

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme de Master

En : Génie Mécanique

Spécialité : ÉNERGÉTIQUE

Par :

•Elhannani Younes Abdeslam

•Djeriou Mourad

Sujet :

Développement d'une solution IoT pour le monitoring des Gaz d'échappement dans les moteurs à combustion

Soutenu publiquement, le 04/07/2021, devant le jury composé de :

Mr. MIMOUN Okacha	MAA	Univ. Tlemcen	Président
Mr. BENMANSOUR Abdelkrim	MCB	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mr. BENADDA Belkacem	Prof.	Univ. Tlemcen	Co-Encadreur
Mr. GUELLIL Hocine	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire 2020-2021

Remerciements

Nous remercions d'abord DIEU qui nous a donné la santé, la force et la volonté pour réaliser beaucoup de choses au-delà de nos capacités normales.

*Nous tenons évidemment à notre encadreur **Mr. BENMANSOUR Abdelkrim** qui a bien voulu superviser et suivre avec attention notre travail malgré les défis et pour sa grande patience et modeste qui donne de l'exemple.*

*Ce travail a été réalisé avec la collaboration du département de télécommunication, nous tenons à remercier **Mr. BENADDA Belkacem** qui nous a aidé dans notre chemin pour terminer ce travail.*

*Nos remerciements aussi à **Mr. MIMOUN OKACHA** d'avoir accepté de nous faire l'honneur de présider le jury de ce mémoire et de bien vouloir l'examiner.*

*Nous adressons aussi nos vifs remerciements à **Mr. GUELLIL Hocine** d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

Nos tout sincères remerciements vont également à tous les enseignants pédagogiques du département du génie mécanique de l'université de Tlemcen qui ont contribué à notre formation.

A tous ceux et celles qui de près ou de loin ont apporté aide et encouragement, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.





Dédicace

Ce travail est dédié

A nos chers parents

A nos chers frères et sœurs

*A tous ceux qui nous sont
chers*



Résumé

Dernièrement, les moteurs à combustion interne ont connu un développement remarquable grâce à leurs performances, leur longévité et aussi leur meilleur rendement de combustion qui se traduit par une consommation de carburant moindre. Cependant, ces moteurs émettent de grandes quantités de polluants tels que le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone et les particules de suie.

Pour traiter ces gaz, des normes doivent être fixées pour les surveiller et les limiter. Les constructeurs doivent trouver des solutions pour lire la quantité d'émissions en plaçant des capteurs à l'entrée et à la sortie du moteur pour donner la quantité de gaz produits. Parmi les systèmes anti-pollution nous citons le système EGR, qui à son tour agit comme un système pour diriger à nouveau les gaz polluant lorsqu'ils dépassent les limites recommandées vers la chambre de combustion pour les réduire...

La simulation de combustion dans les moteurs est un outil très important car elle permet à moindre coût une compréhension approfondie des caractéristiques de la combustion et prédit également la composition des polluants.

Cette recherche numérique est basée sur la prédiction de ce qui arrivera au moteur lorsque nous changeons l'un des paramètres à l'aide du programme numérique FLUENT 6.3. Des simulations numériques prouvent la pertinence de ce système dans le processus de combustion et la formation de dioxyde de carbone.

Mots clés : Moteur à combustion interne ; Gaz d'échappement ; Simulation numérique ; FLUENT.

خلاصة

في الآونة الأخيرة، شهدت محركات الاحتراق الداخلي تطوراً ملحوظاً بفضل أدائها وطول عمرها وأيضاً كفاءة احتراقها الأفضل مما يؤدي إلى تقليل استهلاك الوقود. ومع ذلك، فإن هذه المحركات تنبعث منها كميات كبيرة من الملوثات مثل ثاني أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون وجزيئات السخام.

لمعالجة هذه الغازات، يجب وضع معايير لمراقبتها والحد منها، ويجب على الشركات المصنعة إيجاد حلول لقراءة كمية الانبعاثات من خلال وضع حساسات في مدخل ومخرج المحرك لإعطاء كمية الغازات الناتجة. من بين أنظمة مكافحة التلوث نذكر نظام RGE والذي يعمل بدوره كجهاز استشعار لتوجيه الغازات الملوثة مرة أخرى عندما تتجاوز الحدود الموصى بها نحو غرفة الاحتراق لتقليلها...

تعد محاكاة الاحتراق في المحركات أداة مهمة جداً لأنها تتيح بتكلفة منخفضة فهماً متعمقاً لخصائص الاحتراق وتنبأ أيضاً بتكوين الملوثات. يعتمد هذا التحقيق الرقمي على التنبؤ بما سيحدث للمحرك عندما نغير أياً من الإعدادات باستخدام البرنامج الرقمي 6.3 TNEULF. تثبت المحاكاة العددية أهمية هذا النظام في عملية الاحتراق وتكوين ثاني أكسيد الكربون.

الكلمات الرئيسية: محرك احتراق داخلي؛ غازات العادم. رمز حساب فلونت.

Abstract

Recently, internal combustion engines have experienced a remarkable development due to their performance, longevity and also their better combustion efficiency, which results in lower fuel consumption. However, these engines emit large quantities of pollutants such as carbon dioxide, carbon monoxide and soot particles.

To deal with these gases, standards must be set to monitor and limit them. Manufacturers must find solutions to read the amount of emissions by placing sensors at the engine's inlet and outlet to give the amount of gases produced. Among the anti-pollution systems, we mention the EGR system, which in turn acts as a sensor to redirect the polluting gases when it exceeds the recommended limits to the combustion chamber to reduce them.

The simulation of combustion in engines is a very important tool because it allows a thorough understanding of the characteristics of combustion and also predicts the composition of pollutants at low cost. This numerical investigation is based on the prediction of what will happen to the engine when we change one of the parameters using the numerical program FLUENT 6.3. Numerical simulations prove the relevance of this system in the combustion process and the formation of carbon dioxide.

Keywords: Internal combustion engine; exhaust gas; Numerical simulation; FLUENT.

Table des matières

I.	Chapitre I Généralités sur les Moteurs à Combustion Interne	17
I.1	Introduction :.....	18
I.2	Développement historique des moteurs à Combustion Interne :	19
I.3	Classifications des moteurs (4):	20
I.4	Cycles de fonctionnement du moteur :	22
I.5	L'architecture d'un moteur à combustion interne :	25
I.5.1	Pièces fixes :	27
I.5.2	Pièces mobiles :	29
I.6	Conclusion :	31
II.	Chapitre II Pollutions	32
II.1	Introduction :.....	33
II.2	La pollution de l'air :	34
II.3	Effets de la pollution des véhicules sur la santé humaine :	35
II.4	Carburants :	35
II.4.1	Essence :	36
II.4.2	Diesel :	37
II.4.3	Gaz pétrole liquéfié :	37
II.5	Formation et contrôle des polluants :	38
II.5.1	LES OXYDES D'AZOTE :	38
II.5.2	Monoxyde de carbone (CO) :	41
II.5.3	Émissions d'hydrocarbures imbrûlés :	42
II.5.4	Oxydes de soufre :	43
II.5.5	Suie :	44
II.6	Traitement des gaz d'échappement :	45
II.6.1	EGR :	46
II.6.2	Convertisseur catalytique :	47
II.6.3	Les normes Euro :	48
II.7	Conclusion :	50
III.	Chapitre III Simulation de la pollution dans moteur essence	52
III.1	Introduction :.....	53
III.2	Modélisation de la combustion	53
III.2.1	Équations de bilan pour un écoulement réactif laminaire :	53
III.3	Modélisation de l'écoulement réactif turbulent :	56

III.4	Modèle de combustion :	63
III.5	Modèle EDM pour la combustion turbulente	63
III.6	Propriétés du carburant (n-heptane) :	64
III.7	Propriétés du comburant (air) :	65
III.8	Les conditions initiales et aux limites :	65
III.8.1	Les conditions Initiales :	65
III.8.2	Les conditions aux limites :	66
III.9	Simulation numérique :	66
III.9.1	Création de la géométrie :	66
III.9.2	Le maillage de chambre :	66
III.10	Résultat et interprétation :	68
III.10.1	L'évolution de température:	68
IV.	Chapitre IV Les capteurs	73
IV.1	Introduction :	74
IV.2	Généralités sur la carte ARDUINO :	74
IV.2.1	Définition de la carte ARDUINO et son programme de fonctionnement :	74
IV.2.2	Composants de la carte ARDUINO :	75
IV.3	Les différents types cartes ARDUINO :	75
IV.4	Les capteurs :	76
IV.4.1	Définition générale d'un capteur :	76
IV.4.2	Définition d'un capteur de voiture :	77
IV.5	Défèrent types des capteurs :	77
IV.5.1	Capteur de niveau d'huile moteur :	77
IV.5.2	Capteur de pression d'huile moteur :	78
IV.5.3	Capteurs de température du liquide de refroidissement :	78
IV.5.4	Capteur de débit d'air massique :	79
IV.5.5	Capteur de température d'air d'admission :	79
IV.5.6	Capteurs de cliquetis :	80
IV.5.7	Capteurs de position de vilebrequin/arbre à cames :	80
IV.5.8	Capteur de position du papillon :	81
IV.5.9	Capteur de pression de carburant :	81
IV.5.10	Capteur No _x :	82
IV.5.11	Capteur de température d'échappement :	82
IV.6	Partie pratique :	83
IV.6.1	Capteur de gaz(MQ2) :	83

IV.6.2	Capteur température LM35 DZ :.....	88
IV.6.3	Capteur thermocouple type k :.....	91
IV.6.4	Capteur d'oxygène :.....	94
IV.7	Conclusion :.....	96
V.	Références.....	98

Liste des figures

Figure I-1: Configurations de moteurs multicylindres	21	
Figure I-2: Différentes approches d'injection de carburant pour les moteurs à essence à allumage commandé.	22	
Figure I-3: e cycle de fonctionnement à quatre temps.....	23	
Figure I-4: Le cycle de fonctionnement à deux temps. Un moteur à balayage de carter est illustré. ...	24	
Figure I-5: Les composants du moteur. (8)	26	
Figure II-1: La pollution de l'air. (11)	35	
Figure II-2: molécule d'oxyde d'azote	Figure II-3: molécule de dioxyde d'azote (14)	41
Figure II-4: molécule de monoxyde de carbone. (14)	42	
Figure II-5: Crevasses et autres sources d'émissions de HC du moteur.	43	
Figure II-6: les particules suies. (18), (19)	45	
Figure II-7: comparaison les émissions des gaz polluants entre l'essence et diesel. (20)	45	
Figure II-8: Schéma de fonctionnement de la vanne EGR. (22)	46	
Figure II-9: Processus d'oxydation et de réduction dans le convertisseur catalytique. (21)	48	
Figure II-10: Schéma général d'un pot catalytique. (23).....	48	
Figure II-11: normes Euro pour véhicules lourds. (25).....	49	
Figure II-12: les normes Euro pour voiture diesel et essence respectivement. (26).....	50	
Figure III-1: Géométrie du moteur.	66	
Figure III-2: maillage de la géométrie PMH.	67	
Figure III-3: maillage de la géométrie PMB.....	67	
Figure III-4: Contour de température pour un cycle de tour de vilebrequin.	70	
Figure III-5: Variation de température en fonction du degré vilebrequin.	71	
Figure III-6: la variation de la fraction massique en fonction de vilebrequin.....	71	
Figure IV-1: une image détaillée de la carte ARDUINO UNO (31).	75	
Figure IV-2: Une carte ARDUINO MEGA 2560.	76	
Figure IV-3: Fonctionnement du capteur. (29)	76	
Figure IV-4: Capteur de niveau d'huile moteur.	77	
Figure IV-5: Capteur de pression d'huile moteur.....	78	
Figure IV-6: Capteurs de température du liquide de refroidissement.....	78	
Figure IV-7: Capteur de débit d'air massique (33).	79	
Figure IV-8: Capteur de température d'air d'admission.	79	
Figure IV-9: capteur de cliquetis. (34).	80	
Figure IV-10: capteur vilebrequin (35).	Figure IV-11 : capteur arbre à cames (36).	80
Figure IV-12: Capteur de position du papillon (37).....	81	
Figure IV-13: Capteur de pression de carburant.....	82	
Figure IV-14: Capteur Nox.	82	
Figure IV-15: Capteur de température d'échappement. (38).	83	
Figure IV-16: Capteur MQ2	84	
Figure IV-17: test de MQ-2 sur ARDUINO.....	85	
Figure IV-18: caractéristique de sensibilité du MQ-2 pour plusieurs gaz. (40).	87	
Figure IV-19: test de LM35 sur ARDUINO.	90	
Figure IV-20: Architecture d'un thermocouple. (42)	91	
Figure IV-21: Amplificateur MAX6675. (42).....	92	
Figure IV-22: Thermo-emf par rapport à la température pour le thermocouple de type K. (43)	93	

Figure IV-23: la sonde lambda et sa composante.....	94
Figure IV-24: Courbe de calibration de sonde lambda (44)	95

Liste des tables

Tableau I-1: Les pièces du moteur.....	27
Tableau II-1: Différentes approches d'injection de carburant pour les moteurs à essence à allumage commandé.	34
Tableau III-1: Propriétés du carburant (n-heptane).....	65
Tableau III-2: Propriétés du comburant (air).	65
Tableau IV-1: Les principales caractéristiques des capteurs LM35.....	88

Nomenclature

Lettres latines

u	Vecteur de vitesse, (m/s)
x	Composantes de direction axiale, (m)
Y_k	La fraction massique de l'espèce k .
D_k	Coefficient de diffusion de l'espèce k .
\dot{w}_k	Le taux de production de l'espèce chimique k .
f_k	Force massique, (N).
P	Pression thermodynamique, (Pa).
h_s	L'enthalpie sensible, (J/Kg).
W_T	Le dégagement chaleur dû à la réaction chimique, (J/kg).
Q	Source de chaleur radiative, (J/m^3s).
T	Température, (K).
$V_{k,i}$	La vitesse de diffusion de l'espèce k dans la direction i , (m/s).
C_p	La chaleur spécifique, (J/kgK).
Re	Nombre de Reynolds.
v	La vitesse de convection globale de l'écoulement, (m/s)

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{\mu}$	Constante de modèle k- ε .
G_k	La production d'énergie cinétique turbulente. (m^2/s^2)
G_b	La génération de l'énergie cinétique de la turbulence due à gravitation. (m^2/s^2)
Y_m	La contribution de la dilatation fluctuante.
R_{stoe}	Le rapport stœchiométrique.
\dot{m}_a	Le débit d'air de combustion, (kg/s)
\dot{m}_c	Le débit de carburant, (kg/s)
\dot{m}_{a1}	La quantité d'air strictement nécessaire à la combustion stœchiométrique d'un kg de combustible, (Kg)
L_f	La longueur de la chambre, (m).
D	Diamètre de la chambre, (m).
i, j	Axes de directions.
t	Temps, (s)

Lettre grecques

ρ	La masse volumique du mélange fluide, (kg/m^3)
Ψ_G	Le tenseur des pressions, (Pa)
$\delta_{i,j}$	Le tenseur de Kronecker.
σ	Tenseur des contraintes visqueuses, (N/m^2)
λ	Conductivité thermique, ($W/m K$)
τ	Contrainte de cisaillement.
μ	La viscosité dynamique, ($kg/m s$)
μ_t	La viscosité turbulente, ($kg/m s$)
k	L'énergie cinétique de turbulence
ε	Le taux de dissipation
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Constante de modèle k- ε .

Abréviations

<i>RANS</i>	Reynolds average Navier –Stokes
<i>CFD</i>	Computational fluid Dynamics
<i>EDM</i>	Eddy dissipation model

NO_x	Oxyde d'azote
CO	Monoxyde de carbone
TWC	Three way catalyst
Rh	Rhodium
Pd	Palladium
Pt	Platinum
TiO₂	Dioxyde de Titane
CoO	Oxyde de Cobalt
CeO₂	Oxyde de cérium
ZrO₂	Dioxyde de zirconium
ECM	Engine control module
emf	Electromotive force

Introduction générale

Depuis l'invention et la démocratisation du moteur à combustion, la société a largement utilisé les moteurs thermiques comme machine pour produire de la puissance mécanique. L'utilisation d'un carburant avec des moteurs à combustion interne à faciliter l'émergence de sources de puissance mobile pour des applications nécessitant de grandes puissances spécifiques et de hautes énergies spécifiques. Encore aujourd'hui, les moteurs à combustion interne constituent la principale source de puissance mécanique pour les applications mobiles telles que l'automobile, les avions, les bateaux et les trains. Bien que les systèmes électriques soient en forte croissance, leurs densités de puissance et leurs énergies spécifiques ne leur permettent pas de rivaliser avec les moteurs thermiques pour plusieurs applications.

Dans la majeure partie des cas, les systèmes industriels, impliquant des phénomènes de combustion, sont basés sur la combustion d'un carburant qui est stocké sous forme liquide puis injecté soit dans une chambre de pré vaporisation, soit directement dans la chambre de combustion. Le combustible liquide est alors dispersé sous la forme d'un nuage de gouttelettes (spray) tout en s'évaporant et ainsi favoriser la combustion. L'objectif des chercheurs est de comprendre, de prédire et de contrôler l'ensemble de ces phénomènes. Pour cela, deux voies principales sont explorées :

- La mesure expérimentale
- La modélisation numérique (simulations numériques)

Toutes les voitures neuves doivent respecter les niveaux d'émissions de polluants spécifiés dans les normes européennes. De plus, les voitures neuves qui émettent le plus de dioxyde de carbone sont taxées au moment de l'immatriculation. Ces mesures législatives ont contraint les constructeurs automobiles à développer des moteurs moins polluants et des systèmes de post-traitement de plus en plus complexes. Dans le cadre de la réduction des émissions polluantes à la source, tous les types de moteurs ont été étudiés : moteurs à combustion interne, moteurs hybrides ou électriques, et piles à combustible. Aujourd'hui, les moteurs à combustion interne restent le premier choix des constructeurs automobiles pour les rendre performant avec le moins possible de pollution. Les efforts des émissions polluantes s'orientent actuellement dans trois directions principales :

- Amélioration de la combustion proprement dite par la conception de nouveaux moteurs plus performants, en utilisant les méthodes CFD combinées à des essais expérimentaux et des modèles de cinétique chimique
- Amélioration des techniques de post-traitement des gaz émis à la sortie du moteur.
- Utilisation des carburants alternatifs comme les moteurs à gaz naturel.

Chapitre I Généralités sur les Moteurs à Combustion Interne

I.1 Introduction :

Le moteur à combustion interne est un moteur thermique qui convertit l'énergie de la réaction chimique d'un carburant en énergie mécanique, mise généralement à disposition sur un arbre de sortie. L'énergie chimique du carburant est d'abord convertie en énergie thermique par combustion ou oxydation avec l'air à l'intérieur du moteur. Cette énergie thermique augmente la température et la pression des gaz à l'intérieur du moteur produisant une détente à l'intérieur du cylindre. Cette expansion du gaz produit une force sur le piston l'entraînant dans un mouvement rectiligne qui est traduit en un mouvement rotatif de l'arbre du moteur (le vilebrequin) à l'aide d'un système bielle-manivelle. Le vilebrequin à son tour, est lié à une transmission ou groupe motopropulseur pour transmettre l'énergie mécanique de rotation à un arbre d'entraînement souhaité. Il s'agit souvent de la propulsion d'un véhicule d'une locomotive, d'un navire ou d'un avion. D'autres applications incluent l'entraînement des générateurs ou des pompes, et d'autres petites machines tel que les scies à chaînes et tondeuses à gazon.

