



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance de l'automatisme et de l'instrumentation

Thème

**Contribution à la conception d'un système
d'instrumentation pour un banc d'essais de moteur
thermique**

Présenté et soutenu publiquement par:

BENZERFA Idris & BOUKER Oussama Ahmed

Devant le jury composé de:

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. Abdelaziz ADJLOUA	MCA	Univ. Oran-2, IMSI	Président
Mr. Abderrahim BENFEKIR	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Encadreur
Mr. Hamza BOUSBAA	Pr.	ENPO, Maurice Oudin	Co-Encadreur
Mr. Taha BENARBIA	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Examineur

Juin 2026

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur **Mr. Benfkir Rahim**, pour son accompagnement constant, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail. Sa rigueur scientifique et son soutien nous ont permis d'avancer avec confiance et sérénité.

Nos remerciements s'adressent également à notre Co-encadreur **Mr. Bousbaa Hamza**, dont l'aide précieuse et les orientations techniques ont grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

Nous souhaitons aussi remercier les membres du jury, **Mr Abdelaziz ADJLOUA** et **Mr Taha BENARBIA**, pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant ce travail, ainsi que pour leurs remarques et suggestions qui enrichiront notre réflexion.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet.

Résumé

La réalisation porte sur un système d'instrumentation appliqué à un banc d'essai moteur diesel Deutz Z MWM D302-1. Plusieurs capteurs de température, de régime et de vibrations sont intégrés afin de collecter et analyser les données nécessaires au suivi du fonctionnement du moteur. L'ensemble est conçu pour permettre une supervision industrielle claire et fiable, offrant des perspectives d'amélioration pour les bancs d'essai pédagogiques et industriels.

Mots-Cles : Moteur, Instrumentation, Capteurs, Supervision Industrielle, Banc D'essai.

Abstract

The work focuses on an instrumentation system applied to a diesel engine test bench (Deutz Z MWM D302-1). Several sensors measuring temperature, RPM, and vibration are integrated to collect and analyze the data required for monitoring engine performance. The system enables reliable industrial supervision, providing opportunities for improvement in both educational and industrial test benches.

Keywords: Engine, Instrumentation, Sensors, Industrial Supervision, Test Bench.

ملخص

يتناول العمل تطوير نظام القياس والتحكم لبنك اختبار محرك ديزل Deutz Z MWM D302-1 يعتمد النظام على دمج عدة حساسات لقياس درجة الحرارة وسرعة الدوران والاهتزازات، بهدف جمع وتحليل البيانات الضرورية لمتابعة أداء المحرك. يتيح النظام إمكانية الإشراف الصناعي بشكل موثوق، مع فتح آفاق لتطوير بنوك الاختبار التعليمية والصناعية.

الكلمات المفتاحية: محرك، أجهزة القياس، الحساسات، الإشراف الصناعي، بنك اختبار.

Sommaire

Remerciements

Résumé

Listes des figures

Listes des tableaux

Nomenclature

Abréviations

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les moteurs.....	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. Historique des moteurs.....	4
I.3. Moteur à combustion interne.....	4
I.3.1. Moteurs alternatifs.....	4
I.3.2. Turbomachines.....	5
I.3.3. Moteur WANKEL à piston rotatif.....	5
I.4 Moteur à combustion externe.....	6
I.4.1. Machines à vapeur.....	6
I.4.2. Moteur Stirling.....	6
I.5. Historique des moteurs Diesel.....	6
I.5.1. Les organes des moteurs Diesel.....	7
I.5.1.1. Les organes fixes.....	8
I.5.1.2. Les organes mobiles.....	9
I.5.1.3. Systèmes de distribution.....	10
I.5.2. Les types d'injection des moteurs Diesel.....	10
I.5.3. Système alimentation en carburant d'un moteur Diesel.....	13
I.5.3.1. L'alimentation en air.....	13
I.5.3.2. Exemple d'un système d'alimentation air/carburant.....	15
I.5.4. Principe de fonctionnement du moteur Diesel.....	17

I.5.4.1. Le cycle à deux temps.....	18
I.5.4.2. Le cycle à quatre temps.....	20
I.6. Les systèmes annexes des moteurs diesel.....	22
I.6.1. Le refroidissement.....	22
I.6.2. Circuits et systèmes de graissage.....	24
I.6.3. Système d'échappement.....	25
I.7. Principales différences entre le moteur diesel et moteur à essence.....	24
I.8. Les avantages et les inconvénients du moteur diesel.....	28
I.8.1. Les avantages du moteur diesel.....	28
I.8.2. Les inconvénients du moteur diesel.....	28
I.9. Le contrôle du moteur diesel.....	28
I.9.1. Injecteur de carburant.....	28
I.9.2. Le régulateur.....	29
I.10. Protection du moteur diesel.....	30
Chapitre II: Bancs d'essais moteurs et instrumentation.....	33
II.1. Introduction.....	34
II.2. Les bancs d'essais moteur.....	34
II.2.1. Définition.....	34
II.2.2. Architecture générale des bancs d'essais moteur.....	35
II.2.2.1. Les éléments constitutifs dans la salle d'essais.....	36
II.2.2.2. La salle de contrôle.....	38
II.2.3. Classification fonctionnelle des bancs d'essais.....	39
II.2.4. Classification technique des bancs d'essais.....	41
II.2.5. Nécessité des bancs d'essais moteurs.....	43
II.3. Instrumentation du moteur.....	43
II.3.1. Les capteurs de température.....	44
II.3.2. Les capteurs de pression.....	47

II.3.3. Autres capteurs complémentaires.....	49
II.4. Systèmes d'acquisition des données.....	55
II.4.1. Principe.....	55
II.4.2. Les principaux composants de la chaine d'acquisition.....	56
II.5. Critères de choix d'un capteur.....	58
Chapitre III : Simulation et Réalisation Expérimentale	59
III.1. Introduction.....	60
III.2. Présentation du banc d'essai.....	60
III.2.1. Présentation du moteur.....	60
III.2.2. Les capteurs utilisés.....	61
III.2.3. Présentation de la carte d'acquisition.....	65
III.2.3.1. Rôle et choix de l'Arduino UNO... ..	65
III.2.3.2. Architecture de câblage.....	66
III.3. Résultats expérimentaux et affichage en temps réel.....	67
III.3.1 Analyse des états du moteur en temps réel.....	70
III.3.2 Fonctions intégrées dans l'interface de supervision.....	71
III.4. Essais expérimentaux et performances du moteur.....	74
III.5. Conclusion.....	77
Conclusion générale.....	78
Références et Bibliographies.....	80
Annexes A.....	83

Listes des figures

Chapitre I

FigureI.1 Premier moteur diesel de 1897.....	7
FigureI.2 structure d'un moteur diesel.	8
FigureI.3 bloc-cylindres.....	8
FigureI.4 culasse	8
FigureI.5 joint de culasse	9
FigureI.6 Carter.....	9
FigureI.7 piston	9
FigureI.8 segments.....	9
FigureI.9 bielle.....	9
FigureI.10 volant d'inertie	10
FigureI.11 Dispositif de distribution.....	10
FigureI.12 injection directe.....	11
FigureI.13 injection indirecte (les deux structures)	12
FigureI.14 le système d'injection rampe commune(moteur 2.0L TDI)	13
FigureI.15 Moteur à aspiration naturelle	14
FigureI.16 Principe de fonctionnement de la suralimentation	15
FigureI.17 Disposition générale d'un moteur dv4td.....	16
FigureI.18 le cycle à deux temps	19
FigureI.19 le cycle à quatre temps	22
FigureI.20 circuit de refroidissement par eau	24
FigureI.21 Circuit de graissage sous pression à bain d'huile.....	25
FigureI.22 Présentation de système d'échappement.....	26

Chapitre II

FigureII.1 Schéma générale d'un banc d'essai	36
FigureII.2 Image réelle de la cellule du MCI K9K au niveau du laboratoire LTE- ENPO-MA ..	40
FigureII.3 Capteur de température d'air.....	45
FigureII.4 Courbe de température en fonction de la résistance de sortie du capteur	45
FigureII.5 Capteur de température carburant.....	45
FigureII.6 Capteur de température liquide de refroidissement	46
FigureII.7- Thermocouple,FigureI.30 PT100.....	47
FigureII.8- Capteur de pression d'huile.....	48
FigureII.9- Capteur de pression d'air MAP.....	48
FigureII.10 débitmètre Massique Coriolis	50
FigureII.11 débitmètre de type turbine	50
FigureII.12 débitmètre à Déplacement positif (PD)	50
FigureII.13- Schéma de principe de Capteur de vitesse de rotation	52

FigureII.14 -schéma de Principe de fonctionnement de capteur de couple	53
FigureII.15-schéma d'un capteur de niveau (capacitif).....	55
FigureII.16 -schéma d'un capteur flotteur	55
FigureII.17 Structure le chaine d'acquisition	56
FigureII.18- Schéma d'un chaine d'acquisition	57

Chapitre III

FigureIII.1- Banc réel au niveau du laboratoire dans l'ENP Oran.	60
FigureIII.2- Thermocouple de type K WRNK-191	62
FigureIII.3- Capteur de température DS18B20	63
FigureIII.4- Capteur de vibration MPU-6050	64
FigureIII.5- Capteur de régime moteur (LJ12A3-4-Z/BX-5V)	65
FigureIII.6- Arduino UNO.....	66
FigureIII.7- La synthèse des connexions effectuées pour chaque capteur vers l'Arduino UNO.....	67
FigureIII.8- Schéma conceptuel du système d'acquisition Arduino Uno avec les capteurs.	68
FigureIII.9- Programme principal de l'interface de supervision "Banc d'Essai Monitoring Pro"	69
FigureIII.10- Tableau de bord de supervision industrielle du banc d'essai moteur.....	70
FigureIII.11 - Interface graphique dans la tableau de bord.....	71
FigureIII.12- la gestion des alarmes dans le tableau de bord.....	72
FigureIII.13- Exportation des données dans le tableau de bord.....	73
FigureIII.14- Gestion des paramètres dans le tableau de bord.....	73
FigureIII.15- Historique du système	74
FigureIII.16- Interface de supervision du moteur en état de repos	75
FigureIII.17- Interface de supervision du moteur en état de Marche avant l'accélération.....	76
FigureIII.18- Interface de supervision du moteur en état de Marche après l'accélération.....	76

Listes des tableaux

TableauI.1: principe de fonctionnement de cycle à 2 temps.....	19
TableauI.2- comparaison entre le moteur essence et le moteur diesel.....	27
TableauII.1 Comparaison entre les bancs stationnaires et transitoires	42
TableauII.2 La plage de température du thermocouple et RTD	47
TableauII.3 Comparaison entre les débitmètres de carburant.....	49
TableauII.4 Les types des capteurs de vibration.....	51
TableauII.5 Comparaison entre trois capteurs de niveaux.....	54
TableauIII.1- Les caractéristiques du moteur Deutz Z- MWM D302-1	61
TableauIII.2- Les caractéristiques de thermocouple WRNK-191:	62
TableauIII.3- Les caractéristiques de capteur DS18B20:	63
TableauIII.4- Les caractéristiques de capteur MPU-6050:	64
TableauIII.5- Les caractéristiques de capteur de régime moteur LJ12A3-4-Z/BX-5V:	65
TableauIII.6- La synthèse des connexions effectuées pour chaque capteur vers l'Arduino UNO:	67

Nomenclature

T	Température (air, carburant, huile, gaz)	°C
P	Pression (combustion, injection)	bar
V	Volume du fluide de travail	m ³
N	Régime moteur (rotations vilebrequin)	tr/min
v	Vitesse linéaire	m/s
C	Couple moteur (mesuré par frein ou torsiomètre)	N·m
θ	Angle de torsion de l'arbre (torsiomètre)	rad
P_u	Puissance mécanique	kW
ε	Taux de compression	rapport volumétrique
a	Vibration (accélération dynamique)	m/s ²
Q_f	Débit de carburant	dm ³ /h
Q_a	Débit d'air	m ³ /h
R	Résistance électrique (PT100)	Ω
U	Tension électrique (capteurs, modules)	V
I	Courant électrique	A
f	Fréquence (capteur RPM, signaux)	Hz
α	Accélération angulaire (MPU6050)	rad/s ²
k	Constante d'étalonnage du torsiomètre	N·m/rad
G	Module d'élasticité en torsion	Pa
L	Longueur de l'arbre (torsiomètre)	m
I	Moment polaire de la section	m ⁴

Abréviations

TDI	Turbo Diesel Injection (système d'injection directe, Volkswagen/Audi)
DTI	Diesel Turbo Injection (système d'injection, Renault)
TDDI	Turbo Diesel Direct Injection (système d'injection directe, Ford)
PMH	Point Mort Haut (position extrême du piston en haut du cylindre)
PMB	Point Mort Bas (position extrême du piston en bas du cylindre)
TDC	Top Dead Center (équivalent anglais de PMH)
BDC	Bottom Dead Center (équivalent anglais de PMB)
2T	Two-Stroke Engine (moteur à deux temps)
4T	Four-Stroke Engine (moteur à quatre temps)
RPM	Revolutions Per Minute (rotations par minute du vilebrequin)
MAP	Manifold Absolute Pressure (capteur de pression absolue d'admission)
IAT	Intake Air Temperature (capteur de température d'air d'admission)
NTC	Negative Temperature Coefficient (thermistance à coefficient négatif)
EGT	Exhaust Gas Temperature (température des gaz d'échappement)
SPI	Serial Peripheral Interface (bus série synchrone)
I²C	Inter-Integrated Circuit (bus série à deux fils)
ADC	Analog to Digital Converter (convertisseur analogique-numérique)
PWM	Pulse Width Modulation (modulation de largeur d'impulsion)
VCC	Voltage Common Collector (alimentation positive)
GND	Ground (masse électrique, référence 0 V)

Introduction générale

Introduction générale :

Le moteur diesel constitue l'un des piliers de la mécanique moderne, reconnu pour son rendement élevé, sa robustesse et sa large diffusion dans les secteurs du transport, de l'industrie et de l'énergie. L'étude de son fonctionnement et de ses performances nécessite une approche intégrée, combinant les bases théoriques, les moyens expérimentaux et les outils de supervision.

Ce mémoire s'inscrit dans cette logique en proposant une contribution à la mise en œuvre d'un banc d'essai moteur diesel, instrumenté et supervisé en temps réel. L'objectif est double : d'une part, approfondir les connaissances fondamentales sur les moteurs thermiques et leurs systèmes d'injection, et d'autre part, développer un dispositif expérimental fiable permettant de mesurer et d'analyser les grandeurs physiques essentielles (températures, régime, vitesse, vibrations).

Le travail est structuré en trois chapitres complémentaires :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les moteurs thermiques, leur évolution historique, leurs cycles de fonctionnement et les spécificités du moteur diesel.
- Le deuxième chapitre est consacré aux bancs d'essais moteurs et à l'instrumentation, en mettant en évidence leur rôle dans la caractérisation des performances et la supervision industrielle.
- Le troisième chapitre expose la simulation et la réalisation pratique du banc d'essai, incluant l'intégration des capteurs, la programmation sous Arduino IDE, le développement d'une interface de supervision en Python et l'analyse des résultats expérimentaux.

À travers cette démarche, ce mémoire vise à relier la théorie à la pratique, en démontrant la pertinence d'une instrumentation adaptée et d'une supervision industrielle pour l'étude des moteurs diesel.

Chapitre I : Généralités sur les moteurs

I.1 Introduction

La mécanique motorisée regroupe l'ensemble des dispositifs mécaniques dotés d'un moteur ainsi que des systèmes associés, destinés à produire un mouvement ou à réaliser un travail. Dans la plupart des cas, la propulsion des véhicules repose sur des moteurs thermiques, qui assurent la conversion de l'énergie chimique contenue dans un combustible en énergie mécanique exploitable. Ce processus de conversion s'effectue en plusieurs étapes : l'énergie chimique est d'abord transformée en énergie thermique par combustion, puis cette énergie thermique est convertie en travail mécanique. L'élévation de température due à la combustion entraîne une augmentation de la pression ou du volume du fluide de travail, et l'expansion de ce fluide permet ainsi de générer un travail mécanique.

On distingue deux grandes catégories de moteurs thermiques selon le mode de transfert de chaleur :

- Les moteurs à combustion interne, dans lesquels les gaz issus de la combustion du mélange air-carburant constituent directement le fluide de travail.
- Les moteurs à combustion externe, où la chaleur produite par la combustion est transmise à un fluide de travail distinct via des échangeurs thermiques ; la combustion se déroule alors dans une chambre séparée appelée brûleur.

Ces différents types de moteurs représentent aujourd'hui une part essentielle des systèmes de production d'énergie mécanique, notamment dans le secteur des transports. Leur large diffusion s'explique par leurs performances élevées, leur compacité et leur fiabilité, ce qui a favorisé le développement considérable de l'industrie des moteurs et de ses secteurs associés à l'échelle mondiale.

I.2 Historique des moteurs :

- 1700 : Moteurs à vapeur
- 1860 : Moteur de Lenoir
- 1862 : Beau d Rochas définit le principe du cycle de fonctionnement des moteurs à combustion interne
- 1867 : Moteur de Otto- Langen
- 1876 : Moteur 2temps par Dugan Clark
- 1880 : Otto invente le moteur à 4temps à allumage par bougie
- 1892 : R. Diesel invente le moteur 4 temps à allumage par compression
- 1957 : Wankel invente le moteur à piston rotatif
-

I.3. Moteur à combustion interne

I.3.1. Moteurs alternatifs :

La chaleur est produite par une combustion dans une chambre à volume variable et elle est utilisée pour augmenter la pression au sein d'un gaz qui remplit cette chambre (ce gaz est d'ailleurs initialement composé du combustible et du comburant : air). Cette augmentation de pression se traduit par une force exercée sur un piston, force qui transforme le mouvement de translation du piston en mouvement de rotation d'arbre (vilebrequin).

Les moteurs sont classés en deux catégories suivant la technique d'inflammation du mélange carburant-air :

- Les moteurs à allumage commandé (moteur à essence).
- Les moteurs à allumage par compression (moteur Diesel).

Dans les moteurs à allumage commandé, un mélange convenable essence-air, obtenu à l'aide d'un carburateur, est admis dans la chambre de combustion du cylindre où l'inflammation est produite par une étincelle.

Dans les moteurs à allumage par compression, le carburant est du gazole. On l'injecte sous pression dans la chambre de combustion contenant de l'air, préalablement comprimé et chaud, au contact duquel il s'enflamme spontanément. Ces moteurs sont appelés moteur Diesel.

Les moteurs à allumage, commandé et par compression, sont des moteurs à combustion interne, car la combustion s'effectue à l'intérieur du moteur.

Ces moteurs constituent actuellement la majorité des unités de production de puissance mécanique dans beaucoup de domaines, surtout le domaine de transports où ils se sont particulièrement développés en raison de leurs avantages : bon rendement, compacité fiabilité... ; ceci explique l'extension qu'on prit de nos jours l'industrie des moteurs et l'ensemble de ses branches connexes dans tous les pays du monde[1].

I.3.2. Turbomachines : (turbine à gaz) :

Contrairement aux moteurs précédents, les turbomachines sont des machines à écoulement continu. Dans ces dernières machines, les évolutions des fluides moteurs ont lieu dans des enceintes successives et juxtaposées, contrairement aux moteurs alternatifs où ces transformations s'opèrent dans le même espace, le cylindre.

La chaleur est produite par une combustion dans une chambre de combustion d'un combustible généralement liquide (kérosène par exemple). Cette combustion augmente la pression du gaz (air + combustible). Ce gaz sous pression traverse une chambre de détente à volume constant constituée d'un arbre moteur doté d'ailettes (turbine de détente). De l'énergie est alors fournie à cet arbre sous forme d'un couple moteur qui sera utilisé d'une part vers les consommateurs, d'autre part vers un compresseur (turbine de compression) qui permet la puissance fournie. En effet la pression de l'air augmentant, la masse d'air aspirée augmente, on peut brûler davantage de kérosène, et la puissance disponible est donc augmentée (par rapport à une turbine qui ne disposerait pas d'étage compresseur en entrée)[1].

I.3.3. Moteur WANKEL à piston rotatif :

Le moteur rotatif WANKEL est le résultat d'une importante d'étude menée de 1945 à 1954 par l'ingénieur WANKEL sur les différentes solutions de moteur rotatif. En conclusion, il estima que la meilleure était de faire travailler en moteur, le compresseur rotatif réalisé par Bernard Maillard en 1943[1].

I.4. Moteur à combustion externe :

I.4.1. Machines à vapeur :

La chaleur est produite dans une chambre de combustion (chaudière) séparée de la chambre de détente. Cette chaleur est utilisée pour vaporiser de l'eau. La vapeur d'eau obtenue par cette vaporisation est alors envoyée dans la chambre de détente (cylindre) où elle actionne un piston. Un système bielle manivelle permet alors de récupérer l'énergie mécanique ainsi produite en l'adaptant aux besoins. L'eau qui est fournie à l'évaporateur est transformée en vapeur d'eau par apport de chaleur. Ce gaz (vapeur d'eau sous pression) est distribué vers le piston où il fournit du travail qui sera utilisé par le système bielle manivelle. Les distributeurs permettent de mettre chaque face du piston alternativement à l'admission ou à l'échappement[1].

I.4.2. Moteurs Stirling:

Le moteur Stirling, appelé parfois moteur à combustion externe ou moteur à air chaud est inventé en 1816 dont on reparle de plus en plus aujourd'hui. Le moteur comprend deux pistons A et B et un régénérateur qui absorbe et restitue de la chaleur au cours du cycle. Il existe plusieurs types de moteur Stirling ; pour l'illustration, on ne donne que le schéma d'un moteur alpha[1].

I.5 Historique du moteur Diesel

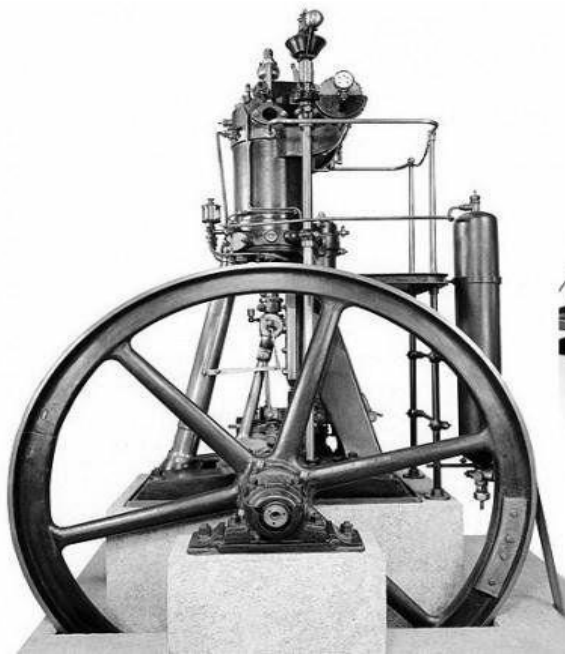
En 1892, Rudolf Diesel, ingénieur et inventeur allemand, dépose le brevet du premier moteur à allumage par compression. En 1897, il parvient à construire un prototype fonctionnel, marquant une avancée majeure dans l'histoire de la mécanique. Ce moteur repose sur un principe novateur : l'air est fortement comprimé dans le cylindre, ce qui élève sa température, puis le carburant est injecté et s'enflamme spontanément sans besoin d'étincelle.

Dès ses premières recherches, Diesel envisage l'utilisation d'huiles végétales comme carburant. Lors de l'Exposition universelle de Paris en 1900, son moteur est présenté fonctionnant à l'huile d'arachide. Cette démonstration visionnaire constitue les prémices du biodiesel moderne, prouvant que des carburants issus de l'agriculture pouvaient alimenter des machines industrielles.

Au fil du temps, le moteur diesel s'est imposé comme une pierre angulaire de l'industrialisation mondiale. Sa robustesse et son efficacité énergétique lui ont permis de motoriser le transport de marchandises et de personnes (camions, trains, navires, autobus), de soutenir l'agriculture et la construction par des machines puissantes, et de fournir de l'électricité dans des zones isolées ou en cas d'urgence grâce aux génératrices[2].

- 1897 : Le premier moteur conçu par l'ingénieur thermicien Rudolf Diesel entre en fonctionnement en Allemagne. Issu de travaux théoriques visant à améliorer le rendement thermodynamique, ce moteur atteint un rendement de 26,2 % – contre 20 % pour les moteurs à essence de l'époque – et développe une puissance de 27 kW.

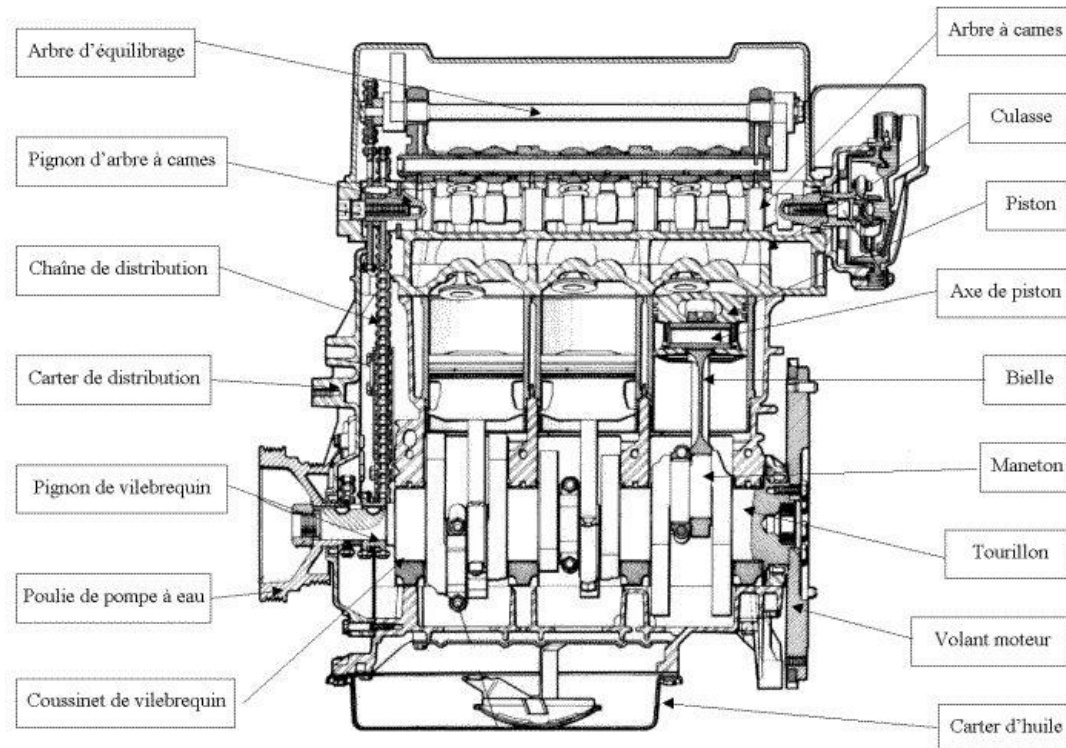
- 1936 : Mercedes-Benz produit en petite série la première automobile à moteur Diesel, la 260 D.
- 1938 : Peugeot réalise une série de mille exemplaires du modèle 402 Diesel.
- 1973 : Le choc pétrolier favorise la généralisation des véhicules à moteur Diesel dans l'automobile particulière.
- 1988 : Fiat lance la première voiture de série équipée d'un moteur Diesel à injection directe.
- 1989 : Audi présente le premier véhicule doté d'un moteur Diesel à injection directe à régulation électronique.
- 1998 : Premières applications commerciales de l'injection directe à rampe commune (Common Rail), développée par Bosch, sur des véhicules de série.
- 2000 : Plusieurs constructeurs européens proposent une version de leur véhicule de prestige équipée d'un moteur V8 Diesel à injection directe à rampe commune[3].



FigureI.1 Premier moteur diesel de 1897.

I.5.1. Les organes du moteur diesel :

Le moteur Diesel, comme tout moteur à combustion interne alternatif, est constitué d'un ensemble d'organes mécaniques dont la fiabilité et la synchronisation sont essentielles au bon fonctionnement. Ces organes peuvent être classés en trois catégories : les organes fixes, les organes mobiles et les systèmes auxiliaires.



FigureI.2 structure d'un moteur diesel.

I.5.1.1. Organes fixes

Bloc-cylindres

Structure de base rigide contenant le cylindre. Il guide le piston, supporte le vilebrequin et intègre les circuits de refroidissement (chemises d'eau) et de lubrification (galeries d'huile).



FigureI.3 bloc-cylindres

Culasse

Ferme hermétiquement la partie supérieure du cylindre. Elle loge les soupapes d'admission et d'échappement, l'injecteur, et forme avec le piston la chambre de combustion. Dans un moteur monocylindre, sa conception est simplifiée pour faciliter l'accès aux capteurs.



FigureI.4 culasse

Joint de culasse

Assure l'étanchéité entre le bloc-cylindres et la culasse. Il doit résister aux fortes pressions (jusqu'à 200 bars) et aux températures élevées.



Figure I.5 joint de culasse

Carter

Il sert de réserve pour l'huile de lubrification et participe également à son refroidissement



Figure I.6 Carter

I.5.1.2. Organes mobiles**Piston**

Transmet la force des gaz brûlés à la bielle. Il subit des contraintes thermiques et mécaniques très élevées (température de pointe $> 400^{\circ}\text{C}$). Dans les moteurs Diesel à injection directe, le piston comporte une cuvette (bowl) de forme complexe pour favoriser le mélange air-carburant.



Figure I.7 piston

Segments

Assurent l'étanchéité entre le piston et le cylindre (segments de feu), régulent l'huile (segment racleur) et participent au refroidissement du piston.



Figure I.8 segments

Bielle

Liaison mécanique entre le piston et le vilebrequin. Elle transforme le mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement rotatif. Sa conception doit résister à la fois à la compression et à la traction.



Figure I.9 bielle

Vilebrequin

Convertit le mouvement alternatif des bielles en couple moteur rotatif. Il est équipé de contrepoids pour équilibrer les forces d'inertie. Dans un moteur monocylindre, l'équilibrage est un défi spécifique nécessitant des masses supplémentaires.



Figure I.10 vilebrequin

Volant d'inertie

Accumule l'énergie cinétique pour régulariser la rotation du moteur. Il porte également la couronne dentée pour le démarreur.



Figure I.10 volant d'inertie

I.5.1.3. Systèmes de distribution

Le système de distribution gère l'admission de l'air frais dans les cylindres puis la vidange des gaz brûlés. Il est constitué d'éléments mobiles, les soupapes qui laissent entrer et sortir les gaz du cylindre par les ports d'admission et d'échappement. Au repos, elles sont maintenues fermées par des ressorts de rappel, l'ouverture est contrôlée mécaniquement par le système composé de l'arbre à cames, des poussoirs et des culbuteurs. L'actionnement des soupapes est aussi réalisé par des systèmes électromécaniques en cours de développement qui équiperont les moteurs sans arbre à cames dans les années à venir. L'arbre à cames est couplé au vilebrequin via une courroie de distribution de telle sorte que sa vitesse de rotation soit deux fois inférieure à celle du vilebrequin. Ainsi, l'ouverture et la fermeture des soupapes sont parfaitement synchronisées avec les mouvements du piston [4].

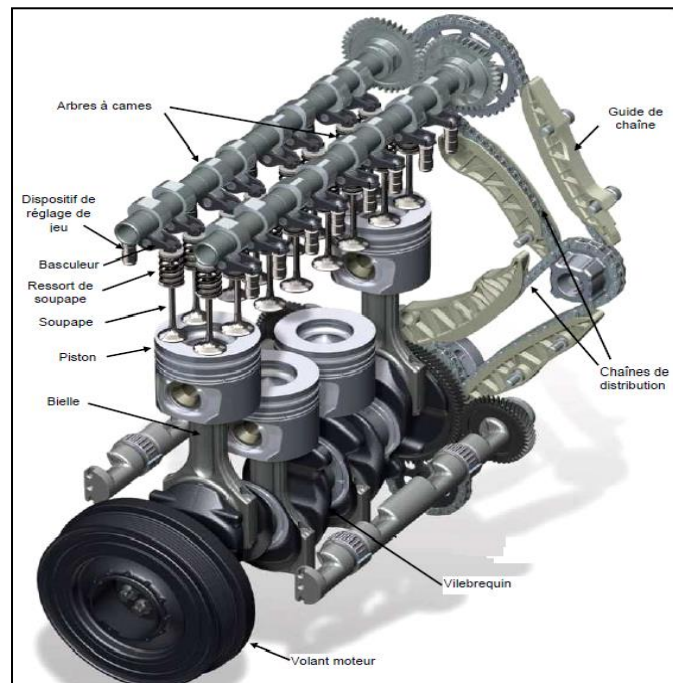


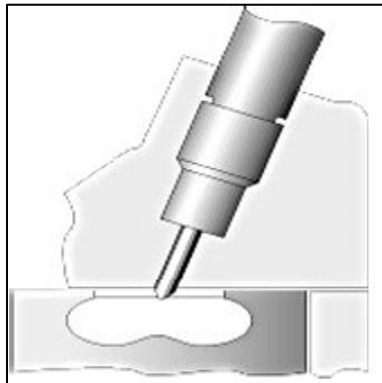
Figure I.11 Dispositif de distribution.

I.5.2. Les types d'injection dans le moteur Diesel

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

➤ **Moteurs à injection directe :**

Le moteur à injection directe s'impose pour son rendement supérieur à ceux des moteurs à injection indirecte. En effet, le rapport entre la surface et le volume de la chambre de combustion est nettement plus faible pour un moteur à chambre à espace mort unique que pour un moteur à préchambre ; de plus, la durée de la combustion est plus courte dans un moteur à injection directe. Ces deux paramètres diminuent les échanges thermiques entre la chambre de combustion et le système de refroidissement, facteurs de perte de rendement. Les problèmes liés à l'injection directe sont de deux ordres : bruits de combustion et émission d'oxyde d'azote (NOx). L'apparition de la régulation électronique dans les systèmes d'injection a permis de stabiliser et d'affiner les réglages de base, tant au niveau du moment d'injection que du débit de combustible. Ces différents systèmes d'injection mécaniques par pompe distributrice, régulés ou non de manière électronique, présentent comme caractéristique commune la variation de la pression d'injection en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Cette variation de pression d'injection rend difficile une maîtrise totale de la combustion.



FigureI.12 injection directe[3]

Les TDI dans le groupe W.W., les "anciens moteurs" 90 et 110 CV des Golf et Passat par exemple, les DTI chez Renault, et les TDDI (ou les transit) chez Ford, les Iveco et les Fiat TDI équipés des moteurs SOFIM sont des moteurs Diesel à injection directe (direct injection en anglais). Ils sont équipés d'une pompe injection rotative HP semi-Automatique (avec des éléments électroniques et parfois même un calculateur). La pompe à injection distribue le carburant successivement à chaque cylindre en ouvrant les injecteurs les uns après les autres par la pression du gasoil mais la l'injecteur injecte directement dans le cylindre. Leur pression d'injection est comprise entre 180 et 250 bar. Ces moteurs ne sont pas (en général) équipés de bougies de préchauffage, il n'est pas nécessaire de préchauffer le moteur pour démarrer Ils sont par contre souvent équipe d'un Thermostat situé dans la pipe d'échappement pour réchauffer l'entrée d'air (au démarrage)[3].

➤ **Moteurs à injection indirecte :**

Traditionnellement, c'est la solution de l'injection indirecte qui a été employée, car elle constitue le moyen le plus simple de créer une turbulence qui assure un mélange intime de la dose de

carburant avec l'air déjà fortement comprimé dans la chambre de combustion. Aussi, dans un moteur à injection indirecte, le carburant n'est pas injecté directement dans la chambre de combustion principale, mais il est envoyé dans une petite chambre de turbulence en spirale (appelée aussi chambre de précombustion) où s'amorce en réalité la combustion.

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

Dans ces deux cas, la combustion se déroule dans deux volumes séparés : une chambre, représentant 30 à 60% du volume total, qui reçoit l'injection du carburant et où s'amorce la combustion, et une chambre principale dans laquelle elle s'achève. L'injection du carburant dans ce petit volume relativement chaud permet de réduire le délai d'allumage du combustible. Seule la quantité minimum de combustible nécessaire à l'amorçage de la combustion s'enflamme, le reste se trouve chassé de la préchambre par l'augmentation de pression et la combustion se poursuit dans la chambre principale. Les moteurs à injection indirecte remplissent les conditions requises pour son application à l'automobile, à savoir un relatif silence de fonctionnement et un faible taux d'émissions de NOx. Le second choc pétrolier en 1973 et les normes de dépollution toujours plus sévères ont amené les constructeurs à repenser le moteur Diesel en termes d'économie et de faible pollution. Ces véhicules sont équipés d'une pompe injection rotative HP (haute pression) semi-automatique (ou un peu d'électronique) qui distribue le carburant successivement à chaque cylindre en ouvrant les injecteurs les uns après les autres par la pression du gasoil qui est d'environ 130 bar[3].

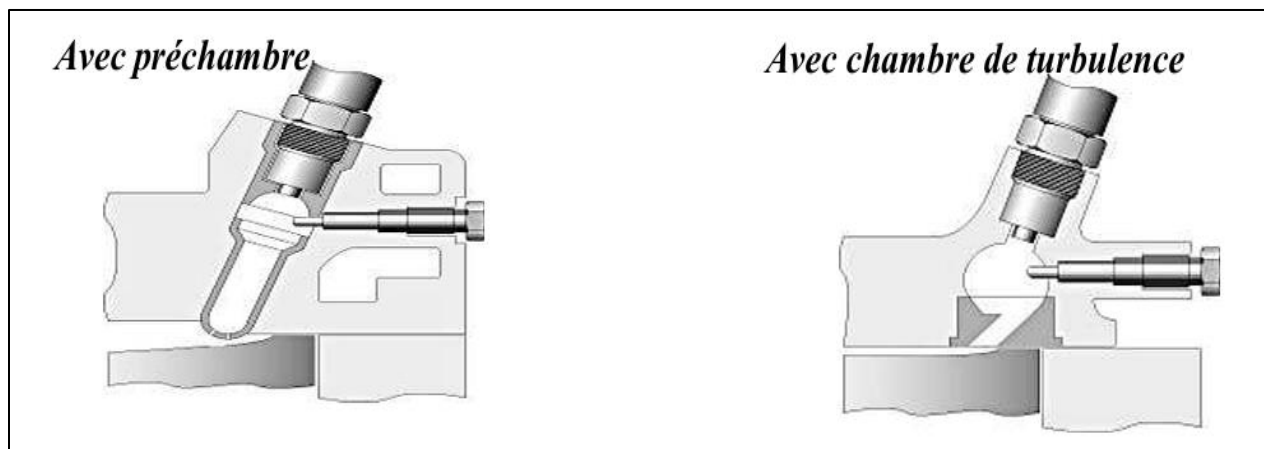


Figure I.13 injection indirecte (les deux structures)[3]

➤ **Moteurs à injection direct à rampe commune[5]**

Contrairement aux systèmes à pompe distributrice, la pression d'injection dans le système à rampe commune est indépendante de la vitesse de rotation du moteur et reste constante pendant la phase d'injection. Le pilotage de l'injection par un calculateur électronique laisse une grande

possibilité de programmation aux motoristes. La quantité de combustible injecté peut être fractionnée pour réaliser une pré-injection, ce qui permet de réduire les bruits de combustion et la formation de NOx. Cette faible quantité de carburant ($1 \text{ à } 4 \text{ mm}^3$) permet de préparer, à travers une augmentation de la température et de la pression dans la chambre de combustion, l'inflammation du combustible lors de l'injection principale.

Les véhicules équipés de filtres à particules présentent une phase de nettoyage qui nécessite une post-injection, rendue possible grâce au pilotage des injecteurs par un calculateur électronique. Le pilotage par une électronique numérique de tous les paramètres de l'injection facilite l'optimisation de fonctionnement du moteur

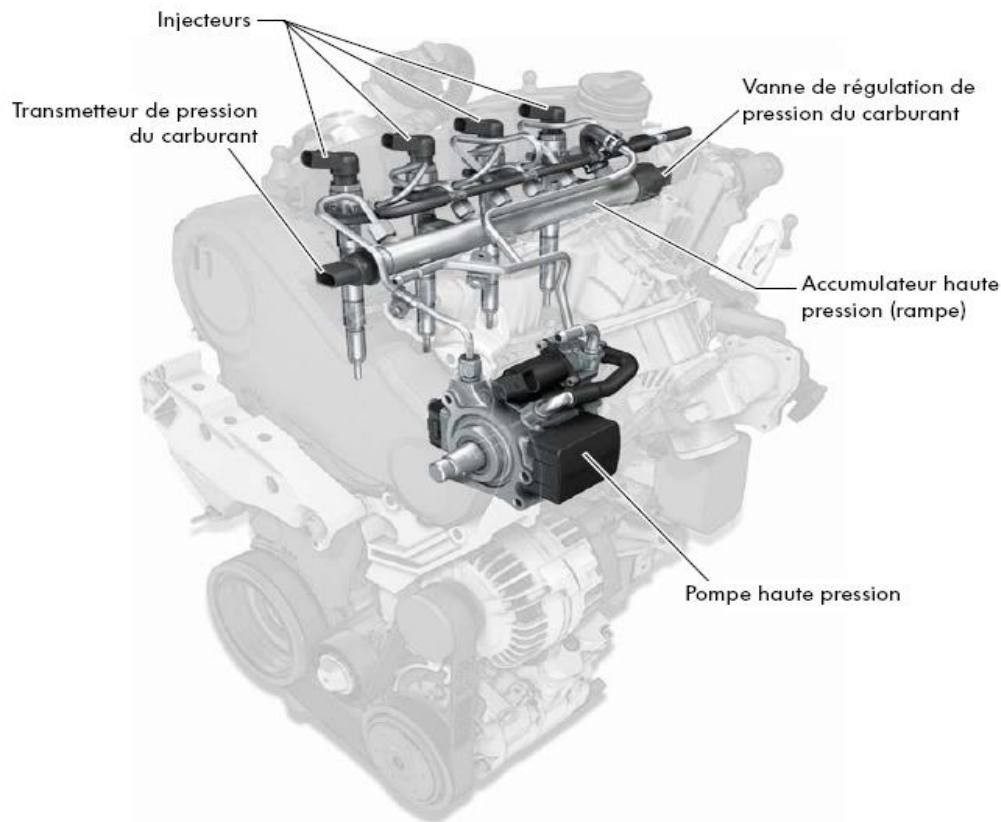


Figure I.14 le système d'injection rampe commune(moteur 2.0L TDI) [5]

I.5.3. Système alimentation en carburant d'un moteur diesel

I.5.3.1. L'alimentation en air :

I.5.1.1 Les moteurs à aspiration naturelle

Le moteur est dit à aspiration naturelle (ou atmosphérique) lorsque c'est le moteur lui-même qui aspire son air grâce à la dépression créée lors de la descente du piston au temps admission. C'est la solution technique la plus couramment employée sur les petits moteurs diesel.

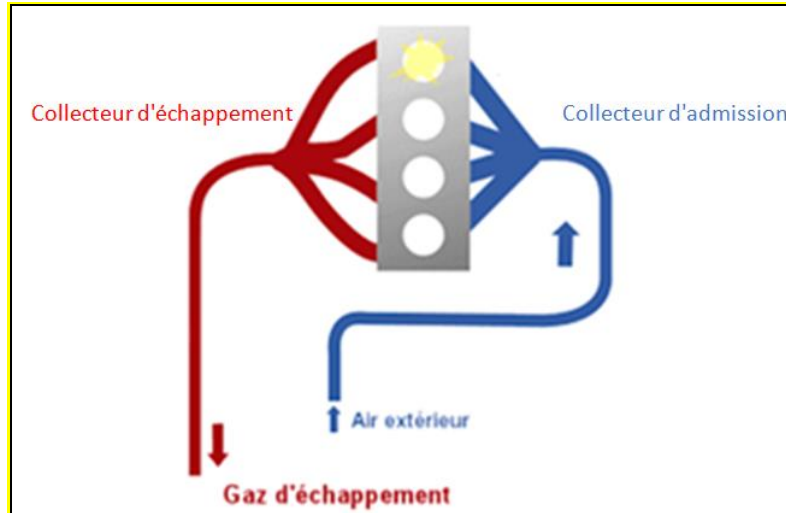


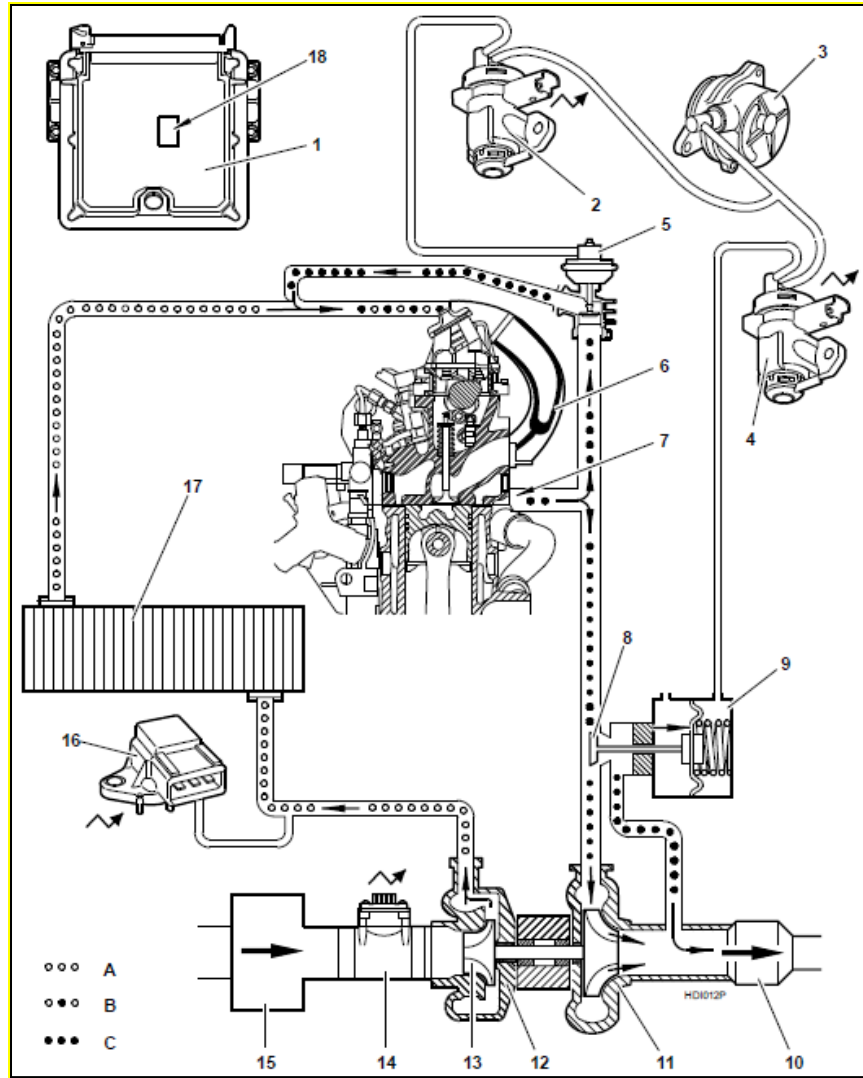
Figure I.15 Moteur à aspiration naturelle[5].

I.5.1.2 Les moteurs suralimentés

Afin d'augmenter le remplissage du cylindre lors de la phase admission d'air, certains moteurs sont munis d'un système de suralimentation. Cette suralimentation consiste à augmenter la masse spécifique de l'air en lui faisant subir une compression préalable. C'est le rôle du turbocompresseur ou du compresseur. Cette suralimentation permet une augmentation de la puissance du moteur pour une même cylindrée ; une amélioration des performances du moteur à haut régime et à forte charge. [1]

Il existe actuellement deux méthodes principales :

- La première consiste à laisser échapper, grâce à une vanne appelée communément en anglais « *Waste-Gate* » et contrôlée par un actionneur, une partie des gaz d'échappement sans passer par la turbine réduisant ainsi sa puissance de sortie.
- La deuxième méthode fait appel à des turbocompresseurs dits à « géométrie variable » appelés habituellement *VGT* (« *Variable Geometry Turbine* »). Ces derniers ont la particularité d'avoir une turbine dont l'angle d'inclinaison des aubes est variable grâce à un actionneur. Cette caractéristique permet d'ajuster la portion d'énergie récupérée des gaz d'échappement et de régler ainsi la vitesse de rotation du turbocompresseur[6].



A - Air. B - Gaz d'échappement + air. C - Gaz d'échappement

Figure I.16 Principe de fonctionnement de la suralimentation [6].

N DESIGNATION

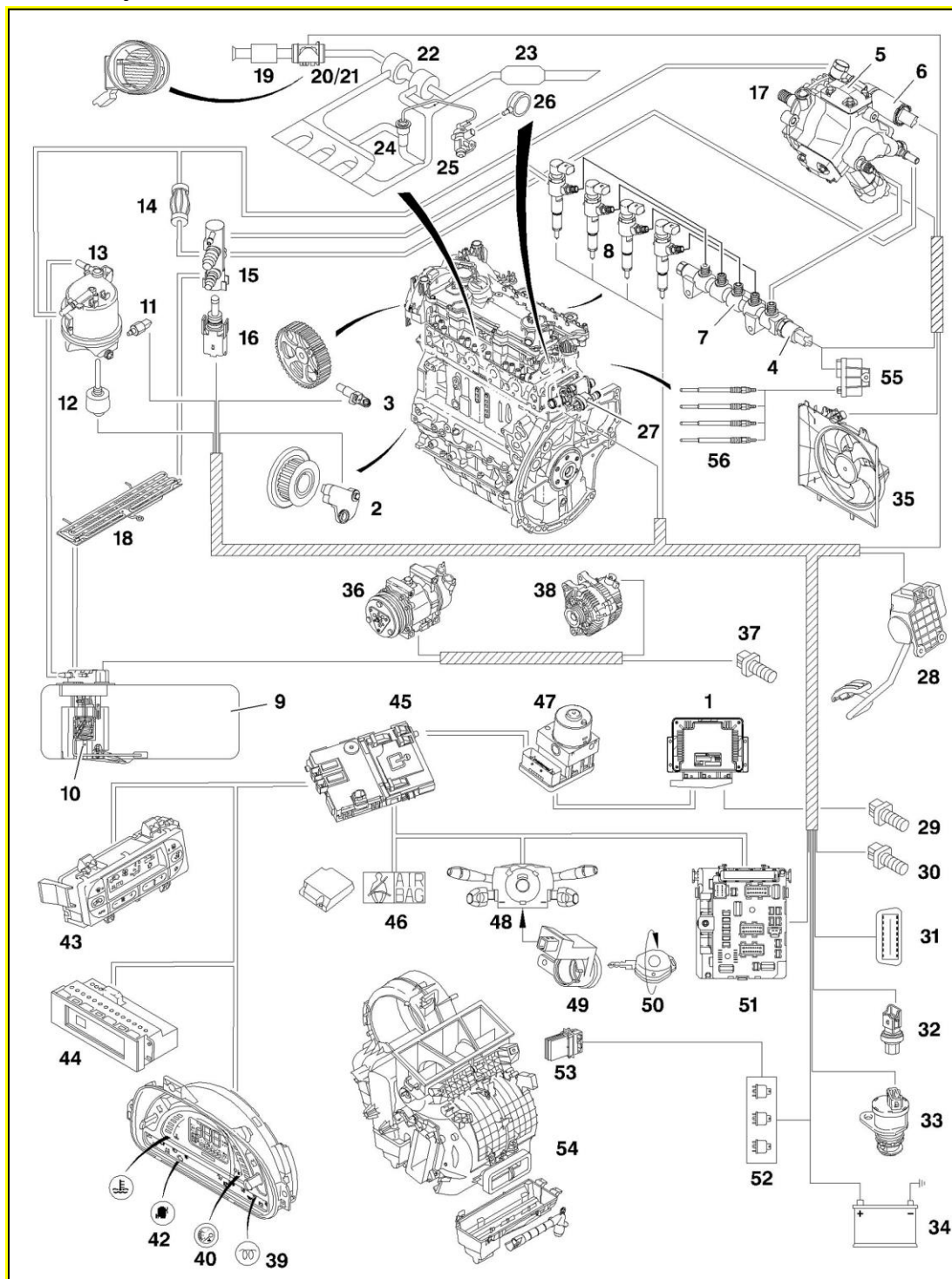
- 1 Calculateur d'injection
- 2 Electrovanne de régulation de recyclage (EGR)
- 3 Pompe à vide (à palettes, entraînement par l'arbre à cames)
- 4 Electrovanne de régulation de pression de suralimentation
- 5 Vanne de recyclage des gaz d'échappement (EGR)
- 6 Repartition d'admission d'air
- 7 Collector des gaz d'échappement.
- 8 Soupape régulatrice de pression de suralimentation
- 9 Capsule pneumatique de commande de la soupape régulatrice de pression de suralimentation (sur turbocompresseur)

N DESIGNATION

- 10 Pot catalytique
- 11 Turbine d'échappement.
- 12 Turbo compresseur
- 13 Turbine d'admission d'air
- 14 Débitmètre d'air + sonde de température d'air
- 15 Filtre à air.
- 16 Capteur de pression tubulaire d'admission
- 17 Echangeur thermique air/air.
- 18 Capteur de pression atmosphérique (intégré au calculateur d'injection)

I.5.3.2 Exemple d'un système d'alimentation air/carburant

La figureI.17 montre la disposition générale d'un système d'alimentation pour un moteur diesel dv4td à injection directe suralimenté.



FigureI.17 Disposition générale d'un moteur dv4td[6].

1 - Calculateur injection

2 - Capteur régime

29 - Contacteur d'embrayage

30 - Contacteur de frein secondaire

3 - Capteur de référence cylindre	31 - Prise diagramme
4 - Capteur haute pression rampe injection	32 - Capteur de pression linéaire
5- Régulateur de pression rampe haute pression	33- Capteur vitesse véhicule (si pas d'ABS)
6 - Actuateur de débit	34 – Batterie
7 - Rampe haute pression	35 – GMV
8 - Injecteurs	36 – Compresseur
9 – Réservoir	37 - Contacteur de frein principal
10 - Sonde niveau carburant	38 – Alternateur
11 - Sonde de présence d'eau dans gazole	39 - Indicateur température moteur
12 - Réchauffeur électrique gazole	40 - Alerte température
13 - Filtre gazole	41 - Voyant pré-chauffage
14 - Pompe d'amorçage (manuel)	42 - Voyant diagramme
15 - Raccordement	43 - Calculateur climatisation
16 - Sonde température carburant	44- Information consommation message alerte
17 - Pompe à carburant haute pression	45 – BSI
18 - Refroidisseur carburant	46 - Airbag info coupure injection
19 - Filtre à air	47 - ABS (suivant équipement)
20 - Débitmètre	48 - commande 2000 (commande RVV)
21 - Sonde température air	49 - Antenne transpondeur
22 - Turbocompresseur	50 - Clé de contact
23 - Catalyseur	51 – BSM
24 - Vanne EGR	52 - Boîte relais de chauffage additionnel
25 - Electrovanne EGR	53 - Résistance chauffage additionnel
26 - Pompe à vide	54 - Groupe chauffage
27 - Sonde température moteur	55 - Boîtier pré-chauffage
28 - Capteur pédale accélérateur	56 - Bougies de pré-chauffage

I.5.4. Principe de fonctionnement du moteur Diesel :

Le moteur diesel est un moteur thermique qui exploite la combustion interne afin de transformer l'énergie chimique contenue dans le carburant en énergie mécanique utile. Ce processus se déroule en deux étapes principales : d'abord, le carburant brûle et libère de l'énergie sous forme de chaleur ; ensuite, cette chaleur provoque la dilatation des gaz emprisonnés dans le cylindre, lesquels, en se dilatant, déplacent le piston. Le mouvement alternatif du piston est ensuite converti en mouvement rotatif grâce au vilebrequin.

Pour assurer cette conversion d'énergie, tout moteur à combustion interne doit passer par quatre phases essentielles : l'admission, la compression, la combustion (ou phase de puissance) et l'échappement. La manière dont ces phases sont ordonnées et synchronisées détermine le type de moteur. Les moteurs diesel se répartissent ainsi en deux grandes catégories : les moteurs à deux temps et les moteurs à quatre temps.

Le terme « cycle » désigne une séquence complète d'événements qui se répète. Dans un moteur à quatre temps, un cycle complet nécessite quatre courses du piston (admission, compression, combustion et échappement), ce qui correspond à deux rotations du vilebrequin, soit 720° ($360^\circ \times$

2). À l'inverse, dans un moteur à deux temps, l'ensemble des événements se réalise en une seule rotation du vilebrequin, soit 360° [7].

I.5.4.1. Le cycle à deux temps :

Le moteur à deux-temps doit passer par les quatre événements : admission, compression, combustion et échappement. Mais un moteur deux-temps nécessite seulement deux courses du piston pour accomplir un cycle complet. Par conséquent, il ne nécessite qu'une seule rotation du vilebrequin pour compléter un cycle. Cela signifie que plusieurs événements doivent se produire à chaque course pour que les quatre événements soient réalisés en deux courses, contrairement au moteur quatre-temps où chaque course contient essentiellement un événement.

Dans un moteur deux temps, l'arbre à cames est entraîné de manière à tourner à la même vitesse que le vilebrequin (rapport 1:1). La section suivante présente le fonctionnement d'un moteur diesel suralimenté à deux temps, équipé d'orifices d'admission et de soupapes d'échappement. Ce moteur possède un alésage de 3,5 pouces et une course de 4 pouces, avec un rapport de compression de 16:1. La description qui suit retrace le déroulement d'un cycle complet en commençant par la phase d'échappement. Il convient de noter que toutes les indications de calage fournies sont générales et peuvent varier selon le type de moteur[7].

I.5.4.1.1. Échappement et Admission :

À 82° après le point mort haut (PMH), lorsque le piston approche de la fin de sa course de puissance, l'arbre à cames d'échappement commence à soulever le poussoir de la soupape d'échappement. Le jeu des soupapes est alors pris, et 9° plus tard (91° PMH), le culbuteur force la soupape à se soulever de son siège, permettant aux gaz brûlés de commencer à s'échapper vers le collecteur d'échappement. La pression dans le cylindre diminue progressivement.

Lorsque le piston a parcouru environ les trois quarts de sa course descendante, soit à 132° de rotation du vilebrequin après le PMH, il découvre les conduits d'admission. Comme la soupape d'échappement est encore ouverte, l'air frais comprimé pénètre dans le cylindre, contribuant à son refroidissement et à l'évacuation des gaz résiduels. En général, les phases d'admission et d'échappement s'étendent sur environ 96° de rotation du vilebrequin.

À 43° après le point mort bas (PMB), l'arbre à cames amorce la fermeture de la soupape d'échappement. À 53° PMB (117° après PMH), la rotation de l'arbre à cames permet au ressort de rappeler complètement la soupape sur son siège. Enfin, lorsque le piston atteint 48° PMB (soit 5° après le début de la fermeture de la soupape d'échappement), les conduits d'admission sont à leur tour obturés par le piston[7].

I.5.4.1.2. Compression :

Après que la soupape d'échappement s'est refermée sur son siège (53° après PMH), la température et la pression dans le cylindre commencent à croître de manière similaire à ce qui se produit dans un moteur à quatre temps. À 23° avant le point mort haut (PMH), la came de l'injecteur initie le soulèvement du suiveur et de la tige de poussée, déclenchant ainsi l'injection

du carburant. Celle-ci se poursuit jusqu'à 6° avant PMH, couvrant une durée totale de 17° de rotation du vilebrequin.

I.5.4.1.3. Combustion :

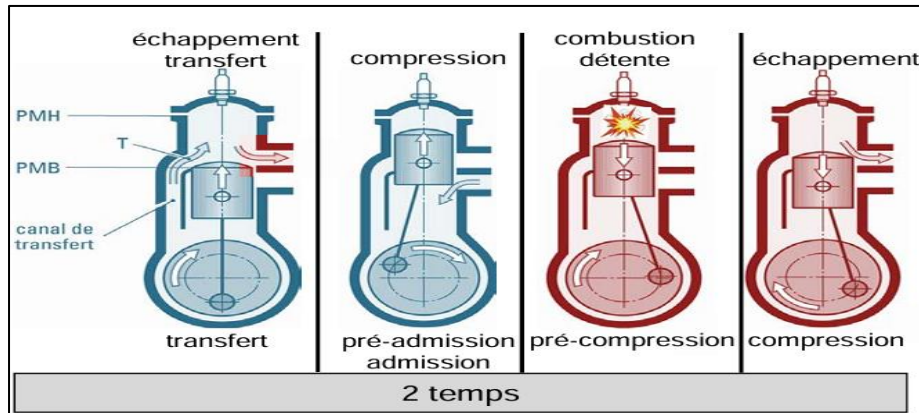


Figure I.18 le cycle à deux temps [8]

Le coup de puissance débute immédiatement après que le piston a dépassé le point mort haut (PMH). Cette phase se poursuit jusqu'à 91° après le PMH, moment où les soupapes d'échappement commencent à s'ouvrir, marquant ainsi la fin de la course de puissance et le commencement d'un nouveau cycle [7].

Tableau I.1: principe de fonctionnement de cycle à 2 temps : [7]

Étape du cycle	Angle vilebrequin ($^\circ$)	Événement principal
Fin de la course de puissance	82° après PMH	Début du soulèvement du poussoir de la soupape d'échappement
Ouverture échappement	91° après PMH	La soupape d'échappement s'ouvre, début de l'évacuation des gaz brûlés
Découverte admission	132° après PMH	Le piston découvre les orifices d'admission, entrée d'air frais comprimé et purge des gaz résiduels
Chevauchement admission/échappement	$\approx 96^\circ$ de rotation	Balayage du cylindre par air frais
Fermeture échappement (début)	43° après PMB	L'arbre à cames amorce la fermeture de la soupape d'échappement
Fermeture admission	48° après PMB	Le piston referme les orifices d'admission
Fermeture échappement (fin)	53° après PMB (117° après PMH)	La soupape d'échappement est complètement refermée
Compression	Après 53° PMH $\rightarrow$ jusqu'à PMH	Température et pression augmentent dans le cylindre

Étape du cycle	Angle vilebrequin (°)	Événement principal
Début injection	23° avant PMH	La came d'injecteur soulève le suiveur et la tige de poussée, début de l'injection
Fin injection	6° avant PMH	Fin de l'injection, durée totale $\approx 17^\circ$ de rotation
Coup de puissance	Après PMH $\rightarrow$ jusqu'à 91° après PMH	Combustion, expansion des gaz, déplacement du piston
Ouverture échappement (nouveau cycle)	91° après PMH	Début du cycle suivant

I.5.4.2. Le cycle à quatre temps :

Dans un moteur à quatre temps, l'arbre à cames est entraîné de manière à tourner à la moitié de la vitesse du vilebrequin (rapport 1:2). Ainsi, le vilebrequin doit effectuer deux rotations complètes pour que l'arbre à cames réalise un tour entier. La section suivante décrit le fonctionnement d'un moteur diesel à quatre temps, naturellement aspiré, équipé de soupapes d'admission et d'échappement. Ce moteur présente un alésage de 3,5 pouces, une course de 4 pouces et un rapport de compression de 16:1. La description qui suit retrace le déroulement d'un cycle complet en commençant par la phase d'admission. Il convient de noter que les indications de calage fournies sont générales et peuvent varier selon le type de moteur[7].

I.5.4.2.1 Admission :

Alors que le piston se déplace vers le haut et approche de 28° avant le point mort haut (PMH), l'arbre à cames commence à actionner le culbuteur. Ce mouvement entraîne la montée de la tige de culbuteur et la rotation du bras de levier autour de son axe. Une fois le jeu de soupape pris en compte, le bras de levier pousse la soupape d'admission vers le bas, ce qui provoque son ouverture. La course d'admission débute alors, tandis que la soupape d'échappement reste encore ouverte. L'écoulement des gaz d'échappement crée une dépression dans le cylindre, facilitant l'aspiration de l'air frais.

Le piston poursuit son mouvement ascendant jusqu'au PMH, moment où l'air frais continue de pénétrer dans le cylindre tandis que les gaz brûlés s'évacuent. Vers 12° après PMH, la came d'échappement amorce la fermeture de la soupape correspondante, qui se referme complètement à 23° après PMH grâce à l'action du ressort de soupape. La période durant laquelle les soupapes d'admission et d'échappement sont simultanément ouvertes est appelée chevauchement des soupapes. Dans cet exemple, elle s'étend sur 51°, permettant à l'air frais de balayer les gaz résiduels et de refroidir le cylindre. Dans la plupart des moteurs, le volume d'air frais balayé représente entre 30 et 50 fois le volume du cylindre, assurant à la fois le nettoyage et le refroidissement des composants.

Lorsque le piston dépasse le PMH et entame sa descente, son mouvement crée une aspiration qui continue de favoriser l'entrée d'air frais dans le cylindre[7].

I.5.4.2.2. Compression :

À 35° après le point mort bas (PMB), la soupape d'admission commence à se fermer. À 43° PMB (soit 137° avant le point mort haut, PMH), elle est complètement refermée sur son siège. À ce stade, la charge d'air présente dans le cylindre se trouve à la pression atmosphérique normale (≈ 1 bar) et à la température ambiante (≈ 300 K, soit environ 27 °C).

Lorsque le piston atteint environ 70° avant PMH, il a parcouru près de la moitié de sa course, ce qui réduit le volume du cylindre de moitié. La température s'élève alors à environ 450–500 K (≈ 180 –230 °C) et la pression atteint 8–10 bar. À 43° avant PMH, le piston a remonté davantage, réduisant de nouveau le volume de moitié ; la température atteint environ 600–650 K (≈ 330 –380 °C) et la pression 18–20 bar.

Lorsque le piston a parcouru environ 3/4 de sa course, le volume est encore une fois réduit de moitié, portant la température à environ 900–1000 K (≈ 630 –730 °C) et la pression à 35–40 bar. Avec une surface de piston de 9,616 pouces² (≈ 62 cm²), cette pression exerce une force d'environ 25 kN, soit près de 2,5 tonnes[7].

I.5.4.2.3. Combustion :

Durant la phase de combustion, le carburant liquide est injecté dans le cylindre à un moment et à un débit précisément contrôlé afin que la pression générée agisse sur le piston ni trop tôt ni trop tard. Le carburant pénètre dans un environnement où l'air est fortement comprimé et chauffé ; il ne peut brûler qu'après vaporisation et mélange intime avec l'oxygène. Les premières gouttelettes s'évaporent rapidement, ce qui refroidit localement l'air et nécessite un court délai avant que la température redevienne suffisante pour initier l'allumage. Une fois la combustion amorcée, la chaleur libérée favorise la vaporisation et l'inflammation du carburant supplémentaire injecté, tant que l'oxygène est disponible.

L'injection commence avant le point mort haut et se poursuit légèrement après, couvrant une durée d'environ 31° de rotation du vilebrequin. Les deux soupapes étant fermées, la charge d'air comprimée reçoit le carburant qui s'enflamme et libère rapidement une grande quantité de chaleur. Cette libération provoque une forte augmentation de la pression dans le cylindre, ce qui pousse le piston vers le bas et transmet la force au vilebrequin pendant la course de puissance.

Toutefois, l'énergie dégagée par la combustion n'est pas intégralement convertie en travail utile. Dans un moteur diesel à deux temps, environ 38 % de l'énergie est transformée en travail mécanique, tandis que 30 % sont dissipés dans le système de refroidissement et 32 % rejetés par les gaz d'échappement. En comparaison, un moteur diesel à quatre temps utilise environ 42 % de l'énergie pour le travail utile, avec 28 % de pertes dans le refroidissement et 30 % par l'échappement[7].

I.5.4.2.4. Échappement :

À mesure que le piston approche de 48° après le point mort bas (PMB), la came d'échappement commence à actionner le suiveur, ce qui provoque le soulèvement de la soupape d'échappement de son siège. Les gaz brûlés s'échappent alors du cylindre sous l'effet de la pression interne et sont dirigés vers le collecteur d'échappement.

Après avoir franchi le point mort bas, le piston entame sa remontée et atteint sa vitesse maximale vers 63° après le point mort haut (PMH), avant de commencer à décélérer. Cette diminution de vitesse favorise l'établissement d'une légère dépression dans le cylindre, ce qui accentue l'évacuation des gaz résiduels.

À 28° PMH, la soupape d'admission s'ouvre, permettant l'entrée d'air frais et marquant le début d'un nouveau cycle [7].

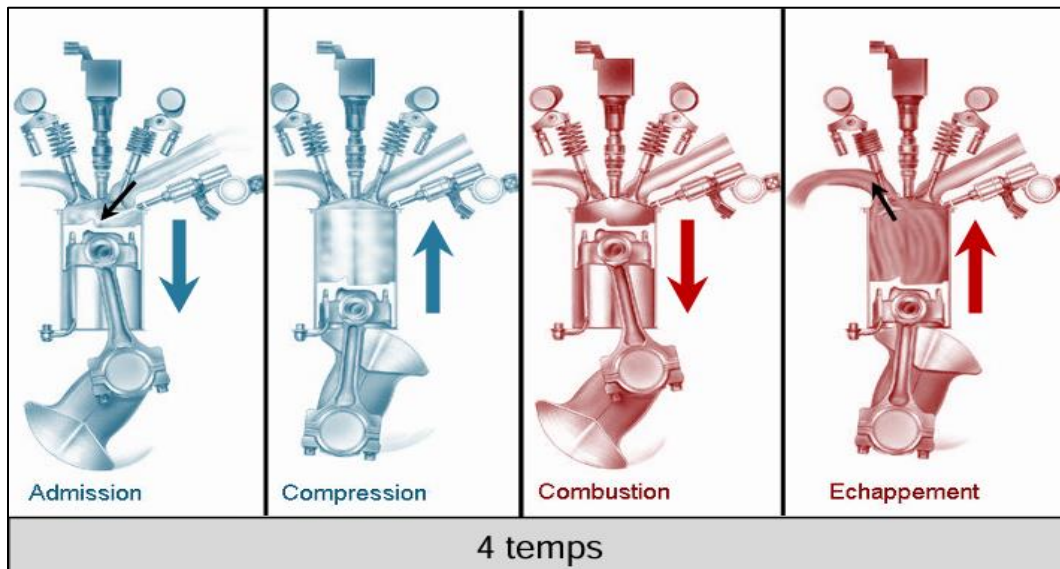


Figure I.19 le cycle à quatre temps [8]

I.6. Les systèmes annexes des moteurs diesel :

Un moteur diesel nécessite cinq systèmes de soutien essentiels pour assurer son fonctionnement : le système de refroidissement, le système de lubrification, le système d'injection de carburant, le système d'admission d'air et le système d'échappement. La taille, la puissance et l'application du moteur déterminent la dimension et la complexité de chacun de ces systèmes [7].

I.6.1. Le refroidissement:

I.6.1.1. Rôle du refroidissement : Le système de refroidissement du moteur a pour rôle :

- De dissiper le dégagement de chaleur produit par la combustion à l'intérieur des cylindres ;
- De maintenir les températures des différents organes à des niveaux compatibles avec une résistance mécanique suffisante.

Son rôle est donc essentiel pour la préservation du moteur.

I.6.1.2. Différents systèmes de refroidissement :

Les principaux systèmes de refroidissement sont :

- Le refroidissement par eau : une circulation d'eau interne refroidit le moteur, ensuite l'eau est refroidie dans un radiateur.
- Le refroidissement par air : un courant d'air frais passe sur le moteur et le refroidit.

En automobile, c'est le refroidissement par eau qui est le plus utilisé.

➤ **Le refroidissement par eau :**

Dans ce système, l'eau, chargée d'évacuer les calories du moteur, circule autour des chemises et à l'intérieur des culasses.

Le système de refroidissement comprend :

➤ **La pompe à eau :** La fonction de la pompe à eau est de faire circuler le liquide de refroidissement dans le moteur et le radiateur, pour éliminer les calories. La pompe est généralement entraînée par une poulie liée en rotation au vilebrequin par l'intermédiaire d'une courroie.

➤ **Le thermostat :** Pour assurer une montée en température rapide du moteur, il faut éviter de faire circuler le liquide de refroidissement dans le radiateur en dessous d'une certaine température. Ce rôle est assuré par le thermostat.

➤ **Le radiateur :** Le radiateur est un échangeur de chaleur eau/air utilisé pour abaisser la température du liquide de refroidissement.

➤ **Les ventilateurs :** L'air refroidisseur est forcé à travers le radiateur : Par l'avancement du véhicule (effet dynamique) et par un ventilateur dans les cas où l'effet dynamique est insuffisant (véhicule à l'arrêt, moteur en fonctionnement; embouteillages; montagne; ...).

➤ **Le vase d'expansion :** Lors de l'échauffement du moteur, le liquide de refroidissement se dilate et la pression monte dans le circuit. Les variations de volume entre moteur froid et moteur chaud sont absorbées par le volume d'air situé à la partie supérieure du vase d'expansion.

➤ **Le liquide de refroidissement :** Le liquide de refroidissement également appelé liquide de caloporteur est constitué d'eau, d'éthylène-glycol (antigel) et d'inhibiteur de corrosion. La présence d'éthylène-glycol augmente la température d'ébullition et abaisse celle de congélation.

➤ **Des durites :** Sont des conduites qui assurent la circulation de liquide de refroidissement à l'intérieur des culasses et du bloc moteur[9].

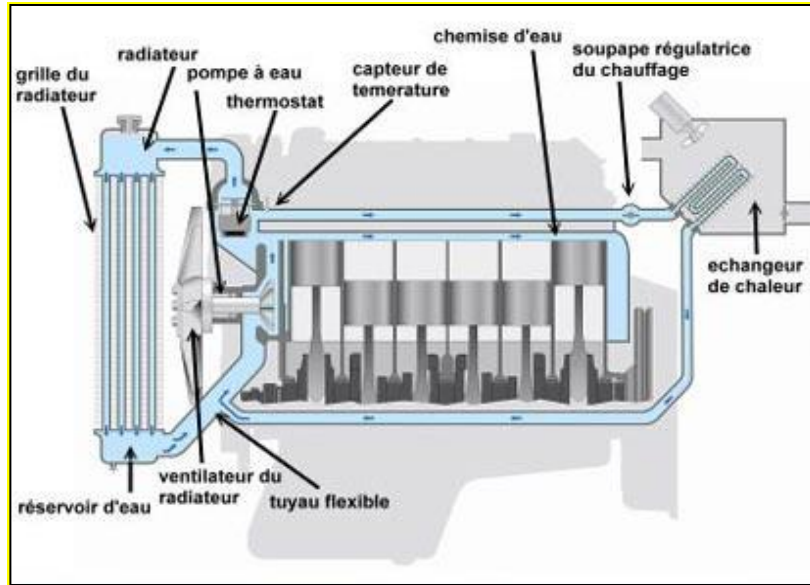


Figure I.20 circuit de refroidissement par eau[9].

I.6.2. Circuits et systèmes de graissage[10] :

I.6.2.1. Rôle de système : Ce système a plusieurs rôles :

- diminuer les frottements sur les pièces en mouvement;
- dissiper une partie de la chaleur de combustion;
- assurer l'étanchéité des cylindres;
- évacuer, lors des vidanges, les particules dues à l'usure et aux résidus de combustion.

I.6.2.2. Circuit de graissage :

On peut distinguer deux types de circuits de graissage et lubrification :

- Les circuits à graissage sous pression et à bain d'huile, le plus généralement utilisé sur les véhicules de tourisme.
- Le circuit à graissage sous pression et à carter sec, réservés à certaines applications particulières (véhicules tous terrains ou véhicules de compétition).

A. Graissage sous pression et à bain d'huile :

Le carter inférieur constitue une réserve d'huile. Cette dernière est aspirée au travers d'une crépine par une pompe, qui la refoule à une pression dont la valeur maximale (environ 4 à 5 bars) est contrôlée par une soupape de décharge, vers successivement :

- le filtre à huile;
- la rampe principale qui alimente les paliers de vilebrequin;
- la rampe de distribution qui permet de lubrifier les contacts cames-patins ou cames-poussoirs.

L'huile retombe ensuite par gravité dans le carter inférieur par des retours prévus à cet effet.

B. Graissage sous pression et à carter sec :

Dans ce cas l'huile qui retombe dans le carter inférieur est aussitôt aspirée par une pompe d'épuisement vers un réservoir d'huile souvent séparé du moteur. De là, l'huile est aspirée puis

refoulée sous pression par une pompe d'alimentation analogue, ainsi que le reste de circuit de graissage.

La pompe d'épuisement a un débit largement supérieur à celui de la pompe d'alimentation, dans un rapport de l'ordre de 1.5 à 2. Elle aspire donc, en même temps que de l'huile, une certaine quantité d'air. D'où l'intérêt de ce type de moteur, d'huiles ayant de bonnes propriétés anti-mousse. Le réservoir d'huile permet une désaération de l'huile avant son départ vers la pompe d'alimentation.

Les deux pompes, d'épuisement et d'alimentation peuvent être toutes deux des pompes à engrenages entraînées par un même arbre[10].

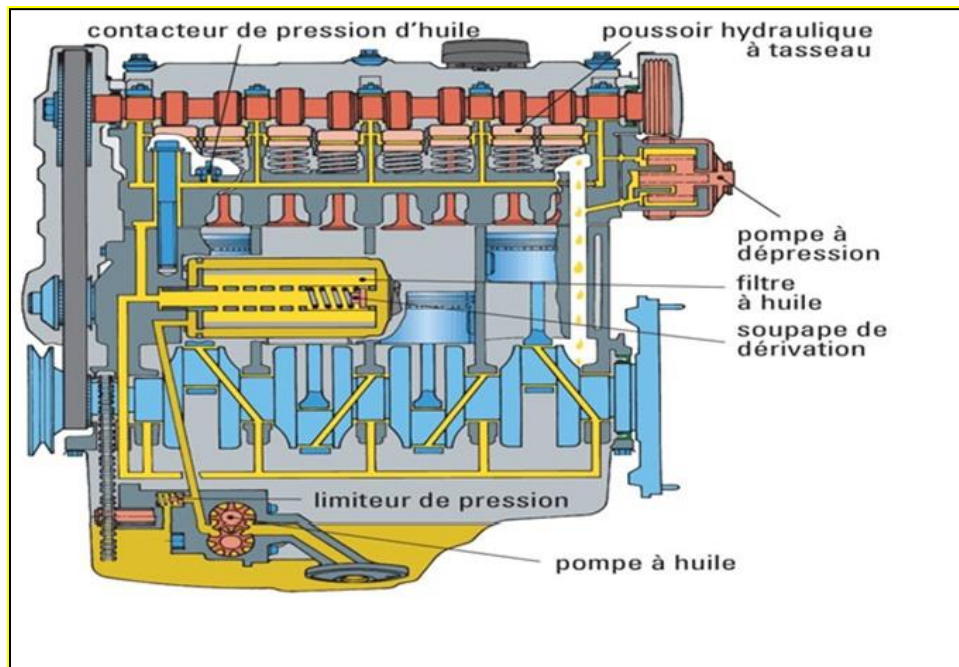


Figure I.21 Circuit de graissage sous pression à bain d'huile[10].

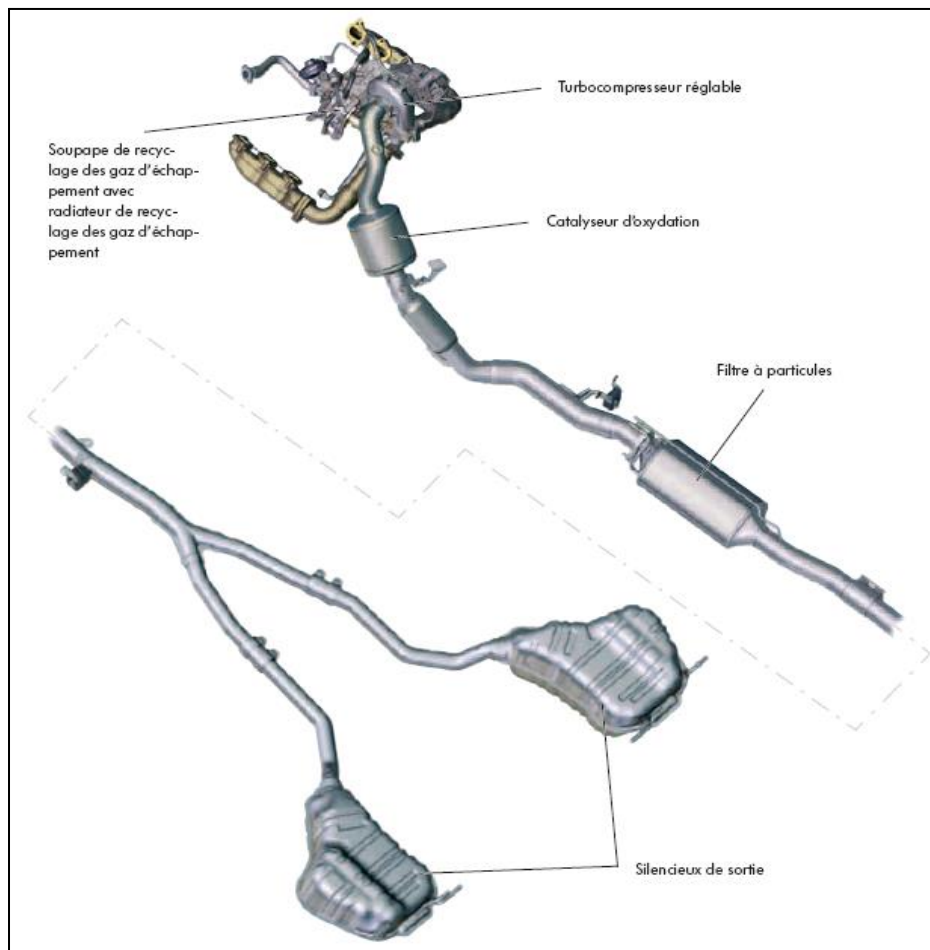
I.6.3. Système d'échappement :

Le système d'échappement d'un moteur diesel assure trois fonctions principales. Tout d'abord, il évacue les gaz brûlés loin du moteur afin qu'ils soient dilués dans l'atmosphère, ce qui permet de maintenir l'environnement autour du moteur habitable. Ensuite, il canalise et dirige ces gaz vers le turbocompresseur lorsqu'un tel dispositif est présent, contribuant ainsi à améliorer les performances du moteur. Enfin, il permet l'intégration de silencieux destinés à réduire le bruit généré par le fonctionnement du moteur [7].

Ce système remplit les fonctions suivantes :

- Il améliore l'efficacité du moteur en améliorant l'efficacité de l'émission des gaz d'échappement de l'engin.
- Il nettoie les gaz d'échappement en filtrant les éléments nocifs.
- Il diminue le bruit de l'explosion créée par les gaz d'échappement.

Le synoptique suivant vous montre les composants du système de filtre à particules. Ce synoptique montre un système monté sur une ligne d'échappement sur un moteur V6-TDI [11].



FigureI.22 Présentation de système d'échappement

I.7 Principales différences entre le moteur diesel et le moteur à essence :

On distingue deux grandes catégories de moteurs thermiques : les moteurs à allumage commandé et les moteurs à allumage par compression. Le moteur à essence et le moteur diesel appartiennent à cette même famille, mais présentent des caractéristiques différentes.

