



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MÉCANIQUE

MÉMOIRE DE MASTER

Réalisé par :

Saibi Younes

Hireche Youcef Abdelbadia

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Electromécanique

OPTION : Maintenance Industrielle

Thème

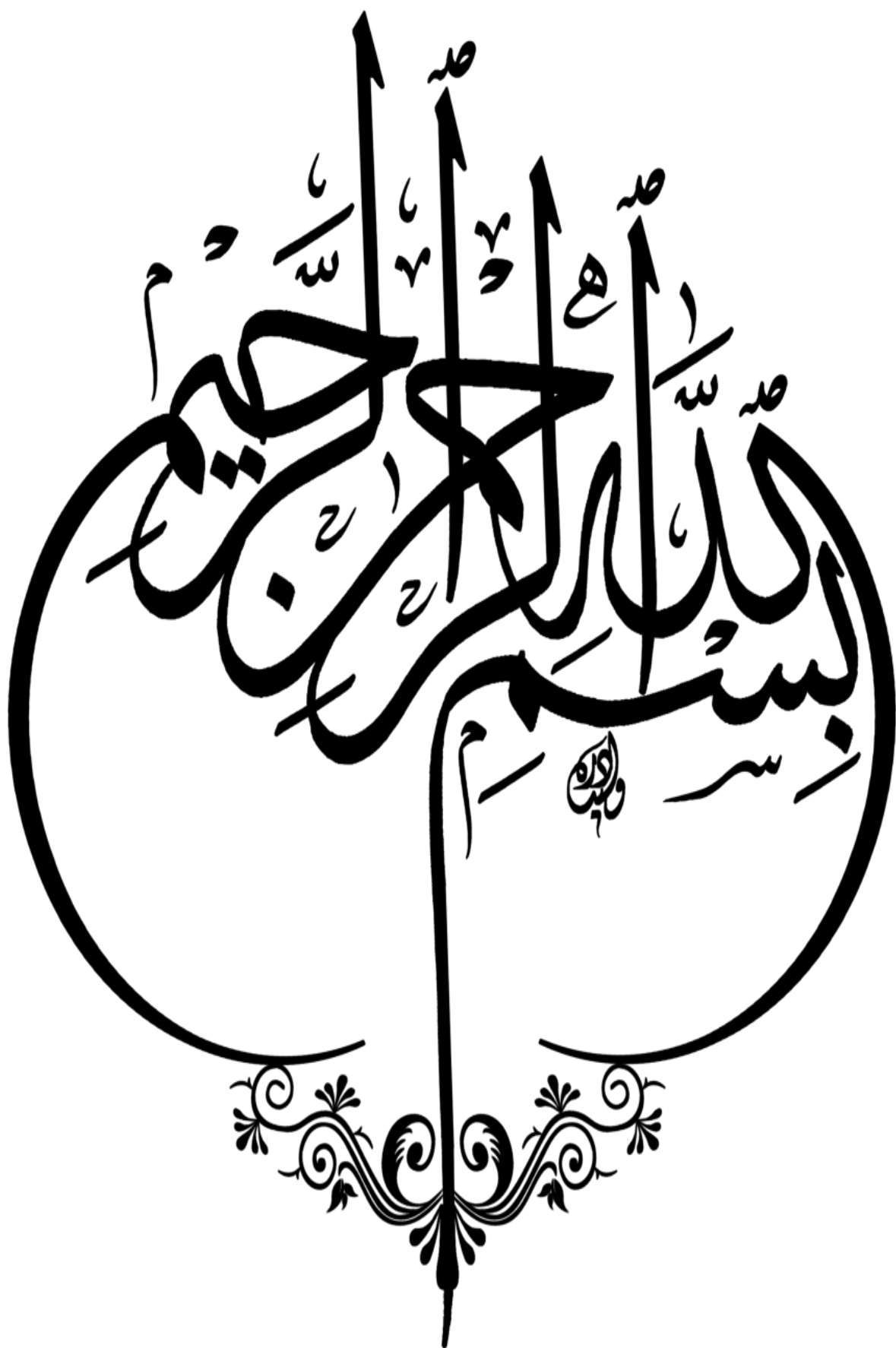
Réalisation d'un système de diagnostic par l'analyse
thermique des gaz d'échappement

Soutenu le : Juin 2025

Devant le jury composé de :

Mr. Rezig Ahmida	MC-A	UAT Laghouat	Président
Mr. Bensahel Djamel	MC-A	UAT Laghouat	Examineur
Mr. Benhorma Mohammed Elhadi	MC-A	UAT Laghouat	Encadreur

Promotion : 2024/2025





Dédicace



*Nous dédions ce mémoire à nos familles respectives,
piliers indéfectibles de notre parcours.*

*À nos parents, pour leur amour, leur patience et leur
soutien inconditionnel, même dans les moments de
doute.*

*À nos frères, sœurs et proches, pour leurs
encouragements, leur compréhension et leur présence
apaisante tout au long de ces années d'études.*

*À tous nos amis, camarades et collègues, avec qui nous
avons partagé les joies, les galères et les longues heures
de travail.*

*Enfin, nous dédions ce travail à toutes celles et ceux
qui croient en nous, et qui nous ont portés, chacun à
leur manière, jusqu'à cette étape importante.*





Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, pour la force, la patience et la santé qu'Il nous a accordées tout au long de ce travail. Sans Sa volonté et Sa miséricorde, rien n'aurait été possible.


*Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre encadrant, **Dr. Benhorma Mohammed Elhadi**, pour sa bienveillance, sa disponibilité et ses conseils éclairés. Son accompagnement, à la fois rigoureux et humain, a grandement contribué à la qualité et à l'aboutissement de ce mémoire.*

*Nous remercions également l'ensemble de l'équipe pédagogique et administrative de **l'Université Amar Telidji de Laghouat**, pour l'enseignement, l'encadrement et le cadre d'apprentissage enrichissant qu'ils nous ont offerts.*

*Nous exprimons notre gratitude aux membres du jury, **M. Rezig Ahmida et M. Bensahel Djamel**, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail, pour leur disponibilité et pour l'intérêt porté à notre recherche.*

Enfin, nous adressons une pensée particulière à nos familles et proches pour leur soutien moral et leur confiance tout au long de ce travail.

Ce mémoire est le résultat de tous ces liens tissés et de cette aventure humaine partagée.



SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I – Généralités sur le moteur diesel	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition	5
I.3. Principe de fonctionnement.....	6
I.3.1. Admission	7
I.3.2. Compression	7
I.3.3. Combustion.....	7
I.3.4. Échappement.....	7
I.4. Principaux organes du moteur diesel.....	8
I.4.1. Organes fixes	8
I.4.1.1. Bloc moteur (bloc-cylindres)	8
I.4.1.2. Culasse.....	9
I.4.1.3. Carter moteur	10
I.4.1.4. Chemises de cylindre	10
I.4.1.5. Supports moteurs	12
I.4.1.6. Collecteurs d'admission et d'échappement.....	12
I.4.2. Organes mobiles	12
I.4.2.1. Pistons.....	12
I.4.2.2. Bielles	15
I.4.2.3. Vilebrequin	15
I.4.2.4. Soupapes (admission/échappement).....	17
I.4.2.5. Arbre à cames	17
I.4.2.6. Culbuteurs et poussoirs	17
I.4.2.7. Volant moteur	18
I.4.3. Système d'injection.....	18
I.4.3.1. Pompe à injection.....	18
I.4.3.2. Rampe commune (Common Rail)	18
I.4.3.3. Injecteurs.....	18
I.4.3.4. Bougies de préchauffage	19
I.4.4. Système d'admission et de suralimentation	19
I.4.4.1. Turbocompresseur (turbo).....	19
I.4.4.2. Filtre à air.....	19
I.4.4.3. Intercooler	19
I.4.5. Système de refroidissement.....	20

I.4.5.1.	Radiateur	20
I.4.5.2.	Pompe à eau	20
I.4.5.3.	Thermostat	20
I.4.5.4.	Ventilateur.....	21
I.4.6.	Système de lubrification.....	21
I.4.6.1.	Pompe à huile.....	21
I.4.6.2.	Filtre à huile	21
I.4.6.3.	Carter d'huile	21
I.4.6.4.	Gicleurs d'huile.....	22
I.4.7.	Système de commande et de gestion.....	22
I.4.7.1.	Calculateur moteur (ECU)	22
I.4.7.2.	Capteurs	22
I.4.7.3.	Actionneurs	22
I.5.	Capteurs du moteur	22
I.5.1.	Type de Capteurs du moteur	23
I.5.1.1.	Capteurs de position et de vitesse	23
I.5.1.2.	Capteurs de température.....	24
I.5.1.3.	Capteurs de pression	25
I.5.1.4.	Capteurs de flux et de composition des gaz	25
I.5.1.5.	Capteurs de vibration	26
I.6.	Principes des systèmes antipollution diesel.....	28
I.6.1.	Évolution des normes Euro pour Poids Lourds.....	30
I.6.2.	Efficacité réelle et enjeux industriels des systèmes	30
I.7.	Conclusion	31
Chapitre II – Étude expérimentale		
II.1.	Introduction.....	33
II.2.	Présentation du moteur Volvo D13	33
II.3.	Caractéristiques générales	34
II.3.1.	Configuration Générale.....	35
II.3.2.	Performances Moteur.....	35
II.3.3.	Systèmes d'Alimentation et Turbo	36
II.3.4.	Conformité Environnementale & Post-traitement.....	36
II.3.5.	Lubrification et Entretien	37
II.3.6.	Équipements Complémentaires.....	37
II.4.	Volvo Tech Tool	38
II.4.1.	Définition	38
II.4.2.	Rôle.....	38

II.4.3.	Structure et fonctionnalités de l'interface VTT.....	39
II.4.3.1.	Produit.....	39
II.4.4.	Équipements nécessaires.....	41
II.4.4.1.	Ordinateur portable.....	41
II.4.4.2.	Interface de communication.....	41
II.4.4.3.	Câbles de connexion diagnostic.....	41
II.4.4.4.	Licence Volvo Tech Tool.....	42
II.5.	Méthodologie expérimentale.....	42
II.5.1.	Protocole expérimental.....	42
II.5.2.	Tests effectués et procédures de contrôle.....	43
II.5.2.1	Système d'alimentation en carburant.....	43
II.5.2.2.	Système d'admission et d'échappement.....	50
II.5.2.3.	Ventilateur de refroidissement du moteur.....	51
II.5.2.4.	Compression des cylindres.....	54
II.5.2.5.	Système de lubrification et d'huile.....	54
II.6.	Conclusion.....	56
Chapitre III –Analyse thermique et diagnostique		
III.1.	Introduction.....	58
III.2.	Méthodes de diagnostic.....	58
III.2.1.	Thermographie infrarouge.....	58
III.2.2.	Test des injecteurs.....	59
III.2.3.	Contrôle de compression.....	59
III.2.4.	Diagnostic stéthoscope.....	59
III.2.5.	Lecture du calculateur.....	59
III.2.6.	Par des capteurs thermiques et l'Arduino.....	59
III.3.	Composant de système.....	59
III.4.	Avantages de ce système.....	60
III.5.	Méthodologie et gestion de système.....	61
III.5.1.	Mesure des températures et Positionnement des capteurs.....	61
III.5.2.	Câblage.....	62
III.5.3.	Acquisition par Arduino.....	62
III.5.4.	Transmission vers un PC.....	62
III.5.5.	Analyse sur PC.....	62
III.5.6.	Diagnostic automatique.....	62
III.6.	Cas thermiques anormaux sur les gaz d'échappement.....	63
III.6.1.	Surchauffe anormale d'un cylindre.....	63
III.6.1.1.	Symptôme et Observation.....	63

III.6.1.2. Causes	63
III.6.1.3 conséquences	65
III.6.1.4. Recommandations pour corriger la situation	67
III.6.2. Basse température anormale d'un cylindre	68
III.6.2.1. Symptôme et Observation	68
III.6.2.2. Causes	68
III.6.2.3. Conséquences.....	69
III.6.2.4. Recommandations pour corriger la situation.....	70
III.6.3. Écart température entre cylindres	71
III.6.3.1. Symptômes observés.....	71
III.6.3.2. Causes	71
III.6.3.3. Principaux mécanismes.....	71
III.6.3.4. Conséquences et risques.....	72
III.6.3.5. Recommandations pour corriger la situation.....	73
III.6.4. Température fluctuante en régime stable (augmentation progressivement). 73	
III.6.4.1. Symptôme et Observation	73
III.6.4.2. Causes	74
III.6.4.3. Conséquences.....	74
III.6.5 Surchauffe globale (température élevée sur tous les cylindres).....	74
III.6.5.1. Symptôme observe.....	74
III.6.5.2. Causes	75
III.7. Impact sur l'environnement	75
III.8. Conclusion	76
Conclusion générale.....	78
Bibliographie.....	81

Liste des figures

Chapitre I

N° de figure	Titre	Page
Figure 1.1	Diagrammes thermodynamiques du moteur diesel (cycle réel et théorique)	6
Figure 1.2	Les quatre temps du cycle diesel	7
Figure 1.3	Les principaux organes d'un moteur diesel	8
Figure 1.4	Bloc moteur	9
Figure 1.5	Vue éclatée de la culasse	10
Figure 1.6	Joint culasse	10
Figure 1.7	Chemise de cylindre humide	11
Figure 1.8	Chemise de cylindre sèche	11
Figure 1.9	Chemises de cylindre	11
Figure 1.10	Position segments de piston	13
Figure 1.11	Description du piston	14
Figure 1.12	Bielle	15
Figure 1.13	Les composants du vilebrequin	16
Figure 1.14	Vue en coupe d'une soupape	17
Figure 1.15	Modèle d'arbre à cames	17
Figure 1.16	Volant moteur	18
Figure 1.17	Circuit d'alimentation de gazole	18
Figure 1.18	Bougies de préchauffage	19
Figure 1.19	Circuit d'admission d'air d'un moteur diesel	20
Figure 1.20	Schéma de principe du circuit de refroidissement moteur	21
Figure 1.21	Transformation chimique des polluants dans les gaz d'échappement	28
Figure 1.22	Filtre à particules combiné	29
Figure 1.23	Catalyseur SCR	29

Chapitre II

N° de figure	Titre	Page
Figure 2.1	Moteur Volvo D13	34
Figure 2.2	Logo Volvo Tech Tool	38
Figure 2.3	Pc portable	41
Figure 2.4	Outil de diagnostic Vocom II	41
Figure 2.5	Câble de diagnostic OBD2	41
Figure 2.6	Groupe électrogène Volvo Penta 440 KVA	42
Figure 2.7	Fenêtre d'indication des données de base	43
Figure 2.8	Résultats du test de pression d'alimentation – Mode Simulation	44
Figure 2.9	Résultats du test de pression d'alimentation – Mode Réel	44
Figure 2.10	Résultats de la consommation de carburant – Mode Simulation	46

Figure 2.11	Résultats d'équilibrage des cylindres – Mode Simulation	49
Figure 2.12	Résultats d'équilibrage des cylindres – Mode Réel	49
Figure 2.13	Résultats des systèmes d'admission et d'échappement – Mode Simulation	50
Figure 2.14	Capteur de vitesse de ventilateur de refroidissement du moteur	51
Figure 2.15	Résultats de demande d'activation du ventilateur – Mode Simulation	53
Figure 2.16	Résultats de compression des cylindres – Mode Simulation	54

Chapitre III

N° de figure	Titre	Page
Figure 3.1	Image imaginaire du système de mesure EGT	61
Figure 3.2	Graphe thermique sur 6 cylindres si une augmentation dans un chambre	63
Figure 3.3	Exemple de cavitation	64
Figure 3.4	Déformation plastique de tête de piston	65
Figure 3.5	Déformation plastique de la jupe de piston	65
Figure 3.6	Joint de culasse endommagé	66
Figure 3.7	Culasse endommagée	66
Figure 3.8	Bloc moteur fissuré	66
Figure 3.9	Graphe thermique basse température dans un chambre	68
Figure 3.10	Usure de piston	69
Figure 3.11	Usure de chemise	69
Figure 3.12	Graphe thermique écart température entre cylindres	71
Figure 3.13	Graphe thermique température fluctuante en régime stable (augmentation progressivement)	73
Figure 3.14	Graphe thermique surchauffe globale	74

Liste des tableaux

Chapitre I

N° de tableau	Titre	Page
Tableau 1.1	Tableau récapitulatif des capteurs moteur	27
Tableau 1.2	Normes Euro d'émissions de polluants pour les véhicules lourds	30

Chapitre II

N° de tableau	Titre	Page
Tableau 2.1	Détails techniques et caractéristiques principales	35
Tableau 2.2	Puissance, couple et régimes de fonctionnement	35
Tableau 2.3	Technologies d'optimisation de l'air et du carburant	36
Tableau 2.4	Technologies de dépollution par norme Euro	36
Tableau 2.5	Caractéristiques du système de lubrification et maintenance	37
Tableau 2.6	Accessoires et dispositifs additionnels pour la sécurité et la polyvalence	37
Tableau 2.7	Comparaison technique de test de pression d'alimentation de carburant	44
Tableau 2.8	Comparaison technique du test d'équilibrage des cylindres	48

Chapitre III

N° de tableau	Titre	Page
Tableau 3.1	Composant de système	59

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
APP	Accelerator Pedal Position (Position de la pédale d'accélérateur)
CKP	Crankshaft Position Sensor (Capteur de position du vilebrequin)
CMP	Camshaft Position Sensor (Capteur de position de l'arbre à cames)
DPF	Diesel Particulate Filter (Filtre à particules diesel)
DOC	Diesel Oxidation Catalyst (Catalyseur d'oxydation diesel)
DTC	Diagnostic Trouble Code (Code de défaut)
ECU	Engine Control Unit (Calculateur moteur / unité de commande électronique)
EGR	Exhaust Gas Recirculation (Recirculation des gaz d'échappement)
FAP	Filtre à Particules (identique à DPF)
HC	Hydrocarbures imbrûlés
ISO	International Organization for Standardization
MAF	Mass Air Flow Sensor (Capteur de débit massique d'air)
MAP	Manifold Absolute Pressure (Capteur de pression d'admission)
MID	Message Identifier (Identifiant de module électronique chez Volvo)
MBC	Model-Based Calibration (calibration modélisée)
R&D	Recherche et Développement
OBD	On-Board Diagnostics,
PTO	Power Take-Off (Prise de force)
PTT	Premium Tech Tool (version du logiciel Volvo Tech Tool)
PM	Particules fines (Particulate Matter)
SPI	Serial Peripheral Interface
SAE	Society of Automotive Engineers (norme d'huile moteur SAE)
SCR	Selective Catalytic Reduction (Réduction catalytique sélective)
SOHC	Single OverHead Camshaft (Arbre à cames en tête simple)
VDS	Volvo Drain Specification (spécification de l'huile Volvo)
VEB	Volvo Engine Brake (frein moteur Volvo)
VGT	Variable Geometry Turbocharger (Turbocompresseur à géométrie variable)
VIN	Vehicle Identification Number
VOCOM	Interface de diagnostic Volvo
VTT	Volvo Tech Tool



Introduction

Générale

Introduction Générale

Le moteur à combustion interne représente une avancée majeure dans l'histoire de l'ingénierie mécanique, ayant profondément transformé les secteurs du transport, de l'énergie et de l'industrie. Parmi les différentes variantes existantes, le moteur diesel s'est distingué par son efficacité énergétique, sa robustesse et sa capacité à répondre aux exigences croissantes en matière de performances et de durabilité. Depuis son invention par Rudolf Diesel à la fin du XIX^e siècle, ce type de moteur n'a cessé d'évoluer, intégrant progressivement des technologies de plus en plus sophistiquées, tant sur le plan mécanique qu'électronique.

Dans un contexte mondial marqué par des enjeux environnementaux pressants, les moteurs diesel sont aujourd'hui au centre de multiples débats. Leur rendement supérieur par rapport aux moteurs à essence en fait une solution de choix pour les applications industrielles, maritimes et les véhicules utilitaires lourds. Toutefois, cette efficacité s'accompagne également de défis majeurs, notamment en ce qui concerne les émissions polluantes.

En fonctionnement, le moteur est exposé à de nombreux dangers, tels qu'une mauvaise qualité du carburant, une surcharge et des dysfonctionnements graves, qui représentent tous des risques importants pour le moteur. Ces risques ne sont détectés que lorsqu'ils affectent le moteur et se manifestent par des signes tels que de fortes vibrations, des variations du bruit du moteur ou des dommages aux composants internes.

Pour cela, nous avons proposé ce système de maintenance préventive du moteur afin de prévenir tout problème avant qu'il ne survienne.

Cette étude s'inscrit dans cette dynamique de développement technologique.

Le chapitre 1 présente les fondements théoriques du moteur diesel, en se concentrant sur son principe de fonctionnement et ses principaux composants, ainsi que sur l'importance croissante des capteurs et des systèmes de dépollution.

Le chapitre 2 présente une approche expérimentale à travers l'analyse du moteur Volvo D13, démontrant l'application pratique des outils de diagnostic électronique, notamment le logiciel Volvo Tech Tool, dans le contexte de la maintenance et de la surveillance des défauts internes.

Le chapitre 3 présente système d'analyse, son application et son fonctionnement, ainsi que son mode de diagnostic du moteur pour la maintenance préventive.

En tant que spécialistes de la maintenance industrielle, nous comprenons que de nombreux problèmes peuvent entraîner des pertes, qu'il s'agisse de pertes financières, de pièces moteur

Introduction Générale

endommagées ou de perte de temps et d'efforts pour les réparer. C'est pourquoi nous effectuons des analyses et des inspections de moteurs afin d'anticiper ces problèmes avant qu'ils ne surviennent.



Chapitre I
Généralités sur le
moteur diesel

I.1. Introduction

Le moteur diesel est aujourd'hui l'un des moteurs thermiques les plus utilisés dans le monde, en raison de son rendement élevé et de sa robustesse, lorsque l'ingénieur allemand Rudolf Diesel développa en 1892 un moteur fonctionnant sur un principe innovant : l'auto-allumage du carburant par la compression de l'air sans l'aide d'une bougie d'allumage. Ce principe marque une rupture technologique majeure, offrant une alternative plus efficace aux moteurs à vapeur et aux moteurs à essence.

Industriellement, les premiers moteurs diesel furent employés dans des domaines à forte demande énergétique, tels que les navires, les locomotives, les groupes électrogènes et les engins lourds. Avec l'évolution des technologies d'injection de carburant, de la mécanique de précision et surtout de l'électronique embarquée, le moteur diesel s'est progressivement adapté aux véhicules légers et utilitaires. Son efficacité énergétique est supérieure à celle des moteurs à essence, grâce à sa capacité à convertir efficacement l'énergie du carburant. Les moteurs diesel utilisent un cycle à quatre temps et combinent des composants mécaniques robustes avec des capteurs électroniques sophistiqués. Parmi eux, le piston est un élément clé pour la conversion d'énergie, tandis que le capteur est nécessaire à la régulation, garantissant performance et fiabilité.

Le but de ce chapitre est de présenter de manière globale et structurée le moteur diesel, en exposant son principe de fonctionnement, en détaillant ses composants fondamentaux, et en mettant l'accent sur l'ensemble des capteurs moteurs, ainsi que sur les systèmes de dépollution qui contribuent à la réduction des émissions polluantes.

