

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : GENIE MECANIQUE
Spécialité : ENERGETIQUE

THEME
CONVERSION D'UN MOTEUR CATERPILLAR 3512A EN
MODE DUAL-FUEL

Présenté par :

MERZOUGUI Walid

MEGHNI Mohammed Amine

Promoteur : **Mr. OUALI Sofiane**

Promotion : 2021-2022

Remerciements

Au terme de ce travail effectué au sein de l'Entreprise Nationale de Forage (ENAFOR),

Nous tenons à remercier :

Notre encadreur Monsieur OUALI Sofiane qui nous à guidé et partagé ses expériences tout au long de ce travail. Son aide si efficace avec beaucoup de compréhension à beaucoup contribué à ce travail. Nous lui exprimons tout notre respect.

Nous tenons également à remercier nos familles et tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection. A mes très chères sœurs,
source de joie et de bonheur.*

A toutes ma famille, surtout mes oncles et tantes source d'espoir et de motivation.

A tous mes amis, et mon chère amie avant d'être mon binôme Med Amine

A vous chers lecteurs.

Walid

Dédicaces

A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection. A mes très chers sœurs et frères source de joie et de bonheur.

A toutes ma famille, surtout mes cousines source d'espoir et de motivation.

A tous mes amis, en particulier et mon chère amie avant d'être mon binôme walid

A vous chers lecteurs.

Med Amine

Etude de l'alimentation dual-fuel pour les groupes électrogènes Caterpillar 3512A

Résumé

Face aux préoccupations environnementales de plus en plus pressantes, telles que la maîtrise des rejets de gaz à effet de serre, et face à l'épuisement des réserves d'énergies fossiles, la disponibilité des ressources tels que le gaz de pétrole liquéfié (GPL) obtenu dans l'industrie, comme produit secondaire du processus de raffinage du pétrole est perçu comme un vecteur énergétique prometteur. De plus le développement technologique d'un système d'injection des moteurs à combustion interne et nécessaire aujourd'hui pour répondre aux réglementations de plus en plus dures qui fixent les seuils d'émissions polluantes par les moteurs diesel. Parmi les stratégies, l'alimentation du moteur diesel au GPL représente une bonne solution pour réduire les émissions polluantes et réduire la consommation sans influence sur la performance du moteur. L'endurance élevée à l'auto-inflammation du GPL nécessite des méthodes de ravitaillement spécialisées. Parmi toutes les méthodes de ravitaillement en GPL possibles, La méthode Dual-Fuel et plus précisément diesel-gaz et la meilleur pour les raisons suivantes : est facile à mettre en œuvre même sur des moteurs déjà en service ; le moteur n'a pas besoin de modifications importantes; le mélange GPL-Air présente une grande homogénéité avec des réductions de la consommation du Gasoil et le niveau des émissions du CO₂ et surtout les NO_x. L'objectif de ce travail est d'étudier la nouvelle technologie d'alimentation des moteurs diesel Dual-Fuel avec le GPL/Gasoil en utilisant des différents ratios. Plusieurs paramètres du moteur CAT3512A sont examinés successivement, l'influence de l'alimentation Dual-Duel (avec différents ratio GPL/Gasoil) sur quelques paramètres de fonctionnement moteur. Les résultats obtenus montrent que le moteur converti en mode dual fuel peut fonctionner avec un rendement équivalent à celui en mode gasoil. Nous avons retenu un ratio GPL /Gasoil permettant l'évaluation énergétique, économique et environnementale de cette application. Les résultats obtenus montrent que la nouvelle technologie étudiée est rentable.

Mots clés : GPL, Gasoil, Moteur, Gaz, Dual-fuel, Energie, Emissions polluantes.

Study of the dual-fuel supply for generators Caterpillar 3512A

Abstract

Faced with increasingly pressing environmental concerns, such as the control of greenhouse gas emissions, and faced with the depletion of fossil fuel reserves, the availability of resources such as liquefied petroleum gas (LPG) obtained in industry, as a by-product of the petroleum refining process, is seen as a promising energy vector. In addition, the technological development of an injection system for internal combustion engines is necessary today to meet increasingly stringent regulations which set the thresholds for polluting emissions from diesel engines. Among the strategies, fueling the diesel engine with LPG represents a good solution for reducing polluting emissions and reducing consumption without influencing engine performance. The high self-ignition endurance of LPG requires specialized refueling methods. Among all the possible LPG refueling methods, the Dual-Fuel method and more specifically diesel-gas is the best for the following reasons: it is easy to implement even on engines already in service; the engine does not need significant modifications; the LPG-Air mixture presents a great homogeneity with reductions in Diesel fuel consumption and the level of CO₂ emissions and especially NO_x. The objective of this work is to study the new technology for supplying Dual-Fuel diesel engines with LPG/Gasoil using different ratios. Several parameters of the CAT3512A engine are examined successively, the influence of the Dual-Duel power supply (with different LPG/Diesel ratios) on some engine operating parameters. The results obtained show that the engine converted to dual fuel mode can operate with an efficiency equivalent to that in diesel mode. We have chosen an LPG / Diesel fuel ratio allowing the energy, economic and environmental assessment of this application. The results obtained show that the new technology studied is profitable.

Keywords : LPG, Diesel, Engine, Gas, Dual-fuel, Energy, Polluting emissions.

ملخص

الانشغالات البيئية أصبحت أكثر صرامة، مثل التحكم في انبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحراري، وضد استنفاد احتياطات الوقود الاحفوري، إن توفر مصادر اخرى للطاقة الاحفورية مثل غاز البترول المسال، الذي يعتبر نتيجة ثانوية لعملية تكرير النفط باعتباره عنصر طاقتي مهما. بالإضافة الى التطور التكنولوجي للنظام حقن محركات الاحتراق الداخلي مع فرض احترام اللوائح على نحو متزايد للتقليل من عتبات الانبعاث الملوثة من محركات الديزل. ومن بين الاستراتيجيات. يمثل تزويد محرك الديزل بغاز البترول المسال حلاً جيداً لتقليل الانبعاثات الملوثة وتقليل الاستهلاك دون التأثير على أداء المحرك. تتطلب القدرة العالية على تحمل الاشتعال الذاتي لغاز البترول المسال طرقاً متخصصة للتزود بالوقود. من بين جميع طرق تزويد محرك الوقود بغاز البترول المسال ، فإن طريقة الوقود المزدوج وبشكل أكثر تحديداً غاز البترول و الديزل هي الأفضل للأسباب التالية: من السهل تنفيذها حتى على المحركات الموجودة بالفعل ؛ لا يحتاج المحرك إلى تعديلات كبيرة ؛ يعتبر خليط غاز البترول المسال والهواء متجانساً للغاية مع التأثيرات على مستوى استهلاك وقود الديزل ومستوى انبعاث ثنائي اكسيد الكربون، ولا سيما على انبعاث اكسيد الازوت. الهدف من هذا العمل هو دراسة التكنولوجيا الجديدة لتزويد محركات الديزل ثنائية الوقود بغاز البترول المسال باستخدام نسب مختلفة. تم فحص العديد من خصائص المحرك كات 13512 على التوالي، وتأثير الحقن المزدوج (بنسب غاز البترول المسال المختلفة / الديزل). تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن المحرك المحول إلى وضع الوقود المزدوج يمكن أن يعمل بكفاءة مكافئة لتلك الموجودة في وضع الديزل. لقد اخترنا نسبة غاز البترول المسال / وقود الديزل مما يسمح بتقييم الطاقة والبيئة والاقتصاد لهذا التطبيق. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن التكنولوجيا الجديدة المدروسة مربحة.

الكلمات المفتاحية : غاز البترول المسال، ديزل، محرك، غاز، وقود مزدوج، طاقة، انبعاثات ملوثة.

SOMMAIRE

Listes des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction generale	1
Presentation de l'entreprise	2
Chapitre 01 : Généralité sur les moteurs diesel	
1-Introduction.....	5
2-Classification des moteurs thermiques	5
3-Moteur diesel	7
3-1-Historique de moteur Diesel	7
3-2-Cycle à quatre temps de moteur Diesel.....	8
3-2-1-Cycle théorique	8
3-2-2-Cycle réel.....	9
3-3-Avantages et inconvénients du moteur diesel.....	11
4-Moteur Diesel CATERPILLAR 3512A	13
4-1-Description et principe de fonctionnement.....	13
4-2-Caractéristiques d'un moteur diesel Caterpillar 3512A	14
4-3-Organe du moteur CATERPILLAR	16
4-3-1-Principaux organes.....	16
4-3-2-Parties fixes.....	16
4-3-3-Partie mobiles.....	27
4-4-Etude des circuits et systèmes.....	25
4-4-1-Système de démarrage.....	25
4-4-2-Système de distribution	25
4-4-3-Circuit d'air et d'échappement	26

4-4-4-Circuit de refroidissement	28
4-4-5-Circuit de graissage	29
4-4-6-Système d'alimentation combustible et d'injection	30
5-Conclusion	39
Chapitre 02 : Choix du carburant	
1-Introduction.....	40
2-Différence entre le GPL et le GNL	40
3-Choix de combustible primaire GPL.....	40
4-Composition du GPL en Algérie.....	41
5-Comparaison entre les propriétés physico-chimiques du GPL et Gasoil	41
6-Conclusion	42
Chapitre 03 : Etude du moteur CAT3512A en mode Dual-Fuel	
1-Introduction.....	43
2- Mode d'injection Dual-Fuel.....	43
2-1-Description des différents composants du système d'alimentation Dual-Fuel.....	44
3-Etude des Performances du moteur CAT3512A en mode Dual-Fuel GPL-Gasoil.....	47
3-1-Paramètres de fonctionnement du moteur Caterpillar 3512A	47
3-2-Quantité d'air	48
3-3-L'énergie délivrée par le carburant Gasoil ou GPL	49
3-4-Débit de Gasoil du moteur CAT3512A.....	49
3-5-Couple du moteur CAT3512A.....	50
3-6-Substitution du Gasoil	50
3-7-Débit massique du GPL.....	50
4-Conclusion	51
Chapitre 04 : Etude de l'influence de la technologie Dual-Fuel	
1-Introduction.....	52
2-Dimensionnement d'un réservoir GPL pour le moteur CAT3512A.....	52

3-Etude de l'Influence de l'alimentation dual-fuel sur différents paramètres du moteur	52
4-Etude énergétiques	57
5-Etude économiques.....	58
6-Etude environnementale	59
6-1-Le dioxyde de carbone (CO ₂)	59
6-2-Les oxydes d'azotes (NO _x)	59
7-Application à l'ENAFOR	60
7-1-Estimations de la consommation en gasoil de 52 chantiers pétroliers	60
7-2-Estimations des gains économiques	61
7-3-Estimations des gains environnementaux.....	62
8-Conclusion	62
Conclusion generale	63
Bibliographie	

LISTES DES FIGURES**Chapitre 01 : Généralité sur les moteurs diesel**

Figure 1.1 : diagramme de cycle mixte (cycle de sabathé).....	9
Figure 1.2 : cycle réel.....	11
Figure 1.3 : Diagramme de cycle réel.....	11
Figure 1.4 : Les différents organes du moteur 3512	16
Figure 1.5 : Bloc-moteur	17
Figure 1.6 : Chemise de cylindre.....	18
Figure 1.7 : La culasse.....	19
Figure 1.8 : Le joint de culasse.....	19
Figure 1.9 : Le piston.....	21
Figure 1.10 : La bielle.....	21
Figure 1.11 : L'arbre à came.....	22
Figure 1.12 : Vilebrequin ou Arbre manivelle.....	23
Figure 1.13 : Coussinet.....	23
Figure 1.14 : culbuteur.....	24
Figure 1.15 : soupape.....	25
Figure 1.16 : Système de distribution.....	26
Figure 1.17 : Circuit d'admission et circuit d'échappement.....	27
Figure 1.18 : circuit de refroidissement.....	29
Figure 1.19 : circuit de lubrification.....	30
Figure 1.20 : Circuit d'alimentation combustible.....	31

Figure 1.21 : Système d'alimentation combustible.....	31
Figure 1.22 : Composants et système de tringlerie de commande.....	32
Figure 1.23 : Mouvement de tringlerie de commande.....	34
Figure 1.24 : Composants et système d'injection.....	35
Figure 1.25 : Composants supérieur de l'injecteur.....	36
Figure 1.26 : Composants inférieur de l'injecteur.....	37
Figure 1.27 : Injecteur pompe.....	39

Chapitre 03 : Etude du moteur CAT3512A en mode Dual-Fuel

Figure 3.1 : Alimentation du moteur Caterpillar 3512 en Dual-Fuel.....	44
Figure 3.2 : Panneau de commande.....	45
Figure 3.3 : Le train de Gaz.....	46
Figure 3.4 : Soupape d'alimentation	46
Figure 3.5 : Mixeur air-carburant	47

Chapitre 04 : Etude de l'influence de la technologie Dual-Fuel

Figure 4.1 : réservoir de 5 m ³ (5000L).....	52
Figure 4.2 : La richesse en fonction de substitution gasoil S _G	53
Figure 4.3 : Le coefficient d'excès d'air en fonction de la substitution gasoil S _G	54
Figure 4.4 : La consommation de carburant en fonction de la substitution gasoil S _G	54
Figure 4.5 : Le rendement moteur en fonction de la substitution gasoil S _G	56
Figure 4.6 : La consommation spécifique en fonction de la substitution gasoil S _G	57
Figure 4.7 : Comparatif de la consommation en mode gasoil et dual-fuel.....	57
Figure 4.8 : Comparatif du coût de la consommation des carburants avec la nouvelle technique dual-fuel.....	58

Figure 4.9 : Comparatif des émissions de CO ₂ en mode Diesel et Dual-Fuel.....	59
Figure 4.10 : Comparatif des émissions de NO _x en mode Diesel et Dual-Fuel.....	60
Figure 4.11 : Comparatif de la consommation en mode Gasoil et Dual-Fuel.....	61
Figure 4.12 : Comparatif du coût de la consommation des carburants avec la nouvelle technique dual-fuel.....	61
Figure 4.13 : Comparatif des émissions de CO ₂ en mode Diesel et Dual-Fuel.....	62

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 01 : Généralité sur les moteurs diesel

Tableau 1.1 : Classification des moteurs thermiques.....6

Tableau 1.2 : Caractéristiques d'un moteur diesel Caterpillar 3512A.....14

Tableau 1.3 : Débit des pompes d'un moteur diesel Caterpillar 3512A.....15

Chapitre 02 : Choix du carburant

Tableau 2.1 : Composition du GPL en Algérie.....41

Tableau 2.2 : Comparaison entre les propriétés physico-chimique du GPL et Gasoil41

Tableau 2.3 : Caractéristiques physico-chimique du GPL.....42

Chapitre 03 : Etude du moteur CAT3512A en mode Dual-Fuel

Tableau 3.1 : Les paramètres de fonctionnement du moteur Caterpillar 3512A.....47

Tableau 3.2 : Caractéristiques du moteur CAT 3512A avec différents ratios GPL/gasoil.....51

Chapitre 04 : Etude de l'influence de la technologie Dual-Fuel

Tableau 4.1 : Prix unitaires des carburants GPL et Gasoil.....58

NOMENCLATURE

Symbole	Définition	Unité
PCI	Pouvoir calorifique inferieur	kJ/kg
CSC	Consommation spécifique de carburant	g/kWh
Pe	Puissance effective	kW
Cmoteur	Couple moteur	N.m
\dot{m}	Débit massique	kg/h
\dot{q}	Débit volumique	l/h
S _G	La substituons gasoil	%
ω	Vitesse de rotation	rad/s
E	Energie	kWh
Lettres grecques :		
η	Rendement du moteur	%
ϕ	Le ratio d'équivalence air-carburant	
α	Le coefficient d'excès d'air	
Abréviations :		
D	Diesel	
DF	Dual Fuel	
G	Gasoil	
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié	
GSubst	Gasoil Substitué	
GDF	Gasoil mode Dual-Fuel	

INTRODUCTION GENERALE

Les ressources pétrolières sous terrains existantes en Algérie participe dans le développement économique d'une façon notable, cependant plusieurs entreprises nationales et internationales ont été installés dans le sud algérien dans les spécialités : forage, production, exploitation, raffinage etc...

Le forage est un procédé primordial à fin d'extraire le pétrole, celui-ci exige des installations importantes à fin d'assurer un environnement de travail sure est efficace.

Parmi les équipements utilisés on site le moteur diesel CATERPILLAR 3512A qui est exploités comme étant un groupe de forces ou bien comme un groupe électrogène qui entraîne un alternateur pour produire de l'énergie électrique afin d'alimenter les équipements de forage (pompe à boue, treuil, table de rotation,...) ainsi pour assurer l'éclairage dans la plate forme pétrolière, les camps et les bases de vie. Donc ce moteur est le cœur de l'appareil de forage.

En effet, au cours des premières années de développement des moteurs, la puissance et la fiabilité du moteur étaient les préoccupations majeures des constructeurs. Cependant, lors des dernières décennies, la réglementation sur les émissions et l'épuisement des ressources pétrolières ont suscité une attention particulière sur la nécessité du développement de conceptions propres et efficaces des moteurs.

L'une des méthodes les plus fiable et adéquate utilisé pour résoudre se problème est la technologie Dual-Fuel.

Dans cet axe que notre mémoire se base, or l'objectif de notre travail est de trouver le meilleure carburant alternative, solution adéquate pour réduire la consommation et les émissions polluantes et bien sure on assurant le bon fonctionnement du moteur.

Pour cela notre travail est subdivisé dans les points suivants :

- On commence d'abord par une représentation du moteur CAT3512A et son mode de fonctionnement.
- Ensuite, le choix du carburant primaire et l'adaptation du moteur CAT3512A pour un fonctionnement Dual-Fuel suivi d'une étude des performances du moteur du cas actuel en mode Dual-Fuel, raccordée par une interprétation des résultats obtenus.
- Puis, une étude de l'influence de la technologie Dual-Fuel sur le moteur CAT3512A et sur tout le parc de l'ENAFOR.
- On termine par une conclusion générale.

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

Raison sociale : Entreprise Nationale de Forage.

Statut juridique : Société par actions.

Capital social : Cinquante Milliards (50 000 000 000,00) de Dinars détenu à 100 % par la Société Holding Services Para Pétroliers SONATRACH.

Siege social : Zone Industrielle, Bir Messaoud, Hassi Messaoud, Wilaya de Ouargla. [1]

HISTORIQUE :

En 1966 : ENAFOR est créée sous la dénomination « ALFOR » dans le cadre plan de développement de SONATRACH en tant que joint –venture entre SONATRACH (51% des parts) et la SEDCO USA (South Eastern Drilling Company Dallas) (49 % des parts).

En 1981 : SONATRACH met fin à son partenariat avec le SEDCO par la mise en place, le 1^{er} janvier 1982, de L'Entreprise National de Forage par arrêté Ministériel du 31 décembre 1981 portant date d'effet de substitution d'ENAFOR à SONATRACH dans une partie de ses compétence.

En 1989 : ENAFOR devient une entreprise autonome sous la forme d'une SPA, dont le capital social de 20 000 000 ,00 DA, est détenu par le Fond Mines à 40%, le Fond Chimique/Pétrochimie/Pharmacie à 30% et le Fond Agro-alimentaires à 30%.

SONATRACH : par la biais de la holding SSP (Société de Service Pétroliers) devient en 1998, l'actionnaire principal d 'ENAFOR avec 51% des parts à son actif. Les 49 % sont détenu par la holding RGT (Réalisation des Grands Travaux).

L'année 2005 : marque l'intégration d'ENAFOR au Groupe SONATRACH qui devient dès lors 100% filiale de SONATRACH.

ACTIVITES :

Activités de réalisation :

- Forage (Développement, exploration) ;
- Work–Over (Reprise d'exploitation et d'entretien des puits producteurs d'hydrocarbures).

Le pack appareils de forage et de Work-Over :

L'ENAFOR dispose de 52 appareils de forage de type super lourd, lourd et moyen.

Activités des supports :

- Transport, principalement le démontage, le transport et le montage (DTM) des appareils de forage et de Work-Over ;
- Maintenance (Rénovation, révision et maintenance) des appareils et équipements pétroliers ;
- Hébergement et restauration ;
- Approvisionnements et gestion des stocks (Pour la prise en charge des besoins en pièces de rechange).

La maintenance pétrolière :

ENAFOR dispose d'installations et de moyen humains hautement qualifiés pour assurer :

- La Maintenance des équipements de Forage ;
- Le Revamping (Reconstruction et rénovation approfondie) ;
- La mise à niveau de ses installations de forage et de Work-Over conformément aux normes internationales grâce à un personnel spécialisé dans les domaines suivants :
- La mécanique de Forage ;
- L'électricité de Forage ;
- La fabrication mécanique ;
- La construction métallique.

Le transport et déménagement des chantiers :

Les besoins logistiques de l'entreprise sont assurés par ses propres moyens pour les nécessités suivantes :

- DTM des appareils (Démontage, Transport et Montage des appareils de Forage) ;
- Transport de carburant ;
- Transport du matériel des chantiers ;
- Approvisionnement des chantiers en nourritures ;
- Approvisionnement des chantiers en pièces de rechange (Consommables) ;

- Transport du personnel et des équipes d'intervention rapide.

La sonde école :

ENAFOR a mis en service, à partir du 1^{er} novembre 2007, la Sonde Ecole pour assurer aux nouvelles recrues un encadrement pédagogique de qualité, dispensé par des cadres chevronnés dans le domaine du Forage et leur faire assimiler la théorie par la pratique, en condition réelles, afin de disposer immédiatement et rapidement d'un personnel opérationnel qualifié et spécialisé et préparer la relève de demain.

La stratégie d'ENAFOR, par la mis en service de la Sonde Ecole, dotée de tous les moyens nécessaires pour une formation de qualité, vise surtout le perfectionnement des compétences professionnelles spécialisées. [1]



Chantier n° 34 (ENAFOR)

Chapitre 01

GENERALITE SUR LES MOTEURS DIESEL

1-Introduction :

Le moteur est un organe qui transforme en travail mécanique une source d'énergie qui lui est fournie.

- Il est dit « moteur thermique » si la source d'énergie est constituée par un combustible.
- Il est dit « moteur électrique » si la source d'énergie est l'électricité.

Dans un moteur thermique, la combustion peut se faire :

- A l'extérieur du moteur : on le dénomme alors « moteur thermique à combustion externe ».

C'est le cas de la machine à vapeur.

- A l'intérieur du moteur on le dénomme alors « moteur thermique à combustion interne ».

C'est le cas de tous les moteurs thermiques employés actuellement en automobile.

En pratique, on a toutefois réservé le terme de « moteur à combustion interne » aux moteurs employant comme carburant le gas-oil (l'usage tend à franciser le terme « gas-oil » en « gazole ») dont le principe d'allumage n'est pas le même que celui des moteurs à essence.

Les moteurs utilisant l'essence ont été dénommés « moteurs à explosion » (ou à allumage commandé). Dans ces moteurs, l'inflammation des gaz est produite par une étincelle électrique qui provoque « l'explosion » du mélange gazeux.

Le rôle du moteur est de fournir au véhicule un moyen d'assurer sa propulsion en utilisant lui-même l'énergie contenue dans un combustible.

C'est un transformateur d'énergie. [2]

Dans ce chapitre on va étudier le moteur diesel et son principe de fonctionnement et ensuite on va se concentrer sur le moteur CAT3512A sur lequel notre mémoire se base.

2-Classification des moteurs thermiques :

Le classement des moteurs peut être fait de différentes façons :

<p>A- Le mode de fonctionnement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moteur à piston alternatif. - Moteur à piston rotatif. - Moteur à turbine. - Moteur mixte (piston libre à turbine). 	<p>B - Le mode de remplissage du cylindre :</p> <p>On distingue :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moteur alimenté. - Moteur sur alimenté.
--	--

<p>C- Le type de combustible :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moteur à combustion légère (essence). - Moteur à combustion lourde (gas-oil). - Moteur à gaz (GPL). 	<p>D - Suivant le cycle adopté :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moteur à quatre temps. - Moteur à deux temps.
<p>E- Le mode d'allumage :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moteur à allumage par compression. - Moteur à allumage par étincelle électrique. 	<p>F- La formation de mélange :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moteur à carburateur. - Moteur à injection.
<p>G - Le cycle de fonctionnement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moteur à combustion à volume constant (cycle OTTO). - Moteur à combustion à pression constante (cycle Diesel). - Moteur à combustion à volume constant pris à pression constante (mixte). 	<p>H - La disposition du cylindre :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moteur à cylindres en ligne (L). - Moteur à cylindres en V (V). - Moteur à cylindres en W. - Moteur à cylindres en X. - Moteur à plat. - Moteur à cylindres en H. - Moteur à pistons opposés. - Moteur en étoile.
<p>I- La vitesse du piston :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Moteur lent. - Moteur semi rapide. - Moteur rapide. 	<p>J - La disposition des soupapes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Arbre à cames en tête et soupapes en tête. - Arbre à cames latéral et soupapes culbuteurs, - Arbre à cames latéral et soupapes latérales.
<p>K-Le mode de refroidissement:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Refroidissement par eau et par air. 	

Tableau 1.1 : Classification des moteurs thermiques [3]

3-Moteur diesel :

3-1-Historique de moteur Diesel :

Le moteur diesel doit son nom à son inventeur, l'ingénieur allemand Rudolf Christian Karl Diesel, né le 18 mars 1858 à Paris et disparu en 1913. A l'âge de 35 ans il publia après de longues études un ouvrage intitulé : "Théorie et construction d'un moteur thermique rationnel".

Dans cet ouvrage, Rudolf Diesel, qui avait l'idée de réaliser un moteur dont le cycle se rapprochait du cycle de Carnot a présenté ce nouveau moteur comme un moteur à combustion interne dans lequel a été utilisé la chaleur due à la compression de l'air pour provoquer l'allumage du combustible.

Cinq mois plus tard, la Société CRUPP fait les essais du premier diesel, dans l'atelier d'Augsbourg ; le combustible injecté après pulvérisation, explosa comme prévu mais malheureusement, le moteur ne résista pas. Toutefois, le but recherché était atteint et Rudolf diesel ne se découragea pas : il construisit un moteur plus résistant et fit une démonstration du parfait fonctionnement de son nouveau moteur à KASSEL en 1897.

A la suite de ces expériences, le Français CAPITAINÉ inventa, en 1918, un moteur semi-diesel ainsi nommé pour la simple raison qu'il ne comprime pas l'air jusqu'à la température d'inflammation du combustible.

La mise en route s'effectue après préchauffage de la chambre de combustion dont la température est ensuite entretenue par les combustions successives.

En 1925, la firme BENZ réalisa un moteur diesel à deux cylindres et GNUKERS un moteur diesel deux temps à cylindres opposés.

PACKARD construisit en 1930 un moteur d'avion en étoile, à refroidissement par air. Sans les études poussées de Rudolf Diesel tous les dérivés du moteur diesel n'auraient jamais pu être réalisés.

Rudolf Diesel, passionné de mécanique, a obtenu différents brevets dont un en particulier, en 1892, intitulé "procédé pour produire de la force motrice en faisant brûler un combustible".

Il disparut en 1913 alors qu'il se rendait en Angleterre. [2]

3-2-Cycle à quatre temps de moteur Diesel :

3-2-1-Cycle théorique :

C'est l'ensemble des évolutions que subit une même masse de mélange depuis son entrée dans le cylindre jusqu'à sa sortie dans l'atmosphère, avec variation de volume, de pression, et de température.

Les quatre temps correspondent à une rotation du vilebrequin égale à 720° , soit deux tours. Dans ce cycle nous avons les phases suivantes :

1^{er} temps. – Admission :

La soupape d'admission étant ouverte, la course descendante du piston créant une aspiration, de l'air pénètre dans le cylindre.

2^e temps. – Compression :

La soupape d'admission se referme. Dans sa course ascendante le piston comprime l'air à une pression de l'ordre de $3 \cdot 10^6$ à $4 \cdot 10^6$ Pascals (30 à 40 kg/cm²). Cette compression brutale de l'air engendre une augmentation de température. Environ 500 à 600 °C.

3^e temps. - Injection, combustion :

Lorsque le piston arrive au voisinage du point mort (P.M.H.) en fin de compression, on injecte le combustible pulvérisé dans la chambre de combustion. La pression d'injection doit naturellement être supérieure à la pression régnant alors dans le cylindre pour permettre l'introduction du combustible. Elle varie suivant le type de moteur entre $8 \cdot 10^6$ et $25 \cdot 10^6$ Pascals (80 à 250 kg/cm²) et même davantage dans les « Diesel marins ».

Au contact de l'air comprimé à température élevée, le combustible s'enflamme de lui-même. La température d'inflammation du gas-oil étant voisine de 300 °C, donc bien inférieure à celle de l'air contenu dans le cylindre.

Il s'enflamme spontanément à mesure qu'il est injecté. Néanmoins, un certain temps mesurable s'écoule entre le début de l'injection et le début de la combustion. Cet intervalle est connu sous le nom de « *délai d'allumage* ».

Les gaz augmentent très rapidement de volume, leur détente chasse le piston vers le bas, ou point mort bas (P.M.B.). Le vilebrequin reçoit de l'énergie durant toute cette course : *C'est le temps moteur.*

Au moment de la combustion la pression atteint $5 \cdot 10^6$ à 10^7 Pascals (50 à 100 kg/cm²); la température est alors de l'ordre de 1 800 à 2 000 °C.

4^e temps. – Echappement :

La soupape d'échappement s'ouvre, les gaz brûlés sont chassés par le piston qui remonte. Pour la distribution nous trouvons, comme sur les moteurs à explosion, des avances et des retards à l'ouverture ou à la fermeture des soupapes. [2]

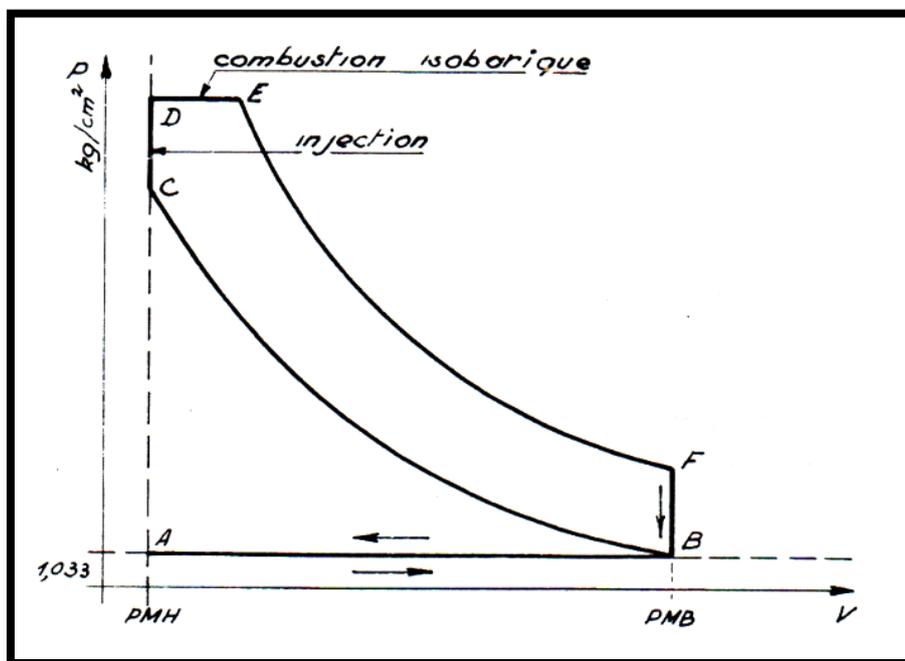


Figure 1.1 : diagramme de cycle mixte (cycle de sabathé)

3-2-2-Cycle réel :

Pour obtenir un fonctionnement correct du moteur Diesel, les modifications suivantes ont été apportées au cycle théorique.

Avance ouverte admission (AOA) :

Pour permettre une meilleure évacuation des gaz brûlés, on donne de l'avance à l'ouverture de la soupape d'admission, de façon à ce que l'air aspiré dans le cylindre chasse les gaz brûlés.

Retard fermeture admission (RFA) :

On donne du retard à la fermeture de la soupape d'admission pour obtenir un meilleur remplissage. En effet, l'air ayant acquis une certaine vitesse durant la course descendante du piston, continue de pénétrer dans le cylindre pendant le temps mort du piston quand il est au PMB.

Avance ouverture échappement (AOE) :

A la fin de cycle de détente, il est bon d'avoir de l'avance à l'ouverture de la soupape d'échappement pour permettre une meilleure évacuation des gaz brûlés.

Retard fermeture échappement (RFE) :

Nous remarquerons que ce retard correspond à quelque chose près à l'avance à l'ouverture de la soupape d'admission. En effet, les gaz frais pénétrant dans le cylindre chassent les gaz brûlés.

Avance à l'injection (A.I.) :

Comme un certain temps s'écoule entre le début de l'injection et le début de la combustion.

Représenté par l'angle α sur la figure I.2, il faut de l'avance à l'injection pour faire coïncider le début de la combustion avec la position du piston au P.M.H. C'est pour cette raison que, durant la compression, on injecte le combustible avant que le piston soit exactement au P.M.H.

Il ne faut pas négliger cette avance, mais ne pas l'exagérer sous peine d'entraîner de graves inconvénients.

On a donc été ramené, sur le moteur diesel, à opérer comme sur le moteur à explosion un réglage de la distribution (AOA- RFA- AOE- RFE et AI).

On obtient ainsi le diagramme de la figure.

- 1) L'aspiration et l'échappement ne s'effectuent pas à la pression atmosphérique en raison des pertes de charge.
- 2) La compression et la détente ne sont pas adiabatiques mais polytropiques.
- 3) La combustion n'est pas instantanée, ne commence pas au début du 3ème temps pour remédier à cet état de choses on réalise une avance à l'injection AI. [2]

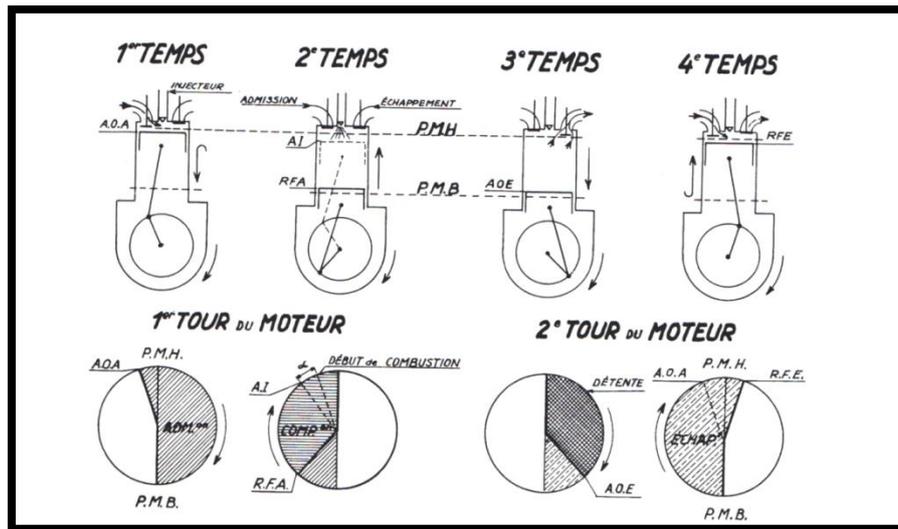


Figure 1.2 : cycle réel

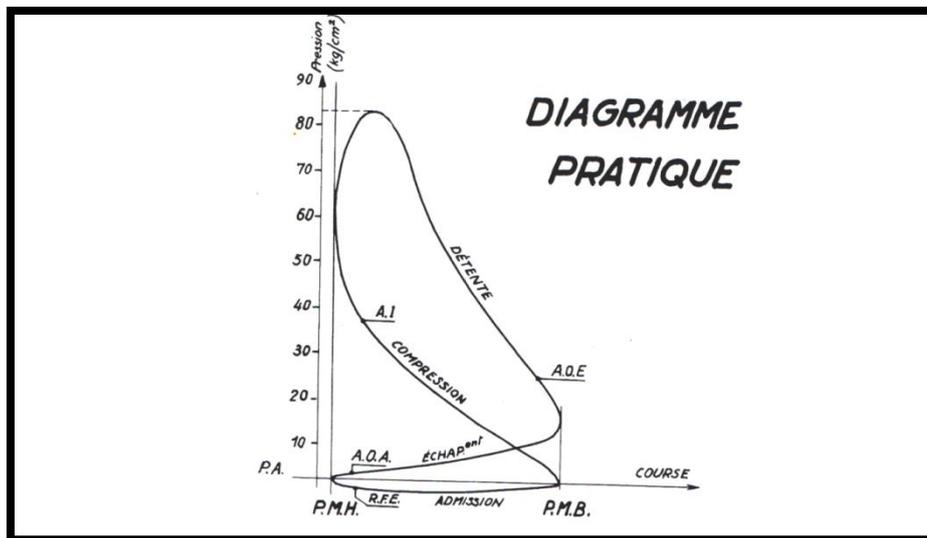


Figure 1.3 : Diagramme de cycle réel

3-3-Avantages et inconvénients du moteur diesel :

a-Avantage :

- Le rendement (rapport entre l'énergie utilisable et l'énergie fournie à la machine) est meilleur : le taux de compression étant plus élevé, une proportion plus grande de chaleur est convertie en travail. En outre, la consommation spécifique est en moyenne de moins de 200 g/kW/h au lieu de 300 g/kW/h pour le moteur à allumage commandé (explosion). Rendement thermique moyen du moteur diesel = 0,35 à 0,38 en version

aspiré ; γ à 0,40 en version suralimenté ; et actuellement γ à 0,45 en équipement turbo- compound.

- Le couple moteur est plus important et il reste sensiblement constant pour les faibles vitesses.
- Le carburant employé est avantagé fiscalement dans certains pays.
- Les risques d'incendie sont moindres car le point d'inflammation du gazole est plus élevé que celui de l'essence.
- Les gaz d'échappement sont beaucoup moins toxiques car ils contiennent moins d'oxyde de carbone (la combustion est plus complète), les particules sont maintenant filtrées.
- Le moteur diesel est le plus adapté à la suralimentation, contrairement au moteur à allumage commandé où la température de fin de compression est limitée par l'indice d'octane de l'essence.

b-Inconvénients :

- Les organes du moteur sont largement calculés, car ils sont soumis à des températures élevées et à des pressions très fortes (de 50 bar à 60 bar) (1 bar 100 kPa, ou 10^5 Pa).
- Ces pressions peuvent atteindre 120 à 150 bar s'il se produit un raté d'inflammation et beaucoup plus sur un système haute pression.
- L'étanchéité entre le cylindre et le piston est plus difficile à réaliser.
- L'aptitude au démarrage à froid est moins bonne que pour un moteur à allumage commandé. Il faut assurer un refroidissement suffisant du moteur pour obtenir une bonne tenue des métaux.
- Le graissage est plus délicat du fait des hautes températures atteintes et des charges plus fortes des organes mobiles.
- Le moteur est plus coûteux à l'achat (les organes d'injection demandent un usinage délicat et très précis).
- Le fonctionnement du diesel est plus bruyant que celui du moteur à essence, et l'on y perçoit aisément un bruit de fonctionnement caractéristique, dû aux fortes pointes de pression dans les cylindres. Des progrès importants ont cependant été réalisés avec les systèmes « à rail commun » (appelés common rail).
- Problème de viscosité du carburant par très basses températures. [4]

4-Moteur Diesel CATERPILLAR 3512A :**4-1-Description et principe de fonctionnement :**

On les appelle CAT 3512 par rapport à leur marque Caterpillar de série 3500, 12 cylindres en V. ils sont spécialement conçus pour les applications de forage. C'est des moteurs Diesel à quatre temps ; suralimentée par deux turbocompresseurs qui tournent à une vitesse de 45000 à 60000 tr/mn.

Chaque culasse comporte deux soupapes d'admission et deux soupapes d'échappement. L'arbre à came actionne mécaniquement les culbuteurs et les soupapes par les poussoirs. Le gas-oil est injecté directement dans le cylindre par le bec de pompe injecteur qui possède 9 orifices de pulvérisation (un par cylindre).

Un régulateur électrique et un mécanisme de commande qui contrôle le débit de l'injection du gas-oil afin de maintenir le régime moteur choisi par l'opérateur.

L'air d'admission est filtré par le filtre à air. Puis comprimé par le turbocompresseur avant de pénétrer dans les cylindres. Le turbocompresseur est entraîné par les gaz d'échappement du moteur. Le moteur est refroidi par un liquide de refroidissement qui est mis en circulation par la pompe à eau dans le bloc cylindres.

Le cycle à quatre temps de ce moteur est le même que celui de tous les moteurs Diesel. Donc, il nécessite deux tours du vilebrequin ; soit 720° de rotation du vilebrequin pour effectuer un cycle complet. [5]

Un cycle complet vaut cinq phases successives suivantes :

La 1^{ère} phase :

Est celle d'admission dans la quelle se fait une aspiration d'air frais par la soupape d'admission et l'introduire dans le cylindre.

La 2^{ème} phase :

Fait produire la compression de l'air frais préalablement introduit dans le cylindre à une pression de 30 à 40 bars. Cette compression brutale engendre une température de l'air de 500°C .

La 3^{ème} phase :

Fait l'injection du gas-oil (pulvérisé très finement) qui a lieu pendant une partie de la course descendante du piston sous forme de brouillard. Au contact de l'air comprimé à température élevée, le combustible s'enflamme.

La 4^{ème} phase :

Les gaz augmentent de volume, leur détente chasse le piston vers le PMB. Le vilebrequin reçoit de l'énergie durant toute cette course.

La 5^{ème} phase :

Est celle qui chasse les gaz brûlés par la soupape d'échappement vers l'atmosphère.

Remarque :

- Au moment de la combustion la pression des gaz atteint 50 à 100 bars ; la température des gaz de combustion atteint 1800 à 2000 °c.
- La pression d'injection est de l'ordre de 196 à 238 bars. Le nez de l'injecteur possède 9 orifices de pulvérisation. La surface du piston a une forme cardioïde (forme chapeau mexicain). Cette forme permet à l'air de tourbillonner ce qui assure un mélange homogène air + gas-oil.
- Le dosage en air frais doit être maximum pour obtenir une bonne combustion du mélange air + gas-oil. [5]

4-2- Caractéristiques d'un moteur diesel Caterpillar 3512A :

Alésage	120mm
Course	190mm
Angle entre les rangées	60°
Nombre de cylindres	12
Cylindrée Unitaire	4.31 Litres
Cylindrée Totale	51,8Litres
Taux de compression	13/1

Sens de rotation vue depuis Le volant	Sens antihoraire
Ordre d'injection	1-12-9-4-5-8-11-2-3-10-7-6.
Type d'injection	Injection directe
Type d'injecteur	Injecte-Pompe à 9 Trous
Régime de ralenti	900 tr/mn
Régime Nominal	1200 tr/mn
Puissance Mécanique	1210 HP

Tableau 1.2 : Caractéristiques d'un moteur diesel Caterpillar 3512A [5]

Débit des pompes :

Pompe à huile	340 l/mn
Pompe à gas-oil	21 l/mn
Pompe à eau	1520 l/mn

Tableau 1.3 : Débit des pompes d'un moteur diesel Caterpillar 3512A [5]

4-3-Organe du moteur CATERPILLAR :

4-3-1-Principaux organes :

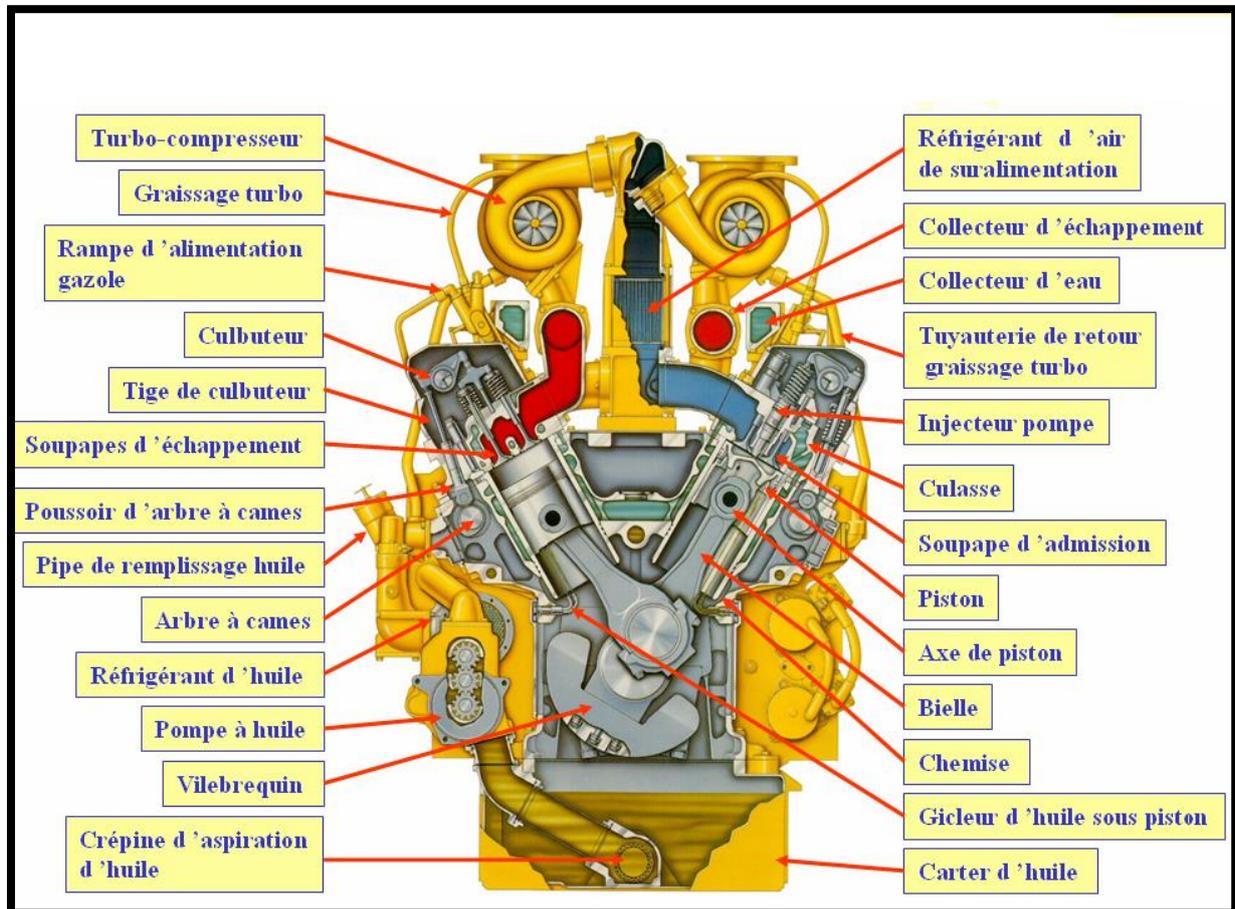


Figure 1.4 : Les différents organes du moteur 3512

4-3-2-Parties fixes :

a-Le bloc moteur :

Il est généralement coulé en fonte d'une seule pièce venu de fonderie. Les cylindres peuvent être usinés ou évidés pour recevoir les chemises. Une circulation d'eau assure leur refroidissement et lubrification.

Les blocs de série 3500 CAT comportent des portes de visite qui autorisent l'accès aux embiellages, aux paliers de vilebrequin et aux arbres à cames.

Le bloc cylindre doit remplir plusieurs fonctions :

- Résister à la pression des gaz, qui tendent à dilater et à repousser la culasse ;
- Guider le piston ;
- Contenir l'eau de refroidissement tout en résistant à la corrosion ;
- Comme, un support, qui reçoit les ensembles moteurs des cylindres, chemise. [3] [7]



Figure 1.5 : Bloc-moteur

b-Les Cylindre :

On englobe généralement sous le nom de bloc cylindre l'ensemble fixe constitué par le tube, les cavités de refroidissement, les supports d'organes de distribution et les amorces des tubulures de circulation d'eau, d'alimentation et d'échappement.

Le cylindre surmonté de la culasse réalise la chambre de combustion, il est constitué par un tube parfaitement alésé qui contient le piston. Il guide ce dernier entre le PMH et le PMB. Ils sont généralement en fonte. [3] [7]

c-Chemise de cylindre :

Les chemises de CAT sont en fonte spécifique centrifugée et type amovible. Chaque chemise est fixée à sa partie supérieure par sa collerette serrée entre la culasse et le bloc. La partie inférieure est guidée dans le bloc et l'étanchéité assure par des joints toriques.

La surface extérieure est revêtue d'un traitement antioxydant La surface interne est pierrée. Ils sont de type chemise humide, fabriquées seule, rapportées sur embase du bloc,

positionnées par un méplat. Ils sont directement en contact avec le fluide de refroidissement. [3] [7]



Figure 1.6 : Chemise de cylindre

d-La Culasse :

Disposé à l'extrémité supérieure du cylindre, elle ferme le cylindre et constitue la chambre de combustion.

Les culasses CAT sont de type individuel et reçoivent quatre soupapes par cylindre. Une plaque intermédiaire en Aluminium assure un appui entre le bloc et la chemise. Les guides et sièges de soupapes sont amovibles (fixation par ajustage serré). Le puits central d'injection est directement usiné dans la culasse. Un conduit de gasoil permet l'alimentation des injecteurs. Des férules indépendantes permettant le passage de l'huile et du liquide de refroidissement entre culasse et bloc. [3] [7]



Figure 1.7 : La culasse

e-Le joint de culasse :

Généralement constituée, de deux feuilles de cuivre enserrant une feuille d'amiante, ou réduit quelque fois à sa plus simple expression : une simple feuille de cuivre, le joint de culasse assure l'étanchéité entre la culasse et le bloc cylindre. [3] [7]

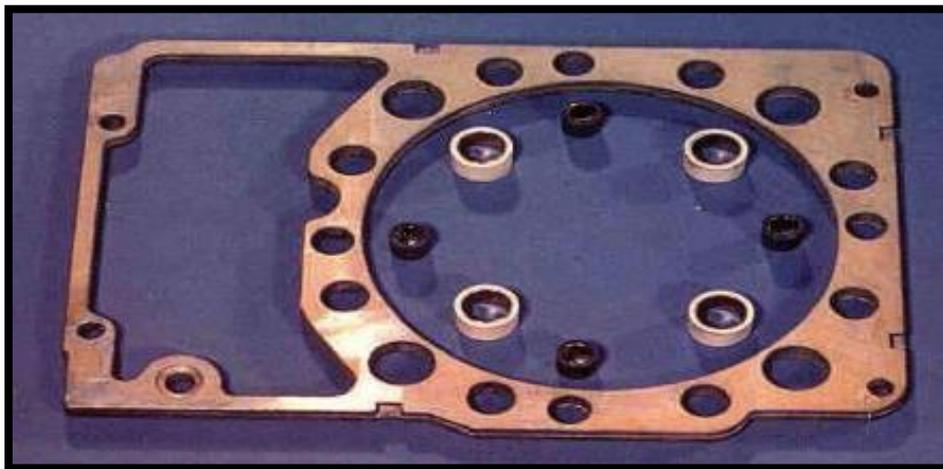


Figure 1.8 : Le joint de culasse

f-Le Carter :

Le carter est une enveloppe métallique placée à la partie inférieure du moteur, le carter se compose de :

- Le demi-carter supérieur fixé par les boulons à la partie inférieure de bloc-cylindres. Il est coulé avec l'ensemble du bloc-cylindres, il forme le carter cylindre;
- Le demi-carter inférieur ferme complètement la partie inférieure de bloc moteur. [3]
[7]

4-3-3-Parties mobiles :

La transmission de couple moteur est assurée par un système dynamique comportant trois éléments principaux : le piston, la bielle et le vilebrequin. L'ensemble constitue l'attelage mobile.

g-Le Piston :

Le piston est un organe qui constitue les parois de la chambre de combustion son rôle est de recevoir l'effort moteur exercé par la dilatation des gaz de combustion d'aspirer l'air extérieur, de le comprimer et d'évacuer les gaz brûlés, dans un moteur à quatre temps le piston ne fournit qu'un seul temps moteur lors de la détente pendant les trois autres temps (aspiration, compression, échappement) il absorbe une partie de la puissance fournie par un autre piston pendant son temps moteur.

Le piston est réalisé en alliage d'aluminium avec des gorges port segments munies de garnitures en fonte, ses segments sont logés dans la partie haute du piston, la tête, assure l'étanchéité de la chambre de combustion, On distingue le segment de feu, les segments de l'étanchéité et les segments racleurs, dont l'un est souvent disposé plus bas que l'axe de piston. Le segment de feu est le plus souvent chromé. Il est disposé assez loin du bord de piston afin d'éviter qu'il soit soumis directement à la chaleur dégagée lors de la combustion, les pistons sont recouverts d'un enduit graphité permettant de favoriser le rodage et éviter les grippages en cas de surchauffe anormale.

Il doit remplir quatre fonctions importantes :

- Assurer le maximum d'étanchéité de la chambre de combustion par l'intermédiaire des segments ;
- Transmettre à la bielle l'effort produit par la combustion ;
- Servir de guide au pied de bielle ;
- Transmettre la chaleur aux parois du cylindre afin de l'évacuer. [3] [7]



Figure 1.9 : Le piston

h-La Bielle :

La bielle assure la liaison mécanique entre le piston animé d'un mouvement rectiligne, et le vilebrequin doté d'un mouvement de rotation. Réalisée en acier, elle doit pouvoir résister à des efforts de compression très élevés. A ce titre les constructeurs ont généralement adoptés une section en H. Le plan de coupe de la tête de bielle est souvent oblique afin de faciliter la dépose de l'ensemble bielle piston par le haut de cylindre. La bielle comporte trois parties essentielles :

- Le pied articulé sur l'axe de piston ;
- La tête articulée sur le maneton du vilebrequin ;
- Le corps qui transmet les efforts entre les articulations. [3] [7]



Figure 1.10 : La bielle

i-L'arbre à cames:

Il est entraîné par le vilebrequin et doté d'autant de cames que des soupapes. Selon la conception de la distribution, son emplacement au sein du moteur varie. La solution la plus répandue sur les moteurs de grandes puissances est la distribution culbutée.

L'arbre à came se situe dans le bloc et son entraînement est assuré par un ensemble de pignons dont le rapport de multiplication est d'un demi (1/2). La liaison arbre à cames soupapes est assurée par un ensemble de poussoirs, de tiges de culbuteurs et culbuteurs. Des ressorts hélicoïdaux, logés autour des soupapes, referment automatiquement celles-ci, quand la pression communiquée par les cames de l'arbre à cames cesse.

Lorsque l'arbre à cames se situe dans la culasse, il est dit en tête. Cette solution, permet de diminuer le nombre d'éléments donc d'alléger le système de distribution, les poussoirs, les tiges de culbuteurs, les culbuteurs. La liaison arbre à cames vilebrequin est alors réalisée par une courroie crantée.

Cette conception de distribution moderne bénéficie de plusieurs avantages :

- Réduction des masses en mouvement.
- Lubrification du système de liaison inexistant.
- Fonctionnement silencieux. [3] [7]

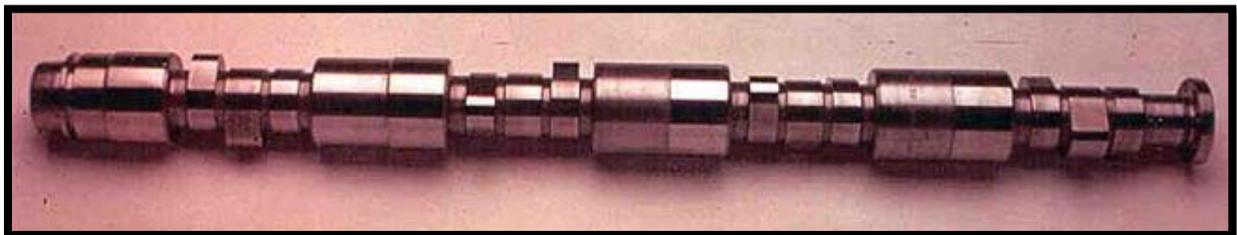


Figure 1.11 : L'arbre à came

j-L'arbre moteur :

Constitué du vilebrequin et de volant moteur, il transmet sous la forme d'un couple l'énergie développée lors de la combustion. La régularisation du fonctionnement du moteur et l'équilibrage de la rotation du vilebrequin est réalisé par le volant moteur. Le vilebrequin est réalisé avec un soin tout particulier, acier au nickel chrome, usinage de précision des parties tournantes, traitements thermiques, équilibrage, font que le vilebrequin et la pièce maîtresse

du moteur, en constitue l'un des éléments les plus onéreux. Parmi les éléments principaux du vilebrequin on distingue :

- Les tourillons qui permettent à l'arbre de reposer sur les paliers de carter ;
- Les manetons sur les quels s'articulent les bielles ;
- Un dispositif de fixation du volant moteur. [3] [7]

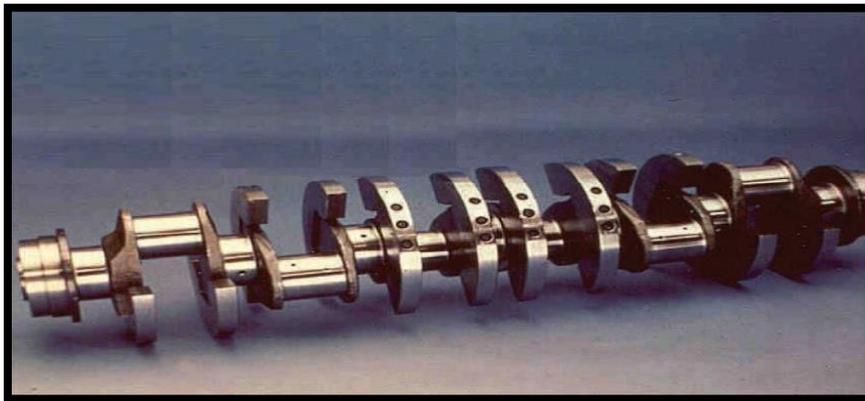


Figure 1.12 : Vilebrequin ou Arbre manivelle

k-Les coussinets :

Les coussinets de bielle et de paliers sont du type mines et sont parfaitement interchangeables ils sont réalisés en deux demi-coquilles en acier revêtues d'une couche mince d'aluminium, d'une fine couche d'accrochage en alliage de cuivre, d'une très fine couche d'étain-plomb et d'une protection étain.

Constitués de demies coquilles démontables, recouvert d'une couche de métal antifriction, ils réalisent les contacts entre le palier du vilebrequin et la tête de la bielle. [3] [7]

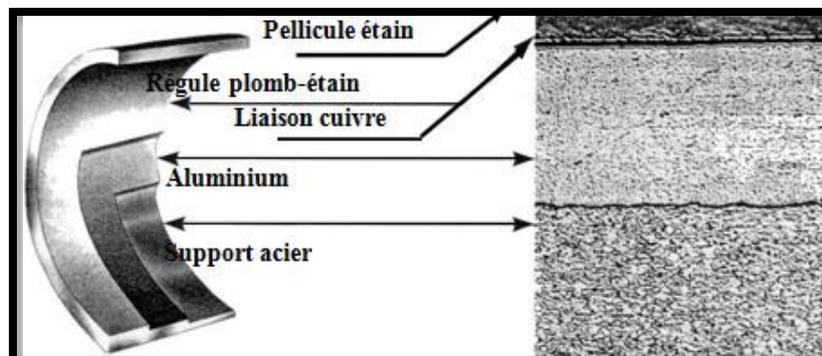


Figure 1.13 : Coussinet

l-Les culbuteurs :

Quelque fois appelés aussi basculeurs, les culbuteurs transmettent le mouvement des cames aux soupapes par l'intermédiaire des tiges de culbuteur. L'extrémité en contact avec la tige de culbuteur est munie d'un système vis écrou permettant le réglage du jeu aux culbuteurs. [3] [7]

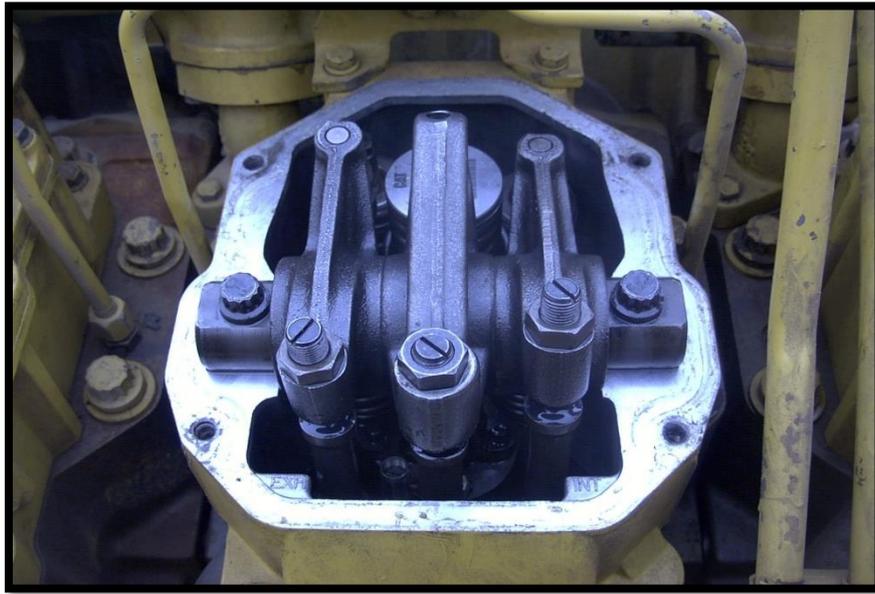


Figure 1.14 : culbuteur

m-Les soupapes :

Les soupapes permettent le passage d'un maximum de gaz dans un temps très court et doivent assurer une parfaite étanchéité à la fermeture sur le siège de soupape. Les soupapes sont exposées aux températures très élevées régnant dans la chambre de combustion (de l'ordre de 800°C à l'ouverture de la soupape d'échappement). La fabrication des soupapes nécessite donc l'emploi de métaux capables de résister à la déformation à haute température (fluage) et aux chocs répétés, tels les aciers austéniques, additifs comme le chrome, le nickel, le tungstène.

La portée conique assure l'étanchéité parfaite à la fermeture et un centrage correct évitant la déformation de la tige ou de la queue. On distingue deux sortes de soupapes :

- Les soupapes d'admission ;
- Les soupapes d'échappement. [3] [7]

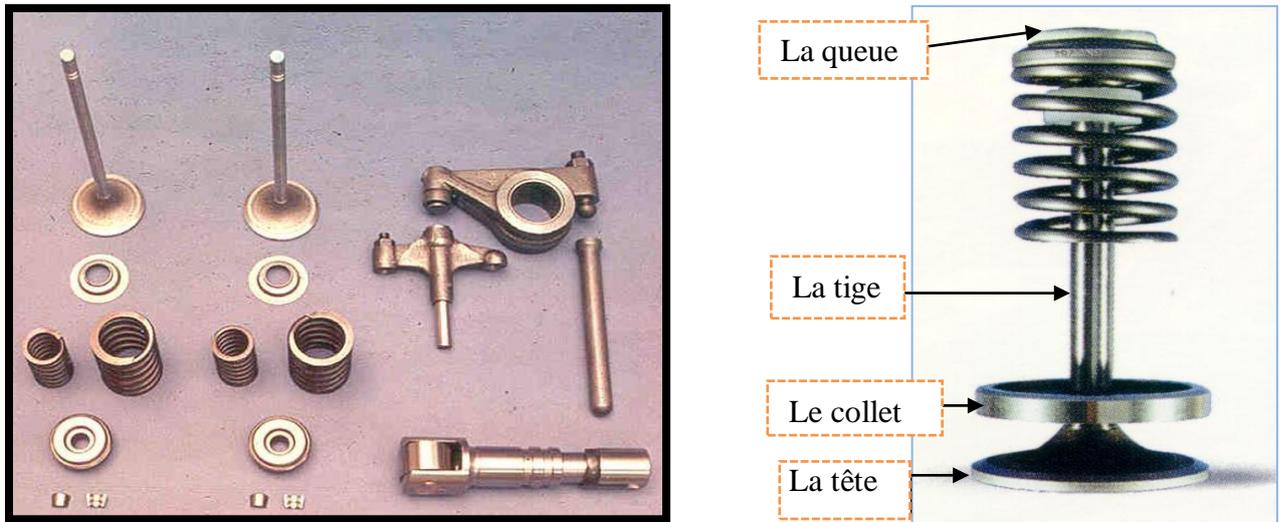


Figure 1.15 : soupape

4-4-Etude des circuits et systèmes :

4-4-1-Système de démarrage :

Le moteur démarre à l'aide d'un démarreur à air comprimé. Par l'intermédiaire d'un filtre, l'air comprimé arrive dans la soupape à bouton poussoir et la soupape de démarrage principale. [3]

4-4-2-Système de distribution :

La distribution se compose des pignons d'arbre à cames, entraînés par le pignon du vilebrequin par l'intermédiaire des pignons libres. Pour les moteurs CATERPILLAR de série 3500, le pignon de l'arbre à cames est fixé par un montage conique serré. Afin de réduire le bruit, les dentures de pignon sont du type hélicoïdal. L'emplacement des arbres à cames est latéral, les cames entraînent les soupapes et injecteurs par intermédiaire des poussoirs, culbuteurs liés aux tiges des culbuteurs. [5] [7]

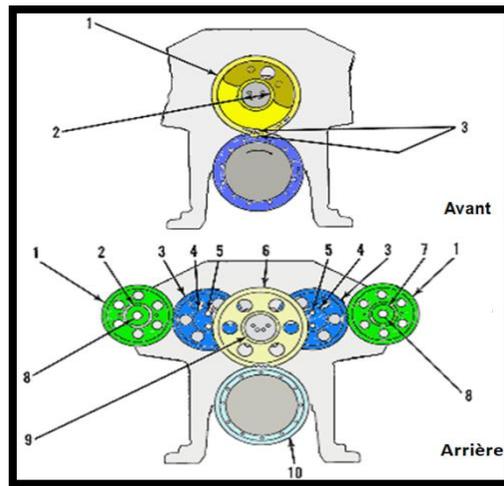


Figure 1.16 : Système de distribution

a-Distribution avant :

- 1-Pignon d'entraînement des pompes à eau et à Huile ;
- 2-Balancier ;
- 3-Pignon de vilebrequin.

b-Distribution arrière :

- 1-Pignon des arbres à cames gauche et droite ;
- 2, 3, 4, 5, 6,8-Pignons intermédiaires ;
- 7- Arbre à cames ;
- 9- Pignon de vilebrequin ;
- 10-Volant moteur.

4-4-3-Circuit d'air et d'échappement :

Ces circuits comprennent :

- Un refroidisseur d'air.
- Deux turbo-chargeurs.
- Deux filtres à air.
- Deux pipes d'admission d'air.
- Deux soupapes d'admission par cylindres.
- Deux soupapes d'échappement par cylindre.
- Deux collecteurs d'échappement.
- Une chambre de combustion par cylindre.

a-Circuit d'air :

L'air aspiré par les deux turbo-chargeurs passe d'abord à travers les filtres à air sur la turbine d'admission de chaque turbo-chargeur afin d'éviter l'introduction des poussières qui sont l'une des causes d'usure des organes mécaniques; l'air est ensuite refoulé vers le refroidisseur d'air à une température de 93°C environ et avec une pression plus importante.

L'air traverse le refroidisseur d'air et entre dans la chambre centrale du vé du moteur. Cette action fera abaisser la température d'air à 38°C environ.

L'air frais se trouvant dans la chambre centrale passe dans les coudes en aluminium communiquant avec les orifices d'admission.

Dès que les soupapes d'admission s'ouvrent, l'air entre en quantité suffisante dans la chambre de combustion. [5] [7]

b-Circuit d'échappement :

Les gaz brûlés sortent par l'intermédiaire des soupapes d'échappement ouvertes, puis par les collecteurs d'échappement. Ces gaz se détendent sur les turbines des turbo-chargeurs et enfin s'échappent dans l'atmosphère par l'intermédiaire du silencieux d'échappement. [5] [7]

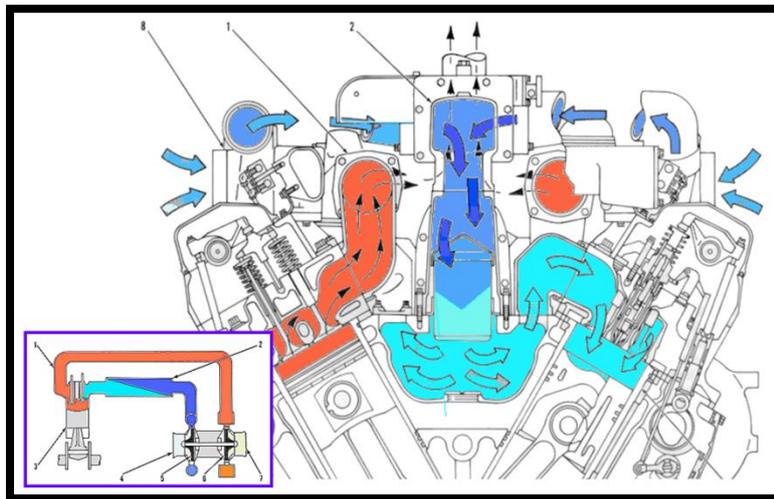


Figure 1.17 : Circuit d'admission et circuit d'échappement

- 1-Collecteur d'échappement ;
- 2-Réfrigérant d'air de suralimentation ;
- 3-Unité cylindre ;

- 4-Aspiration d'air compresseur ;
- 5-Rouet de compresseur ;
- 6-Rouet de turbine ;
- 7-Sortie des gaz turbine ;
- 8-Turbo chargeur.

4-4-4-Circuit de refroidissement :

On appelle "système de refroidissement" l'ensemble des mécanismes et dispositifs qui maintiennent l'état thermique requis des pièces.

Le système de refroidissement comprend une pompe à eau centrifuge entraînée par engrainage, avec un boîtier des thermostats comprenant quatre thermostats pour régler la température de l'eau de refroidissement qui circule dans le moteur, les refroidisseurs d'huile et les refroidisseurs d'admission. L'évacuation de chaleur s'effectue dans le radiateur par l'air envoyé à l'aide d'un ventilateur à huit pales entraîné par courroies.

Le système de refroidissement est un système fermé, avec circulation d'eau forcée. La pompe à eau aspire l'eau du radiateur à travers une conduite, le débit d'eau de refroidissement est divisé à la sortie de la pompe à eau en deux parties. Une partie de 40% du débit est envoyé vers le refroidisseur d'air d'admission et l'autre de 60% est envoyé vers le refroidisseur d'huile de lubrification. Ces deux parties s'assemblent dans le bloc moteur coté arrière. L'eau circule autour des chemises de piston, ensuite remonté dans les culasses pour refroidir les conduites d'échappement, puis s'écoule dans les tuyaux coudés dans la tubulure de retour.

L'eau se dirige vers le boîtier des thermostats. Le boîtier à un passage supérieur et un passage inférieur. Si l'eau est encore froide alors il est envoyé à la conduite by-pass (passage inférieur) vers la pompe à eau, au fur et à mesure que l'eau s'échauffe et des quelles atteint 82°C, les thermostats commencent à s'ouvrir pour laisser l'eau passée par le passage supérieur vers le radiateur qui est chargé d'évacuer la chaleur d'eau à l'aide de l'air ventilé.

[5] [6] [7]

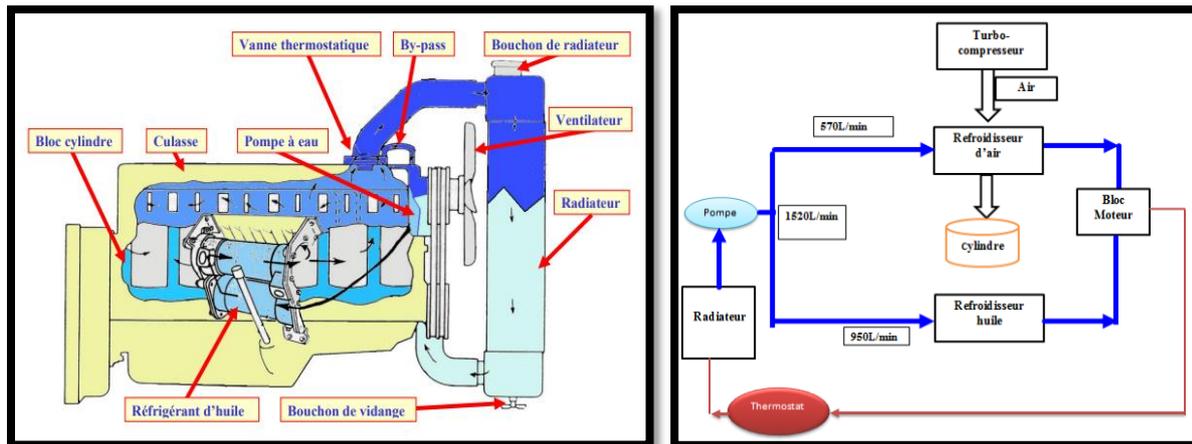


Figure 1.18 : circuit de refroidissement

4-4-5-Circuit de graissage :

Le système de graissage est destiné à protéger les pièces en mouvement de l'usure et de diminuer les frottements qui sont à l'organe de l'usure. Ce système assure la formation des films de lubrifiant entre les surfaces de la pièce en mouvement (segment, cylindre, paliers et tourillons de vilebrequin, ..., etc). Le procédé de graissage est déterminé d'après la position et le mouvement des pièces.

Le circuit d'huile de moteur est conçu en tant que système à circulation forcée avec carter d'huile, la pompe à huile-moteur aspire l'huile du carter d'huile à travers un tamis et la refoule à travers un tube de liaison menant à l'échangeur de chaleur d'huile.

A partir de l'échangeur de chaleur d'huile moteur se dirige vers les deux filtres branchés en parallèle. L'huile est refoulée à travers le perçage de vilebrequin, les arbres à came, les injecteurs-pompes, le régulateur du moteur le train d'engrenages, les turbocompresseurs et les pistons.

L'huile est amenée à chaque palier principal à travers les perçages de vilebrequin, elle parvient aux manetons et graisse les paliers de bielle à partir de la canalisation principale, des perçages amènent l'huile à chaque palier de l'arbre à came qui eux sont reliés par des conduites aux culasses. A cet endroit elle graisse les paliers et les boulons à rotule de culbuteur. L'huile retourne en graissant la tige-poussoir à partir de la canalisation principale, des gicleurs injectent l'huile de refroidissement des pistons dans un perçage prévu dans la jupe de piston. L'huile ressortant librement du piston graisse, l'axe et retourne au carter d'huile. [5] [6] [7]

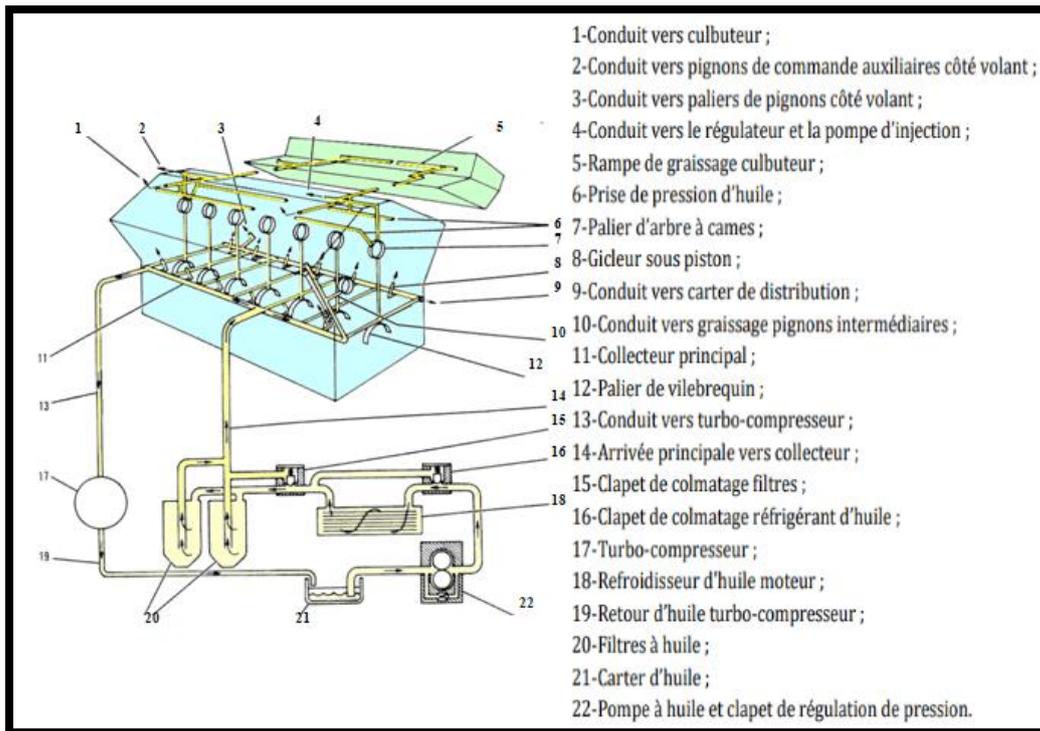


Figure 1.19 : circuit de lubrification

4-4-6-Système d'alimentation combustible et d'injection :

a-Système d'alimentation combustible :

Le combustible venant à partir du réservoir est filtré par le filtre primaire qui élimine les impuretés solides existant dans le gas-oil. La pompe à gas-oil de transfert assure le transport du gas-oil de la citerne. Puis ce gas-oil est refoulé directement vers le filtre principal et vers les deux tubulures d'alimentation. Chaque tubulure à deux passages. Le gas-oil circulant à travers le passage supérieur et celui d'admission alimente chaque injecteur-pompe par une conduite et par la chambre annulaire se trouvant dans la culasse. La chambre annulaire pratiquée dans la culasse communique avec l'orifice d'admission de l'injecteur pompe. Le mouvement de va et vient de l'injecteur-pompe aspire et force le gas-oil jusqu'à la pression d'injection. Quand l'injection de gas-oil est terminée, le restant du gas-oil dans l'injecteur refroidit les pièces internes de l'injecteur, puis retourne par la conduite de retour (conduite de retour inférieure se trouvant juste au-dessous de la tubulure d'alimentation. Le gas-oil acheminant le retour depuis les injecteurs traverse une soupape régulatrice de pression qui montée sur le bout avant de la tubulure de retour droite. Cette soupape régulatrice maintient une pression entre (4,14 et 4,5) bars. Puis le gas-oil sort et retourne vers la citerne en passant par un refroidisseur à air. Un petit orifice relie l'entrée et la sortie du gas-oil pour créer un

siphon au moment du changement des filtres, cela a pour conséquence de réduire le besoin de purge après le remplacement des éléments filtrant. [5] [6] [7]

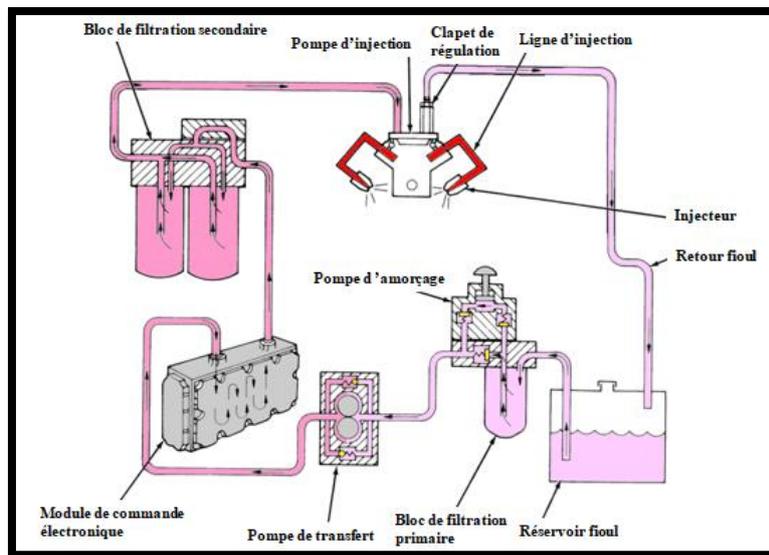


Figure 1.20 : Circuit d'alimentation combustible

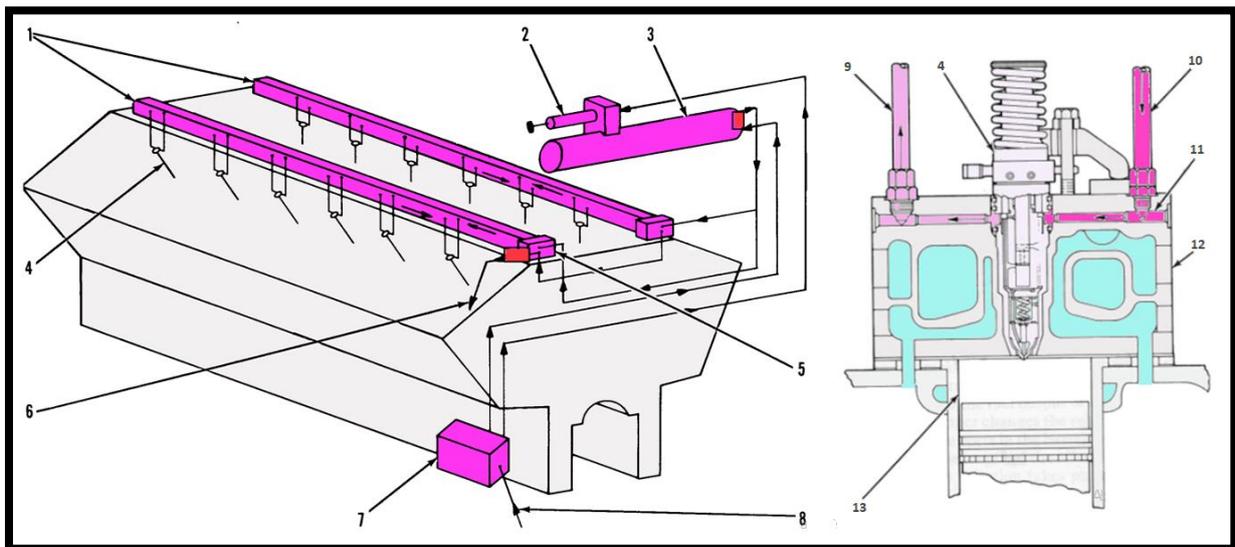


Figure 1.21 : Système d'alimentation combustible

- 1-Tubulures
- 2-Pompe d'amorçage
- 3-Filtre principale à gas-oil
- 4-Injecteur pompe
- 5-Soupape régulatrice de pression
- 6-Retour du gas-oil au réservoir

7-Pompe à gas-oil

8-L'arrivée du gas-oil de réservoir vers la pompe à gas-oil en passant par le filtre primaire

9-Tubulure de sortie du gas-oil

10-Tubulure d'entrée du gas-oil

11-Chambre annulaire

12-Culasse

13-Cylindre

b-Système d'injection :

Les moteurs de la série 3500 utilisent le système de combustion à injection directe. Ce système présente les avantages suivants : faible rejet de chaleur (par rapport à la précombustion); faible consommation de carburant; et démarrage facile.

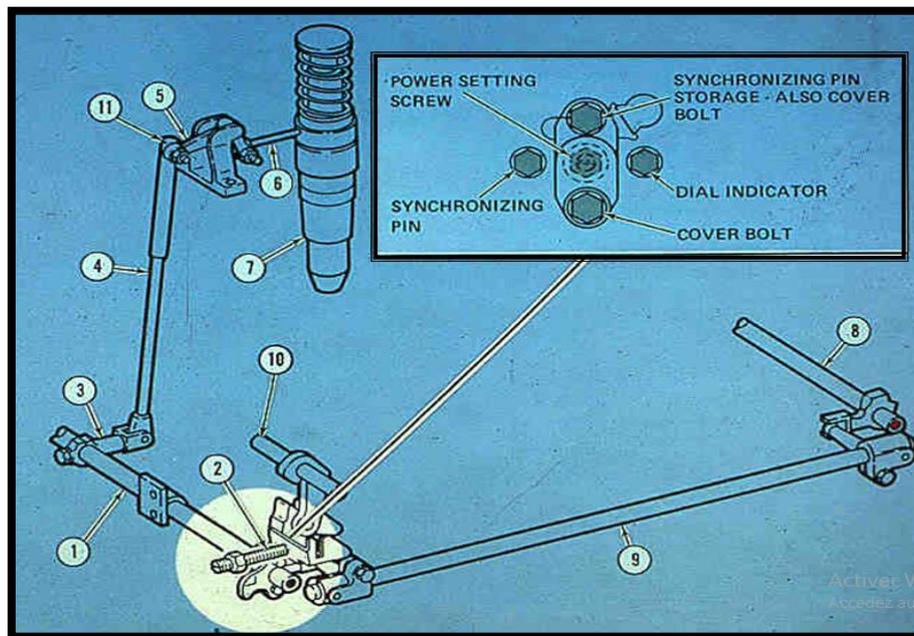


Figure 1.22 : Composants et système de tringlerie de commande

Un injecteur de carburant (7) se trouve dans un alésage central de chaque culasse. La position de la crémaillère (6) de chaque injecteur est modifiée par un levier coudé et un support (5) qui sont maintenus au sommet de la culasse par des boulons. Chaque guignol est mû par une tige de commande (4) reliée à un arbre de torsion creux (1) par l'intermédiaire d'un levier (3).

La rotation de l'arbre de torsion (1) est effectuée par l'arbre d'entrée du régulateur (10) et provoque le mouvement d'entrée et de sortie de la crémaillère (6). Les arbres de torsion (1 et 8) sont justes en dessous des arbres à cames de chaque rangée de cylindres.

Un arbre transversal creux (9) à l'avant du moteur relie l'arbre de torsion droit (1) et l'arbre de torsion gauche (8) afin qu'ils se déplacent ensemble en même temps. Les tringles de commande (4) ont un réglage à vis "clic" (11) aux extrémités du guignol.

Il y a une vis de réglage pour chaque rack. Ce réglage permet de synchroniser tous les racks entre eux. Le réglage positionne les crémaillères des injecteurs-pompes séparés pour qu'ils aient la même position de référence. De plus, il y a un ressort dans l'extrémité supérieure de la tige de commande. Si le piston d'un injecteur unitaire ne tourne pas (est bloqué) ou si la crémaillère de cet injecteur unitaire ne bouge pas, la tige de commande peut toujours contrôler les crémaillères des autres injecteurs. Cela empêchera le surrégime du moteur et le moteur pourra être arrêté. Cette caractéristique de conception sert à protéger le moteur contre les dommages.

Une autre protection pour le moteur : Si la tringlerie de commande se déconnecte du régulateur, le POIDS de la tringlerie de commande peut déplacer les crémaillères des injecteurs unitaires vers la position carburant OFF. Le moteur S'ARRÊTERA.

Les arbres de torsion (1 et 8) sont marqués de couleurs rouge et verte sur le diamètre intérieur à des fins d'identification de l'assemblage. L'arbre de torsion gauche (8) est rouge et le droit est vert. Dans la zone en surbrillance, nous voyons la vis de réglage de puissance. La vis de réglage de puissance entre en contact avec le levier d'arrêt de carburant. Le réglage de la vis de réglage de puissance contrôle le réglage de puissance maximum du moteur. Il contrôle le mouvement maximal de la tringlerie de commande et de toutes les rampes d'injection.

Au-dessus de la zone en surbrillance se trouve le levier du régulateur qui est relié à l'arbre de sortie du régulateur. Le levier du régulateur, le levier d'arrêt de carburant, l'extrémité avant de l'arbre de torsion droit et la vis de réglage de puissance se trouvent dans le carter d'engrenage avant derrière le coussinet de puissance.

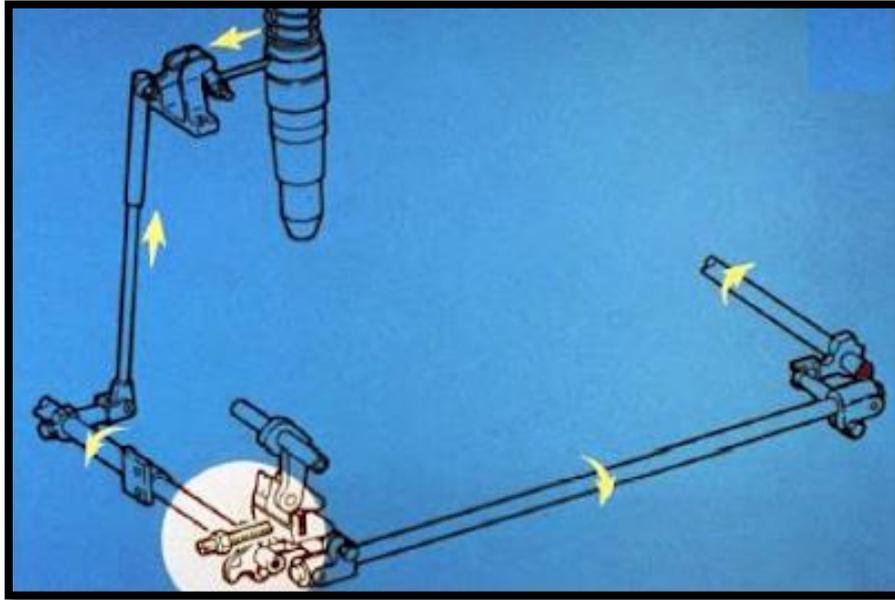


Figure 1.23 : Mouvement de tringlerie de commande

Dans cette diapositive, nous voyons le fonctionnement de la tringlerie de commande de carburant depuis l'avant du moteur. Lorsque la commande de vitesse du régulateur est déplacée vers le régime maximal, l'arbre de sortie du régulateur tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et déplace le levier de l'arbre du régulateur vers la gauche. Une goupille dans le levier de l'arbre du régulateur se trouve dans la rainure du levier d'arrêt de carburant et le déplace vers la gauche. Le levier d'arrêt de carburant fait tourner l'arbre de torsion droit dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, comme indiqué par la flèche. Ce mouvement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre déplace la tige de commande vers le haut. Ce mouvement fait pivoter le levier coudé et tire la crémaillère hors de l'injecteur dans le sens carburant "ON". Les arbres de torsion droite et gauche se déplacent toujours ensemble. Les extrémités des arbres sont reliées aux extrémités de l'arbre transversal par un agencement levier à fourche, levier à bille.

Dans ce schéma, nous pouvons voir les composants d'injection de ce système de carburant.

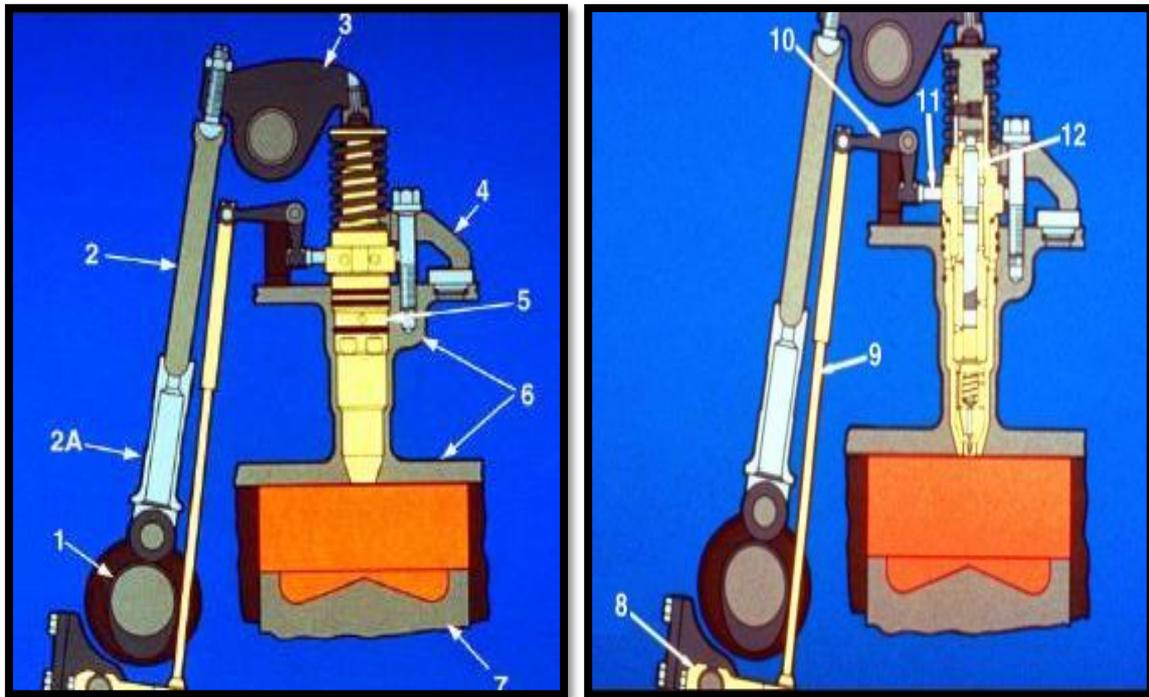


Figure 1.24 : Composants et système d'injection

Les composants sont :

- 1-Lobe de came d'injecteur de l'arbre à cames du moteur ;
- 2-Une tige de poussée
- 2a-Un ensemble élévateur
- 3-Un culbuteur d'injecteur
- 4-Une pince d'injecteur
- 5-Un injecteur-pompe
- 6-Une section de culasse
- 7-Un piston dans un cylindre
- 8-Levier de commande sur l'arbre de torsion
- 9-Tige de commande
- 10-Levier coudé
- 11-Crémaillère d'injecteur
- 12-Plongeur d'injecteur

L'injection de carburant se fait par la rotation de l'arbre à cames du moteur qui amène la came à soulever l'ensemble de poussoir et à pousser la tige vers le haut. Lorsque la tige de poussée déplace le culbuteur de l'injecteur vers le haut, le contact du culbuteur pousse le suiveur d'un piston d'injecteur vers le bas. Lorsque le piston descend, le carburant est injecté dans la chambre de combustion. Lorsque la volute inférieure du piston dépasse l'orifice inférieur, l'injection s'arrête. Lorsque le culbuteur arrête son mouvement vers le bas, le ressort de rappel du suiveur pousse le suiveur vers le haut avec le piston. Le ressort de rappel du suiveur maintient également une force sur la tige de poussée et le poussoir du culbuteur. Cette force maintient le poussoir en contact avec la came.

En regardant la coupe de l'injecteur, nous pouvons voir :

- 1-Le piston plongeur
- 2-Le cylindre
- 3-L'orifice inférieur
- 4-L'orifice supérieur
- 5-Conduit basse pression

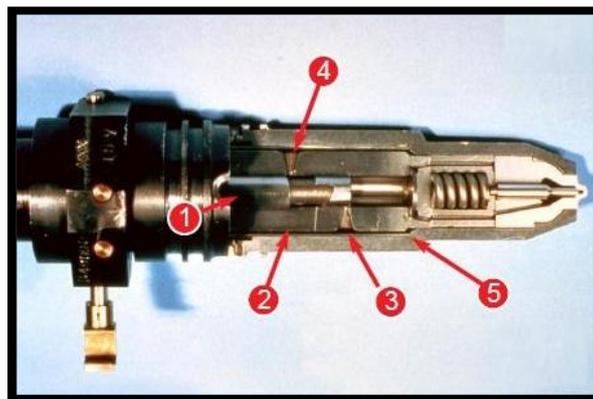


Figure 1.25 : Composants supérieur de l'injecteur

La position du piston illustrée est en haut de la course. Le cylindre (2) a un orifice supérieur (4) et un orifice inférieur (3). La relation des volutes aux orifices :

(1) modifie la longueur de la course effective et la quantité de carburant par course d'injection;

(2) permet au début de la course effective d'être variable en fonction de la position du piston. Plus la quantité (VOLUME) de carburant injecté pendant la course d'injection est petite, plus l'injection est tardive (PRÈS DU CENTRE SUPÉRIEUR). Plus la quantité (VOLUME) de carburant injectée pendant la course d'injection est importante, plus l'injection est précoce (PLUS DU CENTRE SUPÉRIEUR). Le mouvement de la tringlerie de commande et de la crémaillère fait tourner le piston et modifie la quantité de carburant injectée et le point auquel l'injection commence.

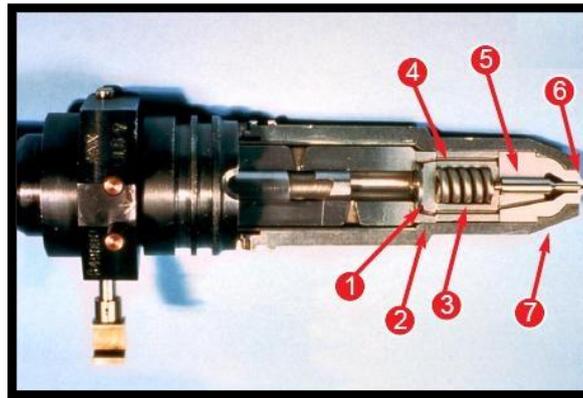


Figure 1.26 : Composants inférieurs de l'injecteur

- 1-Clapet anti-retour
- 2-Cage de clapet anti-retour
- 3-Ressort et siège de soupape
- 4-Cage de ressort
- 5-Aiguille d'injecteur
- 6-Pointe d'injecteur
- 7-Boîtier ou écrou de l'injecteur.

La Pointe d'injecteur comporte plusieurs petits orifices. Chaque buse a deux chevilles dans le corps qui la placent dans la bonne position une fois installée. Cette position place la crémaillère au bon endroit avec le levier coudé et la buse de pulvérisation à l'angle correct avec la surface du piston. La position du piston illustrée ici est sur la course descendante et l'orifice inférieur est juste fermé.

La position du piston indiquée ici est le début de la course d'injection. Le port inférieur et le port supérieur sont fermés. C'est au début du coup effectif.

Pendant la course effective, le piston pousse le carburant dans la buse de l'injecteur (Pointe d'injecteur). Le carburant circule autour du clapet anti-retour et à travers des passages dans la cage du clapet anti-retour. Une fois que le carburant a traversé la cage du ressort de soupape, il pénètre dans les passages de la buse de pulvérisation. Les passages envoient le carburant dans la chambre autour de l'aiguille d'injecteur, la pression du carburant soulève l'aiguille d'injecteur du siège et le carburant s'écoule à travers la buse de pulvérisation et sort par les orifices dans la chambre de combustion. L'injection de carburant se poursuit jusqu'à ce que la volute inférieure du piston passe par l'orifice inférieur, la pression du carburant contre le pointeau est moindre.

Le ressort de soupape pousse l'aiguille d'injecteur fermée. Cela arrête le flux de carburant dans la chambre de combustion. De plus, lorsque le carburant est libéré par l'orifice inférieur, la pression de carburant au-dessus du clapet anti-retour diminue. La pression de carburant dans la chambre de l'aiguille d'injecteur pousse alors le clapet anti-retour contre l'extrémité du cylindre. Avec l'aiguille d'injecteur sur le siège et le clapet anti-retour contre l'extrémité du cylindre, les gaz de combustion ne peuvent pas pénétrer dans l'injecteur et causer des dommages entre les coups d'injection. [6, 7, 8, 9]

REMARQUE : Si l'aiguille d'injecteur est maintenue ouverte par des particules étrangères entre les cycles d'injection, les gaz de combustion peuvent entrer dans l'injecteur et causer des dommages.

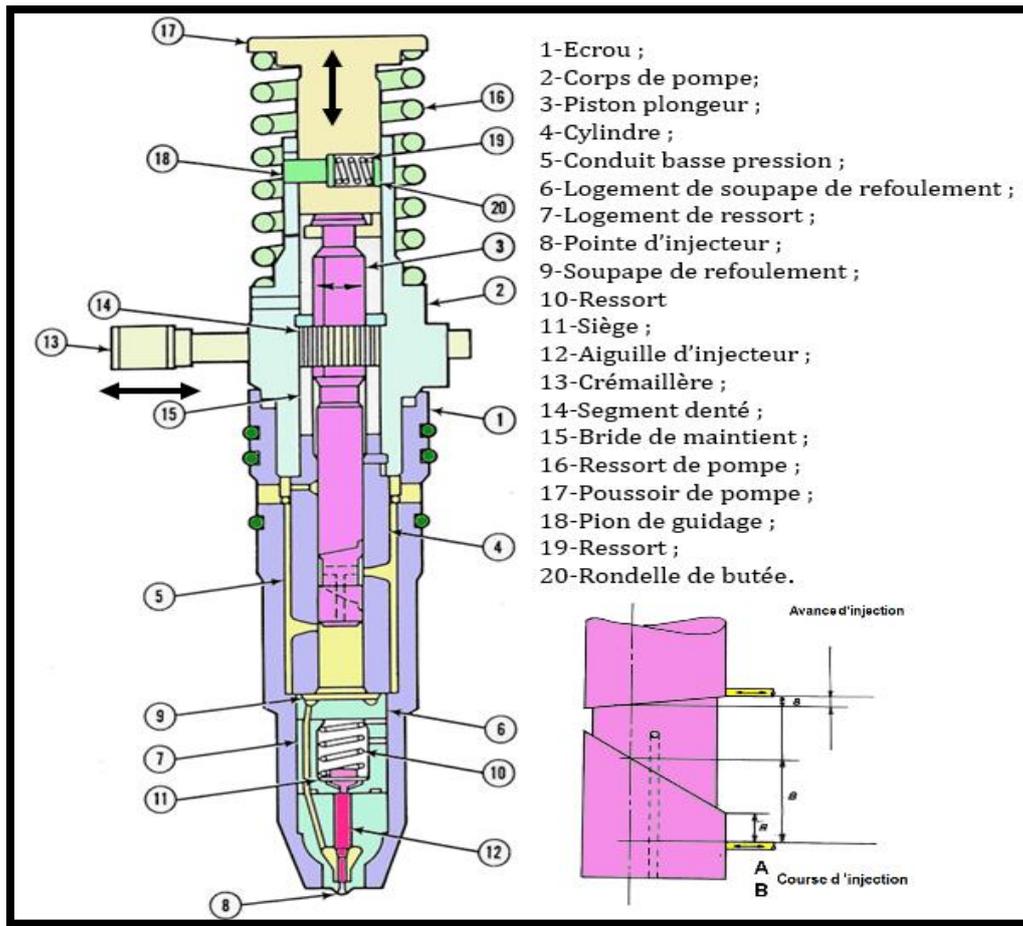


Figure 1.27 : Injecteur pompe

5-Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exposé le moteur diesel et son procédé de fonctionnement. Au deuxième point on a entamé l'étude du moteur Diesel CAT3512A le sujet de notre mémoire avec présentation de ses différents équipements qui le constituent.

Chapitre 02

CHOIX DU CARBURANT

1-Introduction :

L'utilisation excessive de combustibles fossiles épuise les réserves, L'une des solutions pour parvenir à se problème est l'utilisation de carburants gazeux en plus du diesel liquide dans le moteur à allumage par compression. L'utilisation de ce dernier, par exemple le gaz naturel, le gaz de pétrole liquéfié (GPL), etc. est une approche prometteuse pour réduire la dépendance aux carburants liquides à base de pétrole.

2-Différence entre le GPL et le GNL :**a-Le GPL :**

Le gaz de pétrole liquéfié est un mélange de propane et butane stocké sous forme liquide. Issue 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 traité produit 20 à 30 kg de GPL « Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL) ».

b-Le GNL :

Le gaz naturel est essentiellement composé de méthane. La majorité de la production mondiale provient de gisement (c'est alors un gaz naturel fossile). Mais une solution alternative existe à l'extraction, car il est possible de produire du biogaz. Ce gaz issu de la fermentation de produit organique produit du méthane, une fois purifié nous obtenons du bio-méthane qui peut être utilisé dans le réseau.

De plus ces carburants nécessitent des méthodes de transport bien particulier, car ils doivent être transportés sous forme liquide, -48°C pour le GPL et -162°C pour le GNL à pression atmosphérique. Ils sont aussi très dangereux, car inflammables. [18]

3-Choix de combustible primaire GPL :

Le GPL est un carburant gazeux alternatif viable qui est un produit gazeux du raffinage du pétrole composé principalement de propane, butane et d'autres hydrocarbures légers. Il peut être liquéfié dans une plage de basse pression de 0,7 à 0,8 MPa à température atmosphérique. Ainsi, le stockage et le transport du GPL sont plus faciles que d'autres carburants gazeux. Le GPL à une valeur calorifique élevée par rapport aux autres carburants gazeux et il à également

un indice d'octane élevé mais un indice de cétane faible. L'indice d'octane élevé du GPL le rend adapté aux moteurs à allumage commandé.

En revanche, le faible indice de cétane du GPL rend difficile son utilisation en grande proportion dans les moteurs à allumage par compression, par conséquent, il peut être utilisé en mode Duel-Fuel. [14]

4-Composition du GPL en Algérie :

Les proportions de Butane et de Propane mélangés pour obtenir Le GPL varient selon les saisons et les régions. La proportion de propane est plus élevée en hiver pour faciliter les démarrages à froid. [17]

Nord	Eté (Mai à août)	80 % Propane
		20 % Butane
	Hiver (septembre à avril)	100 % Propane
Sud	Eté (Mai à août)	60 % Propane
		40 % Butane
	Hiver (septembre à avril)	80 % Propane
		20 % Butane

Tableau 2.1 : Composition du GPL en Algérie

On choisi le mélange le plus performant 70 % Propane et 30 % Butane. [18] [20]

5-Comparaison entre les propriétés physico-chimiques du GPL et Gasoil :

Propriété	Diesel	GPL	
		Propane	Butane
Formule chimique	C_{7.25}H₁₃	C₃H₈	C₄H₁₀
Masse molaire	100.19	44.1	58.13
Température d'ébullition °C	160-370	-42	-0.5

La densité à l'état liquide Kg/m³ à 15°C	840	510	580
PCI (pouvoir calorifique inférieur MJ/Kg) à 15°C et 1013 mbar	42.5	46.3	45.6
Vitesse de propagation de la flamme cm/s	2.0-8.0	38	40

Tableau 2.2 : Comparaison entre les propriétés physico-chimique du GPL et Gasoil [19, 20, 21, 22, 23, 24]

Dans le tableau suivant en donne les caractéristiques du mélange 70/30 propane/butane :

Propriété	GPL (70% Propane / 30% Butane)
La densité à l'état liquide Kg/m³ à 15°C	531
PCI (pouvoir calorifique inférieur MJ/Kg) à 15°C et 1013 mbar	46.09

Tableau 2.3 : Caractéristiques physico-chimique du GPL

6-Conclusion :

Dans ce chapitre on à étudié les carburants les mieux avantageux pour remplacée une partie du carburant diesel actuellement utiliser dans notre moteur. Apres le choix du GPL comme carburant primaire on à donne ses caractéristiques physico-chimique.

Chapitre 03

ETUDE DU MOTEUR CAT3512A EN MODE DUAL-FUEL

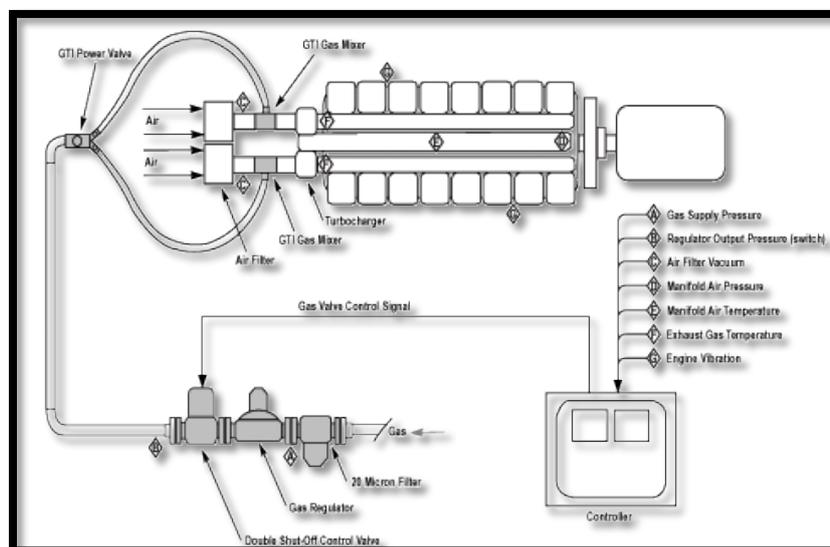
1-Introduction :

Les moteurs Caterpillar 3512A sont l'outil principal de production d'énergie dans les chantiers de forage, l'adaptation de ses moteurs pour fonctionner avec mélange GPL/Gasoil et connue technologie Dual-Fuel.

Le moteur Dual-Fuel (double carburant) est essentiellement un moteur diesel modifié dans lequel un carburant primaire, appelé carburant principal. Ce carburant est la principale source d'apport d'énergie au moteur. Le combustible gazeux primaire est comprimé avec de l'air, mais ne s'enflamme pas automatiquement en raison de sa température d'auto-inflammation élevée. Une petite quantité de diesel, généralement appelée pilote, est injectée comme dans un moteur diesel normal vers la fin de la compression du mélange carburant air primaire. Ce carburant diesel pilote s'enflamme automatiquement en premier et agit comme une source d'allumage délibérée pour la combustion du mélange gazeux carburant-air. [10] [11]

2- Mode d'injection Dual-Fuel :

Le moteur peut être facilement configuré pour fonctionner en mode Dual-Fuel (GPL-Diesel), où le GPL est mélangé à l'admission d'air, tandis que le système d'injection de carburant diesel normal fournit toujours une certaine quantité de carburant diesel, mais à un taux réduit. Le moteur est configuré pour fonctionner en mode Dual-Fuel en attachant une conduite de GPL au collecteur d'admission avec un échangeur. Le carburant gazeux s'écoule à travers la vanne de régulation de pression dans le mélangeur de gaz monté sur le collecteur d'admission. L'alimentation du GPL dans le moteur s'accompagne d'une commande électronique pour différentes charges et vitesse du moteur. [14]





Figures 3.1 : Alimentation du moteur Caterpillar 3512 en Dual-Fuel

2-1-Description des différents composants du système d'alimentation Dual-Fuel :

a-Réservoir :

Elément essentiel du dispositif, il est réalisé en acier spécial d'environ 5 mm d'épaisseur. Son remplissage est limité par une polyvanne à 85 % de sa capacité pour des raisons de sécurité. En effet, le GPL, à l'état liquide, se dilate de 0.25% par degré sous l'effet de la chaleur, C'est la raison pour laquelle le réservoir ne doit pas être rempli à plus de 85 %.

b-Échangeur :

Son rôle c'est de transformer le GPL de l'état liquide à l'état vapeur, Le changement d'état de la phase liquide du GPL à -40°C à la phase gazeuse nécessite un apport de chaleur prélevée au liquide de refroidissement du moteur. La température du GPL gazeux est alors comprise entre 40°C et 60°C .

c-Le panneau de commande :

Est le « cerveau » du système de Dual-Fuel et le système d'alerte pour les opérateurs du moteur en cas de problème d'alimentation en GPL pour le moteur diesel. Le panneau surveille un certain nombre de points de pression et de température et remet le moteur en fonctionnement 100 % diesel si un paramètre s'écarte de sa plage normale.

L'utilisation du Panneau de commande pour contrôler les paramètres de fonctionnement suivant:

- La pression du gaz en temps réel ;
- Pression de sortie du régulateur ;
- Filtre à air vide ;
- Pression d'air du collecteur ;
- La température d'air du collecteur ;
- Température maximale des gaz d'échappement ;
- Vibrations du moteur ;
- Courant charge kW sur le générateur. [15] [16]



Figure 3.2 : Panneau de commande

d-Le train de Gaz :

Le GPL entrant dans le moteur doit être conditionné et régulé. La plupart des solutions, sinon toutes, intègrent un filtre à carburant et un régulateur (autonomes ou combinés). Ces solutions doivent inclure à la fois une vanne d'arrêt manuelle et une vanne d'arrêt d'urgence automatisée, qui peuvent toutes deux arrêter le débit de gaz en cas d'urgence ou d'arrêt du système. Un régulateur de pression de gaz à la demande peut également être présent qui réduit la pression de gaz à zéro (égale à la pression atmosphérique) pour permettre à la soupape d'admission du moteur de "tirer" le gaz dans le moteur au besoin. Cela permet à la soupape d'admission d'ajuster le volume de carburant lorsque les charges du moteur changent. [15] [16]



Figure 3.3 : Le train de Gaz

e-Soupape d'alimentation :

La soupape d'alimentation en gaz est une soupape à pointeau qui contrôle le débit de gaz maximal vers le moteur. Dans certains systèmes, cette vanne est réglable manuellement. Dans ce cas, les réglages de la soupape sont généralement établis pendant la phase de réglage de la conversion du moteur. Une fois les réglages établis, la vanne reste dans une position fixe quelle que soit la charge du moteur. [15] [16]



Figure 3.4 : Soupape d'alimentation

f-Mixeur air-carburant :

Est un carburateur à venturi qui est utilisé pour fournir le mélange air/gaz requis au moteur. [15] [16]



Figure 3.5 : Mixeur air-carburant

3-Etude des Performances du moteur CAT3512A en mode Dual-Fuel GPL-Gasoil :

3-1-Paramètres de fonctionnement du moteur Caterpillar 3512A :

Spécifications	Valeurs
Puissance effective	1210HP=902.3 kw
Vitesse de rotation	1200 tr/mn
Vitesse en ralenti	900 tr/mn
Consommation spécifique	197 g/kwh
Type d'injection	injection direct
Type de moteur	quatre temps
Alésage	170 mm
Course	190 mm
Angle entre rangées	60 °
Nombre de cylindre	12 en V
Cylindrée unitaire	4.3 L

Cylindrée totale	51.6 L
Taux de compression	13
Coefficient d'excès d'air (α)	1.8

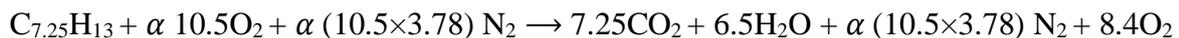
Tableau 3.1 : Les paramètres de fonctionnement du moteur Caterpillar 3512A [5]

3-2-Quantité d'air :

L'air atmosphérique nécessaire pour la combustion, est introduit dans la chambre de combustion durant le temps de l'admission. La composition massique de l'air est comme suit : O₂ (dioxygène) 23 % ; N₂ (diazote) 77 %. [19]

a-Combustion du Gasoil :

La réaction chimique de la combustion du carburant est donnée comme suit :



Donc pour brûler 1 kilogramme de gasoil, il faut disposer d'environ 26.05 kilogrammes d'air (soit, étant donné la composition de l'air, environ 6.04 kg d'oxygène et 20 kg d'azote); la réaction produit environ 3.19 kg de dioxyde de carbone (CO₂), 1.17 kg d'eau (H₂O), 20 kg d'azote et 8.4 kg d'oxygène résidu. [19] [25]

b-Combustion du GPL :

La réaction chimique de la combustion du carburant est donnée comme suit :



Donc pour brûler 1 kg de GPL, il faut disposer d'environ 28.05 kg d'air (soit, étant donné la composition de l'air, environ 6.51 kg d'oxygène et 21.54 kilogrammes d'azote); la réaction produite environ 3.01 kg de dioxyde de carbone (CO₂), 1.6 kg d'eau (H₂O), 21.54 kg d'azote et 4.36 kg d'oxygène résidu. [19] [25]

c-Débit d'air du moteur CAT3512A :

Pour calculer le débit d'air on utilise la formule suivant :

$$\dot{m}_{air} = \alpha \times \dot{m}_g \times l_0 \quad (3.1)$$

\dot{m}_{air} : débit d'air ;

α : Coefficient d'excès d'air ;

\dot{m}_g : Débit massique du gasoil (kg/h) ;

l_0 : Quantité d'air nécessaire à la combustion complète de 1 kg de gasoil.

AN :

$$\dot{m}_{\text{air}} = 1.8 \times 177.75 \times 26.05$$

$$\dot{m}_{\text{air}} = 8334.7 \text{ kg/h}$$

3-3-L'énergie délivrée par le carburant Gasoil ou GPL : [11] [20] [26]

$$E_i = \text{PCI}_i \cdot m_i \quad (3.2)$$

P_i : Energie délivrée par le carburant Gasoil ou GPL (kWh) ;

PCI_i : Pouvoir calorifique inférieur de Gasoil ou GPL (kwh/kg) ;

m_i : La masse du Gasoil ou GPL consommé (kg).

3-4-Débit de Gasoil du moteur CAT3512A :

Pour calculer Le débit du gasoil du moteur, on utilise la formule suivante : [11]

$$\dot{m}_G = \frac{\text{CSC} \times P_e}{1000} \quad (3.3)$$

\dot{m}_g : Consommation totale de Gasoil (kg/h) ;

CSC : Consommation spécifique de carburant (g/kWh) ;

P_e : Puissance effective (kW).

AN :

$$\dot{m}_g = \frac{197 \times 902.3}{1000}$$

$$\dot{m}_g = 177.75 \text{ kg/h}$$

3-5-Couple du moteur CAT3512A :

$$C_{\text{moteur}} = \frac{P_e}{\omega_{\text{rot}}} \quad (3.4)$$

C_{moteur} : Couple moteur (N.m) ;

ω_{rot} : Vitesse de rotation (rad/s) ;

P_e : puissance effective (w).

AN :

$$C_{\text{moteur}} = \frac{902296.8}{125.66}$$

$$C_{\text{moteur}} = 7180.46 \text{ N.m}$$

3-6-Substitution du Gasoil :

Le moteur fonctionne à une charge maximale et à une vitesse initiale. Puis, dans les mêmes conditions de fonctionnement (vitesse du moteur, charge), le GPL est injecté avec une réduction simultanée du carburant diesel. Afin de maintenir les conditions de fonctionnement constantes, le GPL est augmenté jusqu'à atteindre la substitution maximale de 54% GPL [14] [16], On utilise la formule suivant : [10, 14, 20, 26, 27]

$$S_G = \left(1 - \frac{\dot{m}_{\text{GDF}}}{\dot{m}_{\text{GD}}} \right) 100\% \quad (3.5)$$

S_G : Substitution du Gasoil (%);

\dot{m}_{GD} : Débit massique du gasoil en mode diesel (kg/h) ;

\dot{m}_{GDF} : Débit massique de gasoil pilote en mode dual-fuel (kg/h).

3-7-Débit massique du GPL :

Déterminé selon la formule suivante en respectant un développement énergétique équivalent au débit de gasoil substitué :

$$\dot{m}_{\text{gpl}} = \frac{PCI_{\text{g}}}{PCI_{\text{gpl}}} \times \dot{m}_{\text{g}} \quad (3.6)$$

\dot{m}_{gpl} : Débit massique de GPL (kg/h) ;

PCIg : Pouvoir calorifique inférieur Gasoil (MJ/kg) ;

PCIgpl : Pouvoir calorifique inférieur GPL (MJ/kg).

Les résultats des paramètres du moteur avec différents ratios GPL/gasoil sont présentés dans le tableau suivant :

$S_G\%$	\dot{m}_{GDF} (kg/h)	\dot{m}_{GSubst} (kg/h)	\dot{m}_{GPL} (kg/h)	\dot{q}_G (l/h)	\dot{q}_{GPL} (l/h)	E_{GASOIL} (kwh)	E_{GPL} (kwh)
0	177.75	0	0	211.6	0	2098.60	0
10	159.97	17.77	16.39	190.44	30.86	1888.68	209.85
20	142.2	35.55	32.78	169.28	61.73	1678.88	419.70
30	124.42	53.32	49.17	148.11	92.59	1468.96	629.56
40	106.65	71.10	65.56	126.96	123.46	1259.16	839.41
50	88.87	88.87	81.95	105.79	154.33	1049.24	1049.27
54	81.76	95.98	88.51	97.33	166.68	965.29	1133.26

Tableau 3.2 : Caractéristiques du moteur CAT 3512A avec différents ratios GPL/Gasoil

4-Conclusion :

Dans ce chapitre on a exposé la technologie Dual-Fuel et la procédure qui mène à assuré le ravitaillement du moteur CAT3512A en gardant la même puissance. Avec étude des paramètres du moteur avec différents ratios GPL/Gasoil

Chapitre 04

RESULTATS DE LA CONVERSION DUAL- FUEL SUR LE MOEUR CAT3512A

1-Introduction :

Après application de la technologie Dual-Fuel dans le chapitre précédant on va étudier son influence sur les paramètres de moteur et sur trois points (énergétique, économique et environnemental), et leurs impacts sur notre moteur et le parc de l'ENAFOR avec une interprétation des résultats.

2-Dimensionnement d'un réservoir GPL pour le moteur CAT3512A :

La consommation de GPL du moteur CAT3512A avec le ratio 54% GPL est de 166.68 l/h donc 4000.32 l/jour qui est égale à un volume de 4 m³.

Pour un remplissage à 85 % on a besoin d'un réservoir de 5 m³ environ pour une autonomie de 24h.



Figure 4.1 : réservoir de 5 m³ (5000L)

3-Etude de l'Influence de l'alimentation dual-fuel sur différents paramètres du moteur :

a-Ratio carburant/air :

Le ratio d'équivalence air-carburant est défini comme le rapport entre la masse de la quantité d'air nécessaire à la fois pour la combustion du GPL et le Gasoil pilote à la masse de la quantité réelle de l'air consommé par le moteur en mode diesel, à savoir : [10] [26]

$$\Phi = \frac{28.05 \text{ mgpl} + 26.05 \text{ mg}}{\text{mair}} \quad (4.1)$$

Φ : La richesse ;

\dot{m}_g : Débit massique du gasoil (kg/h) ;

\dot{m}_{gpl} : Débit massique de GPL (kg/h) ;

\dot{m}_{air} : Débit massique de l'air (kg/h).

b-Le coefficient d'excès d'air :

Calculer avec la formule suivant : [10] [26]

$$\alpha = \frac{1}{\Phi} \quad (4.2)$$

α : Coefficient d'excès d'air.

Φ : la richesse du carburant ;

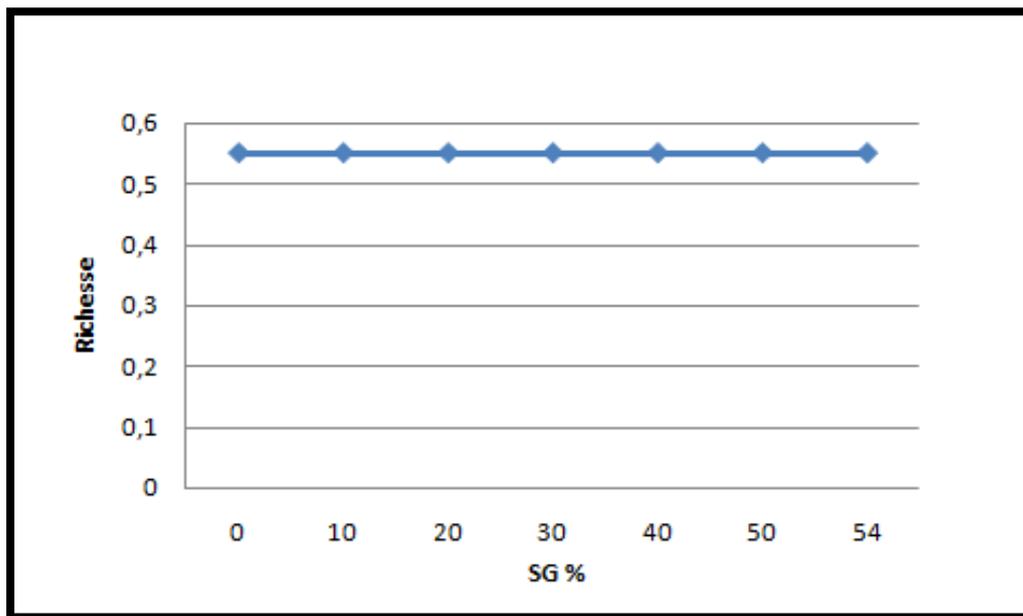


Figure 4.2 : La richesse en fonction de la substitution gasoil S_G

La figure ci-dessus montre que la richesse pour toutes les substitutions en mode dual fuel est constante et identique à celle du moteur en mode diesel.

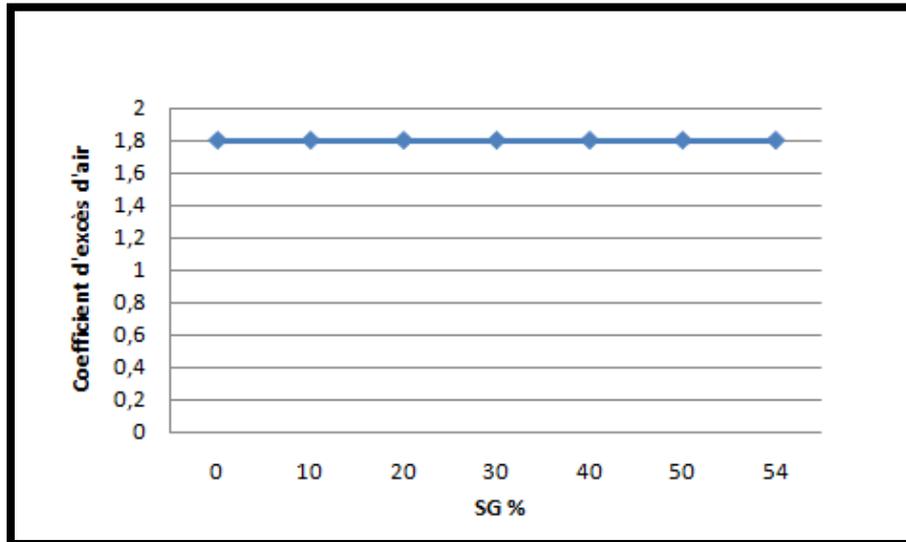


Figure 4.3 : Le coefficient d'excès d'air en fonction de la substitution gasoil S_G

La figure ci-dessus montre que le coefficient d'excès d'air pour toutes les substitutions en mode dual fuel est constant et identique à celui du moteur en mode diesel.

c-la consommation du carburant :

Le débit massique de gasoil remplacé par un débit massique du GPL bien calculé pour avoir la même énergie dans la chambre de combustion du moteur converti en mode dual-fuel.

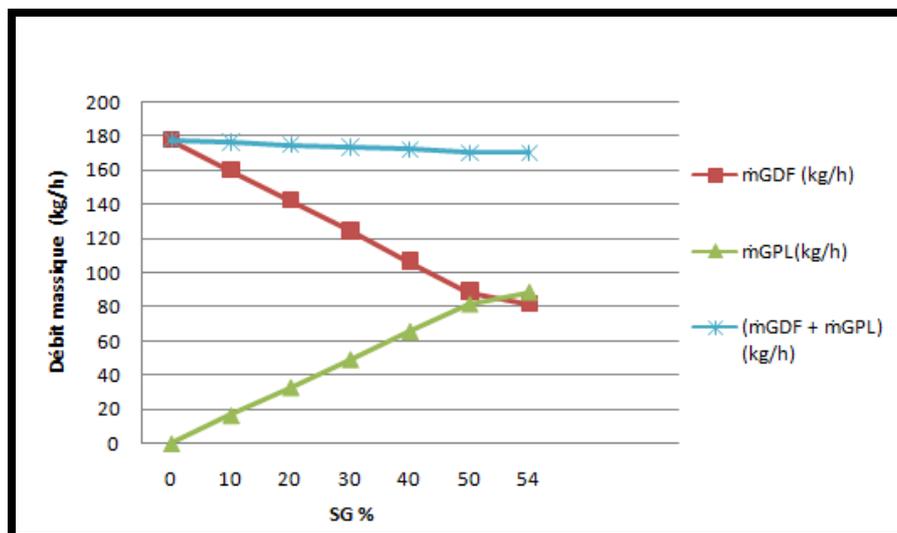


Figure 4.4 : La consommation de carburant en fonction de la substitution gasoil S_G

La figure (4.4) montre que le moteur converti en mode dual-fuel peut fonctionner avec un débit massique (GPL/gasoil) inférieur par rapport à celui du moteur mode diesel original. Nous remarquons une diminution de la consommation de carburant du moteur mode dual-fuel avec un ratio 54% de combustible primaire GPL et 46% de gasoil (combustible pilote) de l'ordre de 4.21%. La diminution de la consommation en débit massique due au pouvoir calorifique inférieur (PCI) du GPL qui est supérieur à celui du gasoil.

e-Le rendement moteur :

Pour calculer le rendement moteur, on utilise la formule suivante : [11] [20] [26]

$$\eta = \frac{P_e}{(PCI_g \times \dot{m}_g) + (PCI_{gpl} \times \dot{m}_{gpl})} \quad (4.3)$$

P_e : Puissance effective ;

PCI_g : Pouvoir calorifique inférieur Gasoil (MJ/kg) ;

PCI_{gpl} : Pouvoir calorifique inférieur GPL (MJ/kg) ;

\dot{m}_g : Débit massique du gasoil (kg/h) ;

\dot{m}_{GPL} : Débit massique de GPL (kg/h).

AN : Calculer le rendement du moteur CAT3512A en mode Diesel :

$$\eta = \frac{902.3}{2098.60}$$

$$\eta = 0.43 = 43\%$$

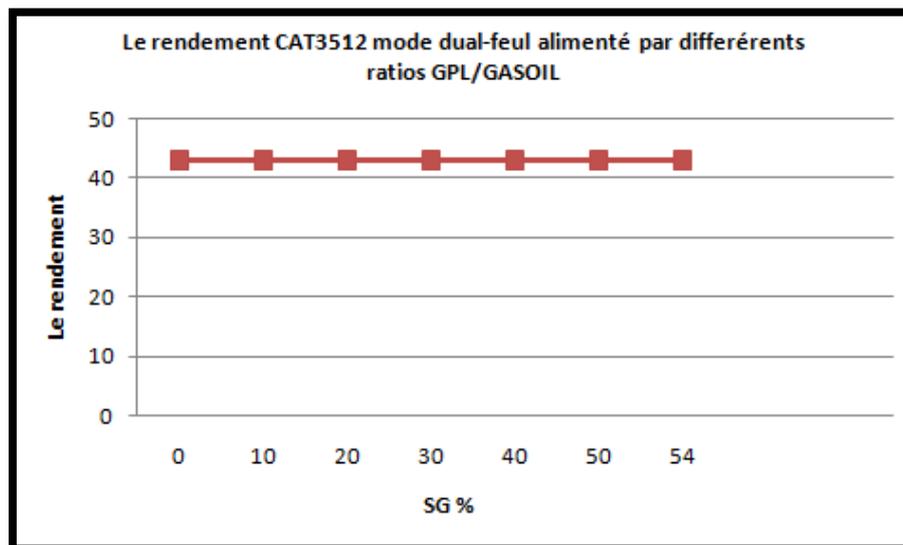


Figure 4.5 : Le rendement moteur en fonction de la substitution gazoil S_G

Le GPL est injecté avec un débit équivalent énergétiquement au débit de gazoil substitué, afin de maintenir les paramètres de fonctionnement du moteur (la même énergie sur la tête de piston moteur). Le rendement moteur Caterpillar 3512A mode dual-fuel alimenté par différents ratios GPL/Gazoil est égal à une valeur constante de 43%.

f-La consommation spécifique :

La consommation spécifique équivalente est définie comme suit : [11]

$$CSC = \left(\frac{\dot{m}_g + \dot{m}_{gpl}}{P_e} \right) 1000 \quad (4.4)$$

CSC : Consommation spécifique de carburant (g/kWh) ;

\dot{m}_g : Débit massique du gazoil (kg/h) ;

\dot{m}_{gpl} : Débit massique de GPL (kg/h) ;

P_e : Puissance de fonctionnement moteur (kW).

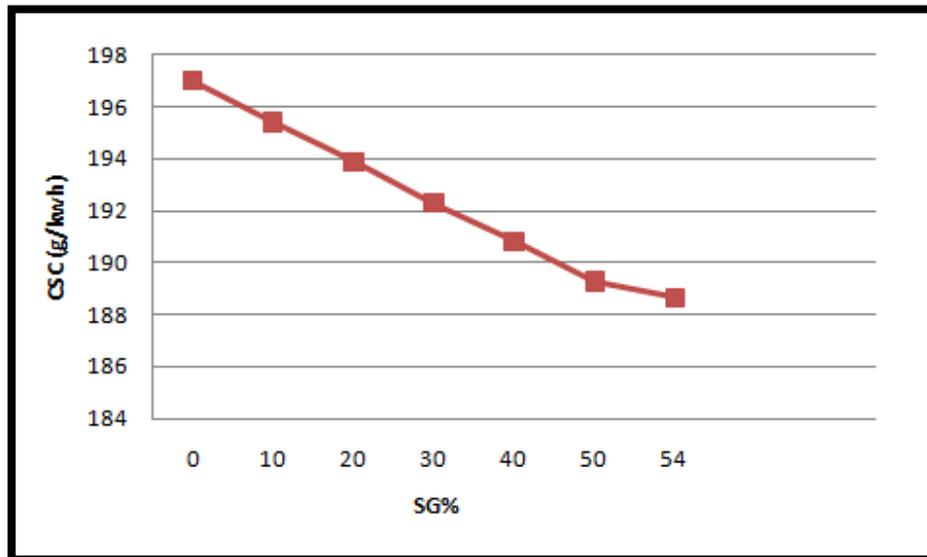


Figure 4.6 : La consommation spécifique en fonction de la substitution gasoil S_G

La figure ci-dessus montre une réduction de la consommation spécifique du moteur Caterpillar 3512A converti en mode dual-fuel allant jusqu'à 4.22 % comparé avec la consommation spécifique du moteur en mode Diesel avec un ratio GPL /Gasoil égal à 54/46. La diminution de la consommation spécifique est due au fait que le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du GPL est supérieur à celui du Gasoil.

4-Etude énergétiques :

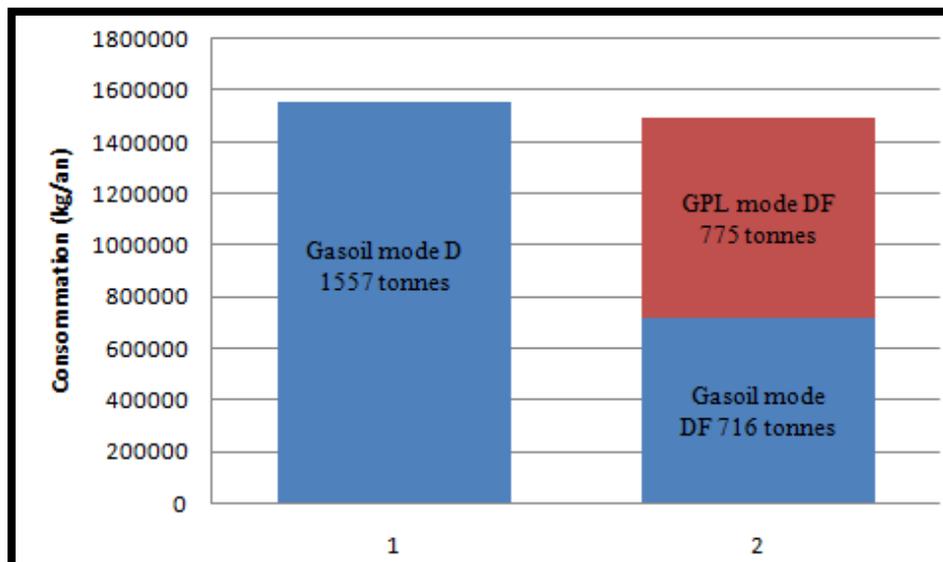


Figure 4.7 : Comparatif de la consommation en mode gasoil et dual-fuel

La figure (4.7) représente une importante diminution de la consommation de gasoil allant jusqu' à 841 tonnes /an remplacée par 775 tonnes /an de GPL.

5-Etude économiques :

En plus des gains énergétiques, le GPL est disponible dans beaucoup de régions. Disponible à un coût plus stable que celui d'autres carburants. Le tableau suivant nous donne les couts des carburants en monnaie locale (DA). [12]

Carburant	Gasoil	GPL
Prix unitaire (DA)	29.01	9

Tableau 4.1 : Prix unitaires des carburants GPL et Gasoil

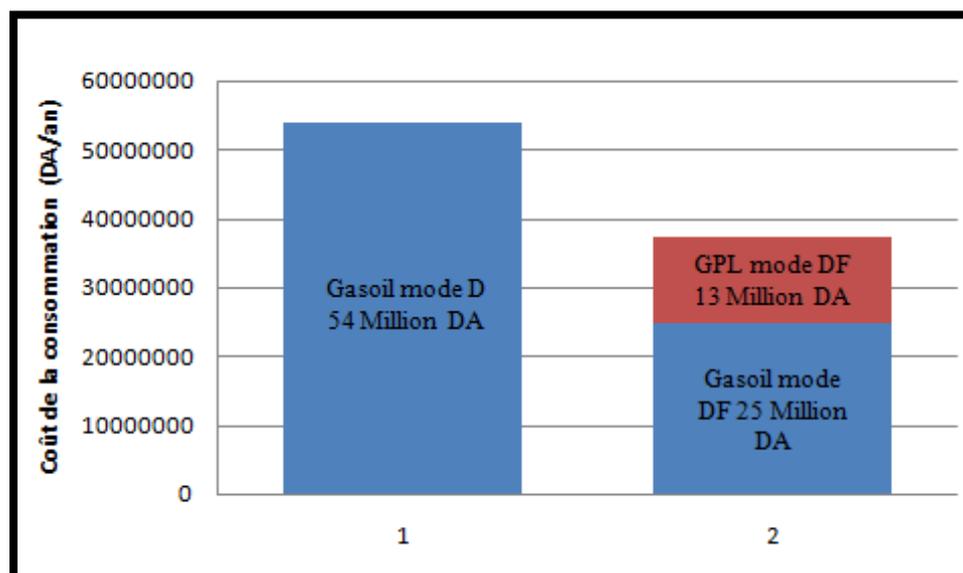


Figure 4.8 : Comparatif du coût de la consommation des carburants avec la nouvelle technique dual-fuel

La figure ci-dessus montre une réduction importante des coûts de la consommation de gasoil allant jusqu'à 16 Million DA/an soit un taux de 30.41 % par an suite à l'adaptation de la nouvelle technologie d'alimentation Dual-Fuel.

6-Etude environnementale :

6-1-Le dioxyde de carbone (CO₂) :

Le dioxyde de carbone (CO₂), est un produit de la combustion des hydrocarbures. Le carburant hydrocarboné est en premier lieu oxydé en CO, lors du processus de la combustion. En présence d'une température suffisamment élevée dans le cylindre, et avec la présence d'oxygène, le CO est oxydé pour former du CO₂. Ainsi, la formation de CO₂ dépend fortement de la température, et de la concentration d'oxygène dans le cylindre. [7]

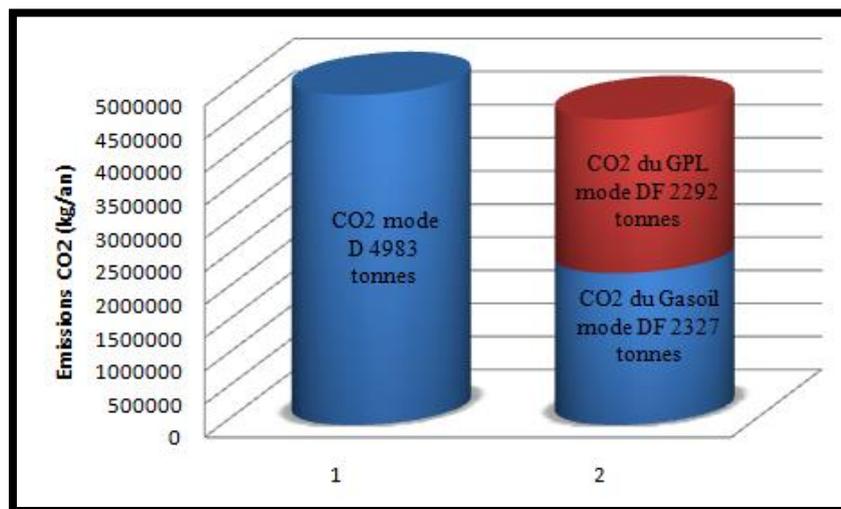


Figure 4.9 : Comparatif des émissions de CO₂ en mode Diesel et Dual-Fuel

L'alimentation dual-fuel présente une réduction significative des émissions de dioxyde de carbone CO₂ comparés au moteur mode diesel. La figure ci-dessus montre qu'il y a une diminution d'émission CO₂ allant jusqu'à 7.32 % avec l'utilisation d'un ratio GPL /Gasol de 54 /46.

6-2-Les oxydes d'azotes (NO_x) :

Sont des combinaisons entre l'azote et l'oxygène (par ex. NO, N₂O ...). Ils se forment durant la combustion à l'intérieur du moteur, lorsque la pression est forte, les températures élevées et s'il y a un excédent d'oxygène.

L'émission d'oxyde d'azotes en mode 100% Diesel du moteur CAT3512A :

$$\text{NO}_x = 9.40 \text{ g/hp-h} = 7.01 \text{ g/kwh. [28]}$$

Sachent que en utilisant le GPL comme carburant de motorisation les émissions d'oxyde d'azote sont 13 fois moins élevé que la motorisation en mode Diesel. [13]

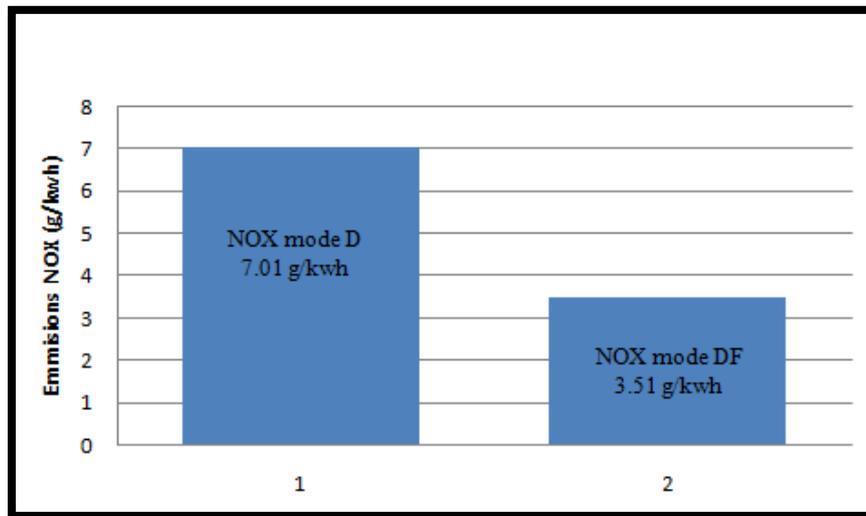


Figure 4.10 : Comparatif des émissions des NO_x en mode Diesel et Dual-Fuel

L'alimentation dual-fuel présente une réduction significative des émissions d'oxyde d'azote NO_x comparés au moteur mode diesel. La figure ci-dessus montre qu'il y a une diminution d'émission NO_x allant jusqu'à 49.93 % avec l'utilisation d'un ratio GPL /Gasoil de 54 /46.

7-Application à l'ENAFOR :

7-1-Estimations de la consommation en Gasoil de 52 chantiers pétroliers :

La consommation de carburant (Gasoil) des groupes électrogènes de 52 chantiers pétroliers durant une année est mesurée à partir de la consommation journalière des groupes électrogènes que soit du camp de vie (01 moteur en marche) ou appareil forage (02 moteur en marche) on a obtenu les résultats suivants :

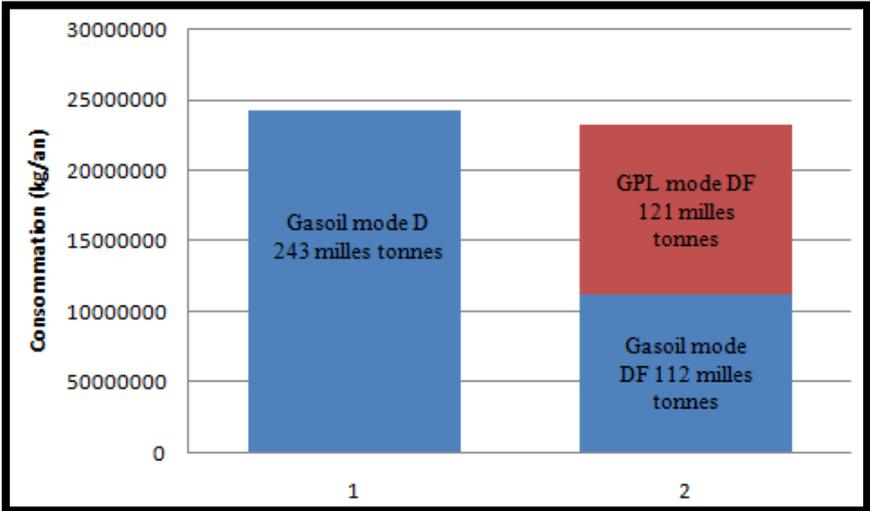


Figure 4.11 : Comparatif de la consommation en mode Gasoil et Dual-Fuel

La figure ci-dessus représente une importante diminution de la consommation de Gasoil allant jusqu’ à 131 milles tonnes /an remplacée par 121 milles tonnes/an de GPL.

7-2-Estimations des gains économiques :

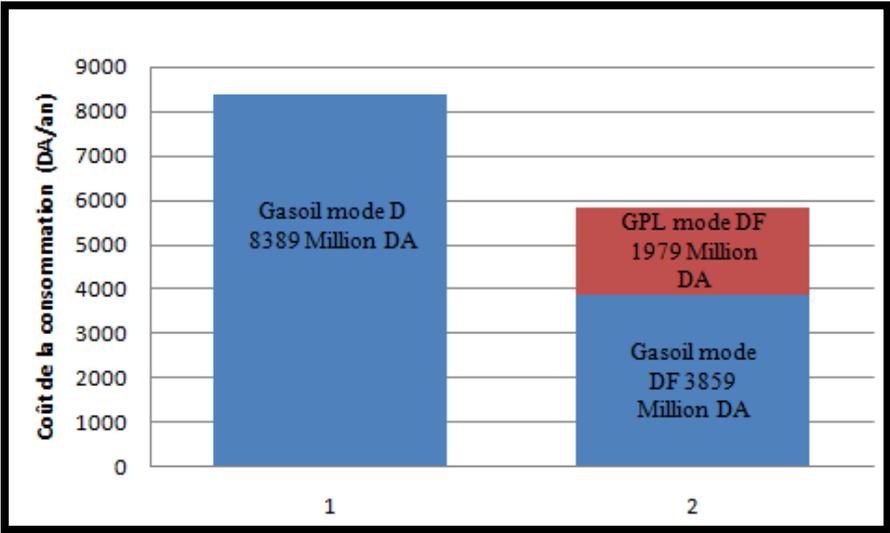


Figure 4.12 : Comparatif du coût de la consommation des carburants avec la nouvelle technique dual-fuel

La figure ci-dessus montre une réduction importante des coûts de la consommation de Gasoil allant jusqu’à 2551 million de dinars algérien soit un taux de 30.41 % par an suite à l’adaptation de la nouvelle technologie d’alimentation Dual-Fuel.

7-3-Estimations des gains environnementaux :

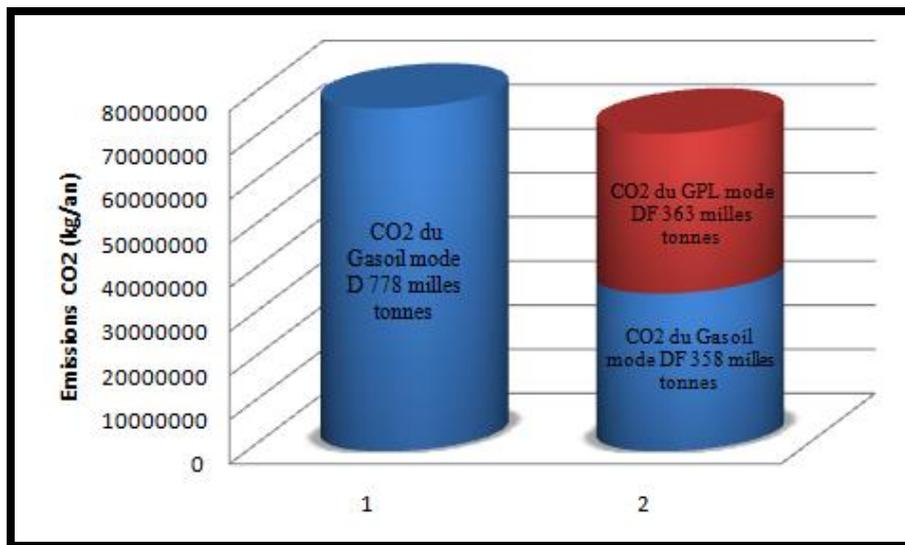


Figure 4.13 : Comparatif des émissions de CO₂ en mode Diesel et Dual-Fuel

La figure ci-dessus montre qu'il y a une diminution d'émission CO₂ allant jusqu'à 7.32 % soit 57 milles tonnes par an avec l'utilisation de la technologie Dual-Fuel pour le parc de l'ENAFOR.

8-Conclusion :

Après interprétation des résultats obtenus par l'alimentation du moteur CAT3512A par le ratio 54/46 GPL/Gasoil et les comparer avec le mode 100% Diesel on a conclu que cette méthode conduit à :

- Diminué la quantité du carburant consommé en gardant la même puissance.
- Diminué le coût de fonctionnement.
- Diminué l'émission des gaz à effet de serre CO₂, et d'oxyde d'azote NO_x.

CONCLUSION GENERALE

Cause aux préoccupations actuelles au sujet du réchauffement climatique provoqué par les émissions de gaz à effet de serre, ainsi que l'utilisation excessive des combustibles fossiles épuisables et nuisibles à l'environnement, le remplacement de ses combustibles par des combustibles d'origine fossile disponibles et moins polluantes représente une bonne solution. Dans ce contexte, le gaz de pétrole liquéfié obtenu dans l'industrie, comme produit secondaire du processus de raffinage du pétrole est perçu comme un vecteur énergétique prometteur pour le futur.

L'objectif de ce travail a été pour but d'étudier la nouvelle technologie d'alimentation des moteurs diesel en Dual-Fuel utilisant différents ratios de combustibles gazeux alternatifs comme le gaz de pétrole liquéfié (GPL).

Afin de réaliser cet objectif, nous avons étudié les moyens techniques pour l'adaptation d'un moteur Caterpillar 3512A en mode Dual-Fuel en décrivant les différents composants constituant le nouveau circuit d'alimentation.

Pour faire une comparaison technique du fonctionnement moteur alimenté en mode Dual-Fuel avec différents ratios GPL /Gasoil, nous avons présenté l'influence de l'alimentation Dual-Fuel sur les paramètres de fonctionnement moteur à une charge maximale. Les résultats montrent que le moteur converti en mode Dual-Fuel peut fonctionner avec le même rendement et la même énergie développée dans le cas de l'alimentation en Gasoil.

Nous avons étudié l'influence de cette technologie sur les émissions polluantes du moteur Caterpillar 3512A converti en mode Dual-Fuel. Les résultats montrent qu'il y a une réduction importante des gaz à effet de serre CO₂ et autre polluant tels que l'oxyde d'azote NO_x.

Finalement, nous avons terminé ce travail par une application sur le parc des appareils de forage de l'ENAFOR. Le gain énergétique en quantité de Gasoil estimé est très important pour l'entreprise en termes de dépenses directes et aussi pour l'économie nationale en termes de préservation des ressources énergétiques et ressources en devises.

Le travail présenté élargit les perspectives de l'intégration de la nouvelle technologie d'alimentation des moteurs diesel, conduisant alors à de nouveaux horizons dans la valorisation d'énergie à partir des sources fossile disponible et moins polluantes.

L'alimentation Dual-Fuel est une approche prometteuse pour diminuer la dépendance aux carburants liquides à base de pétrole et de réduire les émissions de CO₂ et d'autres polluantes du moteur diesel.

L'adaptation des moteurs en mode Dual-Fuel considéré comme une piste de valorisation de l'utilisation du gaz de pétrole liquéfié. Le GPL bénéficie d'un grand intérêt en tant que carburant alternatif propre. Son utilisation comme carburant primaire dans les moteurs diesel nécessite des stratégies à l'échelle nationale en générale et aux niveaux des entreprises de forage en particulier.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DOCUMENT, de l'entreprise ENAFOR (présentation de l'entreprise).
- [2] MARCEL MENARDON - DIDIER JOLIVET, le moteur diesel, CHOTARD ET ASSOCIES EDITEURS, 1986.
- [3] A.Dahoui, S.Derradji, mémoire fin d'étude master professionnel forage, (étude et dimensionnement d'un moteur thermique type Caterpillar 3512) Université de Ouargla, 2016.
- [4] BERNARD VIEUX, Moteurs diesels, Technologie générale, Editions Foucher, 2003.
- [5] DOCUMENT, de l'entreprise ENAFOR (moteur CATERPILLAR série 3500).
- [6] DOCUMENT, ZEPPELIN Power Systems CAT, Bad Bentheim, 03.07.2013.
- [7] BERGERA (CATERPILLAR), moteurs Diesels et technologie de construction, EDITION DOCUMENT DE FORMATION (BERGERA).
- [8] Site, marine éducation, <http://marineexam.blogspot.com/2016/07/direct-injection-unit-injector-fuel.html>, 24 July 2016.
- [9] Site, [Mechanical Engineering](http://mech-engineer.blogspot.com/2008/11/cat-engine-course-part-7-fuel-injection.html), <http://mech-engineer.blogspot.com/2008/11/cat-engine-course-part-7-fuel-injection.html>, 26 November 2008.
- [10] Thèse doctorat, Alexandru Bican, Contribution à l'étude du cycle thermodynamique de moteur fonctionnant en Dual-Fuel, le 17 décembre 2003 à l'ENSTIM de Nantes.
- [11] Thèse doctorat, Fatma Zohra Aklouche. Etude caractéristique et développement de la combustion des moteurs Diesel en mode Dual-Fuel : optimisation de l'injection du combustible pilote. Thermique [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2018. Français.
- [12] Site, GlobalPetrolPrices, <https://fr.globalpetrolprices.com/>, 13 juin 2022.
- [13] Site, dacia, <https://www.dacia.fr/gpl/vehicule-ecologique.html>
- [14] Article, B. Ashok, S. Denis Ashok, C. Ramesh Kumar, LPG diesel dual fuel engine – A critical review Automotive Research Centre, School of Mechanical and Building Sciences, VIT University, Vellore 632014, India, 08 March 2015.

- [15] Site, WORLDWIDE POWER PRODUCTS, <https://www.wpowerproducts.com/news/bi-fuel-technology-revolutionizes-energy-delivery/>.
- [16] Site, ALTRONIC GTI BI-FUEL, <https://www.gti-altronic.com/>.
- [17] Site, NAFTAL, <https://www.naftal.dz/fr/index.php/produits/particuliers/sirghaz>, 2019.
- [18] Benjamin Arnoulet, Mémoire présenté pour l'obtention du titre de Bachelor en mécanique navale, CONVERSION D'UN MOTEUR DIESEL EN UN MOTEUR POLY CARBURANT, HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN, 2021.
- [19] Association adilca, la combustion des carburants, 2016. www.adilca.com.
- [20] Article, Mustafa Aydin, Ahmet Irgin and M. Bahattin Çelik, The Impact of Diesel/LPG Dual Fuel on Performance and Emissions in a Single Cylinder Diesel Generator, 20 May 2018 Turkey.
- [21] Article, Alfredas Rimkus, Modestas Berioza, Mindaugas Melaika, Romualdas Juknelevicius, Zenonas Bogdanovicius, Improvement of the Compression-Ignition Engine Indicators Using Dual Fuel (Diesel and Liquefied Petroleum Gas), 9th International Scientific Conference Transbaltica, 2015.
- [22] Article, Albert Boretti, Numerical study of the substitutional diesel fuel energy in a dual fuel diesel-LPG engine with two direct injectors per cylinder, 2017.
- [23] Article, Ying Wang a, Hong Liu b, Zhiyong Huang, Zhensheng Liu, Study on combustion and emission of a dimethyl ether-diesel dualfuel premixed charge compression ignition combustion engine with LPG (liquefied petroleum gas) as ignition inhibitor, 15 December 2015.
- [24] Ghazi, A. Karim, DUAL-FUEL DIESEL ENGINES, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, by Taylor & Francis Group, LLC, 2015.
- [25] Document, Alessandro Parente, Université Libre de Bruxelles, Service d'Aéro-Thermo-Mécanique, 14 December 2011.
- [26] Article, E. Anye Ngang, C. Valery Ngayihi Abbe, Experimental and numerical analysis of the performance of a diesel engine retrofitted to use LPG as secondary fuel, Applied Thermal Engineering (2018).

[27] Article, Agung Nugroho, Nazaruddin Sinaga, Ismoyo Haryanto, Performance of a Compression Ignition Engine Four Strokes Four Cylinders on Dual Fuel (Diesel –LPG), AIP Conference Proceedings 2014.

[28] Fiche technique, Groupes électrogènes diesel 3512.