'évaporation : (a) FOD; (b) HCR100; (c) HCD100; (d) HRB100 ;
(e) Jatropha pur



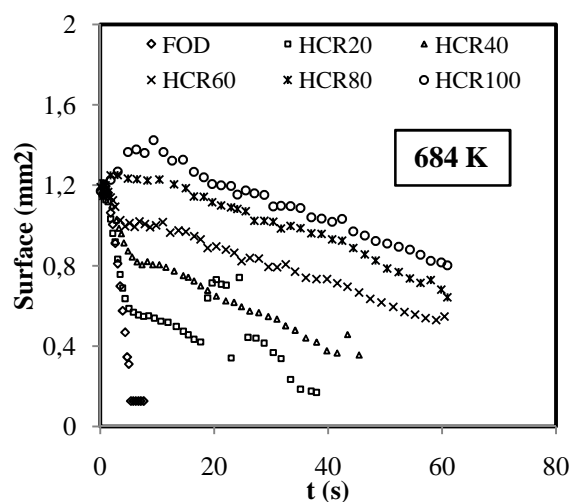
(a)



(b)



(c)



(d)

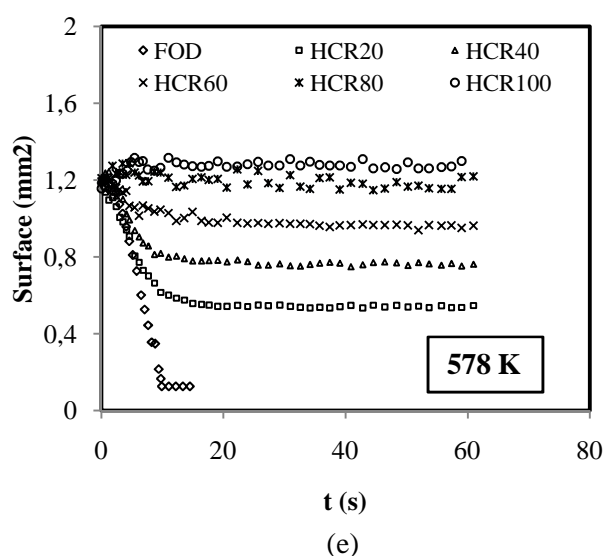


Figure 33 : Influence du pourcentage d'huile incorporée au FOD à différentes températures : (a) 917 K; (b) : 873 K; (c) 773 K; (d) 684 K; (e) 578 K

a) Cas des huiles pures (sans mélange au FOD) et du FOD pur

Les courbes (figure 32) présentent trois parties principales pour l'ensemble des huiles pures et le FOD sauf pour des températures inférieures à 773 K dans le cas des huiles.

- **La première partie** : Elle correspond à la phase transitoire du processus d'évaporation de la goutte. Durant cette phase la goutte subit un réchauffage suivi d'une dilatation ou non de celle-ci ou d'une évaporation ou non selon le combustible. Dans le cas du FOD, cette phase se traduit par une courbe de pente quasi-nulle au début qui devient ensuite légèrement négative (faible évaporation). Une partie de l'énergie reçue par la goutte sert à son réchauffage et une autre partie sert à l'évaporation de celle-ci. Lorsque la température ambiante augmente, la phase transitoire se traduit principalement par une évaporation modérée (faible pente en valeur absolue). La durée de la phase transitoire décroît à température ambiante croissante. Pour l'ensemble des huiles végétales, cette phase se traduit dans un premier temps par une courbe de pente positive (chauffage + dilatation) dont la valeur décroît dans le temps puis devient nulle. La pente de la courbe devient ensuite légèrement négative (faible évaporation). Le phénomène de dilatation est prédominant dans un premier temps puis c'est le phénomène d'évaporation qui devient prédominant. Ce phénomène est observé pour

toutes les huiles. Tout comme le fioul, la phase transitoire décroît à température ambiante croissante.

- **La deuxième partie** : Elle correspond à la phase d'évaporation proprement dite. La surface de la goutte décroît de façon linéaire avec le temps. La loi de régression linéaire de la surface ou du carré du diamètre est bien vérifiée pour tous les combustibles. C'est sur cette partie linéaire que la constante d'évaporation est déterminée.
- **La troisième partie** : Dans le cas du FOD, cette période correspond à la fin de l'évaporation. On obtient, pour toutes les températures étudiées, un plateau où la surface obtenue correspond à celle d'un cercle de diamètre équivalent à celui de la fibre de quartz (évaporation totale). Les mêmes observations sont faites avec les différentes huiles végétales pour des températures supérieures ou égales à 773 K. A 773 K, on obtient au début de cette phase une surface (pour les huiles) qui décroît très lentement sur une courte période (formation de résidu) puis un passage brusque de la surface à une valeur équivalente à celle de la fibre de quartz (sublimation des résidus solides formés). En dessous de 773 K (pour les valeurs de 578 K et 684 K), on ne peut observer cette troisième phase (les temps d'acquisition autorisés par notre dispositif sont de 60 secondes maximum). On peut néanmoins observer une évaporation difficile à 684 K et une absence d'évaporation à 578 K pour toutes les huiles. Ce résultat est conforme à des résultats obtenus par VAITILINGOM (1992) et HIGELIN (1992) avec différentes huiles végétales (huit huiles) : A 713 K toutes les huiles s'évaporent difficilement et laissent des dépôts qui ne disparaissent pas tandis qu'à partir de 813 K toutes les huiles s'évaporent complètement (certaines avec formation de résidus qui disparaissent ensuite).

b) Cas des mélanges d'huiles de coton et de FOD

Les courbes de la figure 34 montrent, pour les températures supérieures à 684 K, une succession de zones quasi linéaires de pentes différentes reliées par une zone de transition. Le phénomène en jeu ici est une évaporation suivant un mécanisme de distillation séquentielle. Le fioul se vaporise dans un premier temps suivi d'une transition correspondant à la phase transitoire de l'évaporation de l'huile de coton. Ce résultat indique qu'on a une recirculation interne au sein de la goutte (modèle de diffusivité infinie) de sorte que la température et la composition du mélange sont constamment homogénéisées. La température de la goutte est proche de la température d'équilibre pour la vaporisation du fioul dans un premier temps sauf

pendant la phase de transition où la goutte subit un chauffage pour atteindre un nouvel équilibre pour la vaporisation de l'huile de coton.

Lorsque le pourcentage d'huile de coton dans le mélange est élevé (60% et 80%), la phase d'évaporation du fioul et la phase de transition tendent à se confondre de sorte que le phénomène de dilation observée dans le cas de l'huile pure n'est pas perceptible.

Les temps d'évaporations des différents mélanges sont intermédiaires entre ceux du FOD et ceux de l'huile de coton pure. Pour des conditions initiales identiques, ces temps d'évaporation se rapprochent de ceux du fioul à mesure que la température ambiante augmente.

On observe des phénomènes de micro-explosions à 684 K (figure 33 d) pour certains mélanges (HCR20 et HCR40) sur toute la série de mesures avec une bonne répétabilité. Ces phénomènes apparaissent lorsque l'évaporation stationnaire de l'huile est établie. Cela s'explique par un piégeage de fractions résiduelles de fioul dans la goutte d'huile. Cette fraction peut dépasser sa température locale d'ébullition conduisant à de micro-explosions. Pour une recirculation interne dans la goutte, ces phénomènes de micro-explosions se produisent difficilement du fait que la température de la goutte est contrôlée par le composé le plus volatile. Toutefois, le modèle de diffusivité infinie étant un modèle idéal et du fait de la diminution de la recirculation interne pour des faibles températures ambiantes on s'approche d'un modèle de diffusion pure où la température de la goutte est contrôlée par la température d'équilibre des composés de surface (l'huile). Il se produit donc plus facilement des micro-explosions. A la température de 578 K, après la vaporisation du fioul, la température d'équilibre de la surface de la goutte est telle que les éventuelles fractions de fioul piégé dans la goutte sont à une température qui ne dépasse pas leur température d'ébullition (pas de micro-explosions). Pour la plage de températures allant de 773 K à 917 K, les résultats (figure 32 a, b et c) indiquent que l'évaporation tend à s'effectuer suivant un mécanisme de diffusion pure (on observe de moins en moins les deux pentes quand la température augmente). Cependant, l'absence de micro-explosions indique une existence de recirculations internes qui ont tendance à équilibrer la diffusion.

II.1.3 Constantes d'évaporation

Les constantes d'évaporation sont calculées sur la phase de l'évaporation établie (deuxième partie de la courbe d'évaporation) : c'est la pente de la droite de régression linéaire sur cette phase, obtenue par la méthode des moindres carrés. La figure 34 et le tableau 20 donnent les courbes d'évolution et les valeurs des constantes d'évaporation expérimentales.

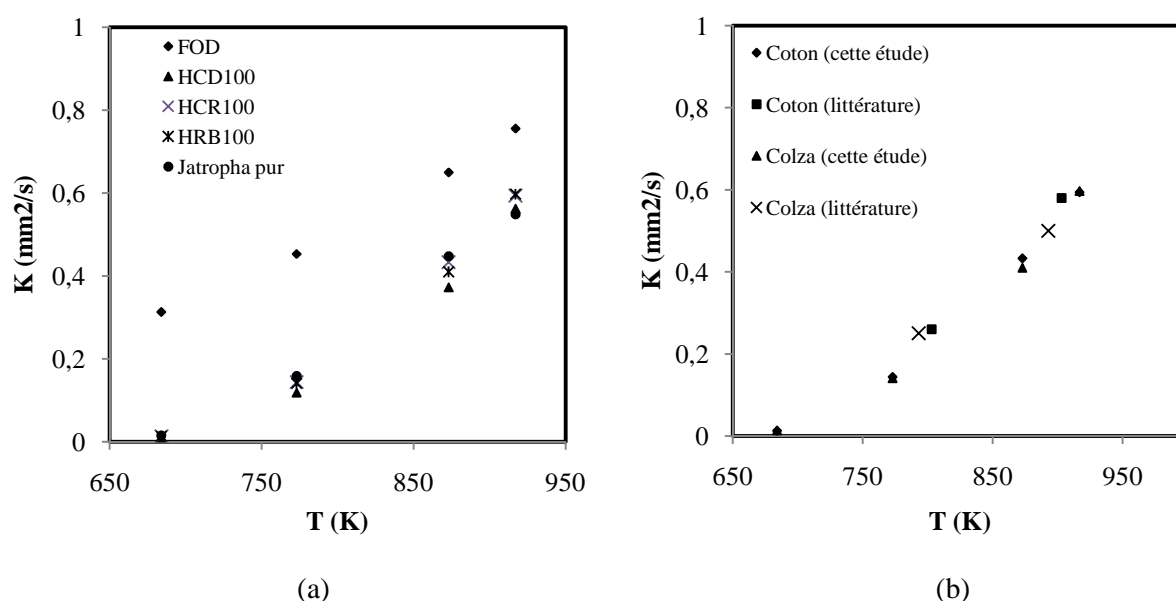


Figure 34 : Constantes d'évaporation en fonction : (a) valeurs expérimentales de cette étude ; (b) comparaison de nos valeurs expérimentales et celles de la littérature

Tableau 20 : Constantes d'évaporation K (mm^2/s)

T(K)	FOD	HCD100	HCR100	HRB100	Jatropha	Colza *	Coton *
684	0,313	0,011	0,013	0,014	0,015		
773	0,453	0,119	0,144	0,141	0,159		
873	0,65	0,373	0,433	0,41	0,448		
917	0,756	0,563	0,594	0,597	0,549		
793						0,25	
803							0,26
893						0,50	
903							0,58

* (VAITILINGOM (1992))

Les constantes d'évaporation obtenues pour les différentes huiles sont très comparables aux différentes températures. On ne peut effectuer ici un classement entre ces huiles au regard des incertitudes de l'ordre de 9,2% sur la détermination de la constante d'évaporation (comparables aux écarts relatifs). On peut noter des constantes d'évaporation des huiles plus faibles à basse température et qui augmentent assez vite avec la température ambiante. Ce résultat est dû en partie à la chaleur latente de vaporisation plus élevée des huiles. Les constantes d'évaporation des huiles croissent beaucoup plus vite que celles du FOD suivant la température. On obtient des constantes d'évaporation des huiles qui se rapprochent de celles

du FOD avec la température. Une tendance similaire a été obtenue par MORIN (1999) avec de l'ester méthylique de colza (EMC) et des n-alcanes. La constante d'évaporation de l'EMC est inférieure à celles du n-heptane et du n-décane pour des températures inférieures respectivement à 873 K et 723 K. Au delà de ces températures respectives la constante d'évaporation de l'EMC devient supérieure à celles du n-heptane et du n-décane. Cette tendance des huiles à avoir des constantes d'évaporation proches ou parfois supérieures aux constantes d'évaporation du FOD pour des températures élevées s'expliquent par les différences de propriétés thermodynamiques (chaleur latente de vaporisation en particulier) et leur nature chimique différente de celle du FOD.

Aussi, nos résultats sont en accord (même tendance) avec des résultats obtenus par VAITILINGOM (tableau 20) dans des conditions expérimentales comparables aux nôtres.

Le tableau 21 montre que l'influence du diamètre initial de la goutte sur le coefficient d'évaporation est négligeable. Seules les temps d'évaporation varient compte tenu principalement du temps de chauffage plus faible lorsque le diamètre de la goutte diminue (figure 35).

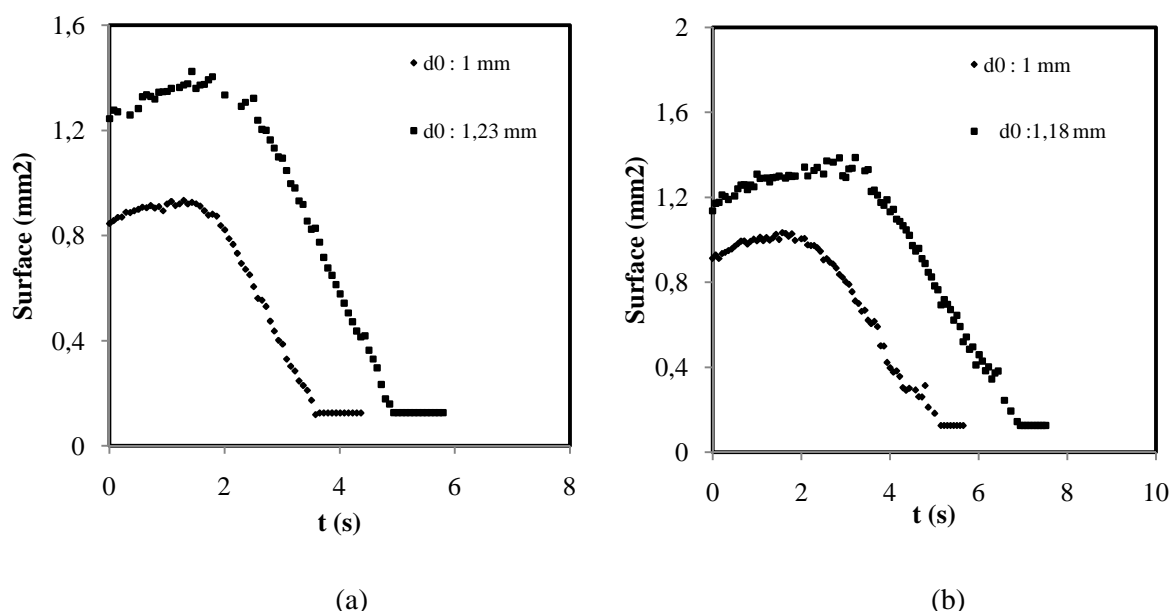


Figure 35 : Evolution de la surface (huile de coton) pour différents diamètres : (a) $T = 917$ K; (b) $T = 873$ K

Tableau 21 : Constantes d'évaporation de l'huile de coton pour deux diamètres différents à différentes températures

T (K)	K (mm ² /s)	
	1 mm	1,23 mm
684	0,013	0,013
773	0,139	0,144
873	0,423	0,433
917	0,609	0,594

Dans la suite de ce chapitre, nous développons un modèle théorique pour déterminer les paramètres essentiels d'évaporation (temps de chauffage, constante d'évaporation etc.). L'huile de coton raffinée et le FOD sont choisis pour développer le modèle théorique et pour la comparaison des résultats expérimentaux et théoriques.

II.2 DESCRIPTION DU MODELE THEORIQUE UTILISE

L'une des difficultés dans la détermination du coefficient d'évaporation théorique (K_{th}), réside dans la connaissance des propriétés thermodynamiques et de transport. En rappel, les équations E.1.37 a et b donnent les expressions du coefficient théorique d'évaporation :

$$K_{th} = 8 \cdot \frac{\lambda_g}{c_{pg} \cdot \rho_{fl}} \cdot \ln(1 + B_T) \text{ ou } K_{th} = 8 \cdot \frac{\rho_{fg}}{\rho_{fl}} \cdot D \cdot \ln(1 + B_M)$$

La différence dans la détermination de la constante d'évaporation suivant les deux expressions repose sur les propriétés de transport utilisées.

Il nous faut donc calculer :

- la chaleur massique du mélange gazeux
- la conductivité thermique du mélange gazeux
- le coefficient de diffusion binaire
- la masse volumique du combustible gazeux et liquide
- les nombres de transfert thermique et massique

La connaissance de la température de surface de la goutte est une étape primordiale dans le calcul des propriétés de transport. Dans les conditions quasi-stationnaires, l'égalité des nombres de transfert thermique et de masse nous permet de déterminer la température de surface de la goutte par une méthode itérative en supposant qu'à l'étape initiale, la température de la surface de la goutte est égale à la température d'ébullition du combustible.

A chaque itération la température obtenue à l'étape précédente (en partant de la température d'ébullition) est diminuée de 0,001K jusqu'à ce que le régime stationnaire soit atteint ; c'est-à-dire :

$$B_M = B_T$$

On obtient dans ces conditions une température d'équilibre de la surface de la goutte T_s telle que :

$$T_s = T_\infty - \left(\frac{Y_{fs} - Y_{f\infty}}{1 - Y_{fs}} \right) \frac{L_v}{c_{pg}} \quad (\text{E.3.16})$$

II.2.1 Propriétés thermodynamiques et propriétés de transport

La détermination des propriétés de transport et des propriétés thermodynamiques dans cette étude est effectuée comme suit :

- La chaleur latente de vaporisation (L_v) du combustible est estimée dans cette étude par la relation de Watson (WATSON, (1931))

$$L_v = L_{v(T_{\text{ébf}})} \left[\frac{T_c - T_s}{T_c - T_{\text{ébf}}} \right]^{0,38} \quad (\text{E.3.17})$$

$T_{\text{ébf}}$: Température d'ébullition du combustible

$L_{v(T_{\text{ébf}})}$: Chaleur latente de vaporisation à la température d'ébullition du combustible ($T_{\text{ébf}}$)

T_c : température critique du combustible

- La température d'ébullition, la température et la pression critique, la chaleur latente de vaporisation à la température d'ébullition de l'huile de coton sont estimées dans cette étude à partir de celles de ses acides gras majoritaires (tableau 17).
- Pour la détermination des paramètres critiques des différents acides gras, nous utilisons la méthode de JOBACK (JOBACK et al. (1987)). Cette méthode repose sur la prise en compte de la contribution des différents groupes fonctionnels d'un composé dans l'évaluation de ses propriétés. Les équations E.3.18 à E.3.21 donnent respectivement les expressions utilisées dans cette étude pour le calcul de la température d'ébullition, de la chaleur latente de vaporisation à la température

d'ébullition, de la température critique et de la pression critique par la méthode de JOBACK :

$$T_{\text{ébf}} = 198 + \sum \Delta_{\text{ébi}} \quad (\text{E.3.18})$$

Où $\Delta_{\text{ébi}}$ sont les constantes (pour la température d'ébullition) relatives à chaque groupe fonctionnel (i) du composé.

$$L_{\text{v}}(T_{\text{ébf}}) = 1,093 \cdot R \cdot T_c \cdot \left[T_{\text{ébr}} \cdot \frac{(\ln(P_c) - 1)}{0,930 - T_{\text{ébr}}} \right] \quad (\text{E.3.19})$$

Avec :

R, la constante universelle des gaz parfaits

$T_{\text{ébr}}$, la température d'ébullition réduite ($T_{\text{ébr}} = \frac{T_{\text{ébf}}}{T_c}$)

T_c et P_c sont respectivement la température et la pression critique, définies ci-dessous :

$$T_c = T_{\text{ébf}} \cdot [0,584 + 0,965 \cdot \sum \Delta_{Ti} - (\sum \Delta_{Ti})^2]^{-1} \quad (\text{E.3.20})$$

T_c et Δ_{Ti} sont respectivement la température critique (K) et les constantes relatives à chaque groupe fonctionnel (i) du composé.

$$P_c = [0,113 + 0,0032 \cdot n_A - \sum \Delta_{Pi}]^{-2} \quad (\text{E.3.21})$$

P_c et Δ_{Pi} sont respectivement la pression critique (bar) et les constantes relatives à chaque groupe fonctionnel (i) du composé. n_A est le nombre d'atomes de la molécule.

- Ces mêmes paramètres pour le FOD sont issus de la littérature (SAZHIN et al. (2005)).
- La conductivité thermique (λ_g) et la chaleur massique du mélange gazeux (c_{pg}) sont déterminées à une température de référence (T_r) et à une composition de référence (Y_{fr}).

$$T_r = T_s + \frac{(T_{\infty} - T_s)}{3}$$

$$Y_{fr} = \frac{2}{3} Y_{fs} \text{ et } Y_{Ar} = 1 - \frac{2}{3} Y_{fs}$$

Y_{Ar} : fraction massique de référence pour l'air.

- La chaleur massique et la conductivité thermique du mélange gazeux sont calculées comme suit :

$$c_{pg} = Y_{fr} \cdot c_{pfg}(T_r) + Y_{Ar} \cdot c_{pA}(T_r) \quad (E.3.22)$$

$$\lambda_g = Y_{fr} \cdot \lambda_{fg}(T_r) + Y_{Ar} \cdot \lambda_A(T_r) \quad (E.3.23)$$

$c_{pfg}(T_r)$ et $c_{pA}(T_r)$ sont les chaleurs massiques respectives des vapeurs du combustible et de l'air à la température de référence. Elles sont calculées par la méthode de JOBACK.

$$c_p(T_r) = A + B \cdot T_r + C \cdot T_r^2 + D \cdot T_r^3 \quad (E.3.24)$$

A, B, C, D et E sont des constantes relatives au combustible ou à l'air. Elles sont obtenues pour l'huile en utilisant la méthode de « contribution des groupes de JOBACK » :

$$c_p(T_r) = (\sum_i n_i \cdot \Delta_{i1} - 37,93) + (\sum_i n_i \cdot \Delta_{i2} + 0,210) \cdot T_r + (\sum_i n_i \cdot \Delta_{i3} - 3,91 \cdot 10^{-4}) \cdot T_r^2 + (\sum_i n_i \cdot \Delta_{i4} - 2,06 \cdot 10^{-7}) \cdot T_r^3 \quad (E.3.25)$$

T_r en Kelvin et C_p en J/(mol.K).

n_i : le nombre du $i^{\text{ème}}$ groupe fonctionnel.

Δ_{i1} , Δ_{i2} , Δ_{i3} et Δ_{i4} sont des constantes relatives au $i^{\text{ème}}$ groupe fonctionnel.

- $\lambda_{fg}(T_r)$ et $\lambda_A(T_r)$ sont les conductivités thermiques respectives des vapeurs du combustible et de l'air à la température de référence. Elles sont déterminées par la méthode de JOBACK pour l'air et par la corrélation d'Eucken pour la vapeur du combustible (REID et al. (1987)).

$$\lambda_A(T_r) = a + b \cdot T_r + c \cdot T_r^2 + d \cdot T_r^3 + e \cdot T_r^4 \quad (E.3.26)$$

$$\lambda_{fg} = \frac{(c_{pfg} \cdot M_f - R)}{M_f} \cdot \mu_{fg} \cdot \left[1 + \frac{\frac{9}{4}}{\left(\frac{c_{pfg}}{R} - 1\right)} \right] \quad (E.3.27)$$

a, b, c, d et e sont des constantes. Elles sont déterminées à partir des données de l'air.

- Dans l'équation E.3.27, nous calculons la viscosité de la vapeur du combustible par l'équation de CHAPMAN-ENSKOG issue de la théorie cinétique des gaz.

$$\mu_{fg} = \frac{2,6693 \cdot 10^{-6} (M_f \cdot T_r)^{1/2}}{\theta_f^2 \Omega_v} \quad (E.3.28)$$

M_f : Masse molaire du combustible

T_r : Température de référence, définie précédemment

θ_f : Diamètre de collision

- Ω_v , l'intégrale de collision pour la viscosité ; elle calculé par la relation de NEUFIELD (REID et al. (1987))

$$\Omega_v = \frac{A}{T^*B} + \frac{C}{\exp(D.T^*)} + \frac{E}{\exp(F.T^*)} \quad (E.3.29)$$

$$T^* = \frac{k_0.T_r}{\varepsilon_f}$$

k_0 est la constante de Boltzmann

A, B, C, D, E et F sont des constantes.

ε_f est l'énergie d'interaction entre deux molécules des vapeurs du combustible (énergie caractéristique de LENNARD-JONES). Elle est liée à la fonction potentielle de LENNARD-JONES (Φ) qui décrit l'énergie intermoléculaire suivant la distance entre celles-ci.

$$\Phi = 4. \varepsilon. \left(\left(\frac{\theta}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\theta}{r} \right)^6 \right) \quad (E.3.30)$$

r étant la distance séparant les deux molécules et θ le diamètre de collision (longueur caractéristique de LENNARD-JONES).

- Dans cette étude, nous utilisons les expressions suivantes pour déterminer ε et θ (WELTY et al. (1984)).

$$\frac{\varepsilon}{k_0} = 0,77. T_c \text{ et } \theta = 2,44. \left(\frac{T_c}{P_c} \right)^{1/3}$$

T_c et P_c sont la température et la pression critique du combustible

- La masse volumique du combustible liquide est estimée à la température de la surface de la goutte. Celle du combustible gazeux est déduite de l'équation d'état des gaz parfaits.
- Pour le coefficient de diffusion binaire nous la déterminons à partir de la théorie cinétique des gaz. Nous utilisons la fonction de potentiel de LENNARD-JONES pour déterminer le coefficient de diffusion binaire. Cette corrélation est donnée par l'équation (E.3.31) (on suppose que les deux gaz ne sont pas polaires et n'entrent pas en réaction)

$$D_{ij} = \frac{0,001858.(T_r)^{3/2} \cdot \left[\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right]^{0.5}}{P. \theta_{ij}^2. \Omega_D} \quad (E.3.31)$$

T_r : Température de référence

P : Pression

θ_{ij} : Diamètre de collision

Ω_D est l'intégrale de collision pour la diffusion ; elle est calculée par la relation de NEUFIELD (1972)

$$\Omega_D = \frac{A}{T^{*B}} + \frac{C}{\exp(D.T^*)} + \frac{E}{\exp(F.T^*)} + \frac{G}{\exp(H.T^*)} \quad (E.3.32)$$

$$T^* = \frac{k.T_r}{\varepsilon_{ij}}$$

ε_{ij} et θ_{ij} (i et j sont relatifs à l'air et aux vapeurs du combustible) sont données respectivement par :

$$\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_i \cdot \varepsilon_j)^{1/2}$$

$$\theta_{ij} = \frac{(\theta_i + \theta_j)}{2}$$

M_i et M_j , les masses molaires respectives de i et j

II.2.2 Nombres de transfert :

Les conditions aux limites imposent $Y_{f\infty} = 0$

On obtient alors :

$$B_M = \frac{Y_{fs}}{1 - Y_{fs}} \quad B_T = \frac{c_{pg}(T_\infty - T_s)}{L_v}$$

- Nous déterminons la fraction massique de combustible à la surface de la goutte comme suit :

$$Y_{fs} = \frac{P_{sat}M_f}{P_{sat}M_f + (P - P_{sat})M_a} \quad (E.3.33)$$

En effet : la fraction molaire de combustible à la surface de la goutte (X_{fs}) s'écrit :

$$X_{fs} = \frac{P_{sat}}{P}$$

P est la pression du milieu ambiant

- P_{sat} est la pression de vapeur saturante du combustible à la température de surface de la goutte. Nous la calculons à partir de la relation de Clausius-Clapeyron :

$$P_{sat} = \exp \left(a - \frac{b}{(T_s - 43)} \right) \quad (E.3.34)$$

a et b dépendent du combustible.

- Les coefficients a et b pour l'huile de coton ont été déterminés dans cette étude en utilisant les données relatives aux acides gras qui la composent. En ce qui concerne le FOD, les données sont issues de la littérature (SAZHIN et al. (2005)).

II.2.3 Prise en compte de la convection

La vitesse du flux de gaz chaud arrivant sur la goutte dans cette étude est assez faible (environ 0,1 m/s), mais les essais sont effectués en conditions de gravité terrestre. L'effet de la convection naturelle sur l'évaporation de la goutte est donc pris en compte. Nous utilisons la corrélation de RANZ et MARSHALL (1952) pour prendre en compte les effets de la convection dans la présente étude :

$$K_{corr1} = K_{th} \cdot (1 + 0,5 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} Gr^{\frac{1}{4}}) \quad (E.3.35)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \rho_g^2 \cdot d_0^3 \cdot \Delta T}{\mu_g^2} \quad (E.3.36)$$

$$Pr = \frac{\mu_g c_{pg}}{\lambda_g} \quad (E.3.37)$$

K_{corr1} : Constante d'évaporation avec la prise en compte de la convection naturelle
 μ_g et ρ_g sont la viscosité dynamique et la masse volumique du gaz ambiant. Elles sont déterminées à la température de référence.

g : Intensité de la pesanteur

d_0 : Diamètre initiale de la goutte

ΔT : Différence de température entre l'ambiance et la surface de la goutte

Nous calculons la viscosité (μ_g) du mélange gazeux par la méthode de WILKE (REID et al. (1987)).

$$\mu_g = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \cdot \mu_i}{\sum_{j=1}^n y_j \cdot \psi_{ij}} \quad (E.3.38)$$

y_i est la fraction massique du gaz (i). (i et j sont relatifs à l'air et aux vapeurs du combustible)

$$\psi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{0,25}\right]^2}{\left[8 \cdot \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)\right]^{0,5}} \quad (\text{E.3.39})$$

II.2.4 Prise en compte de la période de chauffage de la goutte

Le temps de chauffage transitoire représente une part importante de la durée totale de l'évaporation de la goutte dans le cas de combustibles peu volatiles. La durée de vie ($\tau_{év}$) de la goutte durant l'évaporation est la somme de deux temps : le temps τ_1 s'écoulant pendant la phase transitoire (chauffage + dilatation ou évaporation éventuelle de la goutte) et le temps d'évaporation τ_2 en phase quasi-stationnaire. En général, deux approches sont utilisées pour déterminer le temps τ_1 . La première approche considère que l'énergie apportée à la goutte pendant la phase transitoire, sert principalement à son chauffage, la faisant passer d'une température initiale T_{s0} à la température d'équilibre T_s . Pendant cette phase transitoire, il n'y a pas d'évaporation (le diamètre reste constant). La seconde approche considère que pendant la période de chauffage (transitoire), la goutte s'évapore avec un taux modéré et que le carré de son diamètre décroît linéairement avec le temps (CHIN et al. (1985)).

$$\tau_{év} = \tau_1 + \tau_2 \quad (\text{E.3.40})$$

Nous adoptons la première approche pour déterminer le temps de chauffage pour l'huile de coton et le FOD. Pendant la phase transitoire, la goutte subit une dilation dans le cas de l'huile de coton qui n'est pas prise en compte dans ces deux approches. Pour le FOD, nous faisons l'hypothèse que l'évaporation pendant la phase transitoire est négligeable. Il est par conséquent plus indiqué de considérer la première approche que nous explicitons ci-dessous

Par cette Première approche le temps de chauffage τ_1 résulte du bilan thermique suivant :

$$\frac{4}{24} \cdot \pi \cdot d^3 \cdot \rho_{fl} \cdot C_{pfl} \cdot \frac{dT}{dt} = \pi \cdot d^2 \cdot h \cdot (T_\infty - T_s) \quad (\text{E.3.41})$$

On obtient par intégration (entre le début du chauffage ($t=0$) et l'instant de début d'évaporation) l'équation E.3.42 :

$$\tau_1 = -\frac{\rho_{fl} \cdot C_{pfl} \cdot d}{6 \cdot h} \ln \left(\frac{T_s - T_\infty}{T_{s0} - T_\infty} \right) \quad (\text{E.3.42})$$

T_{s0} : Température de la surface de la goutte à $t = 0$

T_s est la température du début de l'évaporation.