La plupart des moteurs à combustion interne sont des moteurs dotés de pistons qui font des mouvements alternatifs dans les cylindres à l'intérieur du moteur. Les moteurs à piston peuvent avoir un ou plusieurs cylindres, jusqu'à 20 ou plus. Les cylindres peuvent être disposés dans différentes configurations géométriques. La gamme des tailles des moteurs varie de petit modèle de moteur d'avion d'une puissance de l'ordre de 100 watts aux grands moteurs stationnaires multicylindres qui produisent des milliers de kilowatts par cylindre.

Le nombre élevé de fabricants de moteurs a permis une diversification de production de moteurs qui diffèrent par la taille, la géométrie, le style et les caractéristiques de fonctionnement.

Les moteurs de production d'énergie sont au service de l'homme depuis plus de deux siècles et demi. Pendant les 150 premières années, de l'eau, transformée en vapeur, s'interposait entre les gaz de combustion produits par la combustion du carburant et l'expandeur à piston-cylindre qui produit le travail. L'histoire enregistre des exemples antérieurs de prototypes de moteurs thermiques bruts entraînés par vapeur datant des années 1600, qui ne sont jamais devenus des véhicules d'exploitation pratiques. La technologie, les routes, les matériaux et les carburants n'étaient pas encore suffisamment développés. Le développement majeur de la machine à vapeur moderne et, par conséquent, la locomotive de chemin de fer s'est produit dans la deuxième moitié des années 1700 et au début des années 1800. Dans les années 1820 et 1830, les chemins de fer étaient présents dans plusieurs pays du monde. (1)

I.2 Développement historique des moteurs à Combustion Interne :

Les moteurs de production d'énergie sont au service de l'homme depuis plus de deux siècles et demi. Pendant les 150 premières années, la combustion du charbon permettait de produire de la vapeur d'eau, qui servait à entraîner un piston produisant ainsi du travail. Ce n'est que dans les années 1860 que le moteur à combustion interne est devenu une réalité pratique. Les premiers moteurs développés pour un usage commercial brûlaient des mélanges charbon-gaz-air à la pression atmosphérique - il n'y avait pas de compression avant la combustion. J. J. E. Lenoir (1822-1900) a développé le premier moteur commercialisable de ce type. Le gaz et l'air étaient aspirés dans le cylindre pendant la première moitié de la course du piston. La charge était ensuite allumée par une étincelle, la pression augmentait et les gaz brûlés fournissaient alors de la puissance au piston pour la seconde moitié de la course. Le cycle se terminait par une course d'échappement. Environ 5000 de ces moteurs ont été construits entre 1860 et 1865 à des puissances allant jusqu'à six chevaux. Le rendement était au mieux d'environ 5 %.

Un développement plus réussi d'un moteur atmosphérique a été introduit en 1867 par Nicolas A. Otto (1832-1891) et Eugen Langen (1833-1895). On utilisait l'augmentation de pression résultant de la combustion de la charge air-carburant au début de la course extérieure pour accélérer un ensemble piston-crémaillère libre de sorte que son élan génère un vide dans le cylindre. La pression atmosphérique pousse alors le piston vers l'intérieur. La crémaillère étant engagée par un embrayage à rouleaux sur l'arbre de sortie. Les moteurs de série, dont environ 5000 ont été construits, ont obtenu des rendements thermiques allant jusqu'à 11%. Une soupape à tiroir contrôlait l'admission, l'allumage par une flamme de gaz et l'échappement. Les inconvénients de ce moteur, à savoir un faible rendement thermique et une taille et poids excessifs. Otto a proposé un cycle moteur avec quatre courses de piston : une admission, puis une compression avant l'allumage, une expansion ou course motrice où le travail est fourni au vilebrequin, et finalement, une course d'échappement. Il a également proposé d'incorporer un système d'induction à charge stratifiée. Bien que cela n'ait pas été réalisé dans la pratique. Son prototype à quatre temps a fonctionné pour la première fois en 1876.

En 1884, on découvre un brevet français non publié, délivré en 1862 à Alphonse Beau de Rochas (1815-1893), qui décrit les principes du cycle à quatre temps. Beau de Rochas a également décrit les conditions dans lesquelles les performances et le rendement maximum d'un moteur à combustion interne pouvaient être atteints.

C'étaient :

1. Le plus grand volume de cylindre possible avec une surface limite minimale.
2. La plus grande vitesse de travail possible.
3. Le plus grand taux d'expansion possible.
4. La plus grande pression possible au début de l'expansion.

D'autres développements ont suivi rapidement lorsque l'impact de ce qu'Otto avait réalisé est devenu évident. Dans les années 1880, plusieurs ingénieurs (par exemple, Dugald Clerk, 1854-1913, James Robson, 1833-1913, en Angleterre, et Karl Benz, 1844-1929, en Allemagne) avaient réussi à mettre au point des moteurs à combustion interne à deux temps où les processus d'échappement et d'admission se produisent à la fin de la course motrice et au début de la course de compression.

En 1892, l'ingénieur allemand Rudolf Diesel (1858-1913) décrit dans son brevet une nouvelle forme de moteur à combustion interne. Son concept consistait à initier la combustion en pulvérisant un combustible liquide dans l'air à haute température produit par la compression dans le cylindre. Cette découverte a permis de doubler le rendement par rapport aux autres moteurs à combustion interne disponibles. Des taux de compression et d'expansion beaucoup plus élevés, sans détonation ni cognement, étaient désormais possibles. (2)

Il y a toujours eu un intérêt pour les géométries de moteur qui sont différentes de l'agencement standard piston-cylindre, bielle et vilebrequin. En particulier, les moteurs à combustion interne rotatifs ont suscité un intérêt. Bien qu'une grande variété de moteurs rotatifs expérimentaux ait été proposée au fil des ans, le premier moteur rotatif à combustion interne, le Wankel, n'a été testé avec succès qu'en 1957. Ce moteur, qui a évolué au cours de nombreuses années de recherche et de développement, était basé sur les conceptions de l'inventeur allemand Felix Wankel. Ses avantages en termes de compacité et d'un fonctionnement plus souple n'ont pas été suffisants pour surmonter son coût de fabrication élevé. (3)

I.3 Classifications des moteurs (4):

Il existe différents types de moteurs à combustion interne. Ils peuvent être classés comme suit :

Configuration de base du moteur :

- a- Moteurs alternatifs (à leur tour subdivisés par la disposition des cylindres : par exemple, en ligne, en V, radial, opposés),
- b- moteurs rotatifs (Wankel et autres géométries).

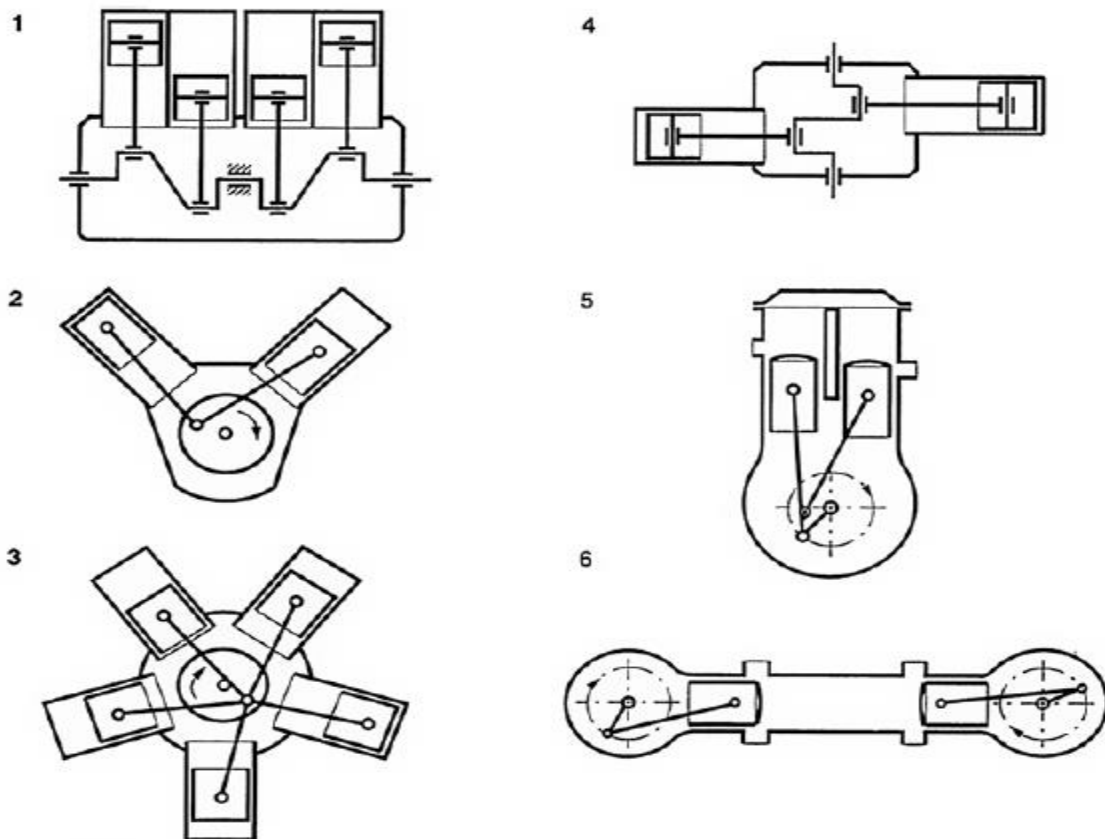


Figure I-1: Configurations de moteurs multicylindres

(1) Moteur en ligne ; (2) Moteur en V ; (3) Moteur à disposition radiale ; (4) Moteur à cylindres opposés ; (5) Moteur en U ; (6) Moteur à pistons opposés. (5)

1. Méthode de préparation du mélange : Carburation ou injection monopoint en amont de l'accélérateur, injection de carburant dans les orifices d'admission, injection de carburant directement dans le cylindre du moteur.

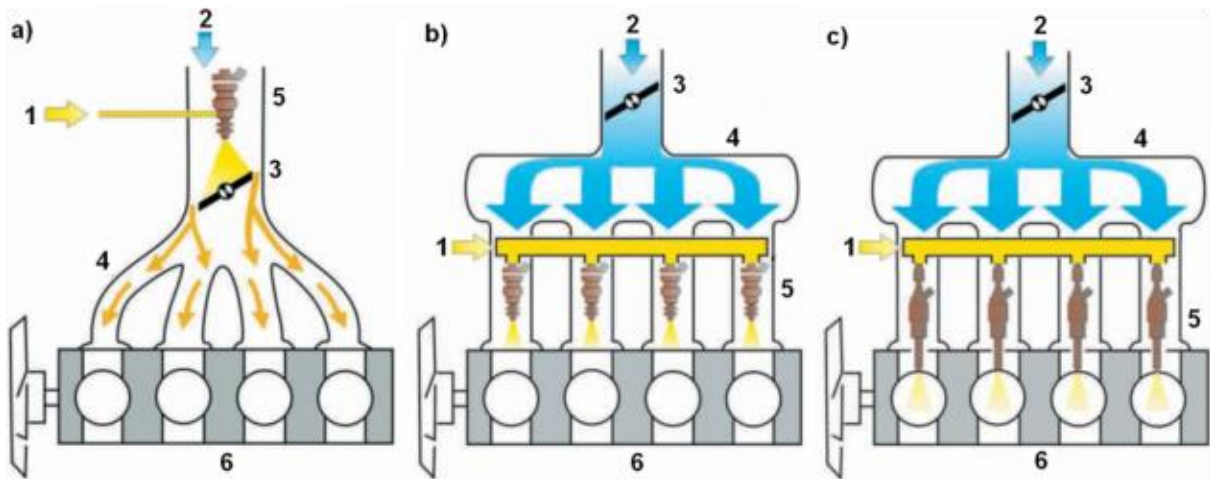


Figure I-2: Différentes approches d'injection de carburant pour les moteurs à essence à allumage commandé.

(a) Injection à un seul point ; (b) Injection à orifices multiples ; (c) Injection directe dans le cylindre. (1) Alimentation en carburant ; (2) Alimentation en air ; (3) Clapet d'étranglement ; (4) Collecteur d'admission ; (5) Injecteurs ; (6) Moteur. (6)

2. Carburant : Essence, fioul (ou carburant diesel), gaz naturel, gaz de pétrole liquéfié (GPL), alcools (méthanol, éthanol), hydrogène, biocarburant.
3. Conception et emplacement des soupapes ou des orifices. Cycle à quatre temps : Soupapes en tête, soupapes en dessous, avec deux, trois ou quatre soupapes par cylindre, et contrôle fixe ou variable des soupapes (calage, points d'ouverture et de fermeture, et levée).
4. Applications : Automobile, camion, bus, locomotive, avion léger, navire, entraînement de pompes, de génératrice d'électricité.

Toutes ces distinctions sont importantes et illustrent l'étendue des conceptions de moteurs disponibles. Certaines caractéristiques des moteurs sont utilisées comme sous-catégories de cette classification de base. Le cycle de fonctionnement du moteur - à quatre temps ou à deux temps. Les principes de ces deux cycles sont décrits dans la section suivante.

I.4 Cycles de fonctionnement du moteur :

Dans la plupart des moteurs alternatifs, un piston coulisse en un mouvement rectiligne alternatif à l'intérieur d'un cylindre. Ce mouvement est transformé en rotation par l'intermédiaire d'une

bielle reliant le piston au vilebrequin. La puissance des gaz brûlés à haute pression et température est transmise à l'arbre d'entraînement à l'aide du système bielle-manivelle.

La majorité des moteurs alternatifs fonctionnent selon ce que l'on appelle le cycle à quatre temps. Chaque cylindre nécessite quatre courses de son piston - deux révolutions du vilebrequin - pour compléter la séquence d'événements qui produit un cycle moteur. Les moteurs SI et CI utilisent tous deux ce cycle Figure I-3 :

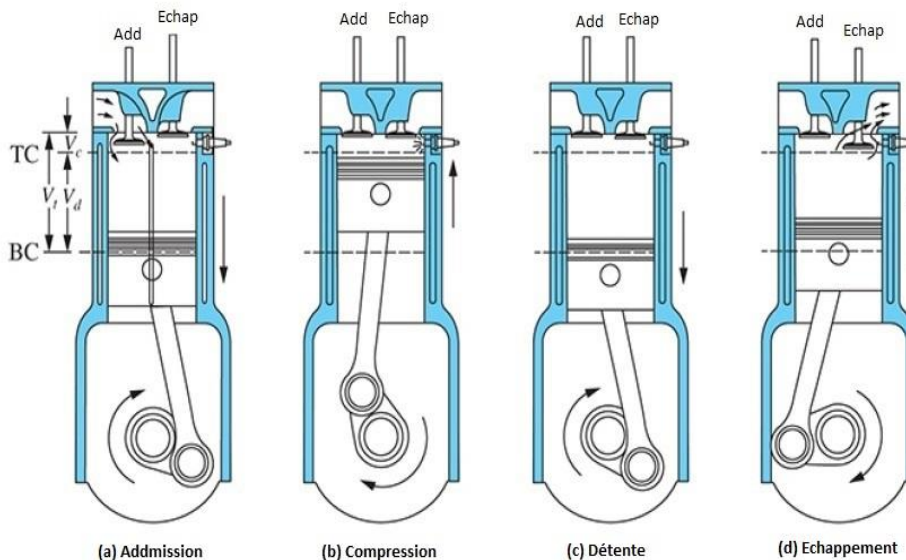


Figure I-3: e cycle de fonctionnement à quatre temps.

1. Une course d'admission, qui commence par le piston au PMH et se termine par le piston en PMB, c'est la phase d'aspiration de l'air frais ou un mélange air-carburant dans le cylindre. Pour augmenter la masse induite, la soupape d'admission s'ouvre brièvement avant le début de la course et se termine après sa fin.
2. Une course de compression, qui commence avec le piston au PMB et se termine en PMH, ainsi le mélange à l'intérieur du cylindre est comprimé à une petite fraction de son volume initial. Vers la fin de la course de compression, la combustion est initiée et la pression à l'intérieur du cylindre augmente rapidement.
3. Une course motrice, ou course de détente, qui commence avec le piston au PMH : les gaz à haute température et haute pression se détendent et poussent le piston vers le bas.

Lorsque le piston s'approche du PMB, la soupape d'échappement s'ouvre pour commencer le processus d'échappement des gaz.