I.2. Définition

Un moteur diesel est un moteur à combustion interne qui utilise le carburant diesel comme source d'énergie. Il fonctionne selon le principe de l'allumage par compression, où l'air est comprimé à une pression et température suffisamment élevées pour provoquer l'auto-inflammation du carburant injecté. Ce type de moteur se distingue des moteurs à essence qui utilisent une étincelle pour enflammer le mélange air-carburant. Le moteur diesel est souvent préféré pour des applications nécessitant un couple élevé et une consommation de carburant plus économique, comme dans les poids lourds, les bateaux, et certaines voitures.

Il est également reconnu pour sa durabilité et son efficacité énergétique, bien qu'il émette davantage de particules fines et d'oxydes d'azote (NOx) par rapport aux moteurs à essence. Selon la norme ISO 2710, un moteur diesel est défini comme : "Un moteur à combustion alternatif où le carburant est injecté dans l'air chaud du compresseur, entraînant un allumage spontané sans dispositif d'allumage électrique." [1]

I.3. Principe de fonctionnement

Le moteur diesel fonctionne selon le cycle à quatre temps, également appelé cycle de diesel. Chaque phase joue un rôle essentiel dans la conversion de l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique. Les quatre temps sont : l'admission, la compression, la combustion (explosion) et l'échappement.

En réalité, le moteur suit un **cycle réel**, qui diffère du **cycle idéal** théorique. Dans le cycle idéal, les transformations sont supposées parfaites : pas de pertes thermiques, pas de fuites de gaz, et des changements instantanés de pression et de volume. Cependant, dans le cycle réel, des phénomènes tels que les pertes de chaleur, les frottements mécaniques, les fuites et le temps nécessaire à la combustion entraînent des écarts. Ces différences font que le rendement réel d'un moteur est toujours inférieur au rendement théorique.

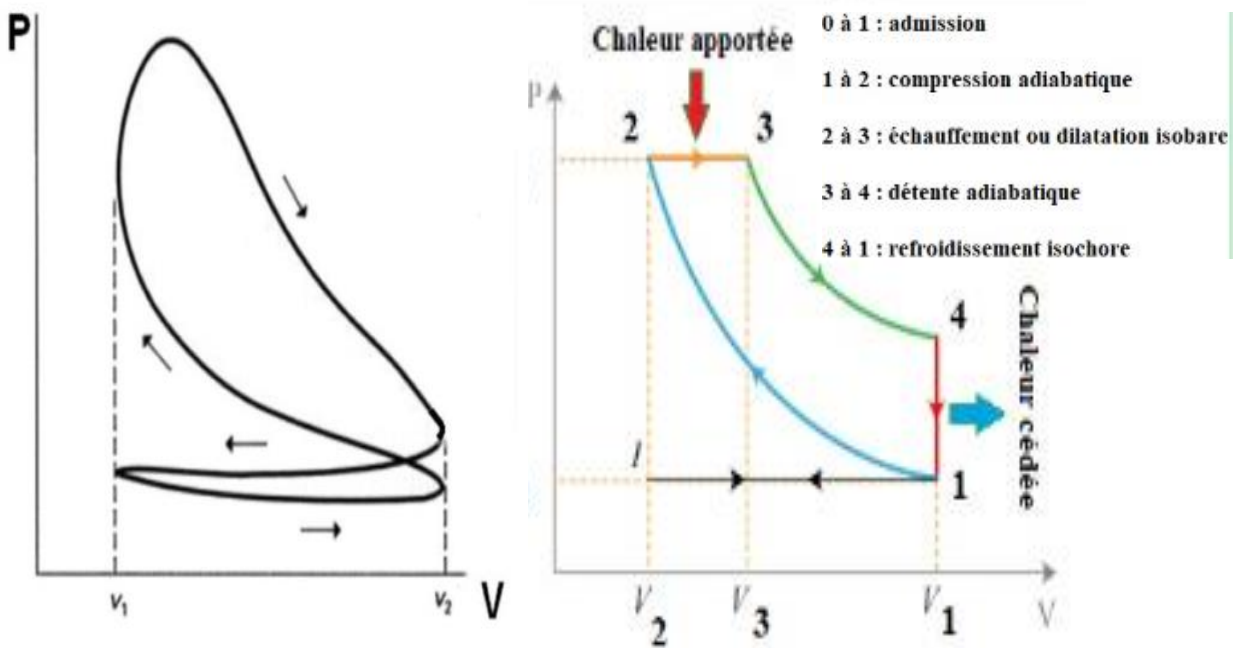


Figure 1.1 Diagrammes thermodynamiques du moteur diesel (cycle réel et théorique)

I.3.1. Admission

Lors de la phase d'admission, la soupape d'admission s'ouvre, permettant à l'air extérieur d'être aspiré dans le cylindre grâce au mouvement descendant du piston. Contrairement aux moteurs à essence, aucun carburant n'est introduit à ce stade, seul de l'air pur est admis. Cette phase est cruciale pour assurer un apport suffisant d'oxygène nécessaire à la combustion future.

I.3.2. Compression

Une fois l'air admis, la soupape d'admission se ferme et le piston remonte dans le cylindre, comprimant fortement l'air. Le rapport de compression est très élevé, généralement entre 14:1 et 22:1, ce qui augmente considérablement la température de l'air, atteignant environ 600 à 900 °C. Cette forte compression est essentielle pour permettre l'auto-inflammation du carburant injecté, sans besoin d'une étincelle.

I.3.3. Combustion

Peu avant que le piston n'atteigne le point mort haut, du gazole est injecté à très haute pression dans la chambre de combustion. Les fines gouttelettes de carburant rencontrent l'air comprimé extrêmement chaud, ce qui provoque leur auto-inflammation immédiate. La combustion rapide génère une grande quantité d'énergie thermique qui se transforme en pression, poussant vigoureusement le piston vers le bas. C'est cette poussée qui fournit la force motrice au moteur.

I.3.4. Échappement

Après la phase de combustion et de détente, la soupape d'échappement s'ouvre. Le piston remonte alors dans le cylindre et expulse les gaz brûlés issus de la combustion vers l'extérieur du moteur. Cette étape est indispensable pour évacuer les résidus et préparer le cylindre pour un nouveau cycle d'admission.

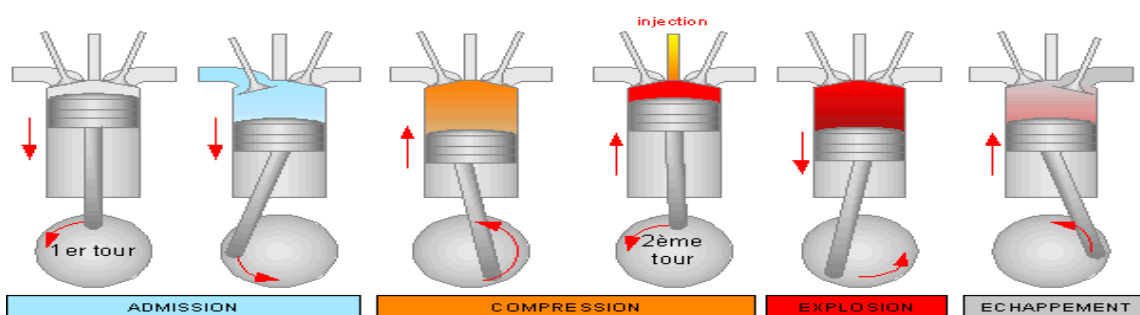


Figure 1.2 I Les quatre temps du cycle diesel [2]

I.4. Principaux organes du moteur diesel

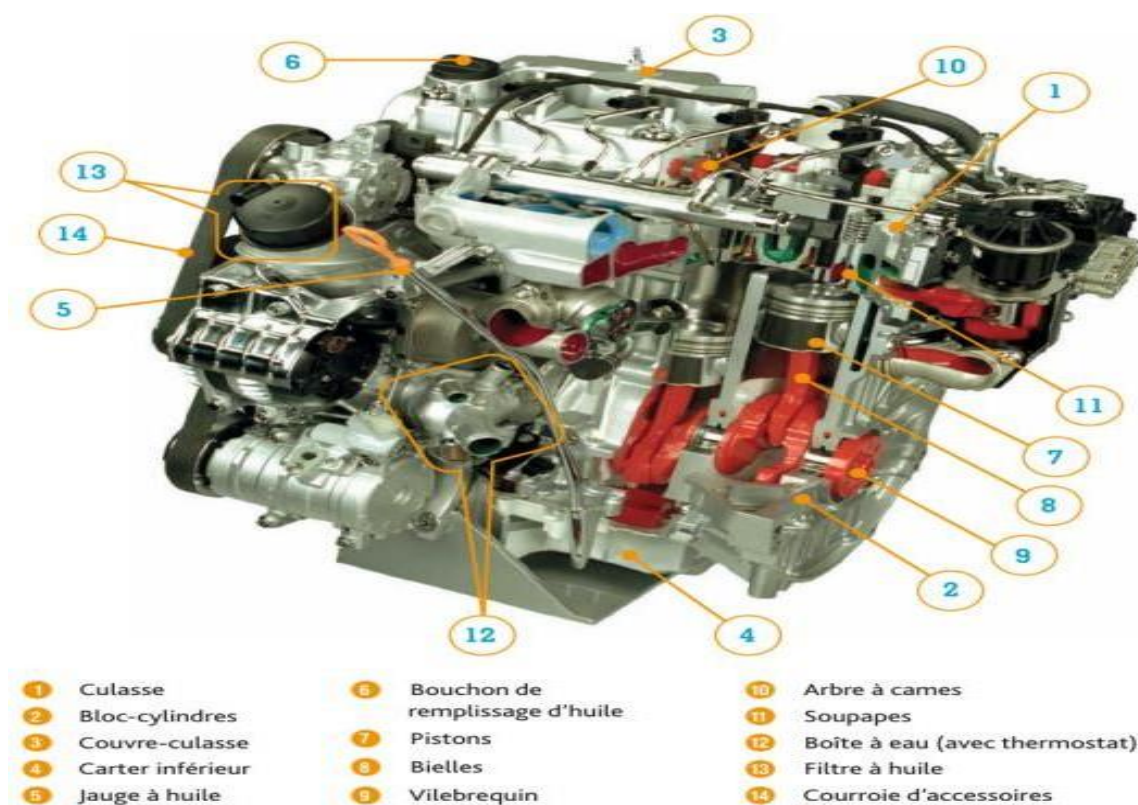


Figure 1.3 Les principaux organes d'un moteur diesel [3]

I.4.1. Organes fixes

Ces éléments constituent la structure principale du moteur. Ils sont fixes, c'est-à-dire qu'ils ne bougent pas pendant le fonctionnement, mais jouent un rôle fondamental dans le soutien, la protection et le guidage des pièces mobiles.

I.4.1.1. Bloc moteur (bloc-cylindres)

Le bloc-cylindres est l'élément central d'un moteur thermique. Il accueille des composants essentiels comme le vilebrequin, les pistons et des périphériques tels que le démarreur ou l'alternateur. Il comprend le bloc moteur et les cylindres. Le bloc soutient le vilebrequin et doit résister à de fortes sollicitations mécaniques : poussées, torsions et vibrations dues aux mouvements des pièces en rotation ou en translation. Les cylindres guident les pistons en supportant pression, chaleur de combustion et frottements répétés sans se déformer.

Fabriqué en fonte (rigidité) ou en alliage d'aluminium (légèreté), le bloc est moulé en une seule pièce intégrant les alésages des cylindres, les galeries de refroidissement (chambres à eau) et les conduits d'huile. Le matériau doit assurer bonne conductivité thermique et

résistance à la corrosion des fluides. La culasse se fixe sur le plan de joint supérieur du bloc pour assurer l'étanchéité des chambres de combustion, grâce au joint de culasse inséré entre les deux. A la base du bloc se fixe le carter inférieur, en fonte ou aluminium, avec les chapeaux de paliers retenant le vilebrequin. À ne pas confondre avec le carter d'huile, qui sert uniquement de réservoir de lubrification.

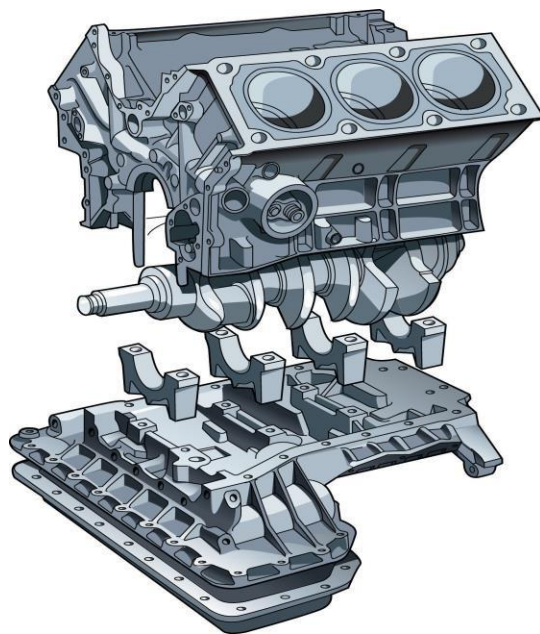


Figure 1.4 bloc moteur [4]

I.4.1.2. Culasse

La culasse constitue la partie supérieure du moteur, faisant office de couvercle au-dessus du bloc-cylindres, et son étanchéité est assurée par le joint de culasse. Dans un moteur monocylindre, plusieurs éléments sont indispensables à son bon fonctionnement : le bloc moteur comprend un cylindre accueillant le mouvement du piston, un vilebrequin en rotation sous le cylindre et une bielle reliant le piston au vilebrequin. Dans la culasse, le haut du cylindre est fermé par la chambre de combustion, qui comprend une soupape d'admission (permettant l'entrée d'air), une soupape d'échappement (pour l'évacuation des gaz brûlés), ainsi qu'une bougie de préchauffage et un injecteur (assurant l'allumage et l'injection du carburant). La culasse intègre également les dispositifs d'ouverture et de fermeture des soupapes, des conduits pour les gaz d'admission et d'échappement (auxquels sont connectés les collecteurs), ainsi que des circuits internes assurant le refroidissement par liquide et la lubrification par huile. Le joint de culasse, placé entre le bloc et la culasse, garantit l'étanchéité des chambres de combustion, tout en permettant la circulation simultanée du

liquide de refroidissement et de l'huile moteur sans fuite. Enfin, un couvre-culasse protège la partie supérieure de la culasse et est muni de son propre joint d'étanchéité.

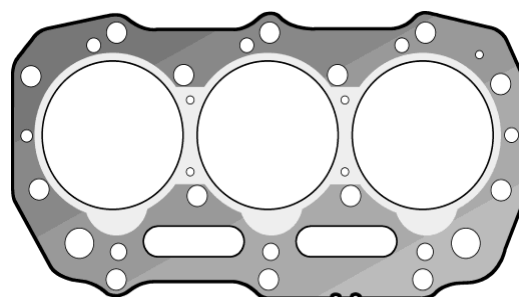
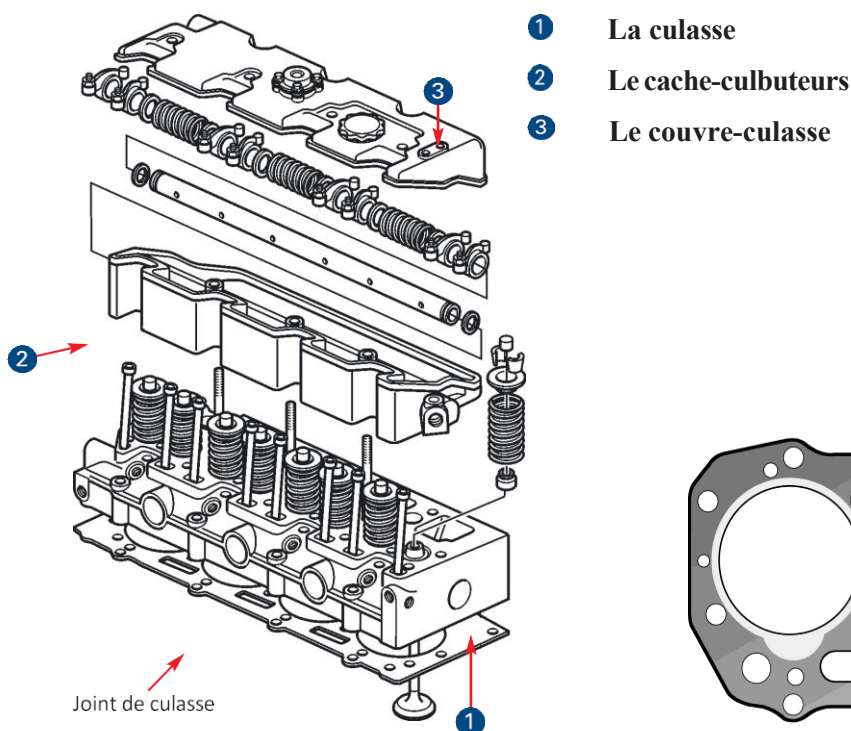


Figure 1.5 Vue éclatée de la culasse [4]

Figure 1.6 joint culasse [4]

I.4.1.3. Carter moteur

Le carter moteur est l'enveloppe inférieure du moteur, protégeant les éléments mobiles comme le vilebrequin et les bielles. Il sert de réservoir à l'huile de lubrification, assurant son stockage et sa distribution. Grâce à ses joints, il garantit l'étanchéité et empêche les fuites. Le carter contribue aussi à la rigidité du moteur et atténue le bruit des composants internes. On distingue souvent le carter supérieur, solidaire du bloc, et le carter inférieur (ou carter d'huile), démontable pour faciliter l'entretien.

I.4.1.4. Chemises de cylindre

Il existe plusieurs façons d'intégrer les cylindres dans un moteur. Dans certains cas, ils sont directement usinés dans le bloc moteur, permettant aux pistons d'y coulisser immédiatement. Cette configuration nécessite un matériau de bloc particulièrement résistant, capable de supporter les effets de la combustion du gazole ainsi que l'usure générée par les mouvements des pistons.

Une autre solution consiste à insérer dans le bloc des éléments rapportés appelés chemises sèches. Il s'agit de parois métalliques fines, ajustées par pression dans les alésages du bloc. Dans ce cas, le matériau du bloc moteur n'a pas besoin d'offrir les mêmes performances mécaniques, puisque c'est la chemise qui assure le contact direct avec le piston. À noter que les chemises sèches ne sont pas en contact avec le liquide de refroidissement.

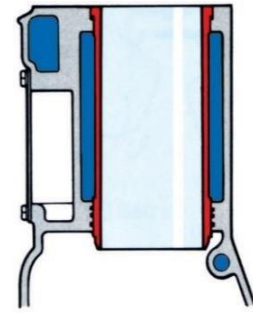


Figure 1.7 Chemise de cylindre humide [4]

Enfin, certains moteurs utilisent des chemises humides, qui sont des cylindres rapportés à l'intérieur d'un bloc creux, plus simple à usiner. Ces chemises sont positionnées par des épaulements aux deux extrémités et maintenues fermement en place par la culasse. Contrairement aux chemises sèches, elles sont en contact direct avec le liquide de refroidissement, ce dernier circulant à l'extérieur des chemises. L'étanchéité de ces chemises est assurée par le joint de culasse en partie supérieure et un joint d'embase en partie inférieure.

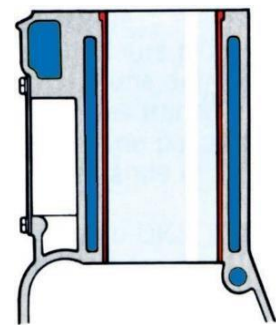


Figure 1.8 Chemise de cylindre sèche [4]

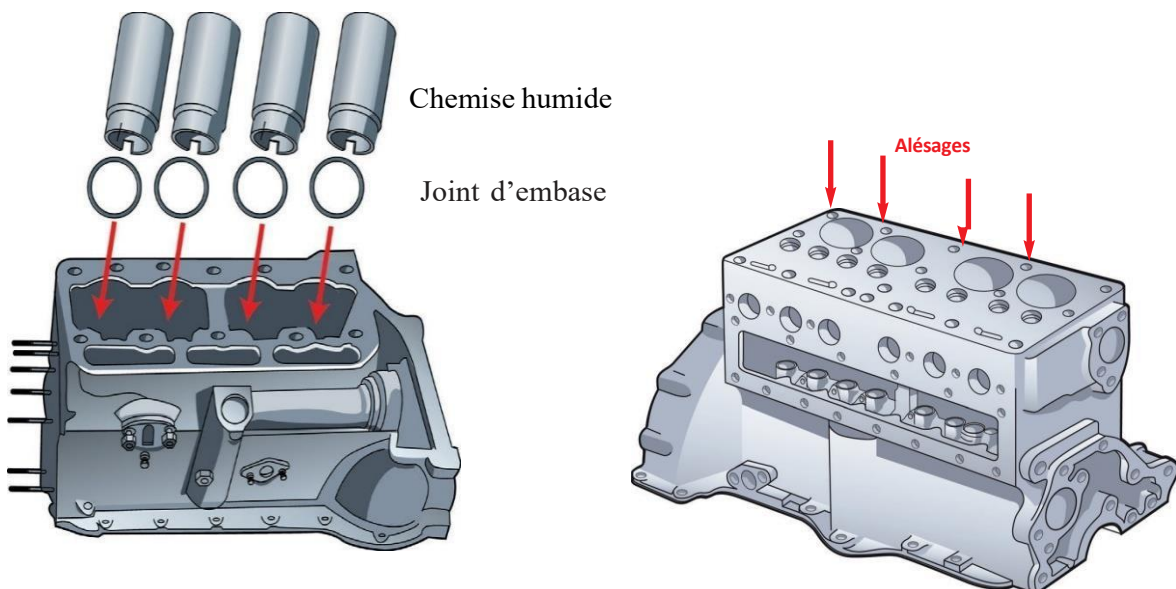


Figure 1.9 Chemises de cylindre [4]

I.4.1.5. Supports moteurs

Les supports moteurs sont des éléments qui fixent le moteur au châssis du véhicule tout en absorbant les vibrations et les chocs générés par son fonctionnement. Ils assurent la stabilité et le bon alignement du moteur, limitant la transmission des vibrations vers l'habitacle. Généralement composés d'une partie métallique et d'un insert en caoutchouc ou en matériau élastique, ils combinent solidité et souplesse. Certains modèles intègrent des supports hydrauliques ou actifs pour mieux gérer les vibrations selon les conditions de conduite.

I.4.1.6. Collecteurs d'admission et d'échappement

Les collecteurs d'admission et d'échappement sont des pièces fixées sur la culasse du moteur. Le collecteur d'admission répartit l'air (ou le mélange air/carburant) vers les cylindres, assurant une alimentation homogène, tandis que le collecteur d'échappement recueille les gaz brûlés issus de la combustion et les dirige vers la ligne d'échappement. Fabriqués en métal ou en alliage, ces collecteurs doivent résister à la chaleur et aux pressions élevées, tout en favorisant le bon flux des gaz pour optimiser les performances et limiter les pertes.

I.4.2. Organes mobiles

Ces composants internes du moteur sont en mouvement constant et jouent un rôle essentiel dans la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique. Ils assurent également la coordination des différentes phases du fonctionnement moteur.

I.4.2.1. Pistons

Le piston constitue un élément fondamental du moteur à combustion interne, où il effectue un mouvement alternatif linéaire dans le cylindre. Son rôle principal est de transformer l'énergie thermique issue de la combustion du carburant en énergie mécanique, transmise au vilebrequin par l'intermédiaire de la bielle.

