



République Algérienne Démocratique Et Populaire  
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR EL-OUED  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine :** Sciences et Technologies

**Filière :** Génie mécanique

**Spécialité :** Energétique

**Thème**

**Etude de l'opacité dans les moteurs diesel**

**Devant le jury composé de :**

Président : Dr. ZOBIRI Oussama

Examineur : Dr. Khalil Deghoun

Encadreur : Dr. BOULIFA M. Iliasse

**Présent par :**

- NAKES Abd Elhalim

- BOURAS Aymen

- GHERBI Mohamed Ali

-DOUCHE Abd Elbasset

**Année universitaire 2024 /2024**

# Dédicace

- À mon modèle de vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et ma source de force, à celui qui a goûté l'amertume de la vie pour jouir de la douceur de la vivre, que Dieu te garde comme une couronne sur ma tête," mon cher père"
- À celui dont les prières ont été pour moi une lumière qui éclaire le chemin, à celui dont la description rend les mots honteux et secs, au sens de la vie et au secret de l'existence, à celui à qui je dédie cet ouvrage avant moi, la flamme de mon cœur et de ma vie, à tout amour: à "ma chère mère."
- À la splendeur de la vie et à ceux qui ont renouvelé mes vœux et à ceux qui m'ont rendu heureux dans toutes les situations, "mes frères et sœurs", je vous aime .
- À ceux qui étaient comme la pluie dans les jours maigres, aux meilleurs et aux mieux choisis de mes jours, aux amis des années et à ceux dans l'adversité, à mes amis: " Ayman - Mohammed Al-Eid - Mohammed Al-Bachir."
- A tous ceux qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours dans l'enseignement supérieur, à ceux avec qui les études m'ont rapproché, dans ses bons comme dans ses mauvais moments .
- À tous les membres de ma promotion " Génie Mécanique Energétique 2021 "
- A tous mes professeurs depuis mes premières années d'études, que Dieu vous récompense en ma faveur.

*Nakes Abd Elhalim*

# **Dédicace**

**Merci à Dieu, par la grâce duquel les bonnes actions sont accomplies et le succès ne vient que de Lui**

**Je dédie ce travail, réalisé avec amour et affection, à mes honorables parents.**

**Le premier d'entre eux est mon père, qui n'a ménagé aucun effort pour que je puisse poursuivre mon parcours éducatif.**

**Je le dédie également à ma mère, qui a travaillé dur pour moi et n'a eu aucun repos jusqu'à ce qu'elle me voie au plus haut niveau.**

**Je dédie également cette note à tous mes frères, chacun en son noble nom et à mes amis qui ont toujours été un soutien moral tout au long de notre parcours académique**

**Je n'oublie surtout pas mes amis qui ont participé avec moi à mener à bien ce travail.**

**J'espère aussi qu'il aura l'honneur d'admirer le comité qui supervise le discours**

***Gherbi Mohammed Ali***

# Dédicace

**Louange à Dieu toujours et surtout.**

**Je dédie cette remise de diplôme à mon père, que Dieu ait pitié de lui et me rassemble dans les jardins du paradis.**

**Je le dédie également à celui qui est resté éveillé et a travaillé dur pour me voir dans ces étapes avancées de ma vie.**

**A tous les membres de ma famille, chacun par son nom, grand et petit, homme et femme A mes frères et sœurs, que Dieu les protège.**

**Je le dédie également à tous ceux qui ont contribué moralement, tendu la main et aidé à mener à bien ce travail.**

**A tous mes professeurs, chacun en son nom, et que Dieu mette tout votre travail dans la balance de vos bonnes actions.**

**J'espère également que ce travail profitera à la nation islamique et qu'il sera dans la balance de mes bonnes actions.**

***Bouras Aymen***

# **Remerciements**

**Louange à Dieu, avant tout, de nous avoir accordé le succès dans l'achèvement de ce travail et d'atteindre cette étape importante de notre vie pour laquelle nous avons toujours étudié et travaillé.**

**Nous remercions ensuite notre professeur et enseignant, DR BOULIFA MOHAMMED ILIASSE, pour son soutien continu et ses conseils avisés, grâce auxquels nous avons pu surmonter les difficultés et les défis auxquels nous avons été confrontés lors de la réalisation de ce travail.**

**Nous adressons également nos remerciements à tous les membres du comité d'encadrement aujourd'hui lors de la présentation de nos travaux, chacun en son nom et sa position. Louange à Dieu, qui nous a accordé le succès et nous a fait l'honneur de vous présenter, notre chère. Les professeurs.**

**Nous tenons également à remercier nos collègues avec qui nous avons partagé de beaux moments tout au long des années scolaires passées.**

**Nous n'oublions pas non plus tous ceux qui nous ont soutenus et nous ont donné un coup de main depuis le début de la planification de ce travail jusqu'à son achèvement et sa soumission. Merci à tous et que Dieu vous récompense de la meilleure des récompenses.**

# ملخص

بعد عدة دراسات تم اجرائها على محركات ذات الاحتراق الداخلي، تبين أن هناك تأثيرًا سلبيًا على البيئة نتيجة للانبعاثات التي تنتج عن هذه المحركات، خاصة محركات الديزل، اين تشكل لدينا مصطلح "عتامة محركات الديزل" كنسبة تقيس مدى الانبعاثات الضارة من محرك الديزل باستخدام جهاز الأوباسيتر.

من خلال رصد النتائج في ورشات المراقبة التقنية للسيارات، تم التوصل إلى أن تلف أحد أجزاء المحرك يُعتبر السبب الرئيسي وراء تكون العتامة، سواء كان ذلك في الأجزاء الثابتة أو المتحركة.

ويعتبر هذا الأمر أكثر شيوعًا في الفئات القديمة من المحركات، بينما تحتوي الفئات الجديدة على تقنيات متقدمة يتم انشائها للحد من العتامة وتقليل التأثير البيئي المضر.

**كلمات مفتاحية:** محرك ديزل، العتامة، وقود، البيئة، الأوباسيتر

## ABSTRACT

After several studies conducted on internal combustion engines, it has been found that there is a negative impact on the environment due to the emissions produced by these engines, especially diesel engines, the term "**diesel engine opacity**" represents the percentage measuring the extent of harmful emissions from the diesel engine using an **opacity meter**. Through monitoring the results in automotive technical inspection workshops, it has been concluded that damage to one of the engine components is considered the main cause of **opacity** formation, whether in fixed or moving parts.

This is more common in older engine models, while newer models contain advanced technologies designed to reduce **opacity** and minimize environmental impact.

**Keywords :** diesel engine, opacity, fuel, environment, opacity meter.

## **RESUME**

Après plusieurs études menées sur les moteurs à combustion interne, il a été constaté qu'il existe un impact environnemental négatif en raison des émissions produites par ces moteurs, en particulier les moteurs diesel. Le terme "**opacité du moteur diesel**" représente le pourcentage mesurant l'étendue des émissions nocives du moteur diesel à l'aide d'un **opacimètre**.

En surveillant les résultats dans les ateliers d'inspection technique automobile, il a été conclu que des dommages à l'un des composants du moteur sont considérés comme la principale cause de la formation **d'opacité**, qu'il s'agisse de pièces fixes ou mobiles.

Ceci est plus courant dans les anciens modèles de moteurs, tandis que les nouveaux modèles contiennent des technologies avancées conçues pour réduire **l'opacité** et minimiser l'impact environnemental nocif.

**Les mots calés :** Moteur diesel, opacité, carburant, environnement, opacimètre.

# Liste des figures

Figure i.1: rudolf diesel [2] .....	3
Figure i.2: architecture d'un moteur a combustion interne [4] .....	4
Figure i.3: culasse[6] .....	6
Figure i.4: le bloc-cylindres. ....	7
Figure i.5: carter d'huile [7].....	7
Figure i.6: collecteur-d-admission[8] .....	8
Figure i.7: piston[9] .....	8
Figure i.8: la bielle[10] .....	9
Figure i.9: vilebrequin[11] .....	9
Figure i.10: les organes fixe de moteur diesel[12] .....	10
Figure i.11: les organes mobiles de moteur diesel[12] .....	11
Figure i.12: cycle de carnot [16].....	13
Figure i.13: cycles a quatre temps[17].....	14
Figure i.14: cycle diesel theorique[19] .....	16
Figure i.15: cycle a pression constant [20] .....	17
Figure i.16: cycle mixte [21] .....	18
Figure ii.1: radiateur bouche.....	22
Figure ii.2:capteurs endommages[26] .....	22
Figure ii.12: échelle pour determiner un coefficient $\lambda$ .....	27
Figure iii.1: l'environnement [38] .....	31
Figure iii.2: emissions d'echappement[42] .....	33
Figure iii.3: emissions d'echappement[42] .....	33
Figure iii.4: une image illustrant les proportions relatives .....	35
Figure iii.5: une image illustrant la particule de nox[45] .....	35
Figure iii.6: une image illustrant la particule de co2[45] .....	36
Figure iii.7: une image illustrant la particule de hap[46] .....	36
Figure iii.8:une image illustrant les proportions relatives de la distribution les composés organiques volatils[47] .....	37
Figure iii.9: une image illustrant la repartition des elements dans le tableau periodique [48] .....	37

Figure iv.1: opacimetre de la societe capelec .....	43
Figure iv.2: architecture de l'opacimetre .....	43
Figure iv.3: tuyau d'echappement.....	44
Figure iv.4: les deux ventilateurs.....	44
Figure iv.5: la carte mere .....	45
Figure iv.6: ecran lcd .....	45
Figure iv.7: resultat du calcul en pourcentage.....	50
Figure iv.8: le resultat du calcul de k.....	54
Figure iv.9: l'opacite $k_1$ dans les moteurs diese .....	58

# Liste des tableaux

Tableau i-1:classification des moteurs a combustion interne [5].....	4
tableau iv-1:resultats d'analyse moteurs diesel .....	55
tableau iv-2: resultats d'analyse moteurs diesel de 2005 a 2009 .....	56
tableau iv-3:resultats d'analyse moteurs diesel de 2010 a 2014 .....	57
tableau iv-4:resultats d'analyse moteurs diesel de 2015 a 2019 .....	57
tableau iv-5:resultats d'analyse moteurs diesel de 2020 a 2022 .....	58
tableau iv-6:resultats de calcule la moyenne arithmetique de moteur diesel.....	58

# Nomenclature

NO<sub>2</sub> : Dioxyde d'azote

C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> : Heptane hydrocarbure

O<sub>2</sub> : Oxygène

N<sub>2</sub> : Azote

H<sub>2</sub>O : eau

SO<sub>2</sub> : Dioxyde de soufre

NO<sub>x</sub> : Oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>)

CO : Monoxyde de carbone

CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone

H : Hydrocarbures

HC<sub>1</sub> : Acide chlorhydrique

O<sub>3</sub> : Ozone

CH<sub>4</sub> : Méthane

N<sub>2</sub>O : oxydes nitreux

HO<sub>2</sub> : hydro-peroxyde

H<sub>2</sub> : hydrogène

C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> : butane

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> : propane

C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> : pentane

PMH : point mort haut

PMB : point mort bas

AOA : Avance à l'ouverture d'admission

AP1500 : L'analyseur de gaz d'échappement

RFA : Retard à la fermeture d'admission

AOE : Avance à l'ouverture d'échappement

RFE : Retard à la fermeture d'échappement

AI : Avance à l'injection

# SOMMAIRE

Dédicace1 .....	I
Dédicace2 .....	II
Dédicace3 .....	III
Remerciement .....	IV
Résumés .....	V
Résumés .....	VI
Liste des figures .....	VII
Liste des tableaux .....	VIII
Nomenclature .....	X
Introduction générale.....	1
chapitre I : Généralité sur le moteur à combustion interne. ....	1
I.1 Introduction .....	2
I.2 Historique de moteur Diesel .....	2
I.3 Architecture d'un moteur à combustion interne .....	4
I.4 Classification des moteurs à combustion interne.....	4
I.5 Définition d'un moteur Diesel .....	6
a) L'énergie chimique en énergie calorifique. ....	6
b) L'énergie calorifique en énergie mécanique. ....	6
I.5.1 Organes fixes .....	6
I.5.2 Les organes mobiles .....	8
I.5.3 Architecture des organes fixes dans les moteurs a combustion interne ....	10
I.5.4 Architecture des organes mobiles dans les moteurs a combustion interne .....	11
I.6 Cycle du moteur diesel.....	12
I.6.1 Définition d'un cycle.....	12
I.6.2 Etude de cycle de Carnot .....	12
I.6.3 Cycles à quatre temps .....	14
I.6.4 Cycles diesel .....	15

6. Cycle à pression constante :	17
I.6.5 Cycle Mixte :	17
I.7 Conclusion.....	19
chapitre II : Opacité dans les moteurs diesel.....	20
II.1 Introduction.....	21
II.2 Définition de l'opacité.....	21
II.3 Les principaux facteurs de formation de l'opacité .....	22
II.3.1 Combustion incomplète.....	22
II.4 Comment la combustion se forme à l'intérieur d'un moteur diesel .....	25
II.4.1 Comburant .....	25
II.4.2 Composition de l'air standard.....	25
II.4.3 Combustibles .....	26
II.4.4 Produits de combustion (fumées).....	26
II.4.5 Combustion stœchiométrique (idéale) .....	26
II.4.6 Combustion non-stœchiométrique .....	27
II.4.7 Combustion non complète.....	27
II.5 Analyse des fumées :	28
II.6 Conclusion .....	28
chapitre III : Effets de l'opacité sur l'environnement.....	29
III.1 Introduction .....	30
III.2 Définition de l'environnement .....	30
III.3 Définition de la pollution .....	31
III.4 La pollution à travers l'histoire.....	32
III.5 Définition des émissions d'échappement.....	32
III.6 Effets de la fumée des voitures sur la santé humaine.....	33
III.6.1 Problèmes respiratoires .....	33
III.6.2 Maladies cardiaques et vasculaires .....	34
III.6.3 Cancer .....	34
III.7 Impact sur les enfants et les personnes âgées.....	34

III.7.1 Impact sur l'environnement.....	34
III.8 Types de molécules .....	35
III.8.1 Les particules fines (PM2.5 et PM10) .....	35
III.8.2 Les oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> ).....	35
III.8.3 Le monoxyde de carbone (CO).....	36
III.8.4 Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) .....	36
III.8.5 Les composés organiques volatils (COV) .....	36
III.8.6 Les métaux lourds .....	37
III.9 Équations chimiques des molécules toxiques .....	38
[ 2NO + O <sub>2</sub> → 2NO <sub>2</sub> ] .....	38
[ 2C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> + 25O <sub>2</sub> → 16CO + 18H <sub>2</sub> O] .....	38
III.10 Façons de réduire l'opacité.....	39
III.11 Conclusion.....	40
chapitre IV : Etude expérimentale .....	41
IV.1 Introduction .....	42
IV.2 Historique sur l'opacimètre .....	42
IV.3 Définition de l'opacimètre .....	42
IV.4 Description de l'appareil .....	43
IV.5 Les instruments qui composent l'opacimètre .....	44
IV.5.1 Tuyau d'échappement .....	44
IV.5.2 Deux ventilateurs .....	44
IV.5.3 La source lumineuse .....	45
IV.5.4 Les lentilles et les miroirs .....	45
IV.5.5 Ecran LCD .....	45
IV.6 Principe de fonctionnement.....	46
IV.7 Loi de Beer-Lambert .....	46
IV.7.1 Interpretation de equation .....	47
IV.7.2 Méthodes de mesure de l'intensité de la lumière originale (I <sub>0</sub> ) .....	47
IV.7.3 Comparaison directe:.....	47

IV.7.4 Calibration automatique: .....	47
IV.7.5 Utilisation d'une référence interne:.....	47
IV.8 Calcul de l'opacité .....	48
IV.8.1 Exemple illustratif.....	48
IV.8.2 Code informatique pour calculer l'opacité.....	48
IV.8.3 Explication du code .....	51
IV.8.4 Exemple Illustratif .....	52
IV.9 Rôle du Coefficient K dans les Mesures Pratiques .....	52
IV.9.1 Code pour Calculer le Coefficient K en Utilisant l'Équation de Beer-Lambert .....	52
IV.9.2 Explication du Code.....	54
IV.9.3 Exemple de Valeurs d'Entrée : .....	55
IV.10 Résultats d'analyse moteurs Diesel .....	55
IV.10.1 Conclusion complète de l'expérience sur l'analyse des émissions des moteurs diesel.....	56
IV.10.2 Remarque :.....	59
IV.10.3 Synthés globaux des résultats .....	59
IV.11 Conclusion.....	60
Conclusion général.....	64
Bibliographie.....	66

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

### Introduction générale

Le monde a réalisé l'importance des moteurs à combustion interne depuis de nombreuses années. Après l'évolution des études et de la technologie, de nombreuses applications ont été développées autour du moteur à combustion interne afin d'assurer une efficacité et des performances élevées de manière positive et d'éviter les dommages causés par les gaz résultant de sa combustion incomplète, également connue sous le nom de fumée noire, ce qui constitue un danger pour l'environnement et la vie des êtres vivants, y compris les humains, les animaux et les plantes.

Dans cette recherche, nous avons d'abord présenté une étude générale sur les moteurs à combustion interne et les avons définis. Le moteur à combustion interne est un dispositif thermique qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique, et comprend de nombreuses pièces principales, fixes et mobiles. Il existe deux types de moteurs, le premier est le moteur diesel qui fonctionne combustion pression, et le second est le moteur à essence qui fonctionne par allumage de la bougie d'allumage. Les deux passent par quatre temps successifs pendant la combustion.

Dans la deuxième partie, nous avons défini la fumée noire dans les moteurs diesel, ses causes, qui résident dans les dommages à l'une des pièces du moteur, ce qui provoque un dysfonctionnement de la combustion et une combustion incomplète, produisant des équations chimiques déséquilibrées et inéquitables, ce qui peut entraîner une diminution des performances du moteur et réduire sa durée de vie.

Ensuite, nous avons effectué une étude générale sur les dangers de la fumée noire résultant de la combustion incomplète du moteur diesel et les dommages qu'elle cause à l'environnement, en utilisant de nombreuses statistiques et études sur la fumée noire, qui est la principale cause de pollution dans notre époque actuelle, avec des propositions de solutions pour la prévenir.

Dans le quatrième chapitre, nous avons mené une étude expérimentale dans un atelier spécialisé dans les véhicules automobiles sur l'opacimètre, l'appareil reconnu pour mesurer la fumée noire des moteurs diesel, et nous avons présenté ses composants. Nous avons pris de nombreux échantillons et résultats expérimentaux de moteurs diesel différents de 2005 à 2022, divisés en quatre groupes.

L'opacimètre se base sur l'équation de Beer-Lambert pour mesurer la lumière et donner des résultats précis qui nous permettent de réparer les défauts et de réduire le risque posé par la fumée noire, nuisible à la vie humaine et environnementale.

**CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ**  
**SUR LE MOTEUR À**  
**COMBUSTION INTERNE.**

## I.1 Introduction

Le moteur diesel, baptisé d'après son inventeur, l'ingénieur allemand Rudolf Diesel, représente une innovation majeure dans le domaine des moteurs à combustion interne. Contrairement aux moteurs à essence, il utilise la compression de l'air pour enflammer le carburant diesel, offrant ainsi une efficacité énergétique supérieure. Grâce à sa capacité à comprimer l'air dans le cylindre à des niveaux élevés, le moteur diesel génère une chaleur intense qui permet l'inflammation spontanée du carburant diesel injecté, sans avoir besoin d'une bougie d'allumage.

Les applications du moteur diesel sont vastes et diversifiées, couvrant des secteurs tels que les transports commerciaux et industriels, la marine, les engins lourds et les centrales électriques. Sa popularité croissante découle de son efficacité énergétique et de sa capacité à fonctionner de manière fiable dans des conditions difficiles.

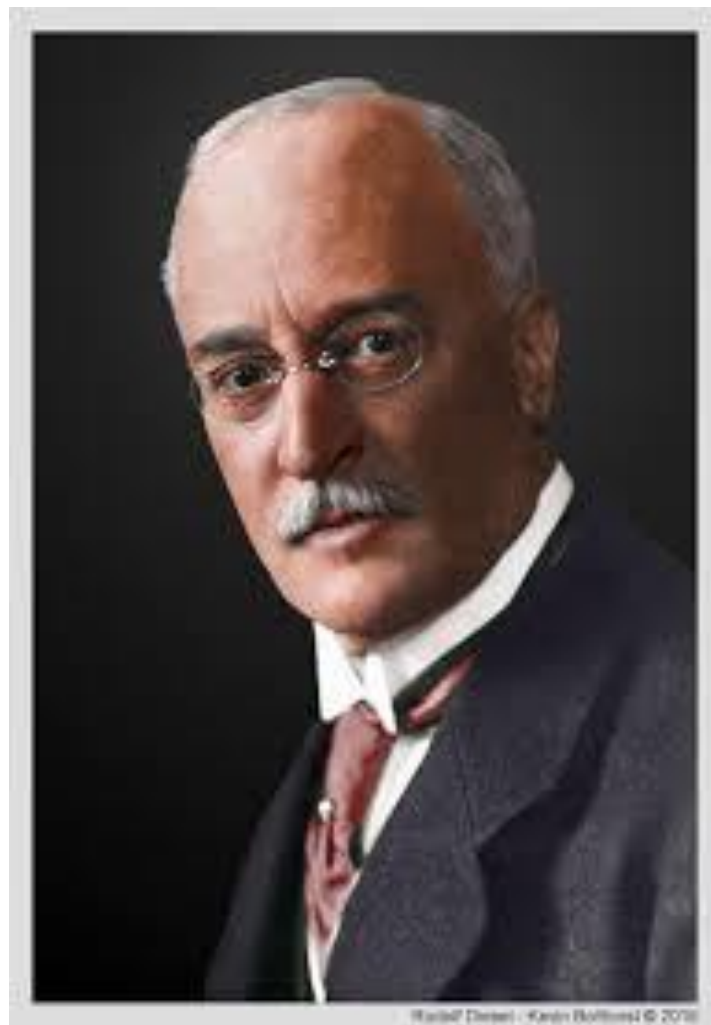
L'évolution technologique constante de l'injection de carburant dans les moteurs diesel a contribué à améliorer encore davantage leur performance et leur efficacité. Cette tendance croissante vers l'utilisation des moteurs diesel dans divers domaines souligne leur importance continue dans le paysage énergétique moderne.

## I.2 Historique de moteur Diesel

Le moteur diesel tire son nom de son inventeur, l'ingénieur allemand Rodolf Diesel (Figure I.1). Né à Paris le 18 mars 1858, Rodolphe Diesel a publié son livre *Théorie et structure thermique rationnelle* en 1893, à l'âge de 35 ans. Dans cet ouvrage, Rodolphe Diesel tire son nom de son inventeur, l'ingénieur allemand Rodolphe Diesel. Né à Paris le 18 mars 1858, Rodolphe Diesel a publié son livre *Théorie et structure thermique rationnelle* en 1893, à l'âge de 35 ans. Dans cet ouvrage, Rodolphe Diesel a eu l'idée de construire un moteur avec un cycle similaire au cycle de Carnot. Il présente ce nouveau moteur comme un moteur à combustion interne qui utilise la chaleur de la compression de l'air pour enflammer le carburant. Rudolf Diesel était passionné par le génie mécanique et a obtenu plusieurs brevets. Les moteurs à allumage par compression compriment l'air dans le cylindre et le rendent suffisamment chaud pour enflammer le carburant finement broyé. Aujourd'hui, les moteurs diesel sont de plus en plus utilisés dans les centrales électriques, sur les navires et sur les routes, notamment grâce aux progrès de l'injection mécanique, Rodolphe Diesel a eu l'idée de construire un moteur avec un cycle similaire au cycle de Carnot.

Il présente ce nouveau moteur comme un moteur à combustion interne qui utilise la chaleur de la compression de l'air pour enflammer le carburant. Rudolf Diesel était passionné par le génie mécanique et a obtenu plusieurs brevets. Les moteurs à allumage par compression compriment l'air dans le cylindre et le rendent suffisamment chaud pour enflammer le carburant finement

broyé. Aujourd'hui, les moteurs diesel sont de plus en plus utilisés dans les centrales électriques, sur les navires et sur les routes, notamment grâce aux progrès de l'injection mécanique [1]



**Figure I.1: Rudolf diesel [2]**

### I.3 Architecture d'un moteur à combustion interne

Le moteur est un assemblage diversifié de pièces, où chaque composant joue un rôle essentiel dans son fonctionnement. Cela inclut les parties fixes et mobiles, et la complexité de son architecture (Figure I.2) met en évidence clairement ces composants et pièces [3]

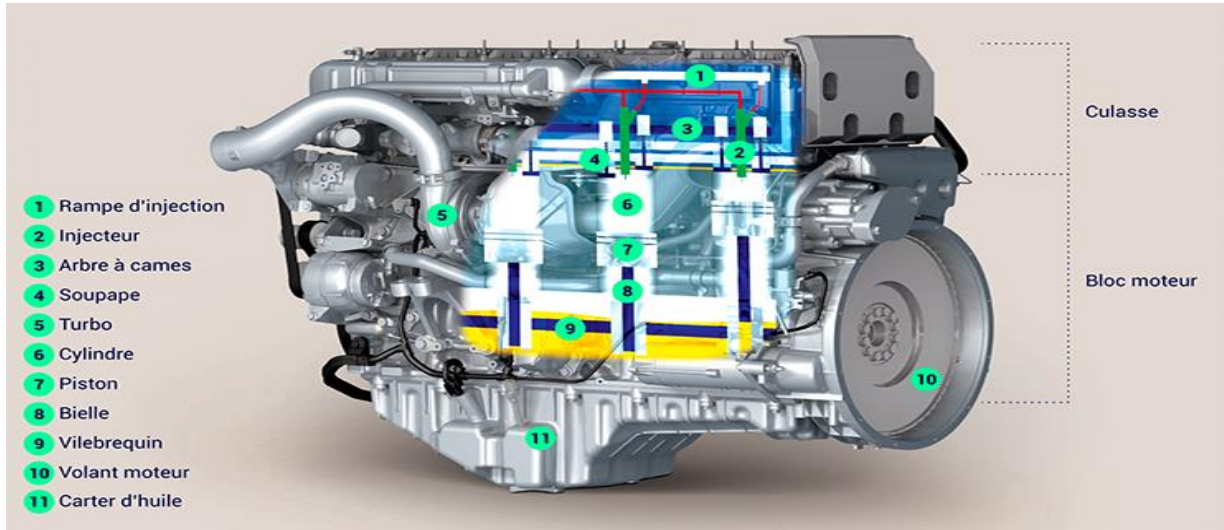
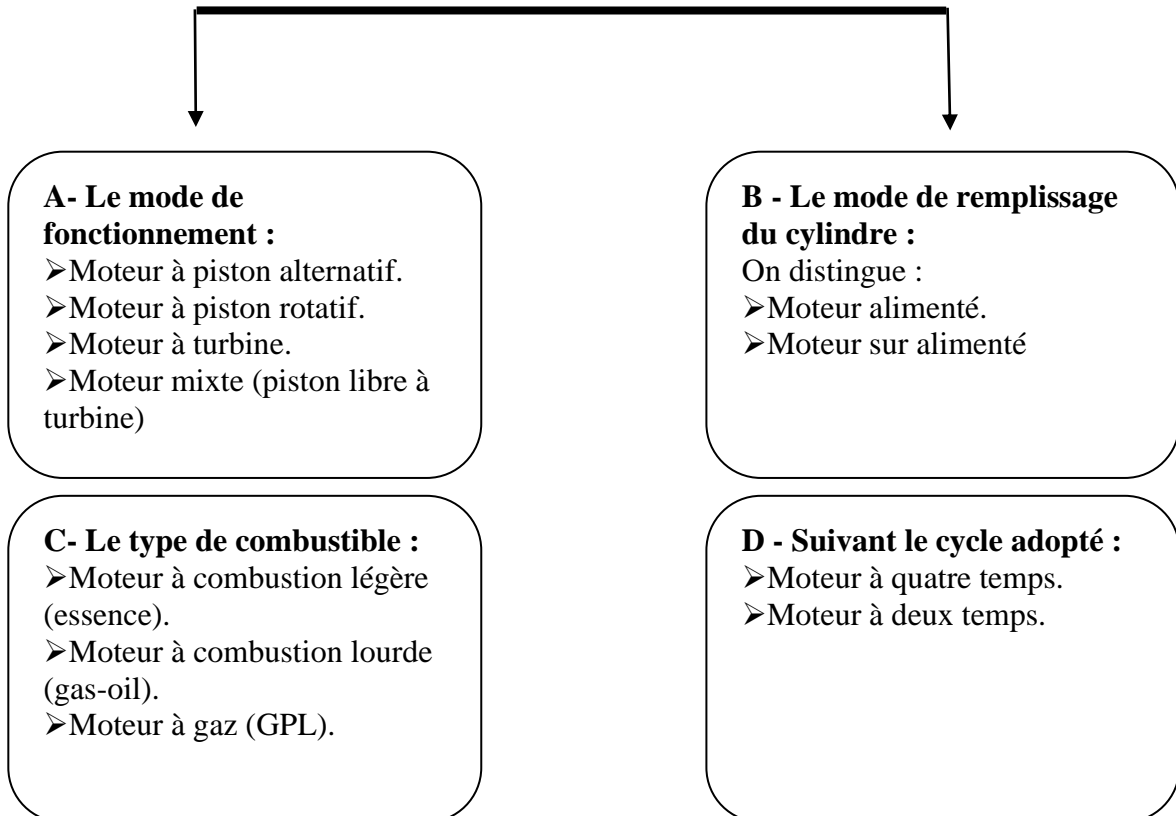


Figure I.2: Architecture d'un moteur à combustion interne [4]

### I.4 Classification des moteurs à combustion interne

Malgré la diversité des moteurs à combustion interne, on les classe suivant :

Tableau I-1: Classification des moteurs à combustion interne [5]



**E- Le mode d'allumage :**

- Moteur à allumage par Compression.
- Moteur à allumage par étincelle électrique.

**F- La formation de mélange :**

- Moteur à carburateur.
- Moteur à injection.

**G - Le cycle de fonctionnement :**

- Moteur à combustion à volume Constant (cycle OTTO).
- Moteur à combustion à pression Constante (cycle Diesel).
- Moteur à combustion à volume constant pris à pression constante (Mixte)

**H - La disposition du cylindre**

- Moteur à cylindres en ligne (L).
- Moteur à cylindres en vé (V).
- Moteur à cylindres en W.
- Moteur à cylindres en X.
- Moteur à plat.
- Moteur à cylindres en H.
- Moteur à pistons opposés.
- Moteur en étoile.

**I- La vitesse du piston :**

- Moteur lent.
- Moteur semi rapide.
- Moteur rapide

**J - La disposition des soupapes ;**

- Arbre à cames en tête et soupapes en Tête.
- Arbre à cames latéral et soupapes culbuteurs, Arbre à cames latéral et soupapes latérales.

**K-Le mode de refroidissement :**

- Refroidissement par eau et par air.

## I.5 Définition d'un moteur Diesel

Un moteur Diesel est une machine thermique à combustion interne que produit un mouvement de rotation en transformant :

- a) L'énergie chimique en énergie calorifique.
- b) L'énergie calorifique en énergie mécanique.

Pour arriver à un tel résultat, le moteur Diesel que nous allons décrire comporte un certain nombre d'organes. Nous distinguerons :

- Les organes fixes.
- Les organes mobiles.
- Les organes de distribution :
- Les organes qui contribuent au bon fonctionnement du moteur, système de refroidissement, système de graissage, système de l'alimentation de carburant

### I.5.1 Organes fixes

Les parties fixes comprennent essentiellement :

#### I.5.1.1 Culasse

La culasse (Figure I. 3) est la partie supérieure du cylindre Elle abrite principalement la chambre de compression, les composants d'admission et d'échappement et les composants de synchronisation. Son rôle est également d'évacuer une partie de la chaleur générée par la combustion des gaz.

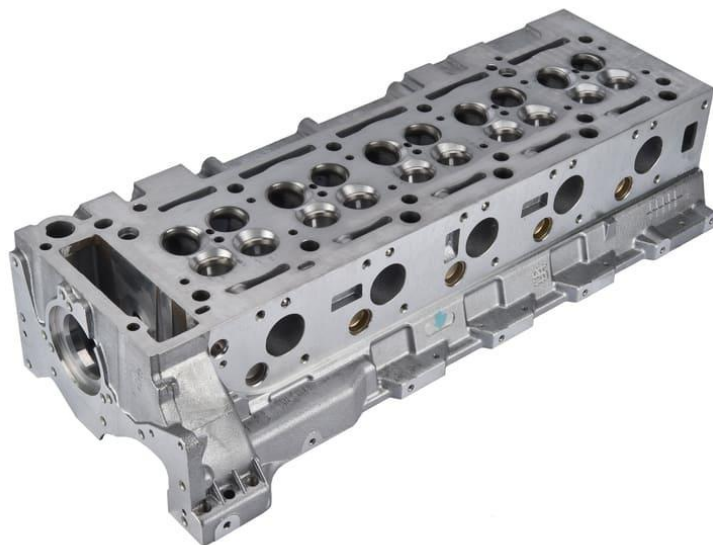


Figure I.3: Culasse[6]

### I.5.1.2 Le bloc cylindrique

Le bloc-cylindres (Figure I. 4) est l'un des composants essentiels d'un moteur. Il a généralement une forme complexe car il doit remplir plusieurs fonctions.



Figure I.4: Le bloc-cylindres.

### I.5.1.3 Carter d'huile

Carter (Figure I. 5) c'est un bac fixé sous le bloc moteur, il y a des carters humides « contient de l'huile moteur » et il y a des carters secs pour les engins, c'est-à-dire au moment d'arrêt pas d'huile dans le carter sauf dans la pompe à huile, et ce type de moteur contient un réservoir d'huile.



Figure I.5: Carter d'huile [7]

### I.5.1.4 Collecteur-d-admission

Les tubulures désignées aussi sous le nom de « collecteurs » (Figure I.6) sont des conduits qui servent pour à amener les gaz frais jusqu’aux soupapes d’admission, et pour les autres à évacuer les gaz brûlés.



Figure I.6: Collecteur-d-admission[8]

## I.5.2 Les organes mobiles

Les organes mobiles d’un moteur sont essentiellement :

### I.5.2.1 Piston

Le piston (Figure I .7) est dans son ensemble de forme cylindrique.

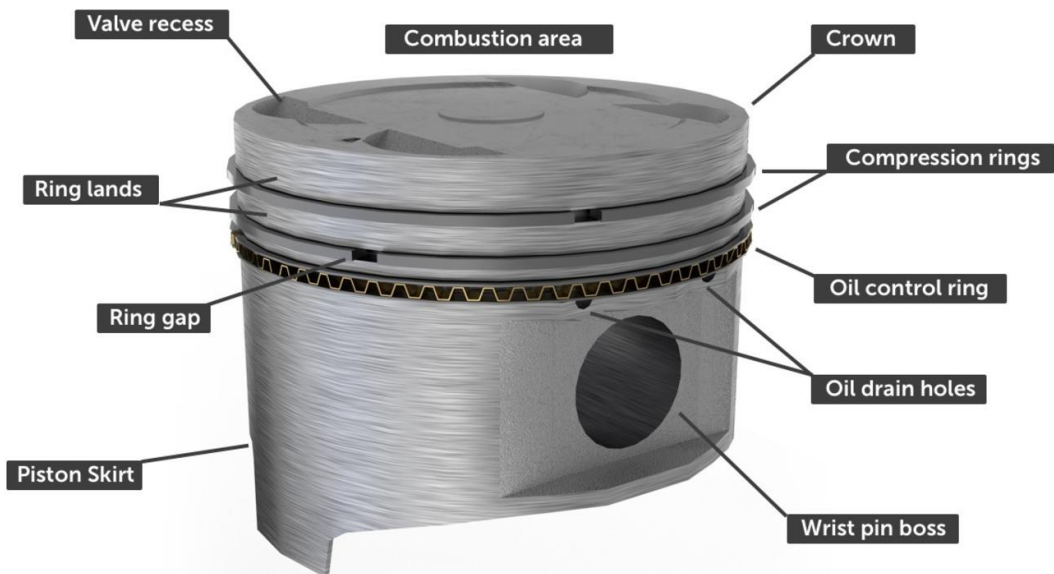
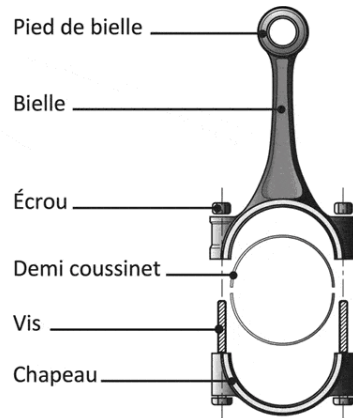


Figure I.7: piston[9]

**I.5.2.2 La bielle**

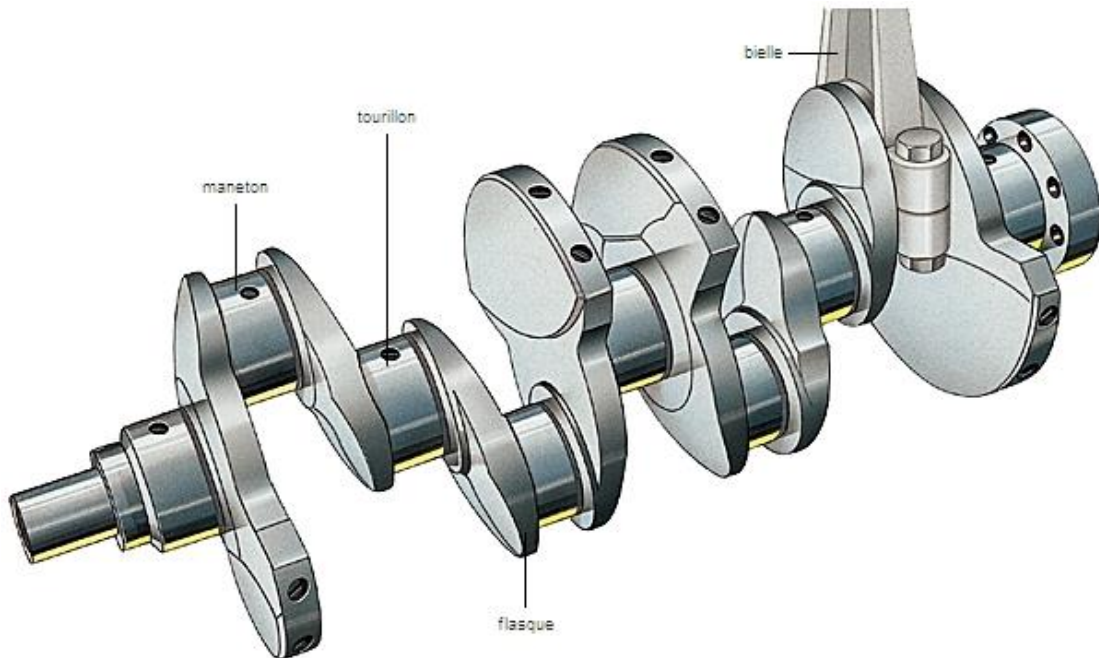
La bielle (Figure I .8) transmet l’effort de poussée de piston au vilebrequin. La bielle transforme le mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement circulaire continu du vilebrequin.



**Figure I.8: La bielle[10]**

**I.5.2.3 Vilebrequin**

Le vilebrequin (Figure I .9) est l’arbre moteur, il reçoit l’effort produit dans chacun des cylindres par l’explosion et la détente du mélange carburé. Le vilebrequin par l’intermédiaire des bielles, assure également les quatre temps (le cycle moteur).



**Figure I.9: Vilebrequin[11]**

### I.5.3 Architecture des organes fixes dans les moteurs a combustion interne

Cette figure (Figure I .9) nous montre les organes fixes d'un moteur diesel

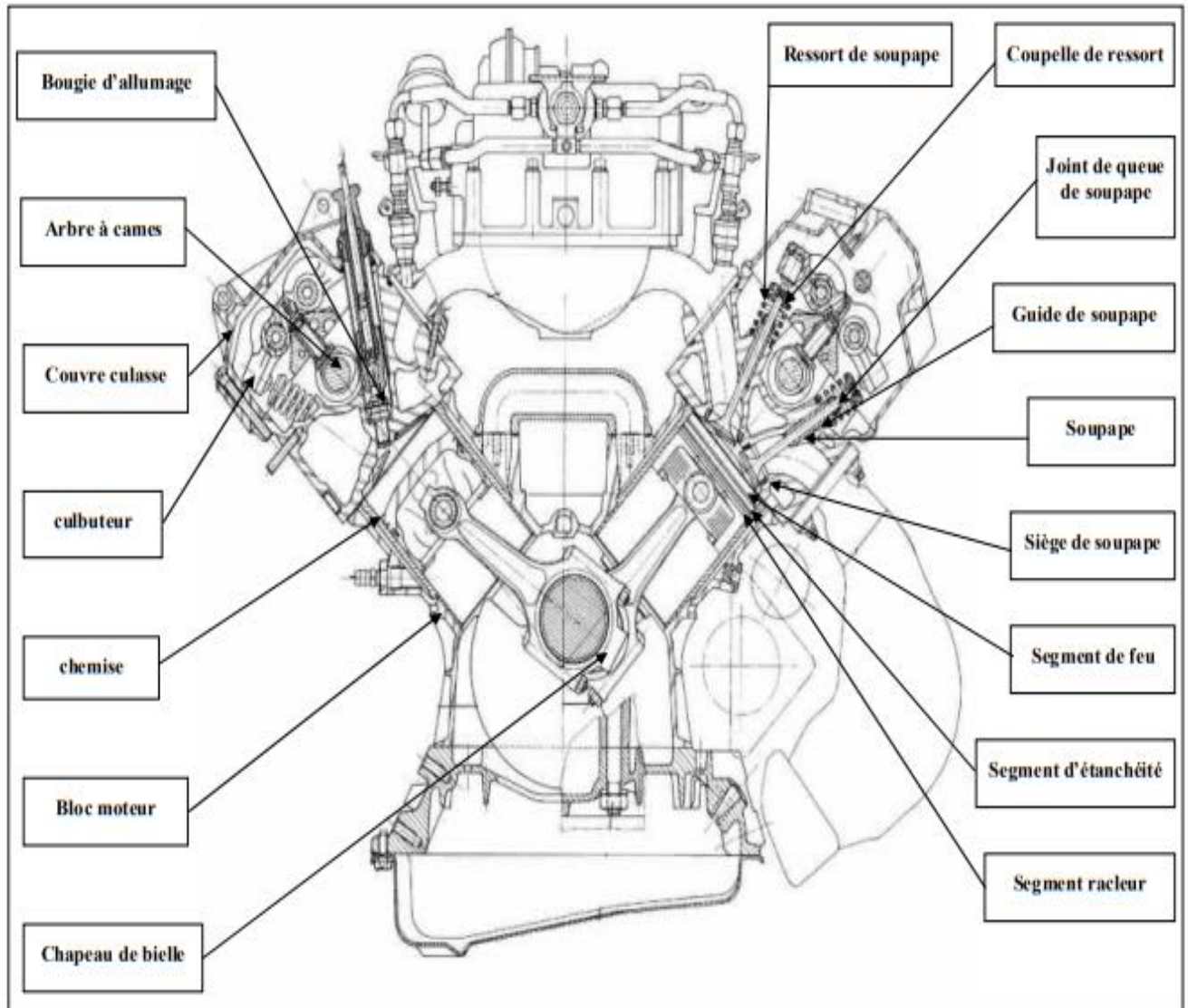


Figure I.10: Les organes fixe de moteur diesel[12]

### I.5.4 Architecture des organes mobiles dans les moteurs a combustion interne

Cette figure (Figure I .9) nous montre les organes mobiles d'un moteur diesel

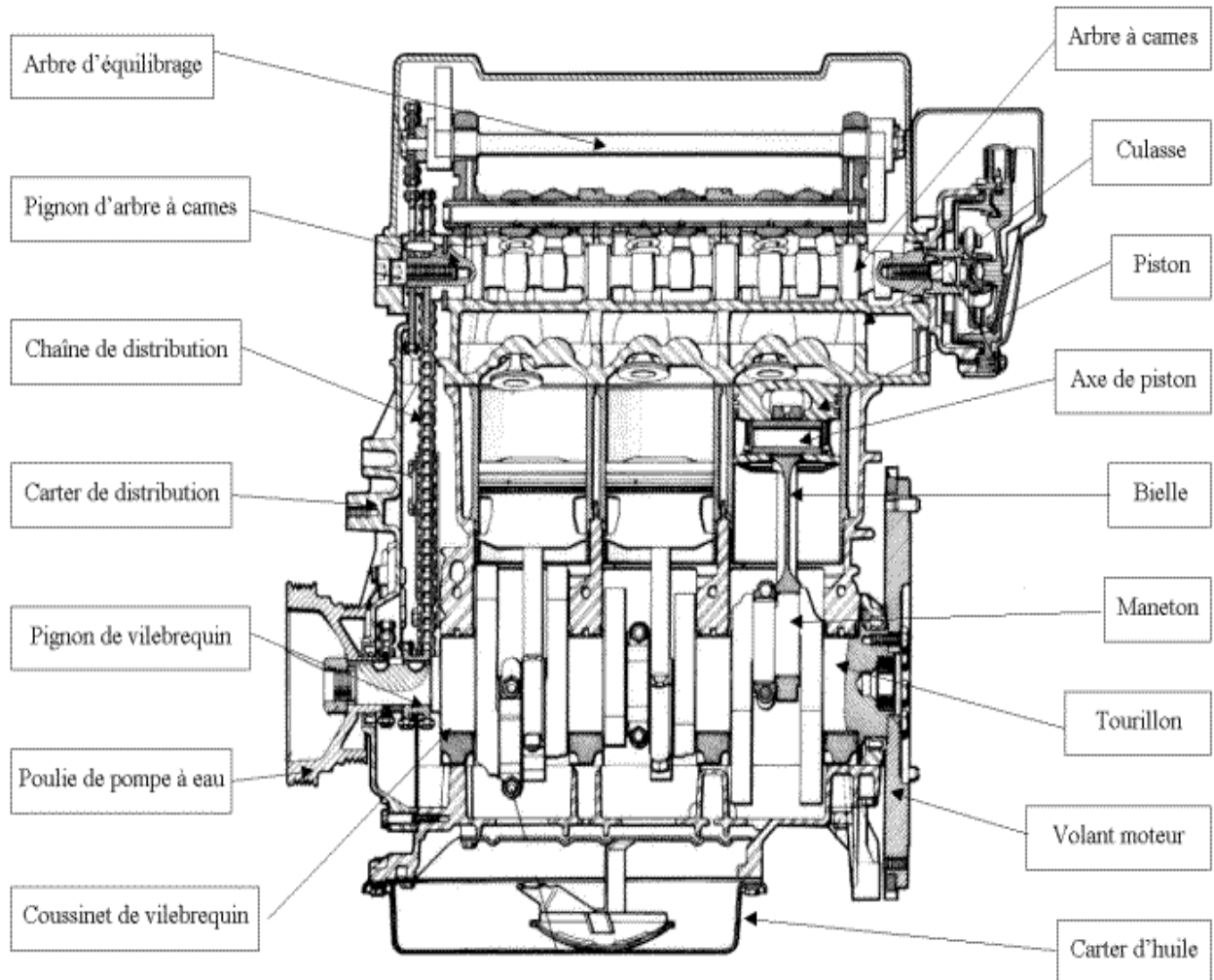


Figure I.11: Les organes mobiles de moteur diesel[12]

## **I.6 Cycle du moteur diesel**

### **I.6.1 Définition d'un cycle**

Lors d'une transformation thermodynamique, un fluide passe par plusieurs états successifs (Les fluides ne doivent pas être confondus avec l'état de la matière, car ils peuvent rester gazeux et changer de pression et de volume). Pour construire un moteur, il faut reproduire cette transformation. Explication : lorsqu'on chauffe une tige de métal, sa dilatation produit un déplacement. Si ce mouvement est provoqué mécaniquement dans une seule direction, il y a production de travail. Cependant, ce dispositif n'est pas un moteur. Une fois que la barre s'est dilatée, il n'y a plus de mouvement. Il faut refroidir et contracter la barre pour la ramener à son état initial.

#### **I.6.1.1 Cycle ouvert**

Une partie des échanges de chaleur se fait par transfert de matière. C'est le cas des moteurs thermiques qui laissent échapper les gaz dans l'atmosphère.

#### **I.6.1.2 Cycle fermé**

Toute la matière est conservée. Si on fait le bilan pour revenir à chaque point, on vérifie le premier principe de la thermodynamique[13] .

### **I.6.2 Etude de cycle de Carnot**

L'injection progressive d'après "Rudolf Diesel" devait permettre la réalisation de cycle de Carnot (Figure I .12) en assurant le tric de piston. Pour réaliser la détente isotherme Diesel injecter le combustible de façon progressive, la température se maintenait a  $800\text{C}^\circ$  alors que l'augmentation de volume entraînait chute de pression allant jusqu'à  $9.166$  pascal ( $90\text{Kg}/\text{cm}^2$ ) [14]. A la fin de la combustion commençait la détente adiabatique avec diminution de la température et chute de la pression de  $9.105$  pascals ( $90$  à  $1.033$   $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ) valeur de la pression atmosphérique. Le cycle théorique de Carnot possède un excellent rendement qui est égal a  $0.727$ [15]

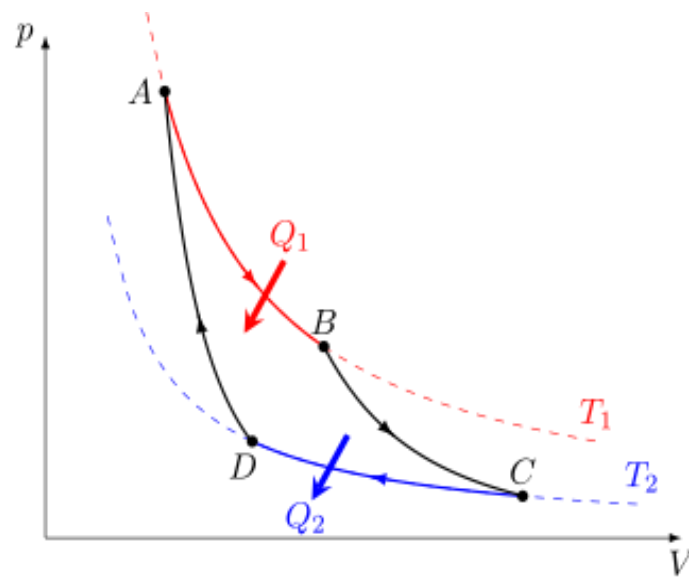


Figure I.12: Cycle de Carnot [16]

**Ce cycle comprend les phases suivantes :**

D-A ↔ compression adiabatique.

B-C ↔ détente adiabatique.

C-D ↔ compression isotherme.

A-B ↔ détente isotherme.

Le diagramme (V, P) est en général appelé diagramme de clapyron, les points A, B, C, et D correspondent à quatre états d'équilibre du système qui sont liés par les quatre transformations (deux isothermes et deux adiabatique).

### I.6.3 Cycles à quatre temps

C'est l'ensemble des évolutions que subit une même masse de mélange de puis son entrée dans le cylindre jusqu'à sa sortie dans atmosphérique avec variation de volume, de pression et de température. Les quatre temps (Figure I.13) correspondant à une rotation de vilebrequin égale a 720, soit deux tours dans ce cycle nous avons les phases suivantes :

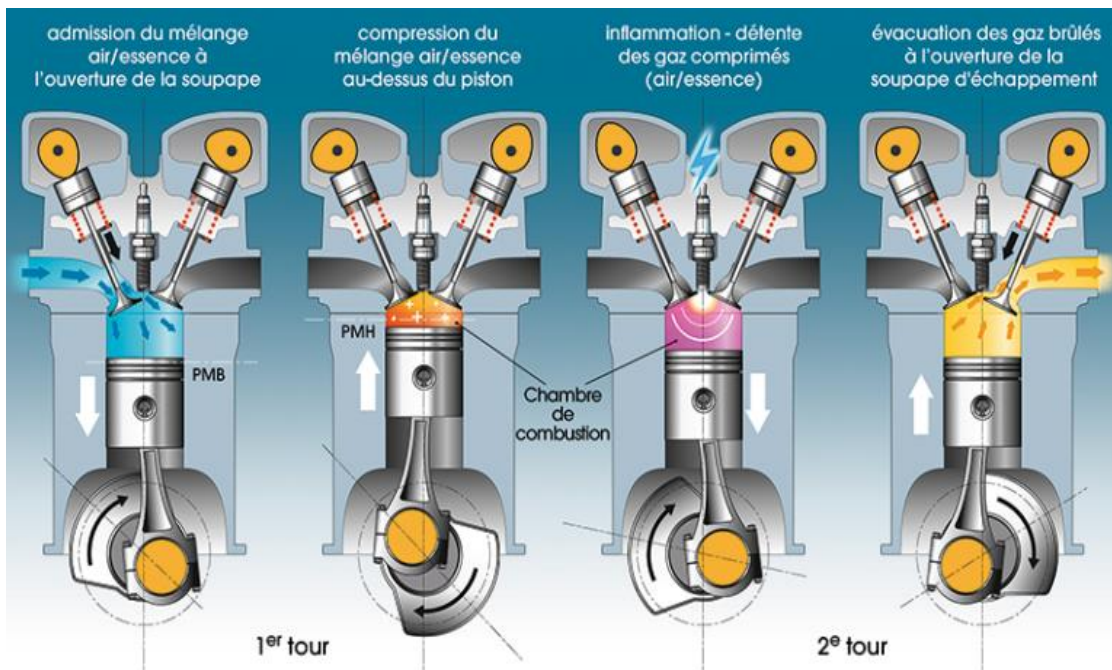


Figure I.13: Cycles à quatre temps[17]

#### 1<sup>er</sup> temps Admission :

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

#### 2<sup>ème</sup> temps compression :

La soupape d'admission se referme. Dans sa course ascendante le piston comprime l'air à une pression de l'ordre de  $3 \cdot 10^6$  à  $4 \cdot 10^6$  pascals (30 à 40 Kg/cm<sup>2</sup>). Cette compression brutale de l'air engendre une augmentation de température environne 500 à 600 C.

#### 3<sup>ème</sup> temps injection combustion détente :

Lorsque le piston arrive au voisinage du point mort (PMH) en fin de compression, on injecté le combustible pulvérisé dans la chambre de combustion. La pression d'injection doit naturellement être supérieure à la pression régnant alors dans le cylindre pour permettre l'introduction du combustible.

Elle varie suivant le type du moteur entre  $8 \cdot 10^6$  pascals (80 à 250 Kg/cm<sup>2</sup>) et même davantage dans les « Diesel marins ». Au contact de l'air comprimé à température élevée, le combustible s'enflamme de lui-même. La température d'inflammation du gaz-oil étant voisine de  $300\text{C}^\circ$ , donc bien inférieure à celle de l'air contenue dans le cylindre. Néanmoins un certain temps mesurable s'école entre le début de l'injection et le début de la combustion. Cet intervalle est connu sous le nom de « délai d'allumage ». Les gaz augmentant très rapidement de volume, leur détente chasse le piston vers le bas, au point mort bas (PMB). Le vilebrequin reçoit de l'énergie durant toute cette course (temps moteur). Au moment de la combustion la pression atteint de  $5 \cdot 10^6$  à  $10^7$  pascals (50 à 100 Kg/cm<sup>2</sup>) la température est alors de l'ordre de 1800 à 2000 C°.

#### **4<sup>ème</sup> temps échappement :**

La soupape d'échappement s'ouvre, les gaz brûlés sont chassés par le piston qui remonte, pour la distribution nous trouvons, comme sur le moteur à explosion des avances et des retards à l'ouverture ou à la fermeture des soupapes [18].

### **I.6.4 Cycles diesel**

#### **I.6.4.1 Théorique**

Ce cycle se (Figure I.14) rapproche du cycle de Carnot.

Le diagramme se décompose ainsi :

**1<sup>ère</sup> temps** aspiration d'air AB.

**2<sup>ème</sup> temps** compression isotherme BC jusqu'à  $3 \cdot 10^5$  Pa environ puis compression adiabatique CD jusque à  $2.5 \cdot 10^7$  Pa la température montante a plus de  $800\text{C}^\circ$ .

**3<sup>ème</sup> temps** injection prolongée du combustible pour obtenir une combustion isotherme. Le décompte du piston s'accompagnant d'une baisse de température et de pression jusqu'à  $9 \cdot 10^6$  Pa ( $90\text{Kg/cm}^2$ ) donc détente isotherme DE, puis détente adiabatique EF après cessation de l'injection.

**4<sup>ème</sup> temps** chute de pression FB puis échappement BA. Ce cycle théorique ne peut être réalisé en raison de la trop forte compression demandée.

#### **I.6.4.2 Réel**

Pour garantir un fonctionnement optimal du moteur diesel, les ajustements suivants ont été apportés au cycle théorique.

### 1. Avance à l'ouverture d'admission (AOA) :

Pour favoriser une meilleure évacuation des gaz brûlés, l'ouverture de la soupape d'admission est anticipée, permettant ainsi à l'air aspiré dans le cylindre d'expulser les gaz brûlés.

### 2. Retard à la fermeture d'admission (RFA) :

Un retard est introduit dans la fermeture de la soupape d'admission afin d'optimiser le remplissage. L'air, ayant atteint une certaine vitesse, continue de pénétrer dans le cylindre pendant le temps mort du piston au point mort bas (PMB).

### 3. Avance à l'ouverture d'échappement (AOE) :

À la fin du cycle de détente, il est bénéfique d'anticiper l'ouverture de la soupape d'échappement pour faciliter l'évacuation des gaz brûlés.

### 4. Retard à la fermeture d'échappement (RFE) :

Ce retard correspond à un délai introduit à l'ouverture de la soupape d'admission. Les gaz frais entrant dans le cylindre chassent ainsi les gaz brûlés.

### 5. Avance à l'injection (AI) :

Comme un certain laps de temps s'écoule entre le début de l'injection et le début de la combustion, il est nécessaire d'anticiper l'injection afin de synchroniser le début de la combustion avec la position du piston au point mort haut (PMH). C'est pourquoi, pendant la compression, le combustible est injecté avant que le piston n'atteigne exactement le PMH. Il est crucial de ne pas négliger cette avance, mais également de ne pas l'exagérer sous peine d'engendrer des problèmes graves.

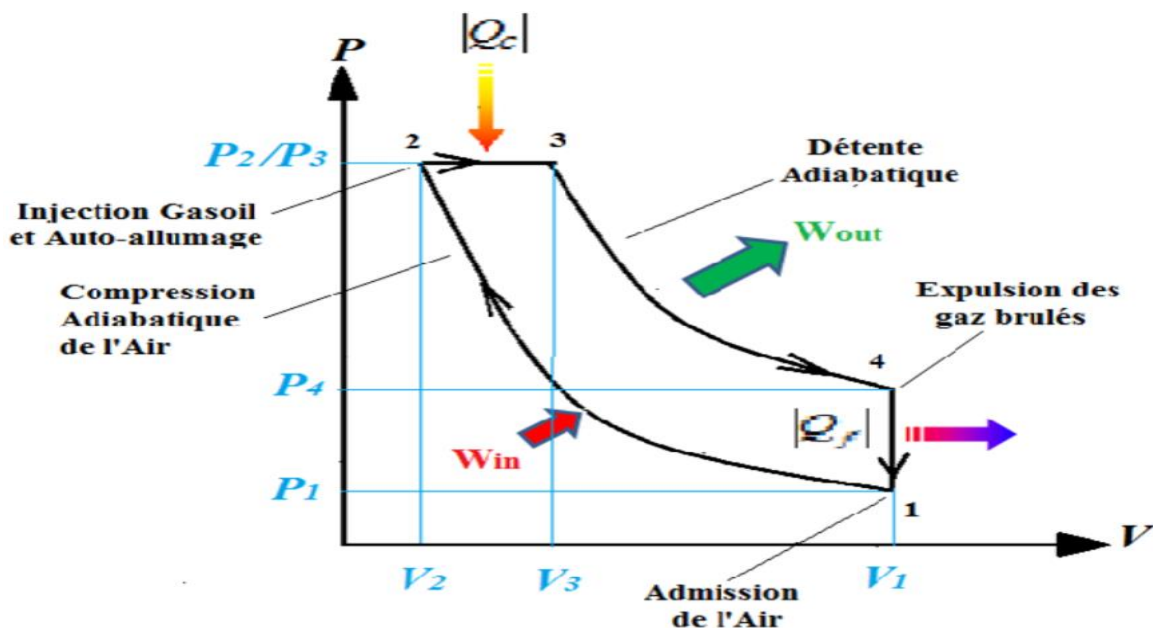
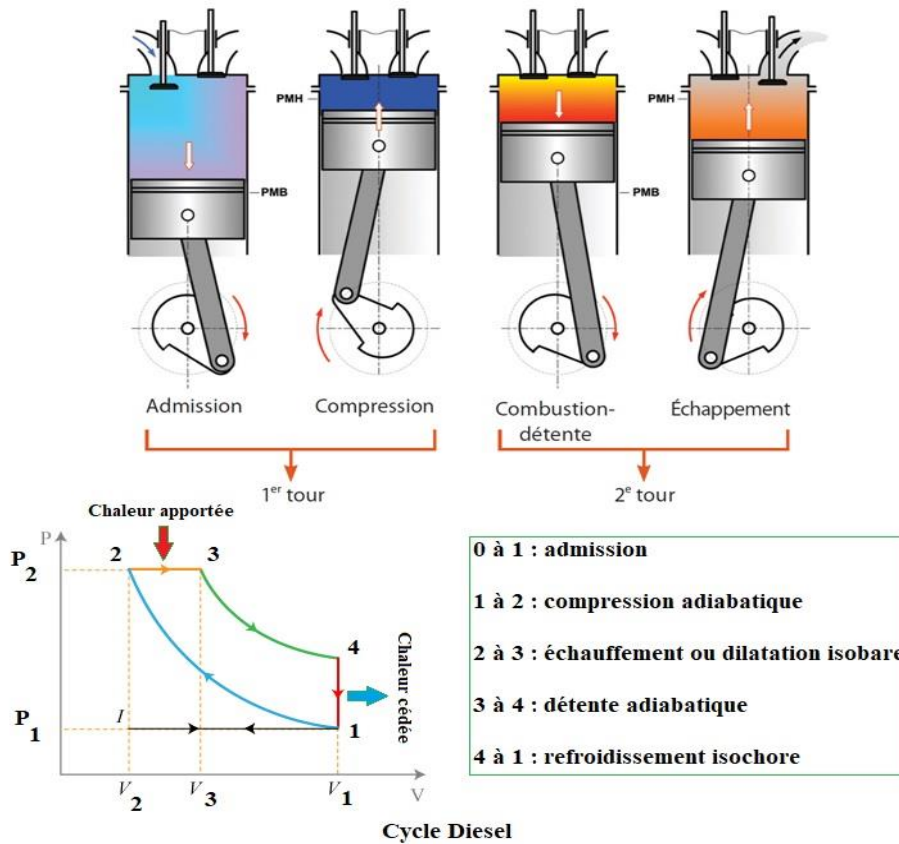


Figure I.14: Cycle diesel théorique[19]

**6. Cycle à pression constante :**

Le diagramme du cycle Diesel à pression constante (Figure I.15) comprend les phases suivantes :



**Figure I.15: Cycle à pression constant [20]**

**1<sup>er</sup> temps** - Admission d'air AB

**2<sup>ème</sup> temps** - compression adiabatique BC

**3<sup>ème</sup> temps** - Injection et combustion isobares CD

La pression reste constante, le volume augmente puis détente adiabatique DE ; la pression baisse progressivement car le volume augmente par suite du déplacement du piston.

**4<sup>ème</sup> temps** - Echappement :

Ce cycle dont le rendement théorique est de 0,40 n'a jamais été atteint en pratique. Il ne peut s'appliquer qu'aux gros Diesel Fixer de 500 à 1500 chevaux.

**I.6.5 Cycle Mixte :**

Afin de se rapprocher le plus possible du cycle idéal tout en réunissant des compromis acceptables, on réalise une combinaison des deux cycles précédents :

- Combustion à volume constant et pression variable
- Combustion à pression constante et volume variable

Le diagramme du cycle mixte (Figure I.15) ou cycle de Sabathé comprend les phases suivantes :

**1<sup>er</sup> temps** – Admission d'air AB

**2<sup>ème</sup> temps** – Compression adiabatique BC

**3<sup>ème</sup> temps** – Injection et combustion à volume constant et pression variable CD.

**4<sup>ème</sup> temps** – Echappement chute de pression FB, puis évacuation des gaz brûlés BA.

Pratiquement tous les Diesels « routiers » légers et rapides utilisés en automobile fonctionnelle suivant le cycle mixte c'est-à-dire qu'ils présentent le rapport entre cycle à volume constant et cycle à pression constante. Variable en fonction du régime du moteur, de la puissance demandée, et du moment où se produit l'injection. Le rendement d'un Diesel routier fonctionnant suivant le cycle mixte de 0,30 à 0,40.

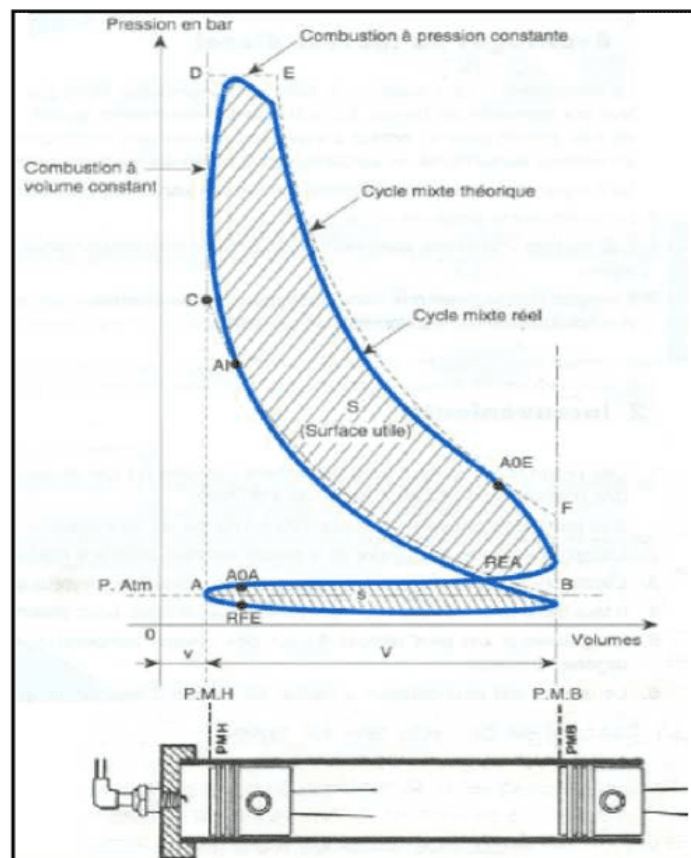


Figure I.16: Cycle mixte [21]

## **I.7 Conclusion**

Cette étude offre un aperçu des composants clés des moteurs à combustion interne, aidant à clarifier les divers éléments du moteur, y compris les parties fixes et mobiles. Chaque élément est considéré comme essentiel et important pour assurer un fonctionnement efficace du moteur, en fonction du type et de l'état des pièces. Le moteur à combustion interne passe par quatre temps lors de son cycle complet, et plusieurs cycles différents sont étudiés pour les moteurs, dans le but d'analyser et d'améliorer leurs performances en fonction des évolutions technologiques et des exigences industrielles.

**CHAPITRE II : OPACITÉ**  
**DANS LES MOTEURS**  
**DIESEL**

## II.1 Introduction

L'un des principaux défis auxquels sont confrontés les moteurs diesel est l'opacité, qui se traduit par une opacité accrue des émissions. Ces dépôts sont générés par l'accumulation de résidus résultant de la combustion de carburant, tels que le carbone et les huiles usées, à l'intérieur des composants du moteur tels que les injecteurs, les soupapes et les conduites. Cela peut entraîner divers problèmes, notamment une diminution de l'efficacité de la combustion, une augmentation de la consommation de carburant et une détérioration des performances du moteur. Il existe de nombreuses solutions pour éviter ces problèmes nocifs pour l'environnement.

## II.2 Définition de l'opacité

- L'opacité d'un moteur diesel est un indicateur important de la qualité de la combustion et de la quantité de particules émises dans les gaz d'échappement. Elle reflète la capacité du moteur à brûler efficacement le carburant et à réduire les émissions nocives. L'opacité est définie comme une mesure de la quantité de lumière bloquée par les particules présentes dans les gaz d'échappement d'un moteur diesel
- Cette opacité est souvent mesurée à l'aide d'un appareil appelé opacimètre, qui projette un faisceau lumineux dans les gaz d'échappement et mesure la quantité de lumière absorbée ou bloquée par les particules en suspension. Plus l'opacité est élevée, plus la quantité de particules dans les gaz d'échappement est importante
- Il est essentiel de comprendre et de contrôler l'opacité dans les moteurs diesel pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les particules émises par les moteurs diesel peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement, notamment en provoquant une pollution de l'air et en exacerbant les problèmes respiratoires. Deuxièmement, une combustion inefficace du carburant peut entraîner une réduction des performances du moteur, une augmentation de la consommation de carburant et une augmentation des émissions de polluants
- Plusieurs approches peuvent être utilisées pour réduire l'opacité et les émissions de particules dans les moteurs diesel, notamment l'optimisation de la combustion, l'amélioration de la qualité du carburant, l'utilisation de technologies de post-traitement telles que les filtres à particules diesel (DPF) et les systèmes de recirculation des gaz d'échappement (EGR), et le respect des normes réglementaires en matière d'émissions
- En résumé, l'opacité des moteurs diesel est un indicateur important de la qualité de la combustion et de la quantité de particules émises dans les gaz d'échappement. Il est essentiel de comprendre et de contrôler l'opacité pour respecter les normes environnementales et

réglementaires en matière d'émissions, tout en réduisant les émissions nocives et en améliorant l'efficacité des moteurs diesel[22]

### **II.3 Les principaux facteurs de formation de l'opacité**

Les principales causes de l'opacité des moteurs diesel sont multiples et dépendent de nombreux facteurs.

#### **II.3.1 Combustion incomplète**

Une mauvaise combustion dans les moteurs diesel peut être causée par un certain nombre de facteurs et est souvent associée à une opacité accrue des gaz d'échappement. Les causes les plus courantes d'échec de la combustion dans les moteurs diesel sont les suivantes[23]:

##### **II.3.1.1 Problèmes de système de carburant**

Des problèmes avec les injecteurs de carburant, les filtres ou les pompes peuvent entraîner une mauvaise performance du moteur et un mauvais rendement énergétique[22]

##### **II.3.1.2 Surchauffe**

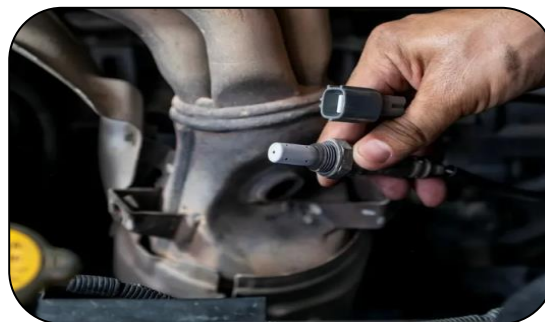
La surchauffe peut être causée par des fuites de liquide de refroidissement, des thermostats défectueux ou des radiateurs (Figure II.1) obstrués. Cela peut entraîner des dommages au moteur s'il n'est pas traité rapidement[24]



**Figure II.1: Radiateur bouché.**

##### **II.3.1.3 Problèmes électriques**

Un câblage défectueux, les problèmes des capteurs défectueux (Figure II.2) peuvent entraîner des problèmes de démarrage ou des arrêts du moteur comme débitmètre[25]



**Figure II.2: Capteurs endommagés[26]**

##### **II.3.1.4 Panne du turbocompresseur**

Une panne du turbocompresseur (Figure II.3) peut entraîner une perte de puissance et une réduction des performances du moteur. Un entretien régulier est crucial pour éviter ce problème[28]



**Figure II.3: turbocompresseur[29]**

#### **II.3.1.5 Perte de compression du cylindre**

La perte de compression des cylindres peut entraîner une réduction de la puissance, une augmentation de la consommation de carburant et un fonctionnement irrégulier du moteur. Cela peut être dû à des segments de piston usés ou à des soupapes endommagées[30]

#### **II.3.1.6 Problèmes de système d'échappement**

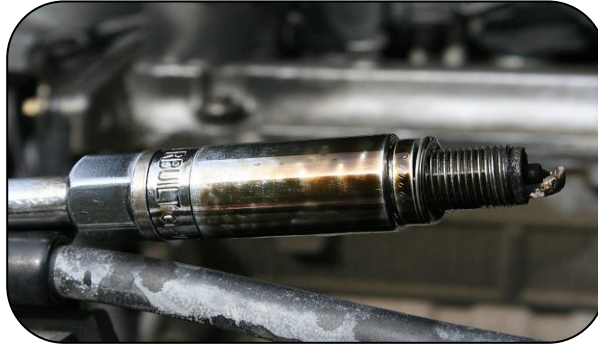
Des problèmes liés au système d'échappement (Figure II.4) , tels que des filtres à particules diesel obstrués ou des convertisseurs catalytiques défectueux, peuvent entraîner une réduction des performances du moteur et une augmentation des émissions[31]



**Figure II.4: Échappement endommagé[32]**

### II.3.1.7 Panne de bougie de préchauffage

Une défaillance des bougies de préchauffage (Figure II.5) peut rendre difficile le démarrage du moteur, surtout par temps froid. Une inspection et un remplacement réguliers sont nécessaires[33]



**Figure II.5: Bougie incandescente endommagée[33]**

### II.3.1.8 Contamination par l'huile

Une huile contaminée peut endommager le moteur et réduire la lubrification. Les causes courantes incluent les fuites de liquide de refroidissement (Figure II.6), la dilution du carburant ou un entretien inapproprié.



**Figure II.6: Moteur diesel encrassé par l'huile.**

### II.3.1.9 Panne d'injecteur

Une défaillance de l'injecteur (Figure II.7) peut entraîner une mauvaise atomisation du carburant, une puissance réduite et une augmentation des émissions. Un nettoyage et un entretien réguliers peuvent aider à prévenir ce problème.



**Figure II.7: Injecteur bloqué.**

### II.3.1.10 Problèmes de vanne EGR

Des problèmes avec la vanne EGR (Figure II.8), (recirculation des gaz d'échappement) peuvent entraîner une réduction des performances du moteur, une augmentation des émissions et un ralenti irrégulier. Un nettoyage et une inspection réguliers sont recommandés.



Figure II.8: la vanne EGR avec sédiments[34]

## II.4 Comment la combustion se forme à l'intérieur d'un moteur diesel

Combustion = réaction d'oxydation classique du type

« Comburant + combustible  $\Rightarrow$  produits + chaleur »

### II.4.1 Comburant

Très souvent, le comburant est l'air.

Il contient l'oxygène qui est l'agent oxydant :

### II.4.2 Composition de l'air standard

Tableau II 1 : Composition de l'air standard [35]

Corposant	Fraction molaire (%)	Masse molaire (g/mol)	Fraction massique (%)
N2	78,1	28	75,6
Ar+CO2+...	0,9	40	1,2
O2	21	32	23,2
Azote atmosphere	79	28,15	76,8

Air = 3,76 moles d'azote atmosphérique pour 1 mole d'oxygène.

### II.4.3 Combustibles

#### a) Gaz

Mélange d'hydrocarbures gazeux avec éventuellement de l'azote et/ou du dioxyde de carbone.  
Exemples : gaz naturels, butane et propane commerciaux, air propané, essence ...

#### b) Liquide

Mélange d'hydrocarbures liquides : diesel, fioul domestique, fiouls lourds, ... contenant des atomes de C, S, H, O, N ; alcools ; ... [35]

### II.4.4 Produits de combustion (fumées)

#### a) Principalement

- dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)      – vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O)
- vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O)              – azote (N<sub>2</sub>)
- anhydride sulfureux (SO<sub>2</sub>)      [35]

#### b) Parfois

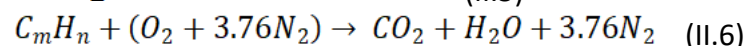
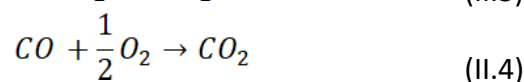
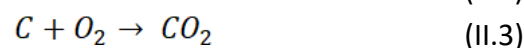
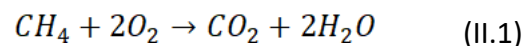
- dioxygène (O<sub>2</sub>)                  – monoxyde de carbone (CO)
- NO<sub>x</sub> (NO et NO<sub>2</sub>)              – dihydrogène (H<sub>2</sub>)
- gazeux (hydrocarbures)

Certains sont neutres pour l'environnement et la santé. D'autres sont considérées comme des polluants [35]

### II.4.5 Combustion stœchiométrique (idéale)

La combustion est stœchiométrique (=neutre) lorsqu'il y a exactement assez de comburant pour oxyder totalement le combustible  $\implies$  les fumées ne contiennent ni oxygène, ni combustible.

Exemples:



La combustion stœchiométrique présente la température de combustion la plus élevée. Elle est donc considérée comme la combustion idéale.

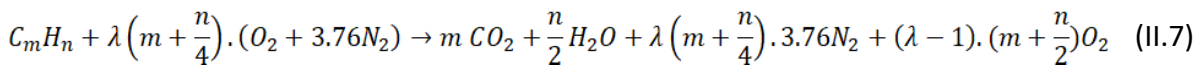
### II.4.6 Combustion non-stœchiométrique

En réalité, les processus de combustion sont réalisés de manière non-stœchiométrique. L'objectif est d'éliminer les matières non-brûlées, il est donc nécessaire d'avoir une quantité suffisante d'oxygène disponible à chaque point pour atteindre une combustion complète. Pour cela, on travaille avec un excès important d'air (exprimé par le coefficient de richesse  $\lambda$  supérieur à 1), même si cela conduit à une dilution des fumées et à une baisse de la température [35]

❖ Ces processus se distinguent par le coefficient de richesse  $\lambda$ .



Figure II.3: Échelle pour déterminer un coefficient  $\lambda$



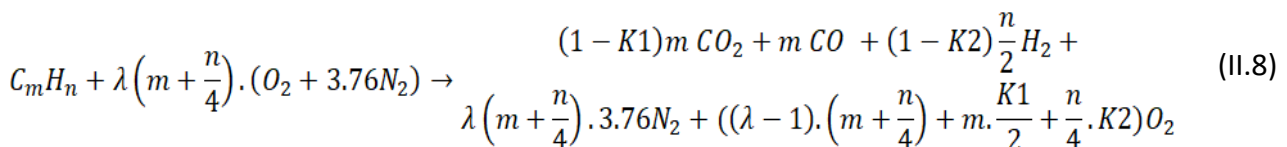
L'analyse des fumées sur site permet de définir la qualité de la combustion. Notamment, la présence d'oxygène caractérise une combustion en excès d'air.

### II.4.7 Combustion non complète

Combustion « non complète »  $\implies$  il reste des espèces non oxydées (les imbrûlés).

Principales causes de la présence de gaz imbrûlés:

- 1) mélange carburant-comburant non homogène  $\implies$  manque local d'oxygène
- 2) température trop basse  $\implies$  combustion peu réactive (cinétique lente) [35]



$K_1$  et  $k_2$  sont les constantes de dissociation du  $\text{CO}_2$  et de l'eau.



Toutes les espèces oxydables ont été oxydées en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$ .

Les constantes de dissociation  $k_1$  et  $k_2$  du  $\text{CO}_2$  et de l'eau sont liées par la constante  $K_P$  Caractérisant la réaction d'équilibre entre les imbrûlés :

✚ **Réaction d'équilibre :**



✚ **Loi d'action de masse :**

$$K_P = \frac{[\text{CO}_2][\text{H}_2]}{[\text{CO}][\text{H}_2\text{O}]} \quad (\text{II.10})$$

✚ **Valeur approximative de la constante  $K_P$  :**

$$K_P \approx \exp\left(\frac{-3.3387}{RT} + \frac{3753}{RT^2}\right) \quad (\text{II.11})$$

✚ **Relation entre les constantes de dissociation  $k_1$  et  $k_2$  et la constante ( $K_P$ ) :**

$$K_P = \frac{k_2^{1/2}}{k_1} \quad (\text{II.12})$$

✚ **Lorsque ( $K_P \gg 1$ ) :**

L'équilibre se déplace vers la droite, les espèces stables sont ( $\text{CO}$ ) et ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

✚ **Lorsque ( $K_P \ll 1$ ) :**

L'équilibre se déplace vers la gauche, les espèces stables sont ( $\text{CO}_2$ ) et ( $\text{H}_2$ ) [35]

## II.5 Analyse des fumées :

Elle peut révéler les constantes de dissociation ( $k_1$ ) et ( $k_2$ ), permettant ainsi de calculer la constante ( $K_P$ ). La température associée est appelée température de figeage, et elle donne une idée de la qualité de la combustion.

## II.6 Conclusion

Les causes de la formation d'opacité à l'intérieur du moteur diesel varient selon le type de dysfonctionnement, entraînant un mauvais processus de combustion et produisant des émissions de gaz et de particules nocives pour l'environnement. Ceci constitue la principale raison de la baisse des performances et de l'efficacité du moteur diesel, pouvant également réduire sa durée de vie. Afin d'éviter ces inconvénients, il est nécessaire de procéder régulièrement à la maintenance du véhicule pour prévenir tout dommage environnemental potentiel

**CHAPITRE III :**  
**EFFETS DE L'OPACITÉ SUR**  
**L'ENVIRONNEMENT**

### III.1 Introduction

La terre elle-même (océans, forêts, volcans, ...) génère des polluants, mais selon un équilibre naturel vieux de millions d'années, équilibre que des nouveaux polluants produits par l'homme viennent perturber. Ces nouveaux polluants peuvent être classés en trois grandes sources:[36]

Les installations de combustion telles que les chaudières industrielles, foyers domestiques, centrales thermiques ; les procédés industriels tels que les cimenteries, verrerie raffineries, usines chimiques et sidérurgiques ; la circulation routière. La plupart des véhicules routiers à moteurs émettent des substances qui représentent une nocivité potentielle pour la santé de l'homme et ou pour la qualité de son environnement [37].

Les émissions dues aux seuls véhicules industriels sont minoritaires, la forte croissance des transports routiers de marchandises ainsi que l'augmentation de la puissance des moteurs et l'expansion de l'urbanisme, conduisent à engager un effort de recherche important en vue de les réduire.

### III.2 Définition de l'environnement

Depuis les débuts des civilisations, l'environnement a joué un rôle crucial dans le façonnement de l'histoire et l'influence des sociétés. La relation entre les êtres humains et leur environnement a eu des répercussions profondes sur le développement de la culture, de la technologie, de l'économie et de la politique. Dans l'Antiquité, l'interaction entre les humains et leur environnement était principalement déterminée par la nécessité de s'appuyer sur les ressources naturelles pour survivre et prospérer. Chaque grande civilisation s'est développée en s'adaptant aux conditions environnementales qui l'entouraient, que ce soit dans les fertiles vallées du Nil qui ont donné naissance à l'ancienne Égypte, ou dans les plaines alluviales où est née la civilisation sumérienne. Au fil du temps, la relation entre les humains et leur environnement a subi des transformations importantes. L'impact de l'activité humaine sur l'environnement a commencé à s'accroître rapidement avec le développement de la technologie et de l'industrie, entraînant la dégradation de l'environnement, la pollution de l'air et de l'eau, ainsi que l'extinction de nombreuses espèces animales et végétales. L'ère industrielle est considérée comme une révolution décisive dans l'histoire de l'environnement, car les activités industrielles et l'utilisation des combustibles fossiles ont généré des émissions croissantes de gaz à effet de serre, entraînant le changement climatique et de nouvelles menaces pour l'environnement et l'humanité.

Actuellement, la protection de l'environnement et le développement durable sont parmi les défis les plus pressants auxquels la communauté internationale est confrontée. Des pays, des

organisations et des équipes de recherche s'efforcent de mettre au point des stratégies visant à préserver l'équilibre écologique et à réaliser un développement économique et social durable.

Ainsi, l'étude de l'environnement et de son évolution ne se limite pas à comprendre les effets de l'environnement sur les êtres humains, mais englobe également l'exploration de la façon dont les activités humaines influent sur l'environnement, ainsi que la recherche de moyens pour concilier l'exploitation des ressources naturelles avec leur préservation pour les générations futures.



**Figure III.1: l'environnement [38]**

### **III.3 Définition de la pollution**

Les efforts des scientifiques spécialisés en écologie et climatologie rencontrent des défis pour parvenir à un consensus sur une définition précise et claire de la pollution environnementale. Ce concept, quel que soit sa définition, est étroitement lié aux systèmes écologiques. L'efficacité de ces systèmes est fortement impactée négativement lorsque des modifications surviennent dans l'équilibre entre leurs différents composants. Les changements quantitatifs ou qualitatifs dans les composants du système écologique peuvent provoquer des perturbations, entraînant une perte d'équilibre environnemental. La pollution environnementale consiste à introduire des éléments étrangers au système écologique, ou à modifier les niveaux des composants du système de manière à ce que le système ne puisse pas s'adapter à ces changements, résultant ainsi en un dysfonctionnement du système écologique [39].

### III.4 La pollution à travers l'histoire

La pollution a laissé des traces tout au long de l'histoire, mais elle s'est considérablement aggravée avec le développement de l'industrie et de la technologie à l'époque moderne. Voici un aperçu de quelques points historiques importants dans l'évolution de la pollution :

➤ **Les temps anciens :**

Il existait déjà certaines formes de pollution dans l'Antiquité, telles que la pollution environnementale résultant de l'utilisation du feu pour la cuisson et le chauffage, ainsi que la pollution de l'eau causée par l'élimination des déchets dans les rivières et les lacs.

➤ **La révolution industrielle :**

La révolution industrielle du XVIIIe siècle a entraîné une augmentation rapide de la pollution industrielle, les usines commençant à déverser d'énormes quantités de fumée et de polluants dans l'air et l'eau.

➤ **Le XXe siècle :**

Avec le développement technologique accru et la dépendance accrue aux combustibles fossiles et aux produits chimiques, les problèmes de pollution se sont considérablement aggravés. Cette période a vu une augmentation de la pollution de l'air, de l'eau, du sol et du bruit.

➤ **L'ère moderne :**

Avec l'expansion démographique et industrielle, les défis environnementaux se sont intensifiés. Les pays et les organisations internationales ont commencé à prendre des mesures pour lutter contre la pollution, telles que l'adoption de lois pour limiter les émissions de gaz toxiques et de polluants industriels, et la promotion du développement durable

Actuellement, le monde travaille au développement de nouvelles technologies et à l'adoption de comportements plus durables pour réduire la pollution et préserver l'environnement pour les générations futures [40]

### III.5 Définition des émissions d'échappement

Les émissions d'échappement (Figure III.1) et (Figure III.2) sont un ensemble de gaz et de particules divers émis par les véhicules lorsqu'ils fonctionnent, et ces émissions peuvent avoir un impact négatif sur la qualité de l'air que nous respirons, surtout dans les grandes villes où les voitures sont nombreuses.

À grande échelle, le mélange de vapeurs d'échappement et d'autres particules émises dans l'atmosphère est largement considéré comme un facteur clé du phénomène du réchauffement climatique.

On peut s'attendre à ce que les substances émises par les voitures comprennent des substances polluantes et dangereuses, ainsi que quelques substances chimiques non nocives telles que l'oxygène, l'azote et l'eau, qui font partie des causes de la pollution de l'air [41].



**Figure III.2: émissions d'échappement[42]**



**Figure III.3: émissions d'échappement[42]**

### **III.6 Effets de la fumée des voitures sur la santé humaine**

Voici quelques-uns des principaux effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement causés par la fumée des voitures :

#### **III.6.1 Problèmes respiratoires**

Les particules fines et les gaz toxiques émis par les voitures contiennent des substances irritantes pour le système respiratoire, ce qui peut entraîner une augmentation des cas d'asthme et d'infections respiratoires supérieures et inférieures.

### **III.6.2 Maladies cardiaques et vasculaires**

L'exposition de l'homme à l'air pollué par la fumée des voitures est associée à une augmentation du risque de maladies cardiaques et vasculaires telles que l'hypertension, l'athérosclérose et les crises cardiaques.

### **III.6.3 Cancer**

Certaines substances chimiques présentes dans la fumée des voitures contiennent des agents cancérigènes qui augmentent le risque de développer un cancer du poumon et d'autres maladies respiratoires.

### **III.7 Impact sur les enfants et les personnes âgées**

Les enfants et les personnes âgées sont des groupes sensibles qui réagissent de manière plus intense à la pollution de l'air causée par la fumée des voitures, les rendant plus susceptibles de développer des problèmes de santé associés.

#### **III.7.1 Impact sur l'environnement**

La fumée des voitures contribue à la pollution de l'air et affecte les écosystèmes, notamment en polluant l'eau et en affectant la biodiversité.

En général, la réduction de l'exposition humaine à la fumée des voitures par l'amélioration de la qualité de l'air, la promotion des modes de transport alternatifs et le développement de technologies de véhicules plus propres peut contribuer à atténuer ces effets néfastes sur la santé [43].

#### **Particules nocives pour l'environnement et leurs dangers**

Les particules nocives pour l'environnement sont l'une des principaux défis auxquels l'environnement est confronté aujourd'hui. Ces particules toxiques et polluantes entraînent une détérioration de la qualité de l'environnement et ont des effets négatifs sur la santé publique. Le principal défi pour faire face à ces particules réside dans la compréhension de leurs effets et le développement de stratégies efficaces pour réduire leurs émissions et leur pollution. Dans cet article, nous examinerons les différents types de particules nocives pour l'environnement et leurs effets néfastes, ainsi que les moyens possibles de faire face à ce problème.

### III.8 Types de molécules

Les différents types de particules toxiques présentes dans la fumée des voitures comprennent :

#### III.8.1 Les particules fines (PM2.5 et PM10)

Ces particules (Figure III.4) sont de très petite taille et peuvent pénétrer profondément dans les poumons, causant des problèmes respiratoires et des maladies cardiovasculaires.

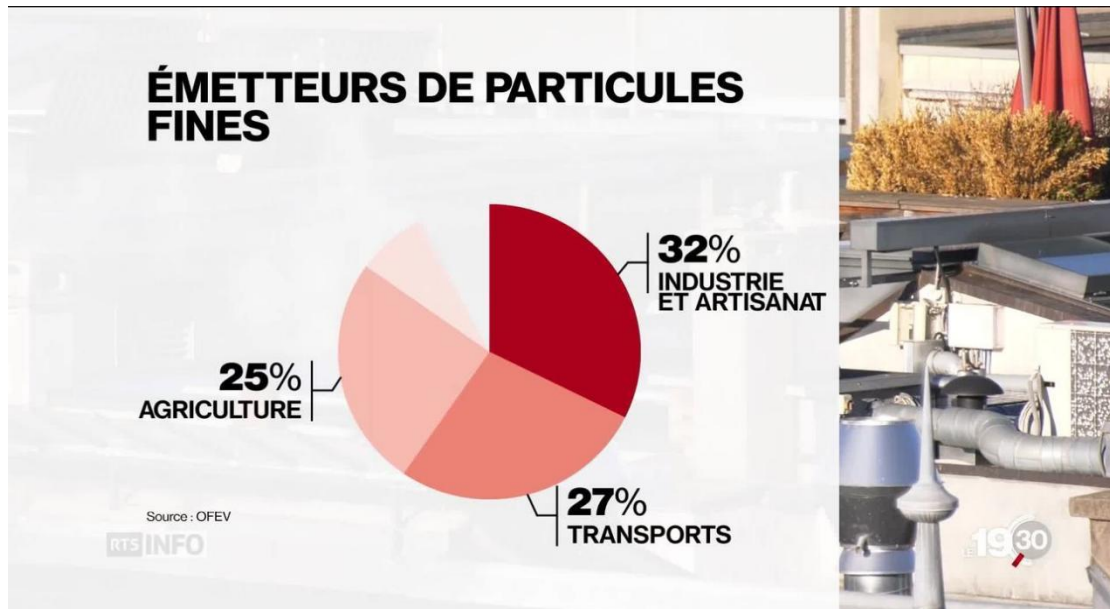


Figure III.4: Une image illustrant les proportions relatives de la distribution Les particules fines[44]

#### III.8.2 Les oxydes d'azote (NOx)

Ils contribuent à la formation de smog et peuvent causer des irritations des voies respiratoires, ainsi que des problèmes pulmonaires et cardiaques.

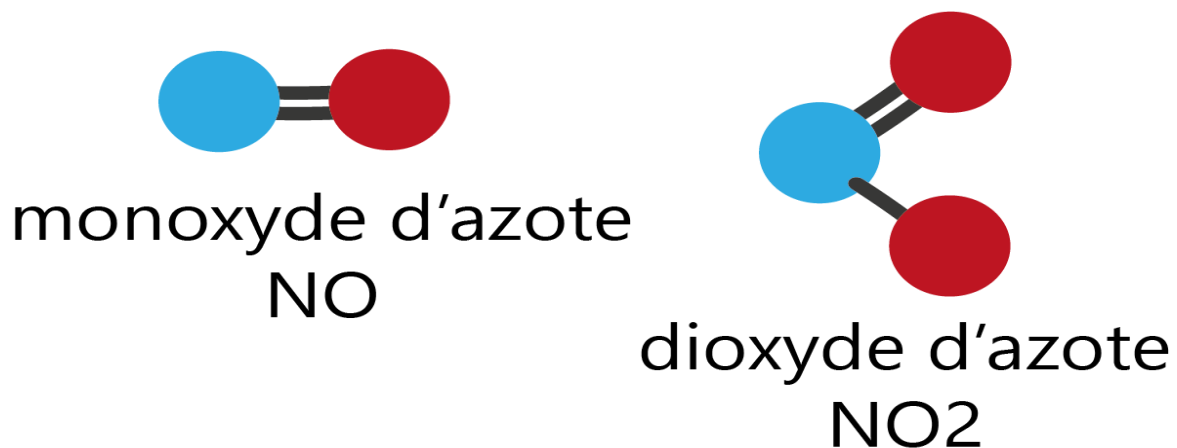


Figure III.5: Une image illustrant la particule de NOX[45]

### III.8.3 Le monoxyde de carbone (CO)

Un gaz toxique inodore et incolore qui peut entraîner une intoxication au monoxyde de carbone (Figure III.6), entraînant des symptômes graves voire la mort.

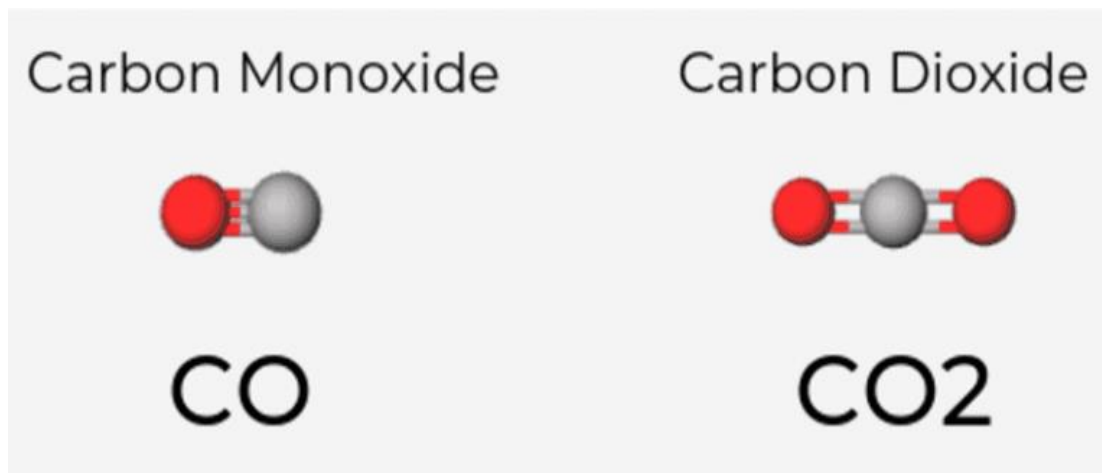


Figure III.6: Une image illustrant la particule de CO<sub>2</sub>[45]

### III.8.4 Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Ce sont des composés organiques présents dans la fumée des moteurs à combustion interne qui sont cancérigènes et peuvent causer des problèmes de santé graves.

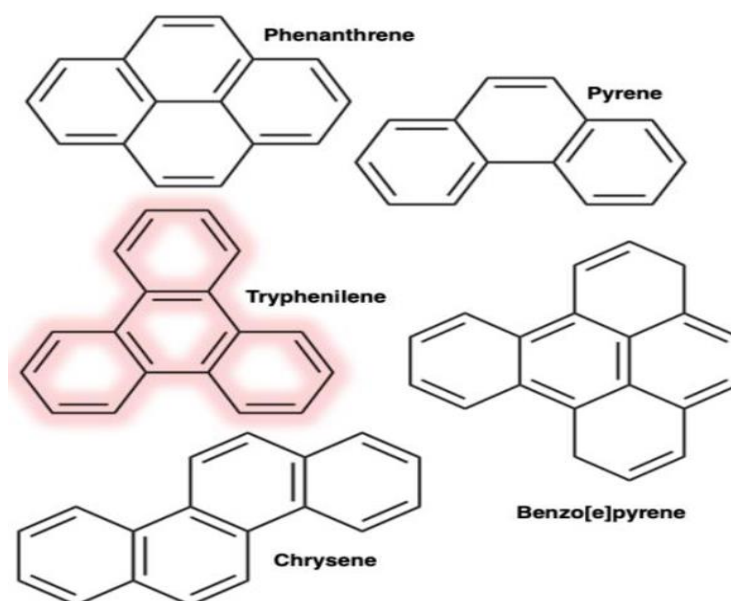


Figure III.7: Une image illustrant la particule de HAP[46]

### III.8.5 Les composés organiques volatils (COV)

Ils contribuent à la formation de smog et peuvent être irritants pour les yeux, le nez et la gorge, ainsi que causer des maux de tête, des nausées et des problèmes respiratoires (Figure III.8)

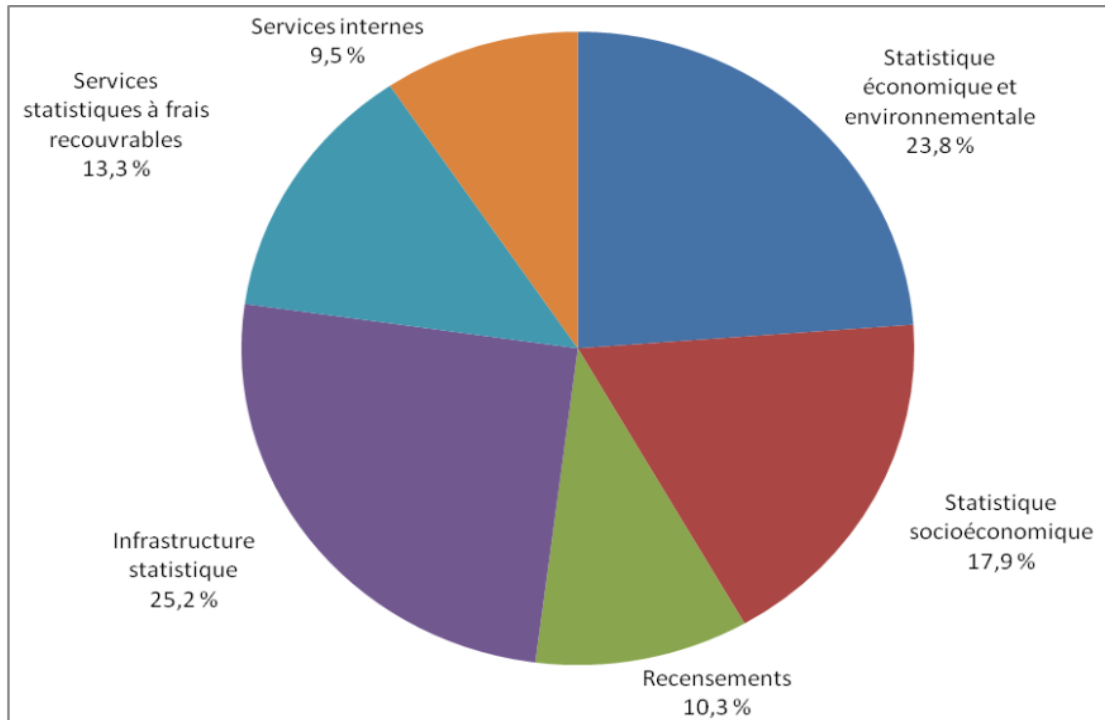


Figure III.8: Une image illustrant les proportions relatives de la distribution Les composés organiques volatils[47]

### III.8.6 Les métaux lourds

Comme le plomb, le mercure et le cadmium, qui sont des polluants toxiques présents dans la fumée des voitures (Figure III.9) et peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement.

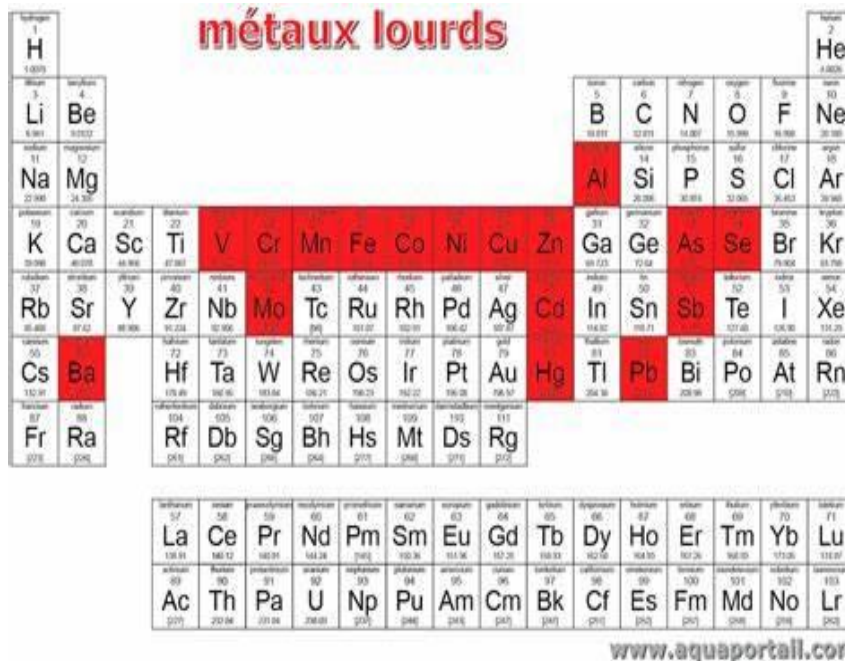


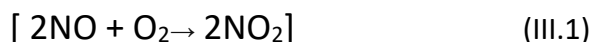
Figure III.9: Une image illustrant la répartition des éléments dans le tableau périodique [48]

Ces particules toxiques sont émises par les véhicules à moteur lors de la combustion des carburants fossiles, ce qui contribue à la pollution de l'air et aux problèmes de santé associés.

### III.9 Équations chimiques des molécules toxiques

Voici les équations chimiques pour la formation de quelques-unes des particules toxiques présentes dans la fumée des voitures :

#### 1. Formation de dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)



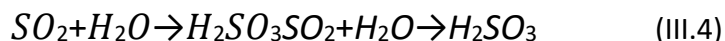
#### 2. Formation de monoxyde de Carbone (CO)



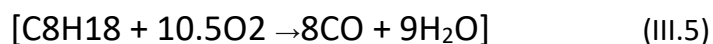
#### 3. Formation de particules fines (PM<sub>2.5</sub>)



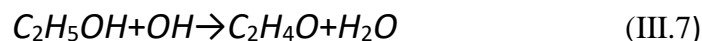
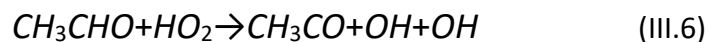
#### 4. Réactions du dioxyde de soufre et de l'ammoniac



#### 5. Formation de particules de carbone (C)



#### 6. Réactions des composés organiques volatils (COV)



Il convient de noter que ces équations sont des simplifications des réactions complexes qui se produisent lors de la combustion des carburants fossiles dans les moteurs à combustion interne des voitures. La composition exacte de la fumée des voitures dépendra du type de carburant utilisé, des conditions de combustion et d'autres facteurs[49].

### III.10 Façons de réduire l'opacité

La réduction de l'opacité nécessite une série de mesures et de dispositifs pouvant être pris à différents niveaux, parmi lesquels :

**1. Développement de la technologie propre :** Il est nécessaire de promouvoir la recherche et le développement pour améliorer la technologie des voitures et des installations industrielles afin de réduire les émissions de gaz d'échappement.

**2. Promotion des transports alternatifs :** Encourager l'utilisation des transports en commun et des moyens de transport propres tels que les vélos et la marche pour réduire la dépendance à l'égard des voitures.

**3. Application des normes environnementales :** Des normes strictes doivent être imposées aux industries et aux installations pour réduire les émissions de gaz d'échappement et se conformer aux normes environnementales.

**4. Encouragement des politiques environnementales gouvernementales :**

Inciter les gouvernements à prendre des mesures légales et politiques pour encourager les industries et les citoyens à réduire les émissions de gaz d'échappement.

**5. Sensibilisation et éducation :** Sensibiliser le public à l'importance de réduire les émissions de gaz d'échappement et à adopter des comportements respectueux de l'environnement tels que la conduite économique et l'entretien régulier des véhicules.

**6. Investissement dans les énergies renouvelables :** Augmentation de l'investissement dans les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne pour se débarrasser de la dépendance aux combustibles fossiles et réduire les émissions nocives.

**7. Renforcement de l'infrastructure environnementale :**

Construction d'infrastructures environnementales telles que des stations de recharge pour les voitures électriques et fourniture d'incitations à utiliser des voitures à faible émission.

La mise en œuvre de ces mesures et d'autres peut contribuer à réduire les émissions de gaz d'échappement, à protéger l'environnement et la santé humaine.

### **III.11 Conclusion**

En conclusion, il est clair que l'opacité joue un rôle crucial dans la pollution de l'environnement. Étant donné que l'opacité est un indicateur de la quantité de particules solides et d'autres substances nocives dans les gaz d'échappement, une augmentation des niveaux d'opacité signifie une augmentation des émissions nocives et une détérioration de la qualité de l'air. Avec l'augmentation du nombre de véhicules et d'industries, la réduction des niveaux d'opacité devient nécessaire pour préserver la santé de l'environnement et de l'homme. Par conséquent, lutter contre le problème de l'opacité nécessite des efforts concertés des gouvernements, des industries et des individus, y compris le développement de technologies propres et l'application de normes d'émissions strictes. La réduction de l'opacité contribue à améliorer la qualité de l'air, ce qui protège l'environnement et contribue à préserver la santé humaine et des êtres vivants sur terre.

# **CHAPITRE IV : ETUDE EXPÉRIMENTALE**

## IV.1 Introduction

Les moteurs à combustion interne produisent de nombreux gaz après le processus de combustion, et il est donc nécessaire de préserver l'environnement en déterminant le pourcentage d'opacité de ces gaz. Cela se fait grâce à l'utilisation d'un appareil appelé opacimètre, spécialement conçu pour mesurer l'opacité des gaz émis par les moteurs diesel.

## IV.2 Historique sur l'opacimètre

L'histoire de la mesure de l'opacité remonte aux années 1930, lorsque des études ont commencé dans le domaine de la mesure de l'opacité des surfaces et des milieux différents, utilisant cette technique pour estimer le degré de transparence des milieux liquides.

Avec le développement de la recherche et des découvertes, le domaine d'utilisation de l'opacimètre s'est élargi, et il est devenu utilisé dans le domaine des moteurs à combustion interne. Il a été utilisé pour vérifier les conditions de sécurité routière et environnementale, et il aide à mesurer la quantité de gaz nocifs émis par les voitures.

Il est également utilisé dans de nombreux domaines différents pour aider à la préservation de l'environnement et de la vie humaine [50].

## IV.3 Définition de l'opacimètre

L'appareil de mesure de l'opacité (Figure IV.1), scientifiquement connu sous le nom d'opacimètre, est considéré comme l'un des moyens importants de détecter les défauts des moteurs à combustion interne et d'évaluer leurs performances. Cet appareil mesure la densité des particules ou de la poussière flottante dans les gaz produits par la combustion interne d'un moteur diesel.

Le type utilisé pour détecter l'opacité des moteurs diesel est le modèle manuel bien connu, largement utilisé dans de nombreux ateliers de contrôle technique pour mesurer le taux d'opacité des gaz émis par les moteurs diesel. Ce type ne repose pas sur l'utilisation de capteurs, mais plutôt sur la méthode optique, où un faisceau lumineux est envoyé à travers les gaz de combustion, puis la réfraction est mesurée lorsqu'elle traverse les gaz et les particules d'air [51].

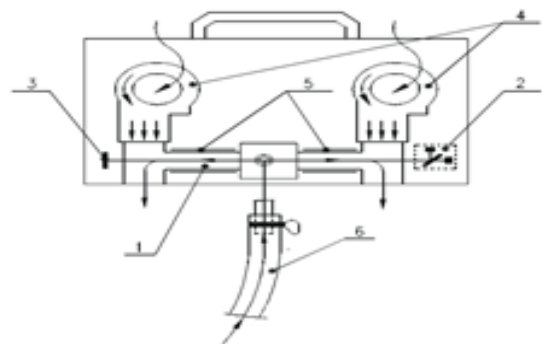


**Figure IV.1: opacimètre de la société Capelec**

#### IV.4 DESCRIPTION DEL'APPAREIL

L'opacimètre se compose d'une part d'un ordinateur personnel (PC ou ordinateur portable, ne faisant pas partie des fournitures) qui permet d'afficher les grandeurs mesurées et de communiquer avec les opérateurs et, d'autre part, d'une unité d'échantillonnage LCS 2400 qui permet, elle, de prélever et d'analyser des échantillons de gaz d'échappement provenant de moteurs diesels [52].

1. Cuvette de mesure.
2. La source lumineuse de la capture.
3. Ventilateurs.
4. Spirale chauffante.
5. Sonde de prélèvement.



**Figure IV.2: Architecture de l'opacimètre**

## IV.5 Les instruments qui composent l'opacimètre

L'opacimètre utilisé pour évaluer l'opacité des émissions des moteurs diesel comprend divers instruments de base qui facilitent la mesure. Ces outils varient en fonction du fabricant de l'appareil et de sa qualité, mais il existe des composants de base qui restent constants et sont nécessaires pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil.

### IV.5.1 Tuyau d'échappement

Il relie le tuyau d'échappement (Figure IV.3) du moteur à l'appareil



Figure IV.3: Tuyau d'échappement.

### IV.5.2 Deux ventilateurs

Les deux ventilateurs (Figure IV.4) il aide à refroidir l'appareil et facilite également le processus d'extraction du gaz vers l'environnement extérieur après son examen par l'appareil



Figure IV.4: les deux ventilateurs.

### IV.5.3 La source lumineuse

Elle envoie un faisceau lumineux à travers l'échantillon prélevé de gaz d'échappement.

### IV.5.4 Les lentilles et les miroirs

Les appareils incluent plus de types, n'utilisez pas certains appareils pour retirer et retirer la lumière cela utilise également d'autres utilisations pour protéger le robinet des impuretés et sur celles-ci. Poussière afin d'éviter toute diffraction du faisceau lumineux. La carte (Figure IV.5) est la même .

La capacité de fonctionnement de l'appareil est basée sur la configuration de base de cet ensemble. Appareil la carte contient un ensemble de circuits électroniques et de ports connectés. Les principes de l'appareil indiquent à l'unité centrale (CPU) la mémoire en direct.

(RAM), les cartes graphiques (GPU) et les unités de stockage qui apparaissent sur le disque (HDD) ou Le disque est fixe (SSD). Ces opérations sur la carte sont corrigées de manière coopérative pour garantir que la fonction d'exploitation est efficace, garantir une efficacité optimale et y parvenir ce sont très fiables.



Figure IV.5: La carte mère

### IV.5.5 Ecran LCD

L'écran LCD (Figure IV.6) Est connecté à l'appareil de manière à afficher les données numériques traduites par la carte mère après le processus de balayage optique des gaz d'échappement.

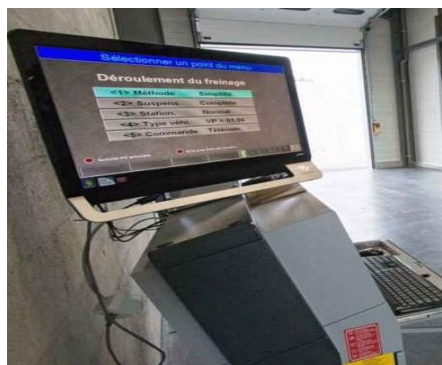


Figure IV.6: Ecran LCD

Après une étude expérimentale sur l'opacimètre de La société de "**Capelec**" et la présentation des composants de cet appareil lors d'une visite à l'atelier de contrôle technique automobile "**SARL FERHAT CONTROLE TECHNIQUE De Véhicule**", nous avons mesuré les valeurs d'opacité de 28 moteurs de différentes générations et catégories de véhicules. Cela nous a permis de comprendre comment mesurer ce taux en utilisant la relation de Beer-Lambert, et de confirmer ces ratios par des calculs mathématiques à l'aide du code mentionné dans ce chapitre. Nous avons également classé les moteurs en quatre catégories distinctes et avons effectué une analyse pour chacune d'entre elles.

#### **IV.6 Principe de fonctionnement**

Cet appareil est utilisé pour déterminer les émissions de fumée en ayant recours à une méthode de mesure de l'opacité basée sur la mesure de l'atténuation optique de la lumière traversant une colonne de fumée située dans la cuvette de mesure de l'appareil. Il permet de réaliser aussi bien des mesures stabilisées que des mesures accélérées. Durant le test d'accélération, l'appareil enregistre la vitesse du moteur (ralenti et survitesse), les valeurs maximales des émissions de fumée et les temps d'accélération. Cet appareil est conçu pour être utilisé dans des lieux de contrôle des émissions ainsi que dans des endroits où du personnel réalise l'entretien des moteurs diesels.

La loi de Beer-Lambert joue un rôle fondamental dans le principe de fonctionnement de cet appareil, en décrivant comment l'intensité de la lumière est atténuée lorsqu'elle traverse une substance absorbante, en l'occurrence, la fumée des gaz d'échappement.

#### **IV.7 Loi de Beer-Lambert**

L'équation de base est :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 \cdot e^{-K \cdot L} \quad (\text{IV.1})$$

Où :

- I est l'intensité de la lumière transmise à travers les gaz d'échappement après interaction avec les particules.
- $I_0$  est l'intensité de la lumière originale avant de pénétrer les gaz d'échappement.
- $\alpha$  est le coefficient d'absorption ou de diffusion, qui dépend de la concentration et de la nature des particules.
- L est la longueur du chemin que parcourt la lumière à travers les gaz d'échappement.

### IV.7.1 Interpretation de equation

- 1 **Intensité de la lumière originale ( $I_0$ )** : c'est l'intensité de la lumière produite par la source lumineuse de l'opacimètre.
- 2 **Intensité de la lumière après interaction ( $I$ )** : c'est l'intensité mesurée de la lumière après son passage à travers les gaz d'échappement, où une partie de celle-ci a été absorbée ou diffusée par les particules.
- 3 **Coefficient d'absorption ou de diffusion ( $K$ )** : ce facteur représente la capacité des particules des gaz d'échappement à absorber ou diffuser la lumière. Plus la concentration de particules est élevée, plus la valeur de  $K$  est grande.
- 4 **Longueur du chemin ( $L$ )** : représente la distance que parcourt la lumière à travers les gaz d'échappement.

### IV.7.2 Méthodes de mesure de l'intensité de la lumière originale ( $I_0$ )

#### IV.7.2.1 Mesure initiale de l'intensité lumineuse :

- Avant de commencer la mesure, l'opacimètre est mis en marche dans un environnement propre sans gaz d'échappement pour déterminer l'intensité lumineuse originale ( $I_0$ ). Cela peut se faire en faisant fonctionner l'appareil sans aucun échantillon de gaz d'échappement, de sorte que l'intensité de la lumière soit mesurée directement de la source au détecteur. Cette valeur est considérée comme la référence pour les mesures ultérieures.

#### IV.7.3 Comparaison directe:

- a) Certains opacimètres utilisent des chemins lumineux doubles ou un miroir semi-réfléchissant pour diviser le faisceau lumineux en deux :
- b) Un faisceau passe à travers l'échantillon (gaz d'échappement).
- c) L'autre faisceau est mesuré directement comme référence sans passer par l'échantillon.

#### IV.7.4 Calibration automatique:

- ❖ Certains appareils disposent d'un système de calibration automatique où l'appareil est périodiquement mis en mode calibration pour ajuster et mesurer l'intensité lumineuse originale. Cela peut être fait en utilisant un miroir interchangeable ou une chambre de référence propre à l'intérieur de l'appareil pour garantir la précision des mesures.

#### IV.7.5 Utilisation d'une référence interne:

- ❖ Certains opacimètres utilisent une référence lumineuse interne, comme une lampe standard ou une LED interne. Cette référence est utilisée pour mesurer en continu l'intensité lumineuse originale ( $I_0$ ). Cette méthode garantit que la mesure de  $I_0$  est effectuée dans les mêmes conditions environnementales et opérationnelles que la mesure de l'intensité lumineuse après son passage à travers les gaz d'échappement ( $I$ ).

## IV.8 Calcul de l'opacité

Pour calculer l'opacité (T) en utilisant l'intensité lumineuse originale ( $I_0$ ) et l'intensité lumineuse après interaction (I), on peut utiliser la relation suivante :

$$T = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100\% \quad (\text{IV.2})$$

### IV.8.1 Exemple illustratif

Supposons que nous ayons mesuré l'intensité lumineuse originale ( $I_0$ ) et l'intensité lumineuse après son passage à travers les gaz d'échappement (I) comme suit :

- ❖ Intensité lumineuse originale ( $I_0$ ) = 1000 unités
- ❖ Intensité lumineuse après passage à travers les gaz d'échappement (I) = 600 unités

Pour calculer l'opacité, on utilise la formule suivante :

**NOTE :**

Intensité lumineuse originale  $I_0$  ne sont pas fixes et varient en fonction de l'appareil et de la source lumineuse utilisés

$$T = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100\% \quad (\text{IV.3})$$

Calcul de l'opacité :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{600}{1000} = 0.6 \quad (\text{IV.4})$$

$$T = (1 - 0.6) \times 100\% \quad (\text{IV.5})$$

$$T = 0.4 \times 100\% \quad (\text{IV.6})$$

$$T = 40\% \quad (26)$$

Ainsi, l'opacité dans ce cas est de 40 %.

### IV.8.2 Code informatique pour calculer l'opacité

Voici un exemple de code en Python pour calculer l'opacité, y compris les méthodes de mesure de l'intensité lumineuse originale :

```
import math
def measure_initial_light_intensity():
    """
```

Mesurer l'intensité lumineuse originale (I0) dans un environnement propre sans gaz d'échappement.

Cette fonction peut être modifiée pour correspondre aux différentes méthodes de mesure mentionnées ci-dessus.

**Returns:**

float: Intensité lumineuse originale (I0)

"""

# Dans cet exemple, nous retournerons une valeur fixe mesurée précédemment.

# Dans les applications pratiques, cette valeur sera mesurée directement depuis l'appareil.

return 1000.0

def calculate\_opacity(I0, I):

"""

Calculer l'opacité en fonction de l'intensité lumineuse originale (I0) et de l'intensité lumineuse après passage à travers les gaz d'échappement (I).

Parameters:

I0 (float): Intensité lumineuse originale

I (float): Intensité lumineuse après passage à travers les gaz d'échappement

Returns:

float: Opacité (en pourcentage)

"""

if I0 <= 0:

raise ValueError("L'intensité lumineuse originale (I0) doit être supérieure à zéro.")

# Calculer l'opacité

opacity = (1 - (I / I0)) \* 100

return opacity

# Mesurer l'intensité lumineuse originale (I0)

I0 = measure\_initial\_light\_intensity()

# Exemple d'intensité lumineuse après passage à travers les gaz d'échappement (peut être mesurée directement à partir de l'appareil)

I = 600 # Intensité lumineuse après passage à travers les gaz d'échappement

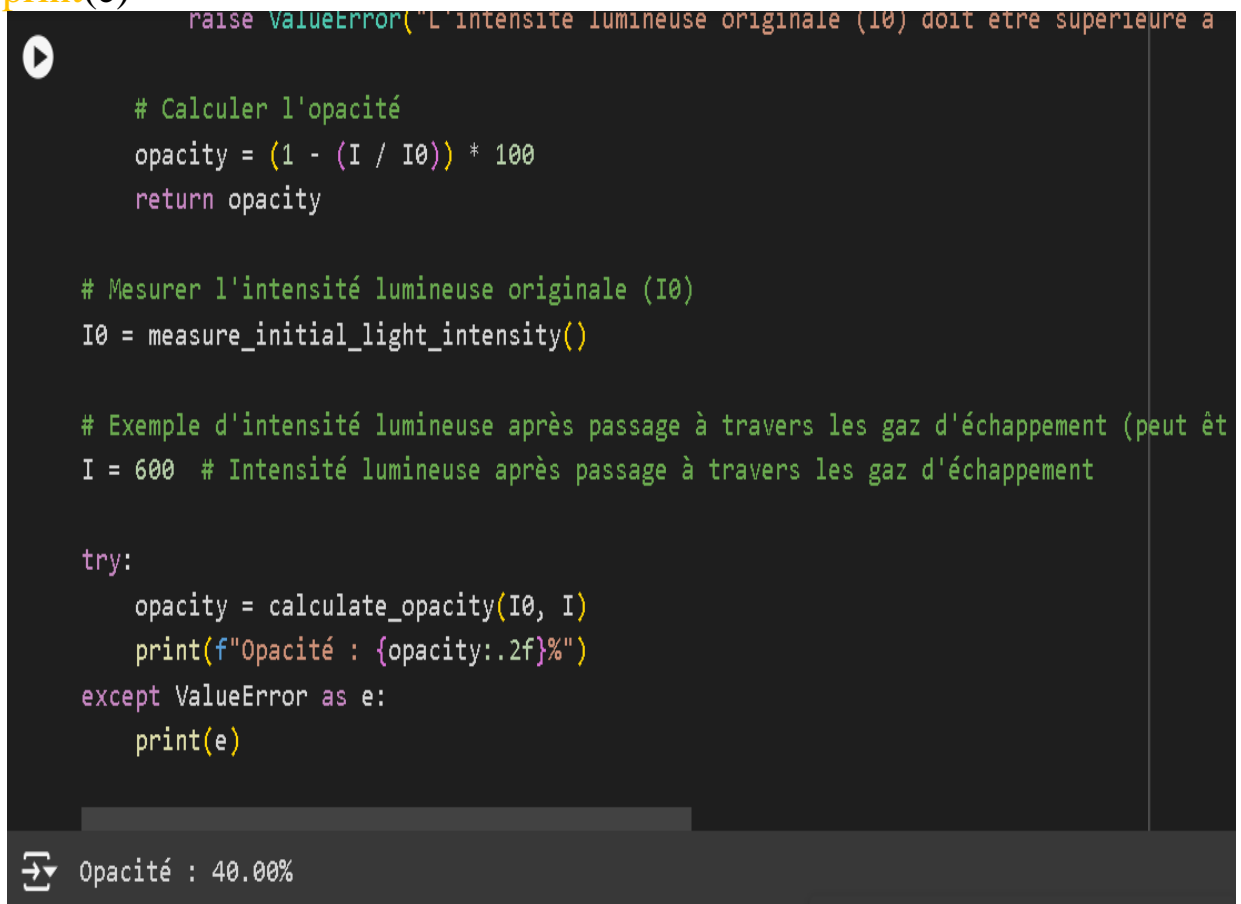
try:

```
opacity = calculate_opacity(I0, I)
```

```
print(f"Opacité : {opacity:.2f}%")
```

except ValueError as e:

```
print(e)
```



```
raise ValueError("L'intensité lumineuse originale (I0) doit être supérieure à")

# Calculer l'opacité
opacity = (1 - (I / I0)) * 100
return opacity

# Mesurer l'intensité lumineuse originale (I0)
I0 = measure_initial_light_intensity()

# Exemple d'intensité lumineuse après passage à travers les gaz d'échappement (peut être
I = 600 # Intensité lumineuse après passage à travers les gaz d'échappement

try:
    opacity = calculate_opacity(I0, I)
    print(f"Opacité : {opacity:.2f}%")
except ValueError as e:
    print(e)
```

Opacité : 40.00%

Figure IV.7: Résultat du calcul en pourcentage

### IV.8.3 Explication du code

#### a) Définir la fonction "measure\_initial\_light\_intensité" :

- ❖ Cette fonction simule la mesure de l'intensité lumineuse originale ( $I_0$ ) dans un environnement propre. Dans une application pratique, cette fonction peut être modifiée pour inclure les différentes méthodes de mesure mentionnées ci-dessus.
- ❖ Dans cet exemple, la fonction retourne une valeur fixe (1000.0 unités), mais dans la pratique, cette valeur sera mesurée directement depuis l'appareil.

#### b) Définir la fonction "calculate\_opacity" :

- ❖ Prend en entrée l'intensité lumineuse originale ( $I_0$ ) et l'intensité lumineuse après passage à travers les gaz d'échappement ( $I$ ).
- ❖ Vérifie que l'intensité lumineuse originale est supérieure à zéro pour éviter une division par zéro.
- ❖ Utilise l'équation pour calculer l'opacité :

$$T = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100\% \quad (\text{IV.7})$$

- ❖ Retourne la valeur de l'opacité.

#### Utiliser les deux fonctions:

- ❖ Appelle la fonction "measure\_initial\_light\_intensity" pour mesurer ou obtenir l'intensité lumineuse originale ( $I_0$ ).
- ❖ Définit la valeur de l'intensité lumineuse après passage à travers les gaz d'échappement ( $I$ ).
- ❖ Appelle la fonction calculate\_opacity pour calculer l'opacité en fonction des valeurs fournies.
- ❖ Imprime le résultat de l'opacité en pourcentage.
  - Avec ce code, vous pouvez calculer l'opacité pour n'importe quelle mesure d'intensité lumineuse originale et d'intensité lumineuse après passage à travers les gaz d'échappement, en tenant compte des différentes méthodes de mesure de l'intensité lumineuse originale.

#### Nous avons également :

en utilisant le coefficient  $K$ , on peut réarranger l'équation de Beer-Lambert comme suit :

$$T = 1 - e^{-K.L} \quad (\text{IV.8})$$

### IV.8.4 Exemple Illustratif

Supposons que nous ayons mesuré l'intensité lumineuse originale ( $I_0$ ) = 1000 unités, et l'intensité lumineuse après son passage à travers le gaz d'échappement ( $I$ ) = 600 unités, avec une longueur de chemin ( $L$ ) = 1 mètre.

Pour calculer le coefficient  $K$  :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-K.L} \quad (\text{IV.9})$$

$$\frac{600}{1000} = e^{-K.1} \quad (\text{IV.10})$$

$$0.6 = e^{-K} \quad (\text{IV.11})$$

$$K = -\ln(0.6) \approx 0.51 \quad (\text{IV.12})$$

Ainsi, le coefficient  $K$  est de 0,51 par mètre.

### IV.9 Rôle du Coefficient $K$ dans les Mesures Pratiques

Le coefficient  $K$  fournit un moyen standardisé de comparer la densité de la fumée entre différents moteurs ou conditions opérationnelles. Il aide à déterminer l'efficacité de la combustion du carburant et est une mesure importante dans le domaine de la surveillance des émissions des véhicules et des moteurs.

#### IV.9.1 Code pour Calculer le Coefficient $K$ en Utilisant l'Équation de Beer-Lambert

Voici un code en Python pour calculer le coefficient  $K$  en utilisant l'équation de Beer-Lambert. Ce code nécessite la connaissance de l'intensité lumineuse originale ( $I_0$ ), de l'intensité lumineuse après son passage à travers le gaz d'échappement ( $I$ ) et de la longueur du chemin ( $L$ ).

```
import math
```

```
def calculate_absorption_coefficient(I0, I, L):
```

```
    """
```

```
        Calculer le coefficient d'absorption  $K$  en utilisant l'équation de Beer-Lambert.
```

```
        Parameters:
```

`I0 (float)`: Intensité de la lumière originale avant de pénétrer le gaz d'échappement.

`I (float)`: Intensité de la lumière après son passage à travers le gaz d'échappement.

`L (float)`: Longueur du chemin que parcourt la lumière à travers le gaz d'échappement.

Returns:

`float`: Coefficient d'absorption `K`.

"""

if `I0 <= 0` or `I <= 0` or `L <= 0`:

    raise ValueError("Toutes les valeurs doivent être supérieures à zéro.

# Calculer le coefficient d'absorption `K`

`K = -math.log(I / I0) / L`

return `K`

# Exemple de valeurs d'entrée

`I0 = 1000` # Intensité de la lumière originale

`I = 600` # Intensité de la lumière après son passage à travers le gaz d'échappement

`L = 1` # Longueur du chemin en mètres

try:

`K = calculate_absorption_coefficient(I0, I, L)`

`print(f"Coefficient d'absorption K: {K:.4f} par mètre")`

except ValueError as e:

`print(e)`

```

# Calculer le coefficient d'absorption K
K = -math.log(I / I0) / L
return K

# Exemple de valeurs d'entrée
I0 = 1000 # Intensité de la lumière originale
I = 600   # Intensité de la lumière après son passage à travers le gaz d'échappement
L = 1     # Longueur du chemin en mètres

try:
    K = calculate_absorption_coefficient(I0, I, L)
    print(f"Coefficient d'absorption K: {K:.4f} par mètre")
except ValueError as e:
    print(e)

```

↩ Coefficient d'absorption K: 0.5108 par mètre

**Figure IV.8: Le résultat du calcul de K**

### IV.9.2 Explication du Code

#### a) Définition de la Fonction `calculate_absorption_coefficient` :

- ❖ La fonction prend trois entrées :  $I_0$  (intensité de la lumière originale),  $I$  (intensité de la lumière après son passage à travers le gaz d'échappement), et  $L$  (longueur du chemin).
- ❖ La fonction vérifie que toutes les valeurs d'entrée sont supérieures à zéro pour éviter les erreurs mathématiques.
- ❖ La fonction calcule le coefficient d'absorption  $K$  en utilisant l'équation de Beer-Lambert :

$$K = -\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{L} \quad (\text{IV.13})$$

- ❖ La fonction retourne la valeur de  $K$ .

### IV.9.3 Exemple de Valeurs d'Entrée :

- ❖ Les valeurs d'entrée sont définies :  $I_0 = 1000$  (intensité de la lumière originale),  $I = 600$  (intensité de la lumière après son passage à travers le gaz d'échappement), et  $L = 1$  (longueur du chemin en mètres).
- ❖ La fonction "**calculate\_absorption\_coefficient**" est appelée pour calculer  $K$  et le résultat est imprimé.
  - Avec ce code, vous pouvez calculer le coefficient d'absorption  $K$  pour n'importe quelles valeurs d'intensité lumineuse originale, d'intensité lumineuse après passage à travers le gaz d'échappement, et de longueur du chemin.

### IV.10 Résultats d'analyse moteurs Diesel

Les résultats ( $K_1$  : Opacité, densité de fumée dans l'environnement) obtenus sont représentés sur le tableau

**Tableau IV-1: Résultats d'analyse moteurs Diesel**

Moteurs	Année de mise en marche	$K_1$	Moteurs	Année de mise en marche	$K_1$
Moteur 1	2006	0.25	Moteur 15	2010	0.20
Moteur 2	2015	0.30	Moteur 16	2013	0.50
Moteur 3	2015	0.40	Moteur 17	2008	0.75
Moteur 4	2022	0.01	Moteur 18	2020	0.10
Moteur 5	2017	0.20	Moteur 19	2012	0.10
Moteur 6	2008	0.80	Moteur 20	2021	0.06
Moteur 7	2006	1.50	Moteur 21	2008	0.43
Moteur 8	2014	0.36	Moteur 22	2005	1.20
Moteur 9	2010	0.70	Moteur 23	2021	0.03
Moteur 10	2020	0.07	Moteur 24	2012	0.40
Moteur 11	2014	0.03	Moteur 25	2016	0.02
Moteur 12	2022	0.02	Moteur 26	2009	0.10
Moteur 13	2019	0.04	Moteur 27	2015	0.04
Moteur 14	2011	0.10	Moteur 28	2007	1.41

### IV.10.1 Conclusion complète de l'expérience sur l'analyse des émissions des moteurs diesel

L'analyse détaillée des émissions de fumée des moteurs diesel au moyen d'un opacimètre a révélé des résultats significatifs qui témoignent de l'évolution technologique et de l'efficacité accrue des moteurs diesel modernes. Cette étude s'est articulée autour de la mesure de l'opacité des gaz d'échappement (K1) sur une sélection de moteurs de différentes années de mise en marche, allant de 2005 à 2022. Voici les conclusions principales tirées de cette analyse


#### ✚ Classe 1: 2005 → 2009

**Tableau IV-2: Résultats d'analyse moteurs diesel de 2005 à 2009**

Moteurs	Moteur 1	Moteur 2	Moteur 3	Moteur 4	Moteur 5	Moteur 6	Moteur 7	Moteur 8
Année de mise en marche	2005	2006	2006	2007	2008	2008	2008	2009
K <sub>1</sub>	1.20	0.25	1.50	1.41	0.80	0.75	0.43	0.10

#### Commentaire :

La classe 1 regroupe les moteurs les plus anciens, de 2005 à 2009. On observe des valeurs d'opacité K1 relativement élevées, avec une moyenne arithmétique de 0.805. Cela est probablement dû à la technologie moins avancée de ces moteurs et à leur utilisation prolongée, ce qui conduit à une usure plus importante et à une combustion moins efficace. Les moteurs de cette classe nécessitent plus de surveillance et de maintenance pour limiter les émissions polluantes.


 **Classe 2 : 2010 → 2014**

**Tableau IV-3: Résultats d'analyse moteurs diesel de 2010 à 2014**

Moteurs	Moteur 1	Moteur 2	Moteur 3	Moteur 4	Moteur 5	Moteur 6	Moteur 7	Moteur 8
Année de mise en marche	2010	2010	2011	2012	2012	2013	2014	2014
K <sub>1</sub>	0.20	0.70	0.10	0.10	0.40	0.50	036.	0.03

**Commentaire :**

La classe 2 montre une amélioration significative par rapport à la classe 1 avec une moyenne d'opacité K<sub>1</sub> de 0.298. Cette baisse de l'opacité est due à l'amélioration technologique des moteurs et à une réglementation plus stricte sur les émissions de polluants. Les moteurs de cette période sont plus efficaces et moins polluants, ce qui reflète les progrès dans la conception et la fabrication des moteurs diesel.

 **Classe 3 : 2015 → 2019**

**Tableau IV-4: Résultats d'analyse moteurs diesel de 2015 à 2019**

Moteurs	Moteur 1	Moteur 2	Moteur 3	Moteur 4	Moteur 5	Moteur 6
Année de mise en marche	2015	2015	2015	2016	2017	2019
K <sub>1</sub>	0.30	0.40	0.04	0.02	0.20	0.04

**Commentaire :**

La classe 3 présente une nouvelle réduction de l'opacité moyenne à 0.125. Les moteurs de cette période bénéficient de technologies encore plus avancées et d'une meilleure efficacité en termes de combustion et de réduction des émissions. Cela souligne l'impact positif des innovations technologiques et des politiques environnementales sur les performances des moteurs diesel.

### ✚ Classe 4 : 2020 → 2022

**Tableau IV-5: Résultats d'analyse moteurs diesel de 2020 à 2022**

Moteurs	Moteur 1	Moteur 2	Moteur 3	Moteur 4	Moteur 5	Moteur 6
Année de mise en marche	2020	2020	2021	2021	2022	2022
K <sub>1</sub>	0.10	0.07	0.06	0.03	0.01	0.02

#### Commentaire :

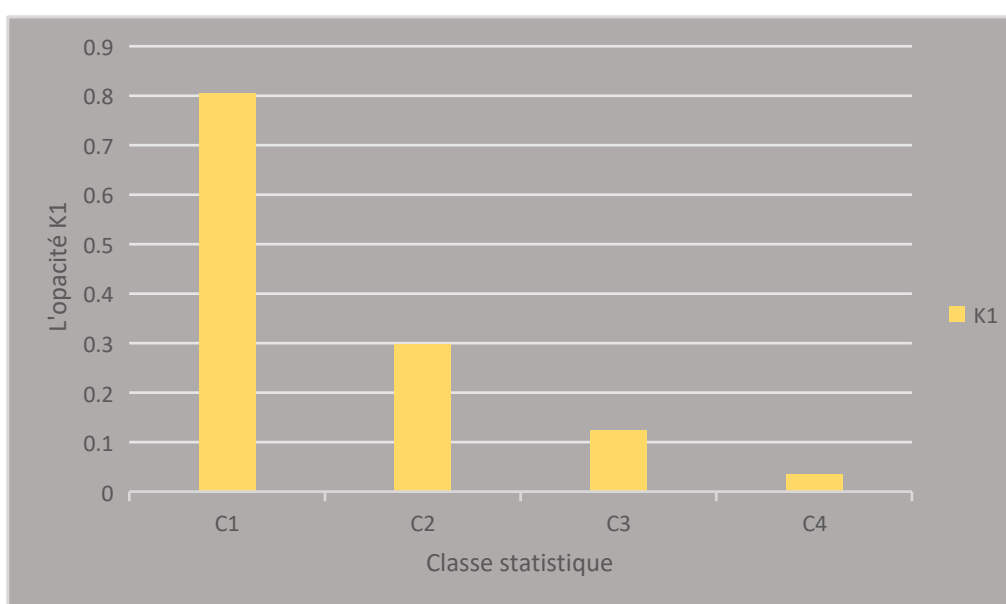
La classe 4, regroupant les moteurs les plus récents, affiche la plus faible opacité moyenne avec une valeur de 0.036. Cette classe montre l'impact des dernières avancées en matière de technologie de moteur diesel, notamment l'amélioration de la combustion et les dispositifs de réduction des émissions. Ces résultats indiquent une tendance positive vers des moteurs diesel plus propres et plus efficaces, en ligne avec les objectifs environnementaux actuels.

#### Tableaux de la moyenne arithmétique de Moteur diesel

**Tableau IV-6: Résultats de calculé la moyenne arithmétique de Moteur diesel**

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
K <sub>1</sub>	0.805	0.298	0.125	0.036

#### Une courbe de la moyenne arithmétique pour différentes catégories de moteurs



**Figure IV.9: L'opacité K<sub>1</sub> dans les moteurs Diesel**

### IV.10.2 Remarque :

Les résultats des quatre classes montrent une nette amélioration de la réduction des émissions polluantes au fil du temps. L'opacité K1 diminue significativement avec les années de mise en marche plus récentes des moteurs, indiquant des progrès technologiques et des efforts réglementaires pour réduire les émissions de gaz d'échappement. La mesure de l'opacité des gaz d'échappement reste essentielle pour surveiller et améliorer la qualité de l'air, ainsi que pour évaluer les performances des moteurs diesel.

### IV.10.3 Synthés globaux des résultats

Les résultats obtenus montrent une tendance claire et encourageante : l'opacité des gaz d'échappement des moteurs diesel a diminué de manière significative au fil des ans. Cette réduction est le fruit des progrès technologiques dans la conception des moteurs, de l'amélioration des systèmes de combustion, et de la mise en place de réglementations plus strictes sur les émissions de polluants.

L'utilisation de l'opacimètre dans cette étude s'est avérée cruciale pour mesurer et analyser ces progrès. En fournissant des données précises sur les niveaux d'opacité des gaz d'échappement, cet appareil aide non seulement à évaluer la performance des moteurs, mais aussi à identifier les moteurs nécessitant une maintenance ou une mise à niveau pour répondre aux normes environnementales actuelles.

### Importance de l'opacimètre dans la gestion des émissions des moteurs diesel

L'opacimètre, en tant qu'outil de mesure de l'opacité des gaz d'échappement, joue un rôle essentiel dans plusieurs domaines :

- **Surveillance de la qualité de l'air** : En mesurant le niveau d'opacité, il contribue à maintenir la pureté de l'air et à protéger la santé environnementale.
- **Évaluation des performances des moteurs** : Il aide à identifier les moteurs inefficaces et à optimiser leur fonctionnement pour réduire les émissions polluantes.
- **Conformité réglementaire** : En fournissant des mesures précises, il permet aux autorités de vérifier la conformité des véhicules aux normes d'émissions en vigueur, contribuant ainsi à des routes plus propres et plus sûres.
- **Sécurité professionnelle** : Il aide à détecter les moteurs présentant des niveaux élevés de fumée, potentiellement dangereux pour la santé publique, et à prendre les mesures nécessaires pour réduire ces risques.

## IV.11 Conclusion

En conclusion, cette expérience démontre l'importance cruciale de l'opacimètre dans le contrôle et la gestion des émissions des moteurs diesel. Les résultats soulignent les progrès technologiques significatifs réalisés au fil des ans, qui se traduisent par une réduction constante des niveaux d'opacité des gaz d'échappement. Grâce à ces avancées, les moteurs diesel modernes sont plus propres et plus efficaces, alignés avec les objectifs de protection de l'environnement et de la santé publique. L'opacimètre reste un outil indispensable pour continuer à surveiller et à améliorer la qualité de l'air et les performances des moteurs diesel.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

### **Conclusion générale :**

Dans ce contexte, on peut dire que les moteurs diesel constituent une source importante d'émissions de particules fines et de fumées noires qui polluent l'air et ont un impact négatif sur la santé publique et l'environnement. Ces émissions de fumées noires contribuent à la formation de nuages denses et de smog, ce qui entraîne de nombreux dommages pour la vie naturelle.

De plus, les particules de fumées noires contiennent des substances nocives telles que les hydrocarbures volatils et les composés organiques volatils lourds, pouvant causer de graves problèmes de santé, notamment des maladies chroniques.

Pour réduire les émissions de fumées noires et atténuer les dommages environnementaux et sanitaires qui en découlent, il est nécessaire de prendre des mesures efficaces telles que l'utilisation de technologies de réduction des émissions et l'entretien méticuleux des moteurs pour éviter leur usure prématurée. Il est également essentiel de promouvoir l'utilisation de modes de transport alternatifs respectueux de l'environnement, tels que les voitures électriques ou hybrides. En adoptant ces mesures, nous pouvons réduire les fumées noires et préserver la qualité de l'air ainsi que la santé de l'environnement et de la société dans son ensemble.

# BIBLIOGRAPHIE :

### Bibliographie :

- [1] K. Nejjar, "Etude de la réactivité thermique d'une huile de lubrification des moteurs diesel," 2011.
- [2] "<https://www.alamyimages.fr/portrait-de-rudolf-diesel-1858-1913-allemand-image463703887.html?imageid=B37E9A39-38F5-4E71-8290-1E69D36BD821&p=1169799&pn=1&searchId=78efa0ca13de3d2b711aee35ca45c0b9&searchtype=0>."
- [3] G. Alix, "Comparaison de concepts de moteur diesel en vue de leur hybridation: Bilan des émissions de Co2 suivant l'usage en véhicule," Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2008.
- [4] "<https://tpdemain.com/wp-content/uploads/2023/02/b77afdc9-dd65-4ed7-a0db-2315adbef3f.jpeg>."
- [5] R. Nadir, "Etude et description détaillée d'un moteur diesel, université de Kesdi merbah, Ouaregla, 2021/2022."
- [6] "<https://club.auto-doc.fr/magazin/la-culasse-du-moteur-definition-fonctions-contrôle-et-reparation>."
- [7] "<https://www.gomecano.com/service/carter-dhuile/>."
- [8] "<https://thumbs.dreamstime.com/z/nouveau-collecteur-d-admission-de-la-voiture-russe-uaz-isol%C3%A9-sur-fond-blanc-198649843.jpg?ct=jpeg>."
- [9] "<https://www.quora.com/What-is-the-function-of-groove-in-the-piston>."
- [10] "Chapeau de bielle : définition et explications. Rozaly.fr.com."
- [11] <https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Vilebrequin/1002385>.
- [12] *Cours de Mécanique Automobile À Liège, wixsite.com.*
- [13] E. Vasilescu, "La thermodynamique en temps fini des cycles des moteurs à combustion interne"
- [14] D. A. Mondenge, "Généralité Sur Le Moteur Thermique.," Sep 29, 2022.
- [15] B. Andresen, R. S. Berry, A. Nitzan, and P. Salamon, "Thermodynamics in finite time. I. The step-Carnot cycle," *Physical Review A*, vol. 15, no. 5, p. 2086, 1977.

## Bibliographie

---

- [16] "Cycle de Carnot, Source:Wikipédia l'encyclopédie libre. ."
- [17] "4 Temps Dun Moteur L'automobile Mystérieuse De Julie D."
- [18] A. Degrandcourt, "Le coup d'écrou#15 - Le moteur 4 temps / Le fonctionnement," NOVEMBER 6 2020, .
- [19] M. younes, "Thermo dynamics , chapter 4,energy analysis of closed."
- [20] "Moteur Diesel\*par school thermodynamique " 19 avril 2020.
- [21] "Moteur diesel suralimenté : bases et calculs, cycles réel, théorique et thermodynamique : rapport interne."
- [22] J. Chesnel, "Simulation aux Grandes Échelles de l'Atomisation, Application à l'Injection Automobile," Université de Rouen, 2010.
- [23] P. Scheepers and R. Bos, "Combustion of diesel fuel from a toxicological perspective: I. Origin of incomplete combustion products," *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 64, pp. 149-161, 1992.
- [24] L. AYRRES and T. Tkera, "Étude problème de corrosion d'un moteur diesel Caterpillar 3512."
- [25] Q. Leclère, "ETUDE ET DEVELOPPEMENT DE LA MESURE INDIRECTE D'EFFORTS- Application à l'identification des sources internes d'un moteur Diesel," INSA de Lyon, 2003.
- [26] B. Richant, *sonde lambda de voiture defectueuse* , 30/12/2022.
- [27] *Site de REXBO.COM pour vente Piece d' automobile.*
- [28] A. BEKKARI, "ÉTUDE ET MAINTENANCE D'UN MOTEUR DIESEL TYPE: CATERPILLAR 3512A," Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2019.
- [29] "<https://www.decalaminage78.fr/turbocompresseur/>."
- [30] A. SELATNIA, "Contribution à l'étude d'un rotor d'un moteur à combustion interne," 2016.
- [31] T. SHIMODAIRA, "LE SYSTEME D'INSPECTION AUTOMOBILE AU JAPON," *JOURNEES INTERNATIONALES DE LA SECURITE ROUTIERE 1983*, no. 18, 1983.
- [32] *R/mecanique advice , partie de sceller le pieces de l'echappement.*

## Bibliographie

---

- [33] O. LAMRI, "L'importance de l'analyse du travail dans l'élaboration des programmes de la formation professionnelle. Le cas de la spécialité: mécanique réparation automobile."
- [34] "<https://www.enji.com.au/insights/mechanics/what-is-an-egr-valve/>."
- [35] "D.O,Bonnefoy,Element de cours ,combustion ,Ecole Nationale Suuperieure de Mines , Saint- Etienne , 201415-."
- [36] R. M., " Le véhicule industriel dans la ville. ," *Arts et Manufactures*, 1992.
- [37] "Le moteur Diesel et la pollution," 11 oct. 1991.
- [38] "<https://presse.credit-agricole.com/actualites/operation-1-contrat-signé-1-arbre-plante-credit-agricole-assurances-elargit-son-action-a-lensemble-des-contrats-dassurance-vie-et-de-prevoyance-deces-12b8-9ed05.html>."
- [39] "Journal of Environmental Studies د خليف مصطفى غرايبة قسم العلوم الأساسية - جامعة البلقاء التطبيقية - الأردن."
- [40] "[https://fr.wikipedia.org/wiki/Environmental\\_Protection\\_Agency](https://fr.wikipedia.org/wiki/Environmental_Protection_Agency)."
- [41] "Vehicle exhaust emissions | What comes out of a car exhaust? | RAC Drive."
- [42] "<https://garagesmartauto.com/article/opacite/gaz/echappment>."
- [43] A. Daouda, "CERAP/COCODY, ABIDJAN, COTE D'IVOIRE " 4 JUIN 2017.
- [44] "La pollution aux particules fines est plus critique 18/02/2019."
- [45] "<https://www.madinair.fr/Oxydes-d-azote-NOx?lang=fr>."
- [46] "Occupational Hygiene in the Basic Petroleum Chemistry "
- [47] "<http://www.mdgfund.org/fr/node/1014>."
- [48] "<https://www.aquaportail.com/pictures2304/metaux-lourds.jpg>."
- [49] "Chimie 2 (scientificsentence.net)."
- [50] " <https://fr.wikipedia.org/wiki/Opacité>."
- [51] "<https://www.cnrtl.fr/definition/opacim%C3%A9trie>."
- [52] "ACTI-GAS. INSTRUCTIONS DE SERVICE."