Pour la détermination du coefficient de convection (h), nous utilisons la corrélation dite de YUGE (1960) pour le nombre de Nusselt.

$$Nu = 2 + 0,43(Gr.Pr)^{1/4}; \quad 1 < Ra < 100000 \quad (E.3.43)$$

$$h = \frac{\lambda_A Nu}{d}$$

Nous déterminons les propriétés de transport et les propriétés thermodynamiques intervenant dans le calcul des nombres de Prandtl et de Grashof à la température du film (T_{film})

$$T_{film} = \frac{T_{\infty} + T_s}{2}$$

II.2.5 *Prise en compte cumulée de la convection naturelle et de la période de chauffage de la goutte*

Nous utilisons la corrélation de RANZ et MARSHALL pour déterminer la constante d'évaporation corrigée (K_{corr2}) prenant en compte les deux effets. Nous calculons cette constante d'évaporation par l'équation E.3.44 :

$$K_{corr2} = K_{th} \cdot (1 + 0,5 \cdot Pr^{1/3} \cdot Gr_{dcorr}^{1/4}) \quad (E.3.44)$$

Dans le calcul du nombre de Grashof, le diamètre corrigé (d_{corr}) n'est plus le diamètre initial de la goutte. Ce diamètre est fonction du temps de chauffage de la goutte, de son diamètre initial et du taux d'évaporation pendant la phase de chauffage.

$$d_{corr} = 0,5^{4/3} \cdot (d_0^2 - K_{c,corr} \tau_1)^{1/2} \quad (E.3.45)$$

Dans notre cas, la constante d'évaporation $K_{c,corr}$ est nulle. On obtient donc un diamètre moyen sur la phase stationnaire d_{corr} , tel que

$$d_{corr} = 0,5^{4/3} \cdot d_0$$

II.2.6 *Durée de vie de la goutte*

Nous calculons la durée de vie de la goutte comme suit :

$$\tau_{\text{év}} = \tau_1 + \frac{d_0^2}{K_{\text{corr}2}} \quad (\text{E.3.46})$$

II.3 RESULTATS THEORIQUES ET COMPARAISON AUX RESULTATS EXPERIMENTAUX

II.3.1 Constantes d'évaporation

Le calcul de la constante d'évaporation en utilisant le coefficient de diffusion binaire nous a donné des valeurs très inférieures aux valeurs expérimentales même avec la prise en compte de la convection et du chauffage de la goutte (figure 36 a). Cependant, les constantes d'évaporation obtenues en utilisant la conductivité thermique du gaz ambiant nous donnent des valeurs dont la tendance est proche de nos valeurs expérimentales (figures 37 a et b). Ces différences s'expliquent par le fait que, contrairement au second cas où les propriétés de transport et les propriétés thermodynamiques sont déterminées à une température et une composition de référence, le coefficient de diffusion binaire dans le premier cas est déterminé uniquement à une température de référence. Par ailleurs, les approximations sur la détermination du coefficient de diffusion binaire sont plus importantes.

Nous choisissons donc d'effectuer les calculs théoriques des constantes d'évaporation en utilisant la conductivité thermique.

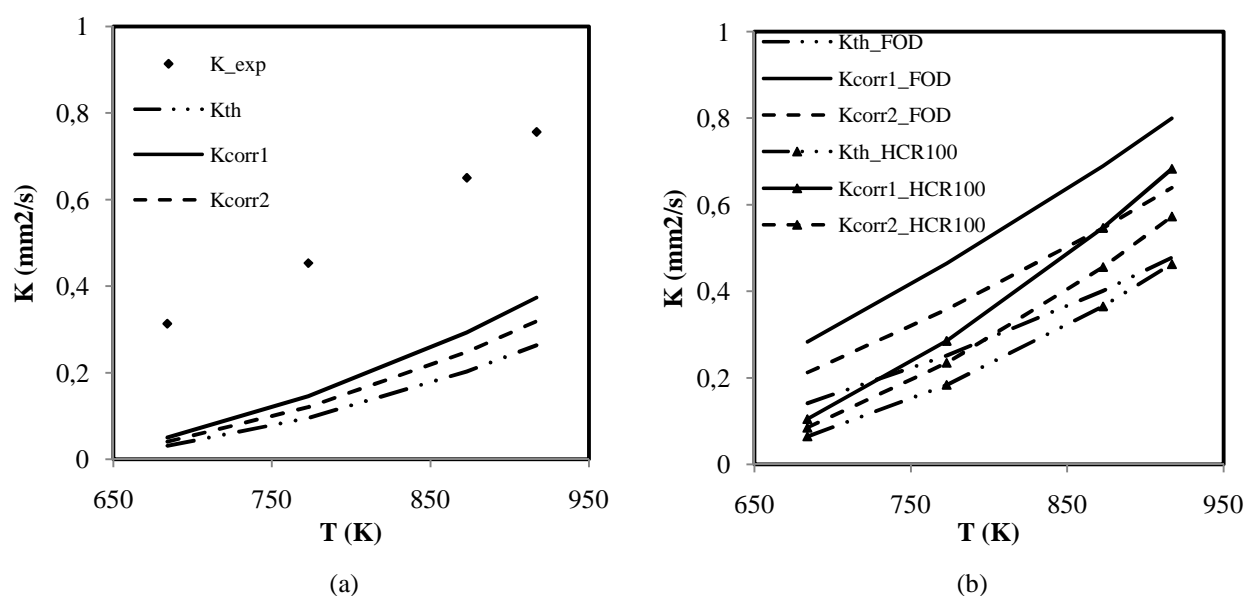


Figure 36 : Constantes d'évaporation : (a) valeurs expérimentales et théoriques en utilisant le coefficient de diffusion binaire pour le FOD ; (b) valeurs théoriques pour le FOD et l'huile de coton en utilisant la conductivité thermique

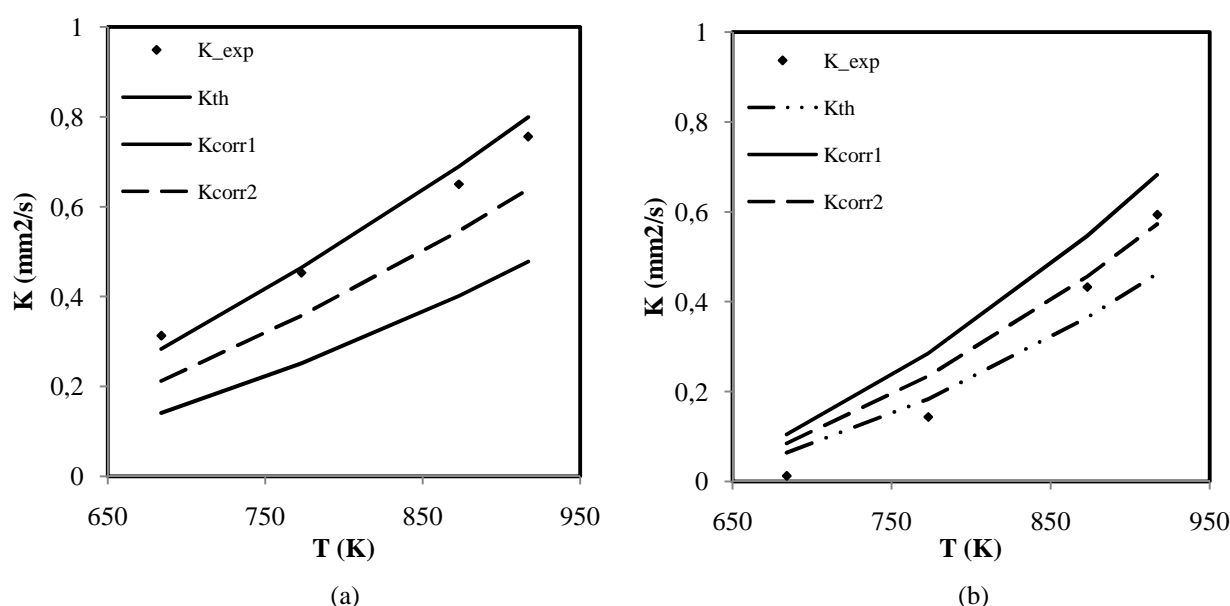


Figure 37 : Constantes d'évaporation expérimentales et théoriques : (a) FOD ; (b) huile de coton

On peut noter que les constantes d'évaporation de l'huile de coton augmentent plus rapidement que celles du fioul lorsque la température ambiante augmente. Ce phénomène avait déjà été observé expérimentalement dans les paragraphes précédents pour l'ensemble des huiles par rapport au FOD (figure 34 a).

D'après le modèle quasi-stationnaire, les constantes d'évaporation théoriques du fioul et de l'huile sont comparables au voisinage de 900 K. Lorsque les constantes d'évaporation sont corrigées (convection seule ou convection et chauffage) les constantes d'évaporation de l'huile et du fioul se rapprochent pour des températures beaucoup plus élevées (> 900 K). Compte tenu de la volatilité plus élevée du fioul, ses gouttes sont plus sensibles aux effets convectifs.

La comparaison de nos résultats expérimentaux aux résultats théoriques donne :

- **Pour le fioul :** Les valeurs expérimentales des constantes d'évaporation sont plus élevées que les valeurs théoriques obtenues par le modèle quasi-stationnaire (K_{th}) ainsi que les valeurs obtenues lorsqu'on prend en compte les effets cumulés de la convection et du chauffage (K_{corr2}). Cependant, les valeurs théoriques obtenues après la prise en compte de la convection seule indiquent un bon accord avec les valeurs expérimentales. Ce résultat indique que l'influence des phénomènes de convection est importante et que la période de chauffage a peu d'influence sur la

constante d'évaporation lors de l'évaporation du FOD dans la gamme de températures étudiées.

- **Pour l'huile de coton** : Les valeurs expérimentales des constantes d'évaporation sont plus faibles que les valeurs théoriques avec la prise en compte ou non de la convection et du chauffage pour les faibles températures ambiantes (684 K et 773 K). Les valeurs expérimentales restent toutefois proches des valeurs théoriques du modèle quasi-stationnaire lorsque la température passe de 684 K à 773 K. Ce résultat s'explique par le fait que le modèle théorique, en plus de ses hypothèses simplificatrices, ne prend pas en compte le phénomène de dilatation de la goutte qui est plus longue aux faibles températures. Aussi, les phénomènes convectifs sont plus faibles aux faibles températures. Cet aspect de la dilatation de la goutte devra être pris en compte pour améliorer le modèle. Les valeurs expérimentales des constantes d'évaporation se rapprochent des constantes d'évaporation théoriques lorsqu'on prend en compte la convection et la période de chauffage (lorsque la température augmente). En effet, avec l'augmentation de la température ambiante, Les phénomènes de convection deviennent importants avec une persistance de l'influence de la période de chauffage.

II.3.2 *Temps de chauffage et temps total du processus d'évaporation*

Les temps de chauffage expérimentaux ont été déterminés en considérant l'intervalle de temps entre l'instant initial ($t=0$) et le temps correspondant au point d'intersection entre la droite d'équation ($d^2 = d_0^2$) et la droite de régression linéaire de la partie stationnaire de l'évaporation (figure 38 a).

Les valeurs expérimentales et théoriques des temps de chauffage des gouttes de fioul et d'huile de coton décroissent rapidement avec la température du milieu ambiant et tendent vers des valeurs asymptotiques (figure 38 b). Les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques sont plus concordantes pour les températures élevées (873 K et 917 K). En effet, lorsque la température croît, la phase transitoire est plus courte de sorte que les phénomènes de dilatation diminuent. Le diamètre de la goutte peut donc être considéré comme constant pendant cette phase. Cette hypothèse étant maintenue dans le modèle théorique, on obtient ainsi une bonne concordance des résultats théoriques et expérimentaux aux hautes températures. En revanche, aux faibles températures la dilation plus importante induit donc une erreur plus grande sur l'hypothèse selon laquelle le diamètre reste constant durant la

phase de chauffage. Le temps de chauffage et le temps total d'évaporation (temps de chauffage + temps d'évaporation stationnaire) du fioul et de l'huile végétale sont proches aux températures élevées.

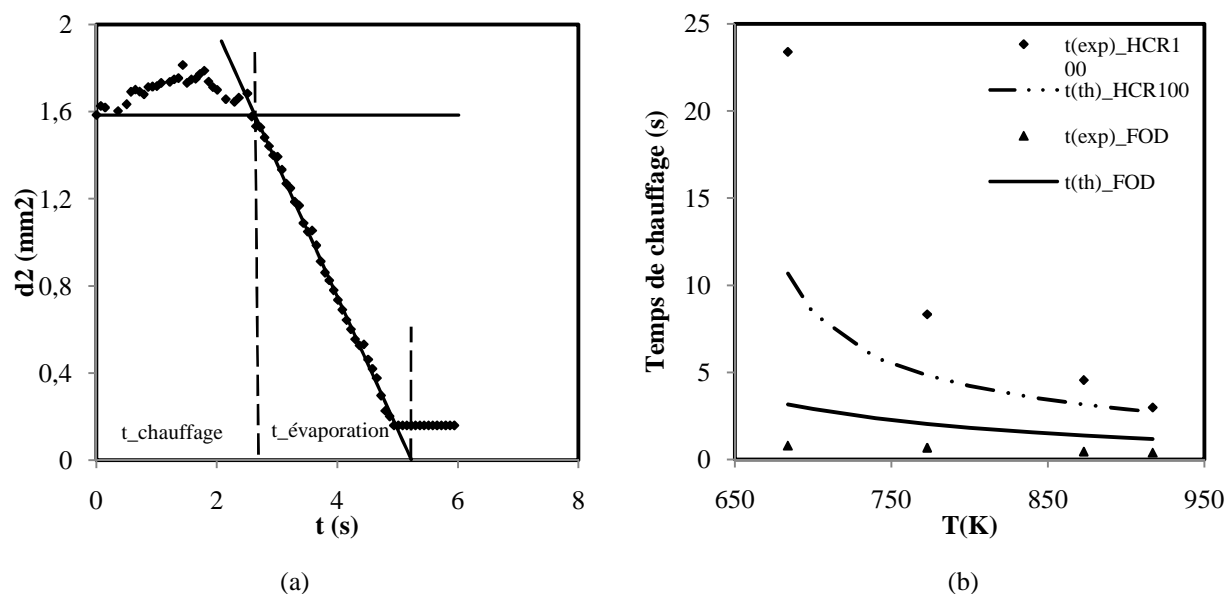


Figure 38 : Temps de chauffage : (a) illustration de la méthode de détermination des temps de chauffage et d'évaporation; (b) Temps de chauffage théoriques et expérimentaux

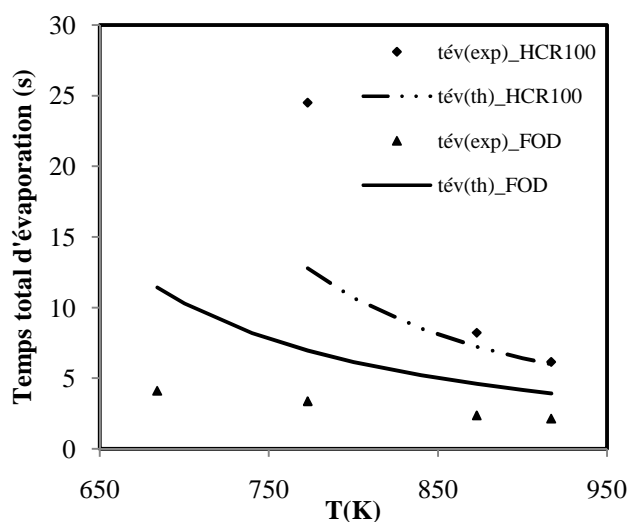


Figure 39 : Temps total du processus d'évaporation (durée de vie)

CONCLUSION

Cette étude expérimentale et théorique de l'évaporation de gouttes de fioul, d'huiles végétales ou leurs mélanges au fioul nous permet de faire les conclusions suivantes :

- Sur la gamme de températures étudiées, le fioul et les huiles végétales s'évaporent complètement pour des températures ambiantes supérieures ou égales à 773 K. cette évaporation est caractérisée par : une phase transitoire, une phase stationnaire et une phase de fin d'évaporation.
- Le fioul s'évapore complètement pour des températures inférieures à 773 K jusqu'à 578 K, tandis que l'ensemble des huiles végétales étudiées s'évaporent difficilement en laissant des résidus sur la fibre de quartz. Pour certaines températures les huiles ne s'évaporent plus (578 K par exemple).
- Les mélanges d'huiles végétales et de fioul s'évaporent suivant un mécanisme de distillation séquentielle lorsque le pourcentage de fioul dans le mélange est élevé. On tend vers un mécanisme de diffusion pure lorsque le pourcentage d'huile dans le mélange augmente.
- Les valeurs obtenues pour les constantes d'évaporation des huiles végétales et du FOD montrent qu'ils tendent à s'évaporer avec la même vitesse lorsque la température ambiante augmente (comportement proche). Les constantes d'évaporation des huiles augmentent plus rapidement que celles du fioul avec la température. Ce résultat obtenu expérimentalement a été confirmé par les résultats théoriques de notre modèle.
- Le temps de chauffage durant la phase transitoire ainsi que le temps total d'évaporation des huiles végétales et du FOD tendent aussi à se rapprocher lorsque la température ambiante augmente.
- Le modèle théorique de détermination des constantes d'évaporation développée dans cette étude donne une bonne prédiction de ces constantes d'évaporation et des temps de chauffage aussi bien pour le fioul que pour l'huile de coton. En particulier, la détermination des propriétés de transport et des propriétés thermodynamiques de l'huile de coton en utilisant les données de ses acides gras majoritaires permet une bonne prédiction des constantes d'évaporation des huiles.

Il reste pour parfaire cette étude d'évaporation à se placer dans des conditions expérimentales (pression et température) proches de celles régnant dans un moteur ou dans un brûleur.

Pour l'étude théorique, il est indispensable de prendre en compte :

- les phénomènes de dilatation et de chauffage de la goutte pour une prédiction plus précise de la durée de la phase transitoire et de la constante d'évaporation.

- L'influence de la tige de quartz devra être prise en compte pour une correction éventuelle de la température de la goutte
- L'approche prédictive des caractéristiques d'évaporation de l'huile de coton, basée sur le calcul de ses propriétés de transport et de ses propriétés thermodynamiques à partir de ses acides gras majoritaires devra être étendue à d'autres huiles.

Enfin, si les constantes d'évaporation sont indépendantes des diamètres des gouttes, les temps d'évaporation en dépendent. Cela justifie la nécessité d'avoir des diamètres moyens de Sauter « seuils » pour obtenir un comportement uniforme des huiles et du FOD (temps d'évaporation et constantes d'évaporation) même pour des conditions de températures suffisantes (>773 K).

CHAPITRE III : RESULTATS ET ANALYSE SUR LES MOTEURS DIESEL**INTRODUCTION****III.1 CONDITIONS EXPERIMENTALES****III.2 RESULTATS DES ESSAIS SUR LE MOTEUR DIESEL A INJECTION INDIRECTE***III.2.1 Performances globales*

- a) Présentation des résultats de performances*
- b) Analyse*

III.2.2 Emissions polluantes

- a) Présentation des résultats*
- b) Analyse*

III.3 RESULTATS DES ESSAIS SUR LE MOTEUR DIESEL A INJECTION DIRECTE*III.3.1 Performances globales*

- a) Présentation des résultats de performances*
- b) Analyse*

III.3.2 Emissions polluantes

- a) Présentation des résultats d'émissions*
- b) Analyse des résultats d'émissions*

CONCLUSION

INTRODUCTION

Les études de l'atomisation, de la granulométrie et de l'évaporation des carburants, présentées dans les chapitres précédents, sont très fondamentales dans la détermination des mécanismes prépondérants lors de leur combustion (émissions polluantes en particulier) dans les moteurs Diesel ou sur les brûleurs. Pour mieux approcher les phénomènes globaux lors de la combustion des carburants, il est important de faire une analyse complète des systèmes (brûleurs et moteurs) utilisant ces combustibles.

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux d'essais (performances globales et émissions polluantes) réalisés sur deux moteurs Diesel (injection directe et injection indirecte) ainsi que leur analyse. Ces essais sont réalisés dans des conditions de réglages standards de fonctionnement des moteurs au gazole ou au FOD.

III.1 CONDITIONS EXPERIMENTALES

a) Le moteur à injection indirecte

Les huiles végétales utilisées sur ce moteur dont les caractéristiques sont indiquées dans la partie II (chapitre II) sont les huiles de coton, de palme et de coprah. Ces huiles sont utilisées pures ou en mélange au fioul domestique. Les huiles de palme et de coprah sont utilisées à titre comparatif à l'huile de coton. Les caractéristiques physico-chimiques de ces carburants sont données dans le chapitre I de la partie III. Le tableau 22 donne les compositions des carburants testés. Le choix de la composition des mélanges huile/fioul (50/50 et 70/30) repose sur le fait que les moteurs Diesel à injection indirecte présentent en général des conditions de température de chambre favorables à la combustion des carburants à faible pourcentage ou à pourcentage élevé d'huile végétale. L'intérêt étant la substitution du maximum de fioul, il nous est paru plus intéressant d'utiliser ces compositions, choisies comme référence, dans l'évaluation du potentiel « carburant » réel des huiles végétales dans ce type de moteur.

La température ambiante pour toutes les mesures varie entre 18 et 21 °C. A cette température, seule l'huile de coton et le fioul sont encore liquides. Le fioul et l'huile de coton (y compris les mélanges des deux) sont utilisés à la température ambiante. Les huiles de palme et de coprah sont pratiquement solides à la température ambiante du fait de leur point de fusion supérieur à 20 °C. Ainsi, pour permettre l'utilisation de ces huiles ou leurs mélanges, ils sont préchauffés à la température de 50 °C. Le réservoir d'huile végétale comporte une résistante chauffante avec un thermostat permettant de maintenir le carburant à une température quasi constante et uniforme.

Les carburants sont testés à la même charge (pleine charge) après une période de préchauffage du moteur (15 min de fonctionnement au ralenti). Pour différentes vitesses de rotation du moteur (1500-4000 tr/min), le couple, la consommation, les émissions sont déterminées après une période de stabilisation du moteur à chaque régime. Plusieurs séries d'essais sont effectués pour chaque point de fonctionnement pour un carburant donné dans les mêmes conditions d'essais.

Tableau 22 : Composition de carburants utilisés en injection indirecte

Carburant	Composition
FOD	Fioul domestique pur
HCR100	Huile de coton pure
HCR70	70 % huile de coton + 30 % FOD
HCR50	50 % huile de coton + 50 % FOD
HPR100	Huile de palme pure
HPR70	70 % huile de palme + 30 % FOD
HPR50	50 % huile de palme + 50 % FOD
HCpB100	Huile de coprah pure
HCpB70	70 % huile de coprah + 30 % FOD
HCpB50	50 % huile de coprah + 50 % FOD

b) Le moteur à injection directe

Les carburants utilisés sont l'huile de coton raffinée, le FOD ainsi que leurs mélanges. Tous ces carburants sont utilisés à la température de la cellule de mesure. Le tableau 23 donne la composition des carburants utilisés. Leurs caractéristiques physico-chimiques sont données dans la partie III (chapitre I).

Avant la mise en marche du moteur, les mises en marche de la ventilation de la cellule de mesure, de la pompe d'eau de refroidissement du frein ainsi que des aérothermes de refroidissement sont effectuées. La ventilation de la cellule de mesure s'effectue grâce à l'air extérieur, canalisé dans des conduits comportant des filtres, apporté par des ventilateurs. Cela permet le refroidissement du moteur, son alimentation en air et le maintien de la cellule à une température quasi constante. La température de la cellule varie entre 29 et 31 °C pour l'ensemble des mesures, la température de l'air d'admission varie entre 31 et 35°C.

Tableau 23 : Composition des carburants utilisés en injection directe:

Carburant	Composition
FOD	FOD pur
HCR20	20% huile de coton raffinée + 80% FOD
HCR40	40% huile de coton raffinée + 60% FOD
HCR60	60% huile de coton raffinée + 40% FOD
HCR80	80% huile de coton raffinée + 20% FOD
HCR100	Huile de coton pure

Chaque carburant est testé successivement à 25, 50, 75 et 100% de la charge maximale après une période de préchauffage du moteur (15 min de fonctionnement au ralenti). Pour chaque charge et pour différentes vitesses de rotation du moteur, le couple, la consommation, les émissions, les températures sont déterminées après une période de stabilisation du moteur à chaque régime. Plusieurs séries d'essais sont effectués pour chaque point de fonctionnement pour un carburant donné dans les mêmes conditions d'essais.

III.2. RESULTATS DES ESSAIS SUR LE MOTEUR DIESEL A INJECTION INDIRECTE

III.2.1 Performances globales

a) Présentation des résultats de performances

- Puissance effective

Les figures 40 a, b et c présentent, pour les différents carburants, l'évolution de la puissance effective en fonction du régime du moteur à pleine charge. Les puissances obtenues ici, représentent les puissances maximales pour chacun des régimes pour un carburant donné. Les dispositions sécuritaires du dispositif n'ont pas permis de réaliser des essais au-delà du régime de 4000 tr/min. Néanmoins, la puissance maximale la plus élevée pour tous les carburants semble se situer au voisinage du régime de 4000 tr/min comme indiqué dans les spécifications techniques du moteur. Même si l'allure globale des courbes de puissance maximale semble être la même pour tous les carburants étudiés, il existe cependant quelques petites différences. On peut noter une baisse de la puissance avec les différentes huiles végétales ou leurs mélanges au FOD par rapport au FOD pur.

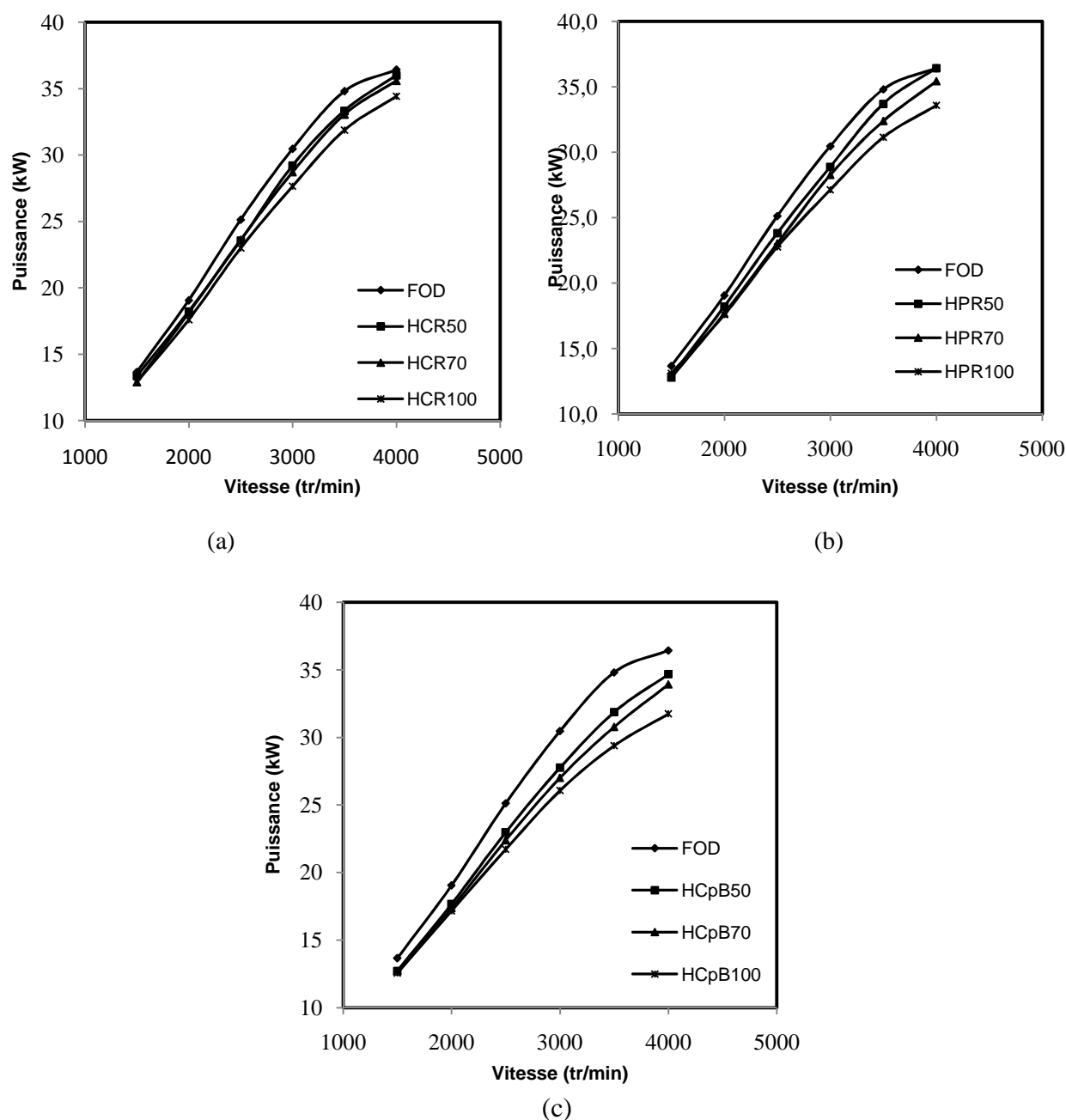


Figure 40 : Puissance en fonction du régime à pleine charge: (a) huile de coton et des dérivés ; (b) huile de palme et ses dérivés ; (c) huile de coprah et ses dérivés



- *Rendement effectif*

Les figures 41 a, b et c présentent le rendement global obtenu pour les différents carburants.

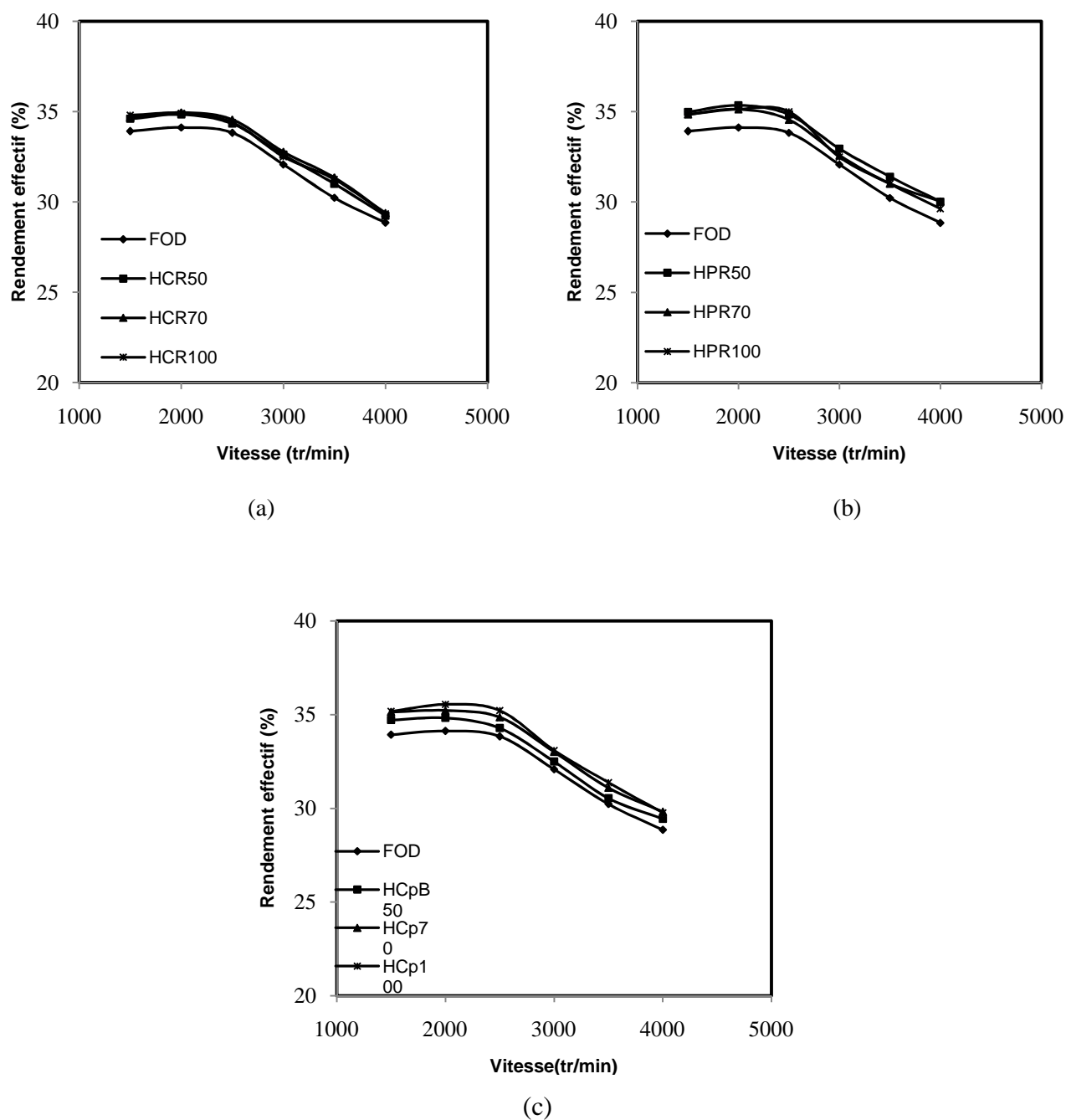


Figure 41 : Rendement en fonction du régime à pleine charge: (a) huile de coton et ses dérivés ; (b) huile de palme et ses dérivés ; (c) huile de coprah et ses dérivés

b) Analyse**- Influence du type d'huile**

- Pour les différentes huiles pures (coton, palme, coprah) ou pour un même pourcentage de ces huiles dans le FOD ; la baisse de puissance par rapport au FOD est très comparable pour les huiles de coton et de palme mais plus importante pour l'huile de coprah. Elle est de l'ordre de 8% pour les huiles pures de coton et de palme, et de 12% pour l'huile pure de coprah (aux hauts régimes). La baisse de puissance augmente avec le régime du moteur pour les carburants par rapport au FOD. En effet, bien que nous ayons un réglage identique (inchangé) de la pompe pour les différents carburants, on a :
 - Des débits de fuites plus faibles entre les cylindres et les pistons de la pompe d'injection avec les huiles végétales ou leurs mélanges et des pertes de charge plus faibles dans la pompe aux faibles régimes. Cela est dû à l'augmentation de la viscosité avec le pourcentage d'huile dans le carburant. Le débit volumique de carburant est alors plus important pour les huiles ou leurs mélanges au FOD comparés au FOD pur. La surconsommation volumique de 5 à 7% d'huile nécessaire pour avoir des quantités d'énergie identiques est presque satisfaite (Il est possible d'introduire plus de masse d'huile végétale que de FOD dans les mêmes conditions mécaniques de fonctionnement de la pompe). On obtient donc des puissances comparables aux faibles régimes
 - Des pertes de charges importantes dans la pompe aux régimes élevés qui provoquent des volumes injectés plus faibles. Cela entraîne une baisse de puissance plus importante. Par ailleurs, dans notre étude, la pompe d'injection utilisée est une pompe en ligne. Ce type de pompe a un mauvais remplissage avec l'huile végétale, ce qui contribue à réduire le débit injecté, en particulier aux hauts régimes.