4. Une course d'échappement : les gaz brûlés restants sortent du cylindre d'abord, parce que la pression du cylindre peut être nettement supérieure à la pression d'échappement ; ensuite, parce que ces gaz sont balayés par le piston lorsqu'il se déplace vers le PMH. Lorsque le piston s'approche du PMH la soupape d'échappement se ferme et juste après le PMH, la soupape d'admission s'ouvre. Ainsi se termine un cycle qui reproduit plusieurs fois.
5. Le cycle à quatre temps nécessite, pour chaque cylindre du moteur, deux tours de vilebrequin pour chaque course motrice. Pour obtenir une puissance plus élevée pour une taille de moteur donnée et une conception de soupape plus simple, le cycle à deux temps a été développé. Le cycle à deux temps est applicable aux moteurs SI et CI. La figure ci-dessous montre l'un des types les plus simples de conception de moteur à deux temps. Le mouvement du piston dans le cylindre permet de rendre des orifices placés dans la chemise du cylindre en état d'ouverture ou de fermeture ce qui contrôlent l'admission du flux de charge fraîche dans le cylindre et le flux d'échappement hors du cylindre. Les deux temps sont :

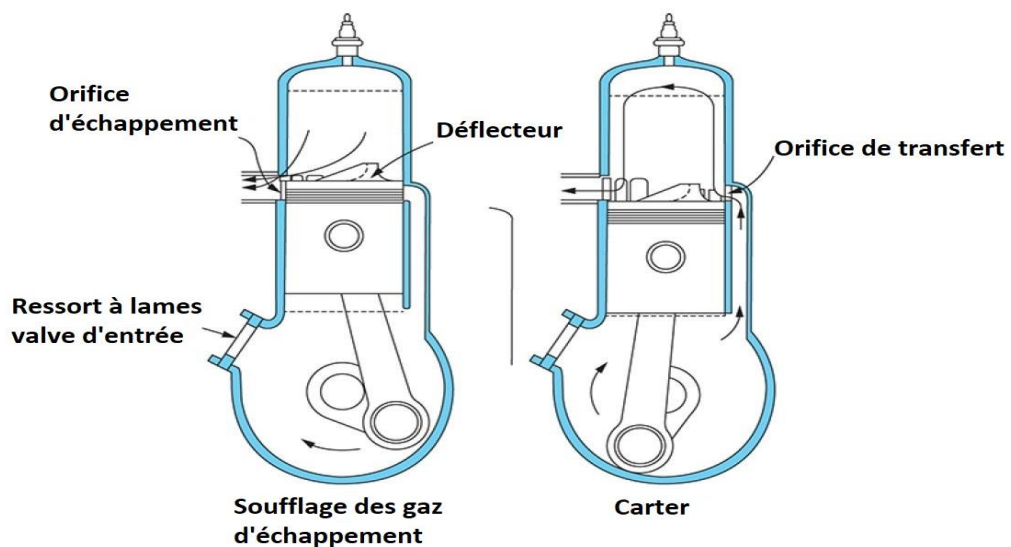


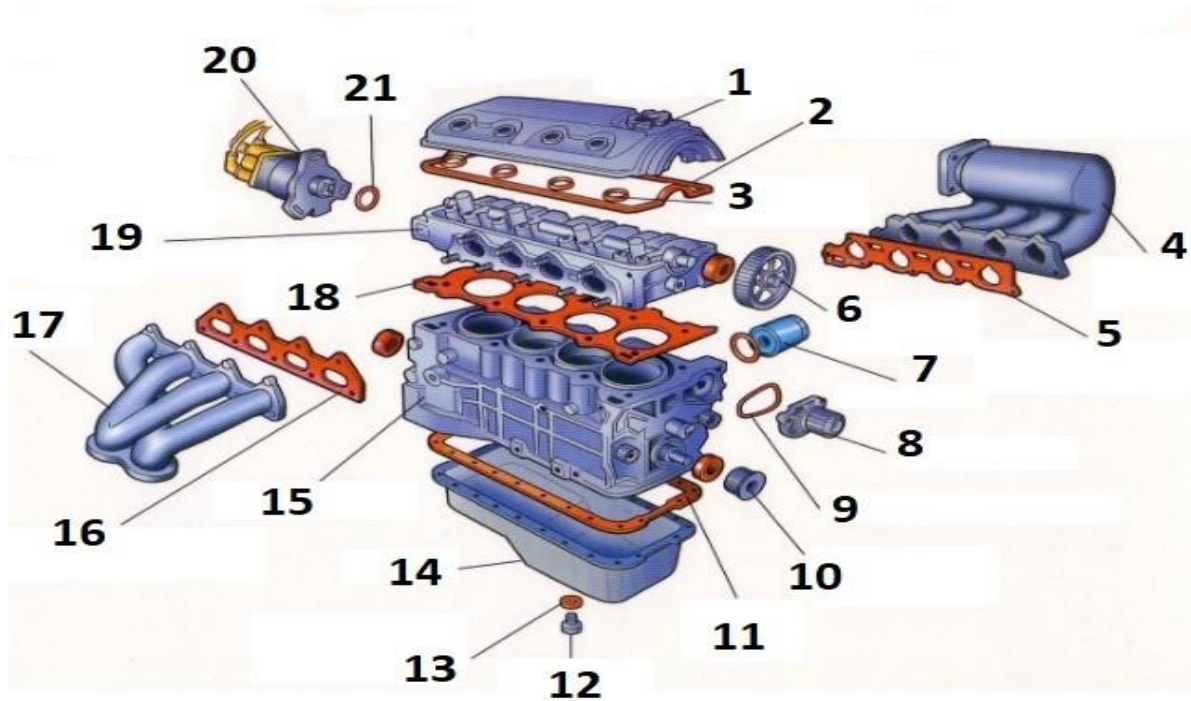
Figure I-4: Le cycle de fonctionnement à deux temps. Un moteur à balayage de carter est illustré.

1. Une course de compression, qui commence par la fermeture de l'orifice de transfert de charge fraîche et de l'orifice d'échappement, et qui comprime le contenu du cylindre au fur et à mesure que le piston monte dans le cylindre, et tire également une charge fraîche dans le carter par la valve d'entrée (soupape d'admission). Lorsque le piston s'approche du PMH, la combustion est initiée.
2. Une course d'expansion, similaire à celle du cycle à quatre temps, jusqu'à ce que le piston atteigne le PMB, où les orifices d'échappement et de transfert sont découverts. Les gaz brûlés sortent du cylindre dans un processus de purge à l'échappement, tandis que la charge fraîche qui a été comprimée dans le carter s'écoule dans le cylindre à travers l'orifice de transfert. Le piston et les orifices sont généralement conçus pour dévier la charge entrante et l'empêcher de s'écouler directement dans l'orifice d'échappement et pour obtenir un balayage efficace des gaz brûlés résiduels dans le cylindre par cette charge fraîche.

Chaque cycle du moteur avec une course motrice est accompli en un tour de vilebrequin. Cependant, il est difficile de remplir complètement le volume déplacé avec une charge fraîche, et une partie du mélange frais s'écoule directement hors du cylindre pendant le processus de balayage. (7)

I.5 L'architecture d'un moteur à combustion interne :

Les moteurs de voiture sont des mécanismes complexes composés de plusieurs pièces internes qui fonctionnent en harmonie pour créer la puissance permettant le déplacement du véhicule. Toutes les pièces doivent être en bon état pour que le moteur fonctionne correctement. La figure ci-dessous illustre la conception du moteur.



Moteur (vue détaillée)

Figure I-5: Les composants du moteur. (8)

(1) couvre-culasse	(2) joint de couvre culasse	(3) œillets en caoutchouc
(4) collecteur d'admission	(5) joint de collecteur d'admission	(6) poulie d'arbre à cames
(7) filtre à l'huile	(8) pompe à eau	(9) joint de pompe à eau
(10) poulie motrice de courroie de distribution	(11) joint de carter d'huile	(12) boulon de vidange du carter d'huile
(13) rondelle d'écrasement de boulon de vidange	(14) carter d'huile	(15) bloc moteur
(16) joint de collecteur d'échappement	(17) collecteur d'échappement	(18) joint de culasse

(19) la culasse	(20) distributeur	(21) joint torique de distributeur
-----------------	-------------------	------------------------------------

Tableau I-1: Les pièces du moteur.

I.5.1 Pièces fixes :

I.5.1.1 Bloc moteur :

Le bloc moteur est la partie principale d'un moteur. Souvent en aluminium ou en fer, il comporte les alésages pour contenir les cylindres et plusieurs orifices pour fournir des voies d'écoulement d'eau et d'huile afin de refroidir et lubrifier le moteur. Les chemins d'huile sont plus étroits que les chemins d'écoulement d'eau. Le bloc moteur abrite également les pistons, le vilebrequin et l'arbre à cames. Toutes les autres pièces du moteur y sont essentiellement boulonnées.

I.5.1.2 Culasse :

La culasse est fixée au sommet du bloc pour sceller avec le joint de culasse la zone supérieure du bloc. Elle comporte de nombreux éléments : la chambre de combustion, l'arbre à cames, les soupapes, les poussoirs, les tiges de poussée des culbuteurs et les passages qui permettent à l'air frais de s'écouler dans les cylindres pendant la course d'admission, ainsi que des passages d'échappement qui éliminent les gaz brûlés pendant la course d'échappement.

I.5.1.3 Chambre de combustion :

La chambre de combustion est l'espace ménagé dans la culasse et qui est formé aussi par une partie du cylindre. Son volume varie d'un moteur à l'autre et détermine le rapport volumétrique. Pour les moteurs alternatifs, la forme de la chambre de combustion dépend de nombreux facteurs et, en premier lieu, du cycle choisi : diesel ou essence, deux ou quatre temps, et de la forme du piston (tête bombée ou creusée). Enfin, la forme de la chambre de combustion doit être conçue en fonction du rapport volumétrique choisi et tenir compte de la surface offerte par rapport au volume, afin d'acquérir un rendement thermodynamique élevé et un bon refroidissement.

I.5.1.4 Carter d'huile :

Le carter d'huile est fixé au bas du moteur. Il comporte toute l'huile utilisée pour la lubrification du moteur.

I.5.1.5 Collecteur d'admission :

Le collecteur d'admission est un ensemble de conduites qui permet l'entrée de l'air (ou la charge) aux cylindres à travers les soupapes d'admission. Dans un moteur diesel, le collecteur d'admission est utilisé pour fournir de l'air au moteur, tandis que dans le moteur à essence, il est utilisé pour fournir un mélange air-carburant au moteur.

I.5.1.6 Collecteur d'échappement :

Le collecteur d'échappement est généralement de simples unités en fonte ou en acier inoxydable qui collectent les gaz d'échappement de plusieurs cylindres d'un moteur et les acheminent vers le tuyau d'échappement. Sa construction est la même que celle du collecteur d'admission. Le collecteur d'échappement a la même fonction dans les moteurs à essence et diesel, dans les deux cas, il évacue les gaz d'échappement.

I.5.1.7 Bougie d'allumage :

La bougie d'allumage est un dispositif électrique, présent sur les moteurs à allumage commandé, qui provoque l'inflammation du mélange gazeux dans la chambre de combustion. Pour cela, elle doit pouvoir générer des milliers d'arcs électriques par minute tout en résistant à la chaleur et aux pressions engendrées par les explosions à l'intérieur du cylindre. La partie supérieure de la bougie est munie d'un embout de connexion permettant de la relier à la sortie haute tension du système d'allumage. Cet embout métallique (généralement en cuivre) assure la conduction électrique à l'électrode centrale en acier qui passe à travers l'isolateur. L'autre électrode est soudée au corps métallique, qui est fileté dans la culasse.

I.5.1.8 Joint de culasse :

Le joint de culasse est un joint mince malléable compris entre le bloc moteur et la culasse. Il doit assurer l'étanchéité de toutes les chambres de combustion ainsi que la continuité du circuit

d'eau de refroidissement et de lubrification et empêche également le liquide de refroidissement et l'huile de se mélanger. Il doit donc résister à des contraintes thermiques, mécaniques et chimiques très importantes.

I.5.2 Pièces mobiles :

I.5.2.1 Piston :

Le piston est une pièce cylindrique avec une surface plane sur le dessus. Le rôle du piston est de transférer l'énergie générée par la combustion vers le vilebrequin pour propulser le véhicule. Le piston effectue un mouvement alternatif rectiligne à l'intérieur du cylindre. Le piston est doté sur son pourtour de segments insérés entre ce dernier et la chemise du cylindre, ils ont des fonctions spécifiques qu'on va détailler par la suite.

I.5.2.2 Vilebrequin :

Le vilebrequin est situé au bas du bloc moteur, maintenu par les tourillons dans des paliers à roulements ou à coussinets. Entre ces paliers se trouvent des manivelles équipées de manetons excentrés sur lesquels sont montées les bielles. Le système bielle-manivelle permet de transformer le mouvement de translation alternatif des pistons en un mouvement rotatif du vilebrequin. Il entraîne l'arbre à cames et d'autres auxiliaires.

I.5.2.3 Arbre à cames :

L'arbre à cames peut varier d'un véhicule à l'autre et se trouve soit dans le bloc moteur, soit dans la culasse. De nombreux véhicules modernes ont les arbres à cames dans les culasses, également connus sous le nom d'arbre à cames en tête double (DOHC) ou d'arbre à cames en tête simple (SOHC), et sont portés par une série de roulements lubrifiés à l'huile pour augmenter leur durée de vie. La fonction de l'arbre à cames est de réguler l'ouverture et la fermeture des soupapes à un moment bien précis.

I.5.2.4 Courroie / chaîne de distribution :

La courroie de distribution a un rôle primordial dans le fonctionnement du moteur. La rotation de l'arbre à cames est assurée par le vilebrequin à l'aide de la courroie ou la chaîne de distribution, qui synchronise ces 2 éléments. Les courroies sont habituellement en caoutchouc robuste et souple, tendues avec des galets tendeurs et très résistantes à la chaleur.

I.5.2.5 Segments de piston :

Les segments sont des anneaux métalliques fabriqués en acier élastique, prévus pour s'emboîter dans les gorges du piston. Ils permettent l'étanchéité du cylindre et contribuent également à la réfrigération de la tête de piston en assurant le transfert de chaleur vers la chemise réfrigérée. Ce sont des parties importantes du piston.

Il existe principalement trois types de segments de piston :

- Le premier est l'anneau de flamme. Ce segment de piston est conçu pour supporter des températures extrêmes. Il assure l'étanchéité pour les gaz brûlés et réduit la température du piston.
- Le segment d'étanchéité il assure le complément d'étanchéité des gaz de fuite passés à travers le segment de feu
- Le troisième est l'anneau de lubrification qui est généralement constitué de trois éléments : deux rails très minces, en haut et en bas d'un expandeur élastique perforé. Il bloque les remontées d'huile vers la chambre de combustion pour éviter qu'elle soit brûlée.

I.5.2.6 Bielle :

C'est une pièce en acier forgé qui relie le piston au vilebrequin et qui aide à la conversion du mouvement de translation du piston en un mouvement rotatif du vilebrequin. La bielle a deux extrémités : La petite extrémité est reliée à la tête de piston à l'aide d'un axe de piston et la grande extrémité est reliée au vilebrequin à l'aide d'un maneton. Les moteurs de type V ont généralement des cylindres opposés qui sont bien configurés pour permettre aux deux bielles de fonctionner ensemble à chaque course de manivelle.

I.5.2.7 Soupapes d'admission et d'échappement :

Les soupapes d'admission et d'échappement sont utilisées pour contrôler et réguler la charge (ou l'air) à l'admission dans les cylindres et les gaz brûlés sortant du cylindre respectivement. Elles sont placées soit dans les culasses, soit sur les parois du carter, leur fonctionnement est régulé par l'arbre à cames. Les soupapes d'admission sont reliées au collecteur d'admission et

les soupapes d'échappement sont reliées au collecteur d'échappement. Les collecteurs d'admission et d'échappement sont décrits ci-dessus.

I.5.2.8 Cames :

Ceux-ci font partie intégrante des arbres à cames. Les cames sont montées d'une manière décalée sur l'arbre à cames pour contrôler le calage des soupapes d'admission et d'échappement.

I.5.2.9 Volant :

Le couple fourni par le moteur n'est pas uniforme et est de nature fluctuante. Si un véhicule continue de se déplacer avec cette puissance fluctuante. Cela causera un inconfort énorme et diminuera la durée de vie de ses différentes pièces. Par conséquent, pour traiter le problème de la charge fluctuante, un volant d'inertie est généralement monté sur l'arbre moteur. Il stocke le couple lorsque sa valeur est élevée et le libère lorsque sa valeur est faible dans un cycle de fonctionnement. (9)

I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre on a traité de manière générale les moteurs à combustion interne. C'est une présentation qui comporte, les descriptions et les principales caractéristiques de fonctionnement des moteurs, avec une brève liste de leurs composants principaux.

Au cours des dernières décennies, de nouveaux facteurs devenus importants sont intervenus et qui affectent désormais considérablement la conception et le fonctionnement des moteurs. L'un de ces facteurs est la nécessité de contrôler la contribution de l'automobile à la pollution atmosphérique urbaine, c'est ce qu'on va entamer dans le chapitre suivant.

Chapitre II Pollutions

II.1 Introduction :

On appelle pollution une dégradation ou une altération de l'environnement (air, eau, sol), en général liée à l'activité humaine par diffusion directe ou indirecte de substances chimiques, physiques ou biologiques qui sont potentiellement toxiques pour les organismes vivants ou qui perturbent de manière plus ou moins importante le fonctionnement naturel des écosystèmes. Les principales causes de pollution de l'environnement proviennent en premier lieu de la production et de l'utilisation des diverses sources d'énergie, puis des activités industrielles et, de façon paradoxale, mais néanmoins importante, de l'agriculture intensive. La pollution du sol peut être diffuse ou locale, d'origine industrielle, agricole (utilisation excessive d'engrais, de pesticides, etc. qui s'infiltrent dans les sols). La pollution de la ressource en eau se caractérise par la présence de micro-organismes, de substances chimiques ou encore de déchets industriels. Elle peut concerner les cours d'eau, les nappes d'eau, les eaux saumâtres, mais également l'eau de pluie. La pollution de l'air, provoquée par des polluants dits atmosphériques est souvent diffuse et donc plus délicate à réglementer efficacement dans un cadre local ou national que beaucoup d'autres formes de pollutions (de même pour les pollutions marines). Des conventions mondiales visent les polluants destructeurs de la couche d'ozone ou les gaz à effet de serre (tous capables de modifier le fonctionnement planétaire du monde vivant). Les principales causes de la pollution atmosphérique sont les activités humaines (industrie, transports, agriculture, chauffage résidentiel...). Ils sont à l'origine d'émissions de polluants, sous forme de gaz ou de particules, dans l'atmosphère. La pollution de l'air en milieu urbain est générée par l'industrie et les transports dont les principales causes sont la combustion non stœchiométrique, la dissociation de l'azote et les impuretés présentes dans le carburant et l'air. Les émissions préoccupantes sont les hydrocarbures (HC), le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), le soufre, et les particules solides de carbone et le dioxyde de carbone CO_2 .

Le tableau ci-dessous présente les émissions de CO_2 de divers carburants et autres sources d'énergie susceptibles d'être utilisés dans les transports. Les émissions des différents combustibles fossiles énumérés varient d'un facteur deux environ. Les émissions provenant de la production de biocarburants sont généralement plus faibles (et pourraient être nettement plus faibles), en fonction de la matière première de la biomasse, du choix du carburant produit et du processus utilisé pour produire ce carburant.

	gCO ₂ /MJ
Essence	93
Diesel	99
Gaz naturel	74
Gaz pétrole liquéfié (GPL)	86
Ethanol ^α	34-73
Biodiesel	45-73
Hydrogène ^β	100-200
Electricité ^θ	90-160

Tableau II-1: Différentes approches d'injection de carburant pour les moteurs à essence à allumage commandé.

α : varie en fonction de la matière première de la biomasse et du processus utilisé. β : à partir du reformage à la vapeur du gaz naturel (bas de gamme) ou de l'électrolyse (haut de gamme). θ : dépend de la combinaison des sources du système de production d'électricité (en particulier la fraction provenant du charbon). (10)

II.2 La pollution de l'air :

Une source majeure de pollution atmosphérique résulte de la combustion de combustibles fossiles. Les émissions des véhicules et des usines sont des sources courantes de ce type de pollution atmosphérique. La combustion de combustibles fossiles contribue à la formation de smog, une couche dense de particules qui se suspend comme un nuage au-dessus de nombreuses grandes villes et zones industrielles. La pollution de l'air contribue à des problèmes respiratoires tels que l'asthme, le cancer du poumon, la bronchite chronique et d'autres affections pulmonaires. Les oxydes d'azote et de soufre dans l'air contribuent aux pluies acides, qui sont une forme de précipitation avec un pH plus bas (plus acide) que la normale. Les pluies acides

endommagent les forêts, les espèces qui vivent dans les plans d'eau et dégradent les monuments et les bâtiments.



Figure II-1: La pollution de l'air. (11)

II.3 Effets de la pollution des véhicules sur la santé humaine :

Les moteurs diesel émettent des niveaux élevés de particules, c'est-à-dire des particules de suie et de métal en suspension dans l'air. Celles-ci provoquent des irritations et des allergies de la peau et des yeux, et de très fines particules se logent profondément dans les poumons, ou elles causent des problèmes respiratoires.. Le monoxyde de carbone, un autre gaz d'échappement, est particulièrement dangereux pour les nourrissons et les personnes souffrant de maladies cardiaques parce qu'il nuit à la capacité du sang de transporter l'oxygène. Le dioxyde de soufre, le benzène et le formaldéhyde sont d'autres polluants automobiles qui nuisent à la santé humaine. Le bruit des voitures est également nocif, endommageant l'ouïe et causant une mauvaise santé psychologique. (12)

II.4 Carburants :

Le principal carburant des moteurs à allumage commandé est l'essence, qui est un mélange de nombreux composants hydrocarbonés et est fabriquée à partir du pétrole brut. Le pétrole brut est composé presque entièrement de carbone et d'hydrogène avec quelques traces d'autres espèces. Il varie de 83% à 87% de carbone et 11% à 14% d'hydrogène en poids. Le carbone et

l'hydrogène peuvent se combiner de nombreuses façons et former de nombreux composés moléculaires différents.

