

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR, EL OUED
FACULTE DE LA TECHNOLOGIE



Département de Génie des Procédés et raffinage

Mémoire de fin d'étude
Présenté pour l'obtention du diplôme de :

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Industrie raffinage

Spécialité: Génie raffinage

Thème

Caractéristiques et performances d'un bi-carburant GPL - Diesel

Devant le Jury composé de :

Président: SEROUTI Abdelghani Université d'El Oued

Examineur : CHAABIA Nacer Université d'El Oued

Encadreur: KHALED Bilel

Présent Par :

REZZAG SALEM Mohamed Yasser

HMIDI Youcef

GUENFOUD Salah

MAOU Taha Yassine

DEHMANI Abbas

REMERCIEMENT

Avant tout , nous remercions **DIEU** tout puissant de nous avoir donné la force , le courage , la persistance et nous a permis d'accomplir ce modeste travail .Merci de nous avoir éclairé le chemin de la réussite .à notre encadrant de mémoire **Dr khaled bilel** , pour avoir accepté de nous encadrer , son aide et ses précieux conseils , il nous ont permis d'avancer plus loin dans nos recherches

SOMMAIRE

Introduction :	1
Chapitre I: Gaz pétrolier liquéfié GPL	
I.1 Historique des GPL :	3
I.2 Définition :	3
I.3 Origine des GPL :	4
I.3.1 Fractions lourdes de l'extraction de gaz naturel :	4
I.3.2 Fractions légères du raffinage du pétrole :	4
I.4 Composition chimique :	5
I.5 Les propriétés des GPL :	5
I.6 Caractéristiques générales des GPL :	6
I.7 Utilisations de GPL :	8
I.7.1. Source de chauffage :	8
I.7.5 GPL carburant :	9
Chapitre II : généralité sur le diesels	
II.1 définition : le diesel	11
II.2. Genèse du carburant diesel :	11
II.3 comment obtenir du diesel :	11
II.4 Mécanisme de fonctionnement des moteurs diesel :	11
II.5 Caractéristiques du diesel:	12
II.6 Avantages du carburant diesel :	15
II.7 Inconvénients du carburant diesel :	15
Chapitre III : les moteurs diesel	
III.1 Introduction :	17
III.2 Rappel historique du moteur Diesel :	18
III.3.1 Moteurs à injection indirecte :	18
I.3.2 Les Moteurs à injection directe :	19
III.3 3 Moteurs à rampe commune et Injecteur Pompe :	21
III.4 Comment ça marche le moteur Diesel :	22
III.4.1 Le Principe:	23
III.4.2 Les temps de la combustion :	23
III.4.3 Le démarrage d'un moteur Diesel:	25
III.4.4 Le cycle du Diesel :	26
Chapitre IV : Travail expérimental	
IV.1.Introduction:	28
V.2. Fonctionnement à carburant diesel et GPL:	28
IV.3. Processus de combustion du moteur à double carburant GPL-diesel:	29

IV.4 Caractéristiques de rendement, de combustion et d'émissions d'un moteur à double carburant GPL-diesel :	32
IV.4.1 Effet de la charge du moteur :	32
IV.4.2 Effet du régime moteur :	34
IV.4.3 Effet de la quantité de carburant pilote :	35
IV.4.4 Effet du moment de l'injection :	36
IV.4.5 Effet des conditions du collecteur d'admission :	38
IV.5.6 Effet du rapport de compression :	38
IV.4.7 Effet de la variation des compositions du combustible gazeux :	39
IV.5 Recherche expérimentale sur le système de contrôle du carburant des moteurs à combustion interne utilisant le GPL - diesel à double combustible :	40
V.5.2 RÉSULTATS ET DISCUSSION DE L'EXPÉRIENCE :	40
Conclusion :	49
Conclusion Générale :	52

Listes des figures

Figure III.1: Schéma d'un moteur Diesel à injection direct.....	17
Figure III.2 : Les structures des préchambres de combustion.....	19
Figure III.3 : L'injection directe.....	20
Figure III.4 : Injecteur piezo de Siemens.....	22
Figure III.5 :L'admission d'air	23
Figure III.6 : La compression d'air.....	24
Figure III.7 : L'explosion	24
Figure III.8 : L'échappement	25
Figure III.9 : cycle diesel théorique	26
Figure IV.1: Moteur diesel à double carburant GPL.....	29
Figure IV.2: Taux de pression et d'augmentation de la pression de combustion typique par rapport à l'angle de manivelle du moteur diesel au GPL	31
Figure IV.3 : Taux de dégagement de chaleur par rapport à l'angle d'une manivelle d'un moteur diesel à combustion à combustible double.....	32
Figure IV.5 : Effet de la charge sur les émissions de NOx.....	33
Figure IV.4 Effet de la charge sur les émissions de HC.	33
Figure IV.6 : Effet de la charge sur les émissions de Co	33
Figure IV.7 : Effets du régime moteur sur le couple (a) et le bruit (b); IT = 35 °BTDC, CR = 22, md = (0,37–0,47) kg/h.....	34
Figure IV.8 : Variation des émissions de NOx pour différents taux de GPL à différentes vitesses	35
Figure IV.9 : effets de la masse du carburant pilote sur le couple (a) et le bruit (b); N = 1300 rpm, IT = 35°BTDC, CR = 22.....	35
Figure IV.10 : Effet de l'efficacité thermique des freins par rapport à la quantité de carburant pilote ...	36
Figure IV.11 : Effet du taux de dégagement de chaleur pour la quantité pilote différente.....	36
Figure IV.12 : Effet des différentes durées d'injection sur la densité de fumée.....	37
Figure IV.13 : Effet des différentes durées d'injection sur les Nox	37
Figure IV.14 : Effet de la température d'admission sur la pression maximale pour une charge de 20 % et 80 %	38
Figure IV.15 : Effet du rapport de compression sur le couple (a) et le bruit de combustion (b) pour le GPL N = 1300 rpm, IT = 35°BTDC, md = 0,37 kg/h.....	39
Figure IV. 16 : Schéma du système de commande d'injection.	40
Figure IV. 17 : Schéma des principes de contrôle du système d'injection de carburant GPL pour les moteurs diesel.....	41
Figure IV.18 : Le contrôleur de temps diminue le carburant diesel en interrompant le temps de fonctionnement précoce de la vanne SPY (a) Le signal d'impulsion contrôle la vanne d'entrée SPY; (b) Le signal d'impulsion contrôle la vanne de sortie SPY lorsque le contrôleur réduit le carburant diesel .	42
Figure IV.19 : Le signal d'impulsion contrôle l'injection de GPL lorsque le moteur fonctionne avec un moteur diesel à double carburant	43

Figure IV.20 : Graphiques des caractéristiques de puissance et de moment lorsque le moteur utilise du diesel	44
Figure IV.21 : Graphique comparant les caractéristiques extérieures (puissance et moment) du moteur à double carburant (diesel au GPL) selon les taux de remplacement	45
Figure IV.21 : Processus de pression des cylindres à 2600 rpm avec différents rapports GPL	45
Figure IV.22 : Le signal d'amorçage de l'impulsion du moteur se produit lorsque le contrôleur de temps ouvre les injecteurs de GPL est $> 4,2$ ms.....	47
Figure IV.23 : NO, épuisement dans les modes de test avec GPL/diesel	47
Figure IV.24 : Exhaustions HC, CO, lors du changement de l'injection de carburant	48
Figure IV.25 : Opacités de NOx et de fumée à l'épuisement lors du changement de la date d'injection du carburant	49

Introduction :

Récemment, en raison du développement de l'industrie ainsi que le nombre croissant de transports et de cloisons équipées de moteur à combustion interne, la demande d'utilisation de carburant tend à augmenter. La demande de combustibles fossiles et de diesel est particulièrement élevée, avec une consommation moyenne de 87 millions de barils par jour. La plupart d'entre eux sont consommés par le transport.

L'Algérie, pays en développement, n'est pas une exception. Le fait que la pénurie de carburant et la pollution environnementale provoquée par les gaz d'échappement sont le problème vital. Le carburant alternatif qui est propre (échappement de substances moins nocives), renouvelable, bon marché et facile à utiliser dans le moteur actuel. Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) est non seulement un combustible qualifié, mais aussi un combustible potentiel.

L'utilisation du GPL sur le moteur diesel actuel augmentera la productivité et réduira les émissions d'échappement. C'est un échappement important mais difficile à traiter de nos jours Moteur diesel. Le GPL, cependant, n'est qu'un combustible partiel de sorte qu'il ne peut pas remplacer complètement le diesel. Par conséquent, la productivité d'un moteur dépend de la caractéristique et du rapport du mélange GPL - Diesel du système de contrôle de l'alimentation en carburant. Il s'appuie également sur les chiffres du moteur. Par conséquent, l'étude sur "L'étude de l'effet du mode d'alimentation en carburant dans le moteur à double carburant (GPL - diesel)" peut utiliser le GPL, réduire la quantité de diesel et réduire les émissions de gaz d'échappement. En outre, il apporte la valeur scientifique et l'avantage économique à l'industrie de fabrication vietnamienne de moteur où le moteur LPG n'est pas populaire.

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les caractéristiques Gaz pétrolier liquéfié GPL, ses usages industriels, Historique des GPL.

Dans le cadre du deuxième chapitre, nous abordons les procédés D'obtenir du gasoil, généralité sur le gasoil

Dans le troisième chapitre, nous avons examiné les composants de base d'un moteur Un moteur Diesel, les caractéristiques, ses usages dans l'industriels

Enfin, nous avons analysé un ensemble d'expériences qui étudient les performances, l'efficacité et les émissions des moteurs bi-carburant.

Chapitre I: Gaz pétrolier liquéfié GPL

I.1 Historique des GPL :

Virginie – USA – 20ème siècle : C'est au cours du processus de croissance du marché des produits pétroliers qu'un ingénieur de la Riverside Oil Company a découvert les Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL).

Le 24 décembre 1910, H. Stukeman réussit pour la première fois à obtenir les 658 premiers litres de GPL liquide. Cet ingénieur avait entrepris ses travaux sous l'impulsion de son Directeur Général, A.N. Kerr, qui dirigeait la raffinerie. Ce dernier se trouvait depuis un certain temps confronté au problème de l'évaporation des essences minérales (extraites du gaz naturel associé aux gisements de pétrole) qui étaient stockées dans des bacs à ciel ouvert. Pour limiter ses pertes, il eut l'idée de récupérer les vapeurs et d'essayer de les recondenser, Ainsi étaient nés les Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL) [3].

C'est en 1912 que fut expérimentée la première installation domestique au GPL. Dans la même année, la carburation automobile au GPL fit ses premiers pas. Le pré-développement de cette invention prit cependant une dizaine d'années. En 1922, les statistiques officielles font état de 417 tonnes de GPL vendues dans l'ensemble des Etats-Unis. Les compagnies pétrolières commencent à s'intéresser au GPL et le commercialisent dès 1927, L'impulsion est alors donnée et en 1930, 20 ans après leur découverte, la consommation de GPL aux Etats-Unis atteignait 32 200 tonnes.

Pour l'Europe, c'est en France que débutera le GPL en 1932, en usage domestique, En revanche, Le GPL carburant n'y sera autorisé qu'en 1979 [3].

En Algérie Suite à une phase d'étude et d'expérimentation entamée en 1977, la décision d'introduire le GPL carburant « SIRGHAZ » est intervenue en 1983 avec l'adoption de la bicarburation et la mise en place de la réglementation liée aux conditions d'utilisation et de distribution du GPL/C [4].

I.2 Définition :

Le GPL est un mélange gazeux composé essentiellement de butane et du propane à température ambiante et pression atmosphérique, et peut passer à l'état liquide sous les conditions suivantes :

- Pression relevée à la température ambiante.
- Pression atmosphérique et basse température.
- Pression modérée et température pas tellement basse.

Cette propriété lui permet d'être stocké dans un volume réduit (250 litres de GPL gazeux égale à un litre de GPL liquide). [5]

I.3 Origine des GPL :

Le GPL provient de deux origines :

I.3.1 Fractions lourdes de l'extraction de gaz naturel :

Les champs de gaz (pour plus de 60%). En moyenne, un champ de gaz naturel fournit près de 90% de méthane (CH_4) mais aussi 5% de propane et 5 % d'autres gaz dont le butane. Schématiquement, on refroidit le gaz naturel extrait pour en séparer les différents constituants.

On obtient alors des GPL (butane et propane à l'état liquide), alors que le méthane se trouve encore à l'état gazeux, ces gaz ayant des points de liquéfaction différents. Du butane et du propane sont également récupérés lors de l'extraction de pétrole, sous forme de gaz associés dissous (d'où l'appellation de « de gaz de pétrole » liquéfiés). Les pourcentages de butane et du propane contenus dans le gaz naturel et le pétrole brut sont très variables d'un gisement à un autre.

I.3.2 Fractions légères du raffinage du pétrole :

Lors du raffinage du pétrole brut, le butane et le propane constituent entre 2 et 3% de l'ensemble des produits obtenus. Ils constituent les coupes les plus légères issues de la distillation du pétrole brut. Ces gaz sont également récupérés à l'issue d'opérations de traitement

« Secondaires », après la phase de distillation. Selon sa provenance, une tonne de pétrole brut traitée produit 20 à 30 kg de GPL, dont 2/3 de Butane et 1/3 de Propane. Au total, les GPL ne pourront dépasser 5% de la ressource mondiale en hydrocarbures. [6]



Figure1 : Origine du GPL.

I.4 Composition chimique :

La composition chimique du GPL est variable, selon les normes et sa provenance. Il peut contenir du propylène, du butène, une faible quantité en méthane, éthylène, pentane, et exceptionnellement du butadiène, de l'acétylène et du méthyle acétylène. Les atomes du butane et du propane sont tous reliés par des liaisons simples (ou covalentes), cela signifie que tous ces atomes liés entre eux mettent en commun un électron de leurs couches externes afin de former des doublets d'électrons qui maintiennent l'attraction entre atomes. [8]

Le composant du GPL	% molaire
Methane	0,32
Ethane	1,12
Propane	60,95
Iso butane	15,46
Normal butane	22,14
Iso pentane	0,01

Tableau I : Composition des GPL

I.5 Les propriétés des GPL :

A température ambiante et à pression atmosphérique, les GPL ont la propriété d'être à l'état gazeux. Mais ils se liquéfient aisément en augmentant leur pression, facilitant ainsi leur stockage et utilisation.

Les GPL ne sont pas vraiment toxiques : ils présentent tout au plus un léger pouvoir anesthésiant, s'ils sont inhalés longuement et peuvent provoquer des migraines et des maux d'estomac.

Le GPL, lorsqu'il se répand sous sa forme liquide, hors d'un container sous pression s'évapore en produisant du froid : au contact de la peau, il provoque des brûlures. Caractéristiques appelées "brûlures froides" [10].

Les vapeurs des GPL constituent avec l'air un mélange extrêmement inflammable et

dangereux. Leur domaine d'inflammabilité dans l'air à 20°C et sous 1 atm varie de 2% à 10% (% volumique). Ce mélange est détonnant au contact d'une source de chaleur (flamme ou étincelle) [10].

Pour mieux les reconnaître ou déceler d'éventuelles fuites, on leur donne une odeur particulière au moyen de substances appropriées (mercaptans).

A l'état liquide, les GPL ont un haut coefficient de dilatation, ils se dilatent de 0,25 % par degré de température dont il faut tenir compte lors de leurs stockages dans les récipients que le remplissage ne doit jamais être dépassé au maximum 85% de sa capacité [11].

Le propane et le butane sont chimiquement réactifs et ils peuvent détériorer certains caoutchoucs naturels ou certaines matières plastiques. Il est donné primordial de n'utiliser que des accessoires et des équipements spécialement congrus pour ces gaz.

Les GPL sont insolubles dans l'eau et ils n'ont pas de propriétés lubrifiantes d'où ce qui doit être pris en considération lors du dimensionnement des compresseurs et des pompes.

Les GPL sont d'une pureté parfaite et brûlent sans aucun déchet, n'encrassent ni les conduites, ni les brûleurs des appareils d'utilisation.

Les GPL ne présentent aucun danger d'empoisonnement et n'est pas à craindre par inhalation, à condition toutefois que l'organisme trouve suffisamment d'oxygène dans l'air. [12].

I.6 Caractéristiques générales des GPL :

– Odeur :

Le GPL est inodore à l'état naturel, mais on doit ajouter un odorant, ce sont des composés sulfures tel que le diéthylmercaptane ou le diméthylsulfide pour des raisons de sécurité.

- Tension de vapeur :

La TVR du GPL est de 8 et 2 bars pour le propane et le butane respectivement à 20 °C.

- Dilatation :

À l'état liquide, le GPL a un haut coefficient de dilatation dont il faut tenir compte lors de leur stockage (les sphères ne doivent jamais être complètement remplies).

- Densité :

Aux conditions normales de température et pression, le GPL est plus lourd que l'air, il est diminué avec l'augmentation de la température à titre exemple : À 38 °C la densité est égale 0,534, la densité est très importante dans le GPL commerciale.

➤ Température d'ébullition :

A la pression atmosphérique la température d'ébullition de propane est de (– 42 °C), celle de butane est de (– 6 °C).