D'autres types de pompes (pompes rotatives) en revanche, donnent un meilleur remplissage à l'huile végétale. Ainsi, en plus de la réduction des débits de fuite du carburant avec l'huile et de l'influence des pertes de charge dans la pompe, la nature de la pompe a une incidence notable sur les résultats de performances du moteur. Les résultats obtenus par HIGELIN (1992) sur un moteur Renault (Injection indirecte, 4 cylindre, pompe rotative, avec des réglages identiques de la pompe pour le gazole et l'huile de tournesol) en sont une illustration : augmentation du couple lorsqu'on passe du gazole à l'huile de tournesol.

- On obtient pour les trois huiles végétales ou leurs mélanges au FOD des rendements du moteur comparables à celui obtenu avec le FOD pur. Des résultats similaires ont été relevés par des études antérieures pour d'autres types d'huiles (NWAFOR et *al.* (1996); (FORSON et *al.* (2004) ; RAKOPOULOS (2006). Toutefois, les valeurs des PCI utilisés sont très variables selon les études. D'une façon générale, la variabilité des PCI utilisés pour un type d'huile végétale donnée induit des différences importantes entre les rendements obtenus pour ce même type d'huile. La sensibilité du rendement global au PCI est très importante.

- Influence du pourcentage d'huile incorporée

On peut noter une baisse de puissance avec le pourcentage d'huile incorporée dans le carburant. En effet, l'augmentation du pourcentage d'huile dans le carburant provoque une augmentation de la viscosité et par conséquent l'augmentation des pertes de charge.

De même, le rendement augmente avec l'augmentation du pourcentage d'huile incorporée pour les mêmes raisons évoquées précédemment.

Le comportement des mélanges est intermédiaire entre celui du FOD et celui des huiles pures.

III.2.2 Emissions polluantes

a) Présentation des résultats

Les figures 42 à 44 présentent les niveaux d'émissions de CO, des NO_x et de CO₂ pour l'ensemble des carburants utilisés. Toutes les courbes présentent la même allure générale. On peut noter une baisse des niveaux de CO avec le régime pour l'ensemble des carburants. Le même classement des niveaux de CO, selon la proportion d'huile dans le carburant, peut être effectué pour les trois types d'huile. Quant aux niveaux des émissions des NO_x, ils augmentent avec le régime du moteur pour tous les carburants. Les émissions de CO₂ varient très peu avec le régime.

- Emissions de CO

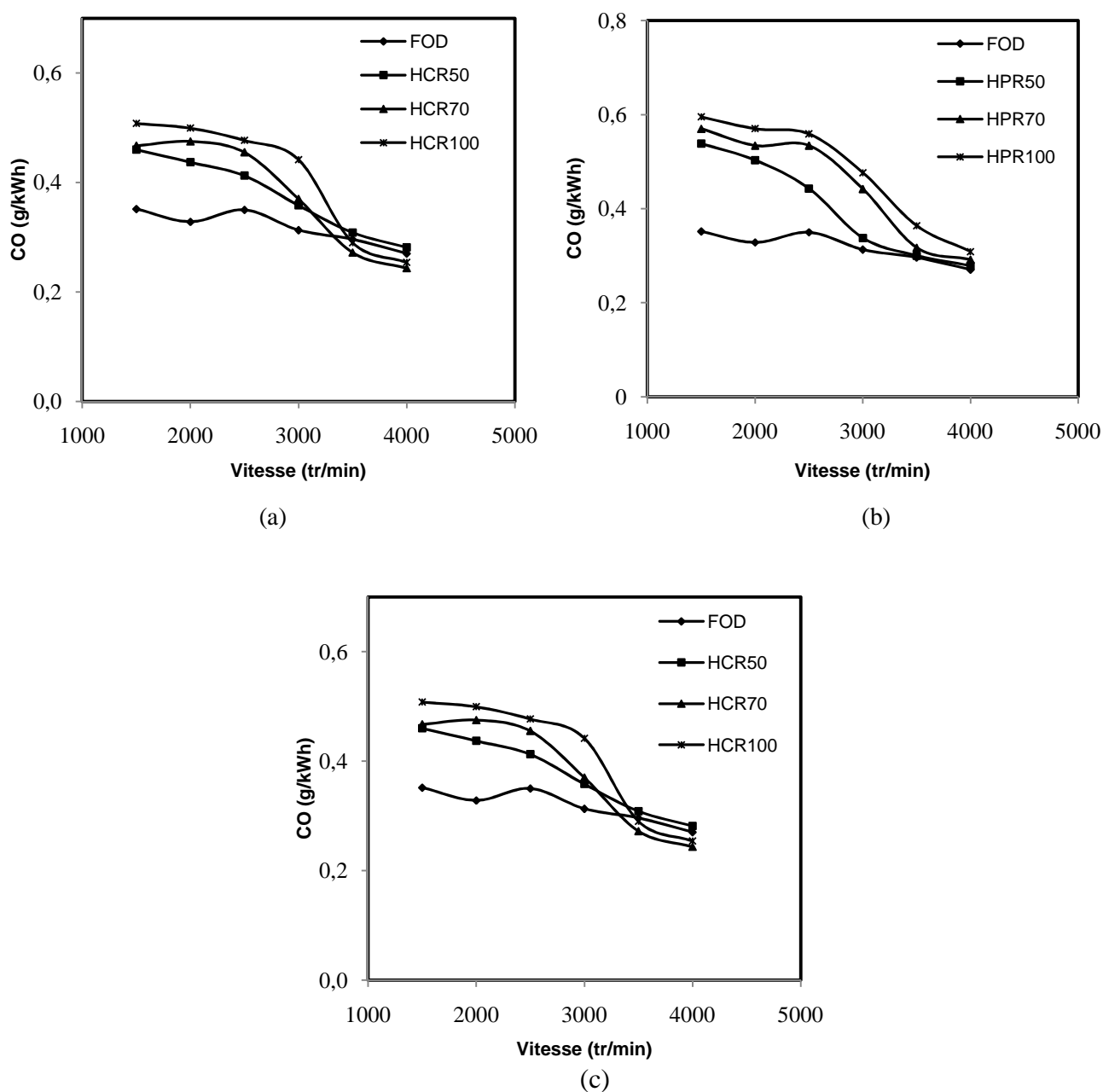


Figure 42 : CO en fonction du régime à pleine charge: (a) huile de coton et des dérivés ; (b) huile de palme et ses dérivés ; (c) huile de coprah et ses dérivés

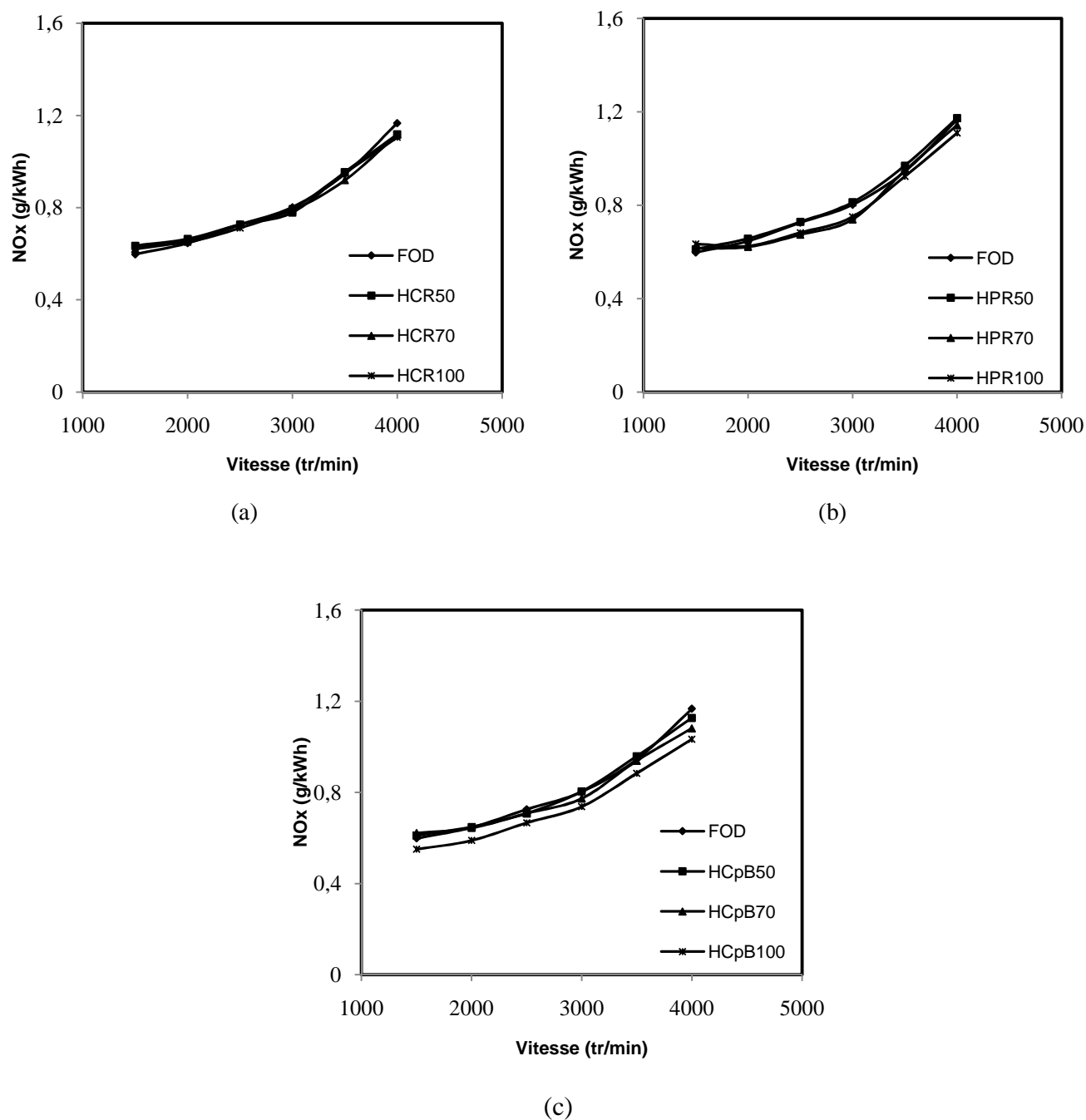
- Emissions des NO_x 

Figure 43 : NO_x en fonction du régime à pleine charge: (a) huile de coton et ses dérivés ; (b) huile de palme et ses dérivés ; (c) huile de coprah et ses dérivés

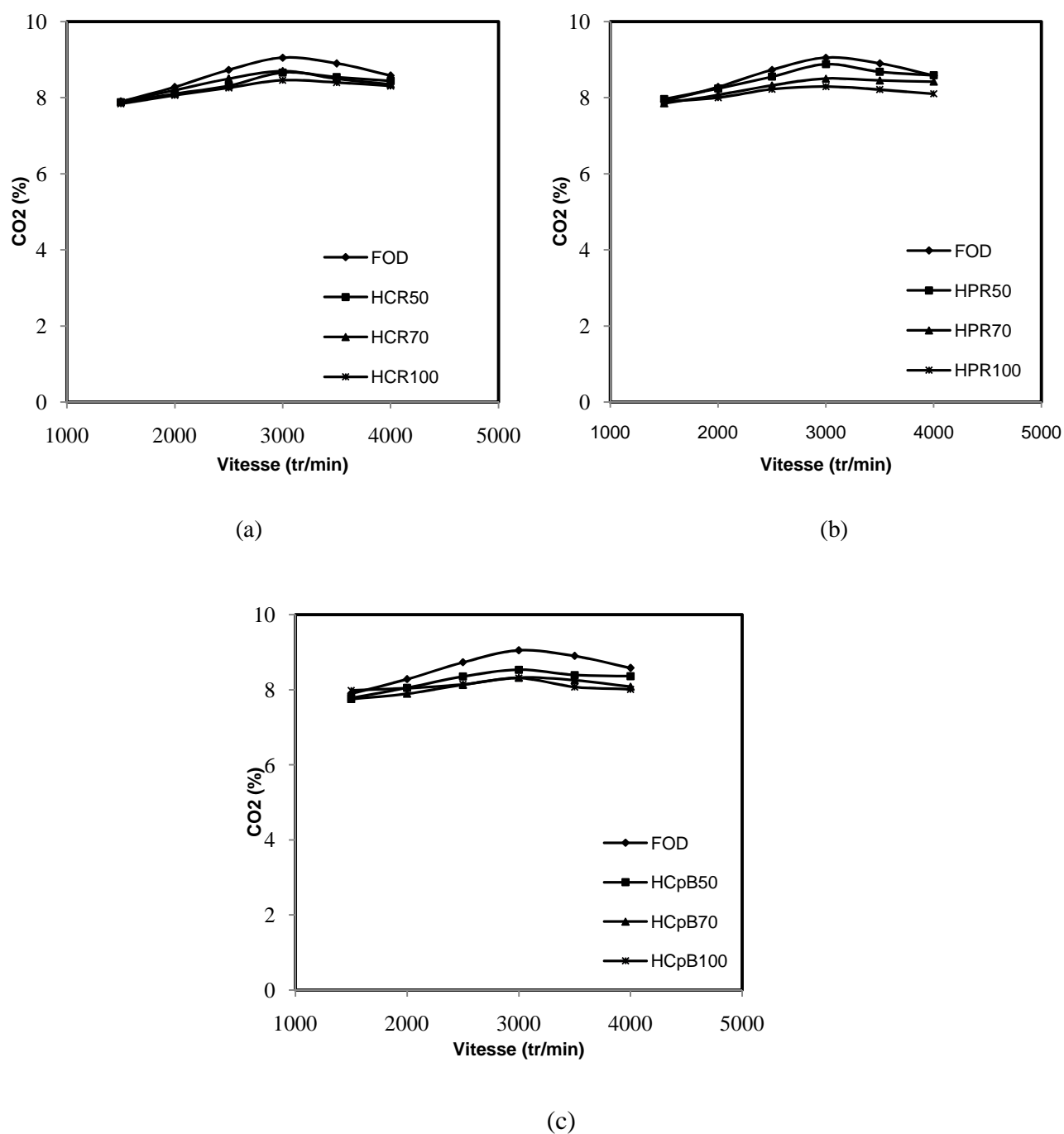
- Emissions du CO_2 

Figure 44 : CO_2 en fonction du régime à pleine charge: (a) huile de coton et des dérivés ; (b) huile de palme et ses dérivés ; (c) huile de coprah et ses dérivés

b) Analyse**- Emissions du CO**

L'ensemble des trois huiles végétales, pures ou en mélange au FOD, ont des niveaux d'émission de CO plus élevés que ceux observés avec le FOD pur ; en particulier aux bas régimes. Ces niveaux d'émissions de CO augmentent avec la proportion d'huile dans le carburant. Par ailleurs, pour une même proportion d'huile dans le carburant, les trois huiles ont des niveaux d'émissions de CO comparables.

Ce comportement des huiles végétales s'explique en grande partie par leur mauvaise atomisation et leur forte granulométrie à mesure que le pourcentage d'huile végétale dans le carburant augmente : ces résultats sont conformes avec ceux établis lors des études de caractérisation de l'atomisation (figures 26 et 27 chapitre I, partie III) et de la granulométrie (tableau 19, chapitre I, partie III) ; les huiles végétales ont une plus forte viscosité et une plus faible volatilité par rapport au FOD. Il apparaît localement de fortes richesses dont la conséquence est l'accroissement de la vitesse des réactions qui conduisent à la formation du CO suite à une production importante d'hydrocarbures et de radicaux hydrocarbonés (pyrolyse de l'huile et formation importante d'espèces hydrocarbonées dans les zones riches). Par ailleurs, l'existence de liaisons carboxyliques (C=O) des acides gras des huiles végétales est un facteur favorable à la production du CO.

A priori, les conditions de températures élevées à pleine charge, devraient conduire à des niveaux de CO très faibles et très comparables entre les différents carburants. Le taux de conversion du CO en CO₂ est très élevé pour des températures élevées des gaz (en particulier pour celles régnant dans le moteur) et lorsque l'excès d'air est suffisant. Dans cette étude, même si la combustion a lieu en milieu globalement pauvre (~0,77), les richesses locales élevées à forte charge limitent la vitesse de conversion du CO en CO₂.

Aussi, les résultats de l'étude d'évaporation dans le précédent chapitre, montraient une uniformité de comportement des huiles et du FOD dans des conditions de températures élevées (>773 K). Toutefois, tous les carburants étant utilisés dans les conditions standards du fioul (sans réchauffage des huiles), les caractéristiques d'atomisation et de granulométrie sont moins bonnes pour les trois huiles végétales ou leurs mélanges au FOD comme indiqué précédemment. On obtient des conditions d'évaporation différentes entre les carburants. Cela explique en partie les différences observées entre les carburants même à forte charge où les conditions de température sont plus favorables à une bonne évaporation de l'huile.

Néanmoins, on peut noter une réduction du CO avec le régime du fait des effets du « *swirl* » dans la chambre de combustion. Le « *swirl* » dans la chambre de combustion favorise l'apparition de phénomènes d'atomisation secondaire et les phénomènes de convection au sein des gouttelettes lors de leur évaporation. Les richesses locales sont réduites. Cela montre une certaine prépondérance des caractéristiques d'atomisation et granulométriques sur la qualité de la combustion.

En définitive, si des conditions de températures élevées dans la chambre de combustion sont nécessaires pour une bonne vaporisation et une bonne préparation du mélange air/carburant, les différents carburants doivent être placés dans des conditions qui conduisent à un régime d'atomisation et une granulométrie comparables à celles du fioul.

- *Emissions des NO_x*

Les niveaux des émissions des NO_x tendent à diminuer avec le pourcentage d'huile dans le carburant. En effet, dans cette étude la baisse de puissance observée avec l'augmentation de la proportion d'huile végétale dans le carburant conduit à une diminution de la température moyenne dans la chambre de combustion. Par conséquent, le NO (thermique), constituant principal des NO_x dans le cas des moteurs, se trouve réduit. Aussi, la phase de combustion cinétique ou de pré-mélange plus courte avec l'huile par rapport au FOD (en particulier à pleine charge comme c'est le cas ici) entraîne une réduction des niveaux de NO_x. En effet, une grande partie du NO est formé pendant cette phase de combustion cinétique.

L'augmentation des niveaux des NO_x avec le régime pour l'ensemble des carburants, est liée à l'augmentation de la température moyenne de la chambre de combustion. Ce résultat est en accord avec la réduction des niveaux de CO aux régimes élevés.

- *Emissions du CO₂*

Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) apparaissent relativement plus faibles avec les huiles végétales et leurs mélanges qu'avec le FOD pur. Elles baissent avec la proportion d'huile dans le carburant. Ce résultat est en cohérence avec l'augmentation des émissions de CO. En effet, en augmentant la teneur des carburants en huile végétale, la conversion de CO en CO₂ est réduite, ce qui maintient élevé le niveau de CO à l'inverse du CO₂. Par ailleurs, la masse de carbone pour un même volume de FOD et d'huile végétale est plus élevée pour le cas du FOD en plus du fait qu'ici, les volumes injectés des carburants contenant l'huile sont

plus faibles dans certains cas (pertes de charge). Des résultats similaires ont été obtenus par une étude antérieure sur un moteur Diesel à injection directe à pleine charge avec une baisse relative de CO_2 entre 5 et 9% environ pour les huiles végétales par rapport au gazole (WANG et al. (2006))

III.3 RESULTATS DES ESSAIS SUR LE MOTEUR DIESEL A INJECTION DIRECTE

III.3.1 Performances globales

a) Présentation des résultats de performances

Les figures 45 à 47 présentent les résultats obtenus sur le couple, la consommation spécifique, le rendement effectif des différents carburants utilisés sur ce moteur (FOD, HCR20, HCR40, HCR60, HCR80, HCR100). Les deux paramètres dont l'influence a été étudiée sont la charge et le régime du moteur. Ces deux paramètres déterminent en grande partie les conditions de température et le « swirl » dans la chambre de combustion pour un moteur donné, aspects fondamentaux dans la combustion des huiles végétales. Les différentes courbes donnent l'évolution des différents paramètres soit suivant la charge du moteur au régime de 2500 tr/min (régime ou le moteur étudié est le plus stable) soit suivant le régime à 75% de la charge maximale. A cette charge, les conditions de température sont en général suffisantes pour une bonne combustion de l'huile végétale.

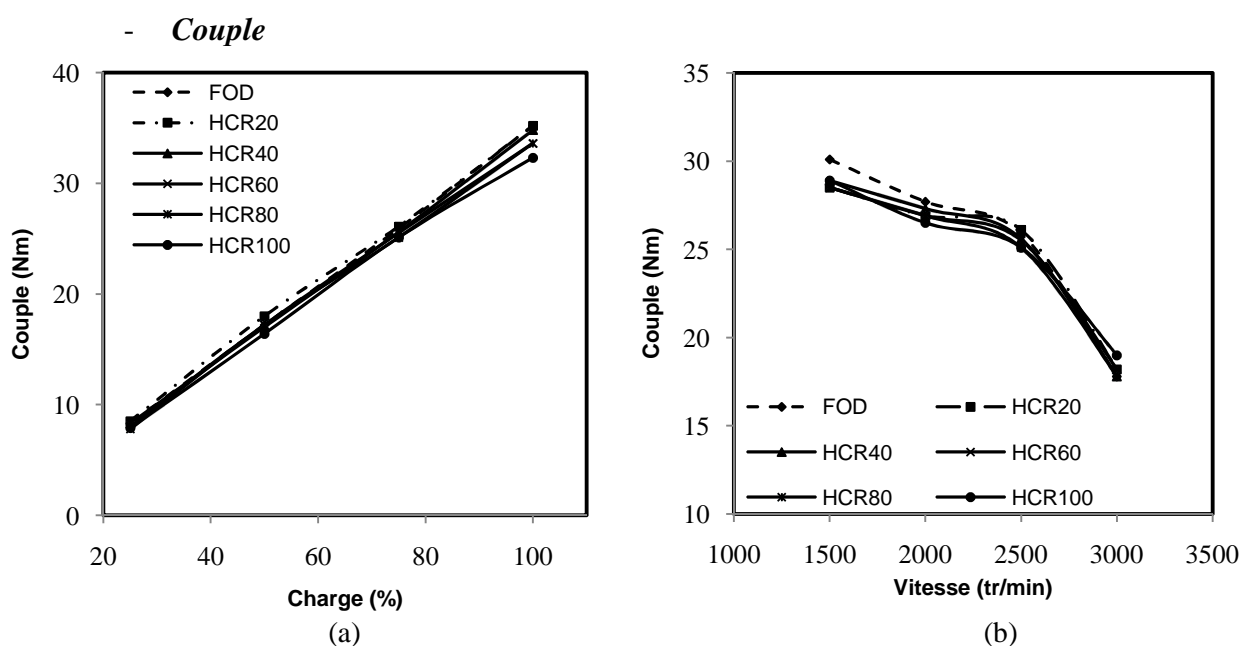


Figure 45 : Couple : (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale

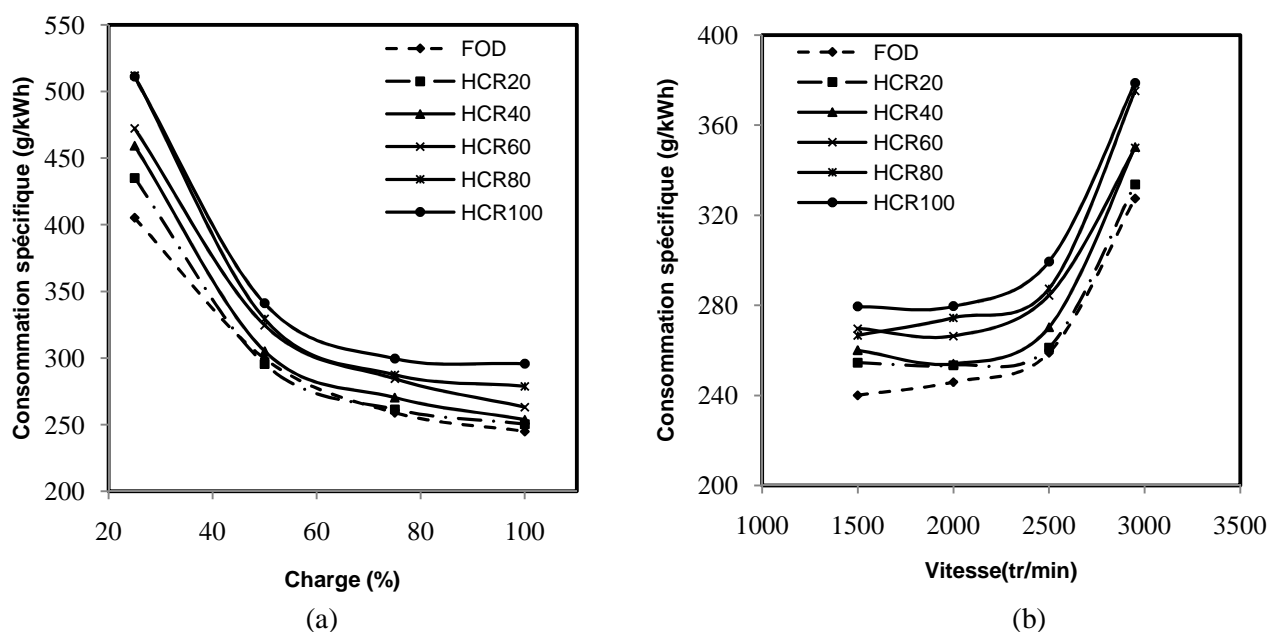
- *Consommation spécifique*

Figure 46 : Consommation spécifique : (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale

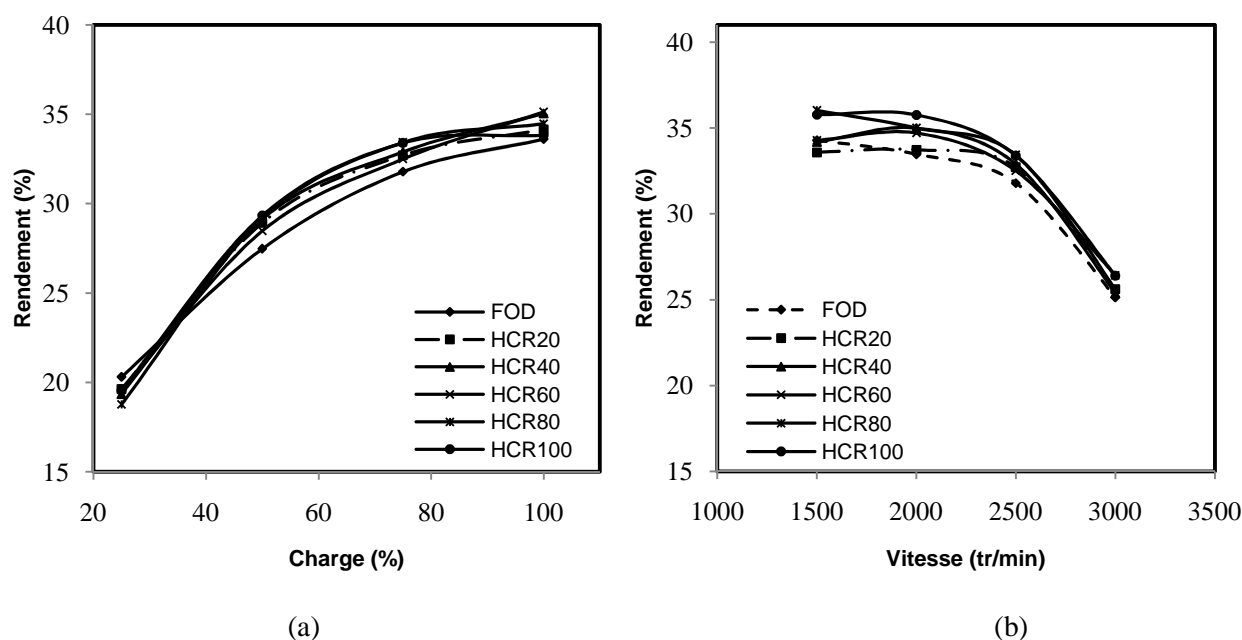
- *Rendement effectif*

Figure 47 : Rendement : (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale

b) Analyse**- Influence de la charge**

Pour toutes les charges étudiées, on ne note pas d'écart significatif de couple entre les différents carburants d'une façon générale. Les écarts sont de l'ordre de grandeur des incertitudes. La présence d'une pompe de gavage dans la ligne d'alimentation de notre dispositif, réduit les pertes de charges liées à la viscosité élevée de l'huile et ses mélanges au FOD. Cette réduction des pertes de charge couplée à des faibles débits de fuite entre les pistons et les cylindres de la pompe permet une compensation de la surconsommation volumique qui est seulement de 5 à 7%. En effet, pour un même volume injecté, le rapport des contenus énergétique du FOD et de l'huile de coton est d'environ 1,07. Les valeurs de couples obtenus très comparables pour les différents carburants, confirment l'hypothèse selon laquelle nous avons une réduction des débits de fuite dans le cas de l'huile ou ses mélanges. Ce résultat montre que la viscosité du carburant et la configuration de la ligne d'alimentation en carburant sont des facteurs déterminants sur les performances d'un moteur utilisant de l'huile végétale comme carburant.

La consommation spécifique augmente avec le pourcentage d'huile de coton dans le mélange en raison des masses injectées plus importantes (ces masses restent toutefois voisines). Elle décroît avec la charge pour se stabiliser aux fortes charges pour l'ensemble des carburants. Aux charges modérées (50 à 75%), l'augmentation de la consommation spécifique est de l'ordre 14% pour l'huile pure par rapport au fioul; elle atteint 20% aux faibles et aux fortes charges (25 et 100% de charge). Toutefois, en raison de l'augmentation de la masse volumique avec le pourcentage d'huile dans le mélange, la surconsommation volumique de l'huile pure par rapport au FOD est de l'ordre de 6% aux charges modérés et de l'ordre de 12% à faible et à pleine charge. Ce résultat est en accord avec des résultats d'études antérieures (HIGELIN (1992) ; VAITILINGOM (2006 a) ; DEEPAK et *al.* (2007)).