Le pétrole brut extrait du sol est séparé en produits constitutifs par craquage ou distillation à l'aide de méthodes thermiques ou catalytiques dans une raffinerie de pétrole. Le craquage est le processus qui consiste à briser les grands composants moléculaires en composants plus utiles de poids moléculaire plus faible. La distillation préférentielle est utilisée pour séparer les mélanges en composants uniques ou en gammes plus petites de composants. En général, plus le poids moléculaire d'un composant est élevé, plus sa température d'ébullition est élevée. Les composants à basse température d'ébullition (plus petits poids moléculaires) sont utilisés pour les solvants et les carburants (essence), tandis que les composants à haute température d'ébullition avec leurs grands poids moléculaires sont utilisés pour le goudron et l'asphalte ou renvoyés au processus de raffinage pour un craquage supplémentaire. Le mélange de composants issu du processus de raffinage est utilisé pour de nombreux produits (1), en moyenne, une raffinerie raffine 25 à 45 % du pétrole brut entrant en essence, 25 à 40 % en diesel, en carburateur et en mazout de chauffage, 5 à 20 % en mazout lourd et le reste en autres produits.

II.4.1 Essence :

L'essence est un mélange d'hydrocarbures avec des points d'ébullition allant d'environ de 25 à 200 °C. En termes de fonctionnement du moteur à allumage commandé, les propriétés les plus critiques de l'essence sont sa volatilité et sa résistance à l'auto-inflammation (ou au cognement) pendant la dernière partie du processus de combustion. La volatilité d'une essence est caractérisée par sa courbe de distillation, la fraction volumique évaporée à pression atmosphérique en fonction de la température. Généralement, 10% de l'essence se vaporise en dessous d'environ 50 °C, 50% se vaporise en dessous de 100 °C et 90% en dessous de 170 °C, les essences d'hiver sont plus volatiles que les essences d'été. Le carburant doit contenir suffisamment de composants hautement volatils pour assurer des démarrages à froid rapides et à faibles émissions. L'extrémité inférieure de la température de la courbe de distillation affecte la fraction du carburant injecté dans l'orifice qui se vaporise dans ces conditions. Elle affecte également les émissions d'hydrocarbures par évaporation du système de carburant du véhicule. L'extrémité supérieure de la courbe de distillation est contrôlée pour réduire les émissions d'hydrocarbures et la dilution de l'huile lubrifiante avec le carburant. La résistance au cognement d'un carburant est définie par son indice d'octane. Une essence ordinaire (standard)

typique aurait un indice d'octane de recherche de 92, historiquement, cet indice anti-cliquetis corrélait le comportement de résistance au cognement des carburants dans les moteurs des véhicules sur la route. Les exigences d'anti détonation des moteurs modernes sont mieux corrélées par l'indice d'octane de recherche, qui est l'indice d'octane du carburant utilisé en Europe. Au moins deux essences de qualité sont généralement commercialisées : ordinaire et une ou plusieurs qualités d'octane plus élevées.

II.4.2 Diesel :

Les carburants diesel contiennent de nombreux composés hydrocarbonés individuels dont le point d'ébullition varie entre 180 et 370 °C environ. C'est un produit primaire du processus de distillation du pétrole brut. Pour répondre à la demande croissante de carburant diesel, les raffineries ajoutent des quantités croissantes de produits de conversion par craquage et cokéfaction du pétrole lourd. Le carburant diesel est un mélange de paraffines, de naphtas, d'oléfinés et d'aromatiques ; ceux-ci ont des poids moléculaires plus élevés (et des proportions différentes) que ces types d'hydrocarbures dans les essences. La composition moléculaire moyenne est $(CH_{1,8})_n$, et la taille moléculaire moyenne est $C_{13}H_{24}$. La densité du carburant diesel est importante, car les systèmes d'injection de carburant sont conçus pour délivrer un volume spécifique de carburant, la densité moyenne du diesel dans les principales régions géographiques varie entre 0,81 et 0,86 kg/litre. D'autres propriétés liées à la densité sont la volatilité et la viscosité. Le carburant diesel doit avoir des caractéristiques d'auto-inflammation appropriées, c'est-à-dire qu'il doit s'enflammer spontanément et assez rapidement dans les jets de carburant en développement pour amorcer la combustion au moment voulu du cycle du moteur. Cette caractéristique des carburants diesel est définie par l'indice de cétane, qui compare les caractéristiques d'auto-inflammation d'un carburant diesel à celles de carburants de référence définis. Les indices de cétane typiques se situent entre 40 et 55 ; plus l'indice de cétane est élevé, plus l'auto-inflammation dans le moteur est facile (plus rapide) à peu près au centre supérieur, juste après le début de l'injection. La composition du carburant est ajustée pour obtenir l'indice de cétane approprié ; il peut être amélioré par des additifs améliorant l'allumage des oxydants actifs tels que les nitrates d'alkyle.

II.4.3 Gaz pétrole liquéfié :

Le gaz de pétrole liquéfié, qui se compose d'hydrocarbures en C_3 et C_4 , est produit soit par extraction du gaz naturel lors du processus d'extraction du gaz, soit par raffinage du pétrole

brut. Dans les véhicules, le GPL est stocké sous forme de liquide comprimé à des pressions comprises entre 10 et 15 bars environ. Les composants du GPL ont un indice d'octane ou une résistance au cognement plus élevés que ceux de l'essence. Les émissions de polluants atmosphériques d'un moteur à allumage commandé (avant tout catalyseur dans l'échappement) sont généralement inférieures à celles des moteurs à essence. (7)

II.5 Formation et contrôle des polluants :

Les moteurs à allumage commandé et les moteurs diesel sont des sources importantes de polluants atmosphériques. En général, les concentrations de ces polluants dans les gaz d'échappement des moteurs à combustion interne diffèrent des valeurs calculées en supposant un équilibre chimique. Ainsi, les mécanismes chimiques détaillés par lesquels ces polluants se forment et la cinétique de ces processus sont importants pour déterminer les niveaux d'émission. Pour certaines espèces polluantes, par exemple le monoxyde de carbone, les composés organiques et les particules, les réactions de formation et de destruction sont intimement liées au processus de combustion primaire du carburant. Ainsi, une compréhension de la formation de ces espèces nécessite une connaissance de la chimie de la combustion. Pour les oxydes d'azote et les oxydes de soufre, les processus de formation et de destruction ne font pas partie du processus de combustion du carburant. Cependant, les réactions, qui produisent ces espèces, se déroulent dans un environnement créé par les réactions de combustion, de sorte que les deux processus sont toujours liés. Un résumé des mécanismes par lesquels ces polluants se forment dans les moteurs à combustion interne constitue une introduction à ce chapitre. Dans les sections suivantes, les détails de la formation de base les mécanismes de chaque polluant et l'application de ces mécanismes au processus de combustion dans les moteurs à allumage par étincelle et par compression seront développés. (7)

II.5.1 LES OXYDES D'AZOTE :

Les oxydes d'azote (NO_x) sont formés dans toute la chambre de combustion pendant le processus de combustion en raison de la dissociation de N_2 et d' O_2 dans leurs états atomiques et des réactions ultérieures avec l'oxygène moléculaire et l'azote. L'effet des paramètres de fonctionnement du moteur, notamment le rapport d'équivalence, l'avance à l'allumage, le régime du moteur et la pression du collecteur, sur la concentration d'oxydes d'azote a fait l'objet de nombreuses recherches. Les réactions de formation de NO_x dépendent fortement de la température, de sorte que les émissions de NO_x sont relativement faibles au démarrage et à

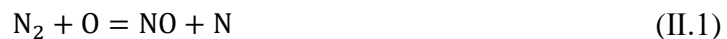
l'échauffement du moteur, puis augmentent proportionnellement à la charge du moteur. La concentration totale d'oxydes d'azote est mesurée à l'aide d'un analyseur à chimiluminescence, comme nous le verrons plus loin dans le texte.

Les oxydes d'azote (NO_x) sont composés de NO et de NO_2 . De nombreuses voies de réaction complexes pour la création et la décomposition des NO_x ont été formulées, et les paramètres de vitesse correspondants pour les réactions ont été établis. Dans les gaz d'échappement des moteurs à allumage commandé, le composant dominant des NO_x est l'oxyde nitrique, NO, avec des concentrations de l'ordre de 1000 ppm, et la concentration de dioxyde d'azote, NO_2 , est de l'ordre de 10 ppm, soit environ 1%. Dans les moteurs à allumage par compression, la concentration de NO_2 peut être plus élevée. Dans l'atmosphère, l'oxyde nitrique s'oxyde en dioxyde d'azote et réagit avec les hydrocarbures non brûlés en présence de la lumière du soleil pour former le smog (2).

Les 3 voies de formation de NO_x :

a. Formation thermique de NO_x :

Comme on le sait, le mécanisme de Zeldovich a été utilisé avec succès pour décrire les étapes chimiques élémentaires responsables de la majorité de l'oxyde nitrique produit dans les conditions du moteur. Le mécanisme original de Zeldovich a été étendu pour inclure une troisième réaction qui s'est avérée être importante pour certaines conditions de combustion. Le mécanisme étendu de Zeldovich est :



b. Formation rapide de NO_x :

En 1971, Fenimore a observé une production d'oxyde nitrique qui dépassait de loin les valeurs attendues du mécanisme thermique. Il a découvert que pour les mélanges riches, une autre voie existait pour la production d'oxyde nitrique. Cette voie était due à une série d'étapes de réaction au front de flamme qui impliquait le radical CH. En général, le radical CH est considéré comme une espèce transitoire dans le processus global d'oxydation des hydrocarbures. Fenimore a toutefois noté que le radical CH pouvait être une espèce importante dans une voie de formation de l'oxyde nitrique.

Cette voie est particulièrement importante pour les mélanges riches. En général, cette voie est initiée par la réaction rapide des radicaux d'hydrocarbures avec l'azote moléculaire, et conduit à des intermédiaires tels que des amines ou des composés cyano (par exemple, HCN) qui réagissent ensuite pour former de l'oxyde nitrique. Les plus importantes de ces réactions sont :



En général, lorsque la production d'oxyde nitrique thermique est inférieure à environ 100 ppm, le mécanisme d'oxyde nitrique rapide peut être important.

c. Formation de NO_x de carburant :

Pour les combustibles contenant de l'azote lié, comme le charbon et certains distillats lourds, un autre mécanisme de production d'oxyde nitrique est possible. Les composés contenant de l'azote se vaporisent pendant la combustion, et l'azote libéré participe à une série de réactions pour former de l'oxyde nitrique. Ces mécanismes passent souvent par la formation de NH₃ (ammoniac) et de HCN (acide cyanhydrique). Cependant, pour la plupart des carburants actuels des moteurs à allumage commandé, l'azote lié au carburant est négligeable ou nul. (13)

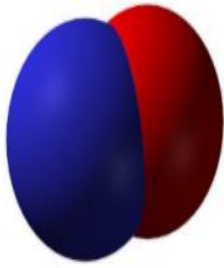


Figure II-2: molécule d'oxyde d'azote

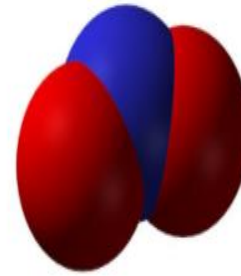


Figure II-3: molécule de dioxyde d'azote (14)

II.5.2 Monoxyde de carbone (CO) :

Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz inflammable incolore, inodore et insipide qui est légèrement moins dense que l'air, il est généré dans un moteur lorsqu'il fonctionne avec un rapport d'équivalence riche en carburant, comme le montre ci-dessous, Lorsqu'il n'y a pas assez d'oxygène pour convertir tout le carbone en CO₂, une partie du carburant n'est pas brûlée et une partie du carbone finit sous forme de CO. En règle générale, l'échappement d'un moteur à allumage commandé contient environ 0,2% à 5% de monoxyde de carbone. Le CO est non seulement considéré comme une émission indésirable, mais il représente également une perte d'énergie chimique qui n'a pas été pleinement utilisée dans le moteur. Le CO est un combustible qui peut être brûlé pour fournir de l'énergie thermique supplémentaire :



Le CO maximum est généré lorsqu'un moteur tourne riche, par exemple au démarrage ou lors d'une accélération sous charge. Même lorsque le mélange air-carburant d'admission est stoechiométrique ou pauvre, du CO sera généré dans le moteur. Un mauvais mélange, des régions riches locales et une combustion incomplète créeront du CO. Un moteur à allumage commandé bien conçu fonctionnant dans des conditions idéales peut avoir une fraction molaire d'échappement de CO aussi faible que 10. Les moteurs à compression qui fonctionnent globalement pauvres ont généralement de très faibles émissions de CO (voir (II.6)). (1)

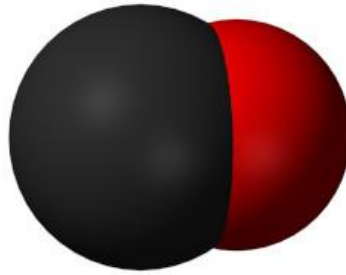


Figure II-4: molécule de monoxyde de carbone. (14)

II.5.3 Émissions d'hydrocarbures imbrûlés :

Les carburants hydrocarbonés sont composés de 10 à 20 espèces principales et de quelque 100 à 200 espèces secondaires. La plupart de ces mêmes espèces se retrouvent dans les gaz d'échappement. Cependant, certains des hydrocarbures d'échappement ne se trouvent pas dans le carburant d'origine, mais sont des hydrocarbures dérivés du carburant dont la structure a été modifiée dans le cylindre par des réactions chimiques qui n'ont pas été menées à terme. Ces hydrocarbures représentent environ 50% du total des hydrocarbures émis. Les produits hydrocarbonés issus de réactions partielles sont classés par l'Agence américaine de protection de l'environnement comme des émissions toxiques. Les émissions d'hydrocarbures résultent de la présence de carburant non brûlé dans les gaz d'échappement d'un moteur, elles sont plus importantes lors du démarrage et du réchauffement du moteur. Dans des conditions riches, le manque d'oxygène produit des concentrations très élevées de HC. Lorsque le moteur fonctionne dans des conditions extrêmement pauvres, des ratés d'allumage commencent à se produire, ce qui entraîne bien sûr une augmentation des émissions de HC. Les ratés d'allumage réduisent également les températures dans le cylindre et à l'échappement, ce qui entraîne une oxydation postcombustion moindre. La raison pour laquelle, pour des rapports air/carburant intermédiaires, les concentrations de HC n'atteignent pas les niveaux d'équilibre (presque) nuls peut s'expliquer comme suit :

- En raison du refroidissement rapide de la charge du cylindre pendant la phase de détente, le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre chimique n'est pas disponible (la concentration élevée de HC est "gelées" peu après leur formation pendant la combustion).
- Pendant le temps de compression, le mélange est poussé dans plusieurs crevasses présentes dans le cylindre, et une partie du mélange est absorbée par le film d'huile qui recouvre les parois du cylindre (Figure II-5). Dès que la pression diminue pendant la

phase de détente (et après la fin de la combustion), ces molécules d'HC sont libérées dans le cylindre. Comme la température de la charge du cylindre a déjà beaucoup baissé, une partie non négligeable de ces molécules d'HC s'échappe de l'oxydation post-flamme.

- Lorsque le front de flamme atteint la proximité des parois du cylindre (à quelques 0,1 mm de distance), d'importantes pertes de chaleur vers la paroi éteignent la flamme avant que tout le mélange ne soit oxydé.

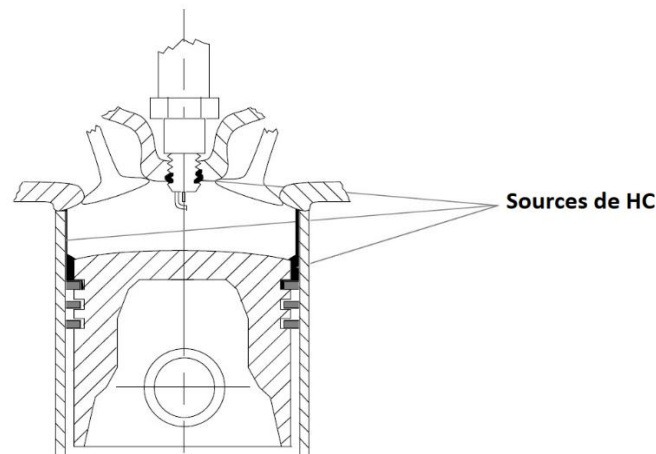


Figure II-5: Crevasses et autres sources d'émissions de HC du moteur.

Étant donné qu'une partie importante des HC est toujours oxydée dans la phase post-flamme à l'intérieur du cylindre, et même pendant la purge dans le collecteur d'échappement, tous les effets qui influencent les conditions de ce phénomène (oxygène disponible, température, temps, etc.) affectent également les émissions de HC à la sortie du moteur. (15)

II.5.4 Oxydes de soufre :

Ce sont une autre classe de polluants dangereux en raison des dommages qu'ils causent aux êtres vivants. Le dioxyde de soufre (SO_2) en particulier est un polluant désagréable qui est très dangereux à haute concentration. En fait, ces polluants peuvent provoquer une détresse respiratoire et des maladies pulmonaires chez l'homme. Une des principales sources de SO_2 est la combustion de produits pétroliers contenant du soufre. Parfois, même le charbon de bois contient des traces de soufre et libère du SO_2 lors de la combustion. Les éruptions volcaniques constituent une source naturelle d'oxydes de soufre.

Ce dioxyde de soufre peut également s'oxyder et se transformer en SO_3 . Et puis, lorsqu'il réagit avec l'humidité ou l'eau, il devient de l'acide sulfurique et précipite sur Terre sous forme de pluie acide.

À haute température, le soufre se combine avec l'hydrogène pour former du H_2S et avec l'oxygène pour former SO_2 :



Les gaz d'échappement du moteur peuvent contenir jusqu'à 20 ppm de SO_2 . Le SO_2 se combine ensuite avec l'oxygène de l'air pour former du SO_3 :



Ceux-ci se combinent avec la vapeur d'eau dans l'atmosphère pour former de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et de l'acide sulfureux (H_2SO_3), qui sont des ingrédients des pluies acides (16):



II.5.5 Suie :

Dépôt poudreux sombre de résidus de combustibles non brûlés, composés principalement de carbone amorphe et de quelques hydrocarbures, qui s'accumule dans les cheminées, les pots d'échappement des voitures et autres surfaces exposées à la fumée. Il s'agit du produit de la combustion incomplète de combustibles organiques riches en carbone dans des conditions de faible teneur en oxygène. Il est parfois appelé noir de lampe ou noir de carbone et est utilisé dans l'encre, dans les pneus en caoutchouc et pour préparer des nanotubes de carbone (17).