I.4.2.1.1. Matériaux et Conception

Les pistons sont couramment fabriqués à partir de fonte ductile ou d'alliages d'aluminium renforcés, selon le type de moteur, qui allient légèreté, bonne conductivité thermique et résistance aux températures élevées (jusqu'à 900 °C). Dans les moteurs à haute performance,

des alliages forgés sont parfois utilisés pour une meilleure résistance mécanique. Différentes parties du piston peuvent être réalisées à partir de matériaux distincts pour optimiser les performances et la durabilité.

I.4.2.1.2. Structure et Composants du Piston

Un piston se compose de plusieurs éléments distincts, chacun remplissant une fonction spécifique :

❖ Calotte (ou tête de piston)

Partie supérieure exposée directement aux gaz de combustion. Sa géométrie (plate, bombée ou creusée) dépend du mode d'injection et de la dynamique souhaitée dans la chambre de combustion. Dans les moteurs à injection directe, une chambre de combustion peut être intégrée directement à la calotte.

❖ Rainures de segments

Situées immédiatement sous la calotte, elles accueillent les segments, éléments critiques pour assurer l'étanchéité du cylindre.

❖ Segments de piston

En général, trois segments sont disposés dans les rainures :

- Le segment supérieur qui est un segment d'étanchéité (ou de compression) appelé « segment de feu » empêchent les fuites de gaz vers le carter moteur.
- Le segment intermédiaire qui est aussi un « segment d'étanchéité ».

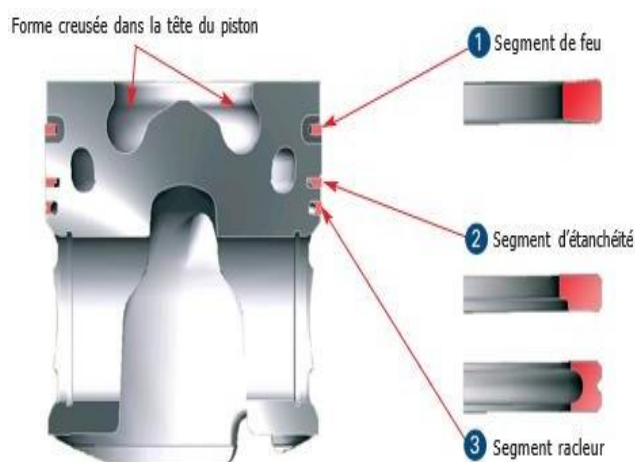


Figure 1.10 position Segments de piston [4]

- Le segment inférieur qui est un « segment racleur » régule la quantité d'huile lubrifiante sur la paroi du cylindre.

❖ **Axe de piston**

Élément transversal reliant le piston au pied de bielle, permettant la transmission de la force entre les deux composants lors du cycle moteur.

❖ **Jupe du piston**

Partie inférieure servant à guider le déplacement du piston dans le cylindre. Elle est également le siège des bossages qui accueillent l'axe de piston. La hauteur de la jupe varie en fonction de la vitesse de fonctionnement du moteur.



Figure 1.11 Description du piston

I.4.2.1.3. Fonctions Mécaniques et Thermiques

Le piston remplit plusieurs fonctions essentielles dans le fonctionnement du moteur :

- Compression du mélange air/carburant en phase ascendante.

Réception et transmission de l'énergie de combustion vers la bielle.

- Étanchéité de la chambre de combustion, grâce à la pression exercée sur les segments contre la paroi du cylindre.
- Dissipation thermique, par transfert de chaleur vers la chemise du cylindre et le circuit de lubrification.
- Un refroidissement complémentaire est souvent assuré par un jet d'huile dirigé contre la face interne de la calotte, soit via un alésage dans la bielle, soit à l'aide d'un gicleur placé à la base du cylindre.

I.4.2.2. Bielles

La bielle, généralement fabriquée en acier, joue un rôle essentiel dans les moteurs à combustion interne. Elle assure la liaison mécanique entre le piston et le vilebrequin, permettant ainsi de convertir le mouvement alternatif rectiligne du piston en un mouvement rotatif continu transmis au vilebrequin. Elle se compose de deux extrémités :

- Le pied de bielle, fixé au piston par un axe en acier traité,
- La tête de bielle, qui s'articule autour du maneton du vilebrequin.

Cette tête est divisée en deux parties : une partie fixe intégrée au corps de la bielle, et un chapeau de tête qui vient se boulonner à celle-ci pour former un assemblage rigide.

La distance entre l'axe du pied et celui de la tête, autrement dit la longueur de la bielle, correspond généralement à une valeur comprise entre 1,7 et 2,5 fois la course du piston. [4]

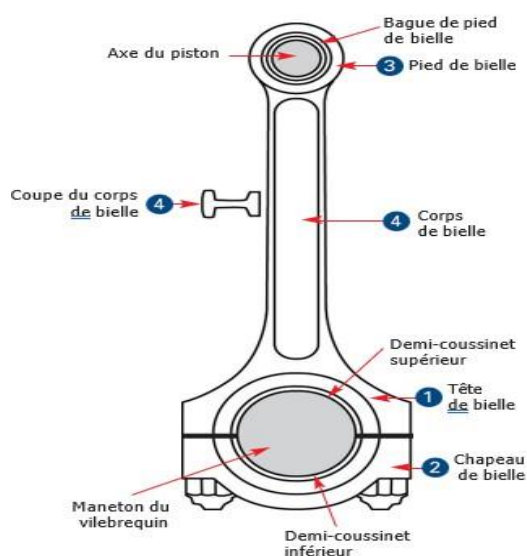


Figure 1.12 Bielle [4]

- Le corps de la bielle, situé entre ses deux extrémités, adopte une forme en H en coupe. Cette conception vise à offrir une bonne résistance aux contraintes de traction et de compression tout en minimisant les risques de flambage.

I.4.2.3. Vilebrequin

Le vilebrequin, généralement fabriqué par forgeage, subit ensuite un équilibrage précis, à la fois statique et dynamique. Il est constitué d'un ensemble de manivelles, chacune correspondant à un piston. Ces manivelles reçoivent les forces transmises par les bielles, convertissant ainsi le mouvement linéaire alternatif des pistons en un mouvement rotatif.

Le vilebrequin est maintenu en position par les paliers du bloc-cylindres, ainsi que par les chapeaux de paliers situés dans le carter inférieur. Ces éléments soutiennent le vilebrequin au niveau de ses tourillons, assurant son bon alignement.

Les bielles s'articulent autour des manetons du vilebrequin. En règle générale, chaque bielle a son propre maneton, sauf dans les moteurs en V où une paire de bielles peut partager le même maneton. Des coussinets sont insérés entre les surfaces en contact (manetons-bielles et tourillons-paliers) afin de réduire les frottements et l'usure.

Les flasques situés entre les manetons et les tourillons sont équipés de masses d'équilibrage, ajustées avec précision par meulage ou perçage, pour compenser les déséquilibres dynamiques.

Étant donné que le cycle du moteur n'est pas parfaitement régulier (seul un des quatre temps est moteur), un volant d'inertie est monté à l'arrière du vilebrequin. Ce composant stocke l'énergie pendant le temps moteur pour la restituer lors des trois temps restants, assurant ainsi un fonctionnement plus fluide. Ce volant porte également la couronne de démarrage et le système d'accouplement reliant le vilebrequin à l'inverseur ou au réducteur.

Enfin, à l'avant du vilebrequin se trouve le système d'entraînement des auxiliaires moteur, comprenant la distribution (avec l'arbre à cames), la pompe à huile, la pompe à carburant (gazole), la pompe à eau de mer, l'alternateur, et autres équipements nécessaires au fonctionnement du moteur.

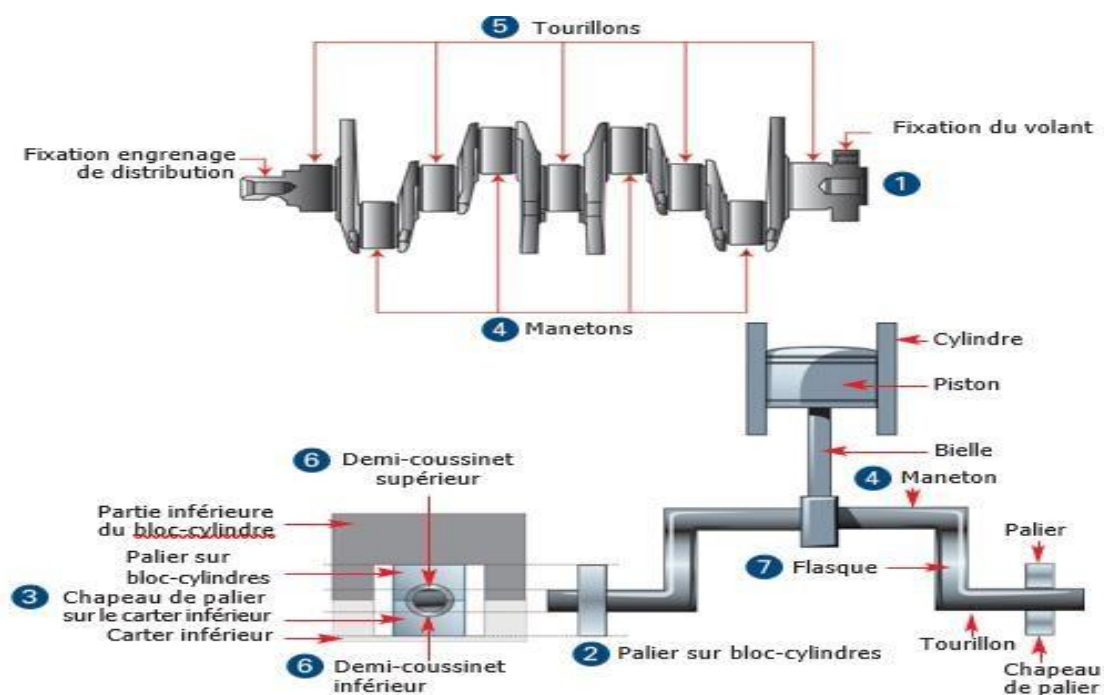


Figure 1.13 Les composants du vilebrequin [4]

I.4.2.4. Soupapes (admission/échappement)

Les soupapes jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement du moteur en contrôlant l'entrée et la sortie des gaz dans les cylindres. Les soupapes d'admission laissent entrer l'air ou le mélange air/carburant dans la chambre de combustion, tandis que celles d'échappement permettent d'évacuer les gaz brûlés après la combustion. Elles sont mises en mouvement par l'arbre à cames, qui agit par l'intermédiaire de culbuteurs ou de poussoirs. Ce mécanisme doit être parfaitement synchronisé avec le déplacement des pistons afin

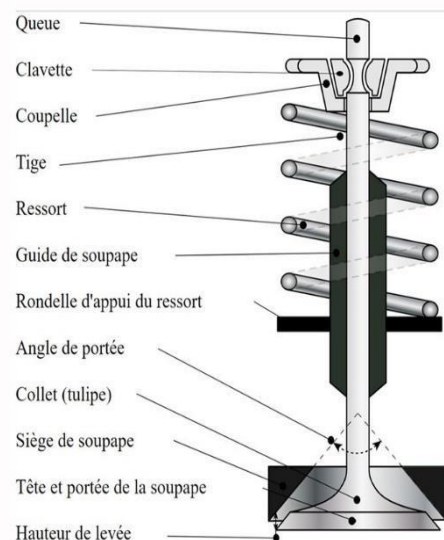


Figure 1.14 vue en coup d'une soupape [5]

d'assurer une combustion optimale et d'éviter tout risque de collision entre les composants internes du moteur.

I.4.2.5. Arbre à cames

L'arbre à cames est muni de cames, des éléments de forme spécifique qui transforment un mouvement rotatif en mouvement alternatif. Ce mécanisme est essentiel pour commander l'ouverture et la fermeture des soupapes d'admission et d'échappement. Il est conçu pour tourner à une vitesse équivalente à la moitié de celle du vilebrequin. Son entraînement est assuré par un système d'engrenages couplé au



Figure 1.15 model d'arbre à cames

vilebrequin, garantissant une synchronisation précise avec les cycles du moteur.

I.4.2.6. Culbuteurs et poussoirs

Ces pièces assurent la transmission du mouvement des cames jusqu'aux soupapes. Elles adaptent et amplifient le mouvement pour garantir un fonctionnement précis.

I.4.2.7. Volant moteur

Le volant moteur accumule de l'énergie pendant la rotation du vilebrequin et la restitue pour lisser le fonctionnement du moteur et faciliter le démarrage.



Figure 1.16 Volant moteur

I.4.3. Système d'injection

Ce système est responsable de l'alimentation du moteur en carburant, en le dosant et en le pulvérisant avec précision dans les chambres de combustion afin d'assurer une combustion efficace.

I.4.3.1. Pompe à injection

La pompe à injection a pour rôle de mettre le carburant sous haute pression et de le distribuer vers les injecteurs selon un ordre précis et au bon moment.

I.4.3.2. Rampe commune (Common Rail)

La rampe commune est un conduit qui stocke le carburant à haute pression, prêt à être envoyé vers chaque injecteur de manière indépendante. Elle permet une injection plus souple, précise et à pression constante.

I.4.3.3. Injecteurs

Les injecteurs pulvérisent le carburant dans les chambres de combustion sous forme de fines gouttelettes, facilitant ainsi un mélange optimal avec l'air pour une combustion efficace.

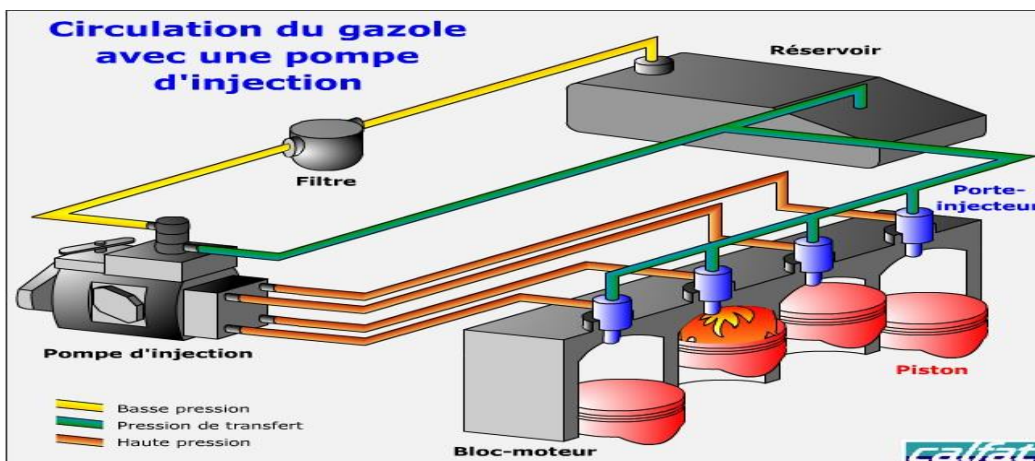


Figure 1.17 Circuit d'alimentation de gazole d'un système d'injection à pompe à rotative [6]

I.4.3.4. Bougies de préchauffage

Les bougies de préchauffage réchauffent l'air dans les cylindres avant le démarrage, surtout par temps froid, afin de faciliter l'auto-inflammation du carburant dans les moteurs diesel.

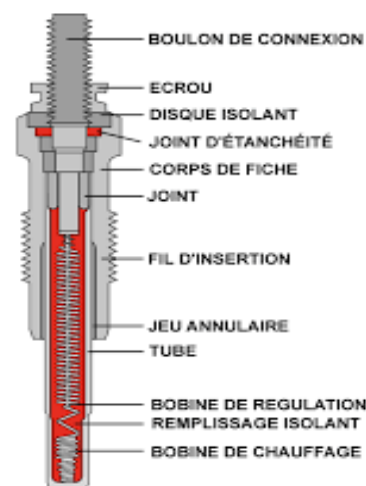


Figure 1.18 Bougies de préchauffage

I.4.4. Système d'admission et de suralimentation

Ce système est chargé d'acheminer l'air jusqu'au moteur tout en optimisant sa pression et sa qualité afin d'améliorer les performances de combustion.

I.4.4.1. Turbocompresseur (turbo)

Le turbocompresseur utilise l'énergie des gaz d'échappement pour compresser l'air aspiré par le moteur. Cette compression augmente la quantité d'air dans les cylindres, ce qui permet une combustion plus efficace et une puissance accrue.

I.4.4.2. Filtre à air

Le filtre à air a pour fonction d'éliminer les particules et impuretés contenues dans l'air ambiant avant qu'il ne soit aspiré par le moteur. Il contribue ainsi à protéger les composants internes et à garantir un mélange air-carburant optimal.

I.4.4.3. Intercooler

L'intercooler est un échangeur de chaleur qui refroidit l'air compressé par le turbo avant qu'il n'entre dans le moteur. En abaissant la température de l'air, il augmente sa densité, ce qui améliore la combustion et les performances générales du moteur.

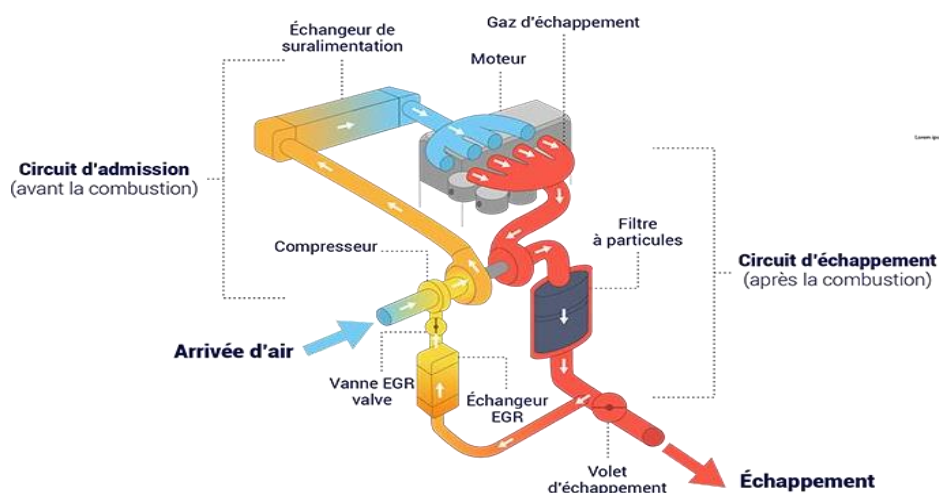


Figure 1.19 Circuit d'admission d'air d'un moteur diesel [7]

I.4.5. Système de refroidissement

Ce système a pour fonction de maintenir la température du moteur dans une plage optimale de fonctionnement, en évacuant la chaleur excessive générée lors de la combustion.

I.4.5.1. Radiateur

Le radiateur dissipe la chaleur du liquide de refroidissement en la transférant à l'air ambiant, grâce à un réseau de canaux métalliques parcourus par le fluide chaud.

I.4.5.2. Pompe à eau

La pompe à eau assure la circulation du liquide de refroidissement à travers l'ensemble du moteur et du radiateur, permettant une répartition efficace de la chaleur.

I.4.5.3. Thermostat

Le thermostat régule l'écoulement du liquide de refroidissement en fonction de la température du moteur. Il reste fermé à froid pour accélérer la montée en température, puis s'ouvre une fois la température optimale atteinte.

I.4.5.4. Ventilateur

Le ventilateur aide à refroidir le radiateur en augmentant le débit d'air, notamment lorsque le véhicule roule lentement ou est à l'arrêt, garantissant ainsi un bon échange thermique.

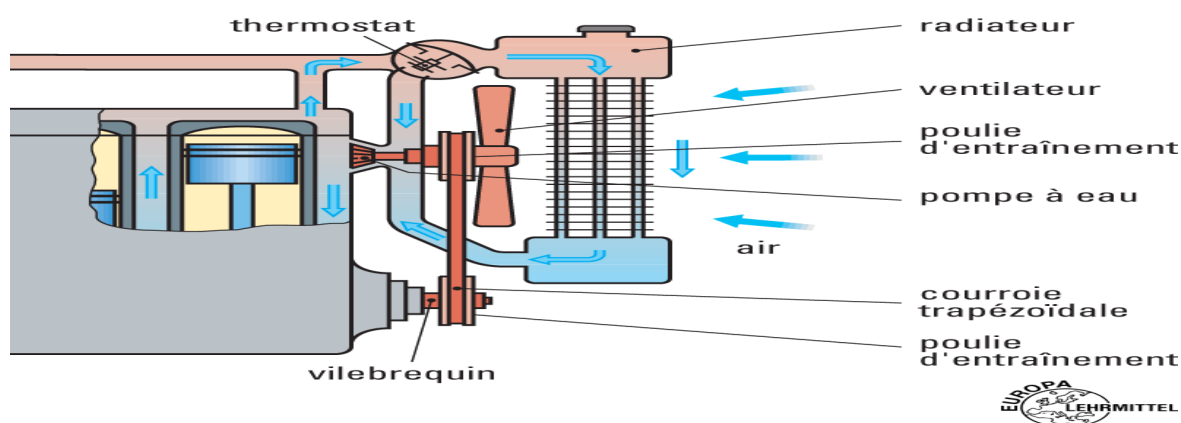


Figure 1.20 Schéma de principe du circuit de refroidissement moteur [8]

I.4.6. Système de lubrification

Ce système assure la distribution de l'huile à l'intérieur du moteur afin de réduire les frottements entre les pièces mobiles, limiter l'usure et contribuer au refroidissement.

I.4.6.1. Pompe à huile

La pompe à huile est chargée de mettre l'huile sous pression et de l'envoyer dans les différents circuits de lubrification du moteur.

I.4.6.2. Filtre à huile

Ce composant retient les impuretés et particules présentes dans l'huile, préservant ainsi la propreté du circuit et protégeant les éléments mécaniques.

I.4.6.3. Carter d'huile

Le carter d'huile sert de réservoir au lubrifiant lorsqu'il n'est pas en circulation. Il est généralement placé sous le moteur et permet également de dissiper une partie de la chaleur.

I.4.6.4. Gicleurs d'huile

Les gicleurs sont de petits injecteurs qui projettent de l'huile sur des zones spécifiques du moteur, comme la base des pistons, pour assurer un refroidissement localisé et une lubrification ciblée.

I.4.7. Système de commande et de gestion

Ce système pilote le fonctionnement du moteur en temps réel. Il recueille des informations provenant de divers capteurs et envoie des instructions aux actionneurs pour optimiser les performances, la consommation et les émissions.

I.4.7.1. Calculateur moteur (ECU)

Le calculateur, ou unité de commande électronique (ECU), est le cerveau du moteur. Il analyse en continu les données transmises par les capteurs et ajuste les paramètres tels que l'injection, l'allumage ou la suralimentation en fonction des besoins.

I.4.7.2. Capteurs

Les capteurs surveillent différents paramètres du moteur (température, pression, régime, débit d'air, etc.) et transmettent ces informations au calculateur pour qu'il puisse prendre les décisions appropriées.

I.4.7.3. Actionneurs

Les actionneurs sont les éléments exécutifs. Ils reçoivent les ordres du calculateur pour modifier physiquement le fonctionnement du moteur, par exemple en ajustant l'ouverture des soupapes, la quantité de carburant injecté ou la position du papillon des gaz.

I.5. Capteurs du moteur

Les moteurs diesel modernes intègrent une multitude de capteurs destinés à optimiser leur fonctionnement, améliorer leur rendement énergétique et réduire les émissions polluantes. Ces capteurs jouent un rôle central dans le pilotage électronique du moteur, en fournissant au calculateur moteur (ECU – Engine Control Unit) les informations nécessaires au contrôle en temps réel des différents paramètres de combustion, de température, de pression et de débit.

I.5.1. Type de Capteurs du moteur

I.5.1.1. Capteurs de position et de vitesse

Dans un moteur diesel, les capteurs de position et de vitesse sont essentiels pour déterminer la position angulaire des composants clés (vilebrequin, arbre à cames, pédale, roues) et leur vitesse de rotation ou de déplacement. Ces capteurs fournissent à l'ECU des données en temps réel qui garantissent une injection de carburant précise, une combustion optimisée, et une performance efficace.

I.5.1.1.1. Principe de fonctionnement

Les capteurs de position et de vitesse reposent sur des phénomènes physiques précis. Un oscillateur intégré génère un signal oscillatoire haute fréquence (signal porteur) envoyé à une bobine à l'extrémité du capteur, créant un champ magnétique. Quand un arbre mécanique s'en approche, il absorbe une partie de l'énergie, réduisant l'amplitude du signal (modulation). Plus l'arbre est proche, plus l'amplitude baisse, traduisant le déplacement relatif. Le signal modulé est ensuite démodulé pour extraire la mesure utile, comme le déplacement crête-à-crête en micromètres (μm , 10^{-6} m). Pour les capteurs de vitesse, l'induction électromagnétique est utilisée : une bobine suspendue et un aimant permanent fixé au boîtier génèrent une tension quand l'aimant bouge avec les vibrations, tandis que la bobine reste fixe. La tension produite, proportionnelle à la vitesse vibratoire (selon la loi de Faraday), est transmise au système de mesure pour analyse. [9]

I.5.1.1.2. Type capteurs de position et de vitesse

- ❖ **Capteur magnétique inductif** : Génère un signal AC lorsqu'une dent métallique passe devant une bobine, utilisé pour le vilebrequin (CKP) et l'arbre à cames (CMP).
- ❖ **Capteur à effet Hall** : Détecte la variation du champ magnétique via un semi-conducteur, utilisé pour la position de la pédale d'accélérateur (APP) et certains capteurs de vitesse.
- ❖ **Capteur optique** : Détecte l'interruption d'un faisceau lumineux (LED + photodiode), plus courant en électronique fine que sur moteurs diesel.
- ❖ **Capteur magnétorésistif** : Mesure la variation de résistance en fonction du champ magnétique, utilisé dans des applications nécessitant une haute résolution.

- ❖ **Capteur à réluctance variable** : Mesure la variation du flux magnétique entre le capteur et la cible métallique, utilisé dans les anciennes générations de capteurs CKP et CMP.

I.5.1.2. Capteurs de température

Les capteurs de température sont indispensables pour assurer la régulation thermique d'un moteur diesel, car ils surveillent des éléments critiques comme les gaz d'échappement, le liquide de refroidissement et l'huile moteur. Grâce à leurs mesures, le système de gestion électronique peut prévenir la surchauffe et optimiser les performances globales du moteur.

I.5.1.2.1. Principe de fonctionnement

Ces capteurs détectent les variations d'une propriété physique (résistance électrique, tension ou conductivité) qui change en fonction de la température. Le signal produit est ensuite transformé en une valeur numérique, que l'unité de contrôle électronique (ECU) utilise pour ajuster les réglages moteurs.

- Dans une thermistance, la résistance varie selon la température : elle diminue ou augmente en fonction de l'échauffement.
- Avec un thermocouple, deux métaux différents génèrent une petite tension proportionnelle à l'écart de température entre leurs extrémités.
- Dans un capteur à semi-conducteur, la conductivité du matériau change sous l'effet de la chaleur, et cette variation est traduite en mesure de température. [10]

I.5.1.2.2. Type capteurs de température

- ❖ **Capteur à thermistance** : Détecte les changements de résistance pour mesurer la température, principalement utilisé pour contrôler le liquide de refroidissement et l'huile moteur.
- ❖ **Capteur à thermocouple** : Produit une tension liée à la différence de température entre deux jonctions, idéal pour surveiller les gaz d'échappement et les zones de combustion.
- ❖ **Capteur à semi-conducteur** : Analyse les variations de conductivité électrique dues à la chaleur, adapté pour mesurer la température de l'air d'admission et celle des composants électroniques.

I.5.1.3. Capteurs de pression

Dans un moteur diesel, les capteurs de pression sont essentiels pour contrôler les pressions dans les différents systèmes, comme le circuit d'huile, le carburant ou l'air d'admission. Ils permettent au calculateur électronique (ECU) de maintenir un fonctionnement efficace, d'ajuster les paramètres moteurs et de détecter les défaillances éventuelles.

I.5.1.3.1. Principe de fonctionnement

Les capteurs de pression convertissent la pression exercée sur une membrane ou un élément sensible en signal électrique transmis à l'ECU : les capteurs piézorésistifs exploitent la variation de résistance d'un matériau sous contrainte, les capteurs capacitifs détectent les changements de capacité entre deux plaques selon la déformation, tandis que les capteurs piézoélectriques produisent une charge électrique lorsqu'un cristal est soumis à une force mécanique. [11]

I.5.1.3.2. Type capteurs de pression

- ❖ **Capteur piézorésistif** : Utilise le changement de résistance lié à la pression, couramment utilisé pour mesurer la pression d'huile ou de carburant.
- ❖ **Capteur capacitif** : S'appuie sur la variation de capacité électrique, adapté pour surveiller la pression dans le système d'admission d'air.
- ❖ **Capteur piézoélectrique** : Convertit des forces mécaniques en signal électrique, idéal pour suivre les variations rapides de pression, notamment dans les chambres de combustion.

I.5.1.4. Capteurs de flux et de composition des gaz

Ces capteurs jouent un rôle clé dans les moteurs diesel pour mesurer la quantité d'air, de carburant ou de gaz d'échappement qui circule, ainsi que pour analyser la composition des gaz afin d'optimiser la combustion et de réduire les émissions polluantes.

I.5.1.4.1. Principe de fonctionnement

Les capteurs de débit mesurent la quantité de fluide (air, carburant, gaz) passant à travers une section donnée en utilisant des principes comme l'effet thermique, la variation de pression ou la détection par ultrasons, tandis que les capteurs de composition des gaz analysent les concentrations de composants spécifiques (comme l'oxygène, le NO_x ou les particules) à l'aide de sondes électrochimiques, infrarouges ou optiques, dont les signaux sont traduits par l'ECU pour ajuster le fonctionnement moteur.

I.5.1.4.2. Type capteurs de flux et de composition des gaz

- ❖ **Capteur de débit massique (MAF)** : Mesure le débit d'air entrant dans le moteur, essentiel pour ajuster le mélange air/carburant.
- ❖ **Capteur de débit volumétrique** : Évalue le volume d'air ou de gaz qui passe, utilisé notamment pour le contrôle du système EGR (recyclage des gaz d'échappement).
- ❖ **Sonde lambda (capteur O₂)** : Analyse le taux d'oxygène dans les gaz d'échappement pour réguler la combustion.
- ❖ **Capteur NO_x** : Mesure la concentration d'oxydes d'azote dans les gaz d'échappement pour le contrôle des émissions polluantes.
- ❖ **Capteur de particules (PM)** : Détecte la quantité de particules fines émises, contribuant à la gestion des filtres à particules.

I.5.1.5. Capteurs de vibration

Dans les moteurs diesel, ces capteurs sont essentiels pour surveiller l'état de santé des composants mécaniques (paliers, arbres, pistons) en détectant précocement les vibrations anormales, chocs ou déséquilibres pouvant indiquer une usure, un défaut ou un risque de panne.[12]






I.5.1.5.1. Principe de fonctionnement





Ces capteurs mesurent les mouvements vibratoires ou les chocs grâce à des éléments sensibles comme des piézoélectriques, des accéléromètres ou des jauges extensométriques ; les signaux générés (variation de charge électrique, changement de tension ou déplacement mesuré) sont analysés par l'ECU pour identifier tout comportement anormal et déclencher une maintenance préventive si nécessaire.[12]

I.5.1.5.2. Type capteurs de vibration

- ❖ **Accéléromètre piézoélectrique** : Capte les vibrations mécaniques en transformant les déformations en charge électrique, utilisé pour surveiller les paliers et roulements.
- ❖ **Capteur à jauge extensométrique** : Mesure les petites déformations mécaniques associées aux contraintes, employé pour détecter les fissures ou défauts structuraux.
- ❖ **Capteur acoustique** : Détecte les sons ou ultrasons générés par les fuites, cavitations ou défauts internes, utile pour la surveillance avancée des moteurs.

Tableau 1.1 Tableau récapitulatif des capteurs moteur

No	Capteur	Fonction clé	Photo
1	Vilebrequin (CKP)	Synchronisation du moteur	
2	Arbre à cames (CMP)	Reconnaissance du cycle moteur	
3	Pression rampe commune	Ajustement de l'injection	
4	Température liquide refroidissement	Gestion thermique	
5	Température air d'admission	Calcul densité air	

6	Sonde lambda	Réduction des émissions	
7	Pression gaz d'échappement	Contrôle EGR	
8	Capteur de cliquetis	Protection contre les anomalies	
9	MAP / MAF	Optimisation mélange air/carburant	

I.6. Principes des systèmes antipollution diesel

Le développement des systèmes antipollution résulte d'une nécessité sanitaire, environnementale et réglementaire. L'usage intensif des moteurs diesel, notamment dans les transports routiers, a entraîné des émissions massives de polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote (NO_x), les particules fines (PM), le monoxyde de carbone (CO) et les hydrocarbures imbrûlés (HC). Ces substances sont associées à des maladies respiratoires,

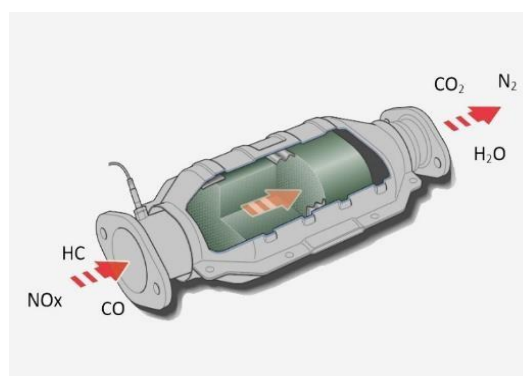


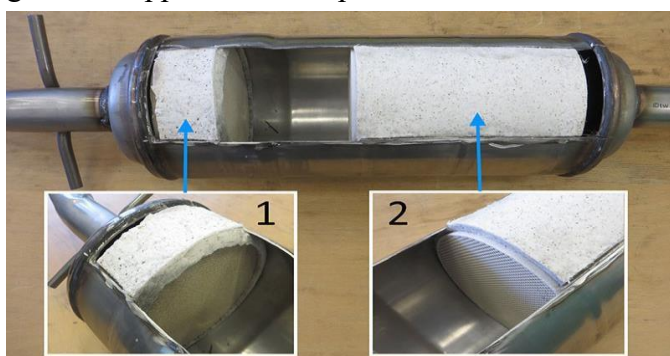
Figure 1.21 Transformation chimique des polluants dans les gaz d'échappement [13]

cardiovasculaires, des pics de pollution urbaine et au changement climatique. Pour contrer ces effets, les autorités nationales et européennes ont imposé des normes d'émissions strictes (normes Euro) et incité à l'intégration de technologies de dépollution avancées dans les véhicules. Ces systèmes visent à détecter, contrôler et réduire les émissions polluantes,

assurant ainsi la conformité aux normes, la protection de la santé publique, et le passage au contrôle technique périodique. Pour atténuer ces émissions, plusieurs dispositifs technologiques ont été développés : [13]

❖ **EGR (Exhaust Gas Recirculation)** : Ce système réintroduit une partie des gaz d'échappement dans la chambre de combustion, réduisant ainsi la température de combustion et, par conséquent, la formation de NO_x .

❖ **FAP (Filtre à Particules)** : Le FAP capture les particules fines présentes dans les gaz d'échappement. Ces particules sont ensuite brûlées lors de phases de régénération, réduisant ainsi les émissions de PM.

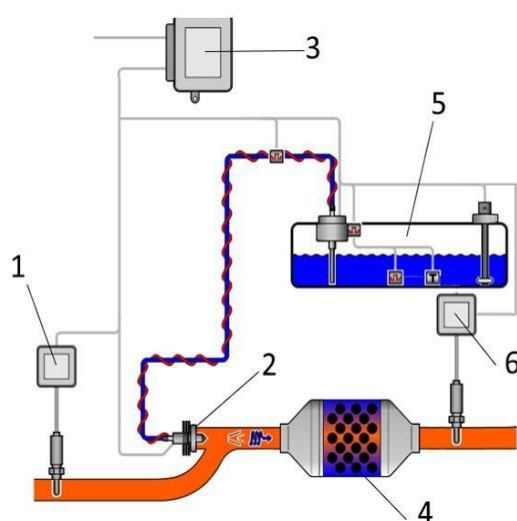


(1) catalyseur

(2) filtre à particules montés en un seul boîtier

Figure 1.22 Filtre à particules combiné [13]

❖ **SCR (Selective Catalytic Reduction)** : Ce système injecte une solution d'urée (AdBlue) dans les gaz d'échappement. Sous l'effet d'un catalyseur, les NO_x sont convertis en azote (N_2) et en vapeur d'eau (H_2O), substances inoffensives pour l'environnement.



(1) Capteur NO_x en amont du catalyseur.

(2) Valve d'injection d'additif uréique

(3) Calculateur

(4) Catalyseur de NO_x

(5) Réservoir d'urée

(6) Capteur NO_x en aval du catalyseur

Figure 1.23 Catalyseur SCR [13]

I.6.1. Évolution des normes Euro pour Poids Lourds

Les normes Euro ont évolué pour réduire progressivement les émissions, poussant les constructeurs à adopter des systèmes antipollution complexes :

Tableau 1.2 Normes euros d'émissions de polluants pour les véhicules lourds [14]

Norme Euro	Date d'entrée en vigueur	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	PM (g/kWh)
Euro 0	01/10/1990	11.2	14.4	2.4	–
Euro I	01/10/1993	4.5	8.0	1.1	0.36
Euro II	01/10/1996	4.0	7.0	1.1	0.15
Euro III	01/10/2001	2.1	5.0	0.66	0.10
Euro IV	01/10/2006	1.5	3.5	0.46	0.02
Euro V	01/10/2009	1.5	2.0	0.46	0.02
Euro VI	01/01/2014	1.0	0.4	0.13	0.01

I.6.2. Efficacité réelle et enjeux industriels des systèmes

Les systèmes antipollution modernes des moteurs diesel poids lourds, tels que la réduction catalytique sélective (SCR), les catalyseurs d'oxydation diesel (DOC) et les filtres à particules (DPF), jouent un rôle central dans la réduction des émissions polluantes. Toutefois, leur efficacité réelle varie fortement selon les conditions de conduite. Une étude menée en Chine sur plus de 800 véhicules diesel lourds a montré que les émissions de NO_x étaient significativement plus élevées en environnement urbain, principalement en raison des températures d'échappement inférieures à 180 °C, qui réduisent l'efficacité du SCR. Par ailleurs, la topographie influence également les émissions : dans des environnements montagneux, les routes en pente entraînent une augmentation de la charge moteur, ce qui génère davantage de NO_x, de CO et de particules, comme démontré dans des tests routiers réalisés à Chongqing, en Chine. Enfin, pour surmonter les limites des approches classiques basées sur des calibrations fixes (Euro VI), un modèle prédictif basé sur la méthode de

calibration modélisée (MBC) a été développé. Ce modèle permet d'anticiper la proportion de NO₂ en sortie de catalyseur DOC dans un système SCR à deux étages, en intégrant le débit massique des gaz, la température et la concentration de NO_x, améliorant ainsi la réactivité du système en conditions transitoires. Ces avancées technologiques, bien qu'efficaces sur le plan environnemental, posent également des défis industriels importants : elles nécessitent des investissements considérables en R&D, une refonte des architectures moteur, une augmentation des coûts de production, et une adaptation des chaînes d'assemblage. Néanmoins, elles stimulent l'innovation dans le secteur automobile lourd, notamment dans les domaines de l'électronique embarquée, des capteurs et des logiciels de gestion moteur, tout en permettant aux fabricants de se conformer aux réglementations environnementales de plus en plus strictes et de renforcer leur compétitivité sur le marché international. [15] [16] [17]

I.7.Conclusion

En résumé, le moteur diesel s'est imposé comme un pilier incontournable de l'ingénierie mécanique, combinant efficacité énergétique, robustesse et capacité d'adaptation aux évolutions technologiques. Depuis son invention par Rudolf Diesel, il n'a cessé d'évoluer, intégrant des innovations majeures comme l'injection directe et les systèmes électroniques de gestion. Comprendre ses composants clés, notamment les pistons et les capteurs, permet de mieux saisir les raisons de sa performance et de sa fiabilité. Ce chapitre a ainsi permis de mettre en lumière non seulement le fonctionnement général du moteur diesel, mais aussi leurs rôles respectifs dans l'équilibre entre performance, durabilité et respect des normes environnementales.



Chapitre II
Étude
expérimentale

II.1. Introduction

Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur le moteur Volvo D13, contrairement à d'autres marques telles que Cummins ou Perkins, en raison de la disponibilité d'outils de diagnostic d'origine (comme le logiciel Volvo Tech Tool), de l'accès facilité à ce type de moteur dans notre environnement de travail, ainsi que de certains résultats préalables obtenus qui renforcent la pertinence de cette sélection.

Dans un contexte industriel où la maintenance préventive et la gestion électronique sont devenues des priorités stratégiques, l'utilisation d'outils de diagnostic avancés est indispensable. À cet égard, le logiciel (VTT), développé par le constructeur, permet une interaction directe avec les systèmes électroniques embarqués du moteur, facilitant ainsi la détection, l'analyse et la résolution des défauts internes.

L'objectif de ce chapitre est double : d'une part, présenter les principales caractéristiques techniques du moteur D13 ; d'autre part, expérimenter l'utilisation du Tech Tool en mode simulation pour détecter des anomalies internes, en mettant particulièrement l'accent sur les défauts potentiels au niveau des pistons. Cette approche vise à démontrer l'efficacité du diagnostic électronique dans un cadre pédagogique et industriel, tout en illustrant l'importance de l'intégration des technologies numériques dans les pratiques de maintenance modernes.

II.2. Présentation du moteur Volvo D13

Le moteur Volvo D13 est un moteur diesel à 4 temps, conçu pour les applications exigeantes du transport routier longue distance ainsi que pour certains environnements industriels. Développé par le groupe Volvo, il est principalement utilisé dans les camions lourds de la marque Volvo Trucks. Réputé pour sa fiabilité, ses performances élevées et sa faible consommation de carburant, le D13 répond également aux normes environnementales strictes, ce qui en fait un moteur de référence dans le secteur du transport.



Figure 2.1 moteur Volvo D13 [18]

II.3. Caractéristiques générales

Le moteur Volvo D13 est un groupe motopropulseur diesel à haut rendement conçu pour les applications lourdes. Il se distingue par une architecture 6 cylindres en ligne, offrant un bon équilibre dynamique et une robustesse mécanique reconnue. Avec une cylindrée de 12,8 litres, ce moteur à cycle Diesel 4 temps combine des performances puissantes à un excellent rendement énergétique, notamment grâce à un rapport de compression élevé (17:1 - 18:1) et à une gestion optimisée de la combustion. Sa conception comprend une culasse monobloc rigide, un arbre à cames en tête (SOHC) et quatre soupapes par cylindre, garantissant une meilleure admission et évacuation des gaz, ce qui améliore la réactivité du moteur tout en réduisant les émissions. Le poids à sec de 1180 kg reflète une structure renforcée, adaptée à des sollicitations mécaniques importantes. Dans l'ensemble, le D13 incarne une synthèse équilibrée entre durabilité, puissance et conformité environnementale. Les tableaux suivants résumant de manière structurée les principales caractéristiques mécaniques et de fonctionnement du moteur Volvo D13.[18]

II.3.1. Configuration Générale

Le tableau suivant présente la configuration de base du moteur Volvo D13, incluant sa cylindrée, son architecture interne et ses dimensions principales.

Tableau 2.1 Détails techniques et caractéristiques principales

Élément	Détail
Type de moteur	Diesel 4 temps, 6 cylindres en ligne
Configuration	En ligne (Inline Six)
Cylindrée	12 777 cm ³ (12,8 L)
Alésage x Course	131 mm × 158 mm
Rapport de compression	17:1 – 18 :1
Arbre à cames	Arbre en tête (SOHC), 4 soupapes / cyl.
Culasse	Monobloc rigide
Poids à sec	1180 kg (2605 lb)

II.3.2. Performances Moteur

Ce tableau résume la puissance, le couple, le régime moteur et la capacité de freinage, mettant en avant la force et l'endurance du moteur.

Tableau 2.2 Puissance, couple et régimes de fonctionnement

Paramètre	Valeur
Plage de puissance	420 à 540 ch (selon les versions)
Couple maximal	2100 à 2600 Nm (vers 1000–1400 tr/min)
Régime nominal	Jusqu'à 2200 tr/min
Puissance de frein à 1500 tr/min	350 ch

II.3.3. Systèmes d’Alimentation et Turbo

Le tableau suivant décrit les technologies de suralimentation et d’injection qui optimisent la combustion et améliorent le rendement énergétique.

Tableau 2.3 Technologies d’optimisation de l’air et du carburant

Système	Détail
Suralimentation	Turbo à géométrie variable (VGT)
Injection	Injection haute pression
Pression maximale d’injection	2500 bars (35 000 psis)
Gestion électronique	ECU MID 128, mise à jour possible

II.3.4. Conformité Environnementale & Post-traitement

Ce tableau met en évidence les dispositifs utilisés pour respecter les différentes normes Euro en matière d’émissions polluantes.

Tableau 2.4 Technologies de dépollution par norme Euro

Normes Euro	Technologie associée
Euro IV	SCR (Selective Catalytic Reduction) avec AdBlue
Euro V	SCR optimisé + meilleur contrôle des NOx
Euro VI	EGR refroidi, DPF, SCR + capteur NOx en boucle fermée

II.3.5. Lubrification et Entretien

Ce tableau détaille la capacité d'huile, les types de filtres et les intervalles de vidange, illustrant la facilité d'entretien du moteur.

Tableau 2.5 Caractéristiques du système de lubrification et maintenance

Élément	Détail
Capacité totale d'huile	36 litres (38 quarts)
Filtres à huile	Deux filtres principaux + bypass
Intervalle de vidange (service normal)	88 500 km (55 000 miles)
Spécification huile	Volvo VDS-4.5, SAE 10W-30
Système de drainage rapide	Optionnel (FLOCS)

II.3.6. Équipements Complémentaires

Ce tableau présente les accessoires et dispositifs additionnels, soulignant les équipements qui renforcent la sécurité et augmentent la polyvalence du système.

Tableau 2.6 Accessoires et dispositifs additionnels pour la sécurité et polyvalence

Équipement	Détail
Compresseur d'air	2 cylindres, 31,8 CFM
Retarder	Frein moteur Volvo (VEB)
Arbre PTO	Oui (prise de force arrière)
Préchauffage électrique	En option

II.4. Volvo Tech Tool

II.4.1. Définition

Le (VTT), également connu sous le nom de Premium Tech Tool (PTT), est un logiciel de diagnostic développé par le groupe Volvo pour assurer la communication entre les systèmes électroniques du véhicule (moteur, boîte de vitesses, freins, etc.) et un ordinateur de maintenance. Il permet d'identifier, surveiller, tester et reprogrammer les modules électroniques embarqués, facilitant ainsi le diagnostic des pannes, la maintenance préventive, et la mise à jour des paramètres techniques du véhicule.



Figure 2.2 logo Volvo tech Tool

II.4.2. Rôle

Le VTT est un élément clé dans la maintenance moderne des véhicules du groupe Volvo. Il offre aux techniciens une interface directe avec les différents calculateurs électroniques installés à bord, leur permettant d'agir avec précision et efficacité.

Avec cet outil, il est possible de :

- Diagnostiquer finement les anomalies détectées par les systèmes embarqués.
- Lire et effacer les codes de défaut (DTC) générés par les modules électroniques.
- Consulter en temps réel les données issues des capteurs (température, pression, régime, etc.).
- Lancer des tests actifs sur des composants critiques comme les injecteurs, le turbocompresseur ou la vanne EGR.
- Programmer ou reprogrammer les calculateurs (ECU) ou mettre à jour leurs logiciels.
- Ajuster certains paramètres techniques en fonction des besoins spécifiques du véhicule ou de son exploitation.

Le VTT peut établir une connexion avec différents calculateurs installés sur le véhicule, parmi lesquels :

- Le calculateur moteur (ECU), identifié par le MID 128.
- Le calculateur de la boîte de vitesses, référencé MID 130.
- Le système électronique de freinage (EBS), avec les MID 136 ou 144.
- Le tableau de bord, identifié par le MID 140.
- Les calculateurs de régulation de suspension ou du système ABS, correspondant à d'autres MID spécifiques.[19]

II.4.3. Structure et fonctionnalités de l'interface VTT

L'interface de VTT est organisée de manière logique et intuitive, permettant aux techniciens d'accéder rapidement aux différentes fonctions de diagnostic et de maintenance. Voici les principales fenêtres que l'utilisateur rencontre lors de l'utilisation du logiciel

II.4.3.1. Produit

Cette fenêtre regroupe les informations générales sur le véhicule connecté :

- Numéro de série (VIN), modèle, configuration moteur, version logicielle des calculateurs.
- Elle permet de confirmer l'identification du véhicule et d'afficher les caractéristiques techniques utiles pour les interventions.[19]

II.4.3.2. Historique produit

Cette section affiche un journal complet des opérations effectuées via Volvo Tech Tool :

- Diagnostic précédents, codes défauts enregistrés, tests réalisés, modifications de paramètres.
- Elle permet un suivi détaillé des interventions pour une meilleure traçabilité.
- Utile pour détecter des pannes récurrentes ou observer l'évolution de certains composants.[19]

II.4.3.3. Diagnostiquer

Dans cet onglet, l'utilisateur peut :

- Lire les codes défauts (DTC) des différents calculateurs (ECU moteur, boîte, freinage, etc.).
- Accéder à une description claire de la panne, au contexte d'apparition, et aux recommandations de réparation.
- Effacer les DTC après réparation et vérifier si le problème est résolu.
- Consulter des données en temps réel issues des capteurs du véhicule.

II.4.3.4. Tester

Cette partie permet d'effectuer des tests fonctionnels ou tests d'actionneurs :

- Vérification du bon fonctionnement de composants : injecteurs, capteurs, vanne EGR, turbo à géométrie variable, etc.
- Le logiciel guide l'utilisateur étape par étape, avec des instructions claires.
- Ces tests permettent d'isoler une panne sans démontage mécanique.

II.4.3.5. Calibrer

Dans cet espace, l'utilisateur peut procéder au calibrage ou à la réinitialisation de certains systèmes :

- Calibrage de la position des papillons, du système SCR, du freinage, ou des capteurs.
- Utilisé après un remplacement de pièce, une réparation ou une mise à jour logicielle.

II.4.3.6. Programmer

Cette section est réservée à la programmation ou la reprogrammation des calculateurs électroniques :

- Mise à jour logicielle des ECU.
- Modification des paramètres techniques du moteur ou d'autres systèmes (ex. : seuils de couple, stratégie antipollution, etc.).
- Requiert souvent une connexion internet sécurisée et un niveau d'autorisation élevé (atelier agréé ou concessionnaire).[19]

II.4.4. Équipements nécessaires

Pour effectuer un diagnostic complet, des tests ou des reprogrammations sur les véhicules équipés du moteur Volvo D13, l'utilisation du logiciel VTT nécessite un ensemble d'équipements compatibles et fiables. Ces éléments garantissent une communication stable avec les calculateurs électroniques (ECU) et permettent des interventions sécurisées. Voici les principaux équipements requis.

II.4.4.1. Ordinateur portable

L'ordinateur sert de base pour utiliser Volvo Tech Tool. Il doit avoir un processeur Intel Core i5, 8 Go de RAM, 100 Go d'espace libre et Windows 10/11 64 bits. Un port USB ou USB-C est nécessaire pour connecter l'interface VOCOM. Il permet d'exécuter les diagnostics, lire les codes défauts et reprogrammer les calculateurs.



Figure 2.3 PC Portable

II.4.4.2. Interface de communication

La VOCOM (VOCOM I, VOCOM II) relie l'ordinateur aux calculateurs du véhicule via différents protocoles (CAN, K-line, J1587). Elle se connecte en USB ou Bluetooth. La version VOCOM II est recommandée pour sa stabilité. Elle convertit les données pour que le logiciel puisse les interpréter.



Figure 2.4 Outil de Diagnostic vocom II

II.4.4.3. Câbles de connexion diagnostic

Ces câbles connectent l'interface VOCOM au port diagnostic du véhicule. Ils varient selon le type de véhicule (OBD-II, 9 broches, Volvo CE). Des câbles de qualité sont indispensables pour assurer une bonne communication et éviter les erreurs.



Figure 2.5 Câble de diagnostic OBD2

II.4.4.4. Licence Volvo Tech Tool

La licence permet d'accéder légalement au logiciel. La version standard offre les diagnostics de base, tandis que la licence avancée donne accès aux calibrages et reprogrammations. La licence se gère via un compte Volvo ID avec une validation internet.

II.5. Méthodologie expérimentale

L'objectif de cette expérimentation est de valider le fonctionnement et la réponse des différents sous-systèmes du moteur **Volvo D13** via les tests en mode simulation réalisés avec l'outil VTT. Ces tests visent à :

- Évaluer les performances des principaux composants du moteur,
- Vérifier la réactivité des actionneurs (ventilateur, injecteurs, électrovannes, etc.),
- Analyser la cohérence des données obtenues des capteurs et leur impact sur les performances du moteur,
- Détecter d'éventuelles anomalies de fonctionnement liées à des dysfonctionnements internes ou des dérives dans les systèmes de gestion.

II.5.1. Protocole expérimental

L'expérimentation a été conduite sur un moteur Volvo D13 installé dans un groupe électrogène Volvo Penta, avec les paramètres de fonctionnement suivants :

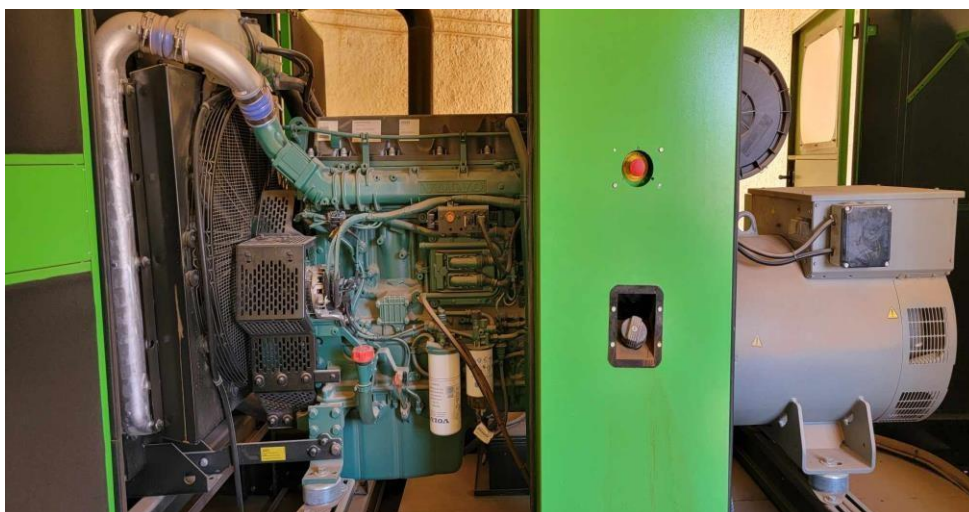


Figure 2.6 groupe électrogène Volvo Penta 440 KVA

- ❖ **Moteur en fonctionnement** : température moteur stabilisée à 85 °C.
- ❖ **Mode de test** : utilisation du mode simulation de VTT, avec activation des différents tests fonctionnels sur chaque sous-système.
- ❖ **Système de surveillance** : connexion avec VTT via le VOCOM II, et collecte des données en temps réel pendant l'exécution des tests.

II.5.2. Tests effectués et procédures de contrôle

Les tests en mode simulation ont couvert plusieurs sous-systèmes du moteur. Les descriptions de chaque test sont détaillées ci-dessous :



The screenshot shows the 'Tech Tool' software interface. At the top, there are navigation tabs: 'Tech Tool', 'Liens', and 'Aide'. Below these are main menu items: 'Produit', 'Historique produit', 'Diagnosticuer', 'Test', 'Calibrer', and 'Programmer'. The 'Diagnosticuer' tab is selected. The main content area is titled 'Indiquer les données de base du moteur' and contains three input fields:

- Type de moteur**: DXI13, 13 L. ENGINE
- Contrôle des émissions**: EM-EC01 EURO3
- Boîte de vitesses**: TRANSMISSION AL205 (with a dropdown arrow)

Figure 2.7 Fenêtre d'indiquer les données de base

II.5.2.1 Système d'alimentation en carburant

II.5.2.1.1. Contrôle de pression d'alimentation de carburant

Ce test permet de mesurer la pression du carburant à l'entrée du rail d'injection. Il est essentiel pour vérifier le bon fonctionnement de la pompe haute pression. Afin de s'assurer que la pression d'alimentation est conforme aux caractéristiques, le test doit être effectué à la fois au régime de ralenti et à 1800 tr/min.

Dans notre cas, le test a été réalisé en conditions réelles sur un moteur Volvo D13, et a donné les résultats présentés dans le tableau suivant.

Tableau 2.7 Comparaison technique de test de pression d'alimentation de carburant

Élément	Mode Simulation	Mode Réel
Pression (kPa)	88	431
Régime (tr/min)	99	901
Débit (l/h)	68.46	6.98
Charge moteur (%)	15.5	21.0
Courbes	Instables / irréalistes	Stables / réalistes

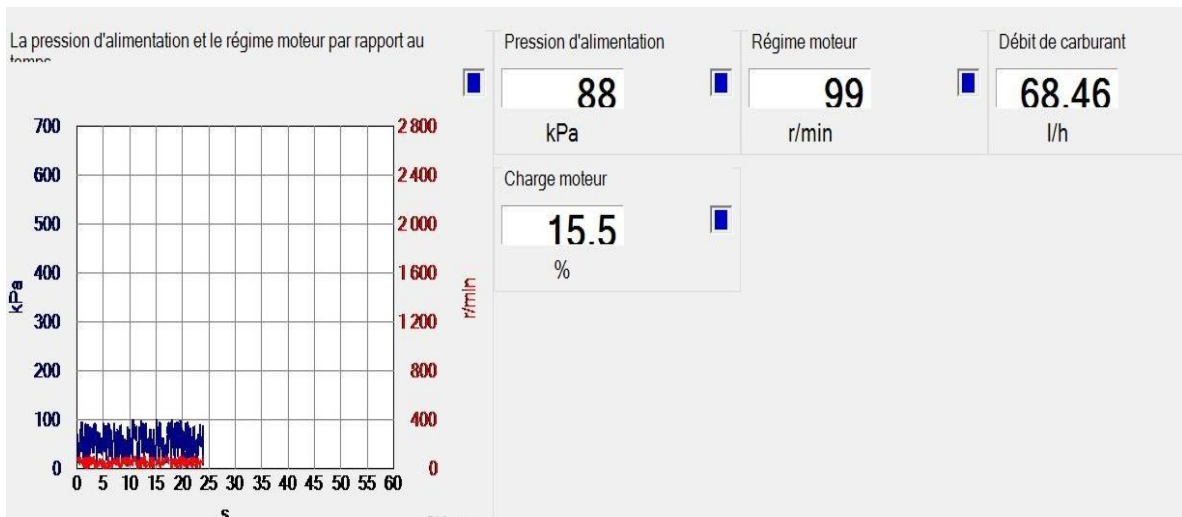


Figure 2.8 Résultats de pression d'alimentation de carburant – Mode Simulation

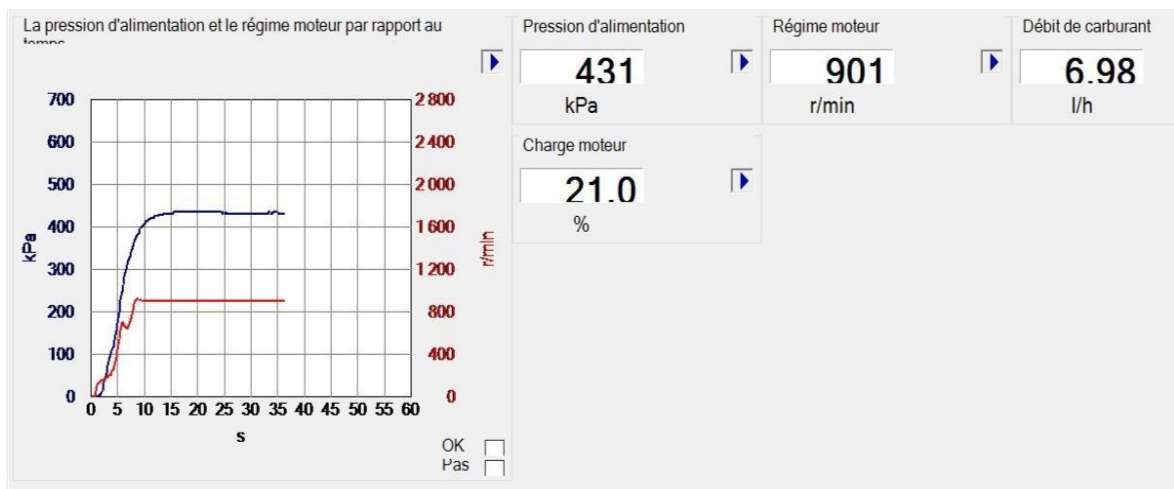


Figure 2.9 Résultats de pression d'alimentation de carburant – Mode Réel

En cas de pression d'alimentation non conforme aux valeurs attendues, plusieurs dysfonctionnements peuvent être en cause. Une pompe basse pression défectueuse, un filtre à carburant colmaté, ou une prise d'air dans le circuit peuvent entraîner une pression insuffisante. Inversement, une vanne de régulation défectueuse ou une erreur de calibration du capteur de pression peut fausser les relevés. Ces anomalies peuvent provoquer des pertes de puissance, des démarrages difficiles ou des arrêts moteurs intempestifs.

II.5.2.1.2. Contrôle de la consommation de carburant

Ce test a pour but de vérifier le volume de carburant, soit avec le véhicule immobile soit lors d'un essai sur route. Le volume de carburant peut être contrôlé dans des circonstances spécifiques, comme lors de la conduite avec prise de mouvement ou avec d'autres accessoires entraînant une forte consommation. Lors de l'évaluation du volume de carburant, il faut prendre en compte tout composant supplémentaire éventuel fort consommateur de carburant. Le même moteur peut afficher différents volumes de carburant dans différentes conditions, comme la température de fonctionnement, la fonction de rétention de chaleur, la prise de force, le compresseur, le générateur actif ou inactif, etc. Le débit de carburant est théorique le volume affiché dans le test correspond au volume calculé par l'unité de commande du moteur et nécessaire à l'injection dans les cylindres selon les conditions à un moment donné. Le volume de carburant peut aussi être vérifié afin de calculer la quantité de carburant lors de la conduite à pleine puissance du moteur. Il n'existe pas de valeurs souhaitées pour le volume de carburant lors d'un essai sur route à pleine puissance du moteur. Le même moteur peut afficher différents volumes de carburant dans des conditions différentes, comme la température de service, dans le cas où la fonction de rétention de chaleur est active, la prise de mouvement active, le compresseur actif ; et si oui ou non le générateur est activé ou pas, etc.

Afin d'évaluer le volume de carburant, un véhicule de référence possédant exactement le même équipement, poids, ratio d'essieu arrière, etc., doit être utilisé. Les conditions de conduite doivent également être identiques pour les deux véhicules. Si des comparaisons sont effectuées avec les mesures précédentes de carburant sur le véhicule concerné, la cause de l'augmentation de la quantité de carburant doit être localisée avant de remplacer

Les composants. Si un ou plusieurs composant ont été remplacés, effectuer un nouveau test de quantité de carburant.

Note Afin d'obtenir une estimation correcte de l'état du moteur ; Le carburant doit être de bonne qualité, Température moteur comprise entre **75 °C et 95 °C** (soit **165 °F à 205 °F**).

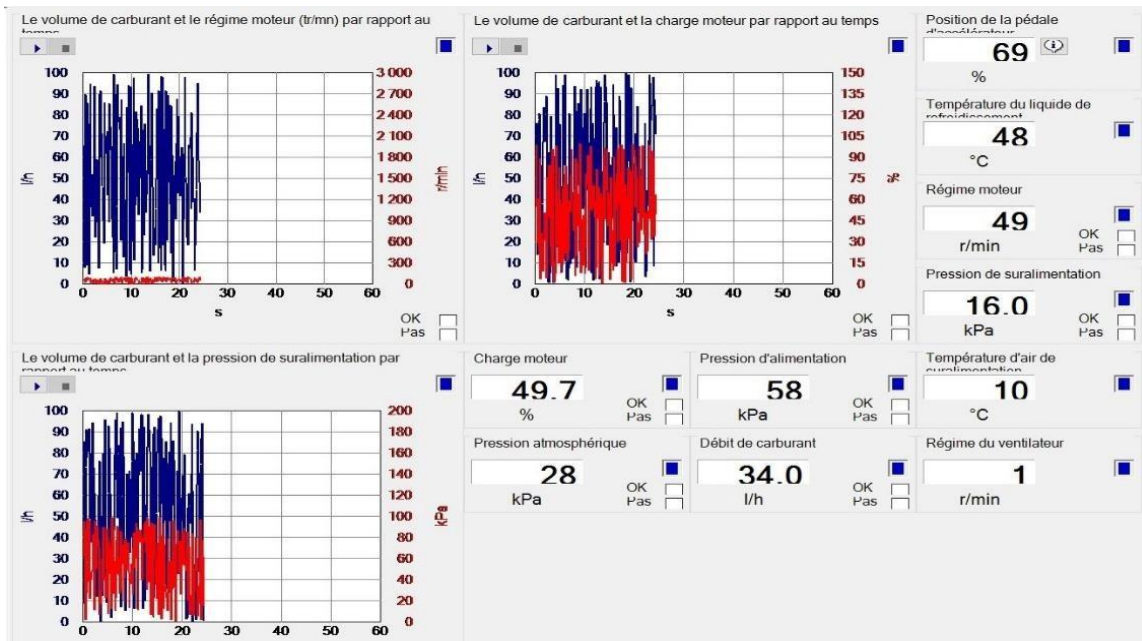


Figure 2.10 Résultats de la consommation de carburant –Mode Simulation

II.5.2.1.3. Contrôle débit de carburant et accessoires de forte consommation

Ce test permet de vérifier la consommation de carburant des accessoires à forte consommation, tels que PTO, compresseur d'air, ventilateur, alternateur, etc. Démarrer le moteur, puis activer le composant à vérifier, et noter la consommation de carburant. Ensuite, désactiver le composant et notez la différence de consommation de carburant. Pour une évaluation précise, les conditions doivent être les mêmes que lorsque les mesures précédentes ont été effectuées sur le véhicule actuel. S'il n'y a pas de valeurs précédentes dans le véhicule, il est possible de lire les valeurs avec le test : Historique des valeurs des capteurs. Si aucune valeur n'existait précédemment, il est possible d'utiliser un véhicule de référence. Le véhicule de référence doit avoir exactement le même équipement pour pouvoir utiliser les valeurs comme valeurs de référence. Vérifier si des réparations ou des modifications pouvant affecter la consommation de carburant ont été effectuées sur le véhicule.

II.5.2.1.4. Test d'équilibrage des cylindres

Ce test indique si, au cours de l'injection de carburant, un des injecteurs dévie de telle manière que le moteur ne puisse fonctionner correctement. Une compensation positive signifie que l'injecteur ne fournit pas assez de carburant au cylindre. Lorsque l'injecteur fournit trop peu de carburant, la durée d'injection est augmentée afin d'assurer un fonctionnement régulier du moteur. Une compensation négative signifie que l'injecteur fournit trop de carburant au cylindre. Lorsque l'injecteur fournit trop de carburant, la durée d'injection est diminuée afin d'assurer un fonctionnement régulier du moteur. Démarrer le test en utilisant le bouton de démarrage. Contrôler que le régime moteur est stable et se trouve dans le régime moteur permis, voir le texte d'information pour l'équilibrage du cylindre. Commencer ensuite le relevé des données de l'équilibrage des cylindres. Si le test montre qu'un cylindre en particulier est plus compensé que d'autres, (par rapport au niveau d'approbation et pas d'autres indications), cela peut entraîner des perturbations opérationnelles et un défaut d'allumage possible durant différentes conditions de conduite. Commencer alors par vérifier les codes programmés pour les injecteurs en enlevant le couvercle de la valve. Contrôler que ces codes correspondent aux valeurs programmées dans le calculateur. Utiliser le test "1700-22-03-03 Paramètres, programmation". Si les codes ne correspondent pas, reprogrammez les paramètres avec les codes inscrits sur les injecteurs et vérifiez que le moteur tourne mieux et de manière plus homogène. Utiliser la note de service B0088.

La procédure de test commence par le démarrage du moteur, qui doit être maintenu au régime de ralenti à environ 600 tr/min. Une fois le moteur stabilisé, on lance le relevé des données d'équilibrage des cylindres, en le poursuivant jusqu'à ce que les valeurs deviennent stables. Il est impératif que le régime moteur ne dépasse pas 800 tr/min, car au-delà, la fonction d'équilibrage est automatiquement désactivée par l'unité de commande. Lors de l'évaluation des résultats, il est normal d'observer que si un ou plusieurs injecteurs sont compensés positivement, d'autres seront compensés négativement pour garantir un fonctionnement homogène du moteur. Une compensation positive signifie que l'injecteur fournit trop peu de carburant, ce qui peut entraîner une baisse de puissance ; dans ce cas, ces injecteurs doivent être vérifiés. À l'inverse, une compensation négative indique que l'injecteur délivre trop de carburant, ce qui peut provoquer des fumées d'échappement, et nécessite également un contrôle. Si un cylindre présente une compensation dépassant $\pm 80\%$ par rapport aux autres

(signalée par un trait rouge), cela révèle une anomalie potentielle sur ce cylindre, sans confirmer pour autant que l'injecteur est défectueux. Pour confirmer le diagnostic, il est essentiel de compléter ce test par un test de compression des cylindres et un test de coupure d'injecteur.

Le tableau ci-dessous présente une comparaison technique détaillée entre les résultats du test d'équilibrage des cylindres en mode simulation et en mode réel sur un moteur Volvo D13.

Tableau 2.8 Comparaison technique du test d'équilibrage des cylindres

Paramètre	Mode Simulation	Mode Réel
Régime moteur (RPM)	71 tr/min (beaucoup trop Bas)	599 tr/min (valeur Normale au ralenti)
Charge moteur (%)	76	21
Pression d'alimentation (kPa)	11	383
Pression de Suralimentation(kPa)	8 kPa	0 kPa
Température air Suralimentation(°C)	34	44
Température liquide Refroid(°C)	66	71
Vitesse ventilateur (tr/min)	24	305
Équilibrage des cylindres (%)	Déviations fortes : cyl. 1 à -86 , cyl. 2 à -54	Tous les cylindres entre -8 et +5

Des compensations importantes sur un ou plusieurs cylindres peuvent indiquer un dysfonctionnement des injecteurs. Une compensation positive indique généralement un manque de carburant, causé par une buse obstruée, un défaut électrique ou une pression de carburant insuffisante. Une compensation négative peut résulter d'un excès de carburant, provoquant des fumées ou un ralenti irrégulier. D'autres causes possibles incluent un mauvais codage des injecteurs, un problème de compression ou un défaut mécanique. Un diagnostic complémentaire est recommandé pour confirmer l'origine du problème.

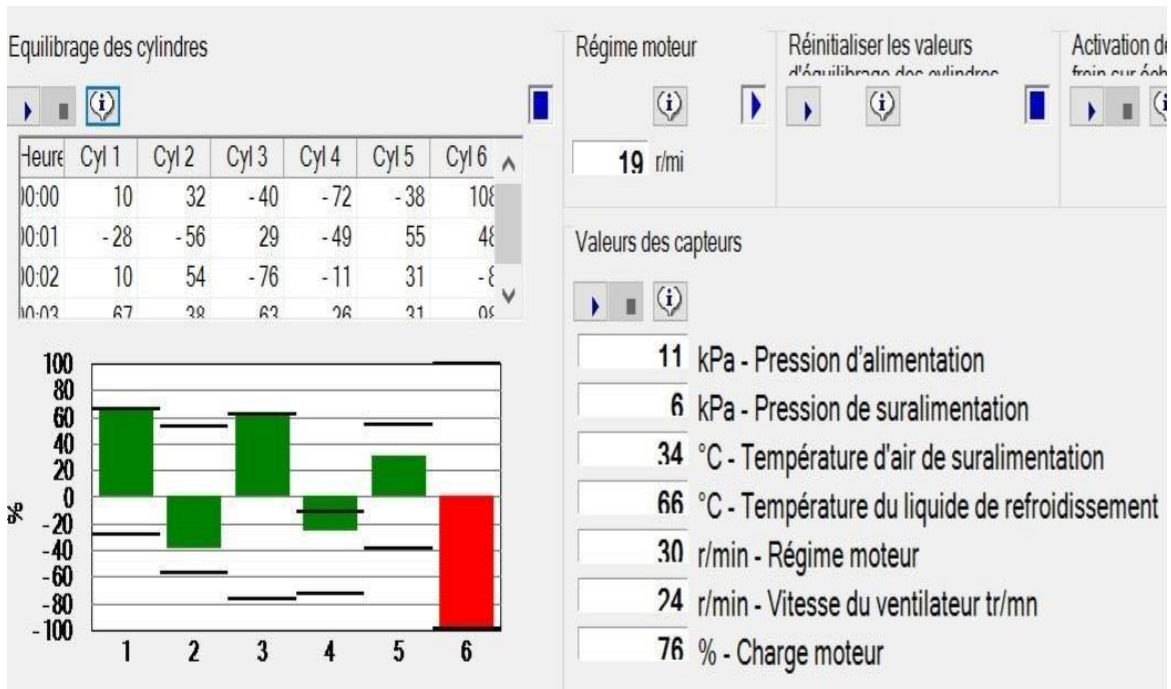


Figure 2.11 Résultats d'équilibrage des cylindres – Mode Simulation

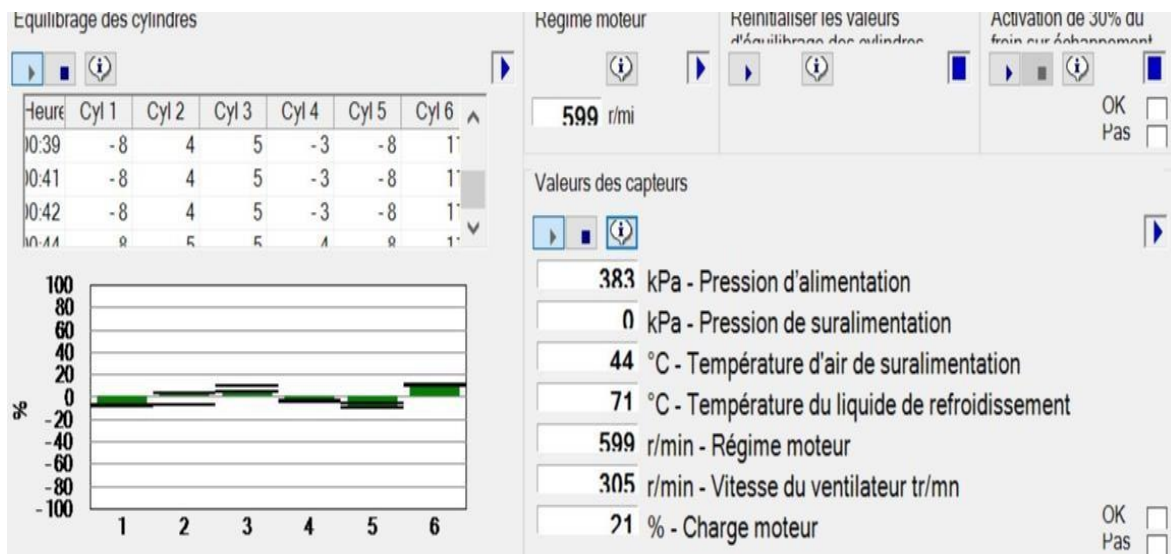


Figure 2.12 Résultats d'équilibrage des cylindres – Mode Réel

II.5.2.2. Système d'admission et d'échappement

II.5.2.2.1. Contrôle des systèmes d'admission et d'échappement

Ce test permet de contrôler si le capteur de pression de suralimentation fonctionne correctement et permet de déterminer la présence d'éventuels engorgements majeurs dans le système d'admission et d'échappement.

Note : Ce test n'est pas prévu afin d'évaluer les valeurs de pression de suralimentation.

Enfoncer la pédale d'accélérateur rapidement afin d'atteindre un régime de ralenti

Élevé. Maintenir ce régime de ralenti élevé pendant environ 10 secondes. Relever la pression de suralimentation dans le collecteur d'admission lorsque la valeur se stabilise. Répéter le test trois fois. Noter la valeur la plus élevée.

Note : S'il est impossible d'atteindre un régime de ralenti élevé conformément aux spécifications, contrôler le paramètre de Régime moteur maximum en stationnement (AU).

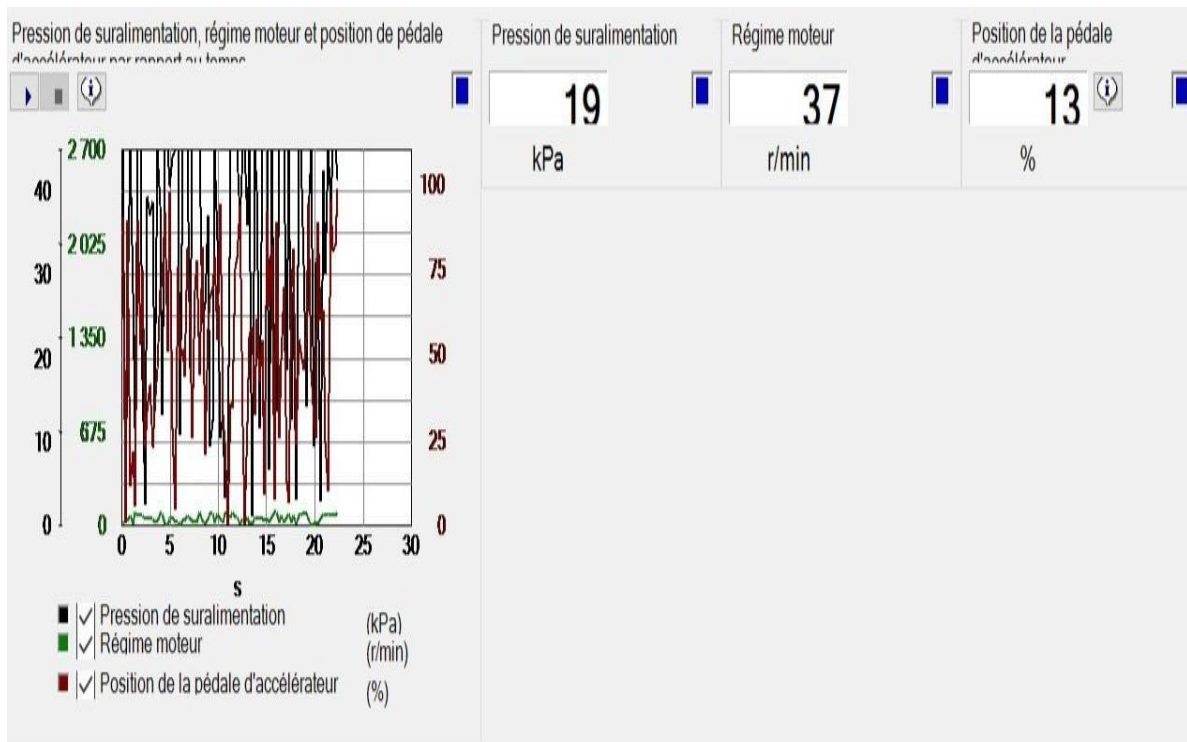


Figure 2.13 Résultats des systèmes d'admission et d'échappement – Mode Simulation

II.5.2.3. Ventilateur de refroidissement du moteur

II.5.2.3.1. Test du ventilateur de refroidissement à commande électrique

Ce test vérifie le fonctionnement du ventilateur de refroidissement du moteur à commande électrique. Le test comprend la vérification du capteur de vitesse de ventilateur et le fonctionnement de la soupape de commande dans le ventilateur. Ce test permet également d'identifier le système qui a requis l'activation du ventilateur. Le test est effectué moteur tournant. Lors de l'exécution de ce test, la température du liquide de refroidissement ne doit pas excéder 90 °C. Si la température est plus élevée, le ventilateur sera automatiquement activé par l'unité de commande du moteur (EMS). Contrôler qu'aucune fonction du véhicule ne demande l'activation du ventilateur avant de lancer le test. Procédure à suivre :

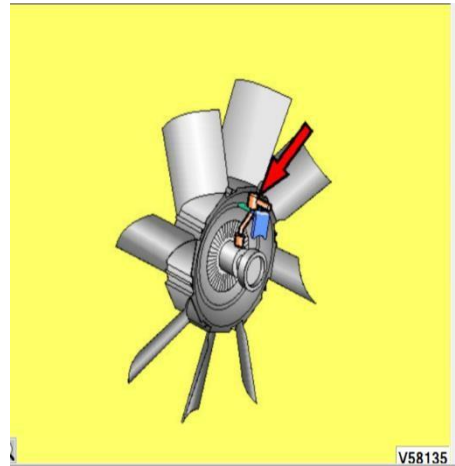


Figure 2.14 capteur de vitesse de Ventilateur de refroidissement du moteur

Il est important de garder un régime moteur constant de 1700 tr/min par à la pédale d'accélérateur tout au long du test pour son bon déroulement.

- Maintenir un régime moteur constant à 1700 tr/min.
- Activer et Suivre les instructions de l'activation 1 (durée approximatif 1 min).
- Activer et suivre les instructions de l'activation 2 (durée approximatif 1 min
- Activer et suivre les instructions de l'activation 3 (durée approximatif 1 min après stabilisation).
- Sauvegarder la fiche d'intervention nécessaire en cas de retour garantie.
- Il est possible de suivre l'évolution du test sur le graphique représentant le régime moteur et le régime ventilateur en tr/min.

II.5.2.3.1. Demande d'activation du ventilateur

Simulation de conditions de haute température pour tester la réponse du système de refroidissement et l'activation automatique du ventilateur. Le rôle principal du ventilateur est de maintenir la température du moteur la plus basse possible. D'autres systèmes du véhicule peuvent également, dans certaines conditions, demander l'activation du ventilateur. Ce relevé indique les fonctions du véhicule pouvant demander l'activation du ventilateur ainsi que l'état de la demande d'activation du ventilateur. Lorsque l'état est affiché, les conditions associées à une demande d'activation du ventilateur en provenance de la fonction concernée sont également indiquées.

Si plus d'une fonction demande l'activation du ventilateur, la fonction ayant requis la vitesse de ventilateur la plus élevée est prioritaire. Lorsque les conditions ne sont plus remplies, le ventilateur est désactivé après un certain délai. Ceci afin d'éviter un fonctionnement saccadé du ventilateur.

❖ **Température du liquide de refroidissement, moteur :**

Symbole vert = activation du ventilateur demandée (0- 100 %).

Symbole gris=activation du ventilateur non demandée.

Conditions :

- Température du liquide de refroidissement > 83 °C Conditions :
- Température du liquide de refroidissement > 83 °C Ralentisseur.
- Température du liquide de refroidissement > 90 °C Autre.

❖ **Unité de commande moteur (EECU), température :**

Symbole vert = activation du ventilateur demandée (1200 tr/min).

Symbole gris=activation du ventilateur non demandée.

Conditions :

- Température de l'unité de commande > 100 °C.
- Système pneumatique (via l'unité de commande du véhicule).
- Symbole vert - activation du ventilateur demandée (50 %).

Symbole gris = activation du ventilateur non demandée.

Conditions :

- Régime moteur >700 tr/min.
- Température extérieure > 10 °C.
- Vitesse du véhicule < 45 km/h.

❖ Climatiseur :

Symbole vert = activation du ventilateur demandée.

Symbole gris = activation du ventilateur non demandée.

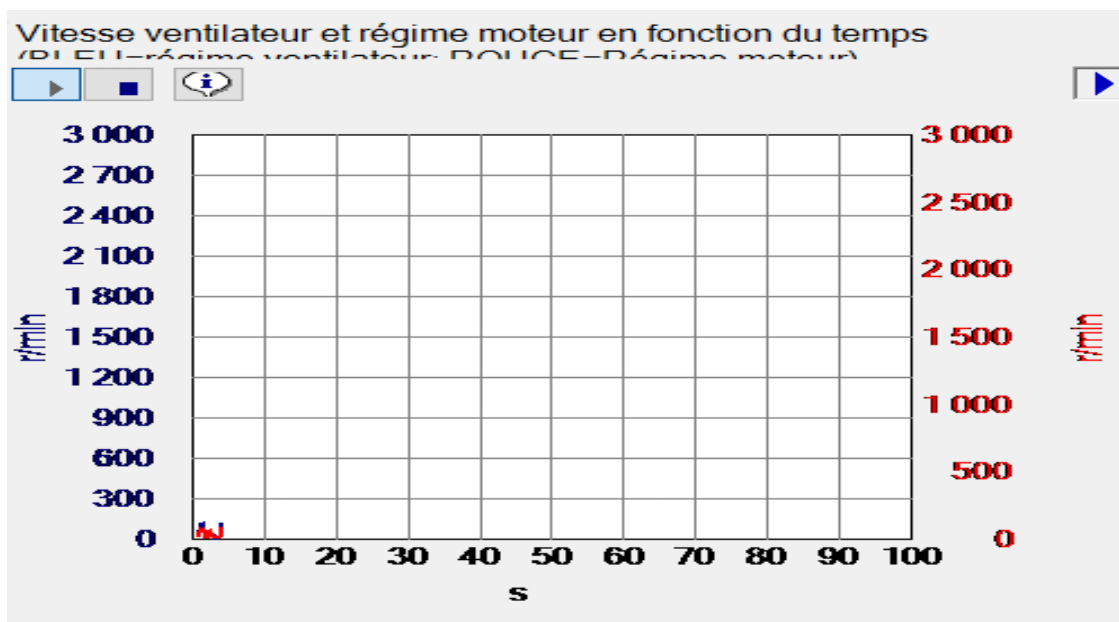


Figure 2.15 Résultats de Demande d'activation du ventilateur – Mode Simulation

II.5.2.4. Compression des cylindres

II.5.2.4.1. Test de compression des cylindres

Ce test permet de relever les éventuels écarts de compression entre les différents cylindres.

Afin que les valeurs soient précises, il est important d'effectuer ce test lorsque le moteur est à température de service. Note : Lorsque le test et l'évaluation sont terminés, la clé de contact doit être placée en position stop puis de nouveau sur la position de conduite afin de démarrer un nouveau test ou de redémarrer le moteur.

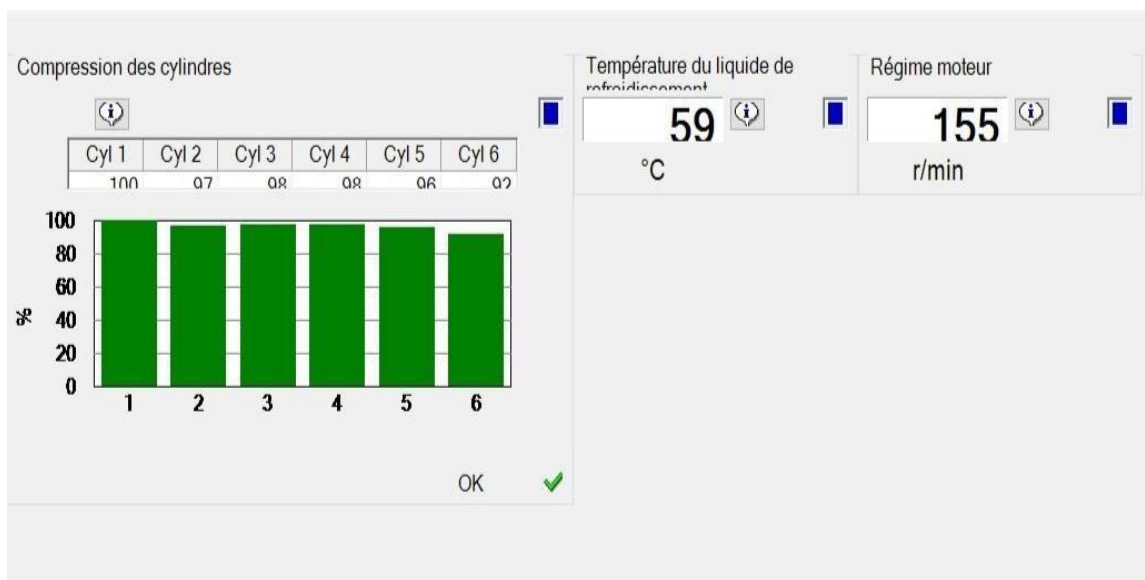


Figure 2.16 Résultats de compression des cylindres – Mode Simulation

II.5.2.5. Système de lubrification et d'huile

II.5.2.5.1. Test des électrovannes, circuit d'huile moteur

Le but de ce test est de valider le fonctionnement de la vanne de refroidissement des pistons et de la vanne thermostatique, en lien avec la procédure de diagnostic.

Note : Pour le branchement des manomètres, se référer à la procédure de GD ou de la NT G0044.

❖ Test du fonctionnement de la vanne de refroidissement des pistons :

- Brancher les manomètres d'huiles.
- Activer le test ouverture de la vanne refroidissement des pistons 100% pendant 30s.
- Relever les valeurs des manomètres.
- Arrêter le test.
- Activer le test fermeture de la vanne refroidissement des pistons pendant 30s.
- Relever les valeurs des manomètres.
- Arrêter le test.

❖ Test du fonctionnement de la vanne thermostatique d'huile moteur :

- Activer le test ouverture de la vanne thermostatique d'huile moteur 100% pendant 30s.
- Relever les valeurs des manomètres.
- Arrêter le test.
- Activer le test de fermeture de la vanne thermostatique d'huile moteur.
- Relever les valeurs des manomètres.
- Arrêter le test.

❖ Test d'ouverture des vannes de refroidissement des pistons et thermostatique 100% :

- Débrancher le connecteur du capteur de pression d'huile de refroidissement des pistons.
- Suivre le formulaire FO015.
- Activer le test d'ouverture des vannes de refroidissement des pistons et thermostatique 100%.
- Relever les valeurs des manomètres et du test Valeurs des capteurs.
- Arrêter le test.

II.6. Conclusion

L'étude du moteur Volvo D13, intégré dans un groupe électrogène, à travers l'outil de diagnostic VTT, a permis de mettre en lumière la pertinence d'une approche expérimentale en mode simulation pour la maintenance. En reproduisant virtuellement différentes conditions de fonctionnement, nous avons pu observer et analyser le comportement des organes internes du moteur, notamment les pistons, injecteurs, capteurs et le système d'alimentation, sans nécessiter de démontage ni d'arrêt prolongé de la machine.

La méthodologie mise en œuvre, basée sur une série de tests simulés, nous a permis de diagnostiquer avec précision les paramètres de fonctionnement critiques, tels que la pression de carburant, la température, la gestion électronique ou encore les cycles d'injection. Ces données ont permis d'identifier rapidement d'éventuels écarts ou défauts, d'optimiser les réglages et de valider le bon état de certains sous-systèmes, confirmant l'efficacité du VTT comme outil d'analyse fonctionnelle et préventive.

Les résultats obtenus démontrent que l'utilisation du Volvo Tech Tool dans ce contexte spécifique constitue une solution fiable et performante pour assurer un entretien ciblé, améliorer la disponibilité de l'équipement, et prolonger la durée de vie du moteur. Cette expérience confirme également l'importance croissante de la synergie entre compétences mécaniques et outils numériques dans le domaine de la maintenance industrielle.



Chapitre III

*Analyse thermique et
diagnostique*

III.1. Introduction

La mesure de la température des gaz d'échappement est fondamentale pour piloter le moteur et son système de dépollution, ainsi que pour détecter d'éventuels dysfonctionnements. En effet, dans les moteurs modernes, la connaissance de la température d'échappement (EGT) est indispensable « pour la gestion et le diagnostic du système de post-traitement, ainsi que pour la protection des composants sensibles à la surchauffe ». De nombreuses études confirment que la température d'échappement est souvent considérée comme le « symptôme diagnostique principal » de l'état du moteur.

L'analyse thermique des gaz d'échappement est une technique permettant de mesurer et d'interpréter les variations de température des gaz issus de la combustion dans un moteur.

Cette analyse repose sur des capteurs thermiques et des instruments de mesure qui enregistrent les températures des gaz à différents points du système d'échappement.

Ainsi que permet L'analyse thermique des gaz d'échappement permet de détecter la pollution environnementale en identifiant les variations de température et les compositions chimiques des gaz rejetés par les moteurs. Elle aide à repérer les émissions excessives de monoxyde de carbone (CO), oxydes d'azote (NO_x), particules fines et hydrocarbures. Ces polluants sont responsables de la détérioration de la qualité de l'air et peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement.

Ce le but ce système et l'analyse Diagnostiquer l'état du moteur avant que des dysfonctionnements ne surviennent et Optimisation des Performances et pour Surveillance des Émissions.

III.2. Méthodes de diagnostic

III.2.1. Thermographie infrarouge

Une caméra thermique appliquée sur la culasse révèle immédiatement le cylindre présentant une température anormalement élevée. Cette méthode détecte précisément les "points chauds" invisibles à l'œil nu.

III.2.2. Test des injecteurs

Contrôler le débit et le fonctionnement de l'injecteur suspect. Sur banc d'essai ou à l'aide de mesures de retour de carburant, on vérifie qu'il n'y a pas de fuite interne ni de débit trop élevé. On peut aussi écouter l'injecteur au stéthoscope de mécanicien.

III.2.3. Contrôle de compression

Réaliser un test de compression comparé sur chaque cylindre. Une valeur anormalement faible sur le cylindre chaud indiquerait une fuite par soupape ou segment. Inversement, une compression trop élevée pourrait témoigner d'un calage d'injection avancé.

III.2.4. Diagnostic stéthoscope

Un stéthoscope de mécanicien permet de localiser les bruits d'usure ou de claquement (soupapes, poussoirs, soupape d'injecteur) sur le cylindre concerné.

III.2.5. Lecture du calculateur

Interroger l'ECU moteur pour relever les codes défaut indiquant un problème d'injecteur ou de calage sur un cylindre spécifique. [25]


III.2.6. Par des capteurs thermiques et l'Arduino




Un système de diagnostic embarqué utilisant une carte Arduino connectée à des capteurs de température placés à la sortie des cylindres (collecteurs d'échappement).

Il permet de mesurer en temps réel les températures des gaz d'échappement de chaque cylindre, puis de transmettre ces données vers un ordinateur ou un affichage pour l'analyse et le diagnostic.

III.3. Composant de système

Tableau 3.1 Composant de système

Composant	Rôle	Photo
Capteur Thermique (Thermocouple type K)	Mesure la température des gaz d'échappement	Plage de mesure : -200°C à +1250°C 

Amplificateur	Convertit le signal du thermocouple pour Arduino	Communication SPI, précision stable 
Arduino Uno / Nano	Contrôle central : collecte, traitement et transmission des données	Doit gérer 6 canaux SPI 
PC / Logiciel Serial	Réception et affichage graphique des données	Utilisation de l'IDE Arduino 

III.4. Avantages de ce système

Nous avons mené l'analyse d'une manière capteurs de température des gaz d'échappement Acquisition par Arduino 'En raison plusieurs des avantages par a pour les autres méthodes :

❖ **Basé sur Arduino (open source) :** Ce qui est considéré comme l'une de ses

caractéristiques très importantes qui fournit :

❖ **Coût réduit, Compatible :** avec de nombreux capteurs, facile à programmer et modifier et personnalisation.

❖ **Fonctions programmées dans l'Arduino**

- Lecture continue des températures.
- Détection des anomalies (écart entre cylindres, dépassement de seuil).
- Affichage temps réel.
- Communication série vers le PC.

De plus :

❖ **Faible coût :** Moins cher qu'un système industriel de télémétrie ou d'analyse thermique.

❖ **Maintenance préventive optimisée :** Réduit les pannes graves, économies sur les réparations et le temps d'arrêt.

- ❖ **Amélioration du rendement moteur** : Évite les combustions incomplètes ou déséquilibrées, moins de surconsommation.
- ❖ **Détection instantanée de surchauffe** : sous-chauffe ou écart thermique anormal.
- ❖ **Prévention des dommages moteur** : détection précoce de surchauffe.

III.5. Méthodologie et gestion de système

Le système repose sur la mesure, l'analyse et l'interprétation en temps réel des températures des gaz d'échappement de chaque cylindre, afin de détecter toute les cas anormale (surchauffe ou refroidissement anormale).

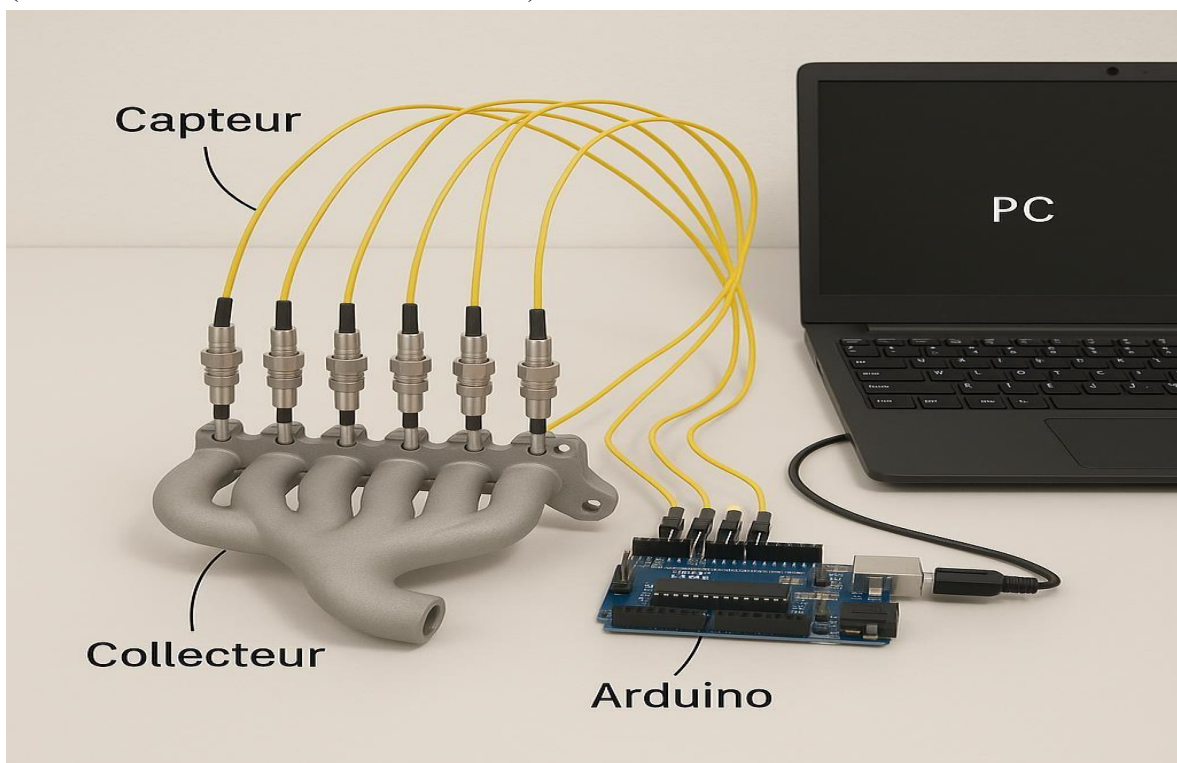


Figure 3.1 image imaginaire du système de mesure EGT

III.5.1. Mesure des températures et Positionnement des capteurs

Dans le collecteur d'échappement, juste après la sortie du cylindre, Chaque capteur est vissé ou soudé sur un orifice préalablement percé sur chaque conduit du collecteur d'échappement (1 capteur par cylindre). Cela permet une mesure précise et individualisée.

Ces capteurs captent la température des gaz de combustion sortant de chaque cylindre, reflétant la qualité de la combustion interne.

III.5.2. Câblage

Les capteurs sont reliés à leurs amplificateurs, qui sont connectés aux entrées SPI de l'Arduino. Elle est connectée au PC via USB pour l'envoi des données série.

III.5.3. Acquisition par Arduino

L'Arduino interroge chaque capteur selon un cycle régulier (ex. toutes les 2 secondes).

Il stocke et compare les valeurs :

- Température moyenne des 6 cylindres.
- Écarts entre cylindres.
- Il peut aussi détecter des seuils d'alerte programmés (ex. > 950 °C).

III.5.4. Transmission vers un PC

L'Arduino envoie des données via une liaison série USB au PC. Données au format clair, par exemple ;

T1=845 ; T2=870 ; T3=750 ; T4=830 ; T5=850 ; T6=770.

III.5.5. Analyse sur PC

Un logiciel (Python, ...) lit les données en direct :

- Affiche graphique en barres ou courbes.
- Compare aux seuils prédéfinis.
- Stocke les valeurs dans un fichier log.
- Il possible Génère des alertes visuelles/sonores.

III.5.6. Diagnostic automatique

Si un cylindre est trop chaud ou trop froid par rapport aux autres :

- ❖ **Surchauffe localisée** : problème d'injection, refroidissement.
- ❖ **Température basse anormale** : combustion incomplète, manque compression.
- ❖ **Si tous les cylindres sont anormalement chauds** : problème global (injection, surcharge, refroidissement).

III.6. Cas thermiques anormaux sur les gaz d'échappement

III.6.1. Surchauffe anormale d'un cylindre

III.6.1.1. Symptôme et Observation

Le cylindre n°5 présente une température significativement plus élevée (980°C) par rapport aux autres (850°C \ 900°C), ce qui indique une surchauffe anormale.

Cylindre n°5 : température > 950 °C.

Autres cylindres : entre 850 et 900°C (**plage normale** de température pour chaque cylindre),
Écart > 50 °C entre les cylindres.

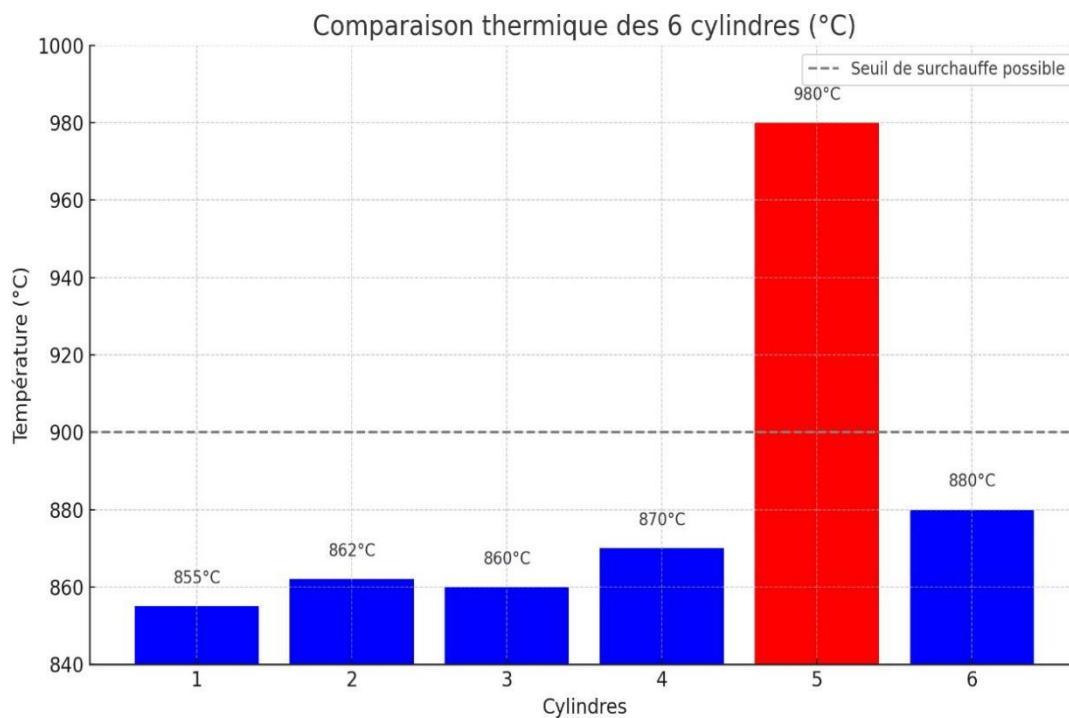


Figure 3.2 graphe thermique sur 6 cylindres si une augmentation dans un chambre

III.6.1.2. Causes

Plusieurs défauts locaux peuvent conduire à une température excessivement élevée sur un seul cylindre.

❖ **Un injecteur défectueux** (soupape d'injecteur restée ouverte trop longtemps, joint d'injecteur percé) suralimente ce cylindre en carburant, provoquant une combustion plus chaude.

❖ **Une avance à l'injection trop importante** pour ce cylindre (calage de pompe mal réglé ou capteur de position arbre à cames HS) engendre une pression et une température de combustion élevées.

❖ **Problèmes de lubrification :**

➤ **Manque d'huile ou huile inadaptée :** Une lubrification insuffisante augmente la friction, générant une chaleur excessive et pouvant provoquer un grippage du piston.

➤ **Gicleurs d'huile défectueux :** Des gicleurs endommagés ne refroidissent pas efficacement le piston par le bas, contribuant à la surchauffe.

❖ **Cavitation :**

La cavitation due à des vibrations de la paroi du cylindre, peut éroder la chemise du cylindre, entraînant des fuites de gaz de combustion dans le liquide de refroidissement.



Figure 3.3 exemple de cavitation [20]

❖ **Défauts du système de refroidissement :**

➤ **Pompe à eau défectueuse :** Une pompe à eau endommagée ou une courroie rompue empêche la circulation adéquate du liquide de refroidissement, entraînant une surchauffe du moteur.

➤ **Thermostat bloqué :** Un thermostat resté fermé empêche la circulation du liquide vers le radiateur, provoquant une montée en température excessive.

➤ **Radiateur obstrué :** Des dépôts de saleté ou de calcaire peuvent boucher le radiateur, réduisant son efficacité à dissiper la chaleur.

➤ **Ventilateur de refroidissement défaillant :** Un ventilateur mal positionné ou de taille inappropriée peut restreindre le flux d'air nécessaire au refroidissement.

III.6.1.3 conséquences

❖ Déformation ou fusion des composants internes

- . Pistons et segments : La chaleur excessive provoque leur dilatation, pouvant entraîner des grippages, rayures ou même fusion des pistons dans les cas extrêmes.
- Risque de déformation plastique de piston : Déformation de tête de segment en cas problème de exé d 'injection.



Figure 3.4 déformation plastique de tête piston [21]

- Déformation la jupe de piston en cas problème de mal fonctionnement de gicleur de refroidissement de chemise.



Figure 3.5 déformation plastique jupe de piston [21]

- ❖ **Cylindres** : La déformation des chemises peut entraîner une perte de compression et une usure prématurée.

❖ Dommages au joint de culasse et à la culasse

- Joint de culasse : Peut se brûler ou se fissurer, entraînant des fuites de liquide de refroidissement ou d'huile, et une perte de compression.



Figure 3.6 joint de culasse endommagé [22]

- Culasse : La chaleur peut la déformer ou la fissurer, compromettant l'étanchéité et la performance du moteur.



Figure 3.7 Culasse endommagée [22]

❖ Fissuration du bloc moteur

Une surchauffe prolongée peut provoquer des fissures dans le bloc moteur, entraînant des fuites de fluides et une perte de compression.



Figure 3.8 bloc moteur fissuré [23]

❖ Défaillance le système de refroidissement

Fuites de liquide de refroidissement Une température élevée peut causer la rupture des tuyaux de refroidissement, aggravant la surchauffe ou défaillance du radiateur et de la pompe à eau : Le radiateur et la pompe à eau peuvent subir des dommages irréparables.

❖ Dégradation de l'huile moteur

La chaleur excessive altère les propriétés lubrifiantes de l'huile, augmentant l'usure des composants internes. Pouvant aboutir à une casse moteur complète si le défaut n'est pas corrigé.

III.6.1.4. Recommandations pour corriger la situation

❖ Injecteur : remplacer ou faire reconditionner l'injecteur défaillant. Vérifier et remplacer si besoin le joint torique de l'injecteur.

Ne pas oublier de purger et contrôler le circuit d'alimentation (pompe haute pression, filtre carburant). Après changement, valider le bon fonctionnement au banc.

❖ Calage de pompe/injection : ajuster l'avance à l'injection selon les données constructrices. Sur les moteurs modernes, cette opération peut nécessiter un outil de diagnostic pour réinitialiser le calage. Tout écart détecté par l'ECU doit être corrigé par du personnel qualifié.

❖ Soupapes et culasse : si une soupape est défectueuse (fuite, calaminage, coinçage), réaliser une rectification de siège ou remplacer la soupape. Contrôler le plan de culasse et le joint, resserrer la culasse aux couples spécifiés.

❖ Compression : si le test montre un défaut d'étanchéité, envisager un honnage de cylindre ou changement des segments.

❖ Refroidissement : même si l'anomalie est locale, vérifier le système de refroidissement (thermostat, pompe à eau, échangeur) pour s'assurer qu'il n'y ait pas de restriction d'eau de refroidissement sur ce cylindre.

❖ **Sécurité/maintenance générale** : utiliser une huile appropriée et un carburant de qualité, remplacer les bougies de préchauffage sur le cylindre concerné si nécessaire. Selon les conseils du constructeur, éviter de tourner le moteur trop longtemps à faible régime lorsque ce type d'anomalie est présent.

III.6.2. Basse température anormale d'un cylindre

III.6.2.1. Symptôme et Observation

De ce graphe thermique sur 3 cylindres si une basse dans un chambre avec un écart moins de 50°C. Le cylindre 3, en rouge, présente une température anormalement basse (770 °C), ce qui indique un problème potentiel.

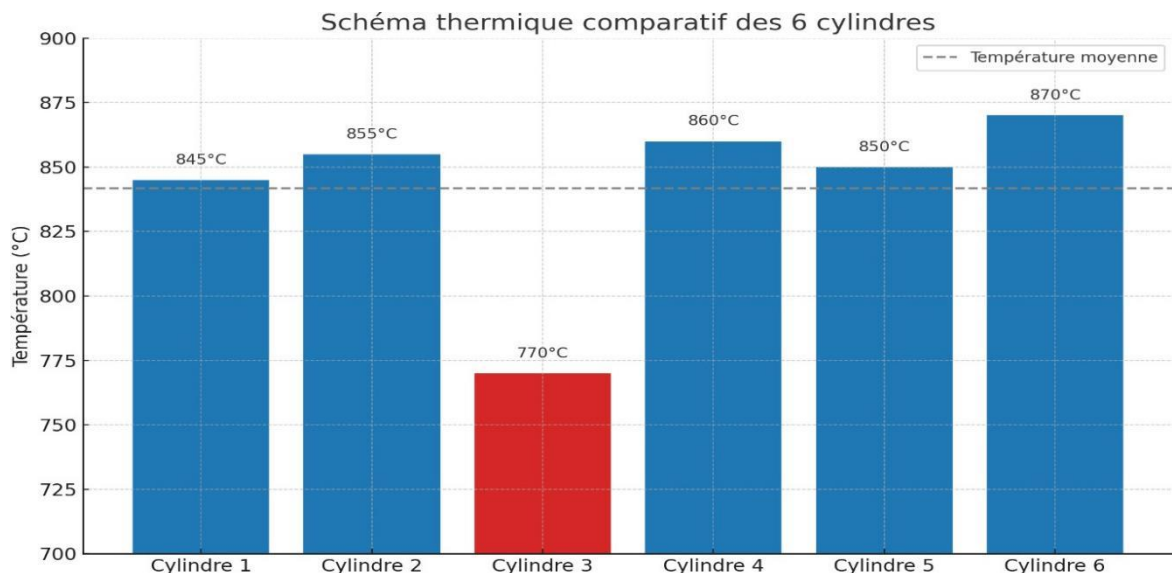


Figure 3.9 graphe thermique basse température dans un chambre

III.6.2.2. Causes

❖ **Injecteur de carburant partiellement fermé ou encrassé** :

Un injecteur dont l'aiguille reste coincée ou dont les sprays sont obstrués provoque une alimentation en carburant insuffisante, réduisant la température de combustion dans le cylindre concerné.

❖ **Fuite de compression (manque de compression)** :

Une perte d'étanchéité réduit la pression et la température de compression, provoquant un cylindre plus froid que les autres.

❖ Mauvaise qualité de carburant :

Un carburant inadapté à l'indice de compression du moteur peut entraîner une combustion lente et moins chaude, abaissant la température des gaz d'échappement.

❖ Bougie de préchauffage défailante :

Dans un Diesel, une bougie de préchauffage HS ne chauffe pas suffisamment la chambre de combustion au démarrage, ce qui peut occasionner un fonctionnement « froid » persistant tant que le moteur n'atteint pas sa température de croisière.

III.6.2.3. Conséquences

Une température anormalement basse dans un cylindre de moteur Diesel entraîne une chaîne de dysfonctionnements qui débutent par une combustion incomplète et un mauvais rendement de la lubrification pour finir par une usure prématurée des composants, une surconsommation de carburant ainsi qu'une hausse des émissions polluantes. Ces conséquences impactent directement la fiabilité du moteur, sa durée de vie et impact sur environnementale.

❖ Usure mécanique et fiabilité réduite :

Usure accrue des chemises et pistons à basse température, l'huile moteur n'atteint pas sa viscosité optimale, réduisant sa capacité à lubrifier correctement la paroi des cylindres. Cette situation provoque une usure prématurée et un polissage des chemises, pouvant entraîner des grippages et fissurations des pistons.



Figure 3.10 usure de piston [21]



Figure 3.11 usure de chemise [21]

❖ Dilution de l'huile et perte de propriétés lubrifiantes :

Lors d'un fonctionnement prolongé à froid, des gouttelettes de carburant non brûlé se mélangent à l'huile moteur, diluant les additifs et altérant considérablement la lubrification. Cela accroît le risque de blocage des pistons et d'endommagement des segments.

❖ Surconsommation de carburant**❖ Enrichissement du mélange pour compenser le froid :**

Le calculateur moteur injecte davantage de carburant pour tenter d'atteindre la température de fonctionnement, ce qui peut augmenter la consommation jusqu'à 30% sur de courts trajets.

❖ Retard d'allumage et ratés :

Les moteurs Diesel en phase de démarrage froid subissent un allongement du délai d'ignition et des ratés, générant davantage de fumées noires et de particules.

❖ Perte de performances :

- Réduction de la puissance : Le moteur peine à développer son couple maximal tant que la température optimale n'est pas atteinte.
- Montées en régime plus lentes : Les accélérations restent molles, le temps de réponse du moteur se dégrade.

III.6.2.4. Recommandations pour corriger la situation

- Tester l'injecteur (débit, étanchéité, pulvérisation), nettoyer ou le remplacer.
- Vérifier la pression et le calage d'injection via ECU.
- Contrôler les électrovannes de commande.
- Réaliser un test de compression moteur pour vérifier soupapes, segments, culasse.
- Rechercher un mauvais serrage, fissure ou joint HS sur le collecteur d'admission.
- Tester la résistance ou le fonctionnement de la bougie préchauffage HS, La remplacer si nécessaire.

III.6.3. Écart température entre cylindres

III.6.3.1. Symptômes observés

Un écart de température de l'ordre de ± 50 °C entre cylindres signale un déséquilibre de combustion localisé. Cet écart est généralement stable dans le temps à régime constant, ce qui exclut une simple fluctuation transitoire.

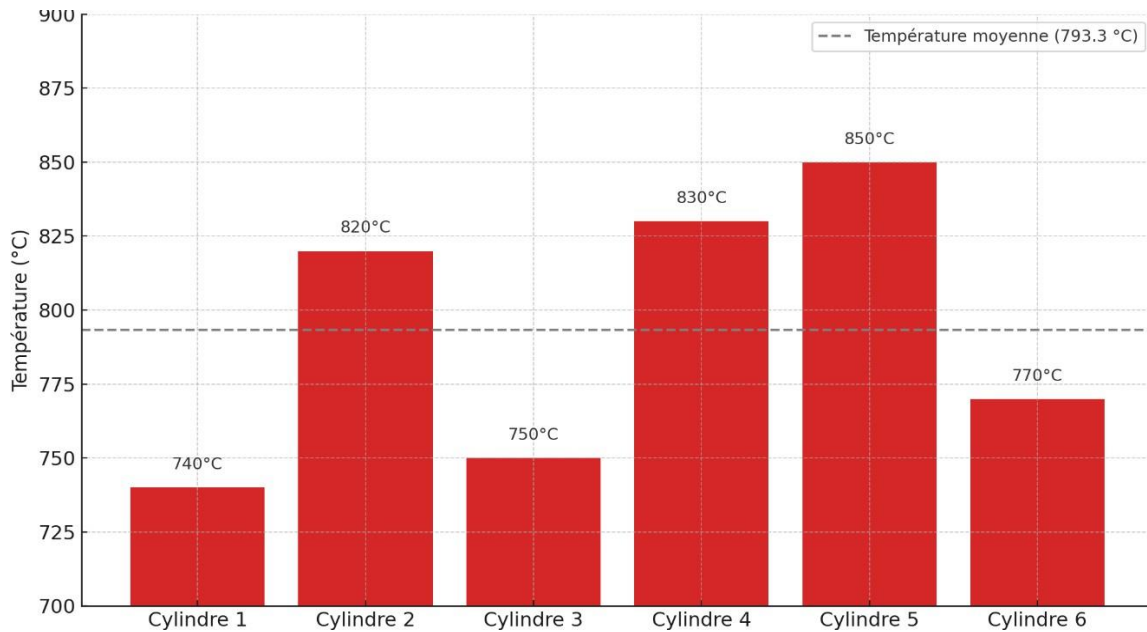


Figure 3.12 graphe thermique Écart température entre cylindres

III.6.3.2. Causes

La cause principale de cette condition est considérée mauvaise qualité de carburant comme (Carburant contaminé, odeur forte, présence d'eau et particules).

III.6.3.3. Principaux mécanismes

Un carburant diesel dégradé peut entraîner un déséquilibre de combustion notable d'un cylindre à l'autre, matérialisé par un écart de plus de 50°C sur les températures des gaz d'échappement. Mis en jeu sont la formation de dépôts sur les injecteurs, la mauvaise atomisation et l'effet d'eau ou d'impuretés dans le carburant, qui altèrent le débit et le timing d'injection. Ce déséquilibre thermique se traduit par des vibrations, une perte de puissance, une augmentation des émissions polluantes et, à terme, des dommages mécaniques (turbocompresseur, soupapes, pistons) si rien n'est corrigé.

❖ Formation de dépôts sur les injecteurs :

Les carburants hors spécifications favorisent l'apparition de dépôts internes et externes sur les orifices et les surfaces de contact des injecteurs, réduisant le débit et altérant le patron de pulvérisation.

. Ces dépôts modifient localement le rapport air/carburant dans un cylindre, provoquant soit un excès de carburant (température haute) soit une insuffisance (température basse).

❖ Mauvaise atomisation et indice de cétane faible :

Un indice de cétane insuffisant allonge le délai d'auto-inflammation, retardant la combustion et générant plus de résidus imbrûlés, d'où une température d'échappement diminuée pour le cylindre concerné.

❖ Présence d'eau et d'impuretés :

L'eau libre ou les impuretés dans le diesel provoquent de la corrosion et de l'hydrocavitation à l'intérieur des injecteurs, réduisant la pression d'injection et déséquilibrant le débit entre cylindres. L'eau absorbe également de l'énergie de combustion, abaissant la température nette de certains cylindres.

❖ Déséquilibre des paramètres ECU :

Les dépôts et la corrosion peuvent perturber les capteurs de pression et les actionneurs reliés à l'ECU, qui ajuste alors de manière incorrecte le timing et la quantité de carburant pour chaque injecteur, accentuant l'écart thermographique.

III.6.3.4. Conséquences et risques

- Vibrations motrices dues au déséquilibre de poussée entre cylindres.
- Fumées noires et suies en sortie d'échappement, détérioration du FAP et échec au contrôle antipollution.
- Surchauffe localisée pouvant conduire à la fusion de soupapes, fissures de piston ou grippage du turbo.
- Dilution de l'huile par carburant imbrûlé, accélérant l'usure interne (paliers, segments).

III.6.3.5. Recommandations pour corriger la situation

- **Purge et remplacement du filtre à gazole** : élimination des dépôts et de l'eau libre.
- **Nettoyage ou remplacement des injecteurs** : selon gravité des dépôts constatés, suivi d'un recalibre ECU.
- **Utilisation d'additifs dispersants et d'agent anti-eau** : pour prévenir la réapparition des dépôts et séparer l'eau.
- **Vérification et éventuellement remplacement des capteurs EGT** : garantir des mesures fiables pour le contrôle en continu.
- **Procédure de ravitaillement contrôlé** : instaurer un protocole de qualité carburant (contrôles périodiques, stations certifiées).

III.6.4. Température fluctuante en régime stable (augmentation progressivement)

III.6.4.1. Symptôme et Observation

Dans ce graphe on observe une augmentation progressive de la température des cylindres écart avec 30 C°. Ce type de schéma indique une anomalie systémique.

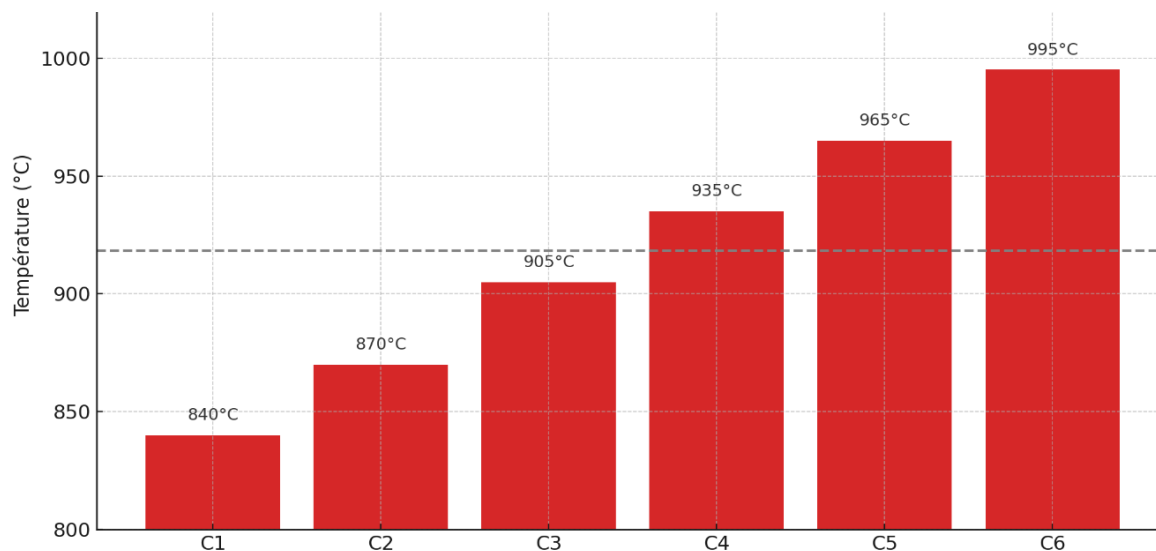


Figure 3.13 graphe thermique température fluctuante en régime stable (augmentation progressivement)

III.6.4.2. Causes

Une augmentation progressive de la température motrice en régime stable indique généralement un dysfonctionnement du système de refroidissement. (Détailé dans le premier cas).

III.6.4.3. Conséquences

▪ Surchauffe motrice :

Lorsque le système de refroidissement ne régule plus efficacement la température, le moteur peut dépasser les 100 °C, entraînant une surchauffe. Cette situation peut causer des dommages irréversibles aux composants internes (En raison de sa température élevée, il provoque les mêmes dégâts que le premier cas).

▪ Fuites de liquide de refroidissement :

Les températures élevées peuvent provoquer la rupture des tuyaux de refroidissement, entraînant des fuites qui aggravent la surchauffe et endommagent d'autres composants :

- Aucune variation significative du régime moteur ni de la charge.
- Ventilateur qui s'enclenche tardivement ou de manière irrégulière.

III.6.5 Surchauffe globale (température élevée sur tous les cylindres)

III.6.5.1. Symptôme observe

Tous les cylindres sont au-dessus de la plage thermique normale (en général 850–900 °C). Cela indique un problème global, pas localisé à un seul cylindre.

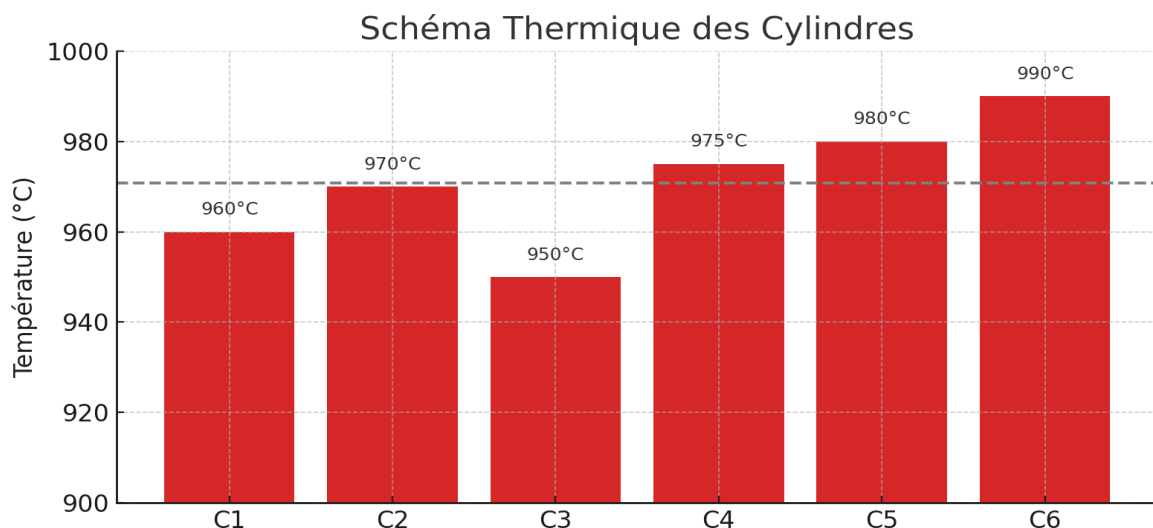


Figure 3.14 graphe thermique surchauffe globale

III.6.5.2. Causes

- **Cause principale qui considère le moteur fonctionne en surcharge :**
Sous haute pression ou à un régime inadapté trop longtemps (ex. : traction lourde) qui cause échauffement important, de plus il possible.
- **Mauvais réglage de l'avance à l'injection (pas de cohérence avec ECU) :**
Si l'injection est trop avancée, la combustion débute trop tôt (avant Point Mort Haut), causant une pression et température trop élevées au moment critique.
- **Air d'admission trop chaud :**
Si l'air admis est chaud (faible densité), le mélange air-carburant est moins efficace et la combustion plus lente mais plus chaude, surtout à pleine charge.
- **Liquide de refroidissement :**
Un débit de liquide de refroidissement insuffisant entraîne une mauvaise dissipation de la chaleur générée par la combustion surchauffe globale du moteur.

III.6.5.3. Les conséquences

- La surchauffe globale des cylindres entraîne les mêmes symptômes que le premier cas. (Déformation ou fissuration du bloc moteur, Déformation des pistons et cylindres, détérioration du joint de culasse, usure prématurée des composants, défaillance le système de refroidissement, Perte de puissance...).

De plus il peut :

- Arrêt moteur / panne complète Si les températures critiques sont dépassées, le moteur peut caler ou être gravement endommagé de façon irréversible.
- Entraîner un incendie dans le compartiment moteur si les matériaux combustibles commencent à brûler.

III.7. Impact sur l'environnement

Lorsqu'un moteur ne fonctionne pas dans des conditions normales, cela peut avoir de nombreux effets négatifs sur l'environnement. Nous nous souvenons à cause d'Une température élevée du cylindre perturbe le processus de combustion, ce qui entraîne une augmentation des émissions :

- ❖ **Oxydes d'azote (NOx) :** Les températures de combustion élevées favorisent la formation d'oxydes d'azote, des gaz nocifs pour la santé humaine et l'environnement.

- ❖ **Hydrocarbures imbrûlés (HC) et monoxyde de carbone (CO) :** Une combustion incomplète due à des températures élevées peut entraîner une augmentation des émissions de HC et de CO, qui sont des polluants réglementés par les normes de contrôle de la pollution.
- ❖ **Particules fines (PM) :** Des températures plus élevées peuvent entraîner une production accrue de particules fines, particulièrement nocives pour la santé humaine.
- ❖ **Convertisseur catalytique inefficace :** Le catalyseur à deux ou trois voies n'atteint pas sa température d'activation (condition de basse température).

Les normes européennes, telles qu'Euro 6 et la future Euro 7, fixent des limites strictes pour les émissions d'oxydes d'azote, d'hydrocarbures, de monoxyde de carbone et de PM2,5. Cela peut entraîner un dépassement de ces limites, rendant le moteur incompatible.

III.8. Conclusion

L'analyse thermique des gaz d'échappement constitue aujourd'hui un outil très important pour le diagnostic, la surveillance et l'optimisation du fonctionnement des moteurs à combustion interne. Grâce à l'intégration de capteurs thermiques et d'un système embarqué à base d'Arduino, il devient possible de détecter en temps réel les anomalies de température au niveau de chaque cylindre, permettant ainsi une intervention rapide avant l'apparition de pannes graves.

Ce système présente de nombreux avantages : faible coût, facilité de mise en œuvre, grande précision des mesures, et adaptabilité aux besoins spécifiques du moteur. Les cas étudiés, tels que la surchauffe localisée, la température anormalement basse ou encore la surchauffe globale, démontrent l'utilité de cette approche pour identifier les défauts d'injection, de compression ou de refroidissement. Au-delà de la maintenance préventive et de l'amélioration des performances, cette méthode contribue aussi à la réduction de l'impact environnemental des moteurs. En optimisant la combustion, on limite la production de polluants tels que les NOx, les particules fines ou les hydrocarbures imbrûlés, ce qui permet de respecter les normes environnementales de plus en plus strictes .



Conclusion
Générale

Conclusion Générale

Le présent mémoire s'est intéressé à l'étude approfondie du moteur diesel, en particulier le moteur Volvo D13, dans une optique de maintenance préventive. Dans un contexte industriel où la fiabilité, la performance et la durabilité des équipements sont essentielles, il devient indispensable de comprendre le fonctionnement des moteurs thermiques, leurs composants clés ainsi que les systèmes électroniques et capteurs qui les accompagnent.

Dans le premier chapitre, nous avons exposé les fondements théoriques du moteur diesel : son principe de fonctionnement, ses organes principaux, et l'importance des systèmes de commande et de dépollution dans la performance globale et le respect des normes environnementales.

Le deuxième chapitre, permis de comprendre l'application expérimentale de ces connaissances à travers l'analyse détaillée du moteur Volvo D13, notamment à l'aide du logiciel Volvo Tech Tool. Les tests réalisés ont démontré la pertinence des outils de diagnostic électronique dans la détection des défauts et la prévention des pannes, confirmant leur l'important dans la modernisation des méthodes de maintenance.

En, le troisième chapitre porté sur l'élaboration et la mise en œuvre d'un système d'analyse prédictive visant à surveiller et diagnostique l'état de santé du moteur en temps réel.

Cette approche représente une avancée majeure dans la réduction des pannes, la prolongation de la durée de vie des composants, et l'optimisation des performances globales du moteur.

À partir de là, nous pouvons ajouter des suggestions que nous n'avons pas pu faire pour améliorer l'efficacité du système, comme l'ajout de capteurs de vibrations pour corrélation thermique/mécanique, Les vibrations sont souvent les premiers signes de défauts mécaniques (usure de paliers, jeu anormal, déséquilibre).

Par exemple Installer des accéléromètres tri-axes sur les composants sensibles (vilebrequin, culasse, bloc moteur).

Conclusion Générale

Qui Permet de diagnostiquer des défauts invisibles par la simple lecture de capteurs standard (pression/température).

Et l'ère du progrès et de la technologie, les systèmes et mécanismes sont devenus presque entièrement interconnectés, notamment en ce qui concerne leurs composants mécaniques, électriques et électroniques.

Pour faciliter la détection et l'identification des pannes, nous pouvons :

Ajouter des interventions automatisées et des alertes intelligentes ;

Intégration de l'intelligence artificielle (IA)

Par entraîner des modèles à partir des données historiques du moteur (température, pression, vibrations, etc.) afin de détecter tout dysfonctionnement.

Enfin, ce mémoire montre que l'intégration de la maintenance préventive, appuyée par des outils technologiques avancés, constitue une réponse efficace aux exigences croissantes de fiabilité et de rentabilité dans le secteur industriel. Elle ouvre également la voie à une gestion proactive des moteurs, plus respectueuse de l'environnement et adaptée aux défis de l'industrie.



Références
Bibliographique

Bibliographie

[1] Organisation internationale de normalisation. (2017). Moteurs alternatifs à combustion interne — Vocabulaire — Partie 1 : Termes relatifs à la conception et au fonctionnement du moteur (ISO2710-1 :2017).

<<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/70032/4efc14fcff9d407bb183ddcd543ca1ce/ISO-2710-1-2017.pdf>>

[2] Golfy. (S.d.). Fonctionnement du moteur thermique. Golfy.free.fr. Consulté le 05 05 2025 <<http://golfy.free.fr/voitures/fonctionnement/moteur.html>>.

[3] GHERBAL, A., & SADAOUI, N. (2018). Maintenance des moteurs à essence (Doctoral dissertation).

[4] Oliver, M. (2010). Manuel Vagnon du moteur diesel : voiliers et vedettes (Éd. Vagnon). <<https://static.fnac-static.com/multimedia/editorial/pdf/9782857257325.pdf>>.

[5] Lafontaine, B. (2020, 11 mai). Décalaminer et nettoyer les soupapes. Le Repaire des Motards. Consulté le 05 05 2025

<<https://www.lerepairedesmotards.com/technique/restauration/decalaminer-nettoyer-roder-admission-soupapes.php>>.

[6] Educauto. (S.d.). Circuit pompe injection. Consulté le 05 05 2025

<<https://www.educauto.org/ressources-mediatheque/circuit-pompe-injection>>.

[7] TP Demain. (2024, 29 septembre). Le circuit d'admission d'air d'un moteur diesel. Consulté le 05 05 2025 <<https://tpdemain.com/module/le-circuit-dadmission-dair-dun-moteur-diesel/>>.

[8] Educauto. (S.d.). Circuit de refroidissement moteur. Consulté le 05 05 2025

<[Http://www.educauto.org/ressources-mediatheque/circuit-refroidissement-1](http://www.educauto.org/ressources-mediatheque/circuit-refroidissement-1)>.

[9] MAXICOURS. MAXICOURS. (S.d.). Instrumentation (1). Consulté le 05 05 2025

<<https://www.maxicours.com/se/cours/instrumentation-1/>>.

- [10] Université Batna 2. (S. d.). Capteurs de température [Support de cours]. <https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/boumaraf-farid/files/chapitre_02-capteurs_de_temperatures.pdf>.
- [11] Electricity & Magnetism. (S. d.). Capteurs de pression capacitifs. Consulté le 05 05 2025 <<https://www.electricity-magnetism.org/fr/capteurs-de-pression-capacitifs/>>.
- [12] Mcours. (S. d.). Mesure des vibrations mécaniques [PDF]. <<https://www.mcours.net/cours/pdf/hascl4/bgghassclie699.pdf>>.
- [13] Hella. (S. d.). Diagnostic du post-traitement des échappements. TechWorld. Consulté le 05 05 2025 <<https://www.hella.com/techworld/be-fr/Technique/Systeme-d-echappement/Diagnostic-du-post-traitement-des-echappements-74805/>>.
- [14] Ministère de la Transition écologique. (S. d.). Normes Euro d'émissions de polluants des véhicules lourds et des véhicules propres. Consulté le 05 05 2025 <<https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/normes-euros-demissions-polluants-vehicules-lourds-vehicules-propres>>.
- [15] Ge, Y., Zhang, Y., Wang, X., & Li, J. (2025). Real-road NO_x and CO₂ emissions of city and highway China-6 heavy-duty diesel vehicles. *Journal of Environmental Sciences*, 135, 1–10. <<https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.04.014>>.
- [16] Tang, M., Hu, W., Duan, L., Yuan, R., & Lv, G. (2024). Evaluating real driving emissions of compressed natural gas taxis in Chongqing, China—a typical mountain city. *Atmosphere*, 15(6), <715. <https://doi.org/10.3390/atmos15060715>>.
- [17] Li, J., Wang, Y., Zhang, L., & Chen, H. (2025). Development of the NO₂ ratio model for heavy-duty diesel engine two-stage SCR aftertreatment system. *Journal of Environmental Sciences*, 140, 50–60. <<https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.11.003>>.
- [18] Volvo Trucks North America. (S. d.). Volvo D13 Engine Family (Brochure n° 4147-101). <<https://www.volvotrucks.us/media/vtna/files/shared/powertrain/revised4147-101-volvo-d13-engine-brochure-low-res.pdf>>.

[19] Volvo Trucks North America. (2024, mars). Premium Tech Tool : Frequently Asked Questions. <<https://www.volvotrucks.us/volvo-premium-tech-tool/media/faqs/tech-tool-faqs-march-2024.pdf>>.

[20] Yunlihong, S. (2021, 19 avril). Cylinder liner wear and cavitation, coolant is the killer! HBYLH. Consulté le 14 05 2025 < <https://www.hbylh.com/info/cylinder-liner-wear-and-cavitation-coolant-is-79680787.html>>.

[21] MS Motorservice International GmbH. (S.d.). Motorservice Group : Quality for the repair shop. Consulté le 14 05 2025
< <https://www.ms-motorservice.com/int/en/company/motorservice-group> >.

[22] Le Guide de l'auto. (2025). Accueil. Consulté le 14 05 2025
< <https://www.guideautoweb.com/>>.

[23] **Volgen Power.** (2024, octobre 31). Cracked Cylinder Block : 5 Warning Signs and Quick Fixes. Volgenpower.com. Consulté le 15 05 2025
<<https://www.volgenpower.com/fr/cracked-cylinder-block-symptoms-what-are-the-warning-signs-and-how-to-address-them/>>.

[24] Commission européenne. (2022, 2 juin). Q&A : Commission proposal on the new Euro 7 standards . Consulté le 17 05 2025
<https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_22_6496>.

[25] Bosch. (2014). Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics : Systems and components, networking and hybrid drive (Bosch Professional Automotive Information). Springer Vieweg. Consulté le 17 05 2025 <<https://doi.org/10.1007/978-3-658-01784-2>>.

[26] Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. New York, NY: McGraw-Hill.

[27] Duret, P. (2003). *Moteurs à combustion interne*. Paris, France: Éditions Techniques de l'Ingénieur.

[28]Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R. (2010). *Gas turbine combustion* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

[29]Stone, R. (2012). *Introduction to internal combustion engines* (4th ed.). Basingstoke, UK: Palgrave Macmillan.

[30]Alkhatib, H. (2007). *Étude des moteurs thermiques : cas d'un moteur diesel* (Mémoire de fin d'études, Université Amar Telidji de Laghouat). Laghouat, Algérie.