Les rendements effectifs sont comparables pour l'ensemble des carburants avec une valeur légèrement plus élevée pour les mélanges et l'huile pure (figure 46 a). A puissances effectives égales, le déficit énergétique de l'huile étant compensé par une surconsommation de celle-ci, on obtient des énergies disponibles très comparables entre le FOD et l'huile pure ou ses mélanges au FOD. Par ailleurs, les difficultés et les imprécisions liées à l'évaluation du rendement effectif ne permettent pas de conclure d'une variation du rendement avec l'incorporation de l'huile dans le cas présent. On peut dire que les rendements sont comparables pour l'ensemble des carburants à toutes les charges.

- *Influence du régime*

A 75% de la charge maximale, le FOD et l'ensemble des autres carburants ont des couples très comparables quel que soit la vitesse de rotation du moteur. Les différences de couple observées sont de l'ordre de grandeur des incertitudes sur la détermination du couple.

Les écarts entre les consommations spécifiques obtenues avec les différents carburants restent pratiquement les mêmes pour toutes les vitesses du moteur. En d'autres termes, les différents carburants ont un même comportement à toutes les vitesses du moteur du point de vue de la consommation spécifique pour la charge considérée.

L'effet de la vitesse sur le rendement du moteur est le même pour l'ensemble des carburants même si l'on peut noter un resserrement des valeurs aux régimes élevés.

Pour l'ensemble des paramètres évalués à 75% de la charge maximale du moteur, on peut noter qu'à chaque régime, tous les carburants présentent globalement les mêmes écarts. Autrement dit, à la charge considérée, l'influence de la vitesse est la même pour tous les carburants.

III.3.2 Emissions polluantes

a) Présentation des résultats d'émissions

Les figures 48 à 50 présentent les émissions du CO, des NO_x et du CO₂ en fonction de la charge et du régime du moteur. Il apparaît un comportement global (allure des courbes) uniforme pour l'ensemble des différents carburants.

- Emissions de CO

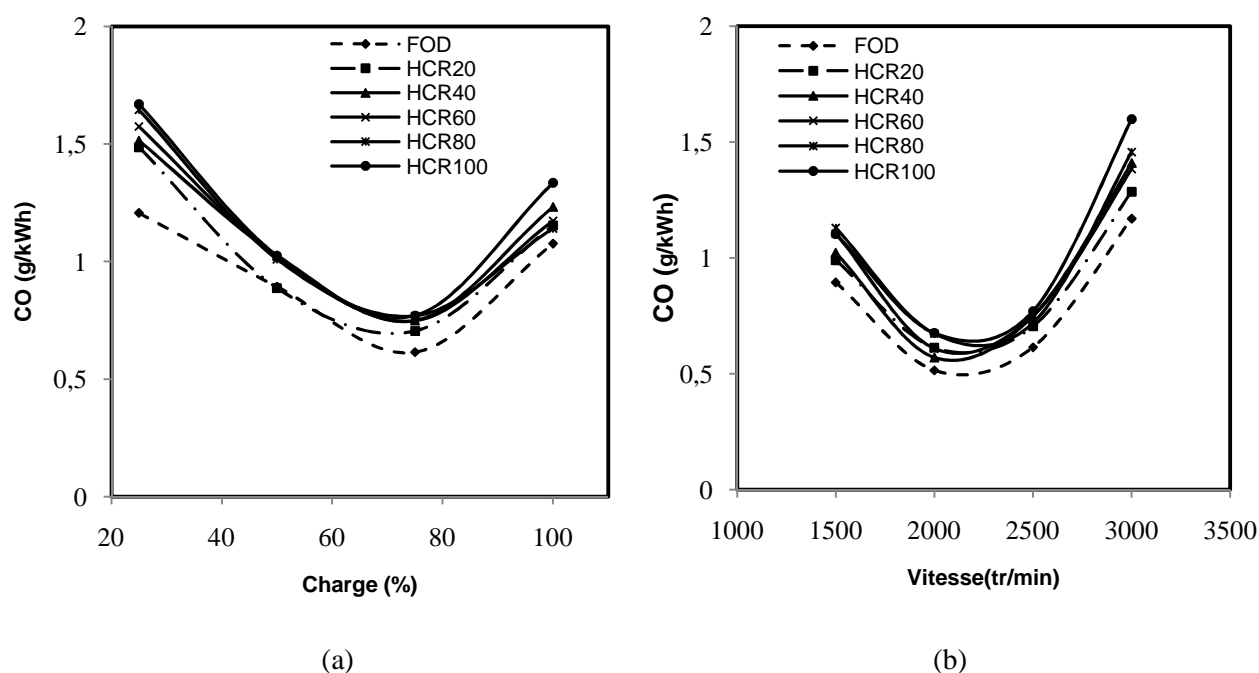


Figure 48 : Emissions de CO (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale

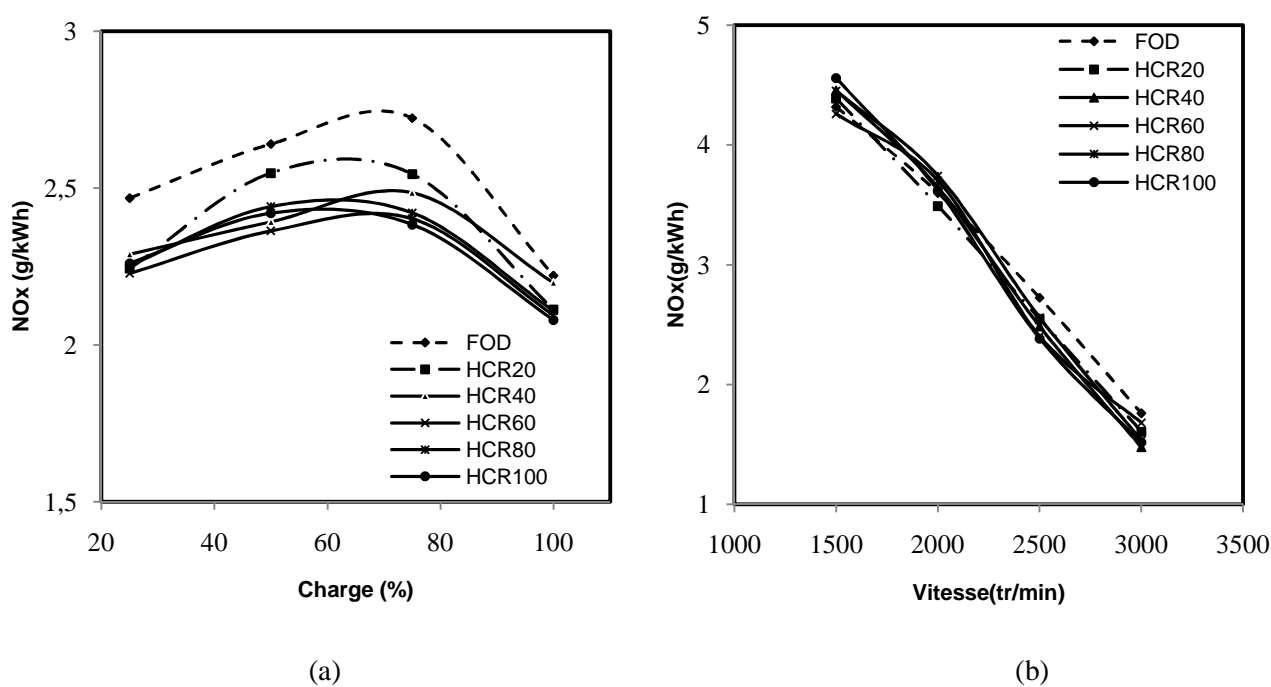
- Emissions des NO_x

Figure 49 : Emissions de NO_x (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale

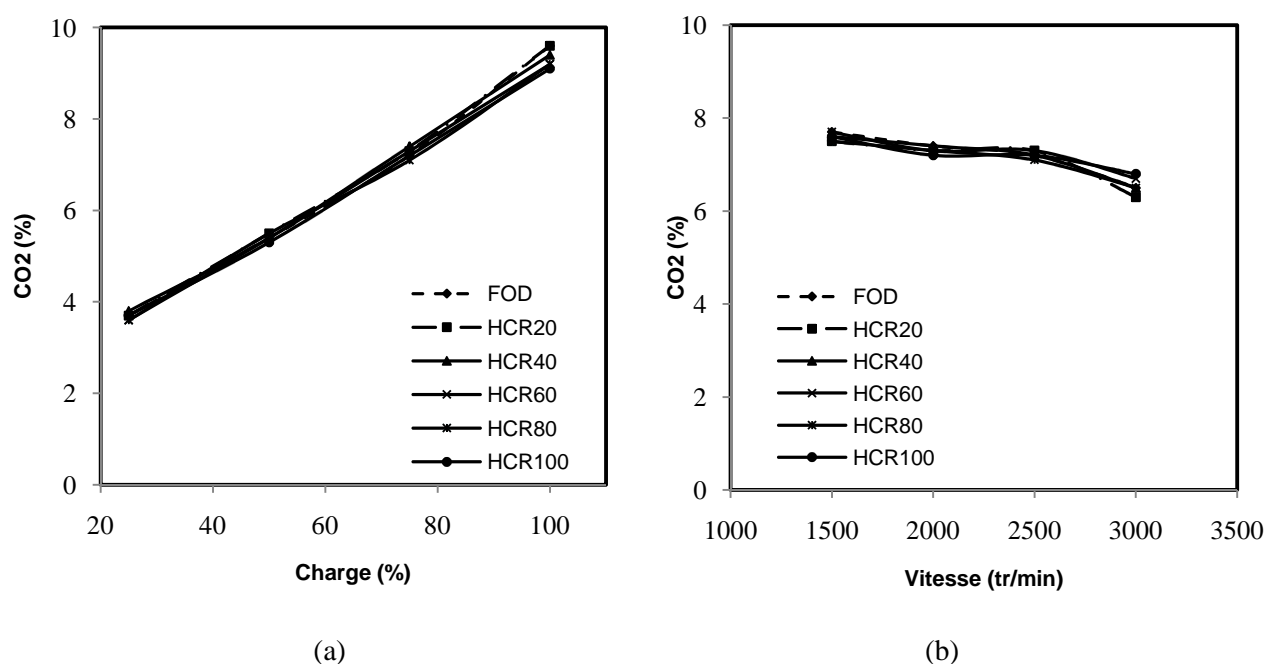
- *Emissions de CO₂*

Figure 50 : Emissions de CO₂ : (a) en fonction de la charge à 2500 tr/min; (b) en fonction du régime à 75% de la charge maximale

b) *Analyse des résultats d'émissions*- *Influence de la charge du moteur*

Les émissions de CO présentent un minimum (figure 48 a) pour l'ensemble des carburants. Aux faibles charges, les émissions élevées de CO sont liées à des conditions de températures relativement faibles, empêchant une bonne évaporation et une bonne préparation du mélange air/carburant. Ce phénomène est beaucoup plus remarquable avec l'huile pure ainsi qu'avec ses mélanges au FOD. Cette observation est liée à la viscosité plus élevée et la plus faible volatilité (granulométrie plus forte) de l'huile ainsi que son évaporation plus difficile aux températures rencontrées à ces charges dans le moteur comme cela a été montré dans les deux premiers chapitres de cette troisième partie. Si les résultats sur l'atomisation (figure 27), dans les conditions de fonctionnement de ce moteur, indiquent que le régime d'atomisation est atteint pour tous les carburants, les conditions d'atomisation et la granulométrie restent néanmoins meilleures dans le cas du FOD (figure 27, tableau 19). Ainsi, les niveaux d'émissions de CO augmentent avec le pourcentage d'huile dans le carburant mais ils restent très proches des niveaux d'émissions du FOD pour ces plages de température (faibles charges).

Aux charges modérées, les conditions de température suffisantes (>773 K) et les quantités modérées injectées conduisent à une meilleure préparation du mélange air/carburant. On observe ainsi une baisse des niveaux de CO. Les émissions de CO des différents carburants se rapprochent avec l'augmentation de la charge.

Aux très fortes charges (100%) en revanche, les importants volumes injectés, conduisent à des richesses locales plus élevées avec des émissions plus élevées de CO pour l'ensemble des carburants. Les richesses sont disparates entre les différents carburants compte tenu de l'apparition de ces richesses locales variables. Il n'est donc pas observé une uniformité dans le comportement des différents carburants comme c'est le cas aux charges modérées. Ce résultat a été obtenu avec le moteur à injection indirecte précédent et est en cohérence avec des études antérieures (WANG et al. (2006) ; DEPAAK et al. (2007)).

Les émissions de NO_x sont maximales entre 50 et 75% de charge du moteur, correspondant aux minima des émissions de CO. Les températures dans la chambre de combustion sont importantes à ces charges avec des richesses modérées. En effet, la température élevée dans la chambre de combustion conduit à une plus grande formation du NO thermique. Cela s'illustre par des niveaux plus élevés de NO_x observés avec le FOD et les niveaux les plus faibles observés avec les carburants à fort pourcentage d'huile (combustion de pré-mélange plus court avec l'huile). Aux faibles charges, les niveaux de températures sont plus faibles dans la chambre de combustion et aux très fortes charges (100%), la plus forte richesse conduit à une réduction sensible des NO_x du fait d'une combustion incomplète. Il apparaît des zones de refroidissement des gaz dans la chambre de combustion. Ces résultats indiquent bien que les facteurs déterminants dans la formation des NO_x , sont la température et les richesses locales.

Les émissions de CO_2 quant à elles augmentent avec la charge pour l'ensemble des carburants et elles sont du même ordre de grandeur quelque soit la charge (figure 50 a). En effet, l'augmentation de la charge conduit à des masses injectées de carburant plus importantes qui sont proches pour l'ensemble des carburants (même si elles sont légèrement plus élevées pour les pourcentages élevés d'huile). Aux très fortes charges (100%), la dégradation de la qualité de la combustion observée en termes d'émission de CO n'est pas perceptible au niveau des émissions de CO_2 , compte tenu des différences d'ordre de grandeur entre les deux mesures (CO et CO_2).

- *Influence du régime du moteur*

Les émissions de CO varient de la même manière quelque soit le carburant (figure 48 b). Les émissions de CO sont plus élevées aux faibles régimes et aux régimes élevés du moteur.

Pour les faibles régimes et à 75% de la charge maximale, le faible « *swirl* » dans la chambre de combustion et la richesse élevée conduisent à de fortes richesses locales et à une faible vaporisation des gouttelettes de carburants.

Aux régimes élevés, pour la charge considérée, un « *swirl* » important conduit à un rejet d'imbrûlés plus élevé. Par conséquent, l'huile végétale ou ses mélanges au FOD, plus sensibles aux conditions de préparation air/carburant, se distinguent très vite du FOD. La figure 51 montre qu'à pleine charge, les émissions de CO sont réduites aux régimes élevés. A cette charge (pleine charge), l'augmentation de la richesse aux régimes élevés par rapport à la charge précédente (75% de la charge maximale) et l'effet favorable du « *swirl* » permettent une réduction des niveaux du CO.

Aux régimes intermédiaires (2000 et 2500 tr/min), le « *swirl* » et la richesse semblent suffisantes pour une bonne combustion de l'ensemble des carburants à la charge considérée.

A une charge donnée (supérieure ou égale à 50% environ), correspond une plage de régime où la richesse et le « *swirl* » sont favorables à une bonne vaporisation et à une bonne préparation du mélange air/carburant.

On ne peut effectuer une distinction entre les niveaux d'émissions de NO_x des différents carburants à la charge considérée (75%) quelque soit le régime du moteur malgré une tendance plus forte des niveaux de NO_x du FOD. Les niveaux de température restent très proches pour tous les carburants à la charge considérée.

Les émissions de CO₂ quant à elles, varient très peu avec le régime quel que soit la nature du carburant. Là aussi, les fluctuations des niveaux de CO avec le régime, ne sont pas perceptibles au niveau des émissions de CO₂ compte tenu des différences d'ordre de grandeur entre les deux grandeurs (CO et CO₂).

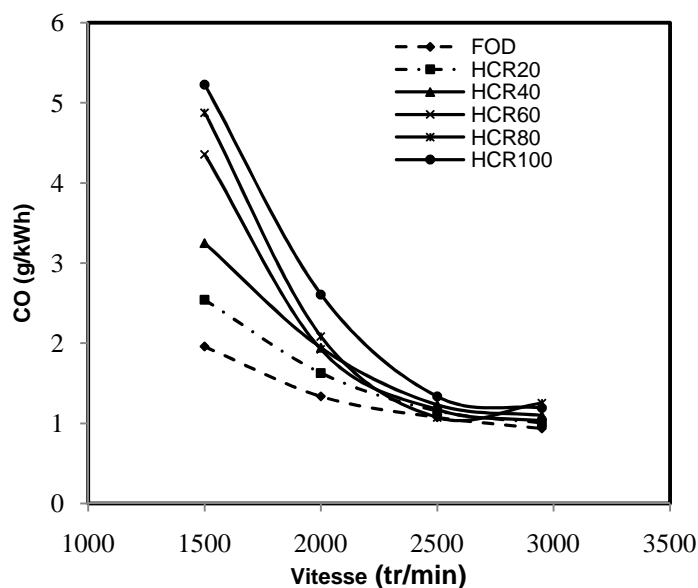


Figure 51 : Emissions de CO en fonction du régime du moteur (pleine charge)

CONCLUSION

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de mettre en évidence l'influence des conditions de température et du « *swirl* » dans la chambre de combustion sur la qualité de combustion des différents carburants ; que ce soit dans le moteur à injection directe ou dans le moteur à injection indirecte.

La température de la chambre de combustion apparaît comme un paramètre fondamental pour une bonne combustion de l'huile. La charge doit être supérieure ou égale à 50% de la charge maximale dans le cas de l'injection directe pour obtenir une bonne combustion (minima de CO) de l'huile ou ses mélanges au fioul. La pleine charge cependant, conduit en général pour une large plage de régime, pour un moteur donné (faibles régimes), à des richesses locales importantes. Ces richesses locales importantes conduisent à une combustion incomplète de l'huile. Ce résultat est obtenu aussi bien pour le moteur à injection directe que pour le moteur à injection indirecte.

La charge optimale pour un type de carburant donné doit donc réaliser un compromis entre la température de la chambre et les richesses locales (« *swirl* » liée au régime).

Enfin, Dans cette étude, les huiles ou leurs mélanges au fioul ont été utilisés dans les conditions standards du fioul. L'on devra déterminer les conditions optimales de combustion de chaque carburant (viscosité réduite convenablement, charge du moteur etc.) afin de déterminer son aptitude réelle en tant que carburant diesel. Chaque carburant devra ensuite

être placé dans les conditions optimales de combustion des autres carburants afin d'effectuer une comparaison « équitable » entre ceux-ci.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE IV : RESULTATS SUR LES BRÔLEURS**INTRODUCTION****IV.1 CONDITIONS EXPERIMENTALES****IV.2 RESULTATS ET ANALYSE : BRÔLEUR A FIOUL NON MODIFIE***IV.2.1 Performances**a) Présentation des résultats**b) Analyse**IV.2.2 Emissions polluantes**a) Présentation des résultats**b) Analyse***IV.3 RESULTATS ET ANALYSE : BRÔLEUR ADAPTEE A L'HUILE VEGETALE***IV.3.1 Résultat et analyse sur l'inflammation du combustible**IV.3.2 Emissions polluantes**a) Présentation des résultats**b) Analyse***CONCLUSION**

INTRODUCTION

L'influence des caractéristiques d'atomisation et des caractéristiques granulométriques des huiles végétales ou leurs dérivés sur la qualité de leur combustion dans les moteurs Diesel a déjà été mis en évidence dans le chapitre précédent ainsi que dans des études antérieures. Par ailleurs, les conditions de fonctionnement conduisant à des températures suffisantes dans la chambre pour une bonne évaporation ont été établies. Cependant, il existe très peu de données sur l'incidence des caractéristiques d'atomisation et granulométriques sur la combustion des huiles végétales ou leurs dérivés dans les brûleurs. Aussi, très peu d'études ont été effectuées sur l'incidence des conditions de température dans la chambre de combustion (des brûleurs) sur la qualité de combustion des huiles végétales. Ce chapitre est consacré à l'étude de ces aspects.

Aussi, une combustion optimisée des huiles végétales dans les brûleurs serait intéressante pour des applications de production de chaleur (chaudières) ou des applications de séchage (directe ou indirecte).

Pour cela, deux brûleurs ont été utilisés : le premier est un brûleur à fioul (domestique) non modifié et le second est un brûleur adapté à l'huile végétale. Ces brûleurs sont installés sur des dispositifs dont les chambres de combustion conduisent à des niveaux de température variables selon les conditions de fonctionnement. Ces deux dispositifs ont déjà été décrits dans la partie II (chapitre II).

Les résultats sur les performances et sur les émissions polluantes sont présentés et discutés dans les prochains paragraphes.

IV.1 *CONDITIONS EXPERIMENTALES*

- Sur le brûleur à fioul non modifié, sept types de mélanges d'huile de coton raffinée et de fioul domestique (FOD) ainsi que le FOD pur ont été caractérisés. La proportion d'huile de coton raffinée dans les différents mélanges varie de 10 à 70% par pas de 10. On désigne pour la suite le FOD, les mélanges contenant 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% et 70% d'huile de coton par FOD, HCR10, HCR20, HCR30, HCR40, HCR50, HCR60 et HCR70 respectivement. Les différents mélanges sont réchauffés à différentes températures selon les évolutions de leurs courbes de viscosité de sorte à obtenir des valeurs de viscosités voisines de celle du FOD à la température d'utilisation de celles-ci (tableau 24).

Les mesures sont effectuées à différents points de fonctionnement du brûleur. Les différents combustibles sont utilisés aux mêmes points de fonctionnement. Chaque point de fonctionnement est défini par un rapport air primaire/air secondaire et une pression de pulvérisation (13 à 20 bars)

La mesure de la consommation, de la température du combustible et de l'eau (à l'entrée et à la sortie de la chaudière) ainsi que les mesures d'émissions (CO , CO_2 , O_2 , NO_x , SO_2) sont effectuées aux différents points de fonctionnement une fois le régime permanent établi.

Les caractéristiques physico-chimiques du FOD et de l'huile de coton raffinée utilisée ont été déterminées (*cf. chapitre I, partie III*).

Tableau 24 : Températures et viscosités correspondantes des différents combustibles

Pourcentage d'huile de coton dans le fioul (%)	Température du combustible (°C)	Viscosité (mm^2/s)	Température ambiante (°C)
0	35	4,03	25-30
10	50	3,62	
20	60	3,70	
30	75	3,60	
40	80	3,70	
50	85	4,00	
60	100	3,90	
70	110	4,10	

- Pour le brûleur adapté à l'huile végétale, les combustibles utilisés sont trois types d'huiles de coton (brute, dégommée et raffinée), l'huile de colza et le fioul oil domestique (FOD). Les caractéristiques physico-chimiques sont données dans le chapitre I (partie III). Les différentes huiles végétales sont réchauffées à des températures comprises entre 50 et 150 °C tandis que le FOD est maintenu à une température de 50 °C. La température ambiante moyenne lors des essais est d'environ 30 °C.

Les points de fonctionnement du brûleur sont définis par la pression de pulvérisation et le rapport air primaire/air secondaire. Les différents combustibles sont utilisés à la pression

constante de 28 bars suivant différents rapports air primaire/ air secondaire afin de déterminer dans un premier temps un point de fonctionnement optimum. A ce point de fonctionnement, une analyse des produits de combustion est effectuée (gaz incondensables et composées organiques), ainsi que la mesure de la consommation et de la température des fumées. Pour chaque essai, les mesures sont effectuées en continu sur 30 minutes après l'établissement d'un régime permanent.

Les résultats présentés sont obtenus à l'issue de plusieurs séries de mesures pour chaque combustible. Ces résultats ont été validés sur plusieurs campagnes d'essais effectuées durant l'étude.

IV.2 RESULTATS ET ANALYSE : BRÛLEUR A FIOUL NON MODIFIE

IV.2.1 *Performances*

a) *Présentation des résultats*

Chaque carburant est maintenu à une température bien choisie de façon à ce que l'ensemble des carburants aient des viscosités et des tensions superficielles très comparables. Cela a déjà été décrit dans les chapitres précédents (Partie II, chapitre II). Les carburants sont donc très proches d'un point de vue des caractéristiques physiques fondamentales. Ils diffèrent toutefois par leur nature chimique.

Les paramètres essentiels pris en compte pour déterminer l'influence de l'atomisation et de la granulométrie ainsi que l'influence de la température de la chambre sont la pression de pulvérisation et le rapport air primaire/air secondaire du brûleur. Les variations de l'un des deux paramètres conduisent à différentes valeurs de richesse du mélange air/carburant.

Les caractéristiques générales de performances du dispositif sont présentées sur les figures 52 a, b et c. Elles sont exprimées en fonction de la pression uniquement. En effet, ces caractéristiques se sont révélées très peu sensibles au rapport air primaire/air secondaire.

On peut noter comme dans le cas des moteurs, que le FOD et l'ensemble de ses mélanges à l'huile végétale présentent le même comportement global (allures des courbes). Le prochain paragraphe présente l'analyse de ses résultats.

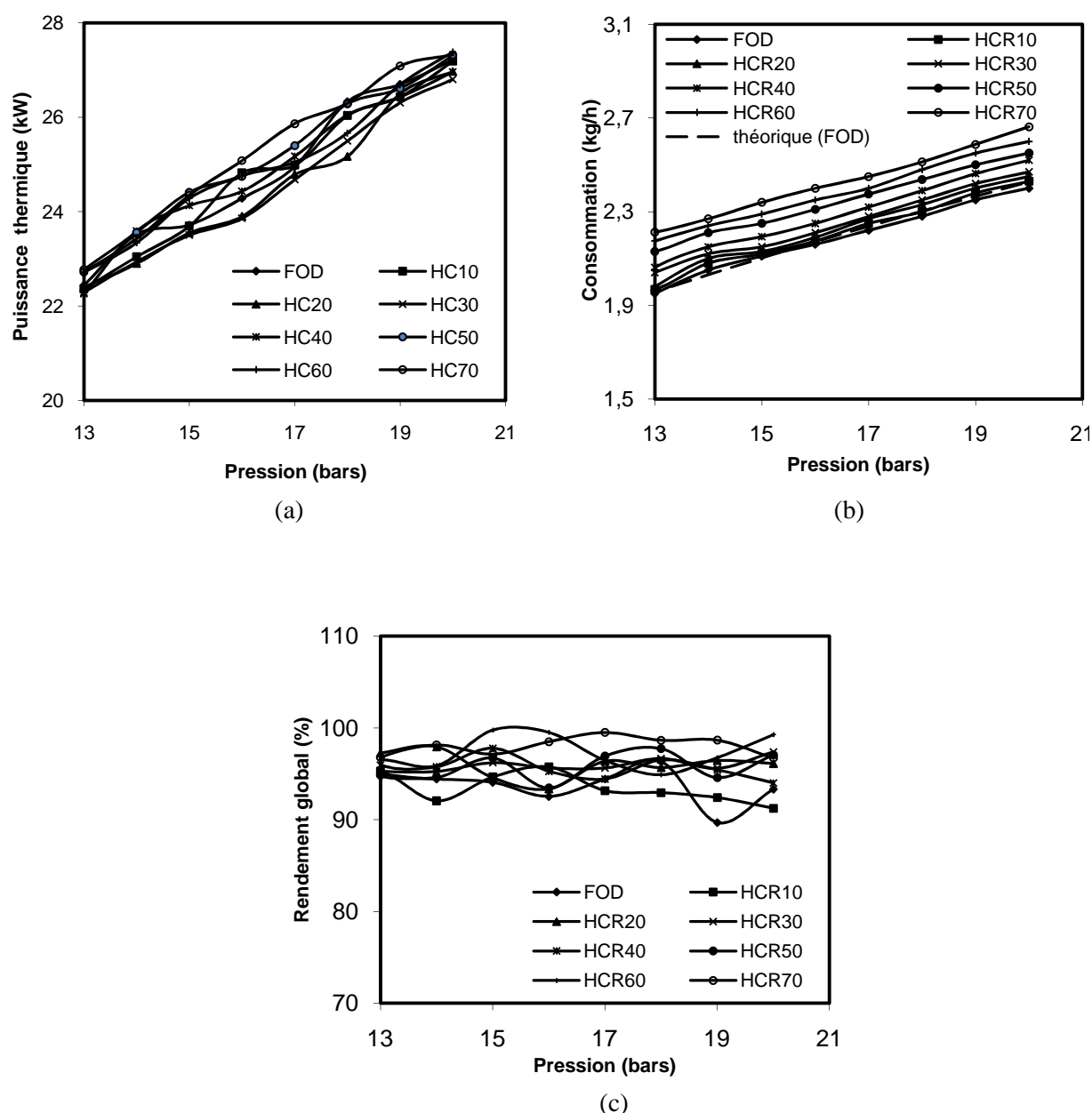


Figure 52 : Performances : (a) Puissance thermique; (b) Consommation; (c) Rendement global

b) Analyse

La puissance thermique disponible varie de façon presque linéaire avec la pression de pulvérisation pour l'ensemble des carburants. En effet, la puissance thermique est proportionnelle à la masse pulvérisée qui, elle est proportionnelle à la racine de la pression de pulvérisation. La figure 52 b donne une illustration de ce résultat où les courbes théorique et expérimentale du débit massique pour le FOD sont très comparables.

La puissance thermique et le rendement global (rapport de la puissance thermique fournie au milieu ambiant à la puissance thermique dégagée par la combustion du combustible) de

l'installation obtenus avec les différents carburants sont comparables pour les mêmes points de fonctionnement au regard des incertitudes.

Le débit massique du carburant augmente avec le pourcentage d'huile dans le mélange et suit la même loi pour tous les carburants. En effet, les volumes de combustible pulvérisé à une pression donnée sont sensiblement égaux pour les différents combustibles car les viscosités sont les mêmes. L'augmentation de la masse volumique avec le pourcentage d'huile dans le mélange, entraîne une augmentation de la masse pulvérisée. L'augmentation de la masse pulvérisée avec le pourcentage d'huile de coton dans le mélange, compense en retour, le déficit énergétique lié à la diminution du PCI lorsque le pourcentage d'huile augmente. Ainsi, les puissances thermiques obtenues avec les différents carburants sont du même ordre de grandeur.

IV.2.2 *Emissions polluantes*

a) *Présentation des résultats*

Les figures 53 à 56 présentent les évolutions des émissions polluantes qui ont été déterminées dans cette étude. Dans un premier temps, le rapport air primaire/air secondaire est fixé à une valeur de référence correspondant au rapport optimal sur la plage des points de fonctionnement du brûleur pour les différents carburants. Ce rapport a été obtenu lors d'essais préliminaires. Pour ce rapport, différentes valeurs de la pression de pulvérisation sont considérées. Cela permet de mettre en évidence l'influence des niveaux de températures dans la chambre de combustion sur la qualité de la combustion. Dans un second temps, pour une pression fixe, où les conditions de températures sont favorables à une vaporisation du carburant, différentes valeurs du rapport air primaire/air secondaire sont considérés. Cela permet de mettre en évidence, l'influence directe de la richesse du mélange air/carburant.

Tout comme les résultats précédents, on peut noter une allure identique des courbes pour tous les carburants.

- Emissions de CO

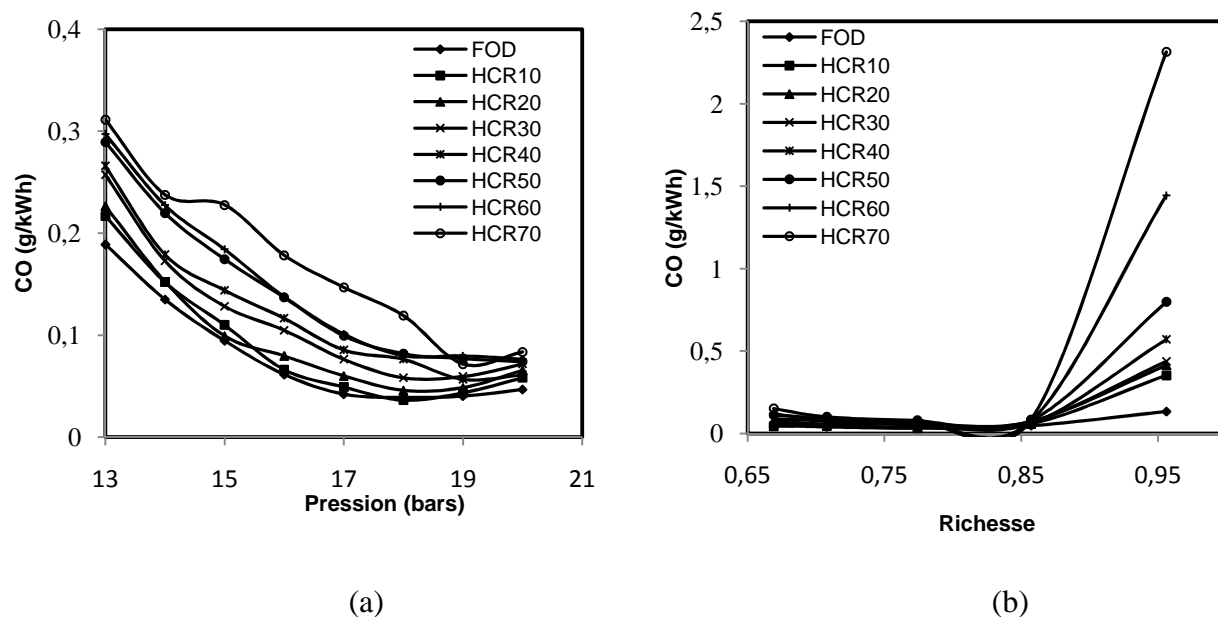
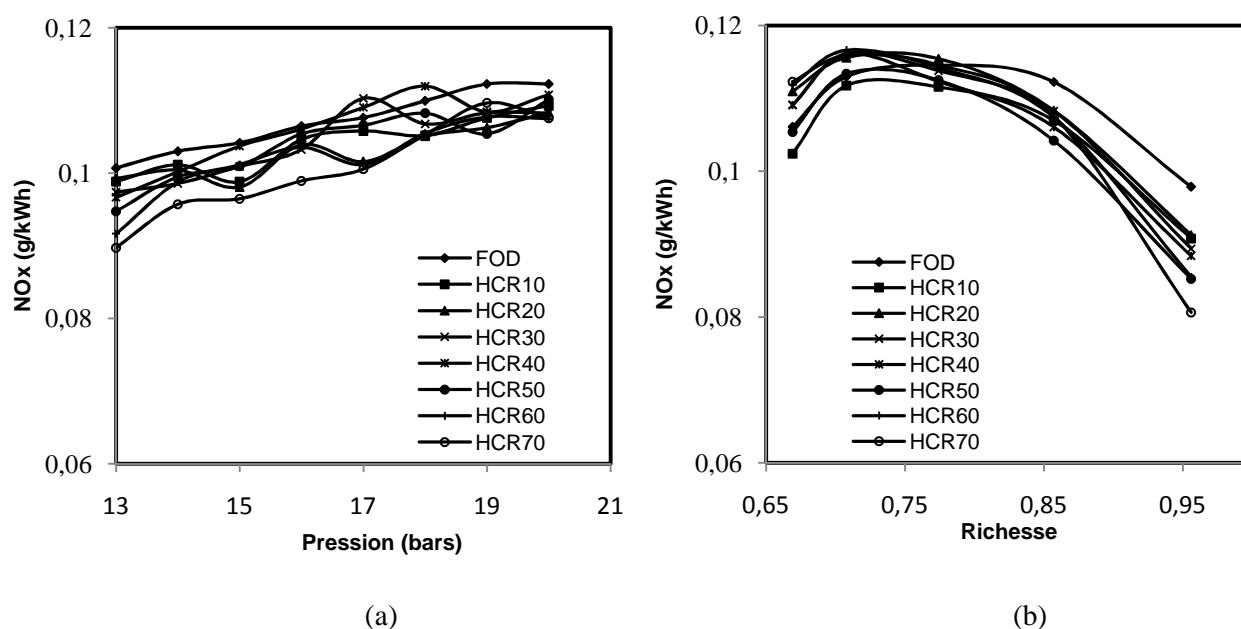
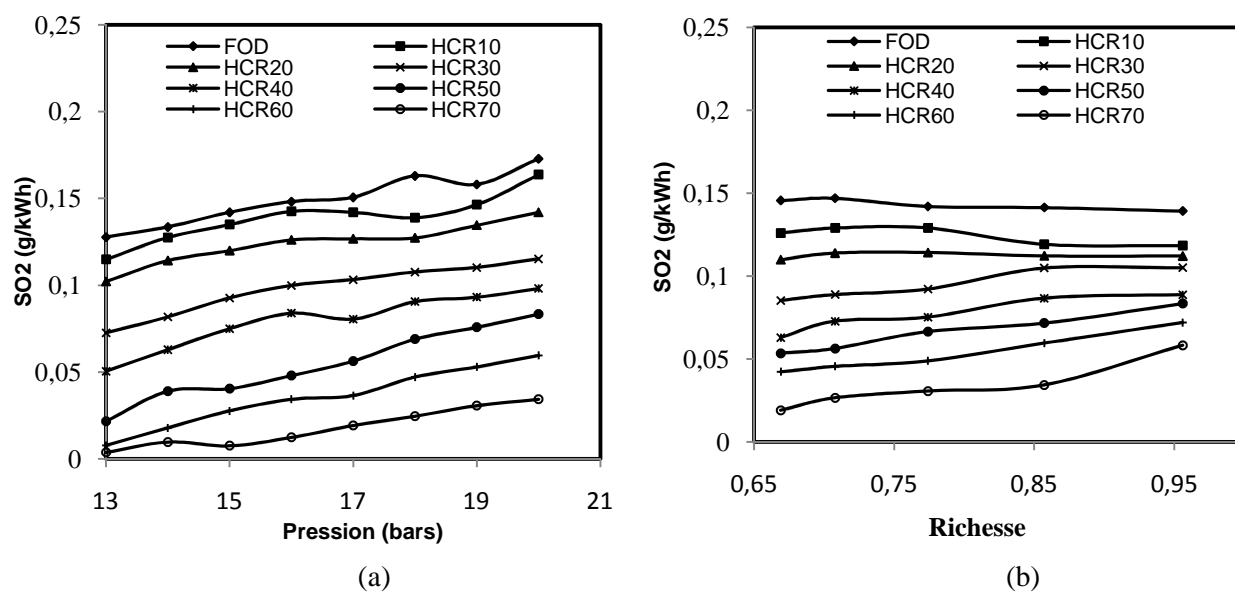
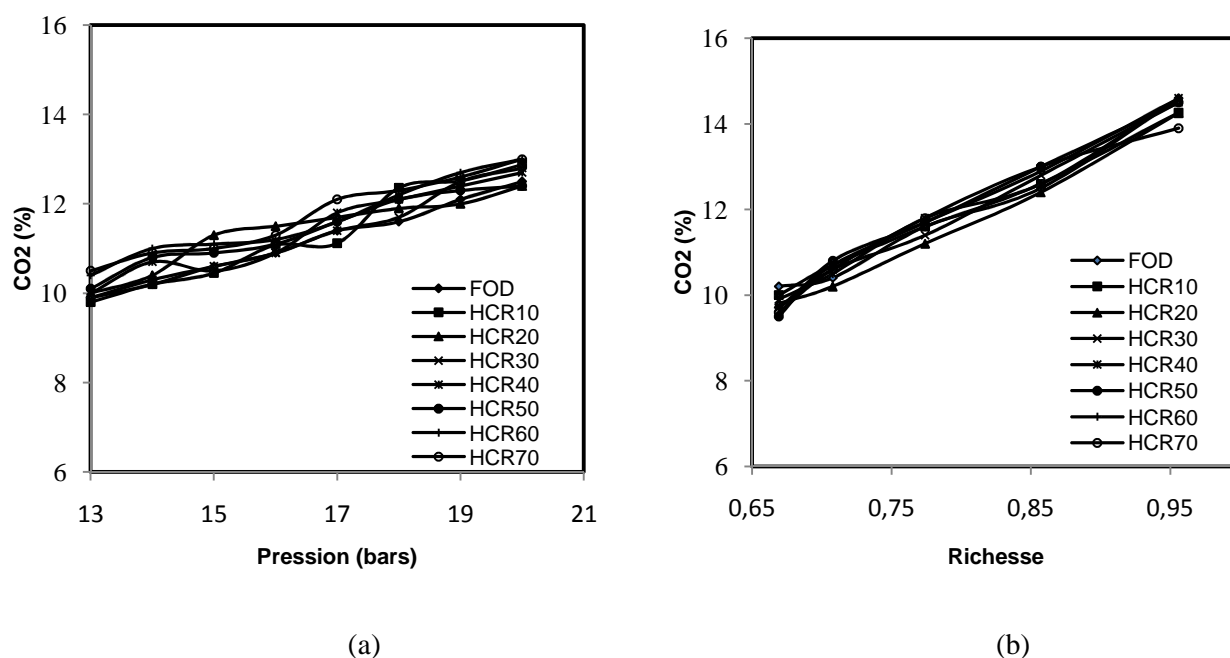


Figure 53 : Emissions de CO : (a) en fonction de la pression de pulvérisation ; (b) en fonction de la richesse à 20 bars

- Emissions de NO_xFigure 54 : Emissions de NO_x : (a) en fonction de la pression de pulvérisation ; (b) en fonction de la richesse à 20 bars

- Emissions de SO_2 Figure 55 : Emissions de SO_2 : (a) en fonction de la pression de pulvérisation ; (b) en fonction de la richesse à 20 bars- Emissions de CO_2 Figure 56 : Emissions de CO_2 : (a) en fonction de la pression de pulvérisation ; (b) en fonction de la richesse à 20 bars

b) Analyse**- Emissions de CO**

Les niveaux de CO diminuent avec la pression de pulvérisation pour se stabiliser aux fortes pressions (19-20 bars). Ils augmentent avec le pourcentage d'huile dans le carburant malgré le préchauffage de chaque carburant à une température convenablement choisie (tableau 24). Cependant, pour des pressions de pulvérisation élevées, les écarts entre les niveaux des CO des différents carburants restent plus faibles. Cela montre que la seule réduction de la viscosité ne suffit pas pour une bonne combustion de l'huile, Il faut prendre en compte d'une part, la pression de pulvérisation et d'autre part la nature chimique de l'huile différente de celle du FOD.

En effet, l'augmentation de la pression de pulvérisation permet d'avoir une granulométrie du jet nécessaire pour une bonne combustion (figure 30). Aussi, la nature chimique différente de l'huile impose des conditions de température minimale pour une bonne vaporisation et une bonne combustion comme cela a été déjà montré dans le chapitre II de cette partie. L'augmentation de la masse pulvérisée avec l'augmentation de la pression, conduit à des niveaux de température dans la chambre qui permettent une vaporisation des carburants contenant une proportion élevée d'huile végétale. Ainsi, les émissions de CO diminuent aux pressions élevées et deviennent pratiquement constantes pour tous les carburants (à partir de 19 bars, avec un « resserrement » à 20 bars). Cela confirme les résultats obtenus au chapitre I de cette partie où la différence entre la pression de pulvérisation et celle régnant dans la chambre devait être supérieure à 17 bars.

A ces pressions (19 et 20 bars), la granulométrie du « spray » de carburant est comparable pour tous les carburants et très proche des valeurs préconisées (comprise entre 50 et 100 μm avec une dispersion telle que les gouttes de diamètre élevé soit entre 200 et 300 μm (MONNOT et *al.* (1978) ; BORGHI et *al.* (1995))). Par ailleurs, A ces pressions la température moyenne dans les zones les plus froides de la chambre (parois) sont de l'ordre de 550 °C, températures suffisantes pour une bonne vaporisation et une diminution des richesses locales. Les particularités tendent donc à disparaître pour des pressions élevées, où les conditions de températures sont suffisantes quel que soit le carburant. On observe une certaine uniformité dans le comportement des différents combustibles. Ce résultat (uniformité dans le comportement aux fortes températures) avaient déjà été observé lors des essais d'évaporation de gouttes d'huile et de FOD (cf. Chapitre II, partie III) et dans le moteur Diesel (cf. Chapitre III, partie III).

En revanche, aux faibles pressions de pulvérisation (en deçà de 19 bars), la granulométrie reste relativement élevée pour l'ensemble des carburants (figure 30). En plus, les niveaux de température dans la chambre de combustion sont faibles pour permettre une vaporisation complète de l'huile. Dans ce type de chaudière, l'échangeur eau-produits de combustion fait office de chambre de combustion. Les parois sont donc constamment refroidies par l'eau dont la température moyenne n'excède généralement pas 80°C. Cela explique en partie les niveaux relativement élevés de CO observés aux faibles pressions.

Les émissions de CO sont faibles pour les faibles richesses. Toutefois, pour des richesses proches de la stœchiométrie, les émissions de CO deviennent importantes. Ce résultat s'explique en partie par des phénomènes d'extinction de la flamme (combustion incomplète) liés à une apparition de zones très riches. Des phénomènes similaires ont été obtenus avec du gaz méthane où les émissions de CO augmentent de façon importante pour des richesses supérieures à 0,85 (GIANFRANCO et al. (2006)). Ce phénomène est beaucoup plus remarquable pour les mélanges, où des phénomènes d'extinction de la flamme et l'apparition de zones trop riches provoqueraient une baisse de température dont l'influence sur la vaporisation de l'huile végétale est plus grande. De la même façon, pour les richesses relativement faibles, les émissions de CO augmentent légèrement du fait des phénomènes d'extinction dus à un refroidissement par l'excès d'air important.

- *Emissions de NO_x*

Le comportement global est le même pour les différents carburants. Les émissions des NO_x augmentent avec la pression compte tenu de l'augmentation de la température moyenne de la flamme et de la richesse du mélange air/carburant. On obtient dans ces conditions une production croissante de radicaux hydrocarbonés avec la richesse, favorable à la formation du NO « précoce ». L'augmentation de la température moyenne de la flamme et de la richesse conduit ainsi à la formation du NO « thermique » et du NO « précoce ». Compte tenu de la teneur (quasi nulle) en azote des carburants utilisés ici, le mécanisme du NO du combustible est donc très négligeable. On ne peut conclure d'un classement des différents carburants. Sur les figures 54 a et b, les uniformités déjà observées dans les émissions de CO à 20 bars se retrouvent bien.

A la pression de 20 bars, les niveaux plus faibles des NO_x pour les richesses faibles, pourraient être dus à un léger refroidissement par l'excès d'air (combustion incomplète). Pour des richesses proches de la stœchiométrie, il se produit aussi un effet de refroidissement, dû

aussi à une combustion incomplète. Pour le FOD en particulier, les niveaux des NO_x restent élevés près de la stœchiométrie. En effet, les phénomènes d'extinction sont moindres avec le FOD près de la stœchiométrie. Ces résultats sont en accord avec les résultats sur les émissions du CO.

- *Emissions de SO_2*

La teneur en SO_2 dans les produits de combustion est une fonction croissante de la teneur en soufre du combustible. L'augmentation de la pression de pulvérisation conduit à un débit pulvérisé croissant. Cela explique l'augmentation de la teneur en SO_2 avec la pression pour l'ensemble des combustibles (avec un rapport air primaire/air secondaire fixe, (figure 55 a). Par ailleurs, compte tenu de l'absence de soufre dans l'huile de coton, on observe une diminution du SO_2 avec l'augmentation du pourcentage d'huile de coton dans le mélange.

Les niveaux d'émissions du SO_2 varient très peu avec la richesse (figure 55 b). En effet, à la pression constante de 20 bars, le rapport air primaire/air secondaire varie mais la masse de carburant pulvérisée reste constante. Les émissions de SO_2 étant proportionnelles à la masse de soufre dans le carburant, elles restent constantes à la pression de 20 bars. Par ailleurs, les émissions de SO_2 sont rapportées au même excès d'air (0%) puis rapportées à l'énergie disponible dans le carburant. Ainsi, l'on s'affranchit de l'influence des phénomènes de dilution aux faibles richesses.

- *Emissions de CO_2*

Pour un rapport air primaire/air secondaire constant, les émissions de CO_2 augmentent avec la pression du fait d'une masse pulvérisée plus importante (figure 56 a).

La valeur du CO_2 calculé pour un combustible donné est proportionnelle à sa valeur théorique maximale de CO_2 ($\text{CO}_{2\text{max}}$) et à la différence entre le taux d'oxygène de l'air et le taux d'oxygène résiduel mesuré dans les fumées. Lorsque la richesse croît, le taux d'oxygène résiduel diminue et tend vers une valeur optimale ; on observe ainsi une valeur de CO_2 calculé croissante. Toutefois, pour des richesses élevées (proches de la stœchiométrie), le CO_2 calculé reste élevé (proche du $\text{CO}_{2\text{max}}$) malgré les phénomènes d'extinction de la flamme entraînant des émissions de CO relativement importantes. Le rapport CO/CO_2 reste cependant encore faible de sorte que cette augmentation des émissions de CO n'est pas perceptible sur les niveaux d'émission de CO_2 .

IV.3 RESULTATS ET ANALYSE : BRÛLEUR ADAPTEE A L'HUILE VEGETALE

IV.3.1 *Résultat et analyse sur l'inflammation du combustible*

L'étude de l'influence de la température de préchauffage du combustible sur les caractéristiques du « spray » d'huile végétale (chapitre I, partie III) a révélé une température minimale de préchauffage de 115°C pour obtenir une atomisation et une granulométrie adaptées de l'huile. Les observations faites lors de l'inflammation de l'huile de coton raffinée confirment ces résultats. En effet,

- pour des températures de l'huile comprises entre 65 et 80°C, on observe un allumage difficile de la flamme suivi d'une extinction de celle-ci.
- Entre 80 °C et 115°C, on obtient un allumage plus aisé de la flamme sans extinction de celle-ci. Cependant, on observe un phénomène d'égouttage du combustible et une flamme instable se développant sur toute la longueur de la chambre de combustion. Cette observation s'explique par un problème de pulvérisation du à une viscosité encore élevée à ces températures. Le jet de combustible est caractérisé par « une longueur de rupture » importante (forte pénétration) avec un angle faible. Par ailleurs, l'atomisation ne commence qu'au delà d'une certaine distance de l'orifice du gicleur.
- Au-delà de 115°C, les phénomènes d'égouttage disparaissent et la longueur de la flamme diminue pour se stabiliser à une valeur minimale. Ces résultats obtenus confirment les prédictions du chapitre I de cette partie où l'on indiquait une température minimale de 115 °C pour une granulométrie adéquate. Cela a permis de valider le choix d'une température de préchauffage des huiles à 125°C, suffisante pour une bonne atomisation de l'huile et une faible granulométrie du « spray ».

IV.3.2 *Emissions polluantes*

a) Présentation des résultats

L'analyse des produits de combustion dans cette partie présente deux enjeux :

Premièrement, ce dispositif permet de mettre en évidence, à travers l'analyse des produits de combustion, l'impact de certains paramètres fondamentaux (régime d'atomisation, granulométrie, température de la chambre de combustion) sur la qualité de la combustion des huiles et du FOD. En effet, la combustion des huiles végétales dans ce type de dispositif, (brûleur adapté) où les températures des parois de la chambre sont relativement élevées (température des parois supérieures à 600°C) et où la pression de pulvérisation est élevée, permet de placer les huiles dans leurs conditions favorables de combustion. La plupart des

essais de combustion des huiles sont généralement faits dans les conditions de combustion standards du FOD. On ne peut donc avoir des résultats comparatifs entre le FOD et les huiles dans ces conditions. Cela a déjà été observé dans les points précédents.

Deuxièmement, le dispositif utilisé pourrait être couplé à un système de séchage direct de produits alimentaires ou non qui sont soumis à des normes de qualité. Cela requiert une certaine « qualité » des produits de combustion.

Les résultats d'analyses des gaz incondensables sont donnés dans le tableau 25. Ces résultats sont obtenus avec le Quintox puis validés avec le micro-GC pour les gaz mesurés communs aux deux dispositifs (CO_2 , O_2). Les teneurs dans les fumées de certains hydrocarbures (CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , H_2) sont inférieures aux limites de détection du micro-CG.

Tableau 25 : Emissions de gaz incondensables:

	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	NO_x (ppm)	SO_2 (ppm)
HCB100	9,2	8,8	15	74	77	0
HCD100	9,9	8,3	13	85	88	0
HCR100	10,2	8,1	13	84	88	0
HRB100	9,7	8,3	25	68	71	0
FOD	8,5	9,3	0	75	78	45

L'analyse des composés organiques solubles contenus dans les produits de combustion, au chromatographe donne les résultats du tableau 26.

Tableau 26 : Résultats d'émissions de composés organiques condensables

Composées organiques	Concentration (mg/m ³ gaz)				
	FOD	HCB100	HCD100	HCR100	HRB100
Pyridine	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33
2 -picoline	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33
p-xylène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
o-xylène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
3-picoline	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
4-picoline	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
2,3-benzofuran	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Indène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
phénol	0,23	0,18	0,19	0,22	0,19
2-metoxxy-phénol. (gaiacol)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
o-cresol	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Naphthalene	0,50	0,59	0,76	0,71	0,80
p-cresol	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
rn-cresol	0,08	0,06	0,06	<0,02	<0,02
2-metoxxy-4-méthyl-phénol	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
2,4-diméthylphénol	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Quinoline	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
2-me-Naphtalene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Isoquinoline	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
3,4 Diméthylphenol	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
1-Méthylnaphtalene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Acenaphtylene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Acenaphtene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Fluorene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23

Tableau 26 (suite): Résultats d'émissions de composés organiques condensables

	Concentration (mg/m ³ gaz)				
Composées organiques	FOD	HCB100	HCD100	HCR100	HRB100
Alpha-naphtol	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Beta-naphtol	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Phenanthrene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Anthracene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Fluoranthene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Pyrene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Benzo(a)anthracene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Chrysene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Benzo(b)fluoranthene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Benzo(k)fluoranthene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Benzo(a)pyrene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Dibenzo(ah)anthracene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Indeno(123cd)pyrene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Benzo(ghi)perylene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23

b) Analyse**- Emissions de gaz incondensables**

Toutes les huiles présentent entre elles, pour l'ensemble des gaz mesurés, des teneurs très comparables. Ces teneurs sont comparables à celles enregistrées pour le FOD à l'exception du dioxyde de soufre.

Les émissions de CO sont de l'ordre de grandeur des incertitudes, de sorte que l'on ne peut conclure d'une différence entre les différentes huiles et le FOD en termes d'émissions de CO. Ce résultat confirme les résultats déjà obtenus avec le brûleur précédent. En effet, la granulométrie de tous les carburants (à la température de réchauffage considérée), la pression de pulvérisation ainsi que les conditions de température dans la chambre de combustion sont suffisantes pour leur vaporisation complète et l'oxydation quasi complète du CO en CO₂ (les richesses sont plus uniformes).

Contrairement à la chambre de combustion de la chaudière (transferts convectifs entre les parois de la chambre et l'eau de la chaudière), les transferts de chaleur convectifs se font entre

les parois chaudes de la chambre de combustion et l'air ambiant (coefficient d'échange convectif plus faible). Cela permet aux parois de la chambre d'avoir une température relativement élevée.

Aussi, l'influence des phénomènes de rayonnement peut être importante sur la combustion et la température moyenne dans la chambre de combustion. De tels phénomènes sont favorables à la vaporisation et à la combustion des huiles végétales. Des résultats obtenus précédemment avec le brûleur à fioul non modifié montraient que les huiles végétales tendent vers un comportement unique et aussi vers celui du FOD pour des conditions de température suffisantes (puissance thermique élevée). Ces mêmes observations (comportement uniforme aux fortes températures) ont été faites lors d'essais sur des moteurs ou lors d'essais d'évaporation de gouttes d'huiles végétales ou leurs esters et le gazole comme indiqué précédemment.

On peut noter que ce type de comportement entre les différentes huiles et le FOD en termes d'émissions des NO_x sont perceptibles. On ne note aucune différence fondamentale entre les niveaux d'émissions des NO_x des différents carburants.

Les émissions de CO_2 sont sensiblement égales pour les différentes huiles et sont légèrement inférieures à celles du FOD. Cela est dû à la masse de carbone plus élevée dans le FOD pour des volumes identiques d'huile et de FOD.

Quant aux émissions de SO_2 , elles sont nulles pour les différentes huiles contrairement au FOD. En effet les émissions de SO_2 sont proportionnelles à la teneur en soufre du combustible.

- *Composés organiques condensables*

Parmi les composés organiques déterminés ici, celles qui font l'objet d'une attention particulière sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) pour leur caractère cancérigène. Ce sont : le Naphtalène, le 2-me-Naphtalène, le 1-Méthylnaphtalène, l'Acénaphthylène, l'Acénaphène, le Fluorène, le Phénanthrène, le Fluoranthène, le Pyrène, le Benzo(a)anthracène, le Chrysène, le Benzo(b)fluoranthène, le Benzo(k)fluoranthène, le Benzo(a)pyrène, le Dibenzo(ah)anthracène, l'Indeno(123cd)pyrène et le Benzo(ghi)pérylène. Cependant, seul le Benzo(a)pyrène fait généralement l'objet d'une norme, il est très souvent utilisé comme indicateur des niveaux des HAP. Les résultats d'émissions de HAP obtenus au cours de la présente étude sont pour l'ensemble, en dessous du seuil de détection du dispositif

de mesure sauf pour le naphthalène. Ce HAP (le plus léger), moins toxique que les HAP lourds, donne pour l'ensemble des carburants, des teneurs comparables avec une valeur légèrement plus élevée pour les huiles végétales. En effet, l'insaturation, comme c'est le cas des huiles, favorise la formation des HAP (les chaînes insaturées, lors de leur dégradation, sont en partie transformées en composés aromatiques, précurseurs de HAP). Ces émissions de Naphthalène pourraient être dues à une combustion en mélange pauvre (richesse : 0,55). Les travaux de LEVENDIS (1997) et YILMAZ (2007) ont montré que les émissions du naphthalène s'effectuent de façon non négligeable en milieu pauvre (pour des richesses inférieures à 0,6), cela explique en partie nos résultats. Quant aux autres HAP, un dispositif d'analyse dont la limite de détection permet leur quantification est indispensable pour évaluer la qualité de combustion en termes d'émissions de HAP. En particulier, la quantification précise d'une grande partie de ces HAP se trouvant sous forme particulaire est indispensable pour un séchage direct de produits alimentaires.

CONCLUSION

Ce chapitre a mis en évidence les possibilités d'utilisation des huiles végétales dans un brûleur adapté ou non ayant subi des réglages adéquats.

L'influence des conditions thermiques, des conditions d'atomisation et la granulométrie du jet de carburant sur la qualité de la combustion a été mise en évidence à travers l'analyse des produits de combustion.

Chaque huile végétale (ou ses mélanges ou FOD) doit être portée dans des conditions de température et de pression spécifiques pour permettre une bonne combustion. Ces conditions de température et de pression obtenues lors de la combustion sont conformes à celles prédites par l'étude d'atomisation et de la granulométrie présentée au chapitre I de cette partie.

Aussi, les conditions de température dans la chambre de combustion définies ici et nécessaires pour une bonne vaporisation et une bonne combustion de l'ensemble des carburants confirment les résultats obtenus lors de l'évaporation de gouttes isolées de ces carburants. Ces mêmes résultats ont été obtenus lors de la combustion des huiles végétales dans un moteur Diesel.

Une fois les conditions favorables d'atomisation, de granulométrie et de température de la chambre réunies, l'ensemble des carburants présentent des comportements très proches en termes de performances et d'émissions.

A la vue des résultats d'analyse des composés organiques dont les valeurs sont inférieures aux seuils de notre dispositif de mesure, une analyse plus fine des émissions de ces composés (aldéhydes, HAP), en particulier les HAP sous forme particulaire, est nécessaire. Cela devra s'accompagner d'essais d'endurance.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail était de déterminer les conditions optimales de combustion d'huiles végétales tropicales (en particulier l'huile de coton) dans les moteurs et sur les brûleurs au vu des divergences sur certains aspects liés à leur combustion dans les moteurs (pollution, performances etc.) et l'insuffisance de résultats de leur combustion sur les brûleurs.

Pour cela, les différentes étapes successives de l'étude ont été :

- la caractérisation physico-chimique de différentes huiles végétales et leurs mélanges au fioul domestique
- l'étude de l'atomisation et l'analyse granulométrique de ces huiles et leurs dérivés
- l'étude théorique et expérimentale de l'évaporation de gouttes d'huiles végétales dans différentes conditions de température
- l'étude de la combustion de ces huiles dans des moteurs et sur des brûleurs par l'analyse des produits de combustion.

Pour ces différents aspects abordés, les principales conclusions sont les suivantes :

- Les huiles végétales ont des propriétés « carburants » essentielles très proches de celles du fioul domestique (PCI, masse volumique, indice de cétane etc.). Elles diffèrent fondamentalement du fioul domestique par leur nature chimique (composition chimique) et leur viscosité (plus élevée) qui imposent des conditions d'utilisation spécifiques :
 - réchauffage de l'huile
 - conditions de températures de la chambre de combustion suffisantes
- L'utilisation de l'huile pure ou ses mélanges au FOD dans un type de moteur ou de brûleur donné, impose des conditions spécifiques (pression d'injection ou de pulvérisation, température du combustible) pour obtenir une granulométrie proche de celle du FOD. La pression de pulvérisation dans le cas des brûleurs doit être supérieure à 20 bars. Le réchauffage de chaque type d'huile végétale (ou son mélange au FOD) telle que la viscosité de celle-ci soit comparable à celle du FOD est indispensable. Dans le cas de l'huile végétale pure, cette température doit être supérieure à 120 °C. C'est seulement dans ces conditions que l'on peut effectuer une comparaison entre les carburants.

- L'étude expérimentale de l'évaporation de gouttes d'huiles végétales et de fioul montre qu'ils s'évaporent tous complètement pour des températures ambiantes supérieures à 773 K avec des constantes et des temps d'évaporation comparables. Toutefois pour des températures inférieures à 773 K, l'huile végétale commence par s'évaporer difficilement pour ne plus s'évaporer pour des températures inférieures à 684 K tandis que le FOD s'évapore encore complètement entre 578 et 773 K.
- Les constantes d'évaporation prédites par le modèle quasi-stationnaire corrigé (prise en compte des phénomènes de convection et de chauffage) sont en accord avec les valeurs expérimentales. Les valeurs expérimentales et théoriques montrent que les constantes d'évaporation des huiles végétales augmentent plus vite que celles du FOD aux températures supérieures à 773 K (tant que l'on reste en dessous des conditions critiques). Ces observations s'expliquent par leurs différences de propriétés thermodynamiques et leur nature chimique différente de celles du FOD.
- La détermination des propriétés thermodynamiques et des propriétés de transport de l'huile végétale sur la base des propriétés de ses acides gras majoritaires permet une bonne prédiction des caractéristiques d'évaporation théoriques.
- L'atomisation, la granulométrie, les caractéristiques d'évaporation de l'huile végétale et du FOD permettent une bonne prédiction des caractéristiques de combustion de l'huile végétale et du FOD dans les moteurs et sur les brûleurs. Les paramètres prépondérants dans les émissions de CO, pris comme critère de qualité de la combustion dans cette étude sont :
 - La viscosité et la nature chimique.
 - La température moyenne dans la chambre de combustion
 - La richesse globale et les richesses locales dans la chambre de combustion
- L'huile végétale ou ses mélanges au FOD doivent être portés dans des conditions de température (réchauffés) de sorte que leur viscosité soit comparable à celle du FOD. Une fois cette condition remplie, si les conditions de température dans la chambre de combustion sont suffisantes (>773 K), les niveaux de CO sont comparables entre tous les carburants. Il y a une certaine tendance à l'uniformité dans le comportement des différents carburants comme cela a été montré dans l'étude de l'évaporation. Il en est de même pour les émissions des NO_x . Ce résultat, est vérifié aussi bien sur les moteurs que sur les brûleurs. Les différences des niveaux d'émissions de dioxyde de soufre dépendent principalement de la teneur en soufre des carburants.

- Lorsque l'huile végétale ou ses mélanges au FOD sont utilisés dans des conditions standards de fonctionnement du FOD, leur granulométrie élevée provoque des richesses locales élevées et des faibles niveaux de température dans la chambre de combustion aux faibles charges (ou aux faibles pressions de pulvérisation) conduisant à des niveaux d'émissions élevées de CO. Il apparaît donc de fortes disparités entre les niveaux d'émissions de CO des différents carburants.
- Les puissances obtenues sur les moteurs et sur les brûleurs utilisant les huiles végétales et le FOD sont comparables. Les écarts de puissance et de rendement sont principalement dus aux différences de viscosité entre l'huile et le FOD et au type de pompe.

Cette étude ouvre de nombreuses perspectives :

- La plupart des méthodes de détermination des caractéristiques des produits pétroliers sont inadaptées pour les huiles végétales. De plus, certaines caractéristiques ne paraissent pas pertinentes pour apprécier la qualité « carburant » des huiles végétales. Cela nécessite l'élaboration de procédures normalisées et des critères de qualité des huiles végétales qui prennent en compte leurs spécificités par rapport aux carburants pétroliers.
- Si le modèle théorique de l'évaporation de l'huile de coton a donné des résultats en bon accord avec les résultats expérimentaux, ce modèle devra être étendu à d'autres huiles végétales (huile de jatropha, d'algues etc.) afin d'obtenir un modèle de prédiction plus global des caractéristiques d'évaporation des huiles végétales et leurs dérivés. Ce modèle devra prendre en compte une modélisation de la phase transitoire (dilatation et chauffage cumulés) qui constitue une part importante de la durée de vie de la goutte dans le cas des huiles végétales et leurs dérivés. Le dispositif pour l'étude expérimentale de l'évaporation des gouttes devra être amélioré en utilisant une chambre isotherme.
- La suite de ces travaux devra prendre également en compte une analyse des composés organiques (aldéhydes, HAP), en particulier les HAP sous forme particulaire suivi d'une modélisation de la cinétique de combustion de l'huile. Cela devra s'accompagner d'essais d'endurance.
- Aussi, dans l'étude de la combustion de l'huile dans les moteurs, les huiles ou leurs mélanges au fioul ont été utilisés dans les conditions standards du fioul. Chaque

carburant devra être placé dans les conditions favorables de combustion de chacun des autres carburants afin d'effectuer une comparaison « équitable » entre ceux-ci.

- Enfin, Il serait intéressant d'étudier les liens entre les caractéristiques physico-chimiques des huiles, leur tendance à polymériser à certaines températures et la durabilité des moteurs. Cela passe entre autre par une étude des mécanismes de décomposition des huiles suivant différences conditions de température et de pression.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADAMS C. PERTERS J. F., RAND M. C., SCHROER B. J. ET ZIEMKE M. C., Investigation of soybean oil as diesel fuel extender : endurance tests. JAOCS, 60, n°8, (1983).

AHMED A., Etude analytique et modélisation corrélative de la phase de combustion dans les moteurs à allumage par compression, thèse de doctorat, Université Paris VI, (1980).

ALTIN R., ÇETINKAYA S., YÜCESU H.S., The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. Energy Conversion Management, 42: 529 – 38, (2001).

AMBA D.P.R and RAMA M., Effect of supercharging on the performance of a DI Diesel engine with cotton seed oil, Energy Conversion and Management, Volume 44, Issue 6, pp. 937-944, (2003).

ARAYA K. and TSUNEMATSU S., Single drop combustion of sunflower oil SAE paper 870590, 4649-4648, (1988).

BAGBY M.O. In Proc. 9th Int. Conf. Jojoba Uses, 3rd Int. Conf. New Industr. Crops Prod.; Princen, L.H., Rossi, C., Eds.; Assoc. Advancem. Industr. Crops. publ. pp. 220-224, (1996).

BARANESCU R.A., LUSCO J.J, Performance, durability and low temperature evaluation of sunflower oil as a diesel fuel extender, ASAE, p 312- 328, (1982).

BARATA, Modelling of biofuel droplets dispersion and evaporation, Renewable Energy 33, 769-779, (2008).

BARI S., LIM T. H., YU C. W., Effect of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system, performance and emissions of a diesel engine, Renewable Energy 27, pp. 339 – 351, (2002).

BERGANS J., CORNET J., Biocarburants en Belgique, Ministère de la Région Wallonne, (1992).

BILLAUD F., DOMINGUEZ V., BROUTIN P., BUSSON C., Production of hydrocarbons by pyrolysis of methyl esters from rapeseed oil . JAOCS 72, 1149-1154, (1995).

BORGHI R., DESTRIAU M., La combustion et les flames, Edit Technip, (1995).

BROKAW R.S., Ignition kinetics of the carbon monoxide-oxygen reaction, 11th Symposium International on Combustion. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 1063, (1967).

CERT A., MOREDA W., PEREZ-CAMINO M.C., Chromatographic analysis of minor constituents in vegetable oils : a review, *Journal of Chromatography A*, 881, 131–148, (2000).

CHAPMAN S. and COWLING T.G., Mathematical Theory of non-uniform Gases, Cambridge Univ. Press London, (1959).

CHARLET A. Combustion et pollution des biocarburants dans les moteurs diesels à injection directe, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, (1994).

CHAUVAU C. "Vaporisation et combustion de gouttes isolées de n-heptane/ Etude en microgravité et influence de la convection forcée", Thèse de doctorat, Université d'Orléans, (1990).

CHESNEAU X., "Vaporisation et combustion de gouttes isolées de combustibles liquides : influence de la pression", Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, (1994).

CHIN J. S. and LEFEBVRE A. H., Steady-state evaporation characteristics of hydrocarbons fuel-drops, *AIAA journal*, vol.21, n°10, 1437-1443, (1983).

CHIN J. S. and LEFEBVRE A. H., The role of the heat-up period in the fuel drop evaporation, *International Journal of Turbo and Jet Engines*, vol. 2, 315-325, (1985).

CHIRAT N., Etude de la qualité de carburants derives des huiles végétales: Approche méthodologique. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, (1996).

CROOKES R. J., KIANNEJAD F, NAZHA M.A. A., Systematic assessment of combustion characteristics of biofuels and emulsions with water for use as diesel engine fuels. *Energy Conversion Management*, 38, pp. 1785 – 997, (1997).

CUNNINGAM L. J. HENLY T. J., KULINOWSKI A.M., The effects of Diesel ignition improvers on low-sulphur fuels on heavy-duty Diesel emissions, *SAE Paper No. 902173*, (1990).

DARNOKO D, CHERYAN M. Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. *JAACS*, 77:1263-7, (2000).

DEEPAK A., AVINASH K. A. Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine, *Applied Thermal Engineering*, 27, 2314–2323, (2007a).

DE SOETE G.G. Aspects chimiques de la combustion du charbon pulvérisé. Première partie, *Revue de l'Institut français du Pétrole*, Vol. 37, n°3, pp. 403-424, (1982).

DIRECTIVE 2003/30/CE du Parlement Européen et du Conseil de l'Europe, mai 2003.

DOCKERY D. W., SCHWARTZ J. and SPENGLER J. D., Air pollution and daily mortality : associations with particulates and acid aerosols. *Environmental research*, 59 (2), pp. 362-373, (1992).

DUPONT L. EL BAKALI A. PAUWELS J.F., DA COSTA I., MEUNIER P., RICHTER H., Investigation of stoichiometric methane/air/benzene (1.5%) and methane/air low pressure flames, *Combustion and Flame*, Vol. 135, pp. 171-183, (2003).

DWYER H. A. SANDERS B. R., Unsteady influences in droplet dynamics and combustion, *Combust. Sci. And Tech.* Vol 58, 253-265, (1988).

EIA, (Energy Information Agency), *Annual Energy Outlook 2007*, DOE/EIA-0383, (2007).

ELKOTB M. M., Fuel atomization for spray modelling, *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 8, (1982).

FAETH G.M., "Current status of droplet and liquid combustion", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 3, pp. 191-224, (1977).

FANGRUI M. MILFORD A.H., Biodiesel production: a review, *Bioresource Technology* , vol.70, pp.1-15, (1999).

FARAVELLI T., FRASSOLDATI A., RANZI E., Kinetic modeling of the interactions between NO and hydrocarbons in the oxidation of hydrocarbons at the low temperatures, *Combustion and Flame*, Vol. 132, pp. 188-207, (2003).

FENIMORE C.P., Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flame, 13th International Symposium on combustion, the combustion institute, pp. 373-380, (1970).

FORSON F. K., ODURO E. K. and HAMMOND-DONKOH E., Performance of jatropha oil blends in a diesel engine, *Renewable Energy*, pages 1135 – 1145, (2004).

FORT E. F., BLUMBERG P.N., Performance and durability of a turbocharged diesel fueled with cottonseed oil blends, ASAE, p 374- 383, august (1982).

FREEDMAN B., BAGBY M.O. CALLAHAN, T.J, and RYAN III, T.W., Cetane Numbers of Fatty Esters, Fatty Alcohols and Triglycerides Determined in a Constant Volume Bomb, International Congress and Exposition, Detroit (Michigan), SAE Paper No. 900343, (1990).

FRÖSSLING N., On the evaporation of falling droplet, Gerlands Beitr. Geophys. Vol. 52, 170-216, (1938).

GATEAU P., Etude de la formation des dépôts au nez des injecteurs lors de l'utilisation de dérivés d'huiles végétales sur moteur à injection directe. Reuil Malmaison : IFP, 30975, (1983).

GATEAU P., J. C GUIBET, R. STERN, Utilisation des esters méthyliques d'acides gras comme carburants pour moteurs diesel. l'A.F.E.C.G., Paris, 16-17, (1983).

GATEAU P., GUIBET J. C. HILLION G. ET STERN R., Utilisation des huiles végétales et de leurs produits de transestérification comme carburant diesel. IFP, 40, n°4, (1985).

GATTELLIER B., TRAPY J., HERRIER D., QUELIN J. M. and GALLIOT F., Hydrocarbon emissions of SI engines as influenced by fuel absorption-desorption in oils films. SAE 920095, (1992).

GEYER S.M.; JACOBUS M.J.; LESTZ S.S. Trans. ASAE 27, 375-381, (1984).

GIANFRANCO S., GIULIO S., ALDO C., Pollutant emissions reduction and performance optimization of an industrial radiant tube burner, Experimental Thermal and Fluid Science, 30, 605-612, (2006).

GODSAVE G.A.E. Studies of the combustion of drops in a fuel spray. The burning of single drops of fuel, in : Proceeding of the 4th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp. 818-830, (1953).

GOERING, C.E., SCHWAB, A.W., DAUGHERTY, M.J., PRYDE, E.H., HEAKIN, A.J., Fuel properties of eleven oils, Trans. ASAE 25, 1472-1483, (1982).

GOERING, C. E., CAMPPION R.N., SCHWAB, A.W., PRYDE, E.H., Vegetables oils fuels" In Proceedings of the international conference on plants and vegetables oils as fuels, Fargo, North Dakota. ASAE, St Joseph, MI 4, 279-286, (1982b).

GROSSLEY T.D., HEYES T.D., HUDSON B.J.F., The effect of heat on pure triglycerides. JAOCS 39, 9-14, (1962).

GUIBET J.C, Carburants et Moteurs, tome 1 et 2, publications de l'Institut Français du Pétrole, Ed. Technip, Paris, (1987).

GUIBET J.C., FAURE E., Carburants et Moteurs, tome 1 et 2, , ed. Technip, Paris (1997).

HANSON R. K. and SALIMIAN S., Survey of rate constants in the N/H/O system, in Gardiner W. C. (ed.), Combustion Chemistry, Springer-Verlag, (1984).

HARDENBERG and HASE F. W., An empirical formula for computing the pressure rise delay of a fuel from its cetane number and from the relevant parameters of direct injection diesel engines, SAE Paper 790493, SAE Trans. Vol.88, (1979).

HARWOOD H.J., "Oleochemicals as a fuel: mechanical and economic feasibility". JAOCS, 61, n°2, (1984).

HEMMERLEIN N., KORTE V., RICHTER H., and SCHROEDER G., Performance, exhaust emissions and durability of modern diesel engines running on rapeseed oil, Porsche R&D Center, pp1-15, (1991).

HEYWOOD J. B., Internals Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, (1988).

HIGELIN P., Huiles végétales – biocombustible diesel : incidence des aspects thermiques liés au type de moteur sur la combustion. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, (1992).

HIROYASU H., ARAI M., TABATA M., Empirical equations for the Sauter mean diameter of a diesel spray, SAE Paper 890464, (1989).

HIROYASU H., ARAI M. Structures of fuel sprays in diesel engines, SAE paper 900475, (1990).

HIRSCHFELDER J.O., BIRD R.B. and SPOTZ, E.L. , Chem. Revs., 44, 205-231 (1949).

HOLT G.A., HOOKER J. D., Gaseous emissions from burning diesel, crude and prime bleachable summer yellow cottonseed oil in a burner for drying seedcotton. *Bioresource Technology*, 92, 261–267, (2004).

HUBBARD G.L., V.E. DENNY, A.F. MILLS, Droplet vaporisation : effects of transient and variable properties, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 18, pp. 1003-1008, (1975).

JALINIER C., Etude comparative de l'inflammation et de la combustion de l'huile de coton et du gazole utilisés comme carburant dans un moteur diesel à injection indirecte. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, (1988).

JOBACK K. G., and R. C. REID, Estimation of Pure-Component Properties from Group-Contributions, *Chem. Eng. Commun.*, 57, p. 233 (1987).

JOHANSSON E, OLLE NORDSTROM, Swedish tests on rapeseed oil as an alternative to diesel fuel, *ASAE*, p 337- 346, august (1982).

KALAM M.A., HUSNAWAN M., MASJUKI H.H., Exhaust emission and combustion evaluation of coconut oil-powered indirect injection diesel engine, *Renewable Energy* 28, pp. 2405 – 2415, (2003).

KALAM M. A., and MASJUKI H.H., Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil, *Biomass and Bioenergy*, pp. 289 – 297 (2004).

KAPLAN M., HALL M. J., The Combustion of Liquid Fuels within a Porous Media Radiant Burner, *Experimental Thermal and Fluid Science* 11:13-20, (1995).

KAUFMAN, K. R. et ZIEJEWSKI M., MAROHL M., KUCERA H. L. et JONES A. E., Performance of diesel and sunflower oil mixtures in diesel farm tractors, *American Society of Agricultural Engineers*, *ASAE paper n°80*, (1981).

KLOPFENSTEIN W.E., estimation of cetane index for esters of fatty acids. *JAOCS*, 59, n°12, (1982).

KNOTHE G., MATHEAUS A.C and RYAN III, T.W., Cetane numbers of branched and straight chain fatty esters determined in an ignition quality tester', *Fuel*, 82, 971-975, (2003).

KRISNANGKURA K., A simple method for estimation of cetane index of vegetable oil methyl esters, *JAOCS*, 63, n°4, (1986).

KRAWCZYK, T., "Biodiesel – Alternative fuel makes inroads but hurdles remain", *INFORM* 7, 801 – 829, (1996).

KOMERS K, STLOUKAL R, MACHEK J, SKOPAL F., Biodiesel from rapeseed oil, methanol and KOH 3. Analysis of composition of actual reaction mixture". *Eur J Lipid Sci Technol*, 103:363-71, (2001).

KORUS R.A., MOUSETIS T.L. et LLOYD L., polymerization of vegetable oils. *ASAE*, (1982).

LAVOIE G. A., HEYWOOD J. B., KECK J.C. Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines. *Combust Sci Technol.*, 1:313, (1970).

LAW C.K., Recent advances in droplet vaporization and combustion, *Prog. Energy Combustion Sci.*, vol.8, pp.171-201, (1982).

LAW C.K., LAW H.K., Quasi-steady diffusion flame with variable specific heats and transport coefficients, *Combustion Sci. and Tech.*, vol.12, pp.207-216, (1976).

LAW C. K. and WILLIAMS F. A., Kinetics and convection in the combustion of alkanes droplets, *Combustion and Flame*, vol. 19, 393-405, (1972).

LEFEBVRE A. H., Atomization and Sprays, Hemisphere publishing, (1989).

LEVENDIS Y.A, ATAL A., CARLSON J., DUNAYEVSKIY Y., VOUIROS P., On the Survivability and Pyrosynthesis of PAH During Combustion of Pulverized Coal and Tire Crumb, *Combustion and Flame* 110:462-478 (1997).

LIENNARD A., GANDON M., Expérimentation de brûleurs à l'huile de colza, *CIRAD-SAR N° 40/96*, (1996).

LORUSSO J. A., KAISER E. W. and LAVOIE G.A., "quench layer contribution to exhaust hydrocarbons from a spark-ignited engine". *Combustion Science and Technology*, pp. 121-125, (1981).

- MARTIN**, Possibilités d'emploi des diverses huiles tropicales dans les moteurs diesel : recensement et caractérisation. Paris : GERDAT-IRHO, (1983).
- MARTIN J., PATIGNY J., COURS MECA 2160**, Combustible et techniques de la chaleur, (1989).
- MARTIN J., VANHEMELRYCK J.L.**, Les combustibles et carburants d'origine agricole, rapport final de recherche, Université catholique de Louvain, novembre (1992).
- MC CORMICK R.L., ALVAREZ J.R. and GRABOSKI M. S.**, NO_x solution for Biodiesel, February, National Renewable Energy. NREL/SR-510-31465, (2003).
- MCCREATH C. G. and CHIGIER N. A.**, Liquid-sapray burning in the wake of a stabilizerdisc, fourteenth international symposium on combustion, the Combsution institute, 1355-1363, (1973).
- MILLER J.A. and BOWMAN C. T.** "Mechanism and modelling of nitrogen chemistry in combustion", Progress in Energy and Combustion Science, (1989) vol.15, pp. 287-338
- MILLS, G.A; HOWARD, A.G. J.** Inst. Energy 56, 131-137. (1983).
- MINISTERE des MINES, des CARRIERES et de l'ENERGIE (MMCE)** du Burkina Faso, Statistiques, (2007).
- MONNOT G., FEUGIER A., LE BOUC F., MAUSS F., MEYER C., PERTHUIS E., DE SOETE G.**, La combustion des les fours et les chaudières, Ed. Technip (1978).
- MORIN C.**, Vaporisation et oxydation à haute température et haute pression de gouttes de combustibles liquides. Application aux n-alcanes et esters méthyliques d'huiles végétales, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, (1999).
- MUGELE R.A., EVANS H.D.**, Droplet size distribution in sprays ,Ind. Eng. Chem., vol.43, No. 6, p. 1317-1324, (1951).
- MURAYAMA T.**, Evaluating vegetable oils as a diesel fuel, Inform (1994) 1138–1145.
- MURUGESAN A., UMARANI C., SUBRAMANIAN R., NEDUNCHEZHIAN N.**, Biodiesel as an alternative fuel for diesel engines—A review, Renewable and Sustainable Energy Revdoi:10.1016/j.rser.2007.10.007, (2008).

NARAYANA J., RAMESH A., Parametric studies for improving the performance of a jatropha oil-fuelled compression ignition engine, *Renewable Energy*, (2006).

NEUFIELD P. D., JANZEN A. R., AZIZ R. A., *Journal Chem. Phys.*, 57, 1100, (1972).

NWAFOR, O.M.I. and RICE, G., Performance of rapeseed oil blends in a diesel engine', *Applied Energy*, 54, 345-354, (1996).

NWAFOR, O.M.I., RICE, and OGBONNA A.I., Effect of advanced injection timing on the performance of rapeseed oil in diesel engine, *Renewable Energy*, 21, 433-444, (2000).

OUEDRAOGO M., Etude biologique et physiologique du pourghère en vue d'une meilleure production de carburant de substitution, Thèse de doctorat, Université de Ouagadougou, (2000).

PASCAL P., Etude du fonctionnement d'un moteur diesel à injection directe, alimenté avec des huiles végétales. Thèse de doctorat, Université Paris VI, (1984).

PISCHINGER G. CLYMANS F. C. ET SIEKMANN R. Diesel oil substitution by vegetable oils – fuel requirements and vehicle experiments. IEA New energy conservation, (1981).

PISCHINGER, G.U. FALCON A.M., SIEKMANN R.W. et FERNANDES F.R., Methyl esters of plant oils as diesel fuels, either straight or in blends. ASAE, (1982).

PIOCH D., LOZANO P. RASOANANTOANDRO M.C., GRAILLE, J. GENESTE P.GUIDA A., "Biofuels from catalytic cracking of tropical vegetable oils". *Oleagineux*- 48, 289-291, (1993).

PRAKASH S., SIRIGNANO W. A., Theory of convective droplet vaporization with unsteady heat transfer in the circulation liquid phase, *Int. J. Heat and Mass transfer*, vol. 23, 253-268, (1980).

PRAMANIK K., Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine, *Renewable Energy*, 28, 239 – 248, (2003).

PRIEUR-VERNAT A., HIS S., Les Biocarburants dans le monde, IFP (2007).

PRINGENT M. AND DE SOETE G., Nitrous oxide N_2O in engines exhaust gases. A first appraisal of catalyst impact. , SAE 890492, (1989).

PRYDE E.H., Vegetable oil standards. In: Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetables Oils as Fuels, Fargo, USA, , (ASAE Publication, 4-82), p.101-105. Saint-Joseph: ASAE , (1982).

PRYDE E.H., Vegetable oils as fuels alternatives, Symposium overview. JAOCS 61, 1609-1610, (1984).

RAKOPOULOS C.D., ANTONOPOULOS K.A., RAKOPOULOS D.C., HOUNTALAS D.T., GIAKOUMIS E.G., Comparative performance and emissions study of direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or biodiesels of various origins, Energy conversion and Management, 47, 3272-3287, (2006).

RAMADHAS A.S., JAYARAJ S. MURALEEDHARAN, Use of vegetables oils as IC engines fuels-a review. Renewable Energy, 29:727-42, (2004).

RAMADHAS A.S. JAYARAJ S., MURALEEDHARAN C., Characterization and effect of using rubber seed oil as fuel in the compression ignition engines, Renewable Energy, 30, 795–803, (2005).

RANZ W.E. and MARSHALL W.R.J.R., Evaporation from drops, Chemical Engineering Progress, Vol. 48, pp. 141-180, (1952).

REITZ R.D., BRACCO F.B., On the dependance of spray angle and other spray parameters on nozzle design and operating conditions, SAE paper 790494, (1979).

REID R. C., PRAUNITZ J. M. and POLING B. E., The properties ands gases and liquids, fourth edition, McGraw-Hill Company (1987).

REITZ R.D. AND RUTLAND C.J., Developpement and testing of diesel engine CFD models”, Prog. Energy Combust. Sci. 0360-1285 (95) 00003-8 (1995).

RENKSIZBULUT M., YUEN M.C., Numerical study of droplet evaporation in a high temperature stream, Journal of Heat transfer, vol. 105, (1983).

ROBIN WOWARD-HILDIGE, Rape oil use as a fuel for modified diesel engines, RE/B/03/001 S.E.I., (2007).

RYAN T.W., DODGE L.G. et CALLAMAN T.J., The effect of vegetable oils properties on injection and combustion in two different diesel engines. *JAOCs*, 61, n°10, (1984).

SAAD R., Vegetables oils. A new alternative, *ASAE* 4-82, p.106-116, (1982).

SAKA S, KUSDIANA D., Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol, *Fuel*, 20:225-31, (2001).

SAZHIN S. S., ABDELGHAFFAR W.A., SAZHINA E.M., HEIKAL M.R., Models for droplet transient heating: Effects on droplet evaporation, ignition, and break-up, *International Journal of Thermal Sciences*, 44, 610–622, (2005).

SATO J; TSUE M., NIWA M. and KONO M., Effects of natural convection on high-pressure droplet combustion, *Combustion and Flame*, vol. 82, 142-150, (1990).

SAVERY C.W., JUEDES D.L. and BORMAN G.L., n-heptane, carbon dioxide and chlorotrifluoromethane droplet vaporization measurements at supercritical pressures, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, Vol., 10, n°4, pp.543-553, (1971).

SCHERRER D. Effets de la convection sur l'évaporation et la combustion d'une goutte de combustible, *ONERA TP-1987-173*, (1987).

SCHMIDT K., VAN GERPEN J., The effect of biodiesel fuel composition on diesel combustion and emissions", *SAE paper 961086*, (1996).

SCHOLL K. W., SORENSON S. C. Combustion of Soybean oil methyl ester in a direct injection Diesel engine, *SAE 930934*, (1993).

SCHWAB A.W., BAGBY M.O. and FREEDMAN B., Preparation and properties of diesel fuels from vegetable oils, *Fuel*, vol. 66, 1372-1378 (1987).

SCHWAB A.W., DYKSTRA G.J., SELKE E. SORENSON S.C., PRYDE E.H., diesel fuels from thermal decomposition of soybean oil, *JAOCs* 65, 1781-1786, (1988).

SENDZIKIENE E., MAKAREVICIENE V., JANULIS P., Influence of fuel oxygen content on diesel engine exhaust emissions, *Renewable Energy*, 31, 2505–2512. , (2006).

SILVIO C.A. DE ALMEIDA, CARLOS R.B., MARCOS V.G., NASCIMENTO, LEONARDO D., VIEIRA S.R., GUILHERME F., Performance of Generator fuelled with palm oil, *Fuel* 81, 2097 – 2102 (2002).

SONNTAG N.O.V., Reactions of fats and fatty acids, *Bailey's industrial oil and fat products*, vol. 1 4th edition, ed. Swern, D., John Wiley & Son, New York, p.99, (1979).

SPALDING D.B., The combustion of liquid fuels, in : proceeding of the 4th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp. 847-864, (1953).

SPARROW E. M., GREGG J. L. trans. *ASME*, (80) :879-86, (1958).

SRIVASTAVA A., and PRASAD R., Triglyceride-Based diesel fuels, *Renewable and Sustainable Reviews*,4, 111-133 (2000).

TAHIR A.R., LAPP H.M., BUCHANAN L.C., Sunflower oil as a fuel for compression ignition engines, *ASAE* p. 82 – 91, (1982).

VAITILINGOM G., Les huiles végétales carburant des moteurs diesel. Le point des travaux de recherche : orientation des recherches : propositions. Université d'Orléans, pp.87, (1986).

VAITILINGOM G., Huiles végétales – biocombustibles diesel : influence de la nature des huiles et en particulier de leur composition en acides gras sur la qualité-carburant, thèse de doctorat, Université d'Orléans, (1992).

VAITILINGOM G., PERILHON C., LIENNARD A., GANDON M., Development of rape seed oil burners for drying and heating, *Industrial Crops and Products*, 7, 273-279, (1998).

VAITILINGOM G., LIENNARD A., COURTY P., Crude copra oil, a biofuel for diesel generators. More self-reliance and higher incomes, *First world conference on Biomass for energy and industry*, Vol. 2, pp. 5-9 (2000).

VAITILINGOM G., Utilisations énergétiques de l'huile de coton, *Cahiers Agricultures* vol. 15, n°1, pp. (2006) a.

VAITILINGOM G., BATTAIS L., DEFAYE S., Perspectives de développement de l'utilisation des huiles végétales pures hors utilisations biocarburant, *Rapport final (DEBAT-CIRAD, (2006))* b.

VALBIOM, Impact Environnemental de l'huile de colza carburant, (2006).

VAN DER WALT A.N., HUGO J.C., (1982). Attempts to prevent injector coking with sunflower oil by engine modifications and fuel additives. In : Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetables Oils as Fuels, Fargo, USA, (ASAE Publication, 4-82), p.230-238 Saint-Joseph: ASAE, (1982).

VAN GERPEN, J. Cetane Number Testing of Biodiesel', Proceedings from the 3rd Liquid Fuels and Industrial Products from Renewable Resources Conference, Nashville, Tennessee (1996).

VANDER G.L., FELDMAN M. PETERSON C.L., Properties of rape oil and its methyl-ester relevant to combustion modelling, ASAE 886507, (1988).

VANHEMELRYCK J.L., Influences des propriétés du carburant dans les moteurs diesel à injection directe : application aux huiles végétales et leurs dérivés, thèse de doctorat, UCL/FSA/Unité de Thermodynamique et de turbomachines, (1997).

WAGNER G.L., PETERSON C.L., Performance of winter rape (brassica napus) based fuel mixtures in diesel engines in vegetable oil fuels, ASAE (1982).

WANG Y.D. AL-SHEMMERI T., EAMES P., MCMULLAN J., HEWITT N., HUANG Y. and REZVANI S., An experimental investigation of the performance and gaseous exhaust emissions of a diesel engine using blends of a vegetable oil Applied Thermal Engineering, 26 1684-1691, (2006) .

WATSON K. M., Prediction of critical temperatures and heats of vaporization. Ind Eng Chem., 23 (4) : 360-4, (1931).

WATSON N., WIJEYAKUMAR S. and ROBERTS G. L., A microprocessor controlled test facility for transient vehicle engine system development, 3rd Int. Conf. on Automotive Electronics, MEP, London, (1981).

WELTY J.R., WICKS C.E., WILSON R.E., Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer, Third ed., John Wiley and sons, USA (1984).

WESTBROOK C.K., and DRYER F.L., Chemical kinetic modeling of hydrocarbons combustion, Progress Energy Combustion Science, Vol. 10, pp. 1-58, (1984).

WILLIAMS .A., Combustion of droplets of liquid fuels: A review, Combust. Flame, vol.21, pp.1-31, (1973).

WILLIAMS F.A., On the assumptions underling droplet vaporization and combustion theories, The journal of Chemical Physics, vol.33, n°1 (1960).

WOLF, J.P. Manuel d'analyse des corps gras. Editions Azoulay, Paris. (1968).

YAKUP I. and DURAN A., Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI Diesel engine performance and emissions, Energy Conversion and Management, 44, 389 – 397, (2003).

YILMAZ N., DONALDSON A.B., Evidence of PAH production under lean combustion conditions, Fuel, doi:10.1016/j.fuel.2007.02.015, (2007).

YUGE T. Experiments on heat transfer from spheres including combined natural and forced convection, Energy and Fuels, vol.82 C, 214-220, (1960).

ZALIHA O., CHONG C.L., CHEOW C.S., NORIZZAH A.R., KELLENS M.J., Crystallization properties of palm oil by dry fractionation, Food Chemistry vol. 86, 245-250 (2003).

ZELDOVICH YA. B. The oxidation of nitrogen in combustion and explosions Acta physiochim. URSS, vol. 21 pp. 577-628, (1946).

ZIEJEWSKI M. ET KAUFMAN K. R. Laboratory endurance test of a sunflower oil blend in a diesel engine. JAOCS, 60, n°8, (1983).

ZIEJEWSKI M., KAUFMAN K.R., SCHWAB, A.W., PRYDE, E.H., "Diesel engine evaluation of a non-ionic sunflower oil-aqueous ethanol microemulsion". JAOCS 61, 1620-1626. (1984).

ZIEJEWSKI M. GOETTLER H. PRATT G., International Congress and Exposition, Detroit. Paper n° 860301, MI, 24-28 February, (1986).

http://bourse.lesechos.fr/bourse/matieres/details_matieres.jsp?Secteur=ENERGIE&Code=XWTI&Plaque=RMSE-TR&Codif=TSB

EIA, http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/pet_pri_wco_k_w.htm

ANNEXES

ANNEXE A

1. Le moteur Diesel

1.1 Circuit d'alimentation du Moteur Diesel

Il est spécifique du moteur Diesel. En effet, le réglage de la puissance implique une modification du débit de carburant introduit par cycle, ce qui permet d'obtenir, en toutes circonstances, une zone où les conditions de température-pression-richesse seront propices à l'auto-inflammation.

Le système d'introduction de carburant est décrit schématiquement sur la figure A1 ci-dessous:

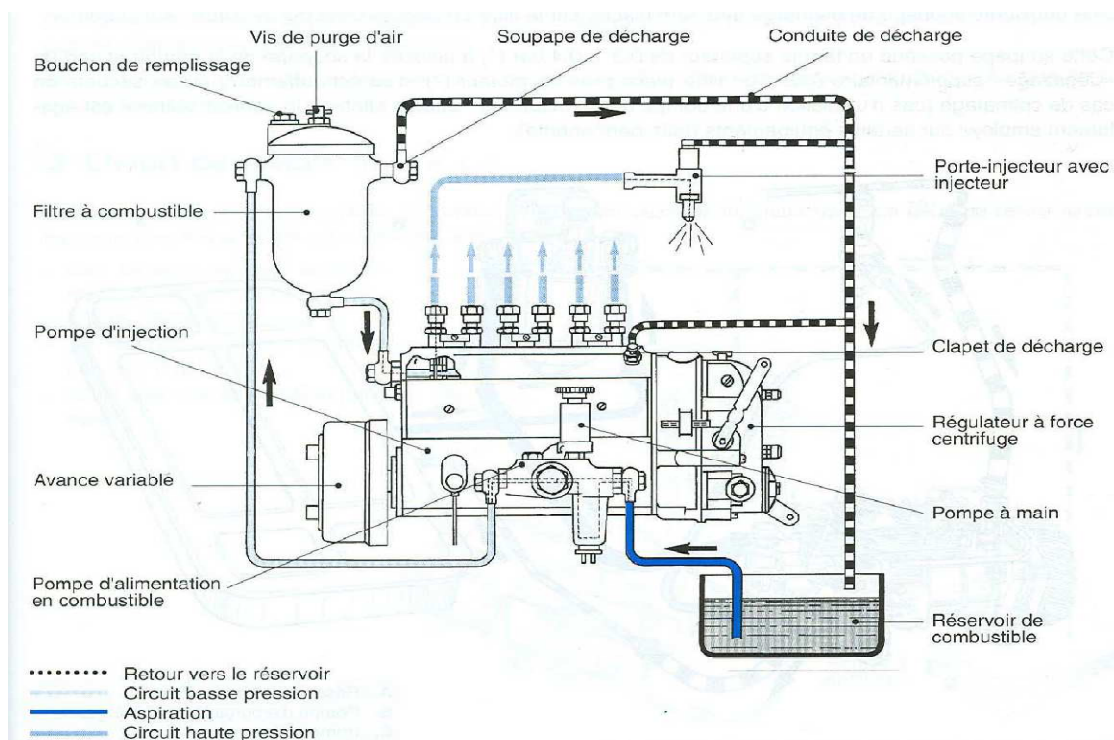


Fig. A1 : Circuit d'alimentation avec pompe en ligne

Dans le cas de la pompe rotative, contrairement à la pompe d'injection en ligne qui comporte autant de piston que de cylindre, un seul élément de pompage refoule le combustible dans une tête hydraulique qui est munie d'autant de sorties que de cylindres à alimenter.

Le circuit d'alimentation comporte à partir du réservoir :

- un filtre à carburant (4 à 10 μm) qui protège l'équipement d'injection Diesel des impuretés et de l'eau,

- la pompe d'alimentation: l'alimentation en carburant est assurée par une pompe à piston à une pression relative d'environ 1 à 1,5 bars,
- la pompe d'injection servant à la mise en pression et au dosage du carburant. L'injection est réalisée dans chaque cylindre une fois tous les deux tours la pompe tourne donc à demi-vitesse du moteur,
- les tuyauteries de liaison entre pompe et injecteurs,
- les injecteurs débouchant dans un orifice de la culasse et assurant la nébulisation et la répartition du gazole dans l'air de la chambre de combustion de chaque cylindre. Ils comportent deux pièces: le porte- injecteur qui canalise l'arrivée de gazole et assure le retour à la pompe du produit non injecté, et le corps d'injecteur constitué d'un cylindre creux à l'intérieur duquel coulisse une aiguille reposant, à sa partie inférieure, sur un siège étanche.

On distingue principalement les injecteurs à téton et les injecteurs à trous (figure A2) :

- L'injecteur à téton qui présente un orifice central; l'extrémité de l'aiguille comporte un téton qui détermine, avec cet orifice, une section de passage annulaire dont la surface varie avec la levée. Le jet de carburant forme un cône creux avec un angle au sommet assez fermé. Cette technologie est bien adaptée aux moteurs à préchambre dans lesquels on souhaite éviter une trop grande dispersion du carburant
- L'injecteur à trous qui réalise au contraire une large répartition spatiale du carburant. Il comporte plusieurs orifices (3 à 6) orientés selon les génératrices d'un cône assez ouvert et présentant un diamètre de l'ordre de 0,2 à 0,5 mm. Les injecteurs à trous équipent tous les moteurs à injection directe.

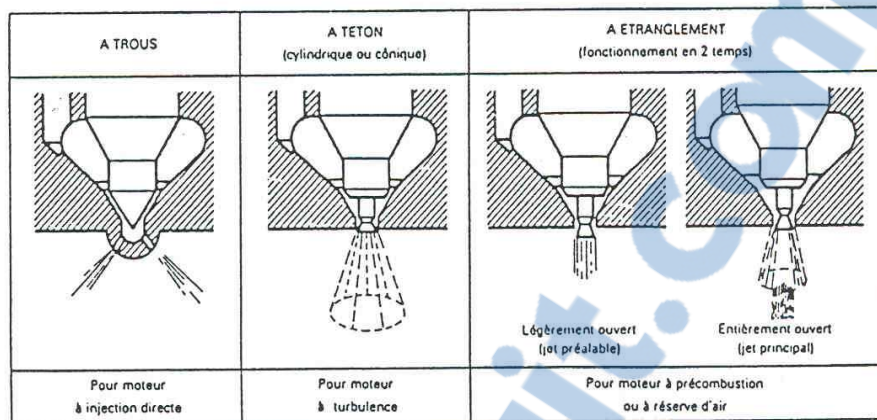


Fig. A2 : différents types d'injecteurs

Il existe de nouveaux types d'alimentation qui ont la particularité d'avoir des pressions d'injection très élevées (pouvant atteindre 2000 bars) : circuit d'alimentation « common rail », circuit d'alimentation avec injecteur-pompe. La figure A3 donne le schéma du circuit d'alimentation de type « common rail ». Une pompe haute pression (possédant trois pistons radiaux décalés de 120 degrés) alimente une rampe commune, maintenu sous pression avec une régulation de cette pression. Cette rampe alimente les injecteurs.

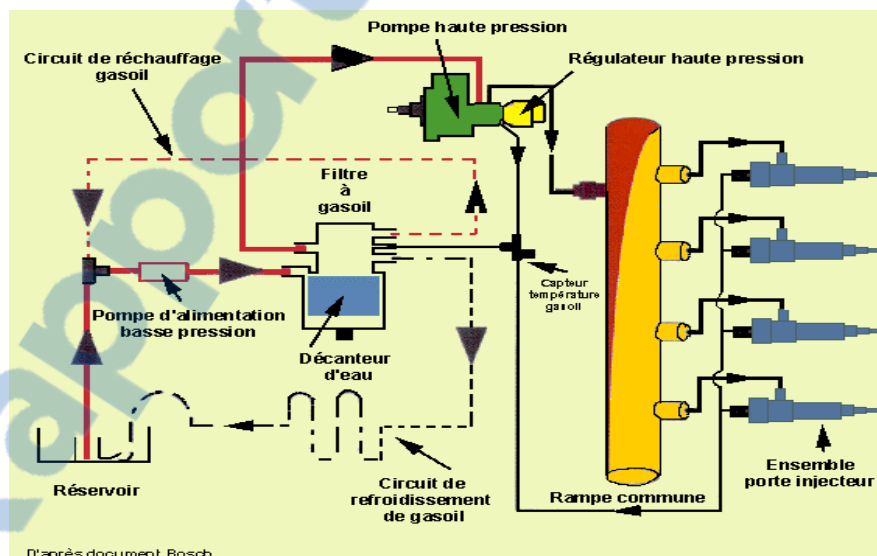


Fig. A3 : Circuit d'alimentation «common rail »

1.2 Typologie des moteurs Diesel : les différents types de chambre de combustion

On distingue deux types de moteurs Diesel, les moteurs Diesel à injection indirecte et les moteurs Diesel à injection directe (figure A4).

a) Moteur à injection directe:

Comme son nom l'indique, l'injection directe consiste à injecter le carburant directement dans le haut des cylindres. La chambre de combustion est constituée d'une cavité située dans la tête de piston. Le carburant est nébulisé par un injecteur à trous vers les parois très chaudes du piston pour accélérer sa vaporisation. Il faut éviter que le carburant ne touche les parois. La création d'une zone de turbulence dans le piston, associée à un mouvement tourbillonnaire de l'air d'admission, favorise l'homogénéisation de l'air et du carburant et permet ainsi une combustion complète sans fumées, jusqu'à une richesse de l'ordre de 0,75-0,80.

L'injection directe, surtout utilisée dans les moteurs Diesel des camions, cars, engins de chantier, moteurs fixes et tracteurs, permet d'obtenir le meilleur rendement mais les moteurs présentent un rapport poids/puissance élevé. La pression d'injection est élevée (180 à 400 bars) et le taux de compression est de l'ordre de 14/1 à 17/1. La vitesse de rotation n'excède pas 3000 tr/mn (l'apparition des nouveaux systèmes d'injection permet aujourd'hui de nettes augmentations de régime jusqu'à 6000 tr/mn et des pressions d'injections très élevées (~2000 bars)).

Ces moteurs sont souvent moins tolérants vis-à-vis des huiles végétales pures du fait des faibles niveaux de températures dans la chambre de combustion aux faibles charges. En effet, dans un moteur diesel à injection directe, les conditions de température relativement basses dans la chambre de combustion à faible charge (la température moyenne de la chambre est inférieure à 200°C lorsque le moteur est au ralenti à vide et ne dépasse pas 400°C jusqu'à la moitié de sa puissance nominale) sont telles que la combustion de l'huile végétale conduit à la formation de dépôts (VAITILINGOM, (2006))

b) Moteurs à injection indirecte:

On distingue deux types de technologie : les moteurs à chambre de "précombustion" ; celle-ci occupe environ 30% de la totalité de l'espace mort (espace compris entre la culasse et le sommet du piston lorsque celui-ci se trouve au PMH) et communique avec la chambre principale par une série de petits orifices. , les moteurs à préchambre de "turbulence" d'un volume supérieur à 50 % de l'espace mort, reliée à la chambre principale par un canal débouchant tangentiellement L'injection et le début de combustion ont lieu dans la

préchambre. Lorsque l'injection se poursuit, le gazole est éjecté vers la chambre principale, brassé au contact de l'air et brûlé de façon progressive. Cette technique favorise, par des moyens aérodynamiques, la nébulisation du gazole et se montre moins exigeante que l'injection directe en matière de qualité d'injection. On utilise le plus souvent des injecteurs à téton plus simples que les injecteurs à trous et mieux adaptés dans ce cas en raison notamment de la géométrie du jet (le jet de carburant forme alors un cône creux avec un angle au sommet assez fermé). La concentration de carburant dans un volume plus faible que celui de la chambre de combustion favorise l'inflammation à faible charge et haut régime, à condition toutefois d'adopter un taux de compression élevé (entre 18/1 et 23/1). Cette technique conduit à des performances plus modestes que l'injection directe, surtout en raison des pertes thermiques inhérentes à l'existence de la préchambre (accroissement du rapport surface/volume; turbulence plus élevée). Elle permet de fabriquer des moteurs plus légers, de faible cylindrée, moins bruyants et à vitesse de rotation de l'ordre de 4 000 à 5 000 tr/min qui équipent les voitures et les utilitaires "légers".

Ces moteurs sont particulièrement intéressants pour les huiles végétales qui, elles, ont souvent une qualité d'injection médiocre. En effet, cette technologie en plus d'être moins exigeante en termes de qualité d'injection utilise des injecteurs à téton qui ont l'avantage de pouvoir « expulsés » mécaniquement les éventuels dépôts à l'orifice grâce au téton. Aussi, les niveaux de température plus importants dans la chambre de combustion (600°C dès 10% de la puissance nominale) dans le cas de la chambre de turbulence, permettent une évaporation et une combustion sans dépôt « anormal ».

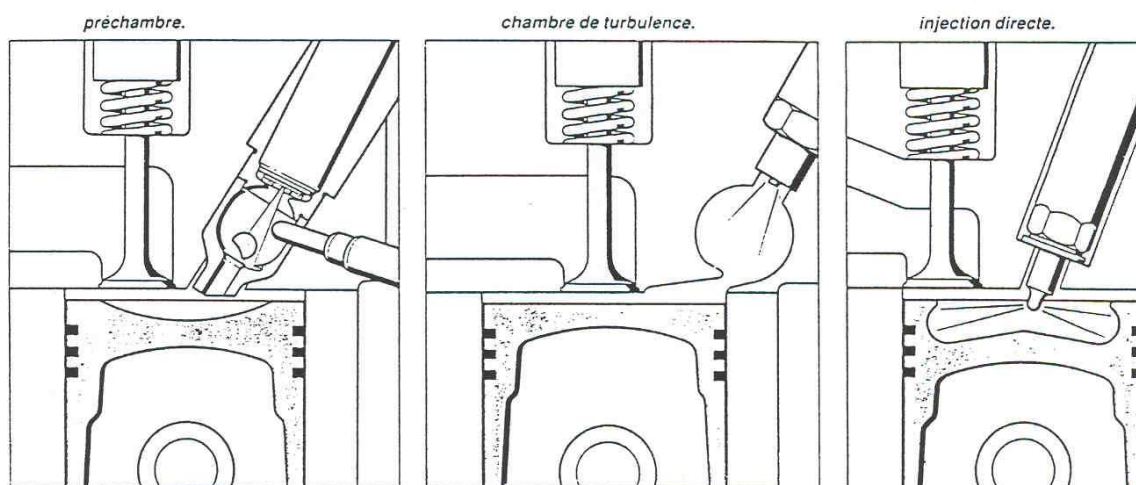


Fig. A4 : Technologie des moteurs Diesel à injection directe et indirecte

1.3 Fonctionnement du moteur Diesel :

a) *Le cycle Diesel à quatre temps*

Comme son nom l'indique, il comporte quatre phases : l'admission, la compression, la combustion et l'échappement (figure A5). Le moteur Diesel fonctionne généralement suivant ce cycle à quatre temps.

- ***La phase d'admission*** : Le piston, initialement au point mort haut (PMH) crée, en descend jusqu'au point mort bas (PMB), une dépression qui provoque l'aspiration d'air frais dans le cylindre. Pour augmenter la masse d'air admise, la soupape d'admission est ouverte légèrement avant le début de la descente du piston et fermée après que le piston soit au point mort bas.
- ***La phase de compression*** : Les deux soupapes étant fermées, le piston évolue du PMB au PMH et comprime l'air pur jusqu'à une pression de l'ordre de 20 à 30 bars. Le carburant est injecté dans le cylindre un peu avant la fin de la compression; on parle alors d'avance à l'injection par rapport au PMH.
- ***La phase de combustion*** : La combustion naît par auto-inflammation dans une ou plusieurs zones de la chambre où se trouvent réunies les conditions de température, pression et concentration nécessaires pour déclencher ce processus. L'injection de carburant se poursuit ensuite dans un milieu où existe déjà une flamme. Sous l'effet de l'énergie thermique dégagée et de la production de gaz, le piston est repoussé vers le PMB tandis que les soupapes restent fermées. Le travail produit vaut plus de cinq fois le travail fournis par le piston lors de la compression de l'air. A l'approche du point mort bas, la soupape d'échappement s'ouvre et crée une baisse de pression dans le cylindre à des valeurs voisines de la pression d'échappement.
- ***La phase d'échappement*** : La soupape d'échappement s'ouvre quand le piston atteint le PMB ; les produits de combustion ("gaz brûlés") sont évacués à l'extérieur sous l'effet du retour du piston au PMH. A ce moment, la soupape d'échappement se referme. En fait, il existe au voisinage du PMH un intervalle de temps (dit "de croisement") pendant lequel les soupapes d'admission et d'échappement sont ouvertes simultanément. La soupape d'admission s'ouvre et le cycle recommence.

1 admission. 2 compression. 3 combustion. 4 échappement.

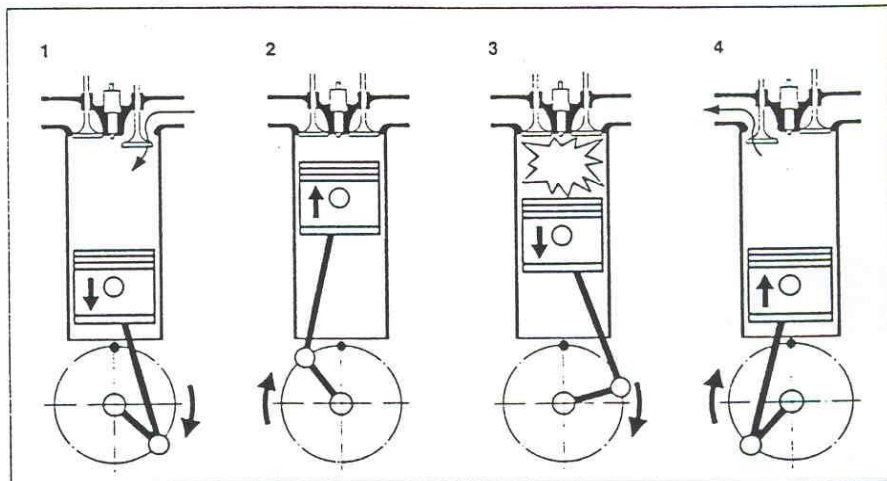


Fig. A5 : Cycle Diesel à quatre temps

b) La combustion dans le moteur Diesel

La combustion dans les moteurs Diesel est un phénomène très transitoire et d'une extrême complexité. Suivant une approche globale, on peut subdiviser la combustion dans les moteurs Diesel en trois phases macroscopiques : une phase de délai, une phase de combustion rapide et une phase de combustion lente.

- La phase de délai :

Elle est constituée du temps qui sépare le début d'injection du carburant de son auto inflammation. Le carburant, injecté sous haute pression, pénètre à grande vitesse dans l'air de la chambre de combustion sous forme de jets qui se disloque, formant un brouillard. Il se forme autour de chaque gouttelette, une zone en phase gazeuse dont le champ de richesse évolue suivant les lois de la diffusion. Celle-ci est favorisée par la turbulence régnant dans la chambre.

Le mélange gazeux formé étant porté à une température supérieure à la température critique T_c d'auto inflammation, il s'y développe des radicaux propagateurs de la combustion dont la prolifération conduit à la concentration critique nécessaire à l'entretien des réactions en chaînes de combustion vive. L'équation E.1.10 donne l'expression de T_c .

$$T_c = \frac{E_a}{R \ln \left(\frac{2Z_R f_R}{Z_T f_T} \right)}$$

Dans cette expression, E_a est assimilable à l'énergie d'activation des réactions de ramification, tandis que $Z_R f_R$ et $Z_T f_T$ sont les facteurs de fréquence des réactions de ramification et de terminaison.

On peut considérer que le délai total d'inflammation comporte deux composantes :

- **Le délai physique (τ_p) :**

Il comprend le temps de pénétration, d'atomisation du jet et de vaporisation des gouttes (deux phases, temps de chauffage et de vaporisation des gouttes). Il est conditionné par les phénomènes de transfert de chaleur et de masse qui constituent l'effet prédominant. La dimension des gouttes et la fonction de distribution de cette dimension conditionne la valeur du délai physique.

- **Le délai chimique (τ_c):**

Il est constitué du temps nécessaire à la saturation en radicaux de la phase gazeuse lors de la vaporisation. La combustion s'amorce ainsi en phase gazeuse, à la périphérie de la zone de mélange, c'est-à-dire en mélange pauvre en carburant. C'est en effet dans cette zone que la température est la plus élevée, le champ thermique étant à gradient radial positif, du fait de la transmission de la chaleur de l'air vers les gouttes.

Le délai d'inflammation totale est considéré par plusieurs modèles comme étant la somme des deux délais avec un délai physique constant ($0,3 \text{ ms} < \tau_p < 0,5 \text{ ms}$) et un délai chimique de la forme d'une loi d'Arrhenius (E.1.11):

$$\tau_c = AP^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

Avec

P et T pression et température dans la chambre de combustion

A et n des constantes

Rigoureusement, le délai d'inflammation n'est pas la somme des délais, ils se superposent en partie. Le délai chimique prend cours dès l'apparition de la phase vapeur, alors même que la phase liquide peut encore être présente.

- **La phase de combustion rapide :**

Cette phase correspond soit, à la propagation implosive d'une flamme de prémélange dans le cas des carburants assez volatiles soit, à la propagation explosive des complexes radicalaires formés par craquage thermique des gouttes pour les carburants moins volatiles (partie AB sur la figure A6). L'élévation de température, consécutive à l'inflammation des premiers centres actifs favorise l'apparition d'espèces radicalaires dans le mélange air-carburant formé pendant la phase de délai. La combustion s'étend rapidement à tout ce mélange, à la fois par propagation de la flamme à partir des premiers foyers d'inflammation et par prolifération de nouveaux foyers. On assiste à une brusque montée de la pression accompagné d'un « bruit » caractéristique du moteur Diesel. Pour une phase de combustion rapide longue (long délai chimique), des produits d'oxydation primaire de type aldéhydique, se forment en abondance et peuvent échapper à la combustion complète s'ils sont en zone de faible richesse où la flamme s'éteint (coincement) ou s'ils aboutissent en zone froide dans la chambre.

- **La phase de combustion lente :**

Cette phase correspond à la combustion diffusionnelle soit de la phase gazeuse, riche en carburant, dans laquelle pénètre progressivement l'air périphérique, soit des complexes radicalaires issus des gouttes introduites après la phase de combustion rapide et des résidus carbonés lourds (éventuellement solides) formés au cœur des gouttelettes initiales (parties BC et CD sur la figure A6).

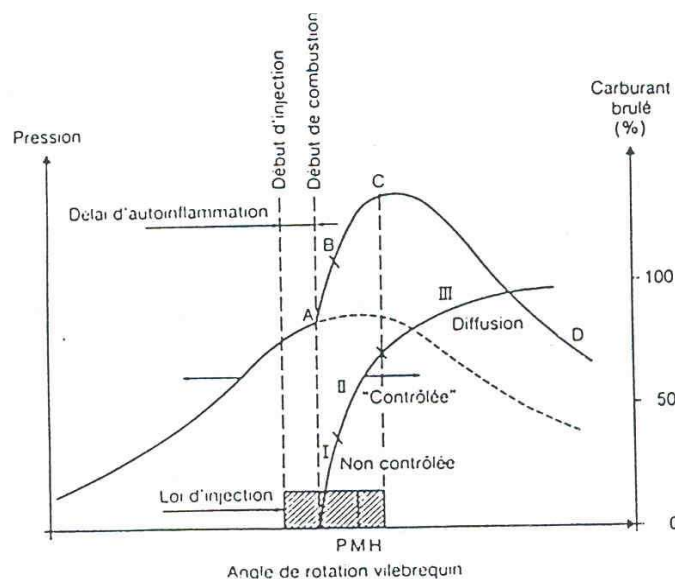


Fig. A6 : Inflammation et combustion dans le moteur Diesel

1.4 Principaux paramètres du moteur

a) Taux de compression ou rapport volumétrique :

C'est le rapport du volume total du cylindre au volume de la chambre de la combustion

$$\tau_c = \frac{V_t}{V_c}$$

b) Cylindrée unitaire :

C'est le volume balayé par le piston entre le PMH (point mort haut) et le PMB (point mort bas). Si C représente la course et d le diamètre (ou alésage) du cylindre, alors: $V = C \times \pi \times d^2/4$. La cylindrée d'un moteur est donc égale à: $VM = V \times z$ (nombre de cylindres)

c) Volume instantané du cylindre

$$V = V_c \left[1 + \frac{1}{2}(\tau_c - 1) \left[\alpha + 1 - \cos\theta - (\alpha^2 - \sin^2\theta)^{1/2} \right] \right]$$

$$\alpha = \frac{l}{r}$$

l : longueur de la bielle

r : longueur du bras de manivelle

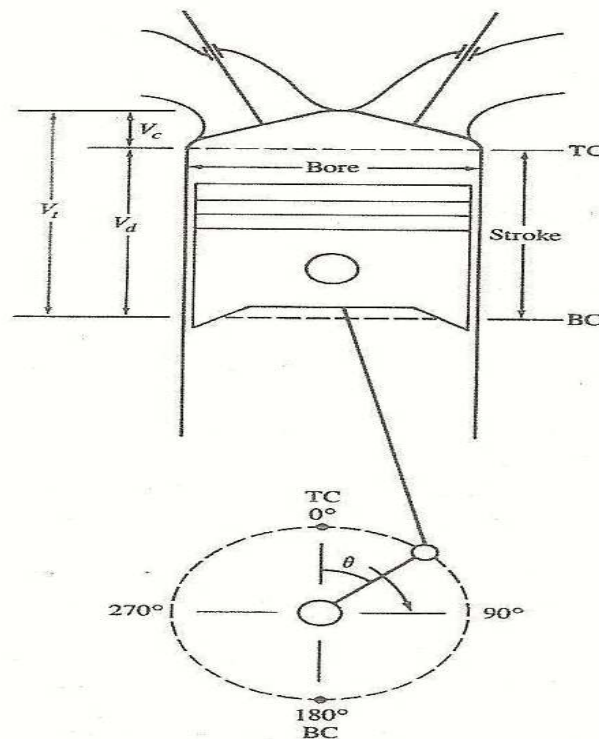


Fig. A7 : Géométrie du moteur Diesel

τ_c : Taux de compression

V_t : Volume total du cylindre

V_d : Cylindrée

V_c : Volume de la chambre de combustion

TC : Point mort haut (Top-Center)

BC : Point mort bas (Bottom-Center)

d) Couple effective et puissance effective

Le couple effectif est généralement mesuré par un dynamomètre. L'arbre du moteur est connecté au rotor du dynamomètre qui équilibre au cours de sa rotation par le stator du dynamomètre. Le couple exercé par le rotor sur le stator est mesuré par divers moyens. La figure A8 donne le schéma de principe de la mesure du couple.

Suivant la notation de cette figure on a :

Le couple effectif, noté C vaut :

$$C = F \cdot d$$

La puissance effective, notée P vaut :

$$P_e = 2\pi \cdot N \cdot C$$

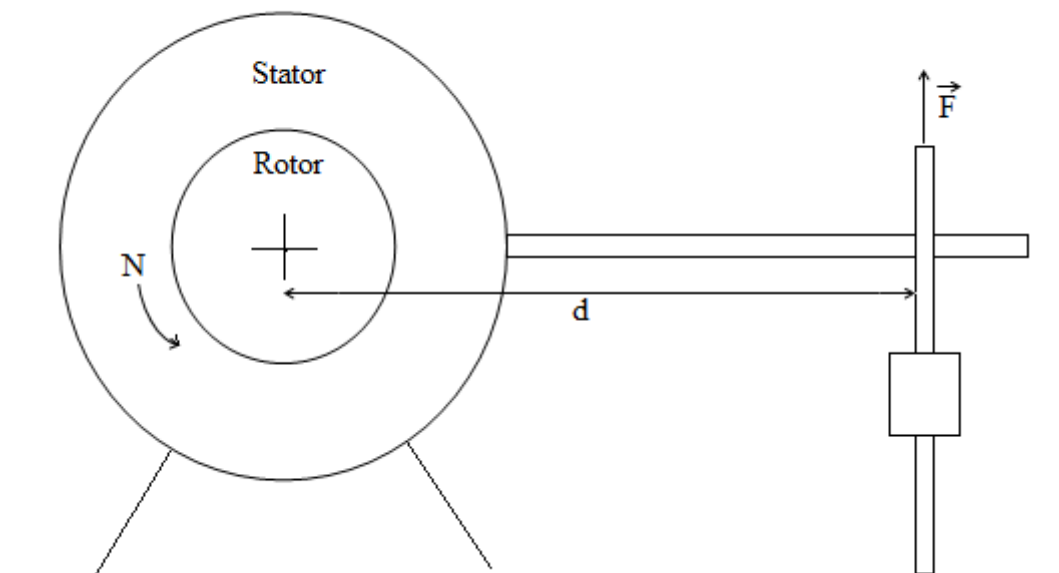


Fig.A8 : Schéma de principe du dispositif de mesure du couple

e) Charge :

Pour un régime donné, on dit qu'un moteur est à pleine charge (100%) quand il délivre 100% du couple disponible, soit la puissance maximale possible au régime considéré. Il est à mi-charge (50%) quand il délivre la moitié de sa puissance au régime considéré.

f) Consommation spécifique effective (C_{se})

C'est le débit massique de carburant consommé par unité de puissance produite. C'est une mesure de l'aptitude du moteur à utiliser efficacement le carburant consommé dans la production de la puissance.

$$C_{se} = \frac{\dot{m}}{P_e}$$

Avec

\dot{m} le débit massique de carburant consommée

g) Le rendement effectif ou global (η_e)

Si la consommation spécifique est un critère de comparaison de l'efficacité d'un moteur, il n'est valable que pour un carburant donné ou pour des carburants qui ont des PCI identiques. On utilise donc en général un critère d'efficacité plus général : le rendement effectif ou global qui tient compte du PCI du carburant. Il est égal au rapport de l'énergie recueillie sur l'arbre sur l'énergie susceptible d'être dégagée par combustion complète du carburant.

$$\eta_e = \frac{1}{C_{se} \cdot PCI}$$

h) Rapport stœchiométrique - Richesse

Le rapport stœchiométrique r est le quotient des masses d'air et de carburant mises en jeu dans une combustion stœchiométrique :

$$r = \left(\frac{\text{masse d'air}}{\text{masse de carburant}} \right)_{\text{stœchiométrique}}$$

La richesse permet d'exprimer l'excès d'air admis dans la chambre. Elle est définie par la relation :

$$\phi = \left(\frac{\text{masse de carburant}}{\text{masse d'air}} \right)_{\text{réel}} \cdot r$$

2. Combustion dans le brûleur (brûleur à fioul)

La description du principe de fonctionnement du brûleur a déjà été effectuée dans le chapitre II de la partie de II de cette étude.

On distingue deux principales grandes familles de brûleurs : les brûleurs de petite puissance (< 50 kW) et les brûleurs de moyenne puissance (< 1000 kW).

Les brûleurs de petite puissance sont moins tolérants vis-à-vis des huiles végétales comparés aux brûleurs de moyenne puissance compte tenu des exigences techniques de chaque type de brûleur .

Les brûleurs de petite puissance sont destinés généralement à des usages domestiques (chauffage) conduisant à des conditions de températures défavorables à une bonne combustion des huiles végétales contrairement aux brûleurs de moyenne puissance.

Le combustible est injecté sous forme de fines gouttes (de diamètre environ $100\text{ }\mu\text{m}$) dans un jet d'air mis en rotation autour de l'axe du brûleur. Le jet d'air en rotation produit une dépression qui crée une zone de recirculation sur l'axe du brûleur, proche de l'injecteur (gicleur). Après l'allumage (par une étincelle produite par deux électrodes) de cette zone de recirculation, alimentée à la fois par de l'air et une partie des gouttes produites par le gicleur (les plus petites) on obtient un noyau stabilisé de gaz chauds en combustion. C'est à partir de ce noyau que se développe une flamme de diffusion, avec son « cœur » riche en gouttelettes et vapeurs du combustible et sa périphérie plus riche en air.

L'aspect de la flamme dépend du débit et de sa nature chimique. Elle rayonne généralement du fait de la présence de suie. Cela peut constituer un atout. La longueur de la flamme varie en fonction de la vitesse de l'écoulement (la turbulence) et du débit du combustible. En augmentation la rotation de l'air, le noyau de gaz chaud grossit au détriment de la flamme de diffusion qui raccourcit.

La modélisation de ces types de flamme prend généralement en compte la turbulence, le rayonnement et la combustion. Ces phénomènes sont ensuite découplés puis modélisés suivant des modèles bien choisis.

ANNEXE B**1. Modifications des chambres de combustion des moteurs à injection directe**

Si l'on ne veut pas modifier le carburant (estérification par exemple), on peut agir sur les chambres de combustion afin que les conditions de températures lors du fonctionnement permettent une combustion complète des huiles végétales.

Mais ces modifications doivent respecter la conception et l'architecture interne du moteur tout en respectant les matériaux et les jeux fonctionnels mécaniques. Il faut alors que les températures maximales atteintes restent raisonnables.

Ce type de modifications, développées au CIRAD depuis 1990, permet toujours l'usage du fioul (et donc de tout mélange d'huile et de fioul) sans pertes de puissance et sans interventions mécaniques supplémentaires. Cet aspect est important et représente un des avantages forts de cette solution. A tout moment les utilisateurs peuvent remplir le réservoir indifféremment avec de l'huile ou du fioul.

Description des modifications des pistons :

Ils sont modifiés pour recevoir une chambre de forme spéciale en acier réfractaire.

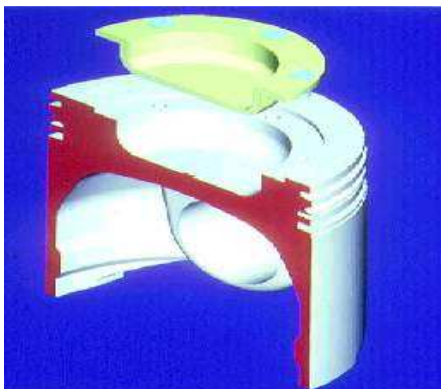


Fig.B1a : Exemple de réalisation (Photo CIRAD)



Fig.B1b : Conception CAO des modifications

On constate qu'après 500 heures de fonctionnement à l'huile de colza, le piston est intact. L'huile a la qualité d'être lubrifiante, cette caractéristique permet d'allonger la longévité des pièces du moteur.



Fig. B2 : Piston modifié après 500 heures à huile de colza (Photo CIRAD)

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

Une autre voie permet de ne pas faire de modifications internes des moteurs, c'est l'adoption d'un circuit d'alimentation en bicarburation. Ce procédé a été mis en place et appliqué par le CIRAD sur des tracteurs, des camions et des groupes électrogènes.

Il consiste à installer un second circuit d'alimentation pour l'huile végétale pure en parallèle à celui du gazole. Sur ce circuit, on trouve en série :

- un filtre à carburant adapté à l'huile végétale,
- un réchauffeur, pour réduire la viscosité de l'huile et se rapprocher de celle du gazole
- une pompe de circulation et de gavage de la pompe à injection,
- une électrovanne qui permet de basculer d'un carburant à un autre ; c'est-à-dire permettant au véhicule de fonctionner soit au gazole soit à l'HVP.

2.1 Schéma des modifications du circuit d'alimentation :

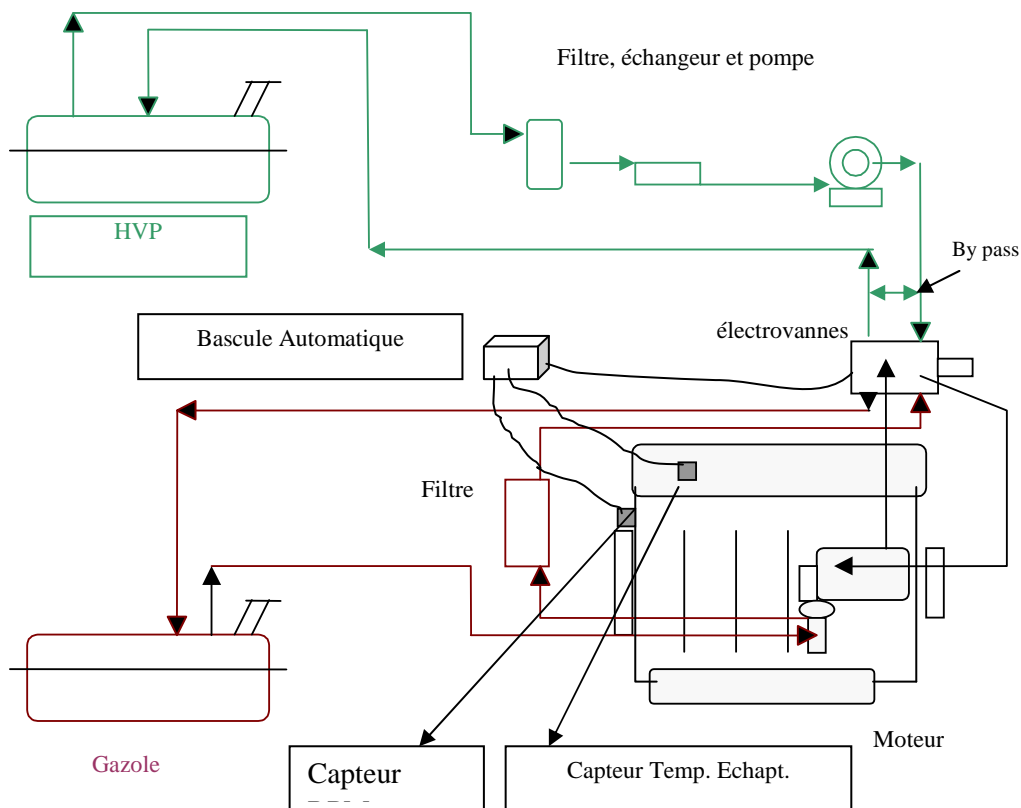


Fig. B3 : Double circuit (Cirad)

2.2 Contrôle des conditions de « bascule » gazole/huile végétale

Le principe de la bicarburation est simple : tant que les chambres de combustion n'ont pas les niveaux de température suffisants pour une bonne combustion de l'huile végétale, le moteur reste alimenter en gazole.

Dès que la température des chambres est suffisante le système de « bascule » pilote l'électrovanne qui alimente alors le moteur grâce au circuit huile végétale.

Le pilotage du système de « bascule » peut s'effectuer en contrôlant ces deux paramètres:

- la température d'échappement,
- la vitesse de rotation du moteur

a. La température de l'échappement

La température des gaz d'échappement est proportionnelle à la température moyenne des chambres de combustion. On peut la mesurer en plaçant une sonde au niveau de la sortie des chapeaux d'échappement dans le flux gazeux.

b. La vitesse de rotation du moteur

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

2.3 Importance de la charge du moteur sur la « bascule » gazole/huile végétale.

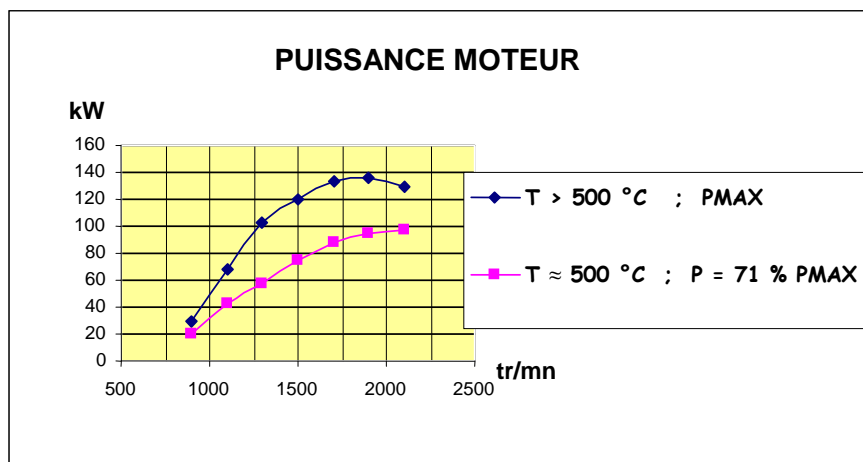


Fig. B4 : Enveloppe de pleine charge et courbe à charge partielle sur un moteur à injection directe. Graphique CIRAD

Le graphique ci-dessus présente les courbes de puissances mesurées sur un moteur diesel à injection directe.

- La courbe supérieure relie les points de puissance maximale pour différentes vitesses de rotation du moteur, elle est appelée « courbe enveloppe à pleine charge ».
- La courbe inférieure relie les points de puissances intermédiaires pour différentes vitesses de rotation, elle est appelée « courbe de puissances à charge partielle ». Il est possible de tracer de nombreuses « courbes à charges partielles » qui s'intercaleront entre puissance « nulle » et « l'enveloppe à pleine charge ». Mais celle-ci est particulière : elle relie des points de puissance à différentes vitesses où la température

d'échappement en sortie de culasse est d'environ 500°C. Pour chaque vitesse de rotation, tout point en dessous de cette courbe affichera une température d'échappement inférieure à 500°C car la quantité de carburant brûlée sera insuffisante pour l'atteindre.

- Par contre, tout point compris entre les deux courbes correspondra à des températures supérieures à 500°C où il sera donc possible d'injecter de l'huile végétale sans souci de combustion.

Dans l'exemple ci-dessus la puissance à 1800 tours par minutes représente 71 % de la puissance maximale à cette même vitesse de rotation, ou autrement dit : à 71 % de charge. Ce qui signifie que le moteur ne fonctionnera à l'huile végétale que lorsque la puissance demandée au moteur dépassera 71 % du maximal de puissance à cette vitesse de rotation (à 1500 tr/mn, c'est à 65 % de la puissance maximale que le passage à l'huile s'effectuera).

ANNEXE C

1. Evaporation des gouttes

1.1 Principe global de calcul de la surface de la goutte

La surface de la goutte est assimilée à celle d'une ellipse dont la détermination passe par les phases suivantes :

- Recherche de la plus grosse particule sombre dans l'image et de son orientation. Cette étape permet de définir une zone de recherche rectangulaire (en vert sur la figure D.1).
- Recherche des premiers et derniers bords (en jaune) sur des lignes parallèles (en bleu) définies dans la zone de recherche. On obtient ainsi une liste de paires de points.
- Filtrage des paires de points : un seuil sur la distance entre les points de chaque paire est appliqué. Le but de cette étape est de ne pas tenir compte des points sur l'aiguille (les points conservés sont en rouge).
- Détermination de la meilleure ellipse.

1 : Zone de recherche

2 : Ligne de détection des bords

3 : Bord détecté

4 : Bord utilisé dans le calcul de l'ellipse

5 : Axes de l'ellipse calculée

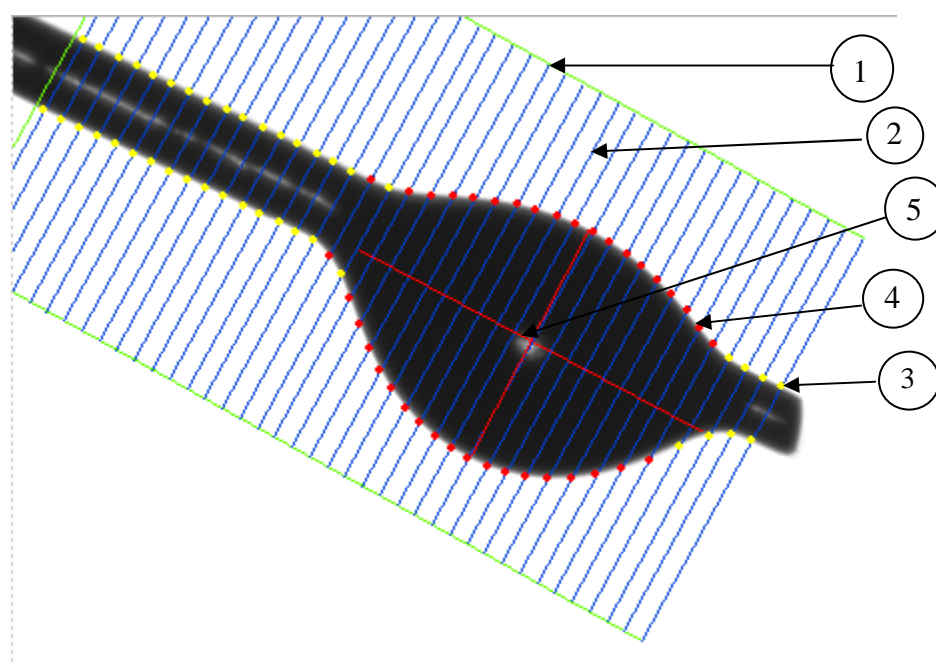


Fig. C1 : Recherche des contours de la goutte

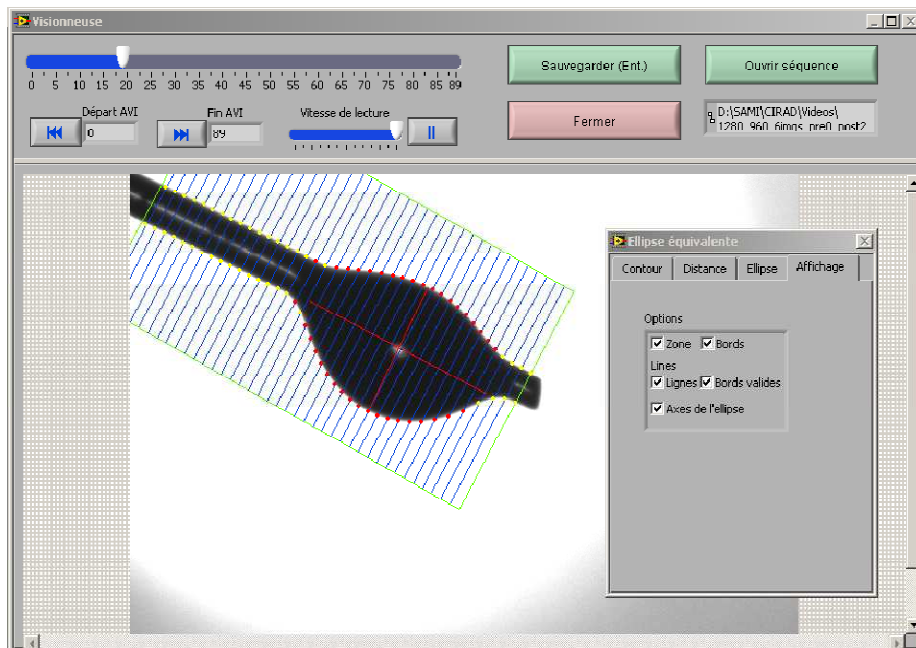


Fig. C2 : fenêtre de traitement des images

1.2 Paramétrage de la mesure de la surface :

1.2.1 Paramètres de détermination du contour

Les paramètres essentiels à fixer pour la détermination du contour de la goutte sont :

- La direction des lignes de recherche pour la détection des bords
- Le choix d'espacement des lignes de recherche : nombre de pixels séparant 2 lignes consécutives
- Le Contraste (3) : seuil de contraste minimum
- Le moyennage (1) : nombre de pixels utilisés pour moyenner les niveaux de gris de part et d'autre du front (contour)
- La pente (2) : nombre de pixels sur lesquels s'étend le changement de niveau.

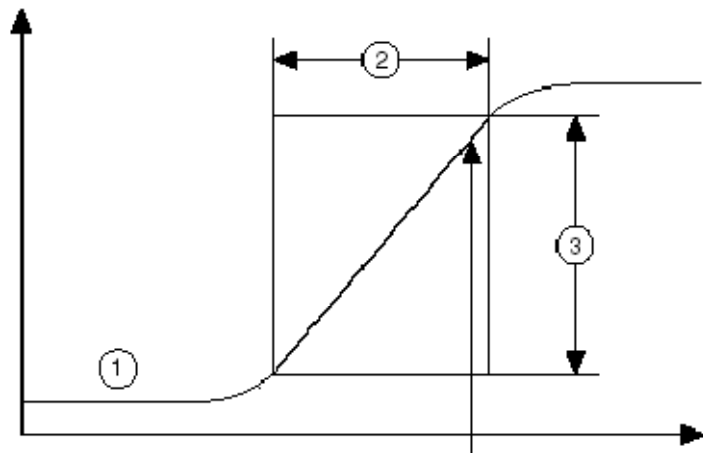


Fig. C3 : Paramètres d'extraction

1.2.2 Distance seuil

Le graphe représente les distances mesurées sur chaque ligne de détection (entre les 2 bords détectés). Sur la figure D4 ci-dessous, la parabole correspond à la goutte, les zones de plat à l'aiguille. La valeur Seuil (également matérialisée en rouge sur le graphe) permet de filtrer ces zones avant de calculer l'ellipse équivalente.

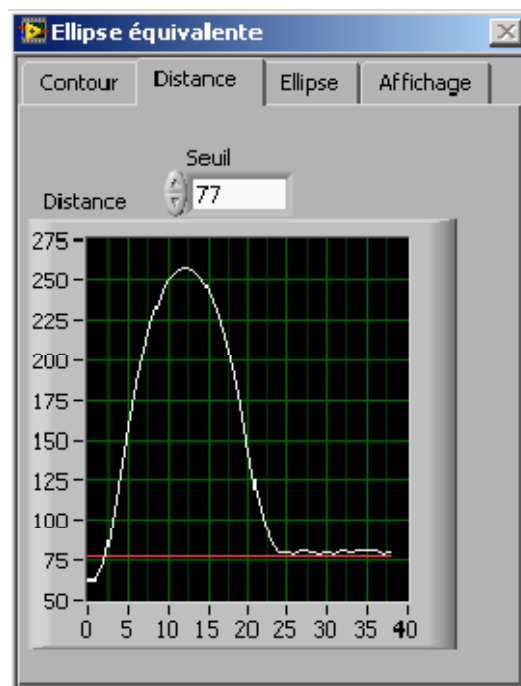


Fig. C4 : distance entre les bords détectés

1.2.3 Paramètres de calcul du périmètre et de la surface de l'ellipse

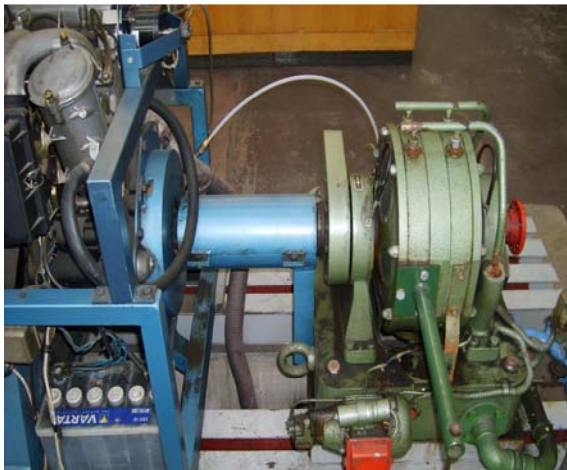
Les paramètres essentiels pour le calcul du périmètre et de la surface de l'ellipse sont :

- Le nombre maximum d'itérations : c'est le nombre maximum de tentatives d'affinage de l'algorithme dans le but d'obtenir la meilleure ellipse

- Le score minimum : il s'agit de spécifier le seuil de qualité minimale de l'ellipse calculée (valeur parfaite : 1000)
- Le rayon : c'est la distance acceptable entre l'ellipse et un point pour que ce point soit considéré comme faisant partie du périmètre de celle-ci
- L'erreur résiduelle : c'est l'erreur des moindres carrés de l'ellipse calculée

L'ajustement est valide (Vrai) si une ellipse avec un score supérieur au seuil minimum a été trouvée dans le nombre d'itérations spécifié. Les valeurs du périmètre et de la surface de l'ellipse sont alors affichées.

2. Dispositifs



(a)



(b)

Figure C5 : Banc d'essai du moteur à injection indirecte : (a) moteur + frein ; (b) contrôle



(a)



(b)

Figure C6 : Banc d'essai du moteur à injection directe : (a) moteur + frein ; (b) contrôle



(a)



(b)

Figure C7 : (a) brûleur non modifié + chaudière ; (b): brûleur adapté à l'huile + chambre de combustion



(a)



(b)

Figure C8 : (a) système de piégeage des composés organiques ; (b): dispositif d'analyse des composés organiques condensables et gaz incondensables

Annexe D : Tableaux de résultats

1. Moteur à injection indirecte

Puissance (kW) à la pleine charge										
Vitesse (tr/min)	FOD	HCR50	HCR70	HCR100	HPR50	HPR70	HPR100	HcpB50	HcpB70	HcpB100
1500	13,7	13,3	12,9	12,9	12,9	12,8	13,1	12,7	12,7	12,6
2000	19,0	18,2	18,1	17,6	18,2	17,7	17,6	17,7	17,4	17,2
2500	25,1	23,6	23,6	23,0	23,8	23,0	22,8	23,0	22,4	21,7
3000	30,5	29,2	28,7	27,6	28,9	28,3	27,1	27,8	27,0	26,1
3500	34,8	33,3	33,0	31,9	33,7	32,4	31,1	31,9	30,8	29,4
4000	36,4	36,0	35,6	34,4	36,4	35,4	33,6	34,7	33,9	31,7

CO (g/kWh) à la pleine charge										
Vitesse (tr/min)	FOD	HCR50	HCR70	HCR100	HPR50	HPR70	HPR100	HcpB50	HcpB70	HcpB100
1500	0,351	0,460	0,524	0,547	0,538	0,570	0,595	0,420	0,470	0,519
2000	0,328	0,437	0,528	0,543	0,503	0,534	0,570	0,411	0,487	0,529
2500	0,350	0,412	0,502	0,518	0,443	0,534	0,559	0,385	0,460	0,500
3000	0,313	0,363	0,437	0,485	0,338	0,442	0,476	0,336	0,423	0,458
3500	0,296	0,321	0,332	0,328	0,300	0,317	0,364	0,304	0,316	0,353
4000	0,270	0,289	0,284	0,290	0,279	0,292	0,309	0,306	0,315	0,339

NO_x (g/kWh) à la pleine charge										
Vitesse (tr/min)	FOD	HCR50	HCR70	HCR100	HPR50	HPR70	HPR100	HcpB50	HcpB70	HcpB100
1500	0,598	0,635	0,620	0,632	0,611	0,616	0,634	0,610	0,621	0,550
2000	0,646	0,664	0,657	0,650	0,657	0,622	0,625	0,648	0,644	0,589
2500	0,725	0,727	0,728	0,712	0,729	0,674	0,682	0,707	0,707	0,666
3000	0,802	0,779	0,789	0,796	0,812	0,739	0,750	0,803	0,772	0,737
3500	0,945	0,954	0,919	0,951	0,969	0,948	0,923	0,958	0,938	0,883
4000	1,166	1,118	1,116	1,105	1,173	1,143	1,109	1,126	1,081	1,033

CO₂ (%) à la pleine charge										
Vitesse (tr/min)	FOD	HCR50	HCR70	HCR100	HPR50	HPR70	HPR100	HcpB50	HcpB70	HcpB100
1500	7,9	7,9	7,9	7,8	8,0	7,9	7,9	7,8	7,8	8,0
2000	8,3	8,1	8,2	8,1	8,2	8,1	8,0	8,1	7,9	8,0
2500	8,7	8,3	8,5	8,3	8,6	8,3	8,2	8,4	8,1	8,1
3000	9,1	8,7	8,7	8,5	8,9	8,5	8,3	8,5	8,3	8,3
3500	8,9	8,5	8,5	8,4	8,7	8,5	8,2	8,4	8,3	8,1
4000	8,6	8,4	8,4	8,3	8,6	8,4	8,1	8,4	8,1	8,0

2. Moteur à injection directe

Couple (Nm) à 75% de la charge maximale						
Vitesse (tr/min)	FOD	HCR20	HCR40	HCR60	HCR80	HCR100
1500	30,1	28,5	28,9	28,5	28,5	28,9
2000	27,7	26,9	27,3	26,9	26,9	26,5
2500	25,9	26,1	25,6	25,5	25,1	25,1
3000	17,8	18,2	17,8	18,2	17,8	19

Consommation spécifique (g/kWh) à 75% de la charge maximale						
Vitesse (tr/min)	FOD	HCR20	HCR40	HCR60	HCR80	HCR100
1500	240	255	260	270	267	280
2000	246	253	254	266	274	280
2500	259	261	270	284	287	299
2950	327	334	350	350	375	379

Rendement (%) à 75% de la charge maximale						
Vitesse (tr/min)	FOD	HCR20	HCR40	HCR60	HCR80	HCR100
1500	34	34	34	34	36	36
2000	33	34	35	35	35	36
2500	32	33	33	33	33	33
3000	25	26	25	26	26	26

CO (g/kWh) à 75% de la charge maximale						
Vitesse (tr/min)	FOD	HCR20	HCR40	HCR60	HCR80	HCR100
1500	0,894	0,990	1,022	1,105	1,129	1,103
2000	0,514	0,612	0,570	0,609	0,673	0,676
2500	0,614	0,705	0,749	0,749	0,719	0,770
3000	1,169	1,285	1,409	1,383	1,457	1,599

NO_x (g/kWh) à 75% de la charge maximale						
Vitesse (tr/min)	FOD	HCR20	HCR40	HCR60	HCR80	HCR100
1500	4,317	4,386	4,456	4,259	4,450	4,557
2000	3,599	3,490	3,644	3,701	3,741	3,620
2500	2,723	2,545	2,485	2,402	2,558	2,384
3000	1,759	1,605	1,477	1,680	1,533	1,518

CO₂(%) à 75% de la charge maximale						
Vitesse (tr/min)	FOD	HCR20	HCR40	HCR60	HCR80	HCR100
1500	7,7	7,5	7,6	7,7	7,5	7,6
2000	7,4	7,3	7,4	7,3	7,3	7,2
2500	7,2	7,3	7,2	7,3	7,1	7,2
3000	6,5	6,3	6,5	6,7	6,5	6,8

O₂ (%) à 75% de la charge maximale						
Vitesse (tr/min)	FOD	HCR20	HCR40	HCR60	HCR80	HCR100
1500	10,4	10,7	10,6	10,5	10,8	10,8
2000	10,9	11	11,2	11,1	11,1	11,3
2500	11,2	11	10,9	11	11,3	11,3
2990	11,7	12,3	12,1	11,8	12,1	11,5

Régime : 2500 tr/min ; charge : 25% de la charge maximale						
	FOD	HCR20	HCR40	HCR60	HCR80	HCR100
Couple (Nm)	8,3	8,5	8,3	8,1	7,8	7,9
Rendement (%)	20	20	19	20	19	20
Consommation spécifique (g/kWh)	405	435	459	472	512	511
O₂ (%)	16	15,9	15,7	16	16	15,9
CO₂ (%)	3,7	3,7	3,8	3,6	3,6	3,7
CO (g/kWh)	1,206	1,486	1,514	1,574	1,645	1,670
NO_x (g/kWh)	2,468	2,243	2,289	2,228	2,253	2,260

Régime : 2500 tr/min ; charge : 50% de la charge maximale						
	FOD	HCR20	HCR40	HCR60	HCR80	HCR100
Couple (Nm)	17,2	18	17	17,2	17,2	16,4
Rendement (%)	27	29	29	28	29	29
Consommation spécifique (g/kWh)	299	295	305	325	329	341
O ₂ (%)	13,7	13,4	13,6	13,5	13,5	13,8
CO ₂ (%)	5,4	5,5	5,4	5,4	5,5	5,3
CO (g/kWh)	0,893	0,887	1,026	1,020	1,010	1,025
NO _x (g/kWh)	2,640	2,548	2,393	2,363	2,441	2,420

Régime : 2500 tr/min ; charge : 75% de la charge maximale						
	FOD	HCR20	HCR40	HCR60	HCR80	HCR100
Couple (Nm)	25,9	26,1	25,6	25,5	25,1	25,1
Rendement (%)	32	33	33	33	33	33
Consommation spécifique (g/kWh)	259	261	270	284	287	299
O ₂ (%)	11,2	11	10,9	11	11,3	11,3
CO ₂ (%)	7,2	7,3	7,4	7,3	7,1	7,2
CO (g/kWh)	0,614	0,705	0,749	0,749	0,768	0,770
NO _x (g/kWh)	2,723	2,545	2,485	2,402	2,421	2,384

Régime : 2500 tr/min ; charge : 100% de la charge maximale						
	FOD	HCR20	HCR40	HCR60	HCR80	HCR100
Couple (Nm)	35,2	35,2	34,8	33,6	33,6	32,3
Rendement (%)	34	34	35	35	34	34
Consommation spécifique (g/kWh)	245	250	254	263	279	296
O ₂ (%)	7,9	7,9	8,2	8,5	8,5	8,8
CO ₂ (%)	9,6	9,6	9,4	9,2	9,2	9,1
CO (g/kWh)	1,076	1,154	1,232	1,173	1,140	1,335
NO _x (g/kWh)	2,221	2,113	2,198	2,095	2,109	2,079

3. Brûleur non modifié

Pression (bars)	Consommation (kg/h)								
	FO D	HCR1 0	HCR2 0	HCR3 0	HCR4 0	HCR5 0	HCR6 0	HCR7 0	Théorique
13	1,95	1,97	1,98	2,04	2,06	2,18	2,18	2,21	1,96
14	2,05	2,10	2,10	2,10	2,19	2,22	2,25	2,25	2,03
15	2,08	2,10	2,13	2,13	2,19	2,25	2,29	2,36	2,10
16	2,16	2,18	2,19	2,18	2,28	2,40	2,30	2,40	2,17
17	2,18	2,25	2,20	2,25	2,37	2,38	2,40	2,45	2,24
18	2,25	2,35	2,25	2,30	2,40	2,44	2,50	2,51	2,30
19	2,35	2,40	2,40	2,40	2,46	2,55	2,55	2,59	2,37
20	2,40	2,45	2,40	2,40	2,55	2,55	2,55	2,66	2,43

Pression (bars)	Puissance thermique (kW)							
	FOD	HCR10	HCR20	HCR30	HCR40	HCR50	HCR60	HCR70
13	22,4	22,4	22,4	22,3	22,3	22,8	22,7	22,7
14	23,5	23,0	22,9	22,9	23,6	23,6	23,3	23,4
15	23,7	23,7	23,6	23,5	24,1	24,4	24,3	24,3
16	24,3	24,8	23,9	23,9	24,4	24,7	24,8	25,1
17	25,0	25,0	24,8	24,7	25,2	25,4	25,0	25,9
18	26,3	26,0	25,2	25,5	26,1	26,3	25,7	26,3
19	26,7	26,4	26,5	26,3	26,4	26,6	26,7	27,1
20	27,2	27,2	27,0	26,8	27,0	27,3	27,4	27,3

Richesse	CO (g/kWh)							
	FOD	HCR10	HCR20	HCR30	HCR40	HCR50	HCR60	HCR70
0,96	0,133	0,352	0,414	0,437	0,571	0,798	1,443	2,314
0,86	0,047	0,058	0,072	0,072	0,061	0,080	0,076	0,083
0,77	0,033	0,032	0,036	0,060	0,052	0,076	0,069	0,080
0,71	0,039	0,045	0,053	0,056	0,076	0,093	0,082	0,101
0,67	0,051	0,043	0,065	0,078	0,089	0,112	0,118	0,151

Richesse	CO₂ (%)							
	FOD	HCR10	HCR20	HCR30	HCR40	HCR50	HCR60	HCR70
0,96	14,6	14,3	14,3	14,5	14,6	14,5	14,6	13,9
0,86	12,5	12,6	12,4	12,8	12,6	13,0	12,9	13,0
0,77	11,6	11,6	11,2	11,4	11,8	11,7	11,7	11,8
0,71	10,4	10,7	10,2	10,6	10,5	10,8	10,7	10,6
0,67	10,2	10,0	9,8	9,7	9,9	9,5	9,7	9,6

Richesse	NO_x (g/kWh)							
	FOD	HCR10	HCR20	HCR30	HCR40	HCR50	HCR60	HCR70
0,96	0,098	0,091	0,091	0,089	0,088	0,085	0,086	0,081
0,86	0,112	0,107	0,108	0,108	0,106	0,104	0,107	0,108
0,77	0,115	0,112	0,115	0,114	0,112	0,113	0,114	0,115
0,71	0,113	0,112	0,116	0,116	0,116	0,113	0,117	0,116
0,67	0,106	0,102	0,111	0,109	0,109	0,105	0,112	0,112

Richesse	SO₂ (g/kWh)							
	FOD	HCR10	HCR20	HCR30	HCR40	HCR50	HCR60	HCR70
0,96	0,139	0,118	0,112	0,105	0,089	0,083	0,072	0,058
0,86	0,141	0,119	0,112	0,105	0,087	0,072	0,060	0,034
0,77	0,142	0,129	0,114	0,092	0,075	0,067	0,049	0,031
0,71	0,147	0,129	0,114	0,089	0,073	0,056	0,046	0,027
0,67	0,146	0,126	0,110	0,085	0,063	0,053	0,042	0,019

RESUME

Les caractéristiques physico-chimiques, la granulométrie du spray et l'évaporation des carburants sont des aspects fondamentaux dans la prédiction et l'optimisation de leur qualité de combustion dans les moteurs ou sur les brûleurs.

Dans cette étude, l'influence des caractéristiques physico-chimiques, de la granulométrie et de l'évaporation du fioul oil domestique, de divers huiles végétales ou leurs dérivés (mélanges au fioul) sur leur combustion dans les moteurs Diesel ou sur les brûleurs a été mise en évidence.

Déjà établies dans le cas des moteurs Diesel, cette étude met en évidence pour les brûleurs, l'existence de corrélations entre : les caractéristiques physico-chimiques, les phénomènes précédant la combustion (granulométrie et évaporation) et la combustion des huiles végétales.

Un modèle théorique simple de prédiction des caractéristiques d'évaporation des huiles (constantes d'évaporation et temps de chauffage) donne des résultats en accord avec les résultats obtenus expérimentalement. Ces résultats ont permis de mettre en évidence qu'il existe une température à partir de laquelle les comportements des huiles et du fioul sont comparables.

Les conditions favorables à une bonne combustion des huiles végétales ou leurs dérivés ont été définies. Une fois ces conditions remplies, la combustion de l'huile est très comparable à celle du fioul en termes d'émissions de CO et de NO_x, aussi bien pour les moteurs Diesel que pour les brûleurs.

Mots clés : Huiles végétales, fioul oil domestique, granulométrie, évaporation, combustion optimale, Moteur Diesel, Brûleur.

ABSTRACT

The physical and chemical characteristics, the drops size and evaporation characteristics of fuels are fundamental aspects in the prediction and optimizing their quality of combustion in engines and burners.

In this study, the influence of physical and chemical characteristics, the drops size and evaporation of fuel oil and various vegetable oils or their derivatives (fuel mixtures with the fuel oil) on their combustion characteristics in Diesel engines and burners was highlighted.

This study highlights for burners, the existence of correlations between : the physical and chemical properties, the drop size, the evaporation characteristics and the combustion of vegetable oils. These correlations were already established in the case of diesel engines.

A simple theoretical model to predict the characteristics of evaporation of vegetable oils (constant of evaporation and heating time) gives results in agreement with the results obtained experimentally. These results have revealed that there is a temperature from which the behaviour of vegetable oils and fuel oil are comparable.

The conditions favourable to good combustion of vegetable oils or their derivatives have been identified. Once these conditions are fulfilled, the behaviour of vegetable oils is very similar to that of fuel oil in terms of emissions of CO and NO_x, both for Diesel engines and burners.

Keywords : Vegetable oils, fuel oil, drop size, evaporation, optimal combustion, CI engine, burner.