Figure II-6: les particules suies. (18), (19)

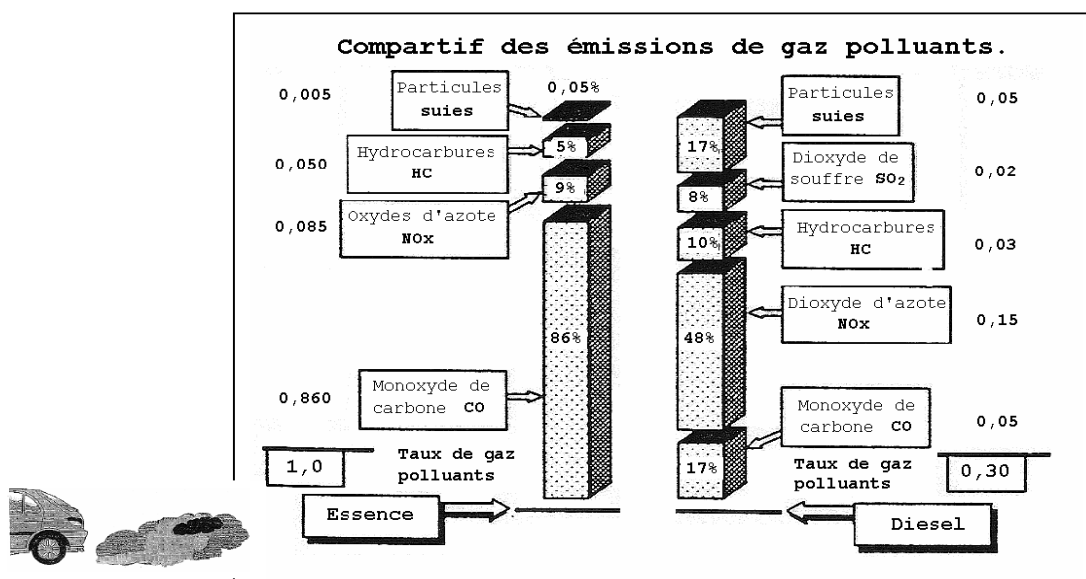


Figure II-7: comparaison les émissions des gaz polluants entre l'essence et diesel. (20)

II.6 Traitement des gaz d'échappement :

A l'heure actuelle, les caractéristiques d'émission des moteurs à combustion interne sont une question très importante. Les gaz d'échappement, qui sont émis par un moteur à allumage et compression, sont composés de HC, CO, NO_x, etc. Par conséquent, les concepteurs de moteurs doivent développer des technologies pour réduire les émissions de polluants ainsi que la consommation de carburant, l'un des systèmes utiliser est l'EGR (21) :

II.6.1 EGR :

La vanne EGR (Exhaust Gas Recirculation) est un système permettant de réduire l'émission de gaz polluant dans l'atmosphère. En effet, depuis 2000, l'Union Européenne a durci la réglementation (Norme Euro 6) en termes d'émissions avec un taux maximal d'émissions de gaz par kilomètre. Son fonctionnement est relativement simple : la vanne EGR permet de recycler les gaz d'échappement afin de diminuer la quantité de CO₂ lâché dans l'atmosphère. Entre 5% et 35% des gaz d'échappement sont ainsi réutilisés par le moteur, techniquement, il s'agit seulement d'un clapet qui libère ou retient les gaz d'échappement afin qu'ils soient réinjectés dans le moteur. La vanne EGR est obligatoire sur toutes les voitures diesel, car ce sont elles qui polluent le plus, surtout lorsque le moteur n'est pas encore chaud. En effet, lorsqu'un moteur diesel tourne à bas régime ou n'est pas encore chaud, une partie des gaz d'échappement ne sont pas brûlés. Un excès d'oxyde d'azote et de particules fines (calamine) est alors rejeté dans l'atmosphère. Pour éviter cela et limiter l'émission de gaz polluants, les voitures sont équipées d'une vanne EGR qui redirige une partie des gaz d'échappement dans les injecteurs. Ils sont alors brûlés une deuxième fois et sont plus pauvres en gaz polluants. Toutefois, ce principe a un défaut : il a tendance à encrasser le système d'injection sur le long terme. De même, la vanne EGR peut elle-même s'encrasser et se boucher, la rendant inutilisable. Si votre vanne EGR est bouchée en position fermée, votre véhicule va polluer beaucoup plus. Si elle est bloquée en position ouverte, le système d'admission risque de s'endommager et d'être encrassé. Il est donc important de bien entretenir votre vanne EGR.

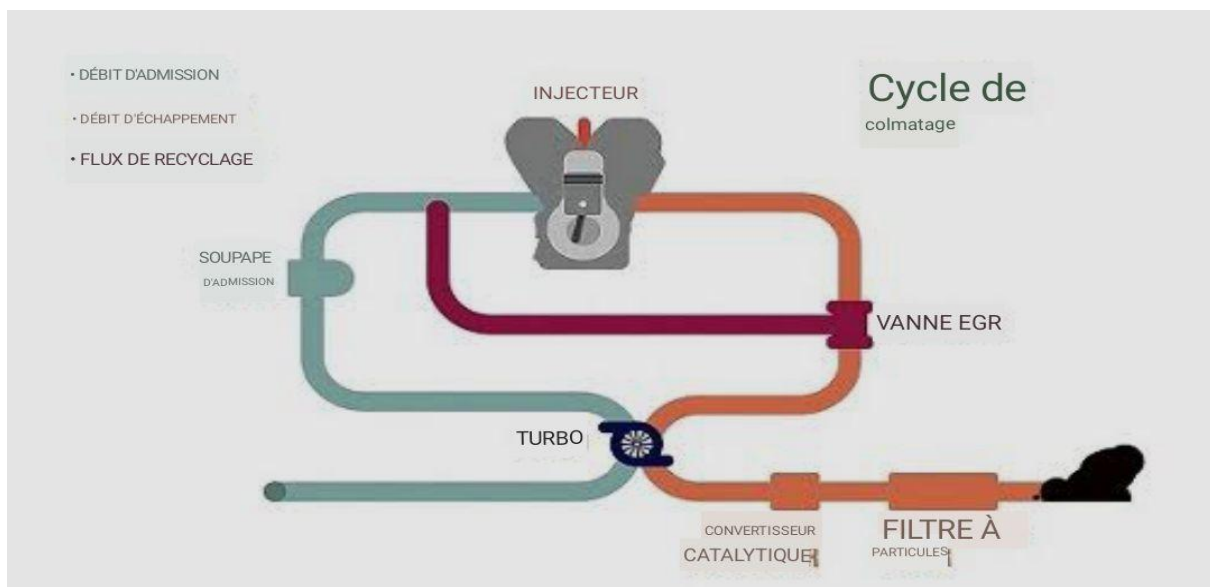


Figure II-8: Schéma de fonctionnement de la vanne EGR. (22)

II.6.2 Convertisseur catalytique :

Le convertisseur catalytique est placé entre le collecteur du moteur et le tuyau d'échappement, les gaz polluants sortant du moteur le traversent et subissent des processus chimiques par lesquels ils sont convertis en gaz relativement inoffensifs. Le gaz s'écoule à travers les passages et réagit avec le catalyseur à l'intérieur de la couche de lavage poreuse. On peut dire qu'un convertisseur catalytique est constitué d'une plaque de recouvrement en acier ou d'une boîte en acier, d'un substrat monolithique (utilisé pour fabriquer des parois tubulaires), d'un washcoat (comme liant) généralement de l'alumine sur lequel des matériaux catalytiques tels que Pt, Rh, Pd, TiO_2 / CoO sont dispersés avec différents rapports. Outre les matériaux de catalyseur, des oxydes mixtes CeO_2 ou $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ sont également ajoutés dans la couche de lavage du convertisseur catalytique à trois voies (TWC) pour une capacité de stockage d'oxygène et une stabilité thermique améliorée de l'alumine.

Les gaz provenant de l'orifice d'échappement entrant dans TWC sont appelés gaz d'alimentation tels que HC, CO, NO_x , CO_2 . Dans le convertisseur catalytique, deux processus chimiques se produisent tels que la réduction catalytique et l'oxydation catalytique. Dans le processus de réduction catalytique, l'oxyde d'azote abandonne son oxygène pour former de l'azote pur. Ensuite, l'oxygène libre réagit avec le CO pour former des émissions de CO_2 . Dans le processus d'oxydation, les hydrocarbures et le monoxyde de carbone continuent de brûler. Cela ne se produit que si la quantité d'oxygène disponible est suffisante pour que les hydrocarbures et le monoxyde de carbone se forment avec. Cette réaction chimique entraîne l'oxydation des hydrocarbures et du monoxyde de carbone pour former de l'eau (H_2O) et du dioxyde de carbone (CO_2).

Les réactions majeures :



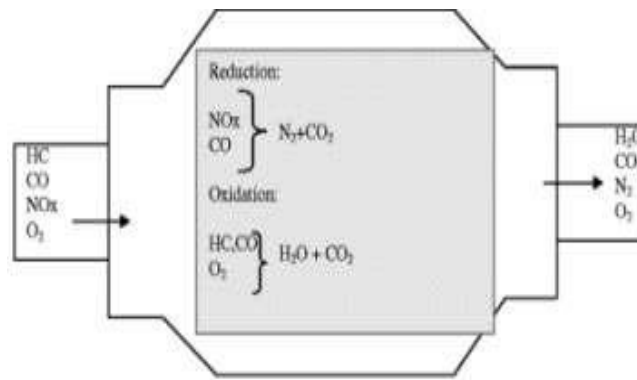


Figure II-9: Processus d'oxydation et de réduction dans le convertisseur catalytique. (21)

Schéma général d'un pot catalytique à deux monolithes et position des platinoïdes utilisés

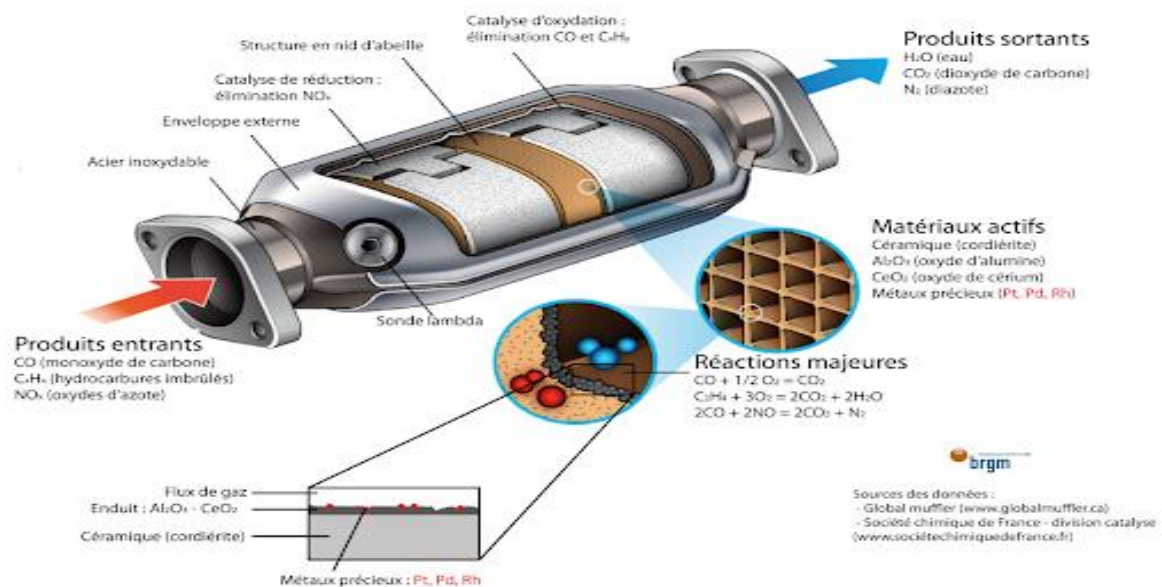


Figure II-10: Schéma général d'un pot catalytique. (23)

II.6.3 Les normes Euro :

La première norme Euro a été mise en place par l'Union Européenne dès 1988. À l'origine, cette norme concernait les véhicules lourds avant de s'étendre aux véhicules légers. Cette norme a été instaurée pour limiter les émissions de polluants en imposant des seuils limites de rejets aux véhicules neufs. Depuis sa création, cette norme Euro a évolué afin de réduire toujours plus les émissions polluantes. De ce fait, les constructeurs se sont vu imposer de plus en plus de contraintes. L'Union Européenne exige de leur part des véhicules plus propres.

Côté poids lourds, les véhicules neufs doivent aujourd'hui être conformes à la norme Euro VI alors que du côté des véhicules légers, les constructeurs sont soumis à la norme Euro 6d-TEMP.

Les différentes normes Euro :

A. Les normes Euro pour les véhicules lourds :

La norme Euro a largement évolué depuis sa mise en place en 1988 pour les véhicules lourds.

Elle a connu, à ce jour, six évolutions pour porter à 7 le nombre de normes existantes (24):

Normes	Textes de référence (directives)	Date de mise en application (tous types)	NOx (g/kWh)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	Particules (g/kWh)
Euro 0	88/77	01-10-1990	14,4	11,2	2,4	-
Euro I	91/542 (A)	01-10-1993	9	4,9	1,23	0,36
Euro II	91/542 (B)	01-10-1996	7	4	1,1	0,15
Euro III	1999/96	01-10-2001	5	2,1	0,66	0,13
Euro IV	1999/96	01-10-2006	3,5	1,5	0,46	0,02
Euro V	1999/96	01-10-2009	2	1,5	0,46	0,02
Euro VI	Règlement (CE) n° 595/2009	31-12-2013	0,4	1,5	0,13	0,01

Figure II-11: normes Euro pour véhicules lourds. (25)

B. Les normes Euro pour les véhicules légers : Concernant les véhicules légers, les normes Euro ne sont apparues qu'en 1993. (24)

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5a	Euro 5b	Euro 6b	Euro 6c	Euro 6d -TEMP	Euro 6d
Oxydes d'azote (NO _x)	-	-	500	250	180	180	80	80	80	80
Monoxyde de carbone (CO)	2 720	1 000	640	500	500	500	500	500	500	500
Hydrocarbures (HC)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydrocarbures non méthaniques (HCNM)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HC + NO _x	970	700	560	300	230	230	170	170	170	170
Particules (PM)	140	80	50	25	5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Particules (PN) (nb/km)	-	-	-	-	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹
Valeurs, sauf PN, exprimées en mg/km.										

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5 ¹⁵	Euro 6b ¹⁶	Euro 6c	Euro 6d -TEMP	Euro 6d
Oxydes d'azote (NO _x)	-	-	150	80	60	60	60	60	60
Monoxyde de carbone (CO)	2 720	2 200	2 200	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
Hydrocarbures (HC)	-	-	200	100	100	100	100	100	100
Hydrocarbures non méthaniques (HCNM)	-	-	-	-	68	68	68	68	68
HC + NO _x	970	500	-	-	-	-	-	-	-
Particules (PM)	-	-	-	-	5 ^{*1}	5 ^{*1}	4,5	4,5	4,5
Particules (PN) (nb/km)	-	-	-	-	-	6 × 10 ^{12*2}	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹
Valeurs, sauf PN, exprimées en mg/km.									
<p>1. † ^a et ^b Uniquement pour les voitures à essence à injection directe fonctionnant en mélange pauvre (combustion stratifiée).</p> <p>2. † Le règlement n° 459/2012 autorise les voitures à essence à injection directe à émettre 6 × 10¹² particules jusqu'en 2017 ; au-delà, elles seront limitées à 6 × 10¹¹ comme les véhicules Diesel.</p>									

Figure II-12: les normes Euro pour voiture diesel et essence respectivement. (26)

II.7 Conclusion :

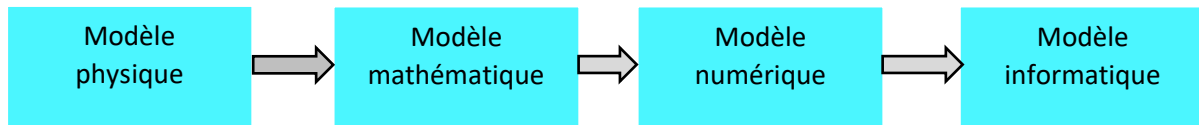
Le but de ce chapitre était de discuter les différents types de pollutions et surtout les composants des gaz d'échappement générés par les véhicules et de décrire l'une des voies prometteuses de réduction des polluants dans les gaz d'échappement au moyen de catalyseurs et l'EGR. Ces dernières années, l'attention des chercheurs s'est orientée vers la création de systèmes cycliques dans lesquels, dans un premier temps, les NO_x sont absorbés par l'adsorbant principal, par exemple BaO, et dans la deuxième étape, une décomposition ou une réduction des NO_x absorbés se produit. L'applicabilité des derniers systèmes catalytiques nécessite la présence de systèmes de contrôle électroniques sophistiqués pour le processus de combustion dans le moteur, ce qui est lié à une analyse rapide et constante de la qualité du neutralisant et de la composition des gaz d'échappement. Les chercheurs sont en cour de développer des nouvelles normes européennes (Euro 7) pour réduire le maximum de ces émissions nocives.

Dans le chapitre suivant, on va donner un exemple sur les gaz d'échappement du moteur à combustion interne.

Chapitre III Simulation de la pollution dans moteur essence

III.1 Introduction :

L'objectif des méthodes numériques est de fournir une solution proche du comportement réel des phénomènes physiques. La physique possède des caractères tridimensionnels, temporelles et non linéaire, c'est-à-dire très complexe. Le rôle de modélisateur est de simplifier suffisamment le problème tout en conservant l'originalité du phénomène physique étudié. La résolution de ces équations présentées dans ce chapitre, nécessite l'utilisation de l'outil informatique « les codes de simulation ». Ce chapitre a été introduit pour la description du problème et la simulation du code de calcul FLUENT, qui est essentiellement le programme qu'il propose de résoudre les problèmes comme le nôtre. La structure de la géométrie et des conditions aux limites avec la génération de maillage est effectuée par le processeur GAMBIT.



III.2 Modélisation de la combustion

III.2.1 Équations de bilan pour un écoulement réactif laminaire :

- **Équations de conservation de la masse :**

La conservation de la masse totale s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (\text{III.1})$$

Où, ρ désigne la masse volumique et u_j est la j^{eme} composante du vecteur vitesse. Pour un mélange gazeux constitué de N espèces chimiques, la conservation de la masse s'écrit de manière équivalente pour chaque espèce k . La somme des N équations de conservation des espèces permet de retrouver l'équation de la masse totale :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} (-J_{jk}^s) + \rho \dot{\omega}_k, \quad k = 1, \dots, N \quad (\text{III.2})$$

Où, J_{jk}^s est le flux de diffusion dans la direction j de l'espèce k dans le mélange et $\dot{\omega}_k$ représente le taux de production (ou de consommation) de l'espèce k . La diffusion moléculaire s'écrit selon la loi de Fick comme :

$$J_{jk}^s = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho D_k Y_k) \quad (\text{III.3})$$

Où, D_k est le coefficient de diffusion de l'espèce k dans le mélange. Cela suppose que l'on néglige la diffusion due aux gradients de température (effet Soret). Les termes sources chimiques de production (destruction) instantanée des espèces, $\dot{\omega}_k$ sont donnés par le modèle de combustion.