Dans un moteur à essence, la préparation du mélange carburé est dite quantitative : la masse de charge fraîche introduite dans le cylindre augmente avec l'accélération, mais le rapport air/carburant reste constant (≈ 16). En revanche, dans un moteur diesel, la préparation est dite qualitative : la masse d'air admise reste pratiquement constante, tandis que seule la quantité de carburant injectée varie avec le régime. Ainsi, le rapport air/carburant change selon la vitesse de rotation, ce qui confère au moteur diesel un rendement thermique supérieur à celui d'un moteur à essence de puissance équivalente.

Il existe également un troisième type de moteur thermique, le moteur HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition). Ce concept, proposé par Onishi en 1977, combine les avantages des moteurs à essence et diesel. Le carburant est préalablement mélangé et homogénéisé avec l'air avant d'être introduit dans le cylindre, mais l'allumage se fait par auto-inflammation, comme dans un moteur diesel. Le carburant privilégié pour ce type de moteur est le diméthyle éther. La réussite du HCCI dépend de plusieurs paramètres : une préparation homogène de la charge, un contrôle précis de la combustion en raison de la flamme froide, et l'utilisation d'un fort taux de gaz d'échappement recirculés ($\approx 70\%$)[12].

Tableau I.2- comparaison entre le moteur essence et le moteur diesel[12] :

Paramètres	Moteurs à Essence	Moteurs Diesel
Désignation	Moteur à allumage commandé par bougie	Moteur à allumage par compression
Carbururation	À l'extérieur par carburateur, par injection indirecte monopoint ou multipoints. À l'intérieur par injection directe.	À l'intérieur par injection directe.
Allumage	Explosion d'une charge homogène	Auto-inflammation d'une charge hétérogène
Carburant	Fractions légères d'hydrocarbures (Octane C_8H_{18} , Gasoline C_8H_{17})	Fractions lourdes d'hydrocarbures (Dodécane $C_{12}H_{26}$, Heptane C_7H_{16})
Cylindrée (cm^3)	800, 1000, 1100, 1200, 1400, 1600, 1800	1500, 1600, 1800, 1900, 2000, 2200,...
Piston	Plat	Creux
Formation du mélange	Quantitative	Qualitative
Taux de compression	Faible (1 à 10)	Élevé (15 à 23)
Turbulence	À limiter à cause de l'étincelle	À favoriser pour la préparation de la charge
Corps d'admission	Carburateur ou papillon motorisé + starter pour démarrage à froid	Système d'injection avec pompe à injection ou injecteur-pompe
Cycle théorique	Otto, Beau de Rochas	Cycle Diesel
Coefficient d'excès d'air	Entre 0,6 et 1,3	> 1
Flamme	Pré-mélange	Diffusion
Combustion	À volume constant	À pression constante
Puissance	Varie selon la masse de charge introduite dans le cylindre	Varie selon la masse de carburant injectée dans la chambre de combustion

Paramètres	Moteurs à Essence	Moteurs Diesel
Rendement thermique	Fonction du taux de compression	Fonction du taux de compression et du taux d'introduction
Pression en fin de compression	Varie avec la masse introduite (10–15 bar)	Ne varie pas (moteur atmosphérique) (20–30 bar)

I.8. Les avantages et les inconvénients du moteur diesel :

I.8.1. Avantages du moteur Diesel :

Rendement supérieur : grâce à un rapport volumétrique plus élevé, la combustion est plus complète, ce qui réduit la consommation spécifique (environ 200 g/kWh contre 330 g/kWh pour un moteur à essence).

Couple élevé et stable : le moteur Diesel fournit un couple important qui reste relativement constant à bas régime.

Coût du carburant réduit : le gasoil est généralement moins cher que l'essence.

Sécurité accrue : le point d'inflammation du gasoil étant plus élevé, le risque d'incendie est moindre.

Moins de gaz toxiques : les émissions contiennent moins de monoxyde de carbone que celles d'un moteur à essence[3].

I.8.2. Inconvénients du moteur Diesel :

Surdimensionnement mécanique : les pièces doivent être plus robustes pour supporter les contraintes.

Niveau sonore élevé : le fonctionnement est plus bruyant que celui d'un moteur à allumage commandé.

Température de combustion élevée : cela nécessite un système de refroidissement plus performant.

Démarrage à froid difficile : l'aptitude au démarrage est moins bonne que celle des moteurs à essence[3].

I.9. Le contrôle du moteur diesel :

Le contrôle d'un moteur diesel est accompli grâce à plusieurs composants : l'arbre à cames, l'injecteur de carburant et le régulateur. L'arbre à cames fournit le calage nécessaire pour injecter correctement le carburant, l'injecteur de carburant est le composant qui mesure et injecte le carburant, et le régulateur contrôle la quantité de carburant que l'injecteur doit injecter. Ensemble, ces trois composants principaux assurent que le moteur fonctionne à la vitesse désirée[7].

I.9.1. Injecteur de carburant :

Chaque cylindre d'un moteur diesel est équipé d'un injecteur de carburant, dont la fonction est de doser et d'introduire le carburant au moment opportun. Ces injecteurs sont actionnés par l'arbre à cames, qui fournit la temporisation et l'action mécanique nécessaires à l'injection. À chaque cycle, l'injecteur détermine la quantité de carburant à introduire dans

le cylindre. Cette quantité est réglée par un dispositif appelé crémaillère de carburant, dont la position est contrôlée par le régulateur du moteur. Le régulateur ajuste ainsi la position de la crémaillère afin de fournir la quantité de carburant requise pour maintenir la vitesse souhaitée.

Le fonctionnement interne de l'injecteur repose sur un ensemble de mouvements précis. Le carburant sous pression pénètre dans l'injecteur par le filtre, puis rejoint la chambre d'alimentation située entre le manchon du piston et le déflecteur de débordement. Le piston, animé par le mouvement du culbuteur transmis via le suiveur d'injecteur, se déplace verticalement dans son manchon. Lorsque le piston descend, une partie du carburant est refoulée vers la chambre d'alimentation jusqu'à ce que le port inférieur soit fermé. Le carburant restant est ensuite comprimé et dirigé vers l'alésage central du piston, puis expulsé par le port supérieur. Une fois les deux ports fermés, le carburant emprisonné sous le piston est soumis à une forte augmentation de pression, ce qui permet son injection efficace dans le cylindre.

Lorsque la pression interne atteint un niveau suffisant, la soupape de l'injecteur se soulève de son siège et le carburant est expulsé à travers de très petits orifices situés dans l'embout de pulvérisation. Ce processus permet l'atomisation du carburant directement dans la chambre de combustion. Une soupape de non-retour intégrée empêche tout reflux d'air provenant de la chambre vers l'injecteur.

Après l'injection, le piston est ramené à sa position initiale par le ressort suiveur. Lors de ce mouvement de retour, le cylindre haute pression se remplit à nouveau de carburant frais par les orifices d'alimentation. Cette circulation continue de carburant contribue non seulement à renouveler l'approvisionnement, mais aussi à refroidir l'injecteur et à éliminer efficacement les éventuelles bulles d'air.

L'injecteur comporte également un orifice de sortie permettant à l'excédent de carburant de rejoindre le collecteur de retour, puis le réservoir. Cet orifice est équipé d'un élément filtrant identique à celui de l'entrée, garantissant la propreté du circuit.

En plus du mouvement alternatif, le piston peut tourner autour de son axe grâce à un engrenage relié à la crémaillère de carburant. Cette rotation modifie la position des hélices usinées dans la partie inférieure du piston par rapport aux orifices du manchon. Ainsi, la fermeture des orifices peut être retardée ou avancée, ce qui influence le début et la fin de l'injection ainsi que la quantité de carburant délivrée. Lorsque la crémaillère est en position de non-injection, le carburant est refoulé vers la chambre d'alimentation sans pénétrer dans le cylindre. À l'inverse, en position d'injection maximale, la fermeture des orifices intervient rapidement, produisant une course effective maximale et une injection complète. Entre ces deux extrêmes, la rotation du piston ajuste progressivement la durée et la quantité d'injection en fonction des besoins du moteur[7].

I.9.2. Le régulateur :

La vitesse d'un moteur diesel est réglée exclusivement par la quantité de carburant injectée dans les cylindres. Contrairement à certains moteurs, le moteur diesel n'est pas

naturellement auto-limitant en vitesse ; il nécessite donc un dispositif permettant à la fois de modifier la vitesse (commande d'accélérateur) et de la maintenir constante une fois atteinte. Ce rôle est assuré par le régulateur, qui fournit un mécanisme de rétroaction sensible à la vitesse.

Un régulateur est essentiellement un dispositif conçu pour maintenir une vitesse moteur constante, indépendamment des variations de charge. Tous les régulateurs utilisés sur les moteurs diesel agissent en modulant la quantité de carburant délivrée aux cylindres ; ils sont donc classés comme régulateurs de vitesse. Il existe plusieurs types et variantes, mais le régulateur mécanique-hydraulique est le plus couramment employé.

La fonction principale d'un régulateur dépend de l'application du moteur. Dans le cas d'un moteur devant fonctionner à une vitesse fixe, indépendamment de la charge, on utilise un régulateur à vitesse constante. Si la vitesse doit varier manuellement ou par un dispositif externe, le régulateur est dit à vitesse variable. Lorsqu'il est conçu pour maintenir la vitesse dans une plage définie (au-dessus d'un minimum et en dessous d'un maximum), il s'agit d'un régulateur limiteur de vitesse. Enfin, le régulateur limiteur de charge agit en restreignant la quantité de carburant afin d'éviter que le moteur ne soit soumis à une charge excessive. Dans la pratique, de nombreux régulateurs combinent plusieurs de ces fonctions pour répondre aux exigences spécifiques de l'application.

Le régulateur contrôle la position du plateau de carburant grâce à une action combinée du piston hydraulique et d'un ensemble de masses centrifuges mécaniques, entraînées par l'arbre du souffleur du moteur. La figure xx fournit une illustration d'un schéma fonctionnel d'un régulateur mécanique-hydraulique. La position des masses centrifuges est déterminée par la vitesse du moteur. Lorsque le moteur accélère ou ralentit, les masses se déplacent vers l'intérieur ou l'extérieur. Le mouvement des masses centrifuges, dû à un changement de vitesse du moteur, déplace un petit piston (clapet pilote) dans le système hydraulique du régulateur. Ce mouvement ajuste le débit de fluide hydraulique vers un grand piston hydraulique (piston servomoteur). Le grand piston hydraulique est relié au plateau de carburant et son mouvement repositionne le plateau de carburant pour augmenter ou diminuer la quantité de carburant[7].

Photo

I.10. Protection du moteur diesel :

Un moteur diesel est équipé de dispositifs de protection destinés à signaler aux opérateurs toute condition de fonctionnement anormale et à prévenir les dommages susceptibles de compromettre son intégrité[7].

I.10.1. Dispositif de survitesse :

Étant donné qu'un moteur diesel n'est pas naturellement limité en vitesse, une défaillance du régulateur, du système d'injection ou une perte soudaine de charge peut entraîner une situation de survitesse. Ce phénomène est particulièrement dangereux, car il conduit généralement à une défaillance catastrophique du moteur, pouvant aller jusqu'à

son explosion. Pour prévenir ce risque, un dispositif de protection contre la survitesse, souvent basé sur un volant mécanique, intervient en interrompant l'alimentation en carburant et en déclenchant une alarme lorsque le régime prédéterminé est atteint. Cette action est généralement réalisée en isolant le régulateur de son alimentation en huile, ce qui le ramène en position de coupure de carburant, ou en contournant le régulateur pour commander directement le vérin de carburant vers cette position de sécurité[7].

I.10.2. Doublure de refroidissement :

Les moteurs diesel refroidis par eau peuvent être sujets à une surchauffe lorsque le système de refroidissement ne parvient pas à évacuer efficacement la chaleur résiduelle. L'élimination de cette chaleur est essentielle pour éviter le grippage du moteur, provoqué par l'expansion excessive des composants soumis à des températures élevées. Le circuit de refroidissement constitue généralement l'emplacement des capteurs de température, lesquels assurent une fonction d'alerte en cas de dépassement des seuils normaux.

Ces capteurs déclenchent une alarme dès qu'une température anormale est détectée, permettant une intervention rapide afin de prévenir des dommages graves. Le point de consigne est réglé de manière à offrir une marge de sécurité : si la condition est corrigée à temps, l'intégrité du moteur est préservée. En revanche, le maintien du fonctionnement à la température d'alarme, ou au-delà, entraîne inévitablement une détérioration du moteur[7].

I.10.3. Température de gaz d'échappement :

Dans un moteur diesel, la température des gaz d'échappement constitue un indicateur essentiel du fonctionnement. Une élévation anormale de cette température peut révéler une surcharge du moteur ou une baisse de performance liée à un balayage insuffisant, c'est-à-dire un refroidissement inadéquat des cylindres. Un fonctionnement prolongé dans ces conditions entraîne des risques de détérioration des soupapes d'échappement, des pistons et des parois de cylindres. En pratique, la surveillance de la température des gaz d'échappement est généralement limitée à une fonction d'alarme, permettant d'avertir l'opérateur avant que des dommages graves ne surviennent[7].

I.10.4. Basse pression d'huile de lubrification :

Une faible pression d'huile, ou une perte totale de pression, peut entraîner une destruction rapide du moteur en raison du manque de lubrification. C'est pourquoi la plupart des moteurs de moyenne et grande taille sont conçus pour s'arrêter automatiquement dans de telles conditions. L'absence de pression d'huile peut provoquer le grippage du moteur, et dans le cas des moteurs équipés de régulateurs mécano-hydrauliques, elle entraîne également l'arrêt du régulateur, faute d'alimentation en huile[7]. La surveillance est assurée par des capteurs de pression d'huile, qui déclenchent généralement l'arrêt du moteur. Sur les moteurs de grande puissance, ces capteurs comportent souvent deux seuils de déclenchement : le premier fournit une alarme précoce en cas de pression anormale, permettant une intervention rapide ; le second est réglé pour provoquer l'arrêt du moteur avant que des dommages irréversibles ne surviennent[7].

I.10.5. Pression élevée dans le carter :

Une pression excessive dans le carter est généralement provoquée par un phénomène de blow-by, c'est-à-dire le passage des gaz de combustion à travers les segments de piston vers le carter. Cette condition traduit un mauvais état du moteur et constitue un indicateur de défaillance mécanique. Dans la pratique, la surveillance de la pression du carter est utilisée principalement comme fonction d'alarme, permettant d'avertir l'opérateur avant que des dommages plus graves ne surviennent[7].

Chapitre II: Bancs d'essais moteurs et instrumentation

II.1. Introduction :

L'étude des moteurs thermiques, qu'ils soient à essence ou diesel, nécessite des moyens expérimentaux permettant de reproduire et de contrôler leurs conditions de fonctionnement. Le banc d'essais constitue à cet égard un outil essentiel, car il offre la possibilité d'évaluer les performances du moteur dans un environnement maîtrisé.

Cependant, l'efficacité d'un banc d'essais repose directement sur l'instrumentation qui lui est associée. Celle-ci permet de transformer les grandeurs physiques produites par le moteur en informations exploitables, facilitant ainsi la supervision et le suivi en temps réel. La relation étroite entre le banc d'essais et son instrumentation garantit la précision des mesures et la fiabilité des analyses.

Ce chapitre met donc en évidence le rôle complémentaire du banc d'essais et de l'instrumentation, en montrant comment leur intégration constitue la base indispensable pour la supervision et l'évaluation des moteurs thermiques.

II.2. Les bancs d'essais moteur :

II.2.1. Définition :

Un banc d'essais moteur est l'ensemble de matériels installés dans une salle généralement insonorisée et ventilée, permettant de reproduire le fonctionnement du moteur thermique dans des conditions réelles d'utilisation[13].

Il permet de déterminer les performances des moteurs à divers régimes par la mesure du couple, de la consommation et du rendement, et sert aussi au contrôle, au rodage et à la vérification des moteurs réparés. L'ensemble des opérations réalisées sur un moteur afin de s'assurer qu'il peut assurer une fonction requise constitue un essai, qui peut être de nature différente (essai de recette, essai de fin de rénovation, etc.).

Une cellule d'essais se compose principalement du moteur thermique, de la machine de charge et des instruments de mesure et de sécurité. L'ensemble est installé dans une salle équipée d'un système d'aération pour le renouvellement de l'air et l'évacuation des gaz chauds. Une salle de contrôle attenante permet de superviser le comportement du banc et le déroulement des essais en cours. Enfin, un système de contrôle et d'alarme est indispensable pour piloter le banc et assurer la sécurité en cas de problème ou d'émission de gaz toxiques[14].

Les bancs d'essais permettent de procéder à des essais comme :

- Essai de rodage : Cet essai est effectué lors du contrôle final de qualité du montage ou de la réparation, il permet de contrôler la régularité de fonctionnement de tous les éléments du moteur.

Dans ce type d'essai le moteur n'est soumis à aucun effort que celui de tourner par ses propres moyens, pour permettre le rodage des pièces mécaniques mise en jeu.

- Essai de performance : Il consiste à mettre le moteur en action dans les conditions semblables à celle d'utilisation et mesurer avec précision les paramètres nécessaires à l'appréciation quantitative des performances du moteur.

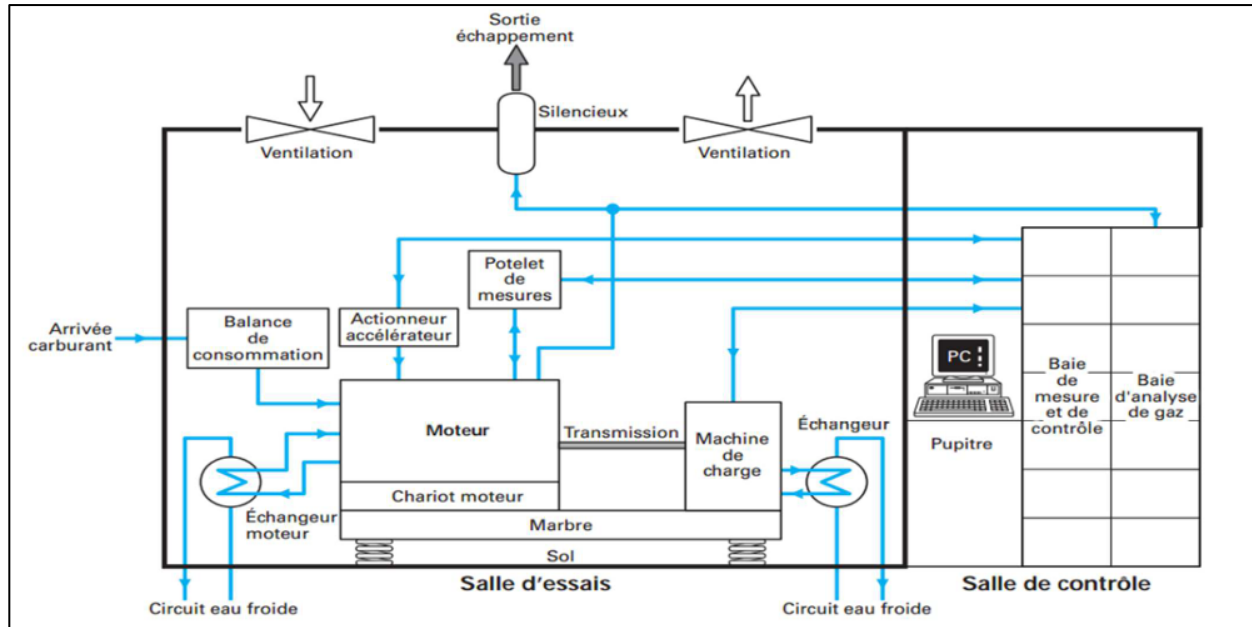
Le but des tests est de savoir si le moteur peut remplir d'une manière satisfaisante ses fonctions dans les différentes conditions de fonctionnement[14].

II.2.2. Architecture générale des bancs d'essais moteur :

Les bancs d'essais moteurs sont des installations lourdes. C'est-à-dire représentant un investissement important. Il faut donc constamment rechercher leur engagement maximal, c'est pourquoi l'architecture et l'organisation des bancs et de leur environnement sont adaptées à cette nécessité.

Autrefois, le moteur était installé directement sur la plate-forme de la cellule, l'équipement et la mise en ligne avec le frein étaient réalisés sur place, immobilisant ainsi le banc pendant plusieurs jours. Actuellement le moteur est préparé à l'extérieur du banc, sur un chariot ou une palette transportable où il reçoit tout son équipement (câblage, durites, etc.) et est aligné, par rapport à l'axe de l'élément de mise en charge, sur un gabarit. Il peut, le cas échéant, être mis en rotation sur un banc à vide afin de vérifier sa fonctionnalité ou être rodé sur un banc simple de façon à ne pas occuper une cellule spécifique par des essais sans rapport avec son équipement. L'installation dans la cellule est alors réalisée très rapidement (environ 1/2 h).

La règle de rengagement maximal conduit également à travailler 24 h sur 24, soit en assurant une présence humaine permanente, soit, et c'est ce qui devient la règle actuellement grâce aux développements de l'informatique, en automatisant au maximum toutes les fonctions de pilotage, d'acquisition et de sécurité. Le taux d'utilisation du banc est en moyenne de l'ordre de 50 à 60 % et peut atteindre 85 à 90 % ponctuellement en endurance (600 à 650 h de rotation par mois). Le schéma général d'un banc d'essais moteur est représenté sur la figure 2.2, chaque élément doit être défini en fonction du type de banc à réaliser[13].



FigureII.1 Schéma générale d'un banc d'essai [13]

II.2.2.1. Les éléments constitutifs dans la salle d'essais [13] :

- **La machine de charge :**

La machine d'absorption de puissance peut être constituée d'un frein à courants de Foucault, utilisé principalement lors des essais stationnaires (non dynamiques), ou de dynamomètres réalisés à partir de moteurs synchrones ou asynchrones. Dans le cas des essais dynamiques, des solutions mixtes sont employées, combinant un frein à courants de Foucault et un moteur électrique accouplé.

Cette machine nécessite un système de refroidissement, soit à eau, soit à air :

- **Freins à courants de Foucault :** l'énergie mécanique du moteur thermique est transformée en énergie calorifique, dissipée dans l'eau de refroidissement du frein. Cette eau chaude doit ensuite être refroidie par un échangeur de chaleur relié au circuit général de refroidissement de la cellule d'essais.
- **Dynamomètres synchrones ou asynchrones :** le refroidissement est assuré par des ventilateurs. L'énergie calorifique produite doit être prise en compte dans le bilan thermique global et évacuée par la ventilation générale de la salle d'essais.

- **Les supports moteur :**

Les supports moteurs sont généralement constitués de chariots de préparation et d'installation, conçus pour augmenter la productivité du banc d'essai. Ces chariots peuvent intégrer différents dispositifs permettant de rendre le moteur « autonome », ce qui facilite la vérification de son démarrage et réduit considérablement les temps de mise en place de l'ensemble sur le banc.

- **Accouplement moteur-machine de charge :**

La transmission entre le moteur et la machine de charge doit être dimensionnée avec précision en tenant compte des couples à transmettre et des inerties en présence. Elle doit également supporter les principales harmoniques d'excitation du moteur thermique lors des essais, comme les ordres 2 et 4 pour un moteur quatre cylindres en ligne quatre temps. Pour cela, il est nécessaire de concevoir une transmission dont la fréquence propre reste suffisamment basse afin d'éviter toute résonance, même aux vitesses de ralenti. Toutefois, cette condition n'est pas toujours réalisable, et il convient alors de vérifier que les harmoniques dangereuses du moteur, déterminées par le cycle (deux temps ou quatre temps), le nombre et l'arrangement des cylindres (en ligne, en V, etc.) ainsi que l'ordre d'allumage, ne risquent pas d'entrer en résonance avec la fréquence propre de la transmission. Dans le cas ultime où une résonance s'avère inévitable, il est impératif d'avertir l'utilisateur du banc afin d'éviter de réaliser des points stationnaires sur les régimes concernés.

- **L'actionneur d'accélérateur :**

L'actionneur d'accélérateur est l'élément qui permet de reproduire les demandes de régime et/ou de couple nécessaires au cycle d'essais. Il doit être précis et reproductible afin de garantir un fonctionnement fiable dans le temps. Les dispositifs les plus performants sont réalisés à partir de moteurs électriques linéaires, car ils offrent une rapidité d'exécution et suppriment tout jeu mécanique entre l'actionneur et l'organe commandé, assurant ainsi une réponse optimale aux sollicitations du banc d'essais.

- **Les ventilateurs :**

La ventilation de la salle d'essais est indispensable pour évacuer les calories produites par le moteur en fonctionnement. Le débit des ventilateurs doit être dimensionné de manière à assurer un refroidissement efficace de la salle, en tenant compte de la puissance maximale des moteurs installés sur le banc d'essais.

- **Les moyens d'évacuation des gaz brûlés :**

L'évacuation des gaz d'échappement doit être assurée par un silencieux afin de réduire le niveau sonore. Ces gaz, plus lourds que l'air et dangereux pour la santé, ne doivent pas s'accumuler dans la partie basse de la salle d'essais. Pour garantir la sécurité, un système d'extraction est nécessaire. Comme ces gaz sont fortement oxydants, la solution la plus utilisée consiste à placer un ventilateur

qui souffle l'air de la cellule vers l'extérieur, au voisinage de l'extrémité de la ligne d'échappement. Ce procédé permet de diluer les gaz évacués sans qu'ils ne traversent les parties métalliques du ventilateur.

- **Les échangeurs thermiques :**

Les calories issues du circuit de refroidissement ou du circuit d'huile du moteur thermique, ainsi que celles provenant de l'échangeur d'air de suralimentation, doivent être évacuées par un échangeur de chaleur, généralement de type eau-eau, raccordé au circuit général de refroidissement du centre d'essais.

- **Le potelet de mesure :**

Le raccordement des mesures au système informatique de contrôle du banc d'essais se fait généralement par l'intermédiaire d'un potelet de mesure placé à proximité du moteur thermique. Ce potelet regroupe les différentes connexions ainsi que les cartes électroniques chargées de la conversion analogique-numérique. Grâce à ce dispositif, la transmission des données s'effectue directement en mode numérique, ce qui simplifie le câblage entre la salle d'essais et la salle de contrôle tout en rendant le système insensible aux perturbations électriques. Cette approche permet à la fois de réduire la distance entre la prise de mesure et le traitement électronique, et de faciliter les raccordements ou les éventuelles modifications de l'installation[13].

II.2.2.2. La salle de contrôle:

La salle de contrôle est l'espace dédié aux techniciens pour préparer et assurer le suivi des essais. Elle est insonorisée et séparée de la salle d'essais, tout en restant reliée par une porte d'accès facilitant le passage entre les deux zones. Dans la plupart des installations, une fenêtre permet également d'observer directement les moteurs en fonctionnement. Les éléments constitutifs de la salle de contrôle sont:

- **Baie de mesure et de contrôle :**

Regroupe l'ensemble des voies de mesure provenant du potelet installé dans la salle d'essais. Elle constitue l'unité centrale où sont rassemblés les équipements nécessaires au pilotage du banc. On y trouve notamment un PC industriel équipé du logiciel de contrôle et de supervision, les unités électroniques destinées à la commande de la machine de charge, les régulateurs de température ainsi que différents racks électroniques. Cet ensemble assure la gestion coordonnée des mesures et le bon fonctionnement du système d'essais.

- **Baie d'analyse de gaz :**

Cette unité regroupe les analyseurs nécessaires au calcul des émissions polluantes et du rapport air/carburant. Les principaux gaz mesurés sont l'oxygène (O₂), le dioxyde de carbone (CO₂), le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x) ainsi que les hydrocarbures imbrûlés (HC)[13].

II.2.3. Classification fonctionnelle des bancs d'essais[15]:

Il n'existe pas de banc d'essais universel capable de couvrir tous les types de tests. C'est pourquoi il est essentiel de définir ses besoins à travers un cahier des charges précis et détaillé. Chaque banc possède des fonctions communes, auxquelles s'ajoutent des spécificités propres à l'essai envisagé.

On distingue généralement quatre grandes familles : les bancs de fin de chaîne, les bancs de recherche, les bancs de mise au point et les bancs d'endurance. Les particularités de chacune seront présentées ci-après, sans entrer dans le détail technique.

II.2.3.1. Bancs de fin de chaîne :

Les bancs de fin de chaîne sont utilisés pour tester les moteurs immédiatement après leur fabrication sur les lignes de montage. Le moteur y est mis en rotation à vide pendant une quinzaine de minutes, ce qui permet d'effectuer les réglages nécessaires (ralenti, culbuteurs, courroies, etc.) ainsi que les vérifications de bon fonctionnement (fuites, nuisances, etc.). En général, ces bancs ne comportent pas de dispositif de mise en charge. Leur cahier des charges met l'accent sur l'automatisation et la rapidité d'exécution. Pour réduire le temps de mise en température, les circuits de refroidissement et d'huile sont portés à environ 50 à 60 °C grâce à une source de chaleur externe.

II.2.3.2. Bancs de recherche :

On distingue généralement cinq grandes familles d'essais de recherche : la combustion, les frottements mécaniques, la thermique, les vibrations et l'acoustique, ainsi que la visualisation des phénomènes (écoulements, combustion). Les cellules d'essais, fermées et équipées d'un seul banc, disposent d'une superficie importante (30 à 40 m²) permettant l'installation de machines ou de montages spécifiques. Leur équipement offre plusieurs possibilités :

- L'acquisition et le traitement partiel d'un grand nombre de paramètres (60 à 80 en continu, extensibles à 100 ou 200 grâce à une ou plusieurs centrales d'acquisition), avec une précision adaptée à la forte dynamique des mesures ;
- Le réglage en température et en hygrométrie de l'air comburant.

L'utilisation de génératrices sur les bancs de recherche en combustion et en frottements mécaniques, permettant l'étude en régimes transitoires.



Figure II.2 Image réelle de la cellule du MCI K9K au niveau du laboratoire LTE- ENPO-MA

II.2.3.3. Bancs de mise au point :

La mise au point du moteur au banc intervient après réception de l'avant-projet élaboré par le secteur recherche. Elle consiste à définir les principaux paramètres du moteur en accord avec le cahier des charges : lois d'arbres à cames, rapport volumétrique, géométrie de la préchambre de combustion, cartographie d'injection et d'allumage, systèmes d'admission et d'échappement, etc. Les moyens d'essais utilisés comprennent :

- Des bancs « classiques », similaires à ceux du secteur recherche ;
- Des bancs climatiques permettant de tester le moteur dans des conditions extrêmes (-40 à $+50$ °C) ;
- Des cellules altimétriques simulant à la fois des conditions sévères et le fonctionnement en altitude (jusqu'à 2000 m).

L'automatisation des essais constitue un axe majeur, permettant déjà la réalisation automatique d'études paramétriques complètes : enregistrement des points de fonctionnement (températures, pressions, régime, couple, concentrations de polluants, etc.) en fonction de paramètres tels que régime, couple, températures des fluides, taux de suralimentation, avance à l'injection ou richesse. Des recherches sont en cours pour déterminer de manière fiable l'apparition du cliquetis.

Un autre enjeu concerne la précision des mesures. La réduction de la consommation et des émissions, proche de ses limites pour les moteurs à combustion interne, rend les gains de plus en plus faibles et difficiles à détecter. Pour concilier précision et dynamique, une solution consiste à multiplier les gammes de mesure afin d'assurer, dans chacune, une exactitude optimale adaptée aux besoins.

II.2.3.4. Bancs d'endurance :

Les bancs d'endurance ont pour objectif de tester la fiabilité thermique et mécanique des moteurs. Ils doivent permettre la réalisation d'un grand nombre de cycles variés sur des durées prolongées. Leur cahier des charges met donc l'accent sur la robustesse du matériel, sa maintenance et son automatisation. La cellule d'essais peut être ouverte, en communication avec d'autres, ou fermée, ce qui reste préférable pour les conditions de travail. La fonction mesures, moins développée que sur les bancs de recherche ou de mise au point, doit néanmoins garantir la qualité et la quantité nécessaires aux analyses post-essai. En revanche, la fonction pilotage est fortement automatisée afin d'assurer la réalisation de nombreux cycles. Outre les bancs classiques, certains bancs dits « de choc thermique » permettent de réaliser des cyclages sévères, avec des variations brutales de température (jusqu'à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) sur le liquide de refroidissement. Pour cela, ils disposent d'une réserve importante (500 à 600 L) de liquide porté à environ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ et d'un système de circulation forcée autonome. Un jeu de vannes pilotables permet d'orienter le circuit vers le banc classique ou vers la réserve froide.

II.2.4. Classification technique des bancs d'essais[16] :

II.2.4.1. Banc d'essais à régime stationnaire :

Le banc d'essai stationnaire permet de réaliser des mesures et des analyses de performance en régime permanent, c'est-à-dire à des points discrets définis par le régime moteur et la charge appliquée. Avant chaque enregistrement, le moteur doit être stabilisé afin d'assurer la fiabilité des données.

Un banc de base comporte généralement :

- Un dynamomètre pour contrôler la puissance de sortie,
- Un débitmètre gravimétrique pour la consommation spécifique de carburant,
- Un débitmètre d'air d'admission,
- Un enregistreur optique pour la vitesse de rotation,
- Des capteurs piézo-électriques pour la pression cylindre et la pression du circuit d'alimentation,
- Un analyseur de gaz d'échappement,
- Des thermocouples pour la température des gaz, de l'huile et du liquide de refroidissement,
- Un oscilloscope pour l'évaluation initiale des pressions,
- Un système d'acquisition et de traitement des données assisté par logiciel.

Dans les bancs stationnaires plus sophistiqués, on peut également trouver :

- Des capteurs de levée d'aiguille d'injecteur pour le calage dynamique,

- Des manomètres et thermomètres pour le compresseur et l'intercooler,
- Un stroboscope ou capteur optique pour la vitesse du compresseur,
- Des thermocouples pour la turbine,
- Un sonomètre pour analyser le bruit de combustion.

II.2.4.2. Bancs d'essais à régime transitoire :

Les essais en régime transitoire sont de plus en plus utilisés car ils permettent une acquisition rapide des données et un contrôle précis du comportement moteur. Ils nécessitent des installations sophistiquées et coûteuses, capables d'assurer une réponse rapide de la charge et un maintien strict du point de consigne.

Ces bancs intègrent généralement des moteurs multicylindres suralimentés et une instrumentation spécifique pour analyser les performances dynamiques, les émissions et la consommation en conditions variables. Les équipements typiques incluent :

- Un dynamomètre à réponse rapide commandé électroniquement,
- Des débitmètres et capteurs de pression/ température à haute fréquence,
- Des analyseurs rapides pour les gaz d'échappement,
- Des systèmes d'acquisition haute résolution et stockage de données sur plusieurs cycles moteur,
- Des techniques de mesure cylindre par cylindre pour détecter les différences d'injection.

L'objectif principal est de caractériser la réponse dynamique du moteur et d'optimiser sa conception en termes de puissance, consommation spécifique, émissions et fiabilité.

Tableau II.1 Comparaison entre les bancs stationnaires et transitoires [16] :

Critère	Bancs stationnaires	Bancs transitoires
Principe	Fonctionnement à régime constant (points fixes de vitesse et de charge).	Fonctionnement en régime variable (accélérations, variations rapides de charge).
Instrumentation	Dynamomètre classique, débitmètres carburant/air, analyseurs gaz, thermocouples, oscilloscope, système d'acquisition standard.	Dynamomètre électronique à réponse rapide, capteurs haute fréquence, analyseurs rapides, acquisition haute résolution, mesures cylindre par cylindre.
Objectif principal	Caractériser les performances et établir les courbes moteur en conditions stables.	Étudier la réponse dynamique, la consommation instantanée et les émissions transitoires.

Critère	Bancs stationnaires	Bancs transitoires
Avantages	Grande précision, reproductibilité, simplicité d'exploitation.	Représentativité des conditions réelles, rapidité d'acquisition, pertinence pour la mise au point.
Limites	Ne reflète pas les conditions dynamiques de conduite.	Installations coûteuses, instrumentation complexe, mesures moins stables.
Applications typiques	Essais pédagogiques, validation des réglages, caractérisation de base.	Recherche avancée, optimisation de conception, études d'émissions en conditions réelles.

II.2.5. Nécessité des bancs d'essais moteurs :

Le banc d'essais moteurs est un outil indispensable pour les constructeurs, équipementiers, pétroliers et préparateurs de véhicules. Il permet de réaliser la majorité des essais de recherche, de mise au point et d'endurance. Son rôle est de caractériser les performances des moteurs, d'identifier leurs qualités et défauts, de tester les prototypes et de valider les moteurs en sortie de production.

Il n'existe pas de banc universel capable de couvrir tous les types d'essais, d'où la nécessité d'un cahier des charges précis. Les bancs d'essais partagent des fonctions communes (mesure, refroidissement, évacuation des gaz, sécurité), auxquelles s'ajoutent des spécifications propres selon l'objectif.

Les cellules d'essais, généralement fermées et équipées d'un seul banc, permettent l'acquisition simultanée de nombreux paramètres (jusqu'à 200), avec une grande précision et un contrôle des conditions ambiantes (température, hygrométrie). Les bancs de recherche peuvent être spécialisés (combustion, frottements, thermique, acoustique, visualisation) et sont souvent équipés de génératrices pour les régimes transitoires.

En raison de leur complexité et de leur coût élevé, la conception et la gestion des bancs d'essais doivent être rigoureuses afin d'assurer fiabilité, maintenance et performance[16].

II.3. Instrumentation du moteur

L'instrumentation désigne l'ensemble des techniques permettant l'étude et la mesure des grandeurs physiques d'un système. Elle constitue un élément fondamental pour analyser le régime de fonctionnement d'un moteur, le comportement de la charge ainsi que les conditions opératoires. Elle joue également un rôle crucial dans la surveillance de l'intégrité du système.

Dans le cas de systèmes complexes tels que les moteurs de groupes électrogènes, d'engins de forage ou de machines-outils, la mise en place d'un dispositif de mesure performant est

indispensable. Un système de mesure efficace doit être conçu avec soin afin d'assurer fiabilité, robustesse et précision, garantissant ainsi la qualité des données nécessaires à l'évaluation et à l'optimisation du moteur[17].

II.3.1. Les capteurs de température :

Les capteurs de température d'une voiture sont importants pour la détection de la pollution par les gaz et la consommation du carburant.

La fonction du capteur de température est d'être intégré à la thermistance fixée au bout de la partie métallique qui peut être cylindrique ou hexagonale. La fabrication des connecteurs des capteurs de température se fait en plastique pour assurer leur compatibilité avec différents types de connecteurs. Il y a également un joint torique fabriqué en caoutchouc qui sert à assurer la protection du capteur et du bloc moteur.

Cet endroit sera soit exposé au liquide de refroidissement, soit à l'air, et le capteur est chargé de surveiller la température pour ensuite envoyer ces informations à l'unité de calcul[14].

II.3.1.1. Capteur de température d'air d'admission :

Le capteur de température d'admission (IAT - Intake Air Temperature) fournit des informations sur la température de l'air entrant dans le moteur ; à partir de ces données, l'ordinateur peut calculer le volume d'air théorique, le calage de l'injection, le débit d'injection de carburant, et même activer un chauffage d'appoint si nécessaire[14].

Le capteur IAT transforme la valeur de la température de l'air sous forme d'une tension comprise entre 0 et 5 V. La caractéristique de la thermistance NTC est la haute résistance dans l'air frais (-20° C environ 10 à 50 k Ω), ainsi que la petite résistance de l'air chaud (80 °C environ 300 Ω). La lecture de cette valeur fait l'objet d'une comparaison avec les valeurs enregistrées dans la table de cartographie du calculateur ECU : en présence d'une densité faible (température de l'air élevée) la quantité de l'essence injectée est diminuée. Les modèles de moteurs turbocompressés sont équipés du capteur IAT, situé après l'intercooler ; ces données permettent de connaître l'efficacité de la ventilation de la suralimentation (allumage, pression de la suralimentation). La précision des mesures est de $\pm 1-2^{\circ}$ C chez certains fabricants. Le signal électrique varie de 0 à 5 V selon la résistance NTC (plage -40 °C à +120 °C)[18].

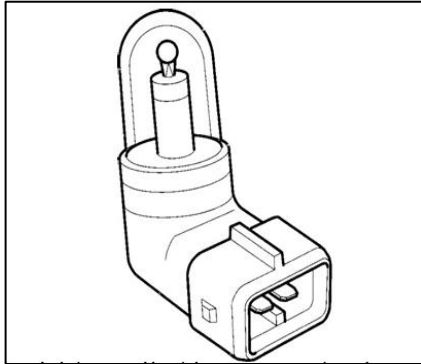


Figure II.3 Capteur de température d'air [19]

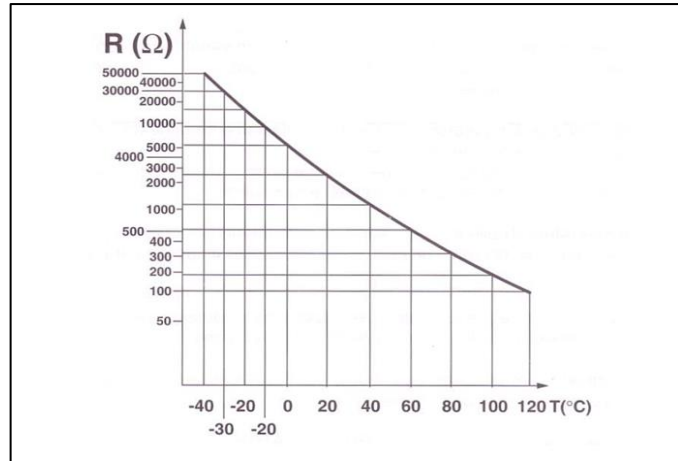


Figure II.4 Courbe de température en fonction de la résistance de sortie du capteur [19]

II.3.1.2. Capteur de température carburant :

Le capteur de température de carburant sert à mesurer la chaleur du carburant qui circule dans le moteur. Il est généralement constitué d'une thermistance NTC (Negative Temperature Coefficient), dont la résistance diminue quand la température augmente. Cette variation est transformée en signal électrique envoyé au calculateur moteur.

Grâce à ces informations, le calculateur ajuste en temps réel la quantité de carburant injectée, le calage de l'allumage et certains dispositifs complémentaires si nécessaire. Le suivi continu de la température du carburant permet d'assurer une combustion plus efficace, d'améliorer le rendement du moteur et de limiter les émissions polluantes [20].

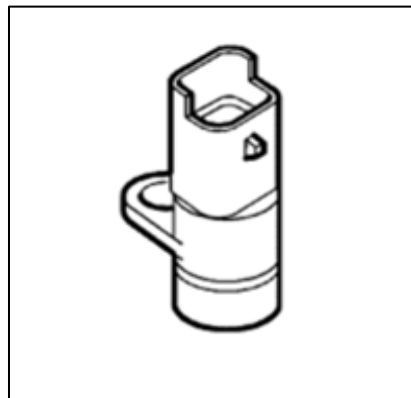


Figure II.5 Capteur de température carburant [14]

II.3.1.3. Capteur de température du liquide de refroidissement :

Sa fonction est de mesurer la température du liquide de refroidissement du moteur. Ils sont montés dans le conduit du circuit de réfrigération. Le capteur est associé à l'unité de contrôle moteur et surveille en permanence la température du liquide afin d'assurer que le moteur tourne à la température optimale. Le calculateur utilise ces données pour l'activation ou l'arrêt du ventilateur de refroidissement. L'amplitude de température de fonctionnement varie de -40°C à $+130^{\circ}\text{C}$ [14].



Figure II.6 Capteur de température liquide de refroidissement[14]

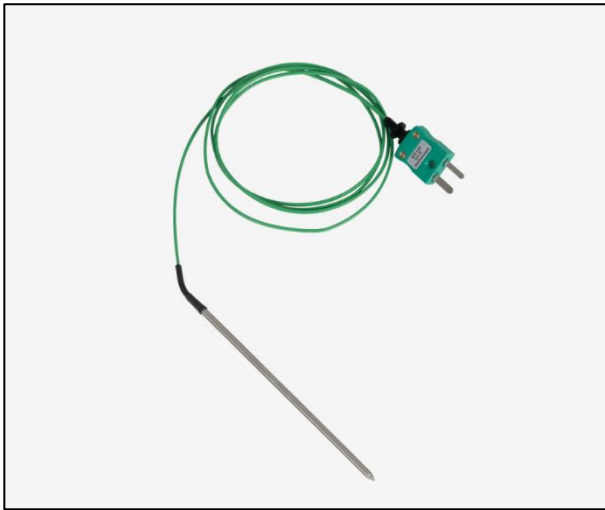
II.3.1.4. Capteur de température de gaz d'échappement :

Les capteurs de température des gaz d'échappement (EGT) sont des composants essentiels des systèmes de gestion des moteurs à combustion interne, notamment dans les applications automobiles, aéronautiques et industrielles. Leur fonction principale consiste à mesurer la température des gaz d'échappement, ce qui est crucial pour optimiser les performances du moteur, garantir la conformité aux normes d'émissions et protéger les composants du moteur contre les dommages causés par la chaleur. La compréhension des principes de conception, du fonctionnement et des fondements technologiques des capteurs EGT permet de mieux appréhender leur rôle essentiel dans les systèmes moteurs modernes[21].

Il existe deux façons principales dont les capteurs EGT fonctionnent : les thermocouples et les RTD (. Les deux sont des capteurs qui transforment l'énergie thermique en énergie électrique, mais de manière différente[21].

TableauII.2 La plage de température du thermocouple et RTD[22] :

Type de capteur	Gamme typique	Application
Thermocouple de type K	-40 °C à +1200 °C	Échappement turbo diesel/essence
RTD (par ex. Pt1000)	-40 °C à +800 °C	Zones à basse température, capteurs d'admission/GPF
Thermocouple de type N	-40 °C à +1300 °C	Diesel haute endurance, zones à haute teneur en soufre



FigureII.7 - Thermocouple [23] FigureII.8 - PT100

II.3.2. Les capteurs de pression :

Ce sont des instruments composés à la fois d'un élément sensible à la pression pour déterminer la pression réelle appliquée au capteur et de certains composants pour convertir cette information en un signal de sortie. Les capteurs de pression envoient à calculateur un courant pulsé variable. Pour cela ils sont dotés de trois fils : l'alimentation ($5V \pm 0.5V$), la masse (référence 0V), et le signal de retour (0 – 5V)[14].

II.3.2.1. Capteur de pression d'huile :

Un capteur de pression d'huile est un composant essentiel des moteurs et des systèmes de lubrification, conçu pour mesurer et surveiller la pression d'huile. Il veille à ce que l'huile soit distribuée de manière adéquate afin de réduire les frottements et de prévenir l'usure du moteur. Cette pression permet d'améliorer la mobilité et la friction des composants et d'éviter les dommages.

Ce capteur envoie les données de pression d'huile mesurées à l'unité de contrôle du moteur et allume le voyant du tableau de bord en guise d'avertissement si la pression d'huile n'est pas conforme aux normes. L'objectif du capteur est de fournir un retour d'information en temps réel et de mettre en évidence tous les problèmes instantanément[24].

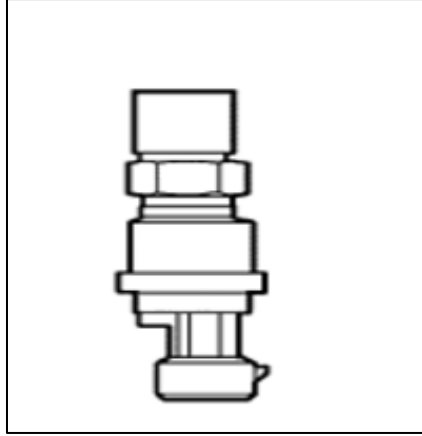


Figure II.9 - Capteur de pression d'huile[14]

II.3.2.2. Capteur de pression d'air d'admission :

Le capteur de pression d'air ou MAP (Manifold Absolute Pressure), est le capteur qui détecte la pression d'air dans l'admission du véhicule. Il transmet un signal électrique au calculateur pour pouvoir régler le mélange stœchiométrique. Les capteurs MAP se classent en 2 groupes, selon qu'ils mesurent une dépression ou une surpression (jusqu'à 400kPa). Quelques modèles intègrent des thermistances du type NTC (Coefficient de Température Négatif) qui permettent également au capteur MAP de détecter la température de l'air d'admission. Cette donnée est nécessaire pour que le calculateur puisse mesurer la masse d'air aspiré de manière à réguler le mélange air - carburant. Le capteur MAP se trouve directement dans le collecteur d'admission ou se connecte à ce dernier à l'aide d'un tube flexible. Les MAP doivent fonctionner dans des conditions critiques et doivent être capables de fonctionner à des températures comprises entre -40 °C et +120 °C. De plus ils doivent être résistants aux hydrocarbures[25].

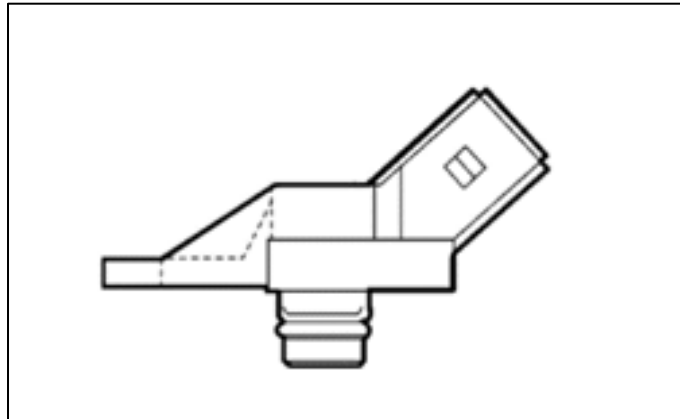


Figure II.10 - Capteur de pression d'air MAP[14]

II.3.3. Autres capteurs complémentaires :

II.3.3.1. Débitmètre de carburant :

Un débitmètre de carburant sert à mesurer la quantité de carburant qui circule dans un système, que ce soit en volume ou en masse. On le retrouve dans les moteurs, les générateurs ou encore les réseaux de distribution, pour suivre la consommation de diesel, d'essence, de kérosène ou de biodiesel.

Cet appareil joue un rôle clé :

- Il permet de contrôler et d'optimiser la consommation,
- Il aide à repérer rapidement une fuite ou une inefficacité,
- Il garantit le respect des normes environnementales et opérationnelles[26].

Tableau II.3 Comparaison entre les débitmètres de carburant [26] :

Type	Principe de fonctionnement		Applications idéales	Avantages	Limites
Déplacement positif (PD)	Capture un volume connu dans des chambres, compte les cycles de remplissage/vidage.		Carburants visqueux (diesel, fioul lourd).	Très précis ($\pm 0,1$ %), insensible aux variations de température/pression.	Pas adapté aux fluides abrasifs ou sales.
Turbine	Une turbine tourne proportionnellement au débit du carburant.		Carburants propres et peu visqueux (essence, kérosène).	Haute précision ($\pm 0,2$ %), économique, facile à installer.	Sensible à la viscosité et aux impuretés.
Massique Coriolis	Mesure la déflexion de tubes vibrants proportionnelle au débit massique.	Tous types de carburants, mesure densité + masse.		Mesure directe du débit massique et densité, aucune pièce mobile.	Coût élevé, sensible aux vibrations externes.



Figure II.11 débitmètre à Déplacement positif (PD)



Figure II.12 débitmètre de type turbine



Figure II.23 débitmètre Massique Coriolis

II.3.3.2. Capteur de vibration moteur :

Les capteurs de vibration, aussi appelés capteurs piézoélectriques ou accéléromètres, sont essentiels pour la surveillance et la maintenance industrielle. Ils détectent les vibrations ou oscillations et les transforment en signaux électriques proportionnels. La fonction du capteur inclut également la mesure du capteur et la conversion des données pour faciliter l'analyse des vibrations.

Ces capteurs jouent un rôle clé pour surveiller l'état des machines, prévenir les pannes et garantir une production optimale. Par exemple, un capteur de vibration industriel ou un module compact intégré peut fournir des données précises pour la protection et la maintenance conditionnelle des équipements dans des secteurs comme l'automobile, l'aérospatiale, l'énergie, l'industrie alimentaire et le pétrole.

Grâce à ces informations, les équipes de maintenance peuvent prendre des décisions éclairées, planifier des interventions préventives et réduire les coûts de réparation ainsi que les arrêts imprévus.

Les capteurs de vibration reposent sur différents principes physiques pour détecter les vibrations. Le plus courant est l'effet piézoélectrique : certains matériaux, comme les cristaux piézoélectriques, produisent une charge électrique lorsqu'ils subissent une déformation mécanique. Par exemple, dans les accéléromètres, une masse sismique interne est soumise à l'accélération de la structure en vibration, générant une force proportionnelle sur le matériau piézoélectrique. Cela produit une charge électrique directement liée à l'accélération[27].

Tableau II.4 Les types des capteurs de vibration[27]:

Type	Principe	Avantages	Limites
Piézoélectriques	Un cristal génère une charge électrique lorsqu'il est soumis à une vibration.	Très précis, robustes, adaptés aux environnements industriels.	Nécessitent un conditionnement de signal.
Accéléromètres	Mesurent directement l'accélération des mouvements (souvent sur 1 à 3 axes).	Sensibles, permettent de suivre intensité et direction des vibrations.	Sensibles aux interférences mécaniques.
MEMS	Mini-capteurs fabriqués comme des puces électroniques, intégrant accéléromètre/gyroscope.	Compacts, économiques, faciles à intégrer (ex. MPU6050).	Moins précis que les capteurs industriels haut de gamme.

II.3.3.3. Capteur de la vitesse de rotation :

La vitesse de rotation d'un moteur peut être mesurée par différents types d'appareils, selon le principe retenu. On distingue trois grandes familles : **mécaniques, électriques et électroniques**.

A – Appareils mécaniques

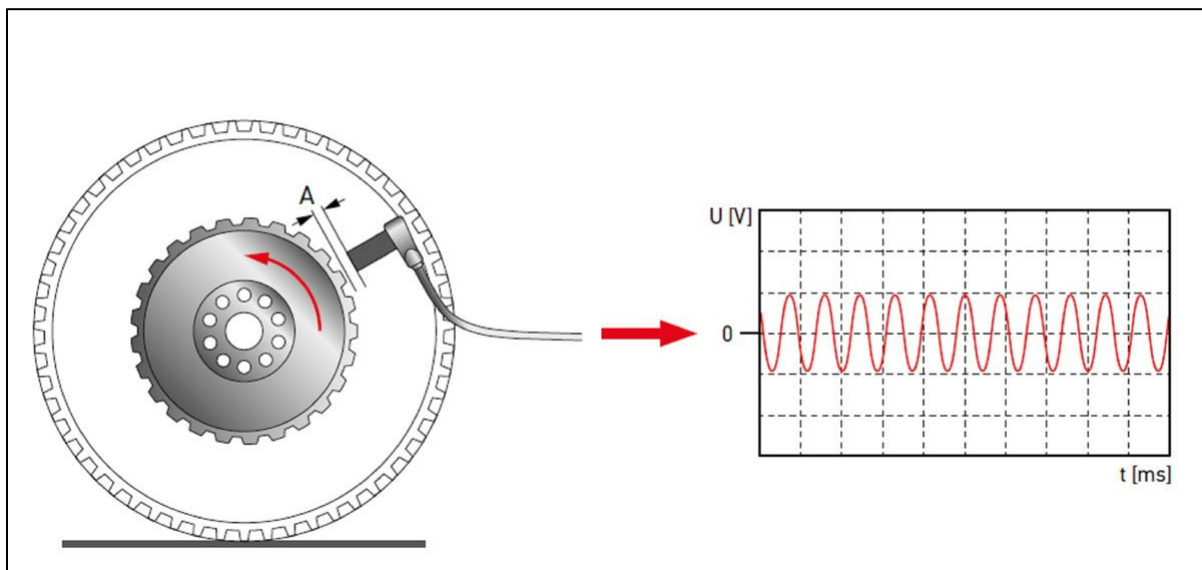
- **Tachymètre centrifuge** : fonctionne comme un régulateur à masselottes. La force centrifuge agit sur des leviers qui déplacent une aiguille. Ce système reste simple mais peu précis, avec une sensibilité variable et la nécessité d'un couplage direct au moteur.
- **Tachymètre mécanique (chrono-totalisateur)** : compte le nombre de tours sur une durée donnée (par exemple 3 secondes). Plus précis que le précédent (± 5 tours), mais limité car il ne permet pas une mesure continue. La méthode la plus fiable consiste à associer un compte-tours à un chronomètre, déclenchés simultanément.

B – Appareils électriques

- **À courant continu** : une petite génératrice CC, entraînée par le moteur, délivre une tension proportionnelle à la vitesse. Celle-ci est lue sur un voltmètre gradué en tr/min. Leur limite principale est la présence de contacts tournants.
- **À courant alternatif** : basés sur une génératrice AC dont le signal est redressé avant lecture. Leur précision est généralement meilleure que celle des appareils à courant continu.

C – Appareils électroniques

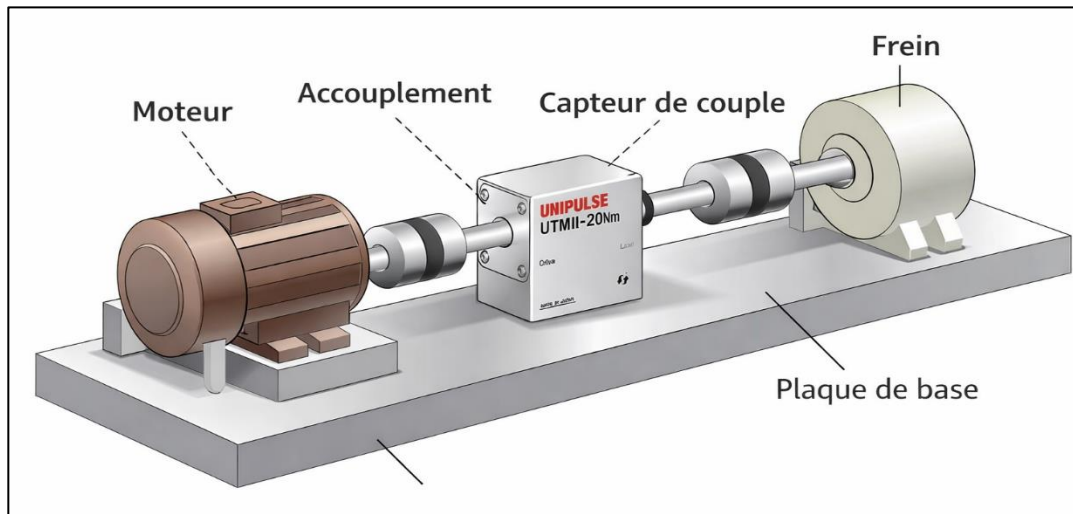
- **Compteurs d'impulsions** : utilisent un capteur électromagnétique qui génère des impulsions proportionnelles à la vitesse. Ces signaux sont comptés électroniquement. Leur précision est nettement supérieure aux appareils mécaniques et électriques, ce qui en fait la solution la plus utilisée aujourd'hui [13].



FigureII.14 - Schéma de principe de Capteur de vitesse de rotation[28]

II.3.3.4. Capteur de couple du moteur [13] :

La détermination du couple moteur peut se faire par différentes méthodes. Les deux approches les plus utilisées sont le **montage du frein en balance** et la **mesure directe par torsiomètre**.



FigureII.15 -schéma de Principe de fonctionnement de capteur de couple

A – Montage du frein en balance

La méthode la plus courante consiste à placer le stator du frein en équilibre. Le couple est alors mesuré par la force exercée sur un bras de levier.

- Les dispositifs utilisés peuvent être des **pesons** (mécaniques ou électriques), une **balance automatique**, ou encore un **poids placé à l'extrémité d'un bras de levier**.
- Cette méthode est simple mais sujette à des erreurs, principalement dues aux frottements parasites (roulements, frottements aérodynamiques).

B – Mesure directe par torsiomètre

Le torsiomètre est un appareil basé sur un arbre élastique, conçu pour transmettre le couple entre le moteur et la machine absorbant l'énergie.

- Lorsque le couple C est appliqué, l'arbre subit une torsion proportionnelle à ses caractéristiques mécaniques.
- La relation est donnée par la théorie de l'élasticité :

$$\theta = \frac{C.L}{G.I}$$

Où :

- θ = angle de rotation,
- L = longueur de l'arbre,
- G = module d'élasticité en torsion du matériau,
- I = moment polaire de la section.

Comme L, G et I sont constants pour un appareil donné, on peut exprimer le couple sous la forme :

$$C=k\cdot\theta$$

Avec k une constante déterminée par étalonnage statique.

- La mesure de l'angle θ peut être réalisée par des méthodes optiques ou inductives.
- L'avantage du torsiomètre est de permettre des mesures instantanées et précises, même en régime transitoire du moteur[13].

II.3.3.5. Capteur de niveau de liquide :

Les capteurs de niveau de liquide font partie intégrante de l'automatisation industrielle, des systèmes automobiles et de l'infrastructure de gestion des fluides. Ces dispositifs surveillent et signalent le niveau de liquides tels que l'eau, l'huile, le carburant et le liquide de refroidissement dans une large gamme d'applications, assurant ainsi le contrôle des processus, la sécurité et l'efficacité opérationnelle. Les capteurs de niveau de liquide sont sélectionnés en fonction des propriétés du liquide, des conditions environnementales, des exigences de précision et des contraintes d'intégration, grâce à une sélection variée de technologies, notamment les systèmes à flotteur, capacitifs, ultrasoniques, radar et à semi-conducteurs[29].

Tableau II.5 Comparaison entre trois capteurs de niveaux[29]:

Type de capteur	Principe de fonctionnement	Avantages	Limites	Applications typiques
Flotteur	Élément flottant qui actionne un interrupteur ou un capteur magnétique.	Simple, économique, fiable.	Usure mécanique, sensible aux turbulences et fluides visqueux.	Réservoirs de carburant automobiles, cuves d'huile.
Capacitif	Variation de la constante diélectrique entre air et liquide.	Adapté aux huiles et carburants, pas de pièces mobiles.	Sensible aux dépôts, nécessite étalonnage.	Réservoirs de carburant, huile hydraulique.
Ultrasonique	Mesure du temps d'écho d'une onde sonore.	Sans contact, adapté aux liquides corrosifs.	Perturbé par mousse, vapeur, condensation.	Cuves industrielles, traitement de l'eau, carburant.

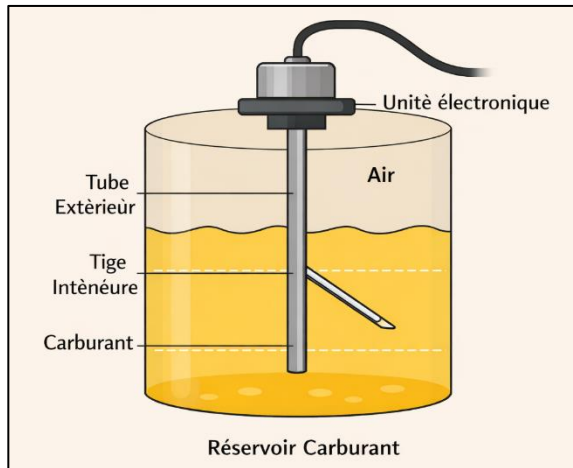


Figure II.16 -schéma d'un capteur de niveau (capacitif)[30]

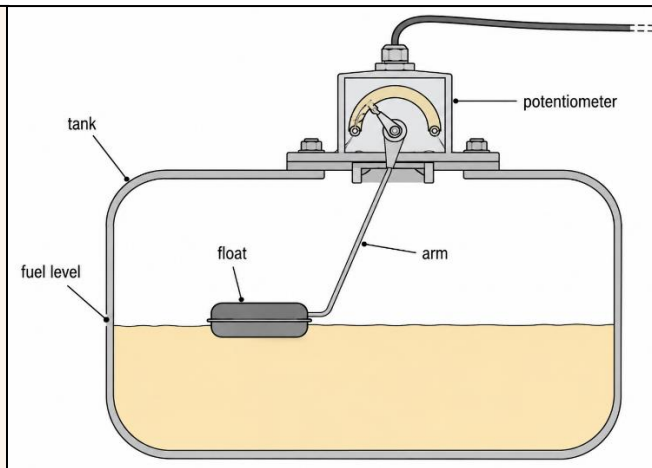


Figure II.17 -schéma d'un capteur flotteur[30]

II.4. Systèmes d'acquisition des données :

II.4.1. Principe :

Le principe consiste à recueillir dans un poste d'ordinateur des grandeurs physiques ou chimiques délivrées par toute installation quelconque. Cependant ces installations peuvent rarement communiquer directement en raison de la différence de langage utilisé. D'où la nécessité d'implanter un dispositif appelé « carte d'acquisition de données » permettant de traduire les grandeurs provenant des installations vers des signaux compréhensibles par l'ordinateur, et vis versa.

L'ensemble constitué par l'installation, la carte d'acquisition de données et le poste d'ordinateur est appelé « chaîne d'acquisition ».

Une chaîne d'acquisition doit pouvoir assurer les fonctions suivantes :

- extraction de l'information
- traitement des grandeurs
- sélection des informations nécessaires à transmettre
- conversion des grandeurs sous forme numérique
- analyse et exploitation des données
- coordination des opérations[15].

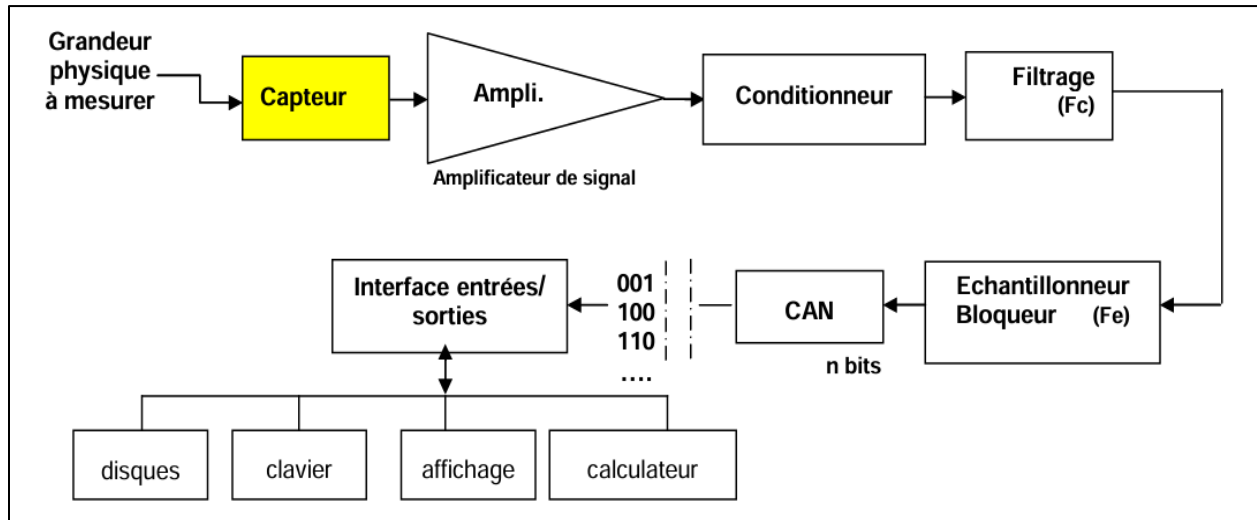


Figure II.18 Structure de la chaîne d'acquisition [31]

II.4.2. Les principaux composants de la chaîne d'acquisition :

II.4.2.1. Le capteur :

Premier élément de la chaîne d'acquisition, le capteur a pour fonction de délivrer un signal électrique de sortie en fonction du mesurant. Autrement dit, il transforme la grandeur physique mesurée (pression, température, vitesse, etc.) en une grandeur électrique exploitable par la suite du système.

II.4.2.2. Le conditionneur :

La fonction principale d'un conditionneur de signal est d'adapter le signal délivré par un capteur afin qu'il soit exploitable par les instruments de mesure ou la carte d'acquisition. Concrètement, il capte le signal brut et le convertit en un signal électrique normalisé (par exemple 0–10 V ou 4–20 mA), plus puissant et plus stable. Cette conversion est indispensable dans les applications industrielles qui utilisent une large gamme de capteurs, car elle permet d'uniformiser les sorties et de garantir la compatibilité avec les systèmes de supervision.

II.4.2.3. Le convertisseur Analogique-Numérique CAN :

Un convertisseur analogique/numérique (CAN) est un dispositif électronique permettant de transformer un signal analogique en un signal numérique. Pour compléter cette définition, il convient de préciser la nature des deux types de signaux :

- Signal analogique : signal continu en temps et en amplitude.
- Signal numérique : signal échantillonné et quantifié, discret en temps et en amplitude [23].

II.4.2.4. Traitement de données :

Le traitement et le stockage des informations sont effectués au sein de l'ordinateur grâce au micro-processeur. L'échange d'informations avec son environnement externe est mis en œuvre à l'aide des interfaces d'Entrées/Sorties, des bus de périphériques externes et des ports d'Entrées/Sorties. Les signaux reçus par l'intermédiaire des ports d'Entrées/Sorties sont en général de type numérique. L'ordinateur peut ainsi les comprendre grâce au langage machine. Cependant, l'utilisateur ne peut percevoir ces informations sans l'aide d'un outil permettant d'afficher ces données via l'écran de son ordinateur. Il est de ce fait nécessaire de créer une interface afin que l'utilisateur puisse communiquer avec l'ordinateur. Cette interface doit permettre la visualisation des données acquises par le biais de l'écran ainsi que la saisie d'instructions à exécuter grâce au clavier.

➤ Bus de périphériques externes

Les communications de l'ordinateur vers l'extérieur se font :

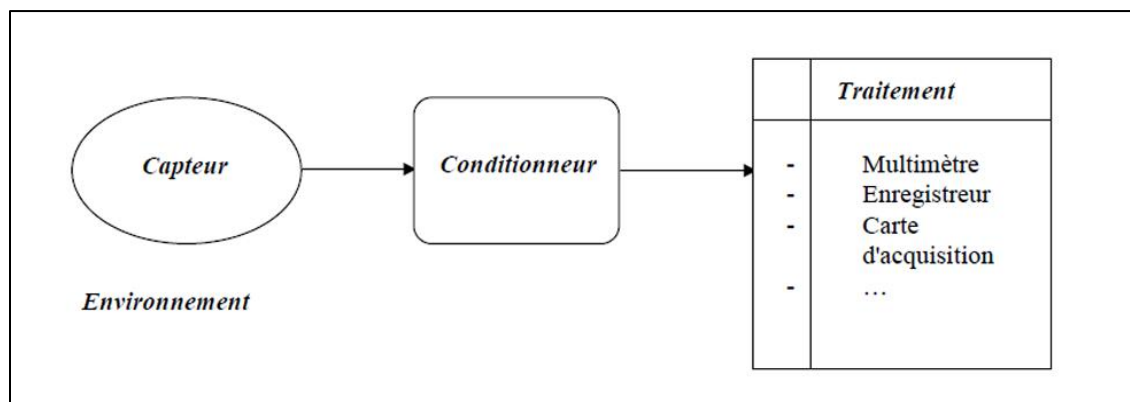
Via un port : point de connexion.

Sur un bus : contient plusieurs câbles et se définit par le protocole de communication.

Grâce à un contrôleur : possédant 04 registres (états, commande, data in & out).

➤ Interface logiciel

C'est au niveau de ce domaine qu'intervient la technologie logicielle qui permet d'écrire un programme exécutant une application accessible à l'utilisateur[15].



FigureII.19 - Schéma d'un chaîne d'acquisition[32]

II.5. Critères de choix d'un capteur :

Le choix d'un capteur dépend du type de mesure à effectuer et des exigences de l'application. Voici quelques critères de choix à prendre en compte :

- La grandeur physique à mesurer : le capteur doit être capable de mesurer la grandeur physique souhaitée avec la précision et la sensibilité requises.
- L'étendue de mesure : le capteur doit être capable de mesurer la plage de valeurs attendues de la grandeur physique. Il est important de vérifier si cette plage est conforme aux spécifications de l'application.
- La sensibilité : la sensibilité du capteur doit être suffisante pour détecter les variations de la grandeur physique à mesurer.
- La linéarité : la réponse du capteur doit être linéaire dans la plage de mesure afin que les données collectées soient fiables et précises. La non-linéarité peut entraîner des erreurs importantes.
- La résolution : la résolution du capteur doit être suffisante pour la précision requise dans l'application.
- La fréquence de mesure : la fréquence à laquelle les mesures doivent être effectuées doit être prise en compte. Certains capteurs ne peuvent pas mesurer à des fréquences élevées.
- La stabilité à long terme : la stabilité à long terme est importante si les mesures doivent être effectuées sur une longue période.
- La précision : la précision est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle. La précision dépend des spécifications du capteur, de l'étalonnage et de l'environnement dans lequel le capteur est utilisé.
- La résistance environnementale : le capteur doit être capable de résister aux conditions environnementales dans lesquelles il sera utilisé.
- Le coût : le coût du capteur doit être pris en compte en fonction des exigences de l'application et des contraintes budgétaires.

Il est important de considérer ces critères et d'autres lors du choix d'un capteur pour garantir que celui-ci convient à l'application et fournit des données fiables et précises[33].

Chapitre III
Simulation ET Réalisation
Expérimentale

III.1. Introduction

Ce troisième chapitre parachève la progression logique de ce mémoire en faisant succéder à la synthèse théorique la mise en œuvre pratique des concepts étudiés. Après avoir établi les fondements conceptuels relatifs aux moteurs et aux systèmes de mesure, cette section se consacre à l'élaboration du banc d'essai, permettant de confronter nos hypothèses à la réalité physique. Le choix d'un écosystème technologique ouvert, associant la plateforme Arduino pour l'acquisition des données et le langage Python pour leur traitement et leur visualisation, répond à une double exigence : garantir la rigueur scientifique de l'expérimentation et assurer la reproductibilité des résultats.

Les essais ont été conduits au sein de l'École Nationale Polytechnique d'Oran, en utilisant un moteur diesel Deutz MWM D302-1 (figure III.42), sélectionné pour sa robustesse et la représentativité de ses performances. Ce banc d'essai a servi de support à l'intégration d'une chaîne d'instrumentation complète, allant du capteur physique jusqu'à l'interface de supervision numérique. Cette approche expérimentale permet ainsi de matérialiser la chaîne d'acquisition et d'offrir une vision globale et cohérente du système de monitoring moteur développé.

III.2. Présentation du banc d'essais:

III.2.1. Présentation du moteur:

Le moteur utilisé pour les essais est un monocylindre diesel Deutz MWM D302-1 (figure III.42). Ses caractéristiques techniques sont synthétisées dans le tableau 8.



Figure III.1 - Banc réel au niveau du laboratoire dans l'ENP Oran.

Tableau III.1- Les caractéristiques du moteur Deutz Z- MWM D302-1[34] :

Paramètre	Valeur / Spécification
Modèle	Moteur diesel Deutz Z-MWM D302-1
Nombre de cylindres	1
Déplacement	744 cm ³
Alésage × Course	95 × 105 mm
Taux de compression	1 : 17.5
Direction de rotation	Sens antihoraire
Régime maximal	2600 tr/min
Régime de ralenti	750–800 tr/min
Puissance maximale	8.5 kW (11.6 ch)
Pression d'allumage	85 bar
Pression d'injection	Fa. BOSCH = 180 ±5 bar ; Fa. CONDIESEL = 220 ±5 bar ; Fa. DELPHY = 190 ±8 bar
Dégagement des soupapes	0.2 mm
Consommation de carburant	3.54 dm ³ /h
Consommation d'huile de graissage	10–20 cm ³ /h
Débit d'air de refroidissement	420 m ³ /h
Température maximale de l'huile	120 °C
Température maximale du collecteur d'échappement	550 °C
Capacité du réservoir de carburant	16 dm ³
Capacité d'huile de graissage	2.75 dm ³
Type de combustion	Injection directe
Refroidissement	Par air
Poids net	165 kg
Calage des soupapes – Admission	Ouverture : 0° bTDC ; Fermeture : 30° aBDC
Calage des soupapes – Échappement	Ouverture : 30° bBDC ; Fermeture : 0° aTDC
Tolérance admissible	±3°

III.2.2. Les capteurs utilisés:

Le système de surveillance développé repose sur l'intégration de cinq capteurs stratégiques, sélectionnés pour offrir une vision exhaustive de l'état de santé et des performances du moteur Deutz MWM D302-1. La chaîne d'acquisition est conçue pour assurer la précision des relevés et la fiabilité des données transmises à l'unité de traitement. Les capteurs utilisés sont les suivants:

- a. **Capteur de température des gaz d'échappement (Thermocouple type K) :** Utilisant le module MAX6675, ce thermocouple est spécifiquement choisi pour sa capacité à supporter les hautes températures. Il joue un rôle déterminant dans le diagnostic de la qualité de la combustion et la détection précoce de surchauffes.

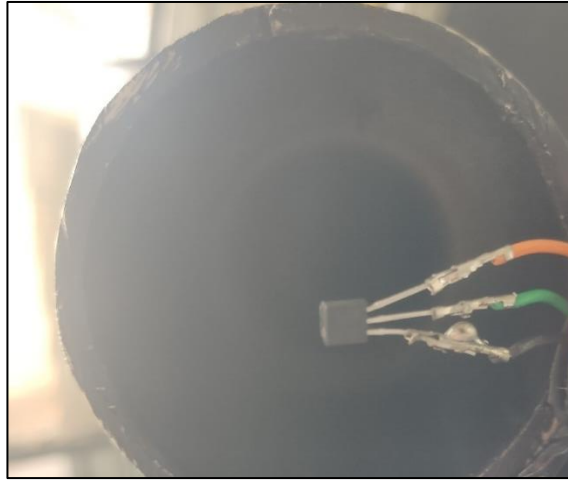


FigureIII.2 - Thermocouple de type K WRNK-191

TableauIII.2 - Les caractéristiques de thermocouple WRNK-191:

Caractéristique	Valeur / Description
Type	WRNK-191
Principe de mesure	Thermocouple type K (Nickel-Chromium / Nickel-Aluminum)
Plage de mesure	0 °C à 1100 °C
Diamètre de la sonde	Φ 8 mm
Longueur totale	500 mm (longueur active) × 1500 mm (longueur totale avec câble)
Matériau de gaine	Acier inoxydable gainé (résistant à la corrosion et à la chaleur)
Tension de sortie	≈ 40 μV/°C (effet Seebeck)
Date de fabrication / contrôle	Novembre 2023
Utilisation typique	Mesure de la température des gaz d'échappement dans les moteurs Diesel ou essence
Avantages	Haute résistance thermique, bonne stabilité, temps de réponse rapide
Précautions	Ne pas dépasser 1100 °C ; éviter les chocs mécaniques et les surtensions

- b. Capteur de température d'admission (Sonde DS18B20) :** Ce capteur numérique, assure le suivi de la température de l'air admis dans le moteur, permettant d'ajuster les calculs de densité et d'optimiser l'analyse de l'admission.

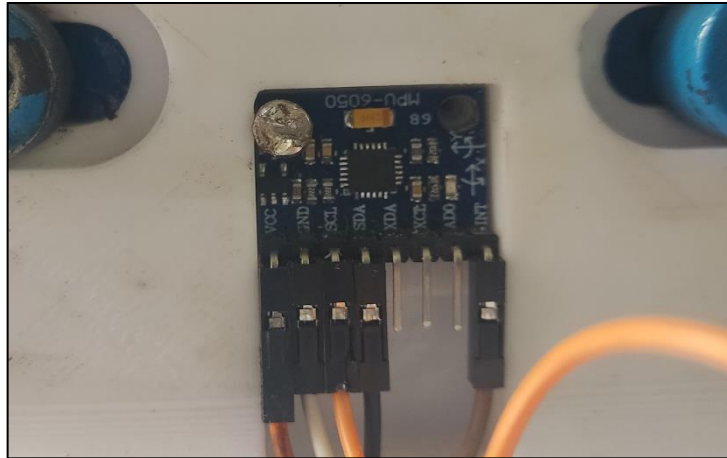


FigureIII.3 - Capteur de température DS18B20

TableauIII.3 - Les caractéristiques de capteur DS18B20:

Caractéristique	Valeur
Type	DS18B20
Nature du signal	Numérique (bus 1-Wire)
Plage de mesure	-55 °C à +125 °C
Précision	±0,5 °C
Tension d'alimentation	3 V à 5,5 V
Nombre de fils	3 (VCC, Data, GND)
Temps de réponse	≈ 750 ms
Application	Mesure de température d'air ou de liquide (non adaptée aux gaz d'échappement)

- c. Capteur de vibration (Accéléromètre MPU-6050) :** Intégrant un accéléromètre triaxial sur bus I²C, ce capteur permet d'analyser le comportement vibratoire de l'ensemble mécanique. L'exploitation de ses données permet de détecter d'éventuels déséquilibres ou anomalies structurelles liés au fonctionnement du moteur.



FigureIII.4 - Capteur de vibration MPU-6050

TableauIII.4 - Les caractéristiques de capteur MPU-6050:

Caractéristique	Valeur / Description
Type	MPU-6050
Principe de mesure	Accéléromètre 3 axes pour la détection des vibrations
Plage de mesure des vibrations	$\pm 2 \text{ g}$ à $\pm 16 \text{ g}$
Tension d'alimentation	3,3 V à 5 V
Communication	Bus I ² C (SDA, SCL)
Sortie	Signal numérique
Application	Mesure des vibrations du moteur sur le banc d'essai
Avantages	Haute sensibilité, faible bruit, intégration facile avec Arduino

- d. **De régime moteur (Capteur inductif NPN) :** Ce capteur de proximité inductif (modèle LJ12A3-4-Z/BX-5V) est configuré pour détecter le passage de pièces métalliques mobiles du moteur. Il transforme ces impulsions mécaniques en un signal numérique, indispensable au calcul précis du régime de rotation (RPM) en temps réel.



FigureIII.5 - Capteur de régime moteur (LJ12A3-4-Z/BX-5V)

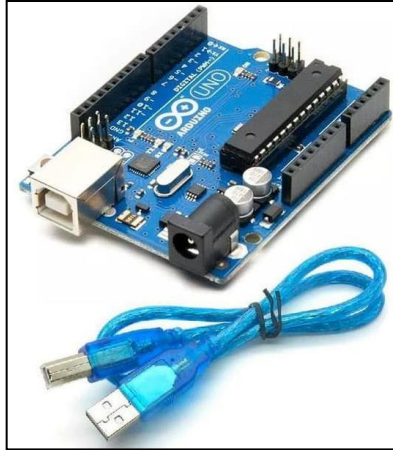
TableauIII.5 - Les caractéristiques de capteur de régime moteur LJ12A3-4-Z/BX-5V:

Caractéristique	Valeur / Description
Type	Capteur inductif NPN NO (Normally Open)
Principe de mesure	Détection d'un objet métallique par variation du champ électromagnétique
Distance de détection	4 mm
Tension d'alimentation	5 V DC
Sortie	Signal numérique (0 V = OFF, 5 V = ON)
Plage de mesure compatible	0 – 10 000 tr/min (selon le nombre de dents ou repères métalliques)
Matériau du corps	Acier inoxydable fileté, embout plastique bleu
Type de connexion	3 fils : marron (VCC), bleu (GND), noir (signal)
Application	Mesure du régime moteur sur le banc d'essai

III.2.3. Présentation de la carte d'acquisition :

III.2.3.1. Rôle et choix de l'Arduino UNO

La gestion de la chaîne d'acquisition est assurée par une carte microcontrôleur Arduino UNO (figure III.47). Elle constitue le pont numérique entre les capteurs physiques du banc d'essai et l'unité de traitement (ordinateur), permettant ainsi la centralisation et l'enregistrement des données expérimentales.



FigureIII.6 - Arduino UNO

Le choix de l'Arduino UNO repose sur plusieurs critères techniques et pédagogiques qui répondent aux exigences de notre banc d'essai:

- **Accessibilité et coût:** Plateforme économique et largement disponible, facilitant la réalisation de prototypes.
- **Flexibilité ET environnement open source:** L'IDE Arduino, compatible avec les principaux systèmes d'exploitation (Windows, macOS, Linux), offre un environnement de programmation intuitif et une grande modularité.
- **Support technique:** Basée sur le microcontrôleur Atmel (ATmega328), elle bénéficie d'une vaste communauté ET d'une documentation riche, facilitant le développement et l'implémentation de fonctionnalités avancées.

III.2.3.2. Architecture de câblage

Le système repose sur l'intégration de cinq capteurs distincts. Pour les besoins du prototype et la phase d'essai, le câblage a été réalisé sur une platine d'essai (breadboard). Cette solution permet une modularité indispensable lors de la mise au point; elle pourra être remplacée par un circuit imprimé professionnel lors d'une phase d'industrialisation ou de pérennisation du banc.

Le tableau (III.13) et la figure (III.48) ci-dessous synthétise les connexions effectuées pour chaque capteur vers l'Arduino UNO, les capteurs sont alimentés sous 5V DC.

Tableau III.6 - La synthèse des connexions effectuées pour chaque capteur vers l'Arduino UNO:

Capteur	Type de signal	Connexions principales (Arduino)
Temp. Échappement	SPI (via MAX6675)	D6 (SCK), D5 (CS), D4 (SO)
Temp. Carburant	SPI (via MAX31865)	D13 (SCK), D11 (SDI), D12 (SDO), D9 (CS)
Temp. Admission	OneWire (DS18B20)	D2 (DATA) + Résistance pull-up 4,7 kΩ
Vibration	I ² C (MPU6050)	A4 (SDA), A5 (SCL)
Régime Moteur	Numérique (NPN)	D3 (Entrée interruption)

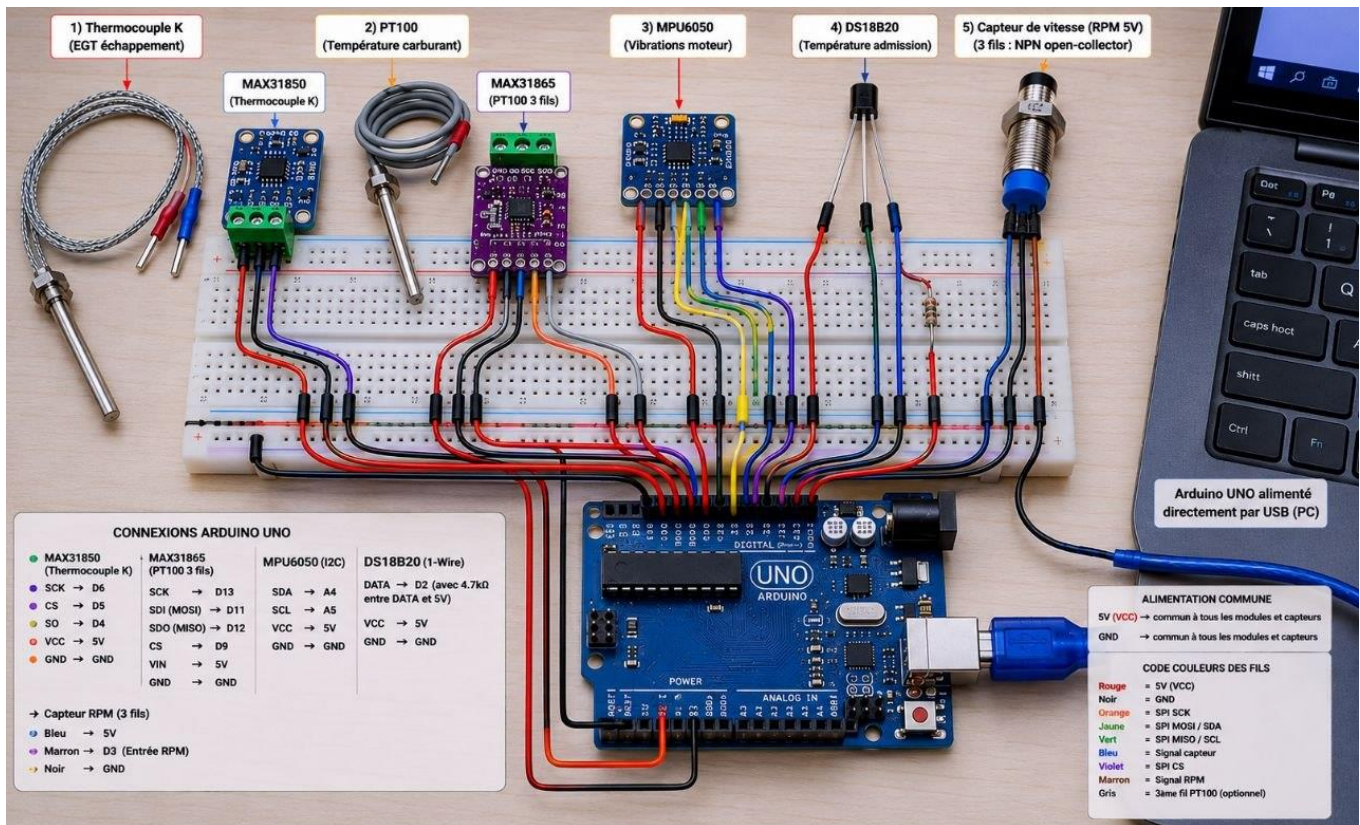


Figure III.7 - La synthèse des connexions effectuées pour chaque capteur vers l'Arduino UNO.

III.3. Résultats expérimentaux et affichage en temps réel:

Après la validation du programme Arduino (voir Annexe A), une interface graphique a été développée en Python pour la supervision industrielle du banc d'essai dans le principe générale est bien montrer sur la figure III.49.

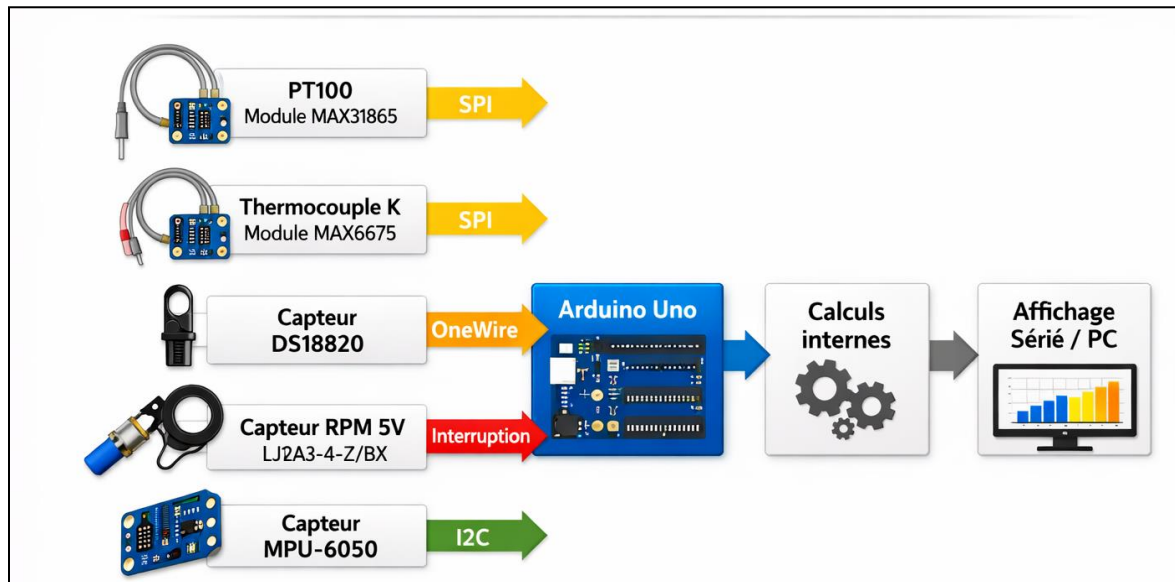
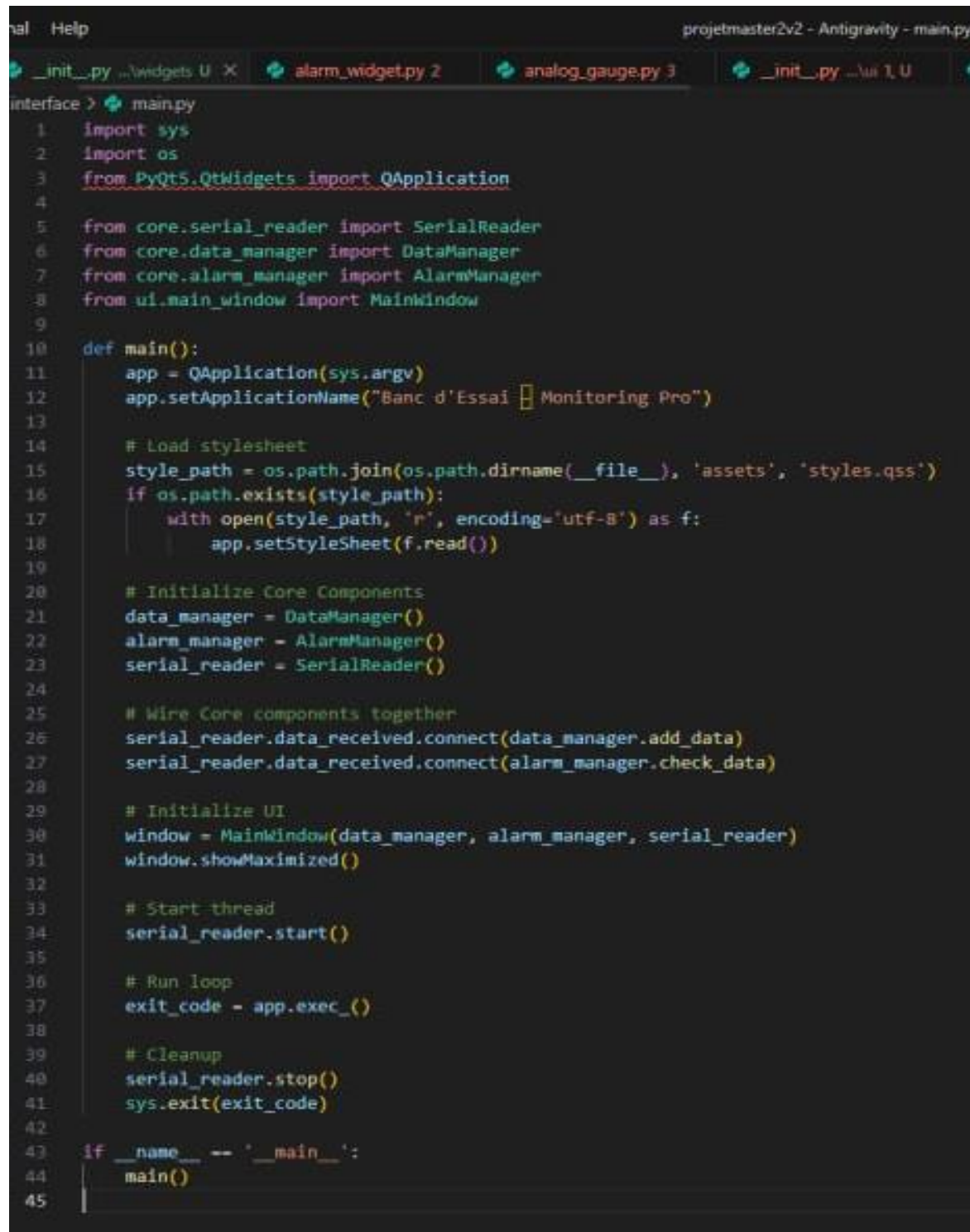


Figure III.8 - Schéma conceptuel du système d'acquisition Arduino Uno avec les capteurs.

Cette interface, conçue avec PyQt5, permet la lecture, le traitement et l'affichage des données issues des capteurs en temps réel. La figure suivante illustre l'environnement de développement et la structure du programme principal, où sont intégrés les modules de gestion des données, des alarmes et de la communication série.



```

1  import sys
2  import os
3  from PyQt5.QtWidgets import QApplication
4
5  from core.serial_reader import SerialReader
6  from core.data_manager import DataManager
7  from core.alarm_manager import AlarmManager
8  from ui.main_window import MainWindow
9
10 def main():
11     app = QApplication(sys.argv)
12     app.setApplicationName("Banc d'Essai Monitoring Pro")
13
14     # Load stylesheet
15     style_path = os.path.join(os.path.dirname(__file__), 'assets', 'styles.qss')
16     if os.path.exists(style_path):
17         with open(style_path, 'r', encoding='utf-8') as f:
18             app.setStyleSheet(f.read())
19
20     # Initialize Core Components
21     data_manager = DataManager()
22     alarm_manager = AlarmManager()
23     serial_reader = SerialReader()
24
25     # Wire Core components together
26     serial_reader.data_received.connect(data_manager.add_data)
27     serial_reader.data_received.connect(alarm_manager.check_data)
28
29     # Initialize UI
30     window = MainWindow(data_manager, alarm_manager, serial_reader)
31     window.showMaximized()
32
33     # Start thread
34     serial_reader.start()
35
36     # Run loop
37     exit_code = app.exec_()
38
39     # Cleanup
40     serial_reader.stop()
41     sys.exit(exit_code)
42
43 if __name__ == '__main__':
44     main()
45

```

Figure III.9 - Programme principal de l'interface de supervision "Banc d'Essai Monitoring Pro"

L'interface de supervision a été développée en **Python** à l'aide du Framework **PyQt5**, permettant une gestion fluide des données issues du banc d'essai. Le programme principal, illustré

ci-dessus, initialise les modules de lecture série, de traitement des données et de gestion des alarmes. Chaque composant est interconnecté pour assurer la **collecte, l'analyse et l'affichage en temps réel** des grandeurs mesurées par les capteurs. L'architecture du code repose sur une structure modulaire :

- Un module de **lecture série** pour la réception des données transmises par la carte d'acquisition ;
- Un module de **gestion des données** pour le filtrage et la mise à jour des valeurs ;
- Un module de **gestion des alarmes** pour la détection des anomalies ;
- Une **interface graphique** intuitive pour la supervision industrielle du moteur.

Cette conception garantit une **visualisation claire et réactive** des paramètres du moteur sur le banc d'essai, tout en facilitant la maintenance et l'évolution du système.

III.3.1 Analyse des états du moteur en temps réel :

La figure III.51 suivante illustre le tableau de bord principal de la supervision industrielle développée en Python. Cette interface, intitulée Banc d'Essai – Monitoring Pro, permet de visualiser en temps réel les grandeurs mesurées sur le moteur : régime (RPM), vitesse, vibration, température du carburant, température des gaz d'échappement (EGT) et température d'air d'admission.

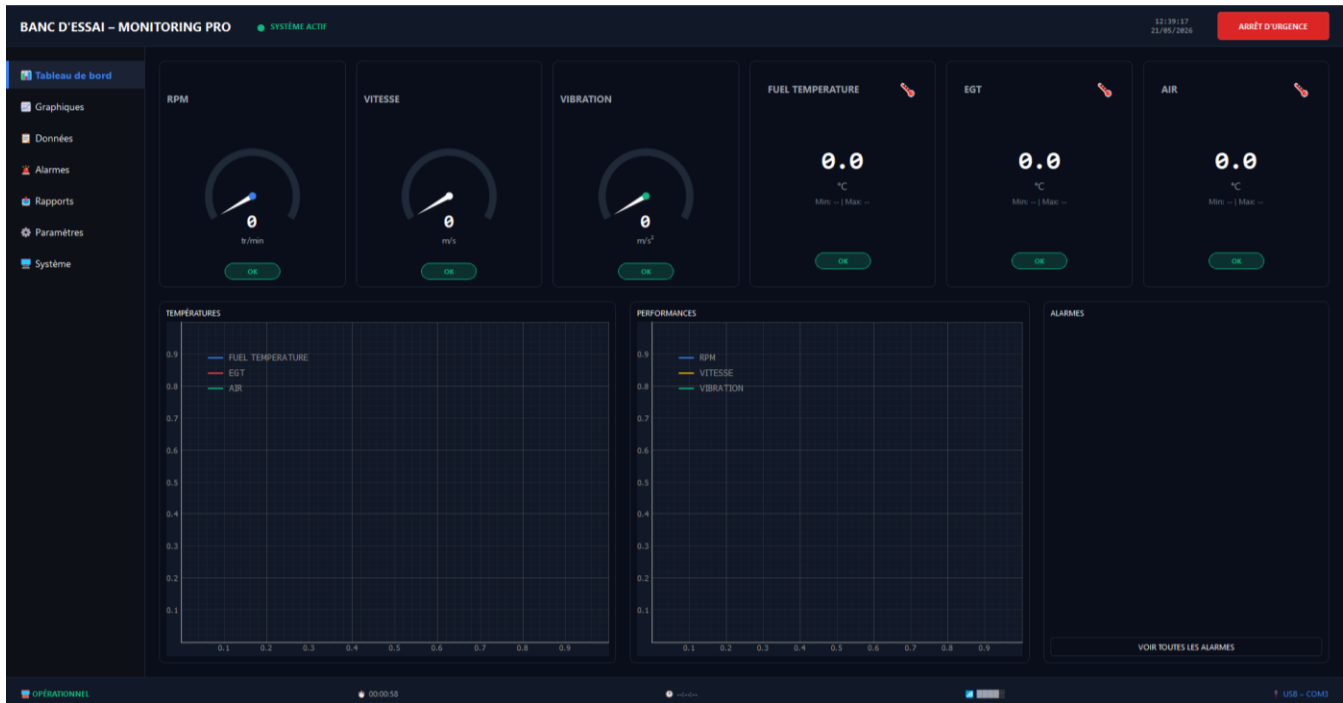


Figure III.240- Tableau de bord de supervision industrielle du banc d'essai moteur

Ce tableau de bord regroupe plusieurs indicateurs visuels :

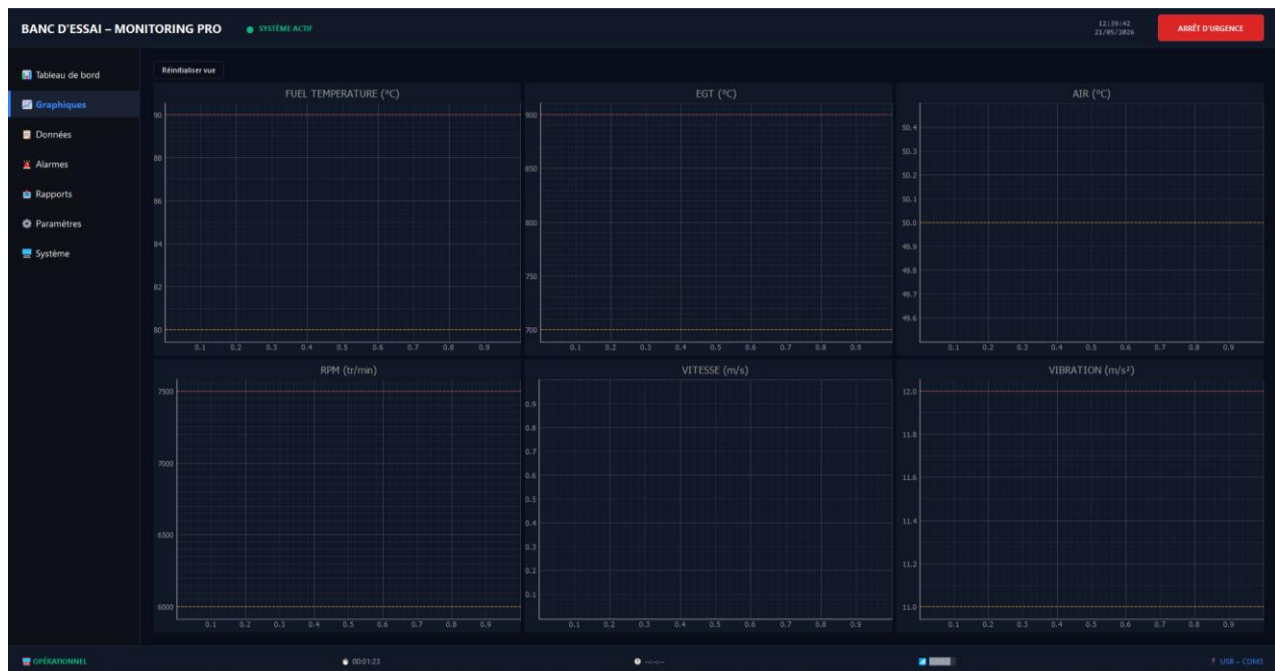
- Des **jauges analogiques** pour le régime, la vitesse et les vibrations ;
- Des **afficheurs numériques** pour les températures ;
- Des **graphes dynamiques** représentant l'évolution des performances et des températures ;
- Un **système d'alarme** et un bouton d'**arrêt d'urgence** pour la sécurité.

L'interface offre une **lecture intuitive et instantanée** de l'état du moteur. Les données sont actualisées en continu, permettant à l'opérateur de suivre les variations de température, de régime et de vibration selon les conditions de fonctionnement. Cette approche de **supervision industrielle** assure une meilleure compréhension du comportement du moteur et facilite la détection précoce d'anomalies.

III.3.2 Fonctions intégrées dans l'interface de supervision :

L'application *Banc d'Essai – Monitoring Pro* intègre plusieurs fonctionnalités essentielles pour la supervision industrielle et la sécurité du banc d'essai moteur. Ces fonctions assurent la lecture, l'analyse et la gestion des données en temps réel.

1. Visualisation graphique:



FigureIII.11 - Interface graphique dans la tableau de bord.

- Affichage simultané des grandeurs mesurées : température du carburant, température des gaz d'échappement, température d'air, régime moteur, vitesse et vibration.
- Courbes dynamiques permettant de suivre l'évolution des paramètres pendant les essais.
- Indicateurs visuels de seuils (warning/danger) pour une détection rapide des anomalies.

2. Gestion des alarmes:

BANC D'ESSAI - MONITORING PRO ● SYSTÈME ACTIF 15:39:44
23/05/2024 ARRÊT D'URGENCE

HISTORIQUE DES ALARMES

Filtrer : Toutes Effacer les alarmes

Horodatage	Capteur	Type	Valeur mesurée	Seuil dépassé
15:38:46	temp_carburant	danger	707.5	90.0
15:38:48	vibration	danger	12.9	12.0
15:38:50	vibration	danger	12.6	12.0
15:38:53	rpm	danger	106440.0	7500.0
15:38:53	vibration	warning	11.8	11.0
15:38:54	temp_echap	warning	816.0	700.0
15:38:55	vibration	warning	11.6	11.0
15:38:58	rpm	danger	1257020.0	7500.0
15:38:58	vibration	danger	12.6	12.0
15:38:59	vibration	warning	11.1	11.0
15:39:02	vibration	warning	11.3	11.0
15:39:04	vibration	danger	12.3	12.0
15:39:07	rpm	danger	13800.0	7500.0
15:39:07	vibration	warning	11.9	11.0
15:39:11	rpm	danger	39360.0	7500.0
15:39:11	vibration	warning	12.0	11.0
15:39:14	temp_echap	warning	760.0	700.0
15:39:15	rpm	danger	106440.0	7500.0
15:39:15	vibration	danger	13.1	12.0
15:39:16	rpm	warning	6540.0	8000.0
15:39:19	vibration	warning	11.8	11.0
15:39:20	rpm	danger	26100.0	7500.0
15:39:21	temp_echap	danger	1792.0	900.0

ATTENTE DONNÉES... 00:01:00 15:39:23 f USB - COM3

Figure 12- la gestion des alarmes dans le tableau de bord

- Enregistrement automatique des alarmes avec horodatage, type, valeur mesurée et seuil dépassé.
- Classification des alarmes en deux niveaux : Warning (pré-alerte) et Danger (alerte critique).
- Possibilité d'effacer ou d'exporter le journal des alarmes pour analyse ultérieure.

3. Exportation des données:

Export des mesures et des alarmes au format CSV, facilitant le traitement sous Excel ou MATLAB. Option d'export des dix dernières minutes pour un suivi rapide des essais.

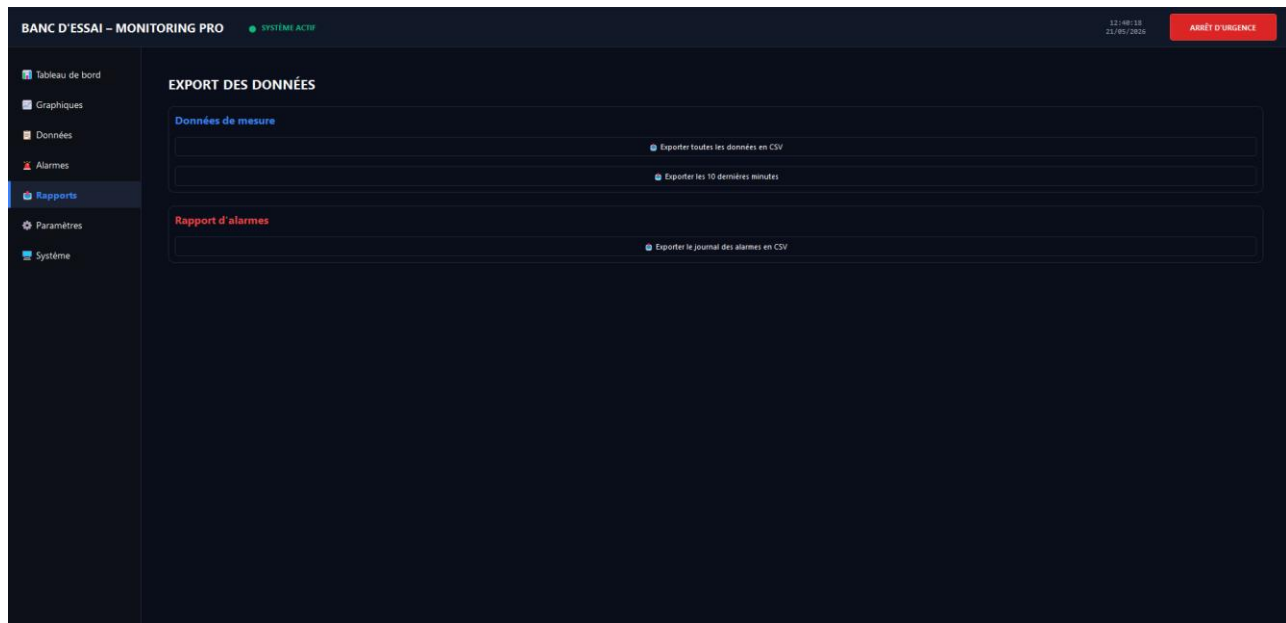


Figure 13- Exportation des données dans le tableau de bord.

4. Paramétrage du système:

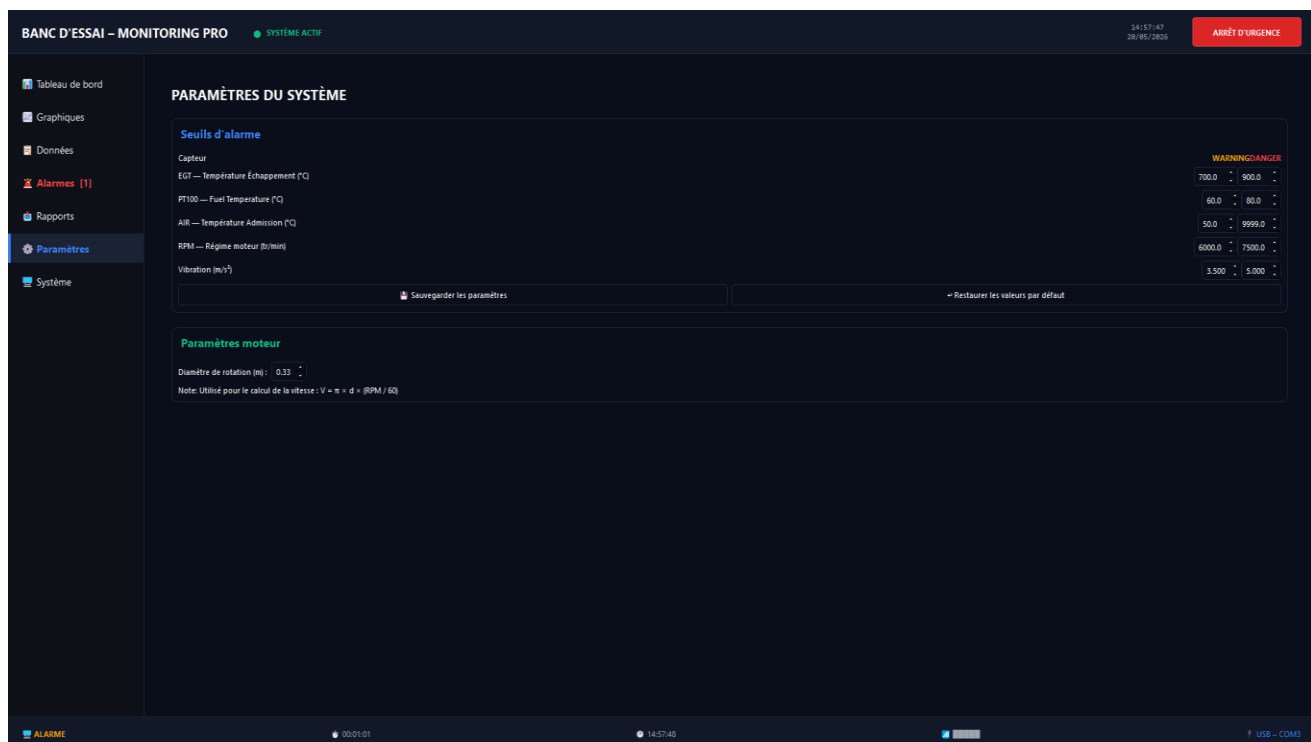


Figure III.14 - Gestion des paramètres dans le tableau de bord.

- Définition des seuils d'alarme pour chaque capteur (valeurs de sécurité et de danger).

- Configuration des paramètres moteur, notamment le diamètre de rotation utilisé pour le calcul de la vitesse.
- Sauvegarde et restauration des paramètres pour garantir la reproductibilité des essais.

5. Historique des mesures:

Effacer l'historique affiché						
Horodatage	TEM CARB (°C)	TEM ECHAP (°C)	TEM ADM (°C)	RPM	VIT (m/s)	VIB (m/s ²)
15:28:57	23.9	45.2	24.4	0.0	0.0	0.530
15:28:56	24.0	47.5	24.5	0.0	0.0	0.530
15:28:55	24.0	46.5	24.4	0.0	0.0	0.510
15:28:53	23.9	47.5	24.4	0.0	0.0	0.520
15:28:52	23.9	44.5	24.4	0.0	0.0	0.520
15:28:51	23.9	44.0	24.5	0.0	0.0	0.530
15:28:50	23.8	43.0	24.4	0.0	0.0	0.540
15:28:48	23.9	43.8	24.4	0.0	0.0	0.520
15:28:47	23.8	43.5	24.4	0.0	0.0	0.520
15:28:46	24.0	44.2	24.4	0.0	0.0	0.540
15:28:44	23.9	44.0	24.4	0.0	0.0	0.530
15:28:43	23.9	44.2	24.4	0.0	0.0	0.540
15:28:42	23.9	47.0	24.4	0.0	0.0	0.550
15:28:41	24.0	43.8	24.4	0.0	0.0	0.520
15:28:39	24.0	44.0	24.4	0.0	0.0	0.520
15:28:38	23.9	45.2	24.4	0.0	0.0	0.520
15:28:37	23.9	44.0	24.4	0.0	0.0	0.530
15:28:35	23.9	44.8	24.4	0.0	0.0	0.540
15:28:34	24.0	45.2	24.4	0.0	0.0	0.530
15:28:33	23.9	45.0	24.4	0.0	0.0	0.540
15:28:32	23.9	45.8	24.5	0.0	0.0	0.530
15:28:30	23.9	46.2	24.5	0.0	0.0	0.540
15:28:29	23.8	46.5	24.6	0.0	0.0	0.530
15:28:28	23.9	45.5	24.6	0.0	0.0	0.530
15:28:26	23.9	46.5	24.6	0.0	0.0	0.530
15:28:25	23.9	46.2	24.6	0.0	0.0	0.540

Figure III.15 - Historique du système

- Conservation des valeurs mesurées (températures, régime, vitesse, vibration) avec horodatage.
- Consultation directe des données pour l'analyse post-essai et la validation des performances du moteur.

III.4. Essais expérimentaux et performances du moteur

Cette section présente les résultats des tests réels effectués sur le banc d'essai moteur diesel Deutz Z MWM D302-1. Les mesures issues des différents capteurs (température, régime, vibrations) sont collectées et affichées en temps réel grâce au système d'instrumentation et de supervision industrielle développé. L'analyse des données permet d'évaluer la fiabilité du dispositif et de caractériser les performances du moteur dans différentes conditions de fonctionnement.

- **En état de repos :**

Avant le démarrage du moteur, le système de supervision affiche les valeurs mesurées en état de repos. Cette phase permet de vérifier la stabilité des capteurs et la fiabilité de la chaîne

d'acquisition avant les essais dynamiques. Les grandeurs physiques restent proches des conditions ambiantes : les températures sont stables, le régime et la vitesse sont nuls, et les vibrations très faibles.

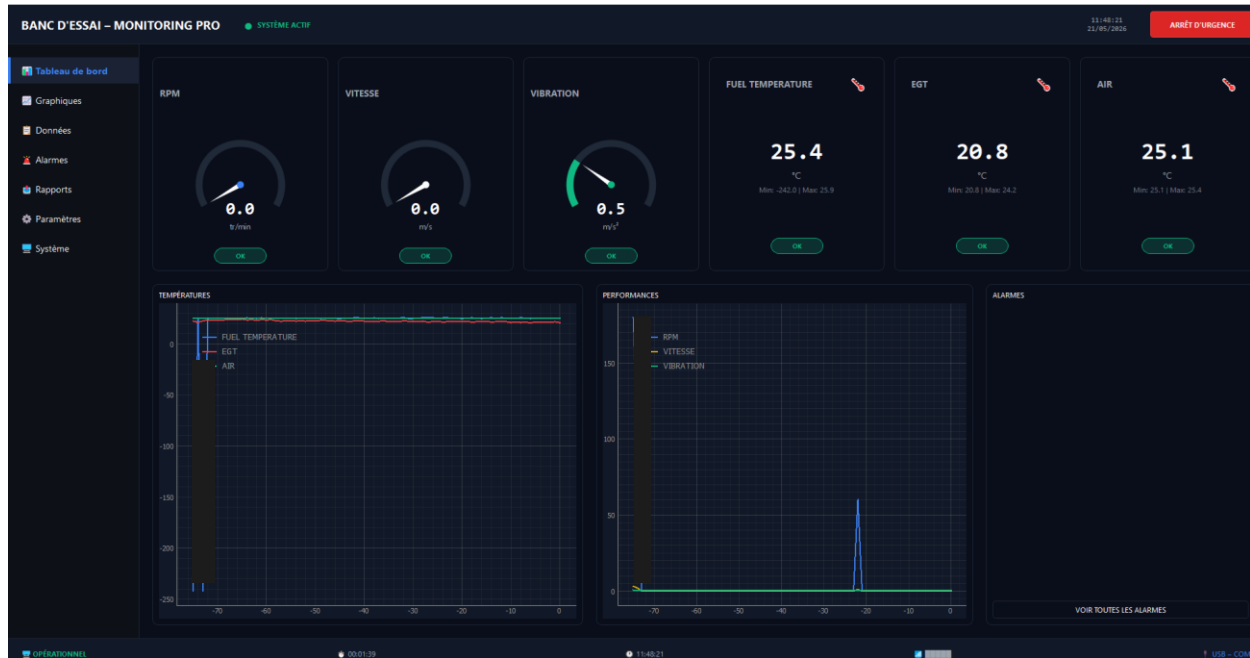


Figure III.16 - Interface de supervision du moteur en état de repos

On observe que le moteur est totalement immobile : le régime (RPM) et la vitesse sont égaux à zéro, confirmant l'absence de rotation. Les températures du carburant ($\approx 25\text{ °C}$), des gaz d'échappement ($\approx 21\text{ °C}$) et de l'air d'admission ($\approx 25\text{ °C}$) traduisent un équilibre thermique normal. La vibration mesurée ($\approx 0,5\text{ m/s}^2$) correspond à de légères oscillations résiduelles du banc d'essai. Cet état de repos constitue la référence de calibration du système avant le démarrage, garantissant la précision des mesures lors des phases actives du moteur.

- **En état de marche :**

Après le démarrage du moteur, le système de supervision affiche les premières valeurs de fonctionnement en régime stable avant l'accélération. Cette étape permet d'observer le comportement du moteur à bas régime et de vérifier la cohérence des mesures transmises par les capteurs.

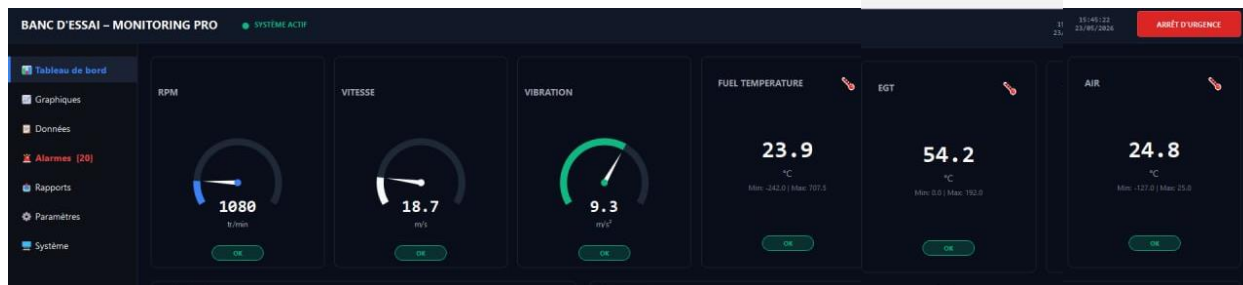


Figure III.17 - Interface de supervision du moteur en état de Marche avant l'accélération.

Le moteur fonctionne à un régime modéré d'environ 1080 tr/min, avec une vitesse de 18,7 m/s et une vibration de 9,3 m/s². Les températures relevées sont : carburant $\approx 23,9$ °C, air $\approx 24,8$ °C, et échappement $\approx 54,2$ °C, indiquant le début de la combustion et l'évacuation des gaz chauds.

Il est à noter que le moteur Diesel présente naturellement un niveau de vibration plus élevé que les moteurs à allumage commandé, en raison de la forte compression et des pressions internes générées lors de la combustion spontanée du gasoil. Cette caractéristique est bien mise en évidence par les valeurs mesurées, qui restent toutefois dans une plage acceptable pour un fonctionnement stable.

Les alarmes affichées signalent des dépassements ponctuels des seuils de vibration, phénomène normal lors du démarrage. Cette phase confirme la réactivité du système d'instrumentation et la fiabilité du banc d'essai avant l'accélération du moteur.

Après l'accélération, le moteur atteint un régime plus élevé, ce qui permet d'analyser la réponse dynamique du système et l'évolution des grandeurs physiques en temps réel. Cette étape met en évidence la montée en charge et la stabilité du moteur diesel sous régime accéléré.

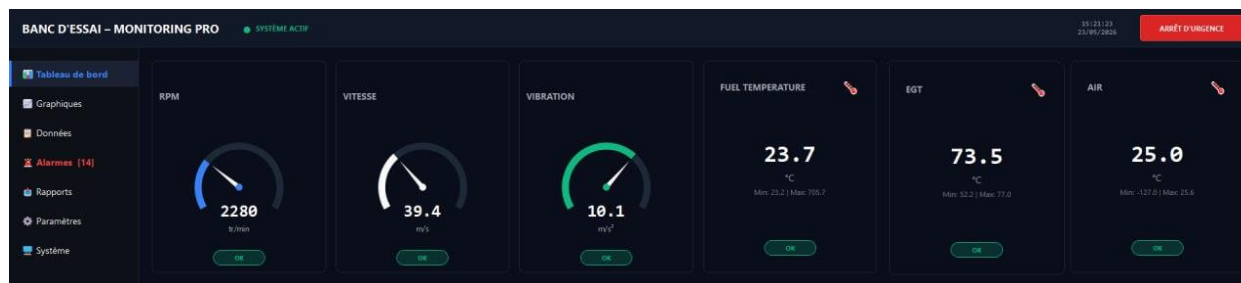


Figure III.18 - Interface de supervision du moteur en état de Marche après l'accélération.

Le régime moteur s'élève à environ 2280 tr/min, la vitesse atteint 39,4 m/s, et la vibration augmente à 10,1 m/s², traduisant une intensification des efforts mécaniques. Les températures mesurées sont : carburant $\approx 23,7$ °C, air ≈ 25 °C, et échappement $\approx 73,5$ °C, cette dernière indiquant une hausse significative de la température des gaz d'échappement (EGT) proportionnelle à l'augmentation du régime moteur.

Cette élévation de l'EGT est typique du fonctionnement d'un moteur diesel, où la combustion plus intense génère davantage de chaleur. De même, la vibration plus élevée observée est caractéristique de ce type de moteur, en raison des fortes pressions internes et de la nature de la combustion spontanée du gasoil.

III.5. Conclusion:

Ce troisième chapitre a permis de concrétiser la démarche théorique par la mise en œuvre pratique d'un banc d'essai dédié au moteur diesel Deutz MWM D302-1. L'instrumentation déployée, combinant des capteurs de température, de régime et de vibration, associée à une chaîne d'acquisition pilotée par Arduino et une interface de supervision développée sous Python, a garanti une mesure fiable et une visualisation en temps réel des paramètres de fonctionnement.

Les essais menés ont permis de caractériser le comportement dynamique du moteur selon trois phases distinctes :

- **Au repos** : La stabilité des mesures et leur adéquation avec les conditions ambiantes attestent de la précision du calibrage initial de l'instrumentation.
- **En marche (pré-accélération)** : Le régime modéré et la température d'échappement de 54,2 °C, couplés à des niveaux vibratoires caractéristiques, confirment le bon fonctionnement nominal du moteur.
- **En marche (post-accélération)** : L'atteinte d'un régime de 2280 tr/min et d'une vitesse de 39,4 m/s, accompagnée d'une montée en température à 73,5 °C, illustre efficacement la réponse du système à une montée en charge et l'intensification du processus de combustion.

Ces résultats valident la robustesse et la pertinence du système de monitoring développé. Au-delà de la validation technique, ce travail constitue une plateforme expérimentale solide pour des analyses comparatives ultérieures. Il ouvre également des perspectives d'optimisation, notamment par l'amélioration de la fiabilité du câblage et l'intégration de seuils d'alarme automatisés pour une gestion encore plus fine de la sécurité et de la maintenance prédictive du banc.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'explorer de manière progressive et intégrée les moteurs thermiques, les bancs d'essais et l'instrumentation, jusqu'à la réalisation pratique d'un dispositif expérimental appliqué à un moteur diesel.

Le premier chapitre a posé les bases théoriques en retraçant l'évolution historique des moteurs, en détaillant leurs cycles de fonctionnement et en mettant en évidence les spécificités du moteur diesel. Cette partie a montré l'importance de la combustion interne et le rôle des organes mécaniques et auxiliaires dans la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique.

Le deuxième chapitre a souligné la nécessité des bancs d'essais pour la recherche, la mise au point et la validation des performances des moteurs. L'accent a été mis sur l'architecture des bancs, leurs classifications fonctionnelles et techniques, ainsi que sur l'importance de l'instrumentation pour transformer les grandeurs physiques en données exploitables. Cette partie a démontré que la précision et la fiabilité des mesures reposent directement sur la qualité des capteurs et des systèmes de supervision.

Ce troisième chapitre a concrétisé la démarche entreprise en passant de l'étude théorique à la réalisation pratique d'un banc d'essai moteur diesel. L'intégration des capteurs, la programmation sous Arduino IDE et le développement d'une interface graphique en Python ont permis de mettre en place une chaîne complète d'acquisition et de supervision industrielle.

Les essais expérimentaux réalisés ont confirmé la cohérence des mesures et la fiabilité du système développé. Les capteurs ont répondu de manière satisfaisante aux sollicitations, validant ainsi leur intégration et leur rôle dans la surveillance du moteur. Le dispositif conçu démontre la capacité de l'instrumentation à assurer un suivi précis et en temps réel des grandeurs physiques, tout en offrant une base solide pour l'analyse des performances et l'amélioration future du banc d'essai.

Ces résultats valident la fiabilité du dispositif expérimental et démontrent la pertinence d'une approche intégrée combinant théorie, instrumentation et supervision. Le travail réalisé constitue une contribution significative à la compréhension et à la maîtrise des moteurs diesel, tout en offrant une base pédagogique et scientifique pour de futures recherches.

Enfin, ce mémoire ouvre des perspectives d'amélioration : l'intégration de capteurs supplémentaires (pression, émissions polluantes), l'optimisation des seuils d'alarme et l'automatisation avancée des essais. Ces développements permettront d'élargir le champ d'application du banc d'essai et de renforcer son rôle dans la recherche et l'enseignement en mécanique énergétique.

Références et Bibliographies

Références

- [1] G. Lamine et Z. Sabri, « Moteur thermique », Support de cours, Institut Supérieur des Etudes Technologiques du Kef_ Tunisie, 2025.
- [2] « Histoire des groupes moteurs diesel | Cummins Inc. » Consulté le: 30 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cummins.com/fr-ca/mp-resource/en-na/news/2023/04/04/history-diesel-engines>
- [3] Labed Fayçal, « Détection des défauts dans le système de combustion d'un moteur Diesel », Thèse de Magister, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2007.
- [4] OLIVIER. G, « Modélisation du moteur à allumage par compression dans la perspective du contrôle et du diagnostic », Thèse de doctorat en Physique- Énergétique, université de Rouen, France, décembre 2004.
- [5] D. A. Pierpont, D. T. Montgomery, et R. D. Reitz, « Reducing Particulate and NOx Using Multiple Injections and EGR in a D.I. Diesel », présenté à International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, United States, févr. 1995, p. 950217. doi: 10.4271/950217.
- [6] BOUSBAA. H, « Moteur à combustion interne », photocopié, Université de Tlemcen, 2016.
- [7] Lawrence J. Marchetti, P.E, *Diesel Engine Fundamentals*. PDHonline Course M144 (4 PDH), 2020.
- [8] Hatat, Nicolas-Ivan, « Fonctionnement des moteurs ». l'École Centrale de Nantes.
- [9] P.Sovanna, « Moteurs thermiques : SYSTEME DE REFROIDISSEMENT ». 2004.
- [10] P. Sovanna, « Moteurs thermiques : SYSTEME DE LUBRIFICATION ». 2004.
- [11] Volkswagen AG, Service Training, « Le moteur V6 TDI de 3,0 l (Conception et fonctionnement) ». mars 2005.
- [12] Dr. Mohamed BENCHERIF, « Moteurs à Combustion Interne, Combustion et Eléments de Carburant », Photocopié destiné aux étudiants de Licence et Master LMD, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohammed Boudiaf, 2018.
- [13] M. A. BENOUAHLIMA et M. N. HAMLAOUI, « ETUDE ET REALISATION D'UN BANC D'ESSAIS MOTEUR MOBILE DUAL-FUEL », Thèse pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique, ECOLE NOTIONALE POLYTECHNIQUE _ALGER, 2016.
- [14] BOURAS Mohammed. et KERKAR Mahdi, « Diagnostic des défauts d'un moteur diesel par banc d'essai », Thèse de Master en Electromécanique, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2021.
- [15] M. J. RANAIVOMANANA, « CONTRIBUTION A LA CONCEPTION D'UN BANC D'ESSAI ENERGETIQUE POUR MOTEUR A ESSENCE », Thèse pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Génie Industriel, Université D'antananarivo Ecole Supérieure Polytechnique D'antananarivo, 2013.
- [16] Dr. Mustapha Bordjane, « Performances caractéristiques des MCI », Photocopié destiné aux étudiants de Licence et Master LMD, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran «Mohamed Boudiaf», 2024.
- [17] « Système d'instrumentation controle moteurs diesel | CMR ». Consulté le: 20 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cmr-group.com/systeme-instrumentation-control-moteurs-diesel>
- [18] AUTOMECANIK, « Capteur de température d'air d'admission », AUTOMECANIK. Consulté le: 25 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.automecanik.com/reference-auto/capteur-temperature-d-air-admission>
- [19] Exxotest – Annecy Électronique S.A.S, « Guide de l'utilisateur DT-M004 – Les caractéristiques de l'air ». Chavanod, France, 24 juillet 2007. [En ligne]. Disponible sur: https://exxotest.com/content/uploads/2018/03/GU_DT-M004_FR.pdf
- [20] Jingpu Sensor, « Quelle est la fonction d'un capteur de température de carburant », Jingpu Sensor. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.jingpusensor.com/blog/what-is-the-function-of-a-fuel-temperature-sensor-243151.html>

- [21] Piping Technology System, « Qu'est-ce qu'un capteur de température des gaz d'échappement ? - Système de tuyauterie ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://pipingtechs.com/what-is-exhaust-gas-temperature-sensor/>
- [22] MOOCAR, « Spécifications techniques et guide de sélection des capteurs de température des gaz d'échappement », MOOCAR AUTO PARTS. Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://moocarparts.com/fr/guide-de-selection-des-capteurs-egt/>
- [23] Kheira SMATEL et BELACEL Khalida, « Etude et simulation d'un capteur de température par une carte Arduino », Thèse de Master en Electronique, Université de Tissemsilt, 2023.
- [24] Sarah, « Capteurs de pression d'huile : Guide pour la santé du moteur et la prévention des pannes », CAPTEUR SENDO. Consulté le: 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://sendo-sensor.com/fr/blog/quest-ce-quun-capteur-de-pression-dhuile/>
- [25] MPi – Bougicord, « Capteurs MAP – Série 15 ». Consulté le: 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mp-i.eu/fr/files/Capteurs%20MAP.pdf>
- [26] Metlan Instruments, « Qu'est-ce qu'un débitmètre de carburant - Metlan Instruments ». Consulté le: 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://metlaninst.com/fr/quest-ce-quun-debitmetre-de-carburant/>
- [27] IFM Electronic GmbH, « capteurs de vibrations », ifm.com. Consulté le: 30 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ifm.com/fr/fr/category/200_040_010
- [28] HELLA GmbH & Co. KGaA, « INFO PRODUIT Capteurs de vitesse de roulement », HELLA. Consulté le: 3 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hella.com/partnerworld/fr/Documentation-Supports/Fiches-infos-produits/INFO-PRODUIT-Capteurs-de-vitesse-de-roulement-39185/>
- [29] Source Sensors, « Capteurs de niveau de liquide pour applications industrielles et commerciales », Source Sensors. Consulté le: 30 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sourcesensors.com/fr/suppliers/capteurs-de-niveau-de-liquide/>
- [30] Navixy, « Types de capteurs de niveau de carburant | Expert center | Navixy | Documentation ». Consulté le: 7 juin 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://navixy.com/docs/expert-center/fr/vehicle-telematics-technology/fuel-management/installation-and-initial-configuration-of-fuel-control-devices/fuel-level-sensors/types-of-fuel-level-sensors>
- [31] Dr. Aicha MEHIDI., « CAPTEURS ET INSTRUMENTATION ». Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem, 2022.
- [32] L. Hammal, « Conception et réalisation de capteurs pour l'instrumentation d'une machine de traction, automatisation de l'acquisitions des données. », Thèse de Magister, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE, 2014.
- [33] Dr. Abdelkader Rabah, « Chapitre 2. Quelques caractéristiques métrologiques », Université Djilali Bounaama Khemis Miliana.
- [34] B. MECEMMENE et A. BENMAZA, « Etude et mise au point du banc d'essai moteur diesel monocylindre », Thèse pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ORAN -MAURICE AUDIN, 2023.

Annexes

Le programme Arduino

```
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_MAX31865.h>
#include <max6675.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Wire.h>
#include <MPU6050.h>
// ===== PT100 =====
#define CS_PT100 9
Adafruit_MAX31865 pt100(CS_PT100);
// ===== THERMOCOUPLE =====
int thermoCLK = 6;
int thermoCS = 5;
int thermoDO = 4;
MAX6675 thermo(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
// ===== DS18B20 =====
#define ONE_WIRE_PIN 2
OneWire oneWire(ONE_WIRE_PIN);
DallasTemperature airTemp(&oneWire);
// ===== RPM =====
volatile int compteur = 0;
unsigned long lastTime = 0;
int repere = 1;
float diametre = 0.33;
// ===== MPU =====
MPU6050 mpu;
int16_t ax, ay, az;
// ===== INTERRUPT =====
void countRPM() {
    compteur++;
}
// ===== SETUP =====
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(CS_PT100, OUTPUT);
    pinMode(thermoCS, OUTPUT);
    digitalWrite(CS_PT100, HIGH);
    digitalWrite(thermoCS, HIGH);
    pt100.begin(MAX31865_3WIRE);
    airTemp.begin();
    pinMode(3, INPUT);
```

```

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), countRPM, RISING);
Wire.begin();
mpu.initialize();
delay(500);
Serial.println("SYSTEM READY");
}
// ===== LOOP =====
void loop() {
  if (millis() - lastTime >= 1000) {
    // ===== PT100 =====
    digitalWrite(CS_PT100, LOW);
    float temp_carburant = pt100.temperature(100, 430);
    digitalWrite(CS_PT100, HIGH);
    // ===== EGT =====
    digitalWrite(thermoCS, LOW);
    delay(80);
    float temp_egz = thermo.readCelsius();
    digitalWrite(thermoCS, HIGH);
    // ===== AIR TEMP =====
    airTemp.requestTemperatures();
    float temp_admission = airTemp.getTempCByIndex(0);
    // ===== RPM =====
    noInterrupts();
    int c = compteur;
    compteur = 0;
    interrupts();
    float rpm = (c * 60.0) / repere;
    float vitesse = 3.1416 * diametre * (rpm / 60.0);
    // ===== VIBRATION (m/s²) =====
    float somme = 0;
    int N = 10;
    for (int i = 0; i < N; i++) {
      mpu.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
      // Conversion en m/s²
      float ax_ms = (ax / 16384.0) * 9.81;
      float ay_ms = (ay / 16384.0) * 9.81;
      float az_ms = (az / 16384.0) * 9.81;
      // Accélération totale
      float total = sqrt(ax_ms * ax_ms + ay_ms * ay_ms + az_ms * az_ms);
      // Supprimer la gravité
      float a_dyn = abs(total - 9.81);
      somme += a_dyn * a_dyn;
      delay(2);
    }
    float vibration = sqrt(somme / N);
    // ===== AFFICHAGE =====

```

```

Serial.print("TEM CARB=");
Serial.print(temp_carburant);
Serial.print("°C | TEM ECHAP=");
Serial.print(temp_egz);
Serial.print("°C | TEM ADM=");
Serial.print(temp_admission);
Serial.print("°C | RPM=");
Serial.print(rpm);
Serial.print(" | VIT=");
Serial.print(vitesse);
Serial.print(" m/s | VIB=");
Serial.print(vibration);
Serial.println(" m/s^2");
lastTime = millis();
}
}

```

Bibliothèques incluses : SPI, Adafruit_MAX31865, MAX6675, OneWire/DallasTemperature, Wire/I²C, MPU6050.

Capteurs intégrés :

1. PT100 + MAX31865 (température carburant, via SPI).
2. Thermocouple type K + MAX6675 (température échappement, via SPI).
3. DS18B20 (température air admission, via OneWire).
4. Capteur RPM 5 V (interruption sur D3).
5. MPU6050 (vibrations, via I²C).