➤ Pouvoir calorifique :

C'est la propriété la plus intéressante étant donné que le GPL est traditionnellement utilisé pour les besoins domestiques :

- Iso-butane: PC = 29460 (kcal/kg).
- Normal butane: PC = 29622 (kcal/kg).
- Propane: PC = 22506 (kcal/ kg).

➤ Impuretés :

Le plus important est le soufre, la teneur en soufre est inférieure ou égale à 0,005 % en masse, ainsi l'eau l'un des impuretés importants.

- Le GPL est non corrosif à l'acier mais généralement aux cuivres et ces alliages ou l'aluminium.
- Le GPL n'a aucune propriété de lubrification et cet effet doit être pris en considération lors de la conception des équipements du GPL (pompes et compresseurs) Le GPL est incolore, que ce soit en phase liquide ou en phase gazeuse.
- Le GPL ne sont pas vraiment toxiques, ils présentent tout au plus un léger pouvoir anesthésiant s'ils sont inhalés longuement et provoquer des migraines et des maux d'estomac.
- Le poids spécifique du GPL est environ la moitié de celui de l'eau.
- Le gaz propane a une densité de 1,5 fois de l'air.
- Le GPL n'est ni toxique ni corrosif vis-à-vis des aciers.
- Le GPL n'est pas de propriétés lubrifiantes et ceci doit être pris en considération lors du dimensionnement des compresseurs et des pompes.
- Le GPL est caractérisé par un indice d'octane recherché (RON) naturellement élevé

atteignant aisément 98. Cette propriété découle en fait directement de des valeurs deRON de chacun de ces constituants. Par ailleurs, son indice d'octane moteur (MON) est, lui aussi légèrement plus élevé que celui des essences classiques [13].

➤ La masse volumique :

•

a masse Volumique G.P.L. à l'état gazeuxAir = 1,2 g/l

Propane = 1,8 g/l

Butane = 2,4 g/l

Les G.P.L en phase gazeuse sont deux fois plus lourds que l'air.

•

a masse Volumique G.P.L. à l'état liquideEau = 1 kg/l

Propane = 0, 51 kg/l

Butane = 0, 58 kg/l

Le G.P.L. en phase liquide est deux fois plus léger que l'eau [14].

I.7 Utilisations de GPL :

Les ressources en hydrocarbures sont essentiellement composées d'hydrocarbures gazeux : le gaz naturel et le GPL.

Compte tenu des profils de production prévisionnels, les GPL constituent la ressource la moins entamée. S'agissant du marché national, de grandes possibilités d'utilisation des GPL existent pour tous les usages énergétiques. Cependant, hormis le butane qui a connu une très forte pénétration dans le secteur résiduel, le propane a été très faiblement utilisé dans les autres secteurs potentiels : transports, industrie, agriculture.

I.7.1. Source de chauffage :

Les appareils domestiques utilisés actuellement sont conçus pour s'adapter à l'utilisation de GPL. Une plus grande flexibilité, les aspirations de la clientèle et la recherche du rapport prix /qualité sont les facteurs principaux de l'évolution de ces appareils.

I.7.2. GPL dans la climatisation :

Il est utilisé pour la construction des réfrigérateurs et des climatiseurs (moyenne capacité)

grâce à sa détente d'absorption de la chaleur et de créer le froid.

I.7.3. GPL dans la pétrochimie :

18% des GPL sont consommés comme charge pétrochimique (production de l'éthylène qui est un produit phare de la pétrochimie). La demande globale pétrochimique de GPL enregistre un taux de croissance de 10%.

L'utilisation du butane est liée essentiellement à la fabrication du MTBE utilisé comme booster des essences en substitution au PTE.

I.7.4. GPL pour la production d'électricité :

Les rythmes attendus de la croissance de la demande mondiale en électricité dépasseraient largement ceux des autres formes d'énergies finales. Elle atteindra 21,2% en l'an 2010.

Les GPL pour la production d'électricité s'avère être une solution privilégiée par rapport aux autres combustibles (Charbon, Fuel...), et ce tant du point de vue économique qu'écologique.

I.7.5 GPL carburant :

La pollution de l'air et climat, le bilan écologique comparé des différents carburants attribue les meilleurs notes, et de loin au GPL, et au gaz naturel.

Si on les généralisait, on soulagerait bien plus l'environnement qu'en améliorant la qualité de l'essence et de diesel. Les autres carburants examinés n'apportent guère des avantages comparés à ces derniers.

Parfois même ils sont moins favorables, tel est le résultat d'une étude réalisée à la demande de l'OFEFP (Office Fédéral de l'Environnement des Forêts et du Paysages) intitulée éco profils des carburants [15].

Chapitre II :

Généralité sur le Gasoil

II.1 définition : le gasoil

Le diesel est un liquide inflammable qui est considéré comme un dérivé du pétrole, c'est-à-dire qu'il est extrait de l'huile elle-même. Le gasoil est utilisé comme carburant pour des moteurs spéciaux appelés moteurs gasoil, de sorte que le carburant gasoil a un pouvoir calorifique élevé par rapport à d'autres types de carburant. Combustibles fossiles, et fournit ainsi un couple puissant et économique en même temps. En outre, le carburant gasoil diffère des autres par la façon dont il est allumé à l'intérieur du moteur, car il s'enflamme en élevant sa température et non avec une étincelle directe comme c'est le cas avec l'essence.

II.2. Genèse du carburant gasoil :

Les origines du gasoil sont dues aux expériences menées par le scientifique et inventeur allemand "Rudolph Gasoil" pour le moteur à combustion-compression qu'il a inventé en 1892, et l'inventeur allemand a initialement conçu son moteur pour utiliser la poussière de "charbon" comme carburant.

Et essayez "Rudolph Gasoil" d'autres carburants, notamment des huiles végétales telles que l'huile d'arachide, qu'il utilisait pour faire fonctionner les moteurs, qu'il a exposées lors de l'exposition "Paris" en France en 1900 et à l'Exposition universelle de 1911, qui s'est également tenue à Paris.

applications industrielles nécessitant de l'énergie telles que les camions de transport, les bus, les bateaux, les machines agricoles, les trains et les grues [9].

II.3 comment obtenir du gasoil :

Le gasoil est obtenu en chauffant le pétrole brut à des températures comprises entre 200 et 350 degrés Celsius, il est donc plus lourd que l'essence, plus visqueux et moins évaporant, mais il contient plus d'énergie que l'essence, il est donc utilisé dans les camions, les bateaux et les gros équipements, qui explique la raison pour laquelle.

les moteurs diesel sont plus économes en carburant que les moteurs à essence, et il est également utilisé dans les générateurs d'électricité.

Le diesel est utilisé comme combustible de chauffage dans de nombreuses régions du monde, notamment au Levant et dans le nord-est des États-Unis, ce qui explique la forte demande de pétrole en hiver.

Il existe de nombreuses lois régissant la qualité du gasoil dans les pays industrialisés, car il contient une grande quantité de soufre, ce qui a entraîné une amélioration significative de la qualité du gasoil ces dernières années, notamment en le mélangeant avec du bio-gasoil, mais les pays arabes sont encore un peu en retard dans la production d'un gazole de qualité. Qualité et respect de l'environnement, d'autant plus que la teneur en soufre du gazole produit est encore élevée selon les normes internationales. [10].

II.4 Mécanisme de fonctionnement des moteurs gasoils :

Et les moteurs gasoils n'utilisent pas d'étincelle avec tension comme les moteurs à essence et à gaz liquéfié. Le moteur diesel comprime l'air à l'intérieur du cylindre à des pressions et des températures élevées, et le moteur pompe le gasoil directement dans le cylindre.

Les températures élevées à l'intérieur du cylindre font réagir le gazole avec l'oxygène du mélange

(combustion ou oxydation) et chauffent et dilatent le mélange brûlant pour convertir la différence chaleur/pression en effort mécanique pour déplacer le piston.

II.5 Caractéristiques du gasoil:

Le carburant gasoil est préparé à partir d'un des dérivés du pétrole brut, également appelé mazout, utilisé dans l'industrie ou à l'intérieur, et le mazout est plus cher.

Les moteurs gasoil plus gros qui peuvent fonctionner au gasoil lourd utilisent souvent un carburant moins cher.

Les caractéristiques du carburant affectent de manière significative les performances du moteur diesel, et ces caractéristiques sont généralement mesurées par certaines expériences destinées à démontrer les performances du carburant dans des cas de travail réels, mais ces expériences ne dispensent pas de choisir les performances du carburant après cela dans le moteur. Lui-même. [11].

Les caractéristiques importantes qui aident à l'allumage du carburant gasoil et qui affectent les performances du moteur sont les suivantes :

A- Type d'allumage :

C'est l'étendue de l'auto-inflammation du carburant à l'intérieur du cylindre du moteur, où le bon carburant s'enflamme de lui-même à des températures relativement basses, améliorant ainsi les performances du moteur pour la vitesse de démarrage du mouvement et moins d'exposition au cognement et à son production de fumée Cette caractéristique est considérée . [10].

L'une des caractéristiques les plus importantes du carburant pour moteur diesel, en particulier pour les moteurs à grande vitesse

Le carburant gasoil est classé en plusieurs types selon un nombre spécifique appelé indice de cétane, qui est similaire à l'indice d'octane utilisé pour indiquer le type d'allumage du carburant et le moteur à essence.

B- Volatilisation :

C'est la mesure dans laquelle le liquide est prêt à se transformer en vapeur. Il est mesuré par rapport au carburant d'un moteur diesel par la température à laquelle 90 % d'une certaine quantité de ce carburant est distillé. Ainsi, il devient plus volatil lorsque cette température est abaissée. Le carburant des petits moteurs gasoils doit être plus volatil que le carburant des gros moteurs pour réduire la consommation de carburant et la température d'échappement diminue ainsi que l'apparition de fumées.¹²

C- carbone résiduel :

C'est la quantité de résidus après avoir chauffé une certaine quantité de carburant dans un récipient fermé Et isolé de l'air après que toutes les parties volatiles du carburant se soient complètement évaporées. Cette procédure vise à connaître le pourcentage de composés lourds dans le carburant et les plus disposés à former des composés carbonisés au lieu de s'évaporer. Ainsi, la caractéristique du carbone restant indique la quantité de la capacité du carburant à former des dépôts de carbone sur les parties internes du moteur,

et la quantité de carbone restant dépend Les carburants autorisés dépendent fortement de la taille et de la vitesse du moteur Le carburant avec un pourcentage plus élevé de restes de carbone peut être utilisé dans les gros moteurs à bas régime , et avec un pourcentage inférieur de restes de carbone dans les petits moteurs à haut régime.¹³

d- Viscosité :

Il exprime la quantité de frottement interne dans un liquide ou la quantité de sa résistance à l'écoulement. La viscosité d'un liquide peut être déterminée par :

(1)- En degrés Engler (rapport entre le temps nécessaire à l'écoulement d'une certaine quantité de carburant et le temps nécessaire à l'écoulement d'une quantité égale d'eau pure, en utilisant l'appareil de mesure de la viscosité allemande Engler).

(2) - Par le nombre de secondes ou l'appareil américain Saybolt (la viscosité du carburant diminue lorsque le nombre de secondes nécessaires au débit de carburant diminue).¹⁴

La viscosité du carburant gasoil est mesurée avant son utilisation car elle détermine sa capacité à s'écouler à l'intérieur

Le système d'injection de carburant, où il ne doit pas être inférieur à une certaine limite, car le carburant gasoil est utilisé pour lubrifier les unités d'injection dans la pompe d'injection principale et les pièces des gicleurs, et la viscosité du carburant gasoil affecte grandement la forme de atomiser le carburant lorsqu'il sort de l'arroseur à l'intérieur de la chambre de combustion, ainsi le carburant le moins visqueux se voit attribuer une distance plus courte La longueur du spray et des atomes plus fins en taille pour le carburant court, ce qui facilite son mélange à l'air et donc sa bonne combustion.¹⁰

E- Quantité de soufre :

Les gaz issus de la combustion du soufre dans la composition du carburant se combinent à la vapeur d'eau condensée issue du processus de combustion du carburant, formant ainsi des acides nocifs qui provoquent la corrosion de certaines pièces du moteur et de l'ensemble de préparation des gaz d'échappement.Ce phénomène s'accroît lorsque le moteur fonctionne à charge partielle, ce qui réduit la température de surface du cylindre dans la mesure où une certaine quantité de vapeur d'eau se condense.

F- Quantité de cendres :

Il exprime la quantité de matériaux solides mélangés au carburant, tels que certains matériaux métalliques et les particules de sable qui provoquent une corrosion rapide de certaines parties du moteur.Par conséquent, il est impératif que le pourcentage du poids de ces matériaux ne dépasse pas une très petite quantité autant que possible. Il est généralement mesuré en brûlant une certaine quantité de combustible, puis le poids de la quantité de cendres restantes de la combustion et son pourcentage par rapport au poids d'origine du même combustible et la quantité de cendres peut être réduite de distillation fine du carburant.¹⁴

G - Quantité d'eau et d'impuretés :

C'est la quantité d'eau ou d'impuretés mélangées au carburant, qui entraîne une réduction de la qualité de la combustion du carburant et provoque la corrosion et la rouille des pièces de la pompe d'injection.

H- Le degré (point) du flash :

Elle est définie comme la température à laquelle le combustible commence à s'évaporer en quantité combustible pour s'auto-enflammer sous forme d'éclair lorsqu'une source de chaleur s'en approche.

Chaque carburant a son propre point d'éclair pour éviter les incendies lors du transport ou du stockage. Le carburant avec un point d'éclair très faible est plus dangereux lorsqu'il est transporté ou stocké. Le degré ou le point d'éclair n'indique pas la méthode de combustion du carburant à l'intérieur du moteur, car la combustion dépend du type de caractéristique d'allumage, alors notez que le carburant essence (Il a un point d'éclair très bas) Il ne convient pas comme carburant pour les moteurs gasoils en raison de sa mauvaise caractéristique de type d'allumage.

I- Degré de point d'écoulement :

C'est la température à laquelle le carburant commence à geler ou à coaguler, car elle indique son aptitude à être utilisée dans des moteurs fonctionnant dans des climats très froids. Un carburant à point d'écoulement élevé n'est généralement pas adapté à une utilisation dans ces atmosphères car, dans ce cas, il n'est pas facile à couler dans le groupe d'injection de carburant.

J- Poids spécifique :

C'est le rapport entre le poids d'un volume spécifique de carburant et le poids d'un volume spécifique égal à celui-ci d'eau pure. Il indique approximativement les différents types de carburant qui sont divisés en lourds avec des poids spécifiques et légers avec des poids spécifiques faibles. Certains types de carburant peuvent être égaux dans leurs poids spécifiques, mais ils diffèrent considérablement en degré

La viscosité et les caractéristiques du type d'allumage sont les deux propriétés les plus importantes du carburant gasoil.

Le poids spécifique du carburant est étroitement lié à sa valeur calorifique, et le poids spécifique du carburant peut être mesuré par un appareil spécial appelé hydromètre.

K- pouvoir calorifique :

La valeur calorifique du carburant est l'une de ses caractéristiques importantes, car il est possible de déterminer la quantité d'énergie thermique donnée au moteur, et ainsi la capacité du moteur à convertir cette énergie thermique en travail utile peut être connue. est mesuré par plusieurs tests coûteux, et puisque la valeur calorifique d'un carburant est quelque peu proportionnelle à son poids spécifique Par conséquent, il est courant d'utiliser le poids spécifique d'un carburant pour déduire sa valeur calorifique.

L - Indice de cétane :

Les unités appelées indice de cétane sont utilisées pour déterminer le type d'allumage du carburant gasoil, et l'indice de cétane du carburant gasoil indique le pourcentage de la quantité de cétane présent dans un

autre carburant qui est un mélange de carburant cétane (a la caractéristique d'un allumage plus court période) et un autre composé de composés hydrocarbonés, l'alpha-méthyl naphthalène. .

(Il a la période d'allumage la plus longue) Lorsqu'il est mélangé, ce mélange peut être égal au premier carburant dans la caractéristique de type d'allumage. Le gradient de l'indice de cyanure commence généralement de zéro, qui représente la caractéristique de type d'allumage du carburant alpha-méthyl naphthalène, à 100, qui représente la caractéristique de type d'allumage du carburant cyanure uniquement. Ainsi, si l'indice de cyanure du gazole est de 45, cela signifie que ce carburant a une caractéristique de type d'allumage qui est égale à un mélange carburé composé de 45 % de cétane et 55 % d'alpha méthyl naphthalène.¹⁴

II.6 Avantages du carburant gasoil :

- Taux de compression élevé

Le gasoil a un taux de compression plus élevé que l'essence.

Le carburant gasoil fonctionne par compression contrairement à l'essence à allumage par étincelle, de sorte que le taux de compression élevé assure une combustion complète du carburant et une plus grande efficacité.

Les véhicules à carburant gasoil sont conçus pour parcourir de longues distances, en fonction de leurs propriétés physiques. C'est donc une option importante pour les véhicules lourds qui doivent parcourir ces distances compte tenu de la rareté des stations-service.

- Carburant à forte densité énergétique

Le carburant gasoil génère plus de couple car il génère plus de puissance que l'essence.¹⁵

- Combustion lente

Les véhicules plus lourds utilisent plus d'énergie pour les déplacer, et la combustion lente du carburant gasoil garantit que cette énergie est fournie sous forme de couple au véhicule même à basse vitesse.

Cette caractéristique rend le carburant gasoil adapté aux véhicules lourds, car ces véhicules doivent faire face à leur propre poids et à un terrain parfois accidenté.

II.7 Inconvénients du carburant gasoil :

Le carburant gasoil présente de nombreuses caractéristiques et avantages, mais certains défauts des moteurs gasoils les rendent inadaptés aux petites voitures.

- Niveaux élevés de bruit, de vibrations et de rudesse

En raison de leur taux de compression élevé, les moteurs gasoil émettent des sons et des vibrations aigus. Cela peut ne pas sembler être un problème dans les véhicules lourds en raison de leur taille massive, mais ce ne serait certainement pas souhaitable dans les voitures et les petits véhicules.

De nombreux constructeurs automobiles ont développé des moteurs gasoil à utiliser dans leurs différents véhicules tels que les jeeps, les SUV et autres.

- Coût d'entretien élevé

Les machines très vibrantes peuvent fonctionner plus rapidement et plus efficacement, mais cela affecte leur durée de vie réelle et elles tombent en panne avant la fin de leur durée de vie. C'est ce qu'on appelle une panne ou «fatigue», et leurs moteurs doivent être conçus pour résister à des niveaux élevés de bruit, de vibrations et de dureté (NVH).

Ces problèmes augmentent dans une large mesure le coût d'entretien de ces moteurs, ce qui les rend inadaptés aux petites voitures dont les propriétaires recherchent un transport économique et des économies de dépenses.

➤ Problèmes d'émissions et de pollution de l'environnement

Avec leur rendement élevé, les moteurs gasoil émettent plus d'émissions d'azote que les moteurs à essence qui peuvent être contrôlés par le système d'échappement, et ces émissions affectent le système respiratoire.

Les moteurs gasoils de plus de dix ans émettent plus d'émissions que les moteurs plus jeunes, ce qui a conduit de nombreux gouvernements à les interdire pour éviter ces problèmes, et donc les moteurs gasoils ne sont pas souhaitables dans les petites voitures.¹⁶

Chapitre III : Les Moteurs

Diesel

II.1 Introduction :

Un moteur Diesel fonctionne différemment d'un moteur à essence. Même si leurs principaux organes sont semblables et s'ils respectent le même cycle à quatre temps, un moteur diesel et un moteur à explosion présentent des différences sensibles, en particulier dans la façon dont le mélange carburé y est enflammé et dans la manière dont la puissance délivrée y est régulée. Dans un moteur à essence, le mélange carburé est enflammé par une étincelle électrique. Dans un moteur diesel, l'allumage est obtenu par une auto-inflammation du carburant à la suite de l'échauffement de l'air sous l'effet de la compression.

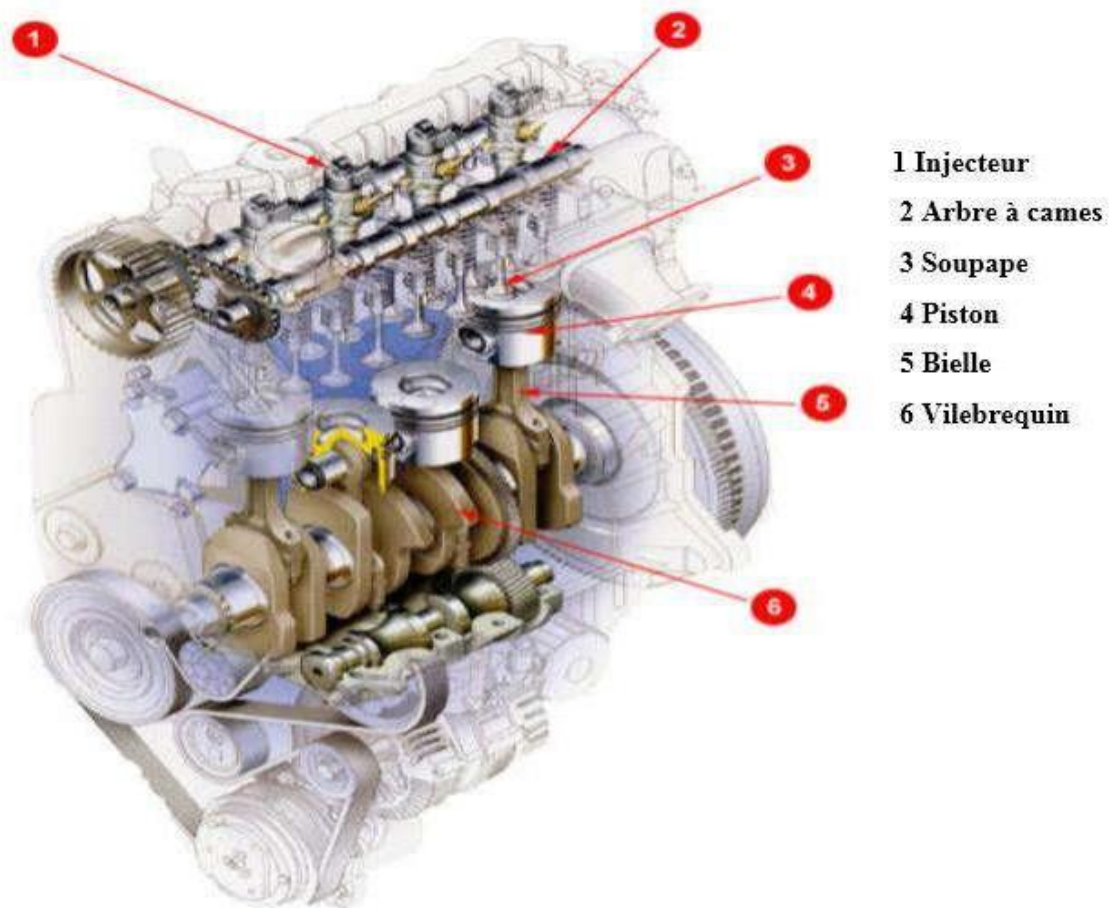


Figure III.1: Schéma d'un moteur Diesel à injection direct

Un moteur à combustion interne fut conçu dès 1678 par le scientifique hollandais Christiaan Huygens. Cependant, il ne fut effectivement construit que beaucoup plus tard. Depuis la carriole motorisée du Suisse Isaac de Rivas en 1805, en passant par la voiture construite par Étienne Lenoir à Paris en 1863 et fonctionnant au gaz d'éclairage, il a fallu attendre le milieu des années 1880 pour que le moteur à combustion interne puisse être utilisable dans un véhicule destiné au transport des personnes. En 1862, le Français Beau de Rochas inventa le premier cycle à quatre temps.

En 1866, les deux ingénieurs allemands Eugen langent et August Otto, mirent au point un moteur à gaz et, en 1876, Otto construisit un moteur à quatre temps, à l'origine de la plupart des moteurs à combustion

interne ultérieurs. [1]

III.2 Rappel historique du moteur Diesel :

Le moteur Diesel qui équipe les automobiles que nous connaissons à ce jour est le fruit d'une évolution constante. Cette évolution a subi des accélérations en fonction de circonstances telles que le premier choc pétrolier et l'apparition des normes antipollution.

1897: Le premier moteur conçu par un ingénieur thermicien, Rudolf Diesel fonctionne en Allemagne. Il résulte de travaux théoriques destinés à améliorer le rendement thermodynamique. Ce moteur, qui a un rendement de 26,2%(comparé aux 20 % du moteur à essence de l'époque), développe une puissance de 27 KW.

1936 : Mercedes produit en petite série la première voiture à moteur Diesel, la 260D. 1938 : Peugeot réalise une série d'un millier de modèle 402 Diesel.

1973 : La crise pétrolière favorise la généralisation des voitures à moteur Diesel.

1988 : Fiat produit la première voiture de série équipée d'un moteur à injection directe.

1989 : Audi présente la première voiture équipée d'un moteur à injection directe à régulation électronique.

1998 : Premières applications de l'injection directe à rampe commune réalisée par Bosch sur des véhicules de série.

2000 : Plusieurs constructeurs européens produisent une version de leur véhicule de prestige équipé d'un moteur V8 Diesel à injection directe à rampe commune.

III.3 Les type de moteur Diesel :

Dans le monde actuel il existe trois types de moteur Diesel :

III.3.1 Moteurs à injection indirecte :

Pour qu'un moteur à combustion interne fonctionne avec régularité et ait un bon rendement, le carburant et l'air doivent être correctement mélangés. Les problèmes posés par le mélange air-carburant sont particulièrement compliqués dans un moteur Diesel, car ces composants y sont introduits dans les cylindres à des moments du cycle différents. Il existe deux types d'injection l'injection directe et l'injection indirecte. [2], [3]

Traditionnellement, c'est la solution de l'injection indirecte qui a été employée, car elle constitue le moyen le plus simple de créer une turbulence qui assure un mélange intime de la dose de carburant avec l'air déjà fortement comprimé dans la chambre de combustion. Aussi, dans un moteur à injection indirecte, le carburant n'est pas injecté directement dans la chambre de combustion principale, mais il est envoyé dans une petite chambre de turbulence en spirale (appelée aussi chambre de précombustion) où s'amorce en réalité la combustion voir (figure III.2).

L'inconvénient de ce système réside dans le fait que la chambre de turbulence est en fin de compte une annexe de la chambre de combustion, avec laquelle elle constitue un ensemble de forme peu propice à

l'obtention d'une combustion réellement totale et régulière, la figure III.2 démontre deux types de ces moteurs

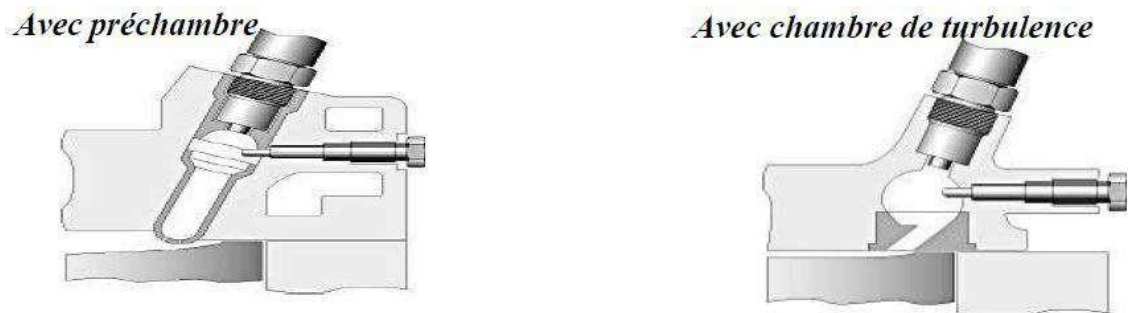


Figure III.2 : Les structures des préchambres de combustion

Dans ces deux cas, la combustion se déroule dans deux volumes séparés : une chambre, représentant 30 à 60% du volume total, qui reçoit l'injection du carburant et où s'amorce la combustion, et une chambre principale dans laquelle elle s'achève.

L'injection du carburant dans ce petit volume relativement chaud permet de réduire le délai d'allumage du combustible. Seule la quantité minimum de combustible nécessaire à l'amorçage de la combustion s'enflamme, le reste se trouve chassé de la préchambre par l'augmentation de pression et la combustion se poursuit dans la chambre principale. Les moteurs à injection indirecte remplissent les conditions requises pour son application à l'automobile, à savoir un relatif silence de fonctionnement et un faible taux d'émissions de NOx. Le second choc pétrolier en 1973 et les normes de dépollution toujours plus sévères ont amené les constructeurs à repenser le moteur Diesel en termes d'économie et de faible pollution.

Ces véhicules sont équipés d'une pompe injection rotative HP (haute pression) semi- automatique (ou un peu d'électronique) qui distribue le carburant successivement à chaque cylindre en ouvrant les injecteurs les uns après les autres par la pression du gasoil qui est d'environ 130 bar.

Inconvénients:

- Le réglage de régime de ralenti.
- La pollution effectuée par cette série de moteur.
- La consommation élevée de gasoil.

I.3.2 Les Moteurs à injection directe :

Le moteur à injection directe s'impose pour son rendement supérieur à ceux des moteurs à injection indirecte.

En effet, le rapport entre la surface et le volume de la chambre de combustion est nettement plus faible pour un moteur à chambre à espace mort unique (injection directe voir figure III.3) que pour un moteur à préchambre (injection indirecte voir figure III.2) ; de plus, la durée de la combustion est plus courte dans un moteur à injection directe.

Ces deux paramètres diminuent les échanges thermiques entre la chambre de combustion et le système de refroidissement, facteurs de perte de rendement les problèmes liés à l'injection directe sont de deux ordres : bruits de combustion et émission d'oxyde d'azote (NOx). [2], [3]

L'apparition de la régulation électronique dans les systèmes d'injection a permis de stabiliser et d'affiner les réglages de base, tant au niveau du moment d'injection que du débit de combustible. Ces différents systèmes d'injection mécaniques par pompe distributrice, régulés ou non de manière électronique, présentent comme caractéristique commune la variation de la pression d'injection en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Cette variation de pression d'injection rend difficile une maîtrise totale de la combustion.



Figure III.3 : L'injection directe

Les TDI dans le groupe W.W., les "anciens moteurs" 90 et 110 CV des Golf et Passat par exemple, les DTI chez Renault, et les TDDI (ou les transit) chez Ford, les Iveco et les Fiat TDI équipés des moteurs SOFIM sont des moteurs Diesel à injection directe (direct injection en anglais). Ils sont équipés d'une pompe injection rotative HP semi-automatique (avec des éléments électroniques et parfois même un calculateur). La pompe à injection distribue le carburant successivement à chaque cylindre en ouvrant les injecteurs les uns après les autres par la pression du gasoil mais l'injecteur injecte directement dans le cylindre. Leur pression d'injection est comprise entre 180 et 250 bars. Ces moteurs ne sont pas (en général) équipés de bougies de préchauffage, il n'est pas nécessaire de préchauffer le moteur pour démarrer ils sont par contre souvent équipés d'un Thermostat situé dans la pipe d'échappement pour réchauffer l'entrée d'air (au démarrage).

Avantage:

Consommation plus faible, très fiables, moins de ruptures des joints déculasses sur le Sofim.

Inconvénients:

Ils sont "assez bruyants" on les reconnaît à leur claquement particulier lié à la pression d'injection plus élevée et ils auraient eu du mal à remplir les conditions des lois anti-pollution futures (surtout les modèles sans turbo).

III.3 3 Moteurs à rampe commune et Injecteur Pompe :

Le système d'injection haute pression à rampe commune consiste à alimenter, à l'aide d'une pompe haute

pression pilotée électroniquement, une rampe commune (soit Common-rail en anglais) qui assure la fonction d'accumulateur du carburant. Cette rampe est connectée à des injecteurs qui assurent une pulvérisation très fine directement dans la chambre de combustion grâce à une pression comprise entre 1350 et 1400 bars (contre 900 bars pour une pompe d'injection normale).

Cette pulvérisation très fine permet d'améliorer la combustion pour plus du détail. [2], [4]

Contrairement aux systèmes à pompe distributrice, la pression d'injection est indépendante de la vitesse de rotation du moteur et demeure constante pendant la phase d'injection. Le pilotage de l'injection par un calculateur électronique laisse une grande latitude de programmation Aux motoristes. La quantité de combustible injecté peut être fractionnée pour réaliser un pré injection, ce qui permet De réduire les bruits de combustion et la formation de NOx.

Cette faible quantité de carburant (1 à 4 mm³) permet de préparer, par une augmentation de la Température et de la pression dans la chambre de combustion, l'inflammation du combustible lors de L'injection principale.

Les véhicules équipés de filtres à particules présentent une phase de nettoyage qui nécessite une Post-injection, rendue possible grâce au pilotage des injecteurs par un calculateur électronique.

Le pilotage par une électronique numérique de tous les paramètres de l'injection permet d'optimiser le Fonctionnement du moteur La réduction des émissions de rejets polluants est devenue une nécessité pour les constructeurs.

Le calcul de la pollution émise par un véhicule prend en compte la puissance fournie et non un pourcentage des gaz émis, ce qui favorise le moteur qui a le meilleur rendement.

Une des solutions pour atteindre cet objectif passe par une diminution de la consommation et par une maîtrise de la combustion.

Le moteur diesel à injection directe, alimenté par un système d'injection haute pression à gestion électronique, offre un rendement supérieur à tous les autres moteurs thermiques. Grâce à sa relative simplicité d'adaptation sur les moteurs existants, le système d'injection diesel haute pression à rampe commune constitue la solution actuelle la plus facilement industrialisable.

L'apparition de l'injection à rampe commune pour les moteurs diesel a ouvert un nouvel espace de liberté aux motoristes. Les progrès sur le plan du confort, de la Consommation et de la diminution de la pollution en sont les conséquences directes.

Les JTD du groupe Fiat, HDI du groupe PSA, DCI Renault, CDI Mercedes, D4D Toyota sont quant à eux des moteurs dits Commons rail C'est à dire qu'ils sont équipés d'une pompe rotative qui alimente un tube commun (rampe commun) et les injecteurs sont alimentés par ce tube, l'ouverture de chaque injecteur se fait par une électrovanne (source de panne) et un calculateur pour donner l'ordre aux injecteurs de s'ouvrir). Une technique Fiat qui a été transférée chez Bosch. (Dans le futur, les électrovannes devraient être remplacées par des systèmes piézoélectriques « électropneumatique » voir figure I -4).

Il y a une variante qui apparaît sur les moteurs plus petits (les Diesels Renault, PSA et Ford) développée par ex Lucas et maintenant Delphi qui remplace le tube par une sphère mais le fonctionnement est le même.

Le groupe VW complice avec leur TDI nouvelle formule: les 100 et 130 CV des Golfs et Passat qui eux sont équipés d'un système dit injecteur pompe c'est à dire qu'il n'y a plus de pompe rotative mais par contre la pompe est intégrée dans l'injecteur. Quand il y a panne on change le tout (sur un cylindre).



Figure III.4 : Injecteur piezo de Siemens

Leurs avantages :

Avec les deux systèmes ce sont des moteurs très puissants.

- Ils polluent moins surtout dans les phases transitoires d'accélération (tant que le calculateur fera bien son boulot).
- Les clients sont "captifs" on ne peut pas faire réparer n'importe où.
- L'introduction de l'électronique peut provoquer une infinité des pannes provenant de système de commande électrique.

III.4 Comment ça marche le moteur Diesel :

Le moteur diesel était considéré, jusqu'à une époque récente, comme un moteur bruyant, polluant et lourd, réservé en principe aux camions, camionnettes et taxis. Mais, avec l'avènement des Diesel légers, rapides et puissants et le raffinement de leurs systèmes d'injection, la situation a changé dans les années 1980. Le diesel a acquis ses lettres de noblesse. On le présente même parfois comme le moteur du futur. L'avantage principal du moteur Diesel par rapport au moteur à étincelle est son faible coût d'utilisation. Ce résultat est dû en partie au meilleur rendement du diesel - résultant du fait qu'il fonctionne avec un taux de compression élevé- en partie au prix inférieur du carburant par rapport à celui de l'essence, surtout en Algérie.

III.4.1 Le Principe:

Un moteur diesel fonctionne différemment d'un moteur à essence. Même si leurs principaux organes sont semblables et s'ils respectent le même cycle à quatre temps, un moteur diesel et un moteur à explosion présentent des différences sensibles, en particulier dans la façon dont le mélange carburé y est enflammé et dans la manière dont la puissance délivrée y est régulée. Dans un moteur à essence, le mélange carburé est enflammé par une étincelle électrique. Dans un moteur Diesel, l'allumage est obtenu par une auto-inflammation du carburant à la suite de l'échauffement de l'air sous l'effet de la compression. Un rapport volumétrique normal est de l'ordre de 20 à 1 pour un moteur diesel (alors qu'il est de 9 à 1 pour un moteur à essence). Un tel taux de compression porte la température de l'air dans le cylindre à plus de 450 °C. Cette température étant celle de l'auto-inflammation du gasoil, celui-ci s'enflamme spontanément au contact de l'air, sans qu'il y ait besoin d'une étincelle, et, par conséquent, sans système d'allumage.

Un moteur à essence admet une masse de mélange carburé variable d'un cycle à l'autre en fonction de l'ouverture du papillon des gaz. Un moteur Diesel, au contraire, aspire toujours la même masse d'air (à régime égal) par un conduit de section constante dans lequel seule s'interpose la soupape d'admission (il n'y a ni carburateur, ni papillon). A la fin de la phase d'admission, la soupape d'admission se ferme, puis le piston, soumis à l'inertie de l'ensemble vilebrequin-volant moteur, remonte vers le haut du cylindre en comprimant l'air dans environ 1/20 de son volume initial. C'est à la fin de cette phase de compression qu'une quantité précisément dosée de carburant (gasoil) est injectée dans la chambre de combustion. En raison de la température élevée de l'air comprimé, ce carburant s'enflamme immédiatement et les gaz chauds, en se dilatant, repoussent le piston avec force. Quand le piston remonte dans le cylindre, lors de la phase d'échappement, la soupape d'échappement s'ouvre pour laisser les gaz brûlés et dilatés s'évacuer dans le système d'échappement.

A la fin de la phase d'échappement, le cylindre est prêt à admettre une nouvelle charge d'air frais afin que le cycle complet recommence.

III.4.2 Les Temps de la Combustion :

Le fonctionnement est fait temps par temps dans chaque cylindre nous avons donc :

1er Temps L'admission:

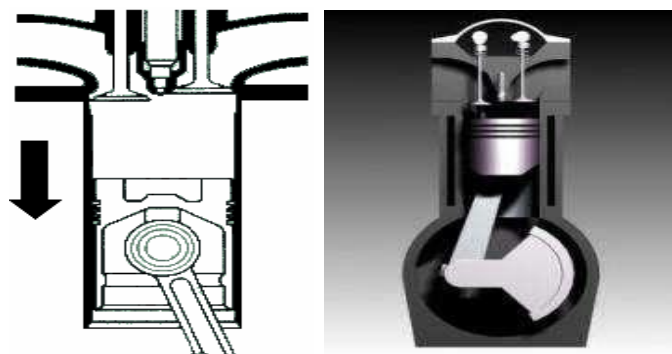


Figure III.5 :L'admission d'air

La soupape d'admission s'ouvre alors que le piston descend du point mort haut au point mort bas. L'air poussé par la pression atmosphérique entre dans la culasse.

2ème Temps La compression:

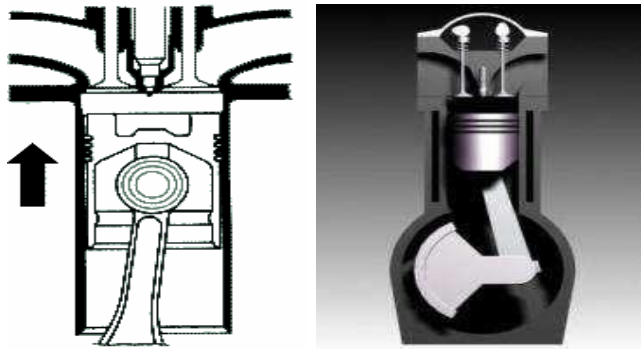


Figure III.6 : La compression d'air

Les deux soupapes sont fermées; le piston monte du point mort bas au point mort haut. Il comprime alors l'air admis dans le cylindre lors du temps précédent. L'air contenu dans le cylindre est porté à une température d'environ, 440°C par le fait qu'on le comprime.

3ème Temps L'explosion ou temps moteur :

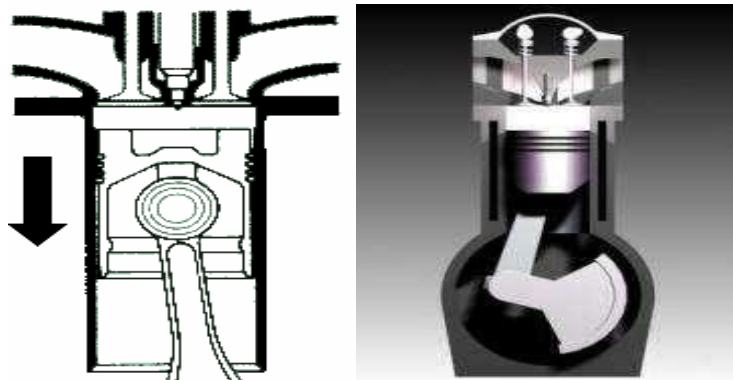


Figure III.7 : L'explosion

Lorsque le piston arrive au point mort haut le gasoil est introduit sous pression dans le cylindre. La haute température de l'air comprimé provoque l'inflammation spontanée du carburant ce qui repousse le piston vers le bas.

4ème Temps L'échappement:

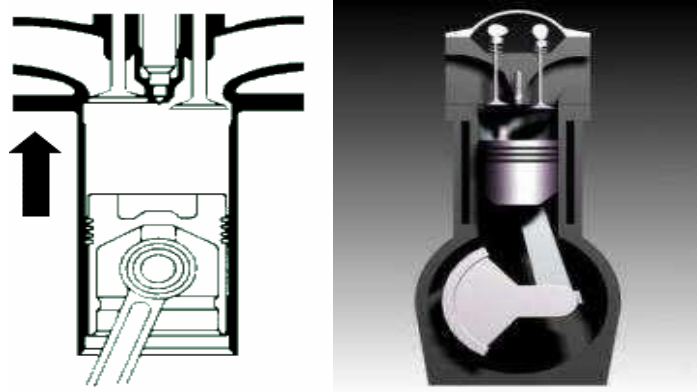


Figure III.8 : L'échappement

La soupape d'échappement s'ouvre alors que le piston remonte du point mort bas vers le point mort haut, les gaz brûlés sont alors chassés par le piston.

III.4.3 Le Démarrage d'un moteur Diesel:

Comme les moteurs à essence, les moteurs Diesel sont lancés par un moteur électrique (démarreur) qui amorce le cycle compression-inflammation.

A froid, cependant, les Diesel sont difficiles à démarrer. Pour faciliter le départ à froid on élève la température des parois de la chambre de combustion et de l'air admis, les Diesel sont équipés de bougies de préchauffage. Ces organes, qui ressemblent à des bougies d'allumage mais qui sont plus courts et plus épais, sont connectés à l'alimentation électrique du véhicule; ils comprennent une résistance intérieure qui s'échauffe très rapidement dès qu'elle est mise sous tension. Les bougies de préchauffage sont mises en fonction par la clé de contact-démarrage-antivol. Sur les moteurs les plus récents, elles sont mises automatiquement hors circuit dès que le moteur est lancé et accéléré au-dessus de son régime de ralenti.

Ce problème de démarrage à froid a au moins deux raisons, d'une part, ils opposent, du fait de leur taux de compression élevé, une forte résistance à l'entraînement, d'autre part, la seule compression de l'air froid ne permet pas d'atteindre une température suffisamment élevée pour que le carburant s'enflamme spontanément. Le contrôle du régime.

Le contrôle du régime Un moteur Diesel n'est pas régulé comme un moteur à essence, car la masse d'air aspirée à chaque cycle y est toujours la même quel que soit l'effort qui lui est demandé. Le régime du moteur est uniquement régulé par la quantité de carburant pulvérisé dans la chambre de combustion une quantité supérieure de gasoil injecté donne une combustion plus vive et produit une force plus importante. La pédale d'accélération est reliée au dispositif de dosage (le régulateur) du système d'injection et non pas, comme dans un moteur à essence, à un papillon d'admission d'air. Si l'arrêt d'un Diesel s'obtient maintenant par la manœuvre d'une clé semblable à une clé de "contact", il s'agit de couper non pas un circuit assurant la production d'étincelles, mais un circuit assurant l'alimentation électrique d'une

électrovanne qui contrôle l'arrivée de carburant à la pompe d'injection du système de dosage et de distribution.

III.4.4 Le Cycle du Diesel :

C'est le cycle de fonctionnement des moteurs à allumage par compression.

Le cycle théorique se compose d'une détente isobare, d'une détente adiabatique et d'une transformation isochore).

Dans les débuts, le cycle de fonctionnement comportait une phase théorique de combustion à pression constante, comme Rudolf Diesel en avait eu l'idée. Pour un fonctionnement à quatre temps du moteur, c'est à dire pour un cycle se déroulant pendant deux tours de vilebrequin et quatre courses du piston, les opérations à réaliser étaient les suivantes :

Introduction de l'air dans le cylindre (par aspiration naturelle ou mécanique au moyen d'un compresseur).

compression de la charge d'air et, allumage spontané de ce combustible.

combustion du mélange à pression presque constante, suivie de la détente proprement dite des gaz brûlés, avec production de travail.

Expulsion mécanique des produits de la combustion par l'action de poussée du piston pendant sa remontée. Le rendement thermique était caractérisé par les valeurs de deux rapports caractéristiques.

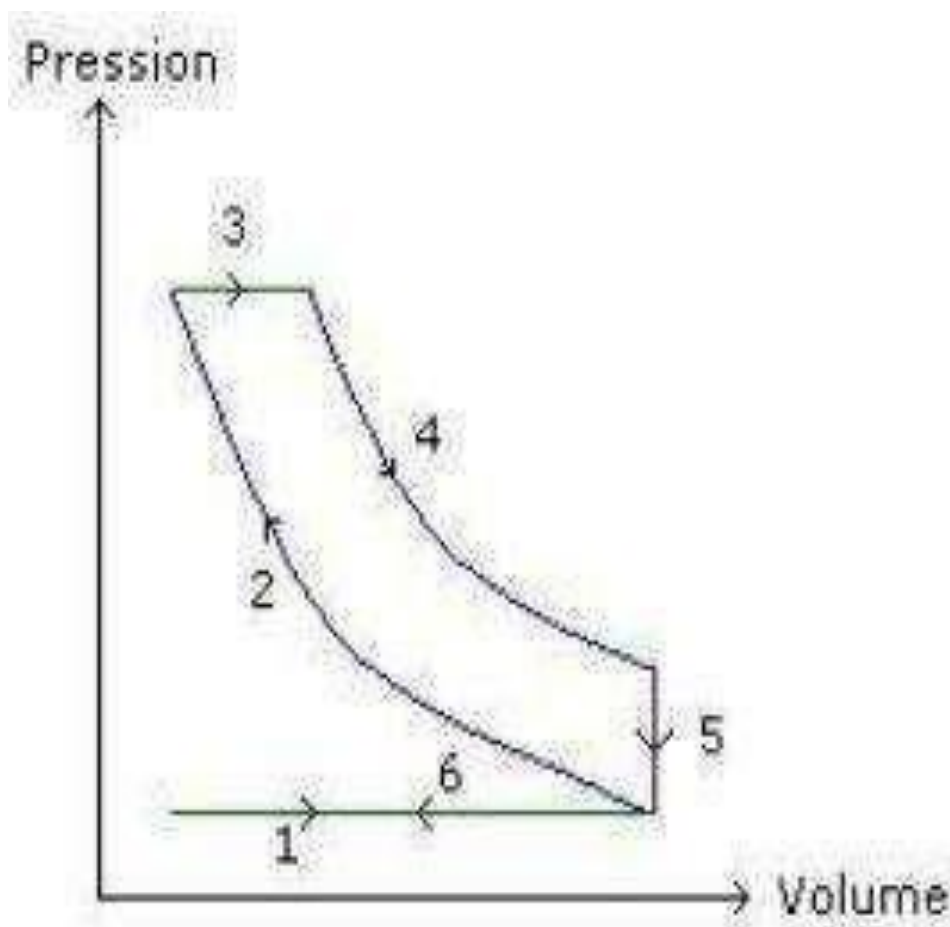


Figure III.9 : cycle diesel théorique

Chapitre IV : Travail expérimental

IV.1.Introduction:

Le bi carburant est une technologie utilisée dans les moteurs à combustion interne, permettant un fonctionnement avec deux types de carburant différents, le carburant principal est l'essence ou le diesel et l'autre est un carburant alternatif tel que le gaz de pétrole liquéfié ou l'hydrogène.

Un système à double carburant se compose de deux circuits d'alimentation en carburant séparés, reliés au moteur par des injecteurs ou un carburateur à sélecteur. Le passage d'un carburant à un autre se fait à l'aide d'une clé située sur le tableau de bord de la voiture manuellement ou automatiquement.

L'utilisation des bi-carburants présente de nombreux avantages, notamment la réduction des émissions polluantes et l'économie de carburant grâce à la possibilité de choisir entre deux sources d'énergie en fonction du coût et des performances. Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude du bi-carburant l'essence /GPL.

Dans cette étude, plusieurs expériences ont été examinées pour mieux comprendre le sujet. L'une de ces expérimentations a été réalisée à l'aide d'un banc d'essai comprenant un bloc moteur essence quatre temps monocylindre, un système de ravitaillement en GPL, un analyseur de gaz d'échappement et divers équipements de mesure. Le moteur d'essai consistait en un moteur à allumage commandé couplé à un alternateur. L'incertitude sur la puissance de sortie a été calculée à $\pm 0,3$ W.

V.2. Fonctionnement à carburant diesel et GPL:

Tous les moteurs à combustion interne (CI) fonctionnent selon le même processus de base. Un mélange combustible est d'abord comprimé en petit volume entre la tête du piston et le cylindre qui l'entoure. Le mélange est ensuite mis à feu et les produits de combustion à haute pression qui en résultent poussent la vapeur à travers le cylindre. Il existe deux méthodes d'allumage utilisées dans les moteurs à CI alternatifs, l'allumage par compression (CI) et l'allumage par étincelle (SI). Le mode de fonctionnement actuel du moteur diesel est par la méthode d'allumage par compression, où l'air d'admission seul est comprimé et à la fin de la course de compression le carburant diesel est directement injecté à haute pression sur le com l'air comprimé à l'intérieur de la chambre de combustion qui s'enflamme facilement en raison de sa température d'allumage. Mais le moteur GPL-diesel à double carburant utilise le concept de l'allumage par compression et du principe d'allumage à étincelle pour brûler le mélange de combustible gazeux primaire (GPL) et de carburant pilote liquide .

Dans le cas d'un moteur GPL-diesel à double carburant, le mélange air-GPL de l'admission est aspiré dans le cylindre, comme il serait dans un moteur à allumage par étincelle et ce mélange est comprimé afin d'augmenter la température et la pression. A la fin de la course de compression, le mélange est mis à feu par injection d'une petite quantité de carburant diesel pilote comme indiqué dans la Fig.V.1. Cette injection pilote agit comme source d'allumage. Le mélange gaz-air GPL à proximité du jet de

diesel injecté s'enflamme en plusieurs endroits, créant un certain nombre de fronts de flammes. La combustion démarre ainsi rapidement et en douceur. Il est intéressant de noter que dans un moteur à double carburant, la combustion démarre d'une manière semblable au moteur CI mais se propage par fronts de flamme, c.-à-d. d'une manière similaire au moteur SI. La puissance du moteur est normalement contrôlée en modifiant la quantité de carburant gazeux primaire GPL ajoutée au collecteur d'admission. La quantité de carburant diesel utilisée varie selon le moteur et ses paramètres de conception, et généralement la quantité de diesel pilote nécessaire pour l'allumage est comprise entre 10 % et 20 % du fonctionnement sur le carburant diesel seul à des charges normales. La fraction massique du GPL utilisé en mode bicarburant est calculée à l'aide de l'expression suivante, 'Z' :

$$Z = \frac{m_{LPG}}{m_{diesel} + m_{LPG}} \times 100 \%$$

où m(Diesel) est le débit massique du diesel et m(GPL) est le débit massique du GPL. Et $z = 0 \%$ représente le fonctionnement du diesel, $z = 10 \%$, 20% , 30% et 40% représentent la fraction de masse du GPL utilisée en mode à double combustible.

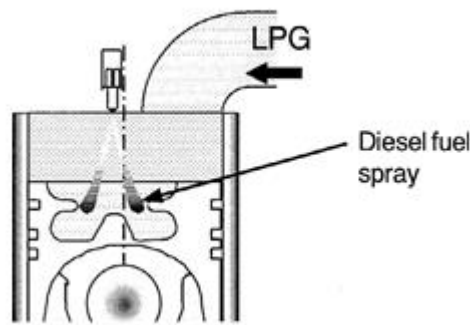


Figure IV.1: Moteur diesel à double carburant GPL

IV.3. Processus de Combustion du moteur à double carburant GPL-diesel:

Le processus de combustion du moteur diesel pur se déroule en quatre étapes, appelées retard d'allumage, combustion rapide, combustion contrôlée et période après la combustion. Considérant que le processus de combustion du moteur à GPL double carburant partage les caractéristiques de combustion des moteurs SI et CI et se compose de cinq étapes tout au long du processus de combustion du monocylindre Ricardo E6 comme indiqué dans la figure V.2. Les étapes sont un retard d'allumage pilote (AB), prémélange pilote (BC), retard d'allumage du combustible primaire (GPL) (CD), combustion rapide du combustible GPL (DE), période après combustion (EF).

La période de retard d'allumage (AB) est plus longue que le fonctionnement du combustible pur en raison de la réduction de la concentration de l'oxygène d'admission, résultant de l'introduction du GPL avec l'air d'admission et en partie due au changement de la chaleur spécifique du mélange comprimé qui a entraîné une baisse de la température de compression. La combustion prémélangée

pilote (BC) conduit à produire la petite flamme, qui est d'abord initiée par la petite quantité de diesel et la combustion augmente la pression en douceur. Le combustible primaire (GPL) utilisé dans le processus de compression subit des réactions chimiques de pré allumage conduisant à un retard d'allumage primaire (CD) où la pression commence à diminuer pendant cette période et son taux est très faible. La phase de combustion rapide (DE) est très instable, car elle a commencé par la propagation de flamme qui a été initiée par l'allumage spontané du carburant diesel pilote. Dans un premier temps, la pression est augmentée principalement par la combustion pré mélangée d'une partie ou de l'ensemble du diesel pilote en plus de la combustion d'une petite partie du gaz GPL entraîné. Puis encore la pression est augmentée à son niveau maximum en raison de la combustion de la majeure partie du carburant gazeux GPL et une petite quantité du pilote restant diesel dans le cylindre. La période après l'étape de combustion (EF) commence à la fin de l'augmentation rapide de pression et se poursuit bien au-delà de la course d'expansion. Cela est dû au taux de combustion plus lent du GPL et à la présence de diluants provenant du carburant pilote. Le succès de cette phase dépend principalement de la durée du délai d'allumage.

Cependant, le processus de combustion présente aussi généralement des risques de claquement et de raté- ment lorsque le pourcentage de GPL introduit est augmenté. Il faut donc tenir compte de la masse du GPL utilisé à des charges plus élevées pour surmonter le choc et le défaut de mise en feu. Augmenter la quantité de carburant diesel réduit le choc moteur dans des conditions de haute performance. Pour les moteurs à double carburant fonctionnant au GPL, la pression maximale est toujours plus élevée que dans le cas du diesel, en raison de la combustion et de la chaleur supplémentaire dégagée par le combustible gazeux. Le rapport GPL plus élevé dans les modes à double carburant entraîne deux effets. Premièrement, la combustion pré mélangée et la vitesse de réaction de la flamme augmentent mais la combustion contrôlée par mélange pour le combustible liquide diminue. Deuxièmement, la quantité réduite d'injection pilote entraîne une taille plus petite des sources d'allumage, ce qui augmente le chemin que la flamme doit parcourir pour consommer tout le mélange pré mélangé dans la chambre

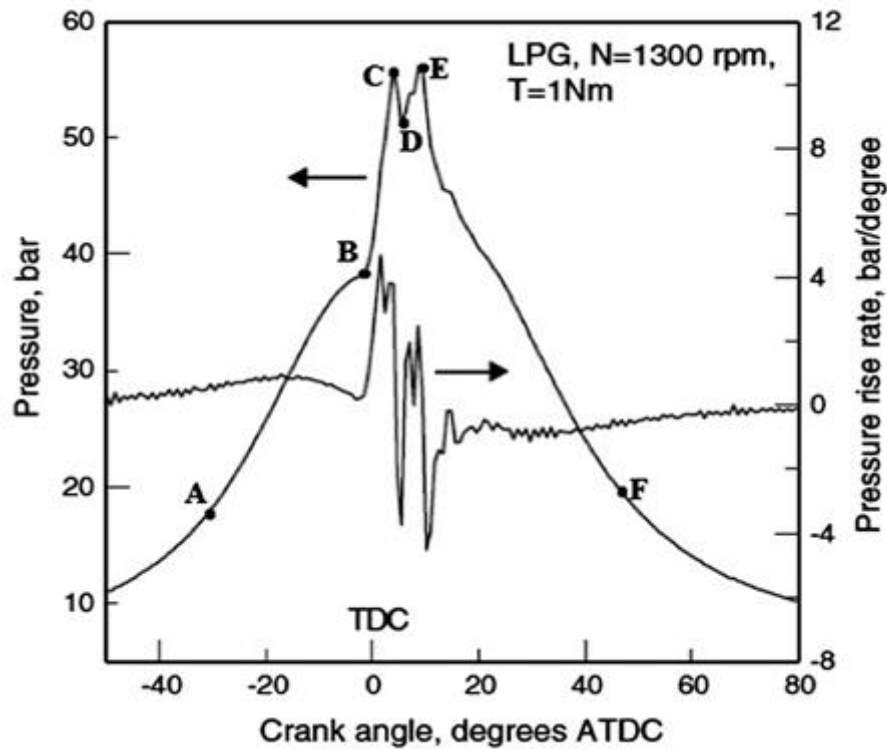


Figure IV.2: Taux de pression et d'augmentation de la pression de combustion typique par rapport à l'angle de manivelle du moteur diesel au GPL

Le taux de chaleur dégagée (ROHR) du combustible diesel à double carburant GPL indiqué dans la figure 3 pour un moteur monocylindre à régime constant montre qu'il y a trois phases importantes de combustion du processus de combustion, et elles sont une combustion pré mélangée du combustible diesel pilote, combustion pré mélangée du combustible primaire GPL et combustion par diffusion du carburant GPL et du carburant diesel pilote restant. La première phase est principalement due au carburant diesel pilote et une petite partie du GPL entraîné par le jet de diesel brûle avec le diesel. L'énergie thermique dégagée dans cette phase est principalement due au combustible diesel brûlé. La deuxième phase est due à la combustion d'une partie maximale du carburant GPL et d'une partie du reste du carburant diesel pilote. L'énergie calorifique dégagée lors de la phase de combustion du combustible GPL pré mélangé dépend de la quantité croissante de substitution du diesel pilote. Cela signifie que la quantité d'énergie thermique libérée par le GPL est plus grande lorsque sa quantité est augmentée. Par conséquent, le combustible gazeux brûle principalement pendant la deuxième phase de la combustion.

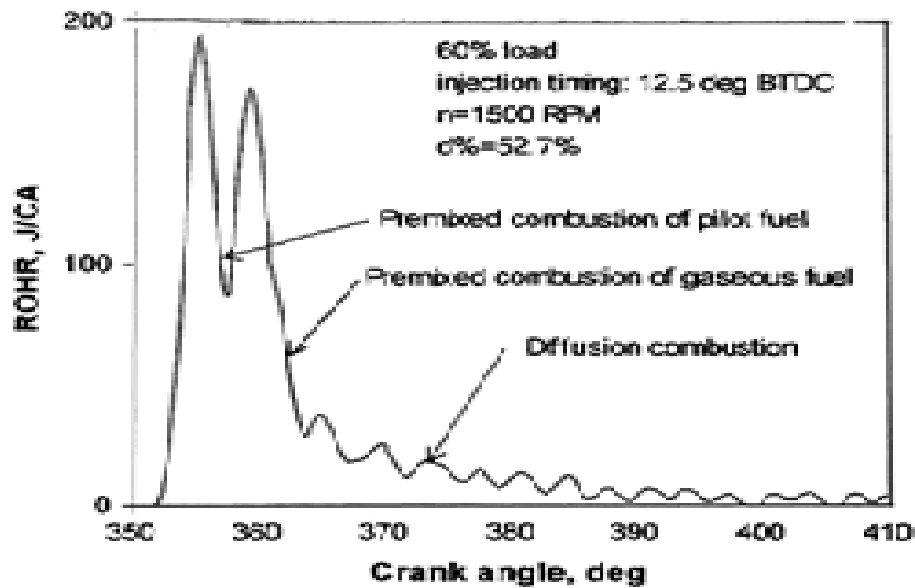


Figure IV.3 : Taux de dégagement de chaleur par rapport à l'angle d'une manivelle d'un moteur diesel à combustion à combustible double

Enfin, la troisième phase est due à la combustion des deux autres combustibles qui ne sont pas brûlés dans la dernière phase. La phase de combustion diffusion est due aux gouttelettes de diesel qui ne brûlent pas pendant la combustion pré mélangée ou qui sont injectées après le début de la combustion pré mélangée. Ces gouttelettes brûlent lentement et progressivement dans une phase liquide à l'intérieur du cylindre

IV.4 Caractéristiques de rendement, de combustion et d'émissions d'un moteur à double carburant GPL-diesel :

Les caractéristiques de performance et d'émissions du moteur diesel à double carburant GPL sont influencées par les paramètres de fonctionnement et de conception du moteur. Les effets sur des paramètres tels que les changements de régime moteur, la charge, la quantité de carburant pilote, le moment d'injection, l'état du collecteur d'admission et la composition des carburants gazeux d'admission sur les caractéristiques de performance, de combustion et d'émissions ont été étudiés. Beaucoup d'efforts de recherche ont été consacrés à la mise au point de mesures efficaces pour améliorer encore les caractéristiques de fonctionnement des moteurs diesel à double carburant GPL.

IV.4.1 Effet de la charge du moteur :



Les moteurs diesel et GPL à double carburant souffrent de problèmes tels qu'un mauvais rendement thermique des freins et des émissions élevées de HC, particulièrement en basse charge, et d'une meilleure efficacité thermique des freins en charge.

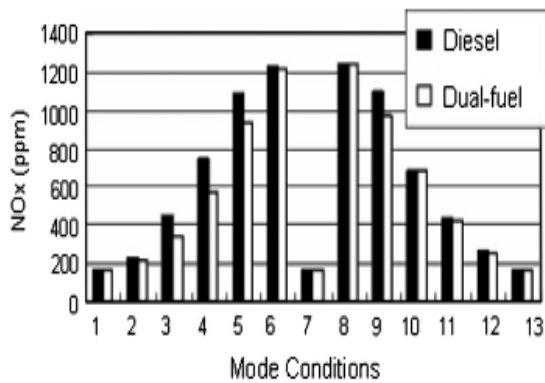


Figure IV.5 : Effet de la charge sur les émissions de NOx

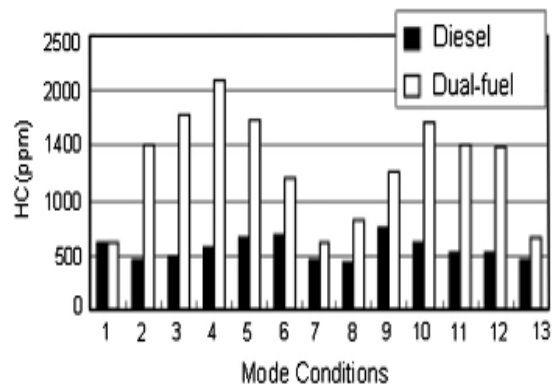


Figure IV.4 Effet de la charge sur les émissions de HC.

Les émissions de HC sont présentées dans la figure 8. Elles étaient extrêmement élevées, surtout lorsque le contenu en GPL était élevé et que la charge du moteur était légère. La raison probable de ce résultat est une température de réaction plus basse dans les chambres à des charges inférieures avec du carburant diesel-GPL. De plus, la teneur en GPL plus élevée à des charges inférieures tend à provoquer un retard d'allumage prolongé. Dans des conditions de charge très faible, comme le mode 2 et le mode 12, les émissions de HC en mode bicarburant étaient beaucoup plus élevées qu'en mode diesel malgré la teneur très faible en GPL dans cette condition. Les émissions de CO indiquées sur la figure V.6 étaient légèrement réduites à pleine charge, mais elles augmentaient considérablement dans les autres conditions de fonctionnement. En charge légère également, les émissions de CO du mode bicarburant étaient beaucoup plus élevées que celles du diesel malgré une très faible teneur en GPL dans cette condition de fonctionnement

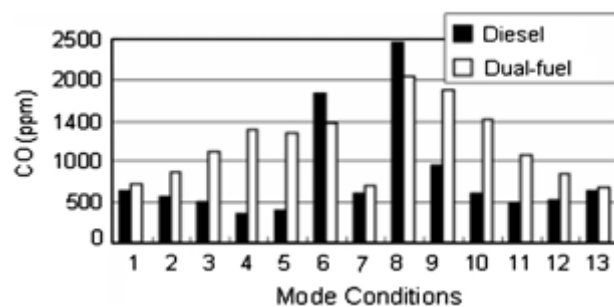


Figure IV.6 : Effet de la charge sur les émissions de Co

- Les faibles performances de charge partielle et les émissions peuvent être améliorées en modifiant les conditions de charge d'admission par diverses méthodes.
- Toutefois, l'augmentation des émissions de NOx provenant du remplacement du diesel diminue à la charge partielle et les particules diminuent considérablement pour toutes les charges d'exploitation.

-
- Les deux carburants produisent des niveaux de bruit plus élevés que le diesel simple, car la charge est augmentée en augmentant le carburant GPL avec un débit diesel fixe.
- La durée de combustion en mode bi-carburant est plus élevée que les valeurs diesel à faibles débits parce que le délai d'allumage est élevé. Il est toutefois inférieur aux valeurs du diesel à des rendements élevés.

IV.4.2 Effet du régime moteur :

- Augmenter le régime du moteur réduit le bruit de combustion pour le moteur à double carburant.
- Augmenter le régime moteur a entraîné une amélioration de l'efficacité thermique et de sa variation cyclique.
- Le taux d'augmentation de la pression diminue avec l'augmentation du régime moteur et est plus élevé que celui des moteurs diesel.

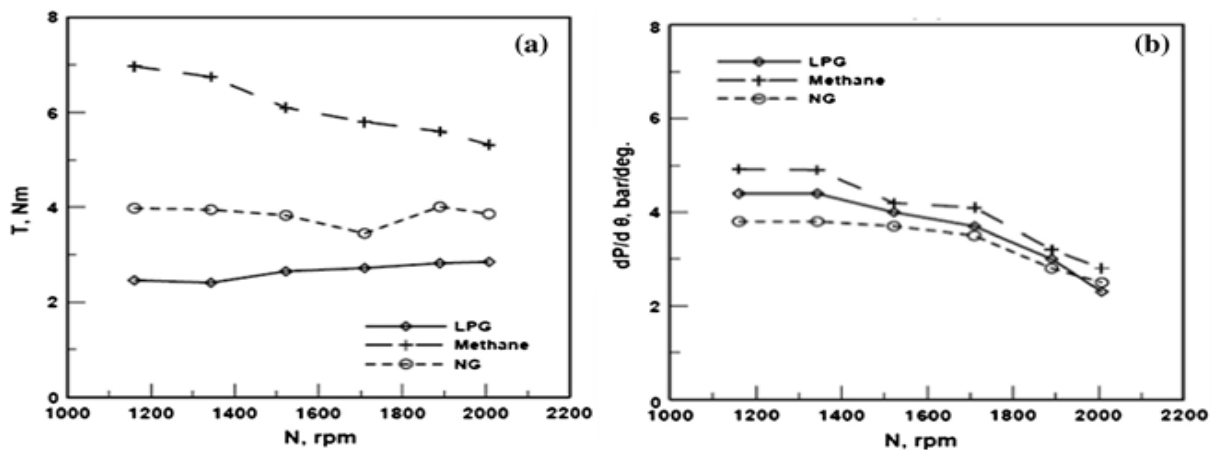


Figure IV.7 : Effets du régime moteur sur le couple (a) et le bruit (b); IT = 35 °BTDC, CR = 22, md = (0,37–0,47) kg/h

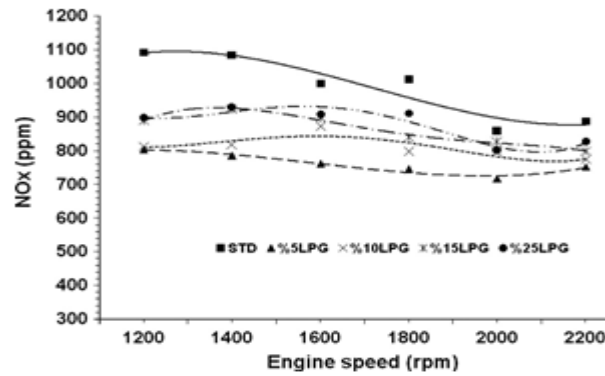


Figure IV.8 : Variation des émissions de NOx pour différents taux de GPL à différentes vitesses

IV.4.3 Effet de la quantité de carburant :

- Augmenter la quantité de carburant pilote augmente le couple de sortie, l'efficacité thermique et la pression maximale. Cependant, le bruit de combustion généré est plus élevé que dans le cas du monocombustible diesel pur.
- Le recours à des quantités pilotes élevées est très efficace pour réduire les niveaux de HC et de CO dans toutes les sorties.
- L'augmentation des émissions de NOx avec la quantité croissante de carburant pilote a été attribuée à une augmentation de la température maximale de la charge.
- Des quantités élevées de diesel pilote doivent être utilisées à faible rendement pour assurer une combustion correcte du carburant gazeux. Au fur et à mesure que la puissance augmente, la quantité de pilote doit être réduite pour contrôler la combustion

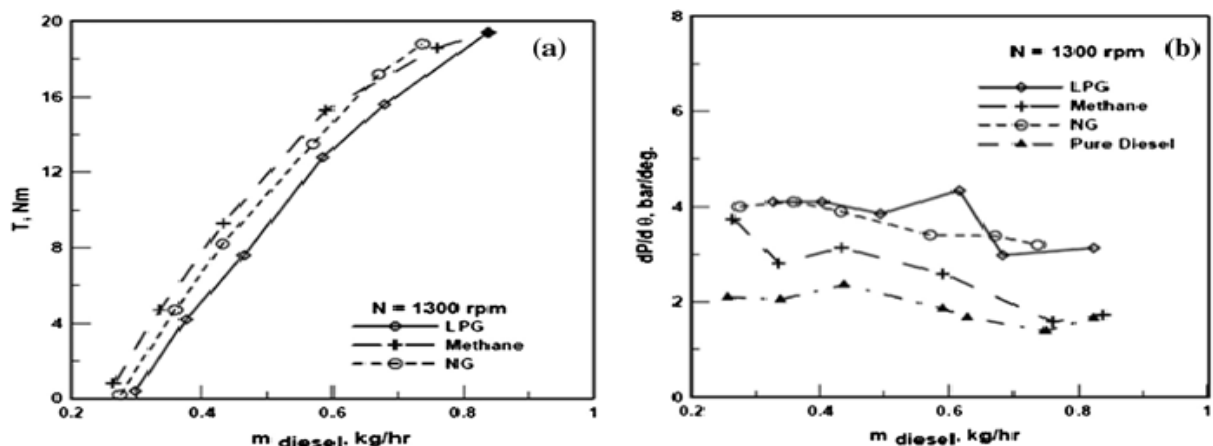


Figure IV.9 : effets de la masse du carburant pilote sur le couple (a) et le bruit (b); N = 1300 rpm, IT = 35°BTDC, CR = 22

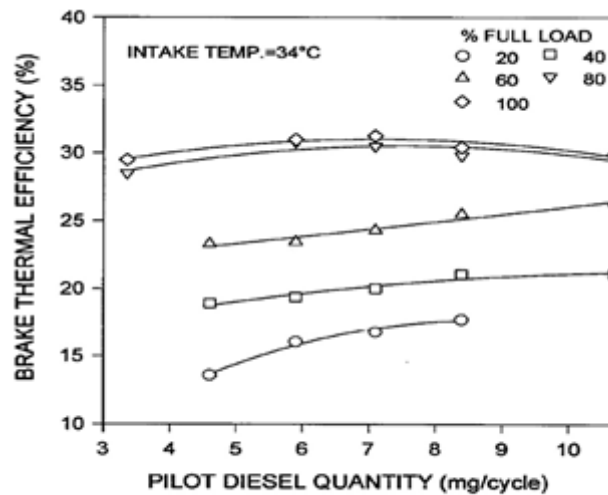


Figure IV.10 : Effet de l'efficacité thermique des freins par rapport à la quantité de carburant pilote

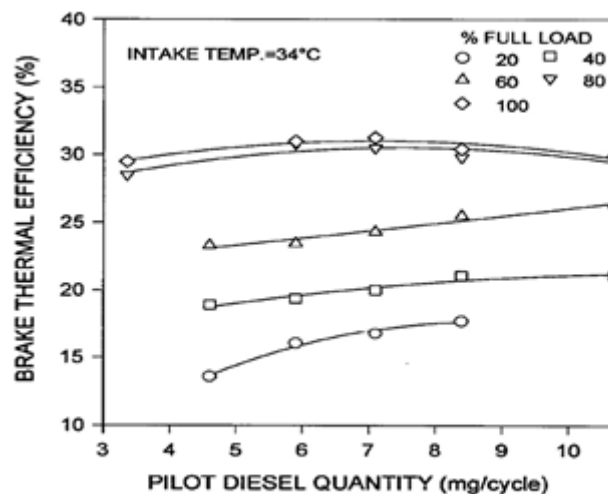


Figure IV.11 : Effet du taux de dégagement de chaleur pour la quantité pilote différente

IV.4.4 Effet du moment de l'injection :

- Une amélioration de l'efficacité thermique des freins est obtenue en augmentant le temps d'injection et l'opacité de la fumée, les émissions de HC et de CO diminuées.
- Pour le calendrier d'injection avancé, la température de pointe augmente; par conséquent, les émissions de NO_x seront plus élevées et on a également observé une réduction des émissions de HC et de CO en raison de l'augmentation de la température.
- Le fait d'avancer la synchronisation de l'injection du carburant pilote augmente le niveau sonore global du moteur et le niveau sonore de combustion. Les caisses à double carburant présentent des niveaux de bruit plus élevés que le diesel, surtout au moment de l'injection précoce.

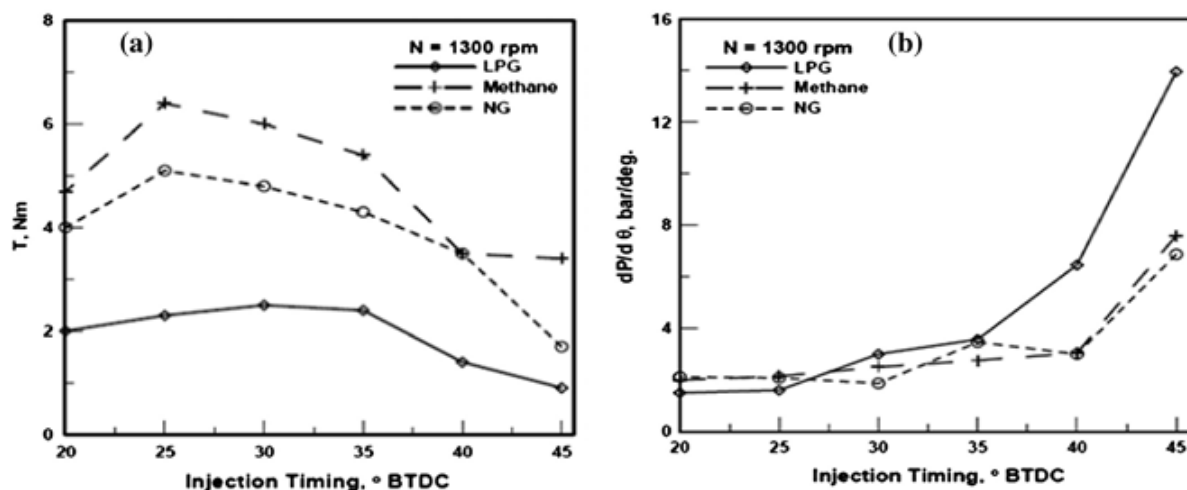


Figure IV.11 : Effets du moment d'injection du carburant pilote sur le couple (a) et le bruit (b); $N = 1300$ rpm, $CR = 22$, $md = 0,37$ kg/h

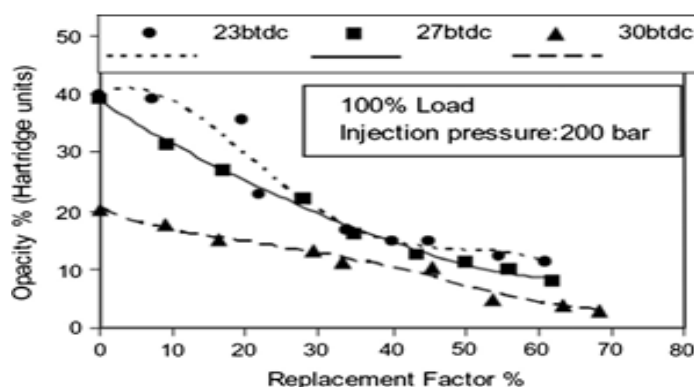


Figure IV.12 : Effet des différentes durées d'injection sur la densité de fumée

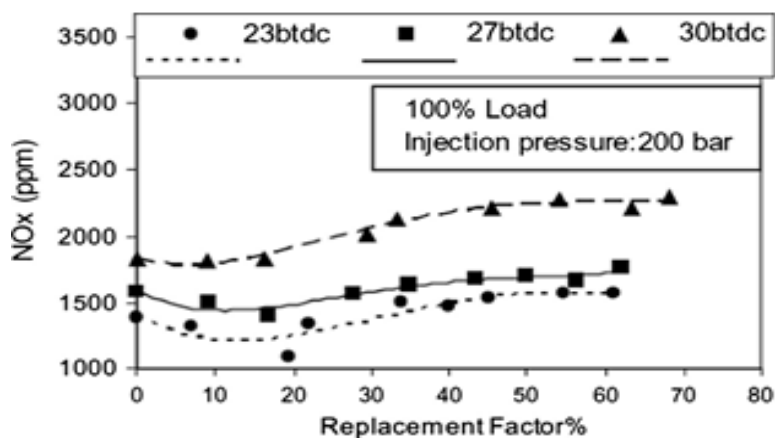


Figure IV.13 : Effet des différentes durées d'injection sur les Nox

IV.4.5 Effet des conditions du collecteur d'admission :

- Lorsque la température d'admission augmente à n'importe quelle sortie, le délai d'allumage diminue avec le fonctionnement diesel et le fonctionnement à carburant double.
- Une augmentation de la température de charge d'admission se traduit par une amélioration du rendement thermique des freins et réduit les émissions de HC et de CO.
- Le débit EGR optimal améliore l'efficacité thermique des freins et réduit les niveaux de HC, en particulier aux faibles et moyennes puissances.
- Le taux d'augmentation de la pression est marginal pour tous les pourcentages EGR à charges partielles; cependant, le taux d'augmentation de la pression diminue considérablement à des charges plus élevées.

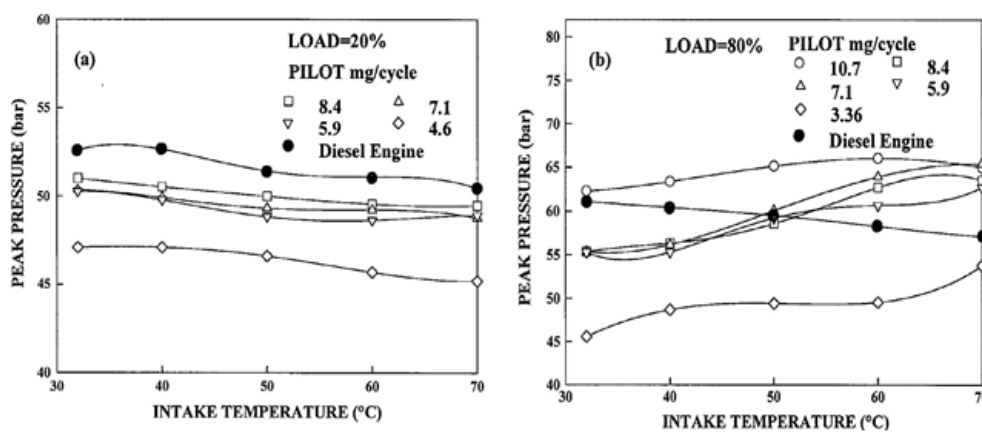


Figure IV.14 : Effet de la température d'admission sur la pression maximale pour une charge de 20 % et 80 %

IV.5.6 Effet du rapport de compression :

Pour le fonctionnement à carburant double GPL-diesel, on peut voir dans la figure V.5 (a) les cas de déclenchement et de défaillance d'allumage pour les trois rapports de compression de 18, 20 et 22 pour un moteur monocylindre Ricardo E6. On peut voir que pour un rapport de compression plus élevé de 22, le choc commence très tôt, à un couple moteur d'environ

8,1 N m, tandis que toute augmentation de la quantité de carburant gazeux augmente l'intensité du claquement et commence à réduire le couple de sortie jusqu'à ce qu'une défaillance d'allumage se produise à environ 7,85 N m et que la sortie diminue ensuite fortement. Lorsque le rapport de compression est réduit à 20, le couple au début du choc passe à une valeur plus élevée d'environ 17,6 N m et la défaillance de l'allumage se produit à environ 17 N m. Pour un rapport de compression inférieur à 18, la limite de choc est déplacée à environ 20 N m. et la défaillance de l'allumage est déplacée à

18,5 N m. On peut conclure que la réduction du taux de compression a eu pour effet de retarder l'apparition des détonations dans le moteur à double combustible (de 8,1 N m à 17,6 N m à 20 N m) et d'étendre considérablement les limites d'allumage (de 7,85 N m à 17 N m à 18,5 N m). Ceci peut être postulé pour le déclenchement précoce à des taux de compression élevés associés à une pression et à des températures plus élevées et à des températures d'auto-allumage plus basses du GPL. Pour des limites d'allumage étendues et un fonctionnement sans choc du bicarburant, le taux de compression doit être réduit à des valeurs inférieures. La figure V.15 (b) illustre le taux maximal d'augmentation de pression à différents rapports de compression pour le mode GPL-diesel bicomcombustible. On peut constater que l'augmentation du rapport de compression augmente généralement le bruit de combustion en raison de la possibilité plus grande d'auto-inflammation des combustibles gazeux à des pressions et températures plus élevées. Le rapport de compression étant réduit, le bruit de combustion est également réduit et les limites d'allumage sont étendues.

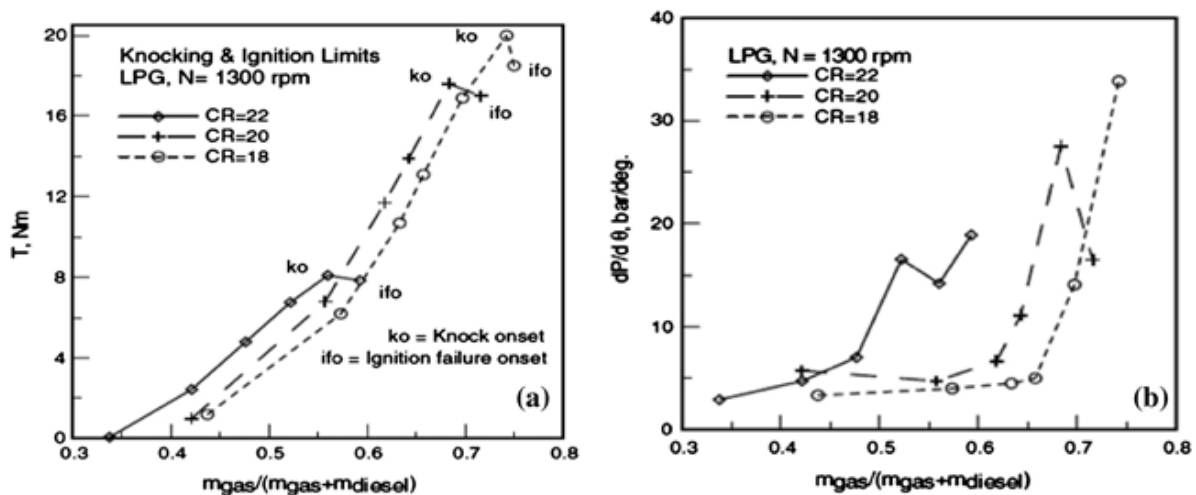


Figure IV.15 : Effet du rapport de compression sur le couple (a) et le bruit de combustion (b) pour le GPL N = 1300 rpm, IT = 35°BTDC, md = 0,37 kg/h

IV.4.7 Effet de la variation des compositions du combustible gazeux :

- La variation de la composition du GPL entraîne une variation des émissions d'échappement, des températures des gaz d'échappement et du rendement de conversion en mode bicarburant.
- Le GPL avec une teneur en butane de 30 % était le meilleur mélange de GPL dans un fonctionnement à carburant double, puisque la performance globale du moteur était équivalente à celle du moteur diesel conventionnel, sauf pour les charges partielles.
- L'utilisation d'hydrogène et de GPL comme carburant secondaire améliore le rendement thermique des freins en cas de charge élevée, tandis qu'elle produit un effet inverse en cas de faible charge.

- Un mélange d'hydrogène et de GPL comme carburant secondaire réduit les hydrocarbures non brûlés, les NOx et la fumée dans des conditions de charge plus élevées.

IV.5 Recherche expérimentale sur le système de contrôle du carburant des moteurs à combustion interne utilisant le GPL - diesel à double combustible :

V.5.1 Recherche sur la conception et la fabrication de l'alimentation en carburant à double combustible commande de la tige de moteur (GPL - diesel) :

Les études expérimentales utilisant le bicarburant (GPL - Diesel) sont réalisées au diesel 3C - TE équipé d'une pompe de type distributeur de carburant à commande électronique VE - EDC (Electronic Diesel Control) . Le système de contrôle du ECU permet de modifier les paramètres du moteur pour l'ajuster facilement et aider à établir les conditions de travail et récupérer les données dans un mode pratique, fiable et précis. La recherche empirique sur ce moteur apporte une grande signification pratique, peut reproduire les résultats afin d'appliquer le fonctionnement pratique immédiatement.

Injection Volume Control

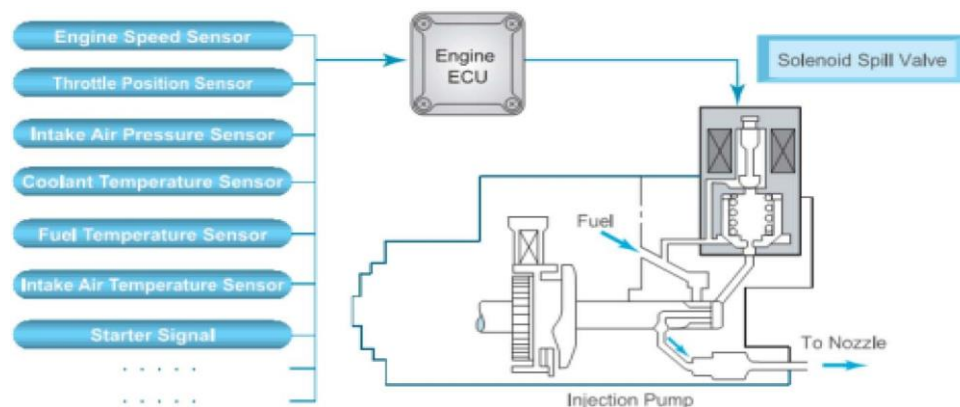


Figure IV. 16 : Schéma du système de commande d'injection.

Dans le contrôleur électronique (ECU), les données disponibles sur l'injection de flux de base ont été calculées en fonction de facteurs tels que le régime du moteur, la charge du moteur et l'accélération.

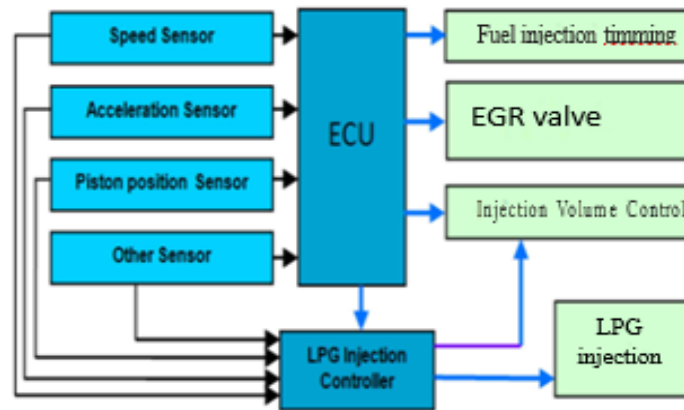


Figure IV. 17 : Schéma des principes de contrôle du système d'injection de carburant GPL pour les moteurs diesel

V.5.2 Résultats et Discussion de l'expérience :

V.5.2.1 Objet et sujet de l'expérience :

But des expériences :

Le processus d'essai sur les moteurs diesel avec système de contrôle électronique du carburant utilisant le bicarburant (GPL - Diesel) sur le banc à rouleaux sert aux fins suivantes :

- Développer les caractéristiques extérieures du moteur utilisant le carburant diesel
- Évaluer le fonctionnement du système de commande à carburant double (GPL - Diesel) lorsque l'on combine les systèmes de commande électronique du carburant diesel et le système d'alimentation en proportions de GPL
- Évaluer les caractéristiques économiques, les caractéristiques techniques et le processus d'émissions du moteur lors de l'utilisation de carburant double (GPL - diesel) avec le taux de remplacement du GPL le plus élevé.
 - Évaluer l'impact des paramètres d'image sur le mode de fonctionnement du moteur à double carburant (GPL - diesel).
 - Vérifier et évaluer les composants des émissions du moteur en utilisant complètement le diesel et en utilisant le bicarburant (GPL - Diesel).
 - Il évalue également un certain nombre de caractéristiques que la recherche imitée ne peut pas montrer, telles que la limite d'initiation et les vibrations lors de l'augmentation de la proportion de GPL remplacé.

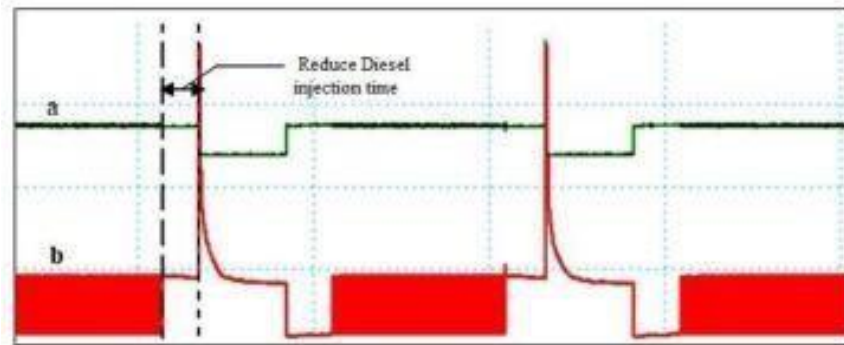
Sujet de l'expérience :

Le sujet de l'expérience est un moteur diesel TOYOTA 3C-TE avec système d'alimentation à double carburant (GPL - Diesel) contrôlé électroniquement.

V.5.2.2 L'expérience du système de commande d'alimentation à double combustible (GPL - Diesel) :

Utilisation du logiciel de programmation LabVIEW pour contrôler le taux de remplacement de deux types de carburant GPL et diesel lorsque le moteur est en marche. Simultanément, avec l'appareil de mesure pour recueillir les données de forme pulsée de Pico Scope montrera la période où le contrôleur réduit la quantité de carburant diesel injecté comme la figure V.18.

Simultanément, avec la réduction de carburant diesel prévue pour le moteur, afin de garantir l'équilibre énergétique du processus de combustion, le système de contrôle doit calculer le débit alternatif corrélé du



GPL via l'injecteur de GPL-période de levage pour assurer les caractéristiques du moment et la puissance du moteur.

Figure IV.18 : Le contrôleur de temps diminue le carburant diesel en interrompant le temps de fonctionnement précoce de la vanne SPY (a) Le signal d'impulsion contrôle la vanne d'entrée SPY; (b) Le signal d'impulsion contrôle la vanne de sortie SPY lorsque le contrôleur réduit le carburant diesel

Par conséquent, les signaux du contrôleur de l'injecteur de carburant GPL sont exprimés au moyen d'appareils de mesure qui recueillent les données de forme pulsée de la portée Pico comme le montre la figure V.19.

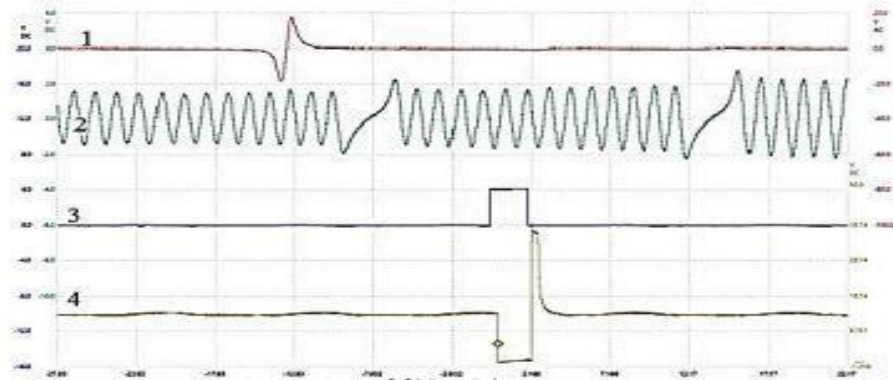


Figure IV.19 : Le signal d'impulsion contrôle l'injection de GPL lorsque le moteur fonctionne avec un moteur diesel à double carburant

La largeur du signal d'impulsion (numéro 4) qui contrôle les injecteurs de GPL varie en fonction du signal d'impulsion (numéro 3) de sortie du régulateur de rapport (LPG - Diesel). Modifier le temps de contrôle des injecteurs de GPL pour augmenter ou diminuer la quantité de GPL fournie au moteur lorsque l'on utilise un carburant à double combustible (GPL - diesel).

Les resultants de l'expérience montrent que le changement du taux d'approvisionnement GPL - Diesel a certaines règles. La proportion de GPL - carburant diesel alternatif avec la période de reduction du diesel et d'augmentation de l'injection de GPL est présentée dans le tableau 1 avec un calendrier corrigé comme suit.

Rate (%)	Reduce Diesel injection (ms)	Increase LPG injection time (ms)
10	0.5	2.2
20	1.3	3.0
30	1.5	3.5
40	2.4	4.2

IV.5.2.3 Caractéristiques techniques de l'expérience du moteur 3C – TE :

Les données de l'expérience réalisée à l'aide du logiciel AVL-Concerto pour calculer les caractéristiques des systèmes AVL - InDICOM, résultats de mesure de sortie sont présentés :

Avec les résultats de l'expérience que nous voyons à la figure V.20 ci-dessus, le moment maximal du moteur est de 202,50 (Nm) au régime de 2600 tours par minute et la puissance maximale est de 71,35 kW à 4200 tours par minute; si le régime du moteur est supérieur à 4200 tours par minute, le moment et la

puissance sont considérablement diminués en raison de la réduction du carburant fourni au moteur par le contrôleur

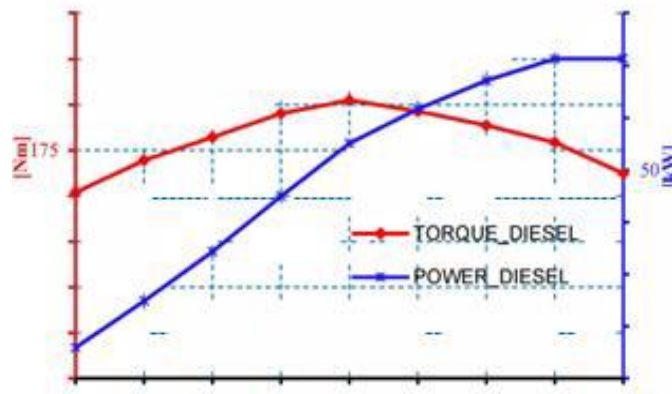


Figure IV.20 : Graphiques des caractéristiques de puissance et de moment lorsque le moteur utilise du diesel

Le moment et la puissance du moteur testé sont inférieurs à 10% et 7,6 par rapport aux paramètres du fabricant, puisque le moteur 3C - TE est second-main, de sorte que le système moteur n'est plus aussi grand qu'un nouveau moteur. D'après les résultats de la comparaison, il a été démontré que l'utilisation des moteurs 3C-TE dans les études expérimentales est appropriée.

IV.5.2.4 Impact sur le moment et la puissance du moteur à double combustible (GPL-diesel) :

En résultat, données obtenues lors du fonctionnement de l'essai du moteur avec le dynamomètre de capacité AVL et le logiciel AVL

- InDICOM à 10 %, 20 %, 30 % et 40 % de GPL alternatif par tour. Les applications logicielles spécialisées AVL Concerto commencent à analyser la base de données et donnent des résultats expérimentaux sur les caractéristiques du moment et de la puissance de la double moteur à carburant (GPL-diesel) comme indiqué à la figure V.21 ci-dessous :

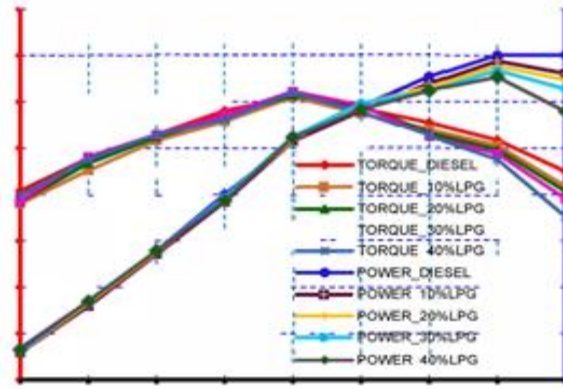


Figure IV.21 : Graphique comparant les caractéristiques extérieures (puissance et moment) du moteur à double carburant (diesel au GPL) selon les taux de remplacement

L'expérience montre que le moteur à double carburant (GPL-Diesel) atteint 98,5% du moment maximum et 85% de la puissance maximale. La puissance et le moment moyen à des taux différents ont diminué, mais pas de manière significative, au taux alternatif de GPL supérieur à 40%, phénomène initiateur commence à se produire. Par conséquent, la quantité maximale de carburant GPL de remplacement pour le moteur 3C-TE à double combustible (GPL - diesel) est de 40 % de GPL

- 60 % de diesel, et c'est le taux de remplacement le plus élevé pour un moteur 3C TE au mode de moment le plus élevé.

IV.5.2.5 Évaluation du taux maximal de GPL de remplacement dans un moteur à double carburant (3C - TE) :

Basé sur les données recueillies des capteurs de la chambre de pression de combustion, nous pouvons surveiller et spécifier l'augmentation de la pression pour initier la limite lorsque le taux d'alimentation en GPL augmente.

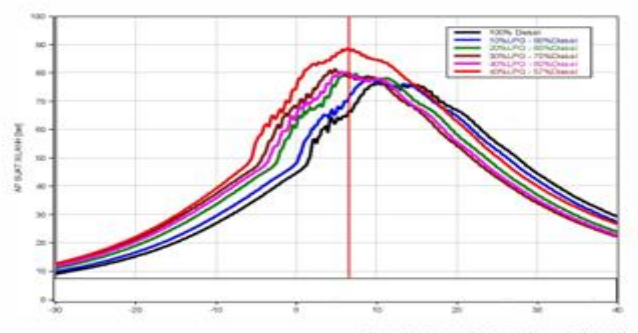


Figure IV.21 : Processus de pression des cylindres à 2600 rpm avec différents rapports GPL

Avec le taux alternatif de GPL est de 10%, 20%, 30%, 40% successivement, la pression de combustion dans la bouteille augmente progressivement. Mais lorsque le taux d'augmentation du GPL alternatif à 44%, la pression d'amplitude du processus de combustion augmentera plus élevé que les modes alternatifs ci-dessus, simultanément, l'initiation se produira également au moteur. Lorsque le rapport de LPG est augmenté d'environ 43%, la pression de crête apparaît plus élevée d'environ 10 bars, le processus d'initiation devient puissant. Ainsi, la limite maximale pour le débit de carburant GPL alternatif dans la thèse est de 40%, au mode qui assure le moment moteur le plus élevé (mode de charge 100%).

Avec le taux alternatif de GPL est de 10%, 20%, 30%, 40% successivement, la pression de combustion dans la bouteille augmente progressivement. Mais lorsque le taux d'augmentation du GPL alternatif à 44%, la pression d'amplitude du processus de combustion augmentera plus élevé que les modes alternatifs ci-dessus, simultanément, l'initiation se produira également au moteur. Lorsque le rapport de LPG est augmenté d'environ 43%, la pression de crête apparaît plus élevée d'environ 10 bars, le processus d'initiation devient puissant. Ainsi, la limite maximale pour le débit de carburant GPL alternatif dans la thèse est de 40%, au mode qui assure le moment moteur le plus élevé (mode de charge 100%).

En même temps, surveiller le processus de démarrage du moteur lorsqu'il fonctionne avec un carburant double (GPL - diesel). Le système de commande utilise également des signaux de détection d'initiation pour connaître l'heure exacte à laquelle le processus d'initiation se produit afin de contrôler la limite d'alimentation en GPL du moteur à carburant double selon le signal (no 3) Figure V.22

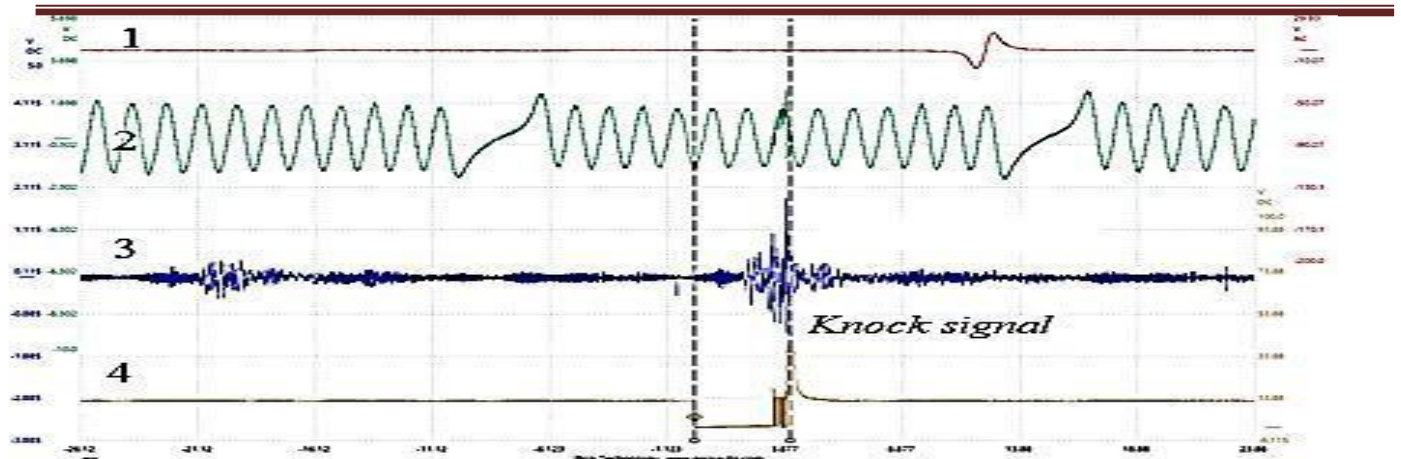


Figure IV.22 : Le signal d'amorçage de l'impulsion du moteur se produit lorsque le contrôleur de temps ouvre les injecteurs de GPL est $> 4,2$ ms

IV.5.2.6 Évaluer l'impact sur les émissions (HC, CO, NOx et suie) du moteur à double carburant (GPL - diesel) :

Émission de suie :

Figure 11 les résultats de mesure de l'opacité des fumées (suies) effectués en mode GPL alternatif 10 %, 20 %, 30 %, 40 % sont présentés avec la mesure de l'opacité des fumées (BEA 640 Bosch). Opacité de la fumée réduite en tout temps lorsque les taux de GPL alternatifs augmentent et que l'opacité de la fumée diminue de 77,61 % après avoir remplacé le taux de GPL alternatif à 40 %, comme indiqué

Le graphique V.23 montre que lorsque l'on utilise du GPL - Diesel à double carburant, la teneur en NOx diminue. En mode de remplacement du GPL à 40 %, l'épuisement approximatif des NOx diminue au maximum de 6,7 %

Comparer à la valeur NOx en cas d'utilisation de carburant diesel.



Figure IV.23 : NO, épuisement dans les modes de test avec GPL/diesel

Les NOx diminuent parce que le GPL est mélangé avec du diesel Diminuer la température du feu flamboyant; le solvant brûlé maintient le temps à haute température lorsque le contact avec le feu est raccourci, réduit la constitution de NOx au cours du processus en mode haute température.

IV.5.2.7 Effets de l'angle d'injection du carburant sur les émissions du moteur :

Selon les figures V.24 et V.25, lorsque l'angle d'injection précoce du moteur à carburant double (GPL - diesel) est réduit par rapport à l'angle optimal d'injection précoce de 17°, le composant d'échappement diminue de 8,47 % et le NOx de 0,34 % à 14°, tandis que le composant d'échappement demeure presque inchangé. Toutefois, la composante opacité de la fumée diminue de 4,1 % à l'angle d'injection de 14° mais augmente de 2,08 % à 12° par rapport aux moteurs fonctionnant à un angle d'injection précoce de 17°.

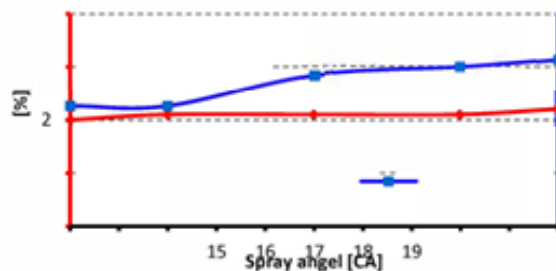


Figure IV.24 : Exhaustions HC, CO, lors du changement de l'injection de carburant

Lorsque l'on augmente l'angle d'injection précoce du moteur à double carburant (GPL - diesel) par rapport à l'angle optimal d'injection précoce de 17°, tous les composants du moteur augmentent les émissions. HC monte et atteint 4,2 %, NOx augmente 1,8 %

- 12,5 % à un angle d'injection précoce de 22°, la composante CO demeure inchangée. Le premier angle d'injection de carburant a augmenté, les HC, NOx ainsi que l'opacité de la fumée ont augmenté, ce qui empêche l'augmentation continue du premier angle d'injection de carburant.

Ainsi, selon les résultats expérimentaux évalués ci-dessus, il est visible que l'angle d'injection du carburant précoce acceptable est de 14° avec le couple le plus élevé. Avec ce paramètre de cet angle d'injection précoce, il est possible de réduire les composants presque nocifs dans les émissions du moteur.

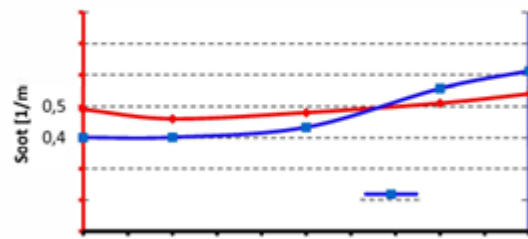


Figure V.25 : Opacités de NOx et de fumée à l'épuisement lors du changement de la date d'injection du carburant

Conclusion :

Des études ont montré que l'utilisation du GPL dans le moteur diesel en mode bi-carburant est une des mesures les plus importantes et efficaces pour surmonter la rareté des combustibles fossiles et les émissions de gaz d'échappement. Les caractéristiques de performance, de combustion et d'émission du moteur diesel à double carburant GPL ont été examinées à partir des diverses études expérimentales et indiquent que la caractéristique de charge partielle peut être améliorée en optimisant les paramètres de fonctionnement du moteur et les facteurs de conception tels que régime du moteur; la charge, la quantité de carburant pilote, le moment d'injection, l'état du collecteur d'admission et les compositions de carburant gazeux d'admission. Les conclusions suivantes sont tirées des travaux actuels sur un moteur GPL-diesel à double carburant.

✓ Effet de la charge du moteur

Les moteurs diesel et GPL à double carburant souffrent de problèmes tels qu'un mauvais rendement thermique des freins et des émissions élevées de HC, particulièrement en basse charge, et d'une meilleure efficacité thermique des freins en charge.

Les faibles performances de charge partielle et les émissions peuvent être améliorées en modifiant les conditions de charge d'admission par diverses méthodes.

Toutefois, l'augmentation des émissions de NOx provenant du remplacement du diesel diminue à la charge partielle et les particules diminuent considérablement pour toutes les charges d'exploitation.

Les deux carburants produisent des niveaux de bruit plus élevés que le diesel simple, car la charge est augmentée en augmentant le carburant GPL avec un débit diesel fixe.

La durée de combustion en mode bi-carburant est plus élevée que les valeurs diesel à faibles débits parce que le délai d'allumage est élevé. Il est toutefois inférieur aux valeurs du diesel à des rendements élevés.

✓ Effet du régime moteur

Augmenter le régime du moteur réduit le bruit de combustion pour le moteur à double carburant.

Augmenter le régime moteur a entraîné une amélioration de l'efficacité thermique et de sa variation cyclique.

Le taux d'augmentation de la pression diminue avec l'augmentation du régime moteur et est plus élevé que celui des moteurs diesel.

✓ Effet de la quantité de carburant du pilote

Augmenter la quantité de carburant pilote augmente le couple de sortie, l'efficacité thermique et la pression maximale. Cependant, le bruit de combustion généré est plus élevé que dans le cas du monocombustible diesel pur.

Le recours à des quantités pilotes élevées est très efficace pour réduire les niveaux de HC et de CO dans toutes les sorties.

L'augmentation des émissions de NOx avec la quantité croissante de carburant pilote a été attribuée à une augmentation de la température maximale de la charge.

Des quantités élevées de diesel pilote doivent être utilisées à faible rendement pour assurer une combustion correcte du carburant gazeux. Au fur et à mesure que la puissance augmente, la quantité de pilote doit être réduite pour contrôler la combustion rapide et le bruit.

✓ Effet du moment de l'injection

Une amélioration de l'efficacité thermique des freins est obtenue en augmentant le temps d'injection et l'opacité de la fumée, les émissions de HC et de CO diminuées.

✓ Effet des conditions du collecteur d'admission

Lorsque la température d'admission augmente à n'importe quelle sortie, le délai d'allumage diminue avec le fonctionnement diesel et le fonctionnement à carburant double.

Une augmentation de la température de charge d'admission se traduit par une amélioration du rendement thermique des freins et réduit les émissions de HC et de CO.

Le débit EGR optimal améliore l'efficacité thermique des freins et réduit les niveaux de HC, en particulier aux faibles et moyennes puissances.

Le taux d'augmentation de la pression est marginal pour tous les pourcentages EGR à charges partielles; cependant, le taux d'augmentation de la pression diminue considérablement à des charges plus élevées.

✓ Effet du rapport de compression

Un taux de compression plus élevé, inférieur au niveau de claquement, améliore l'efficacité globale du moteur avec des niveaux plus élevés de génération de bruit de combustion.

Augmenter le taux de compression en utilisant du GPL en mode bi-carburant entraîne un bruit excessif de combustion et une variation cyclique à des charges élevées, en plus d'entraîner une perte de pression moyenne effective indiquée.

✓ Effet de la variation des compositions du combustible gazeux

La variation de la composition du GPL entraîne une variation des émissions d'échappement, des températures des gaz d'échappement et du rendement de conversion en mode bicarburant. Le GPL avec une teneur en butane de 30 % était le meilleur mélange de GPL dans un fonctionnement à carburant double, puisque la performance globale du moteur était équivalente à celle du moteur diesel conventionnel, sauf pour les charges partielles.

L'utilisation d'hydrogène et de GPL comme carburant secondaire améliore le rendement thermique des freins en cas de charge élevée, tandis qu'elle produit un effet inverse en cas de faible charge. Un mélange d'hydrogène et de GPL comme carburant secondaire réduit les hydrocarbures non brûlés, les NOx et la fumée dans des conditions de charge plus élevées.

Pour le calendrier d'injection avancé, la température de pointe augmente; par conséquent, les émissions de NOx seront plus élevées et on a également observé une réduction des émissions de HC et de CO en raison de l'augmentation de la température.

Le fait d'avancer la synchronisation de l'injection du carburant pilote augmente le niveau sonore global du moteur et le niveau sonore de combustion. Les caisses à double carburant présentent des niveaux de bruit plus élevés que le diesel, surtout au moment de l'injection précoce.

Conclusion Générale :

Dans ce mémoire, nous avons présenté les résultats récemment trouvés de l'analyse des gaz d'échappement des moteurs à Diesel utilisant un bi-carburant gas-oil et GPL, selon trois classes statistiques basées sur l'année de mise en marche des moteurs. Nous avons comparé les concentrations de CO et CO₂ pour chaque classe et chaque type de carburant, et nous avons analysé ces résultats par des graphiques. Nous avons constaté que les moteurs à Diesel ont tendance à produire moins de CO mais plus de CO₂ au fil du temps, ce qui traduit une amélioration de la performance et de l'impact environnemental des moteurs, mais aussi une augmentation de la consommation de carburant. Nous avons également constaté que les moteurs à Diesel utilisant un bicarburant gasoil et GPL ont tendance à produire moins de CO et CO₂ que les moteurs à gasoil, ce qui traduit une meilleure performance et un meilleur impact environnemental des moteurs, mais aussi une consommation de carburant plus faible.

Ces résultats sont intéressants pour évaluer la qualité de l'air et le potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre des moteurs à Diesel. Ils montrent que le choix du carburant et l'année de mise en marche des moteurs sont des facteurs importants à prendre en compte. Ils suggèrent également que le développement de technologies plus avancées et plus propres pour les moteurs Diesel est nécessaire pour réduire davantage la production de CO et CO₂.

Dans l'ensemble, la méthode proposée dans ce travail a un potentiel d'application dans les petits moteurs à gaz à double carburant et à allumage commandé. Des travaux supplémentaires visant à améliorer l'homogénéité du mélange sont nécessaires pour contrôler le problème des émissions plus élevées de HC.

الملخص :

يتعلق هذا الموضوع بما يلي: << خصائص وأداء غاز البترول المسال - الديزل ثنائي الوقود >> تناولنا في الفصل الأول تعريف الغاز البترولي المسال وبعض مميزاته ومزاياه وعيوبه. وفي الفصل الثاني بعنوان “الديزل” تحدثنا عن تعريف الديزل ومميزاته وخصائصه. وفي الفصل الثالث تناولنا محرك الديزل مع ذكر أنواعه وخصائصه ووظائفه والفرق بين الخلية والمحرك من حيث البنزين. وفي الفصل الرابع توصلنا إلى استنتاج حول ما إذا كان من الممكن وضع غاز البترول المسال في محرك الديزل.

الكلمات المفتاحية: الديزل، غاز البترول المسال، المحرك

Résume :

Ce sujet concerne : << Caractéristiques et performances du GPL -Diesel bicarburant >> Dans le premier chapitre, nous avons discuté de la définition du gaz de pétrole liquéfié, de certains de ses avantages, avantages et inconvénients. Dans le deuxième chapitre, intitulé « Diesel », nous avons parlé de la définition du diesel, de ses avantages et de ses caractéristiques. Dans le troisième chapitre, nous avons abordé le moteur diesel, en mentionnant ses types, ses caractéristiques, ses fonctions et les différences entre la cellule et le moteur en termes d'essence. Dans le quatrième chapitre, nous sommes arrivés à la conclusion s'il est possible de mettre du gaz de pétrole liquéfié dans un moteur diesel.

Mots clés : diesel, Gaz de pétrole liquéfié, moteur

Bibliographie

- [1] Y. ABCHI ,," Perspective des exportations des GPL et place de Sonatrach sur le marche méditerranéen, revue de l'Algérien Petroleum Institute, Vol 04 N-01, p10 Janvier 2010
- [2]K. Otto, Global LPG Market Outlook, Purvin& Gertz Inc, LP Gas exceptional energy Journal, Edition of International Systems and Communications Limited (ISC) & the World LP Gas Association (WLPGA), (September 2009), p. 12.
- [3].Comité Français Butane Propane, GPL carburant historique, Site web www.cfbp.fr,05/05/2020
- [4] : M. Nasserredine, Simulation et optimisation des paramètres technologiques de l'unité de fractionnement des GPL à Haoud Berkaoui, mémoire de magister, BOUGARA BOUMERDES,2012/2013
- [5] : Z.HANICHI ; «Optimisation des paramètres de fonctionnement d'une débutaniseuse» ; Mémoire de fin d'étude université de BOUMERDES ; 2005.
- [6] : Bendaas Okba, optimisation des paramètres de fonctionnement de déethaniseur (C-701) et débutaniseur (C-702) de la section, mémoire de master,2016/2017
- [7] Hajd, Ali Djamel. Etude de la section de déshydratation de l'unité GPL-2 HASSIMESSAOUD. Aout 2005; 75P
- [8] Gaz de pétrole liquéfiés, site web www.naftal.dz,05/05/2020
- [10]. Centre canadien d'hygiène et sécurité au travail ; site web www.cchst.ca,05/05/2020
- [11]. Agence international de l'énergie (AIE/OCDE), division des statistiques de l'énergie (l'AIE transmettra les données à la commission économique pour l'Europe des nations Unies.
- [12]. Air liquide, fiche sécurité sur site web www.airliquide.com.
- [13]. P.WUITHIER. Raffinage et génie chimique, tome I et tome II, 2eme édition, 1972 paris.
- [14]FRANCOIS MONCHY, la fonction maintenance, EDITION MASSON, 1996.
- [15]G.LEMASSON, les machines transformatrices d'énergie tome II : turbomachines et machine alternatives.
- [16]KALAKOUTSKI ET V.VOLKOV, calcul thermique et mécanique du diesel (INH 1986).
- [17]Christophe Des voies, « L'injection Diesel " Common Rail" Delphi », mémoire professionnel, Génie Mécanique Session 2003.

- [18]Guy. Fillettaz, « classification des moteurs Diesel ».Document de la société Delphi 2002.
- [19]Serge Picard, « L'injection Diesel haute pression à rampe commune», dossier technique A.N.F.A « Association Nationale pour la Formation Automobile » édition 2001.
- [20]Gérard Delville, « Common rail», étude de conception dans La revue auto concept 2002.
- [21]<http://www.motorlegend.com>.
- [22]Moteurs à combustion description, Constructive, Bruxelles, 2012.
- [23]<http://www.techautoalgerie.wordpress.com>.
- [24]Les organes de moteur, Technologie automobile, Académie de Nancy-Metz, 2008.
- [25]<http://moteur-a-explosion.e-monsite.com/pages/le-moteur-essence-et-le-moteur-diesel.html>.