- **Équations de conservation de la quantité de mouvement :**

L'équation de bilan de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} - p \delta_{ij}) + \rho S_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (\text{III.4})$$

Où, p est la pression, τ_{ij} est la composante i, j du tenseur des contraintes visqueuses, S_i est la composante dans la direction i du terme source de forces volumiques (gravité, forces électromagnétiques, . . .) qui sont négligées dans ce travail. Le tenseur des contraintes visqueuses, s'écrit :

$$\tau_{ij} = 2\mu \left(S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (\text{III.6})$$

Où, μ est la viscosité dynamique, S_{ij} est le tenseur des vitesses de déformation, δ_{ij} est l'opérateur de Kronecker, l'indice l est arbitraire.

Les fluides considérés sont assimilés à des fluides Newtoniens. La relation entre le tenseur des contraintes de viscosité et le tenseur des taux de déformation est linéaire et isotrope. Les coefficients de cette relation linéaire (coefficients de viscosité) ne dépendent que de la température T .

- **Équations de conservation de l'énergie**

Le bilan de l'énergie totale du mélange est défini par :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e_t) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j e_t) = \frac{\partial}{\partial x_j}(-J_j^{e_t} + \sigma_{ij} u_j) + \rho S^{e_t} \quad (\text{III.7})$$

$$e_t = h_t - p/\rho \quad (\text{III.8})$$

Avec

$$h_t = \int_{T_0}^T C_p dT + \sum_{k=1}^n \Delta h_{f,k}^0 Y_k + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (\text{III.9})$$

Où $J_j^{e_t}$ est le flux d'énergie totale dans la direction j , σ_{ij} est la composante i, j du tenseur défini par :

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - p\delta_{ij} \quad (\text{III.10})$$

Et S^{e_t} est le terme source d'énergie totale (travail des forces volumiques, rayonnement, ...), qui seront négligés.

Le flux d'énergie totale dans la direction j s'écrit :

$$J_j^{e_t} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \rho \sum_{k=1}^N \Delta h_k D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \quad (\text{III.11})$$

La diffusion de chaleur par conduction (loi de Fourier) ainsi que la diffusion d'espèces sont considérées, tout en négligeant la diffusion par gradient de concentration (effet Dufour) ainsi que le rayonnement. λ est la conductivité thermique du mélange.

L'aérothermochimie est représentée par un ensemble de $N + 4$ équations. Le vecteur inconnu est le vecteur des variables conservatives $(\rho Y_1, \dots, \rho Y_N, \rho u, \rho e_t)$. Il faut donc compléter le système par une relation d'état pour la pression, $p=f(\rho, T)$.

III.3 Modélisation de l'écoulement réactif turbulent :

Dans la chambre de combustion, l'écoulement est turbulent, c'est-à-dire que la vitesse des fluides, mesurée en un point, fluctue continuellement de façon apparemment aléatoire, même en régime parfaitement établi. Cela est vrai aussi pour la température et toute autre caractéristique du milieu. La turbulence se caractérise donc par une fluctuation dans le temps et l'espace des grandeurs physiques de l'écoulement, telles que la vitesse ou la pression et par la présence de tourbillons. La dimension de ces tourbillons s'étend dans un spectre dont la taille dépend du régime d'écoulement, caractérisé par le nombre de Reynolds. Pour chaque échelle de la turbulence, on peut définir un nombre de Reynolds correspondant :

$$Re(r) = \frac{ur}{\nu} \quad (\text{III.12})$$

Où u est la vitesse d'un élément caractéristique de taille r et ν est la viscosité cinématique du fluide. A l'échelle intégrale, on retrouve la définition classique du nombre de Reynolds $Re_L=UL/\nu$ (où L est la taille caractéristique de l'écoulement) qui quantifie le rapport entre les effets d'inertie et les effets visqueux. Dans le spectre de l'énergie cinétique turbulente, les gros tourbillons sont les plus énergiques. Ils interagissent aux grandes échelles avec le mouvement moyen en lui extrayant son énergie cinétique et dépendent donc fortement de la géométrie du problème (forte anisotropie). L'étirement des structures tourbillonnaires permet le transfert de l'énergie à des échelles de plus en plus petites, où les forces dissipatives sont prépondérantes. Les plus petits tourbillons (isotropes) dissipent donc l'énergie créée aux grandes échelles. C'est la cascade directe d'énergie décrite par la théorie de Kolmogorov.

Les équations de Navier-Stokes ne présentent pas de solution analytique exacte. Il convient par conséquent d'utiliser une résolution numérique capable de rendre compte de l'ensemble des

échelles mises en jeu par la turbulence. L'approche RANS consiste en une description statistique de l'écoulement. La composante moyenne du vecteur des variables conservatives est transportée, tandis que sa composante fluctuante est modélisée grâce à une équation de fermeture. Chaque variable est composée d'une partie moyenne ($\bar{\Phi}$) et d'une partie fluctuante (Φ') de sorte que :

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi' \quad (\text{III.13})$$

La décomposition de Reynolds, équation (3.13), est linéaire, conserve les constantes et commute avec les opérateurs de dérivation ($\overline{\bar{\Phi}} = \bar{\Phi}$, $\overline{\Phi'} = 0$). Cette méthode a été étendue aux écoulements compressibles. Les équations ainsi obtenues contiennent, comparativement aux équations instantanées, de nouveaux termes qui ont la forme de corrélations doubles de vitesse ou vitesse/masse volumique. Les corrélations vitesse/vitesse sont nommées contraintes de Reynolds et représentent l'échange de quantité de mouvement dû à l'agitation turbulente. L'hypothèse de $\rho = \text{Cte}$ n'est pas adéquate pour les flammes, et les équations moyennées doivent donc être modifiées.

Dans des écoulements réactifs à masse volumique variable, la décomposition de moyenne pondérée par la masse volumique (Favre) est usuellement utilisée. Chaque quantité extensive φ (à l'exception de la densité et la pression), peut être décomposée par une moyenne $\tilde{\varphi}$ et sa fluctuation φ'' :

$$\varphi = \tilde{\varphi} + \varphi'' \quad (\text{III.14})$$

Tel que :

$$\tilde{\varphi} = \frac{\overline{\rho\varphi}}{\bar{\rho}} \quad (\text{III.15})$$

L'introduction de ce type de décomposition permet la simplification par la fluctuation de la masse volumique et le formalisme des équations instantanées est conservé. La différence des moyennes (Reynolds et Favre) s'écrit :

$$\tilde{\varphi} - \bar{\varphi} = \frac{\overline{\rho' \varphi'}}{\bar{\rho}} \quad (\text{III.16})$$

En utilisant les équations de transport, équations (3.1, 3.2, 3.4 et 3.7) et les décompositions de Reynolds et de Favre, on peut déduire les équations filtrées du bilan de masse (continuité), de conservation de l'espèce chimique, de quantité de mouvement et d'énergie.

- Equation de continuité :

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (\text{III.17})$$

- Equation de conservation de l'espèce chimique :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{Y}_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} [-(\overline{\rho u_j Y_k} - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_k) - \bar{J}_{jk}^s] + \bar{\rho} \tilde{\omega}_k, \quad k = 1, \dots, N \quad (\text{III.18})$$

- Equation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p}) = \frac{\partial}{\partial x_j} [-(\overline{\rho u_i u_j} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \bar{\tau}_{ij}] + \bar{\rho} \tilde{S}_i \quad (\text{III.19})$$

- Equation de conservation d'énergie totale :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{e}_t) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}_t) = \frac{\partial}{\partial x_j} [-(\overline{\rho u_j e_t} - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{e}_t) + (\overline{\tau_{ij} u_i} - \bar{\tau}_{ij} \tilde{u}_i) - \bar{J}_j^{e_t} + \bar{\tau}_{ij} \tilde{u}_i] + \bar{\rho} \tilde{S}^{e_t} \quad (\text{III.20})$$

Les hypothèses faites au paragraphe (3.2.1) restent valables pour les quantités filtrées. Ainsi, les flux de diffusion filtrés s'écrivent :

$$\overline{J_{jk}^s} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho} \tilde{D}_k \tilde{Y}_k) \quad (\text{III.21})$$

$$\overline{J_j^{e_t}} = -\lambda \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} + \overline{\rho} \sum_{k=1}^N \tilde{D}_k \tilde{h}_k \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_j} \quad (\text{III.22})$$

De même, le tenseur des contraintes de viscosité filtrée s'écrit :

$$\overline{\tau_{ij}} = 2\hat{\mu}(\overline{S_{ij}} - \frac{1}{3} \frac{\partial \tilde{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij}) \quad (\text{III.23})$$

Avec

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (\text{III.24})$$

Les quantités ($\hat{\lambda}$ et $\hat{\mu}$) correspondent aux coefficients de transport moléculaire calculés avec la valeur filtrée de la température \tilde{T} .

- **Fermeture des équations**

La fermeture des contraintes visqueuses turbulentes s'écrit :

$$(\overline{\rho u_j u_j} - \overline{\rho \tilde{u}_j \tilde{u}_j}) = \tau_{ij}^t \quad (\text{III.25})$$

Les fermetures des flux de diffusion turbulents sont :

$$(\overline{\rho u_j Y_k} - \overline{\rho \tilde{u}_j \tilde{Y}_k}) = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho} D_t \tilde{Y}_k) \quad (\text{III.26})$$

$$(\overline{\rho u_j e_t} - \overline{\rho \tilde{u}_j \tilde{e}_t}) + (\overline{\tau_{ij} u_i} - \overline{\tau_{ij} \tilde{u}_i}) = -\lambda_t \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} + \overline{\rho} \sum_{k=1}^N D_t \tilde{h}_k \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_j} + \tau_{ij}^t \tilde{u}_j - \overline{\rho k' u_j''} + \overline{\tau_{ij} u_j''} \quad (\text{III.27})$$

Le coefficient de diffusion turbulente D_t est estimé à partir du nombre de Schmidt turbulent

$$D_t = \nu_t / Sc_t \quad (\text{III.28})$$

Le terme $\rho k'uj'' + \tau_{ij}uj''$ correspond au terme de diffusion de l'énergie cinétique turbulente.

- **Fermeture du tenseur de Reynolds**

Comme il a été précisé précédemment, la décomposition au sens de Favre est idempotente. Le tenseur de Reynolds s'écrit simplement :

$$\tau_{ij}^t = -\bar{\rho} \widetilde{u_i u_j} \quad (\text{III.29})$$

Par analogie avec la viscosité moléculaire des équations instantanées, on peut utiliser l'hypothèse de Boussinesq pour définir le tenseur des contraintes turbulentes

$$\tau_{ij}^t = \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij} \quad (\text{III.30})$$

Où k est l'énergie cinétique turbulente et μ_t est la viscosité dynamique turbulente. La modélisation du tenseur des contraintes turbulentes dépend de la définition de ces deux paramètres, k et μ_t . Une des caractéristiques importante de la turbulence est que la vitesse de l'écoulement en un point donné montre des fluctuations aléatoires. En pratique, la moyenne temporelle est définie par :

$$\tilde{u}_\alpha^t = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t u_\alpha dt \quad (\text{III.31})$$

L'indice α représente la composante du vecteur vitesse ($\alpha=1,2,3$), En utilisant l'hypothèse ergodique [51] on peut écrire :

$$\overline{(u_\alpha - \bar{u}_\alpha)^2} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_\alpha^{(i)} - \bar{u}_\alpha)^2 \quad (\text{III.32})$$

Et

$$\mathbf{u}'_{\alpha} = \mathbf{u}_{\alpha} - \bar{\mathbf{u}}_{\alpha} \quad (\text{III.33})$$

Cette variance est directement reliée à la turbulence. La valeur moyenne étant caractéristique de l'écoulement moyen. L'énergie cinétique turbulente est définie alors par :

$$k = \frac{1}{2} \left[\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2} \right] \quad (\text{III.34})$$

Dans le cas de l'écoulement réactif, la masse volumique ne peut y être constante, les grandeurs moyennes sont pondérées par ρ :

$$\tilde{u}_{\alpha} = \frac{\overline{\rho u_{\alpha}}}{\bar{\rho}} = \frac{\overline{(u_{\alpha} - \bar{u}_{\alpha})^2}}{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho^{(i)} u_{\alpha}^{(i)}} \quad (\text{III.35})$$

On a alors :

$$\mathbf{u}'_{\alpha} = \mathbf{u}_{\alpha} - \bar{\mathbf{u}}_{\alpha} \quad \text{Et} \quad \widetilde{u_p'^2} = \frac{\overline{\rho u_{\alpha}'^2}}{\bar{\rho}} \quad (\text{III.36})$$

Et

$$\tilde{k} = \frac{1}{2} \left[\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2} \right] \quad (\text{III.37})$$

Deux modèles turbulence sont utilisées pour la fermeture du système d'équation, le modèle (k, ε) standard et le modèle (k, ε) Réalisable.

- **Le modèle (k, ε) standard**

Ce modèle est réputé pour sa robustesse, économie de calcul et stabilité dans les écoulements complexes. Les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente k , et sa dissipation ε sont données par :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{k}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{k}\tilde{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \bar{\rho}\tilde{\varepsilon} \quad (\text{III.38})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{\varepsilon}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{\varepsilon}\tilde{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} (G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\bar{\rho} \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} \quad (\text{III.39})$$

Où G_b est le terme lié à l'effet de la gravité, qui est négligé dans ce travail, G_k représente la génération de l'énergie cinétique turbulente due aux gradients de la vitesse moyenne :

$$G_k = \bar{\rho} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial \tilde{u}_j} \quad (\text{III.40})$$

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (\text{III.41})$$

$$S \equiv \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (\text{III.42})$$

La viscosité turbulente s'écrit :

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{\tilde{k}^2}{\tilde{\varepsilon}} \quad (\text{III.43})$$

Les valeurs des constantes du modèle (k , ε) standard, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k et σ_ε sont gardées par défaut :

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{\mu} = 0.09, \sigma_k = 1, 0 \text{ et } \sigma_{\varepsilon} = 1, 3 \quad (\text{III.44})$$

III.4 Modèle de combustion :

Les modèles de combustion, dans le cas d'une flamme, doivent permettre de calculer la composition moyenne de l'écoulement réactif en tout point, ainsi que le terme source de l'équation de conservation de l'énergie lié à la production ou la consommation de chaleur provenant des réactions exo- ou endothermiques du processus de combustion. L'approche consiste à résoudre une équation de conservation pour la fraction massique de chaque espèce dans le schéma réactionnel choisi. Cette approche, est intitulée modèle généralisé du taux fini de réaction. Dans l'équation de conservation de l'espèce i , équation (3.2), le terme source, représente la création ou la destruction nette de l'espèce par la réaction de combustion. Le flux diffusif laminaire de la masse de l'espèce i est relié au gradient de la fraction massique par le coefficient de diffusion $D_{i,m}$ moléculaire de l'espèce i dans le mélange. Un coefficient de diffusion turbulent est ajouté au coefficient moléculaire pour relier le flux diffusif à la fraction de masse moyenne. Ce coefficient de diffusion turbulent est défini comme le rapport de la viscosité turbulente au nombre de Schmidt turbulent, soit μ/Sc_t . Le terme source dépend quand à lui de la température et des concentrations de manière fortement non linéaire. Par conséquent, le calcul du terme source moyen à partir des valeurs moyennes de la température et des concentrations conduit à des erreurs importantes.

III.5 Modèle EDM pour la combustion turbulente

Le modèle de combustion EDM est basé sur le modèle Eddy Break Up développé dans les années 1970 pour le calcul des flammes pré mélangées. Le concept Eddy-dissipation a été développé pour étendre le principe du modèle EBU aux flammes non prémélangées. Celui-ci postule qu'on peut représenter le phénomène de combustion turbulente par des divisions successives (break-up), sous l'action du frottement turbulent, du domaine des gaz frais en élément de plus en plus petits (appelés Eddies ou bouffées turbulentes), et ce jusqu'à atteindre une taille limite à laquelle ces bouffées, contenant les réactifs supposés mélangés à l'échelle moléculaire, sont en contact suffisant avec les gaz brûlés pour que leur température soit assez élevée pour réagir instantanément. Dans le modèle de Spalding, aussi que dans le modèle de Magnussen et Hjertager, implémenté dans Fluent, intitulé, EDM, la chimie est considérée

comme infiniment plus rapide que le mélange (même turbulent) des réactifs, et la composition atteinte alors dans ces structures fines correspond à celle de l'équilibre chimique. Par conséquent, on peut supposer la vitesse de réaction moyenne comme inversement proportionnelle au temps caractéristique du mélange des grandes échelles de la turbulence et indépendante de la cinétique chimique. Le taux moyen net de la production/destruction de l'espèce i dans la réaction r peut donc s'exprimer par :

$$\bar{\omega}_i = M_{\omega,i} \sum_{r=1}^{Nr} R_{i,r} \quad (\text{III.45})$$

$$\dot{\omega}_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min_R \left(\frac{Y_R}{v'_{i,r} M_{\omega,i}} \right) \quad (\text{III.46})$$

$$\dot{\omega}_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum p Y_p}{\sum_j^N v''_{i,r} M_{\omega,i}} \quad (\text{III.47})$$

Ceci est un artifice qui permet de simuler l'inflammation du mélange réactif sous l'effet du préchauffage par les produits de combustion, ainsi que cela se produit en pratique dans un équipement de combustion. L'absence de notion de cinétique dans ce modèle ne permet pas de tenir compte de l'effet de la température d'inflammation. On suppose donc que, si des produits de combustion existent, c'est qu'on a atteint localement la température d'inflammation et donc la réaction peut se produire. La conséquence de ceci est que, pour que la réaction de combustion puisse démarrer, il est obligatoire d'imposer une fraction non nulle de produit de combustion quelque part dans le domaine. Dès que la réaction a démarré, elle est supposée se maintenir tant que la turbulence soit présente ($k/\epsilon > 0$) et il est impossible de simuler les phénomènes d'extinction locale ou de décollement des flammes turbulentes.

III.6 Propriétés du carburant (n-heptane) :

Le carburant utilisé pour une meilleure combustion c'est le n-heptane dont les propriétés

Thermophysiques données dans le tableau suivant :

LES PROPRIETES	SYMBOLES	VALEUR	UNITES
La conductivité thermique	λ_1	0.0178	[W/ m K]
La viscosité cinématiques	μ_1	$7 \cdot 10^{-6}$	[Kg/m S]
Enthalpie standard	ΔH_0	$-1.878 \cdot 10^8$	[j/ kmol]
Entropie standard	ΔS_1	428006.3	[j/kmol k]
Masse molaire	M_1	100.204	[Kg / kmol]

Tableau III-1: Propriétés du carburant (n-heptane).

III.7 Propriétés du comburant (air) :

La combustion a besoin d'une quantité importante d'air caractérisé par les propriétés si dessous dans le tableau :

LES PROPRIETES	SYMBOLES	VALEUR	UNITES
La conductivité thermique	λ_2	0.0242	[W/ m K]
La viscosité cinématiques	μ_2	$1.7894 \cdot 10^{-5}$	[Kg/m S]
Masse molaire	M_2	28.966	[Kg / kmol]

Tableau III-2: Propriétés du comburant (air).

III.8 Les conditions initiales et aux limites :

III.8.1 Les conditions Initiales :

Nous avons introduit une pression atmosphérique et une température de 318 K avec un régime moteur de 2000 tr/min.

III.8.2 Les conditions aux limites :

Vitesse de l'air	1.1 m/s	
Fraction massique de l'air	20.6147 % pour O ₂	77.5112 % pour N ₂
Fraction massique de carburant (C ₇ H ₁₆)	1.8741 %	

III.9 Simulation numérique :

III.9.1 Création de la géométrie :

On trace notre géométrie dans un logiciel de dessin comme SpaceClaim ou bien Solidworks, après on utilise le logiciel GAMBIT pour dessiner notre maillage et construire les conditions initiales. Notre géométrie a un diamètre de 84 mm et une course de 100 mm avec une hauteur de 20 mm de chambre de combustion, on a un diamètre de 28 mm, 26 mm pour la tubulure d'admission et d'échappement respectivement.

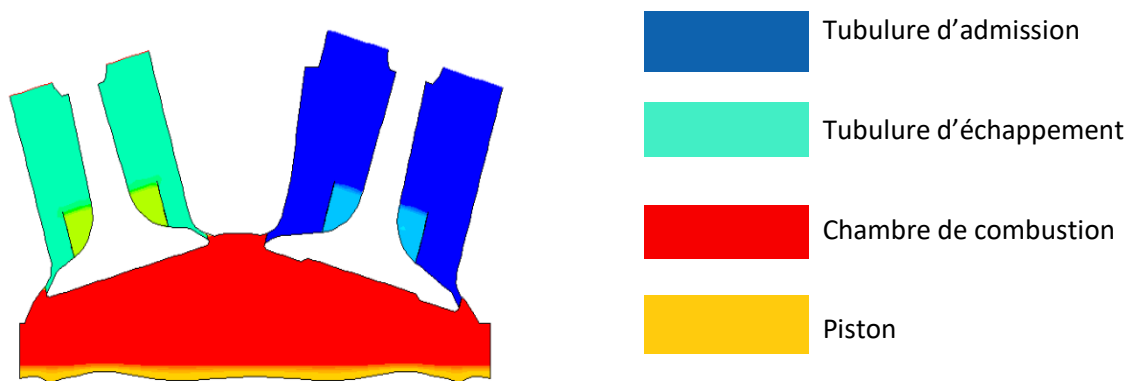


Figure III-1: Géométrie du moteur.

III.9.2 Le maillage de chambre :

Le nombre des cellules est 6048 et le nombre des nœuds est 3550.

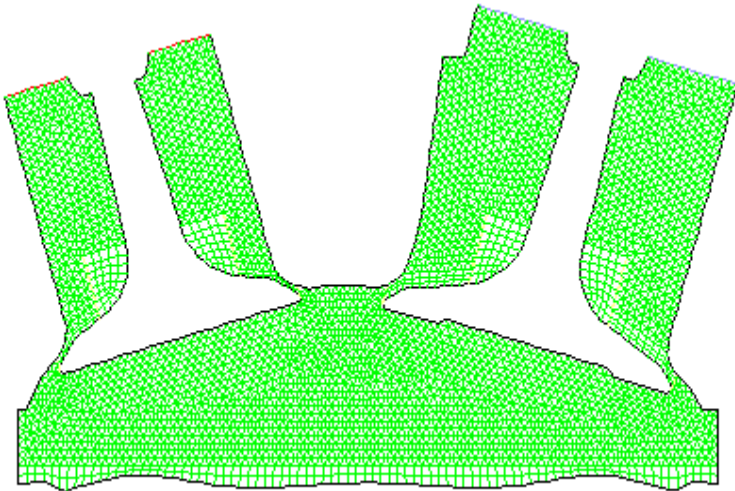


Figure III-2: maillage de la géométrie PMH.

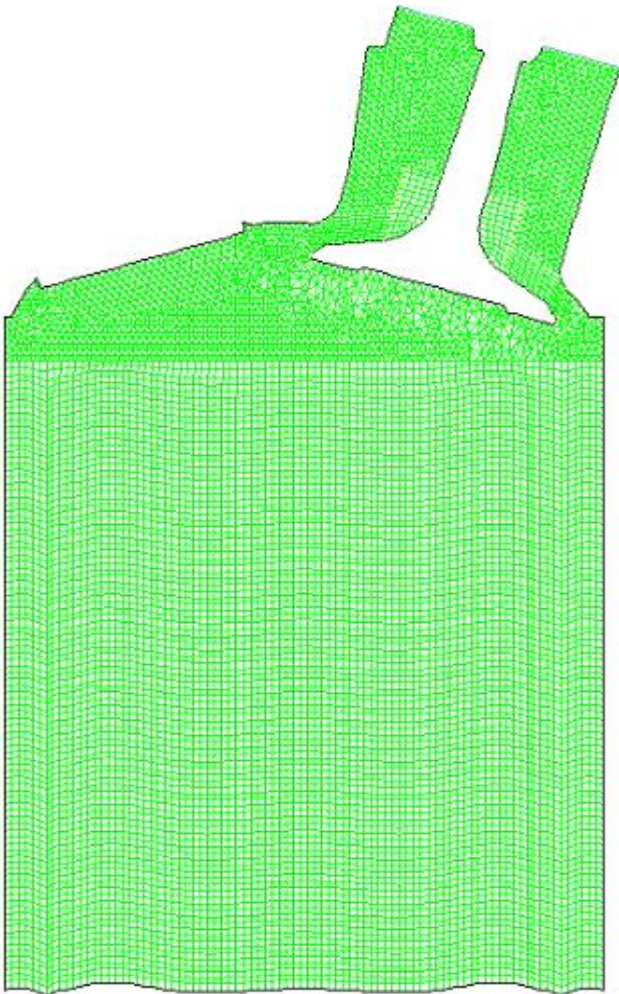


Figure III-3: maillage de la géométrie PMB.

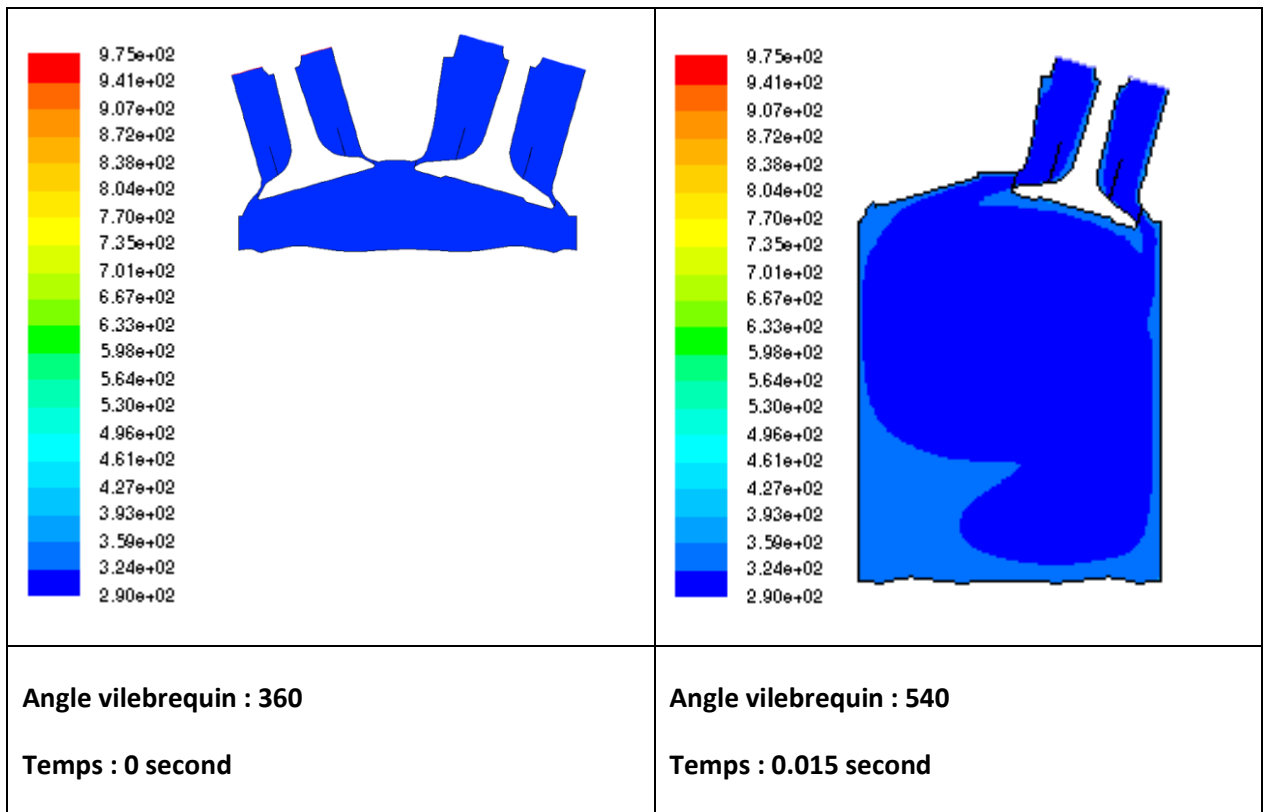
Nombre des cellules : 12535

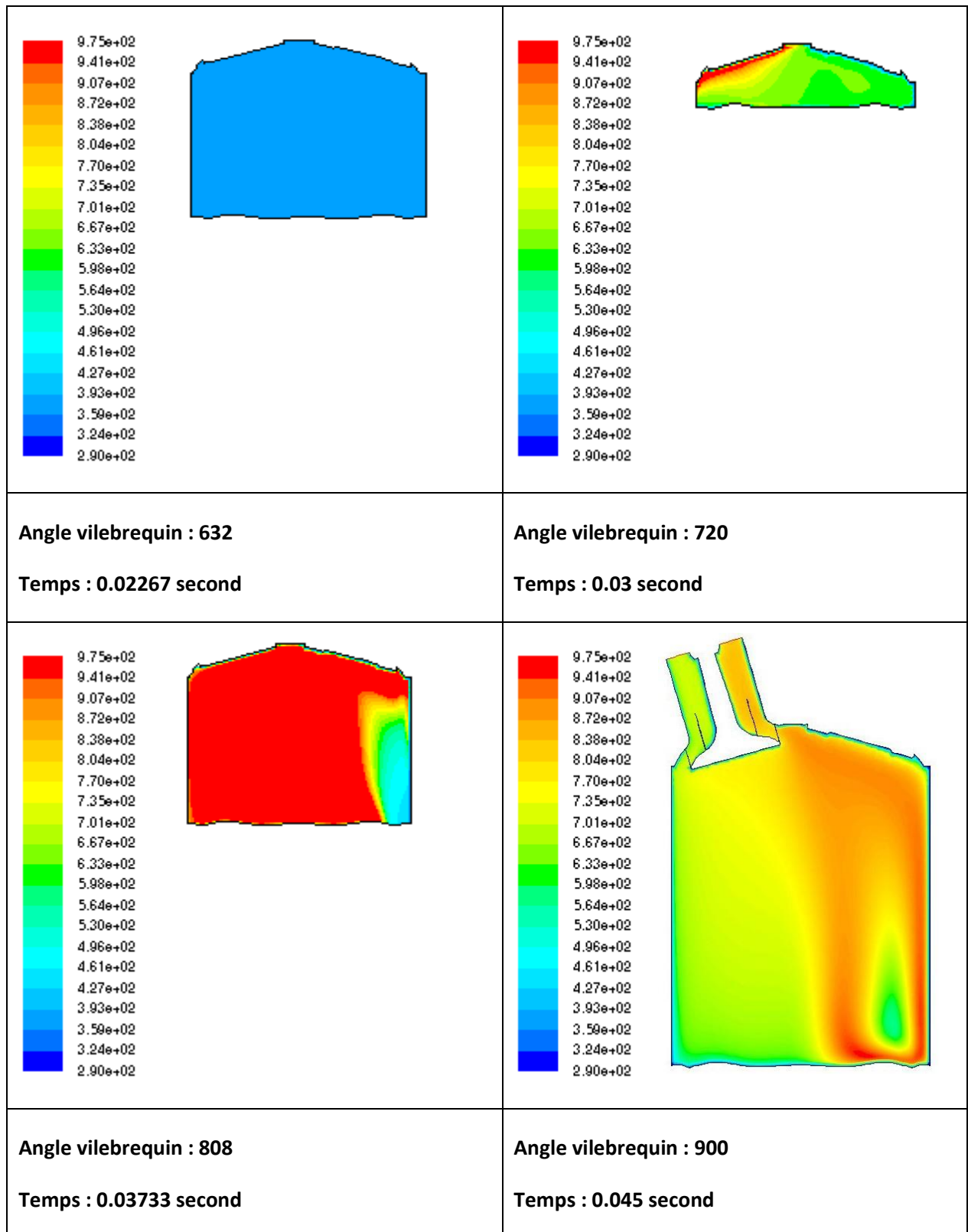
Nombre des nœuds : 11612

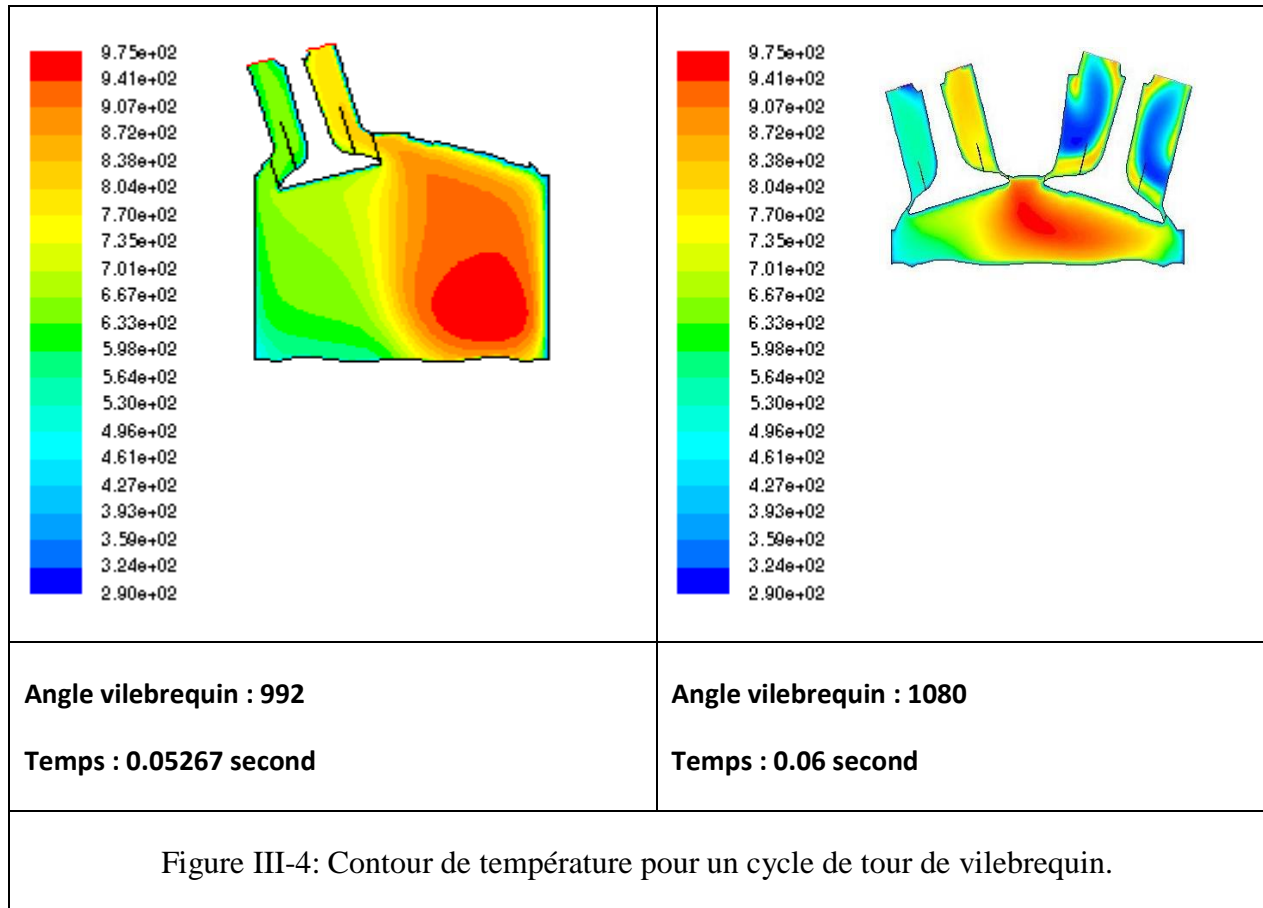
III.10 Résultat et interprétation :

III.10.1 L'évolution de température:

L'évolution de température à différents angles du vilebrequin est présentée sur la figure si dessous, la température dans la chambre de combustion augmente de façon régulière, jusqu'à sa valeur maximale.







La simulation peut nous préciser le moment de l'allumage, ceci est possible grâce à la poursuite des premières traces des produits de l'étincelle.

- A l'angle de 540 on a une zone de circulation du mélange, on remarque que la partie supérieure de la chambre de combustion est homogène et la partie inférieure n'était pas homogène due à la soupape d'admission qui commande l'écoulement.
- Au 632 degrés vilebrequin la température commence à élargir quand le piston monte vers le PMH.
- Lorsque le vilebrequin est au niveau 720 degrés, la combustion démarre sous la soupape d'échappement ce qui augmente la température instantanément.
- Au 808 degrés vilebrequin on note la propagation de la température le long de la chambre de combustion.
- Au 900 degrés la couleur orange représente la continuation de l'allumage du carburant.
- On observe au 992 degrés que la zone de flamme se poursuit.

- Dans 1080 degrés les gaz s'évacuent vers l'échappement et commencent un nouveau cycle.

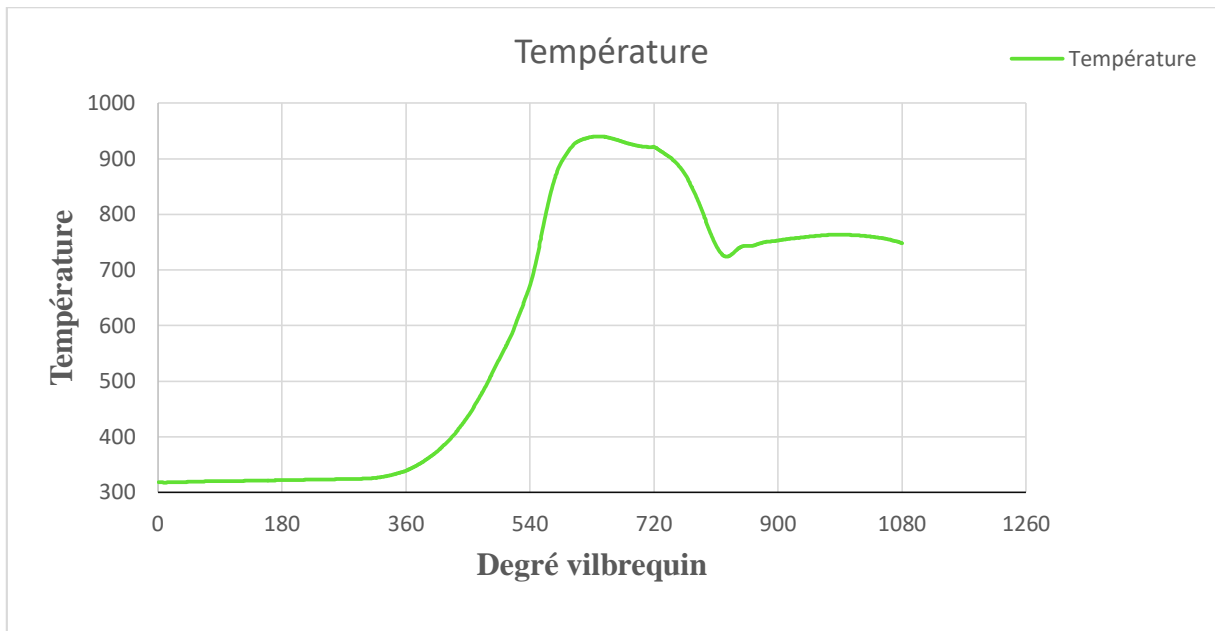


Figure III-5: Variation de température en fonction du degré vilebrequin.

Après le déclenchement de la combustion, on a une augmentation très importante de la température, elle se maintient jusqu'à 950 K, après elle descend dans la zone de détente (de 720 jusqu'à 900 degrés), puis elle remonte légèrement (processus d'échappement).

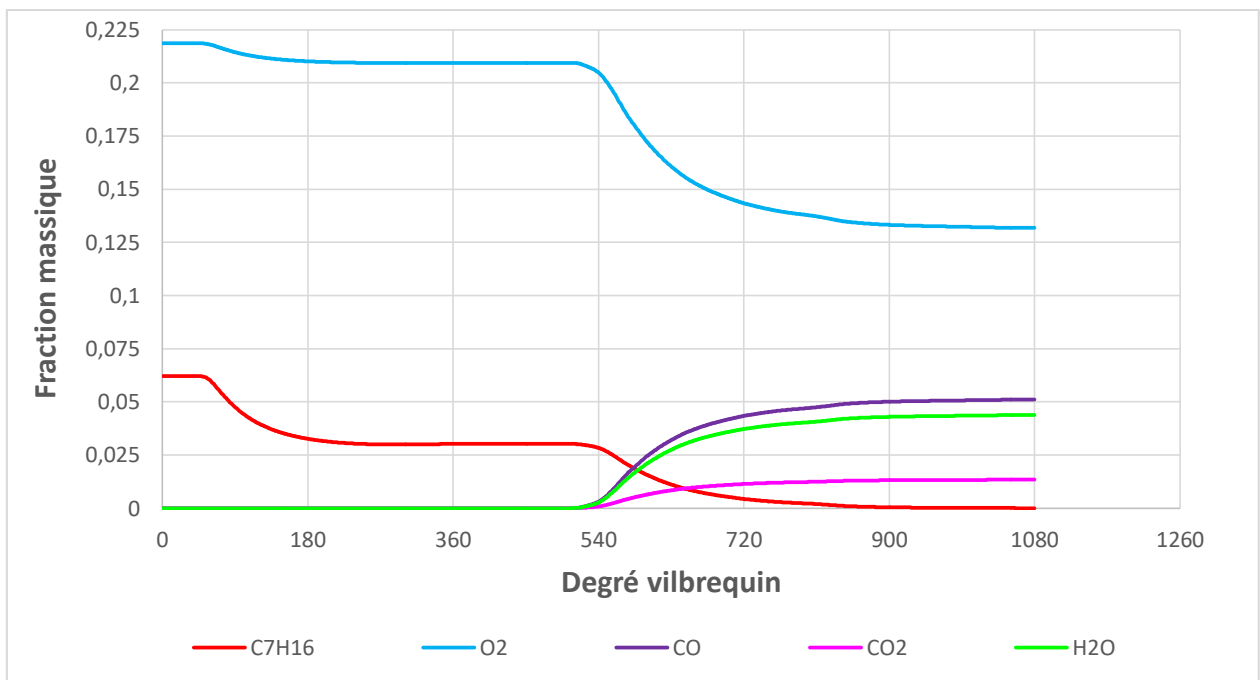


Figure III-6: la variation de la fraction massique en fonction de vilebrequin.

On remarque qu'on a une zone de mélange à peu près de 70 jusqu'à 540 degrés vilebrequin où la combustion démarre, après cette zone le carburant diminue et les produits (CO, CO₂, H₂O) commencent à augmenter à la fin du cycle jusqu'à 1080 degrés.

Chapitre IV Les capteurs

IV.1 Introduction :

À l'heure actuelle, la conception automobile moderne peut être réalisée à l'aide de différents types de capteurs. Ceux-ci sont disposés dans le moteur de la voiture pour reconnaître et résoudre les problèmes possibles tels que les réparations, l'entretien, etc. Les capteurs utilisés dans les automobiles vérifieront le fonctionnement du véhicule. Le propriétaire d'un véhicule ne connaît pas l'état du nombre de capteurs utilisés dans ses véhicules. Il existe plusieurs plus grandes organisations de capteurs disponibles dans le monde, qui peuvent offrir une solution innovante aux clients. Dans les automobiles récentes, des capteurs sont utilisés pour détecter et réagir aux changements de conditions à l'intérieur et à l'extérieur de la voiture. Pour que les voyageurs dans le véhicule puissent se déplacer efficacement et en toute sécurité. En utilisant ces données de capteurs, nous pouvons augmenter le confort, l'efficacité et la sécurité (27).

Le terme de capteur est devenu courant, au cours des 20 à 40 dernières années, les jauges de mesure ont également fait leur apparition dans les applications grand public (par exemple dans la technologie des véhicules à moteur et des appareils ménagers). Les capteurs - autre terme pour les détecteurs de mesure ou les capteurs de mesure - convertissent une grandeur physique ou chimique (généralement non électrique) F en une grandeur électrique E ; ce processus s'effectue souvent aussi par d'autres étapes intermédiaires non électriques (28).

IV.2 Généralités sur la carte ARDUINO :

IV.2.1 Définition de la carte ARDUINO et son programme de fonctionnement :

La carte ARDUINO est une carte électronique programmable (appelée microcontrôleur) utilisée pour réaliser des montages électroniques. Facile d'utilisation, elle permet de s'initier aisément à l'électronique et à la programmation. Elle devra se connecter sur un ordinateur pour permet la télé versement des commandes à exécuter (le code ou le programme) (29) .

La carte ARDUINO a besoin d'un programme pour faire fonctionner. Ce programme doit être réalisé sur l'ordinateur puis envoyer à la carte ARDUINO. Cette carte fonctionne avec un langage proche de la langue C. Une fois, le programme tapé ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte à travers de la liaison USB. Le câble USB alimente à la fois en énergie la carte et transporte aussi l'information, ce programme appelé IDE ARDUINO (30).

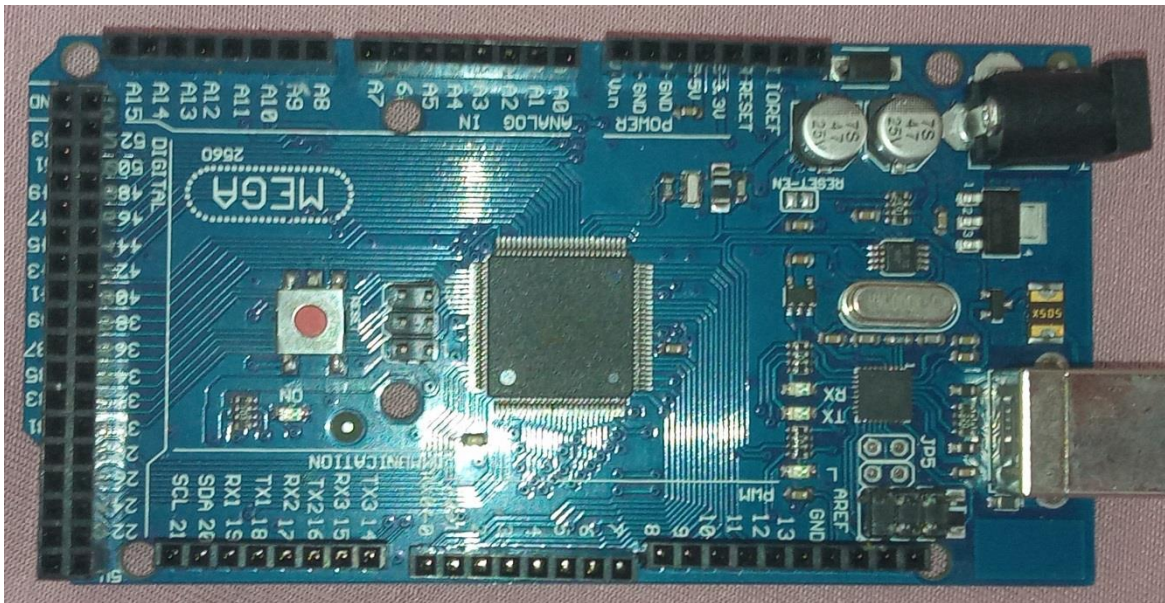


Figure IV-2: Une carte ARDUINO MEGA 2560.

IV.4 Les capteurs :

IV.4.1 Définition générale d'un capteur :

Un capteur est une interface entre un processus physique et une information manipulable. Il ne mesure rien, mais fournit une information en fonction de la sollicitation à laquelle il est soumis. Il fournit cette information grâce à une électronique à laquelle il est associé.

Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données. Leur mise en œuvre est du domaine de l'instrumentation.

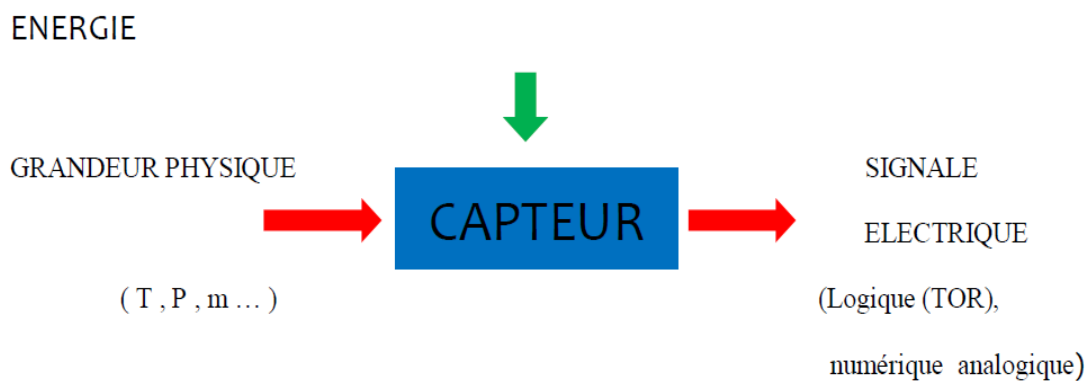


Figure IV-3: Fonctionnement du capteur. (29)

IV.4.2 Définition d'un capteur de voiture :

Un capteur de voiture est un appareil intelligent qui surveille l'état d'un véhicule et envoie des informations à l'utilisateur pour savoir quand des modifications doivent être apportées. Dans certaines situations, il apporte automatiquement des modifications au moteur. L'appareil contrôle un aspect différent d'un véhicule, notamment la température, le système de refroidissement, la pression d'huile, les niveaux d'émission, etc. Les capteurs automobiles sont si intelligents qu'ils acceptent une plage de valeurs, les examinent idéalement et déterminent la condition appropriée. Si le composant qui comporte le capteur est défectueux, il envoie des informations d'avertissement à l'utilisateur. Le capteur est toujours réglé pour remarquer les changements avec les pièces du véhicule. Cela signifie que les capteurs fonctionnent toujours tant que le moteur tourne. La conception initiale du capteur ne fonctionne que sur le moteur, mais il est maintenant avancé qu'il contrôle chaque partie du véhicule, du contrôle de la température à l'intérieur du moteur au composant le moins électrique d'une voiture (32) .

IV.5 Différents types de capteurs :

Il existe de nombreux types de capteurs dans les véhicules modernes de 60 à 100 pour que tout fonctionne comme il se doit, dans la section suivante on va citer quelques-uns :

IV.5.1 Capteur de niveau d'huile moteur :

L'un des capteurs les plus courants dans votre véhicule est le capteur de niveau d'huile moteur. Ce capteur mesure le niveau d'huile dans le carter d'huile de votre moteur pour s'assurer qu'il est à une capacité de fonctionnement sûre. Si vous n'avez pas assez d'huile, ce capteur provoquera un voyant d'avertissement de niveau d'huile sur votre tableau de bord. Ce capteur est souvent installé au fond du carter d'huile, vous devez donc puiser l'huile moteur pour le remplacer. Cela dépend cependant du modèle de moteur.



Figure IV-4: Capteur de niveau d'huile moteur.

IV.5.2 Capteur de pression d'huile moteur :

Le capteur de pression d'huile moteur est souvent assez similaire au capteur de niveau d'huile, sauf qu'il mesure la pression d'huile après la pompe à huile. Vous trouverez souvent ce capteur situé au niveau du bloc moteur, souvent près du filtre à essence. Le capteur de pression d'huile moteur comporte souvent des pièces en plastique qui peuvent se fissurer avec l'âge, ce qui peut provoquer une fuite avant qu'il ne fonctionne mal. Vous remarquerez surtout un mauvais capteur de pression d'huile en voyant un voyant rouge de pression d'huile sur votre tableau de bord.



Figure IV-5: Capteur de pression d'huile moteur.

IV.5.3 Capteurs de température du liquide de refroidissement :

Un autre capteur critique dans votre moteur est le capteur de température du liquide de refroidissement. Ce capteur surveille la température de votre liquide de refroidissement, ce qui est un excellent moyen de déterminer la température globale de votre moteur. S'il fait trop chaud, le moteur peut être endommagé. Dans certains modèles de voitures plus récents, la température du liquide de refroidissement devrait éteindre votre moteur une fois qu'il atteint une température suffisamment élevée.



Figure IV-6: Capteurs de température du liquide de refroidissement.

IV.5.4 Capteur de débit d'air massique :

Le moteur de votre véhicule doit connaître la quantité d'air entrant afin d'optimiser le rapport de carburant pour des performances maximales. Votre capteur de débit d'air massique (MAF) mesure la quantité d'air passant par l'admission, il sait donc combien il rentre. Le capteur MAF est souvent situé sur le tuyau d'admission entre votre collecteur d'admission et le boîtier du filtre à air.



Figure IV-7: Capteur de débit d'air massique (33).

IV.5.5 Capteur de température d'air d'admission :

Croyez-le ou non, la température de l'air entrant dans le moteur est un élément essentiel pour maximiser les performances du moteur. C'est pourquoi le capteur de température d'air d'admission (IAT) indique à l'ECM la température de l'air, afin qu'il effectue des ajustements et maximise les performances. Le capteur IAT peut être soit séparé, soit intégré au capteur MAF. L'intégration dans le capteur MAF est beaucoup plus courante sur les modèles de voitures plus récents.



Figure IV-8: Capteur de température d'air d'admission.

IV.5.6 Capteurs de cliquetis :

Les capteurs de cliquetis sont là pour s'assurer que votre moteur ne souffrira pas de détonation ou de ce qu'on appelle le cliquetis. Une détonation ou un cliquetis dans un moteur de voiture est fatal pour les pièces internes, entraînant une réparation très coûteuse. Cela peut également provenir de ratés d'allumage ou de composants cassés, mais si le capteur de cliquetis de votre moteur entend quelque chose, vous avez un problème.



Figure IV-9: capteur de cliquetis. (34).

IV.5.7 Capteurs de position de vilebrequin/arbre à cames :

Le calage du moteur repose sur une symphonie parfaite entre le vilebrequin et l'arbre à cames - et leurs capteurs de position respectifs permettent à l'ECM de savoir précisément où chacun se trouve. Si ces positions ne correspondent pas à ce qu'elles devraient être, vous devez le savoir dès que possible. Vous avez souvent un capteur sur l'arbre à cames et un sur le vilebrequin. Cependant, certains modèles de voitures n'ont qu'un capteur de position de vilebrequin.



Figure IV-10: capteur vilebrequin (35).



Figure IV-11 : capteur arbre à cames (36).

IV.5.8 Capteur de position du papillon :

De nos jours, la connexion entre la pédale d'accélérateur et le corps de papillon est entièrement connectée par l'électronique au lieu d'un câble. Par conséquent, sur le corps de papillon, il y a un capteur de position du papillon pour mesurer l'angle du volet des gaz. Le capteur de position du papillon indique à l'ECM à quel point le papillon est ouvert. De cette façon, s'il y a un problème entre la pédale et l'accélérateur, il ne videra pas une tonne de carburant et n'endommagera pas le moteur à cause d'un accélérateur collant.



Figure IV-12: Capteur de position du papillon (37).

IV.5.9 Capteur de pression de carburant :

Le capteur de pression de carburant mesure la pression de carburant sur votre conduite de pression de carburant ou au niveau de la rampe de pression de carburant. Il est le plus susceptible d'être monté sur votre rampe de pression de carburant, mais parfois il peut également être monté sur la conduite de pression de carburant. Il est essentiel que le module de commande du moteur mesure la pression de carburant, car une augmentation de la pression entraînerait un mélange de carburant plus riche et une pression plus basse entraînerait un mélange de carburant plus pauvre. Le capteur lui-même est souvent assez bon marché, mais il peut être difficile de le remplacer si vous n'êtes pas un mécanicien expérimenté. (Une grande quantité de carburant peut s'échapper).



Figure IV-13: Capteur de pression de carburant.

IV.5.10 Capteur No_x :

Le capteur No_x mesure le volume de No_x dans les gaz d'échappement. Ce capteur n'est pas installé dans de nombreux modèles de voiture. Vous pouvez généralement les trouver chez Volkswagen, Audi, Seat et Skoda. Le capteur No_x est installé sur le tuyau d'échappement et l'unité de commande sous un couvercle en plastique. Pour remplacer le capteur NO_x, vous devez souvent remplacer l'unité de commande pour lui aussi, malheureusement. L'unité de contrôle et le capteur sont souvent coûteux, et le remplacement peut être un peu délicat, car le capteur a tendance à rouiller et à se coincer.



Figure IV-14: Capteur Nox.

IV.5.11 Capteur de température d'échappement :

Le capteur de température d'échappement est souvent installé dans les moteurs diesel. Son but est de mesurer la température des gaz d'échappement avant et après le filtre à particules pour optimiser la régénération du filtre à particules. Selon le modèle de moteur du véhicule, vous disposez souvent de 1 à 4 capteurs de température des gaz d'échappement. Les capteurs sont installés sur le tuyau d'échappement et le collecteur d'échappement, et parfois aussi sur le turbocompresseur. Les capteurs sont souvent assez chers et peuvent être difficiles à atteindre et à remplacer ; ils rouillent souvent et se coincent.



Figure IV-15: Capteur de température d'échappement. (38).

IV.6 Partie pratique :

IV.6.1 Capteur de gaz(MQ2) :

Le MQ-2 est un capteur qui permet de détecter du gaz ou de fumée à des concentrations de 300 ppm à 10000 ppm. Après calibration, le MQ-2 peut détecter différents gaz comme le GPL, l'i-butane, le propane, le méthane, l'alcool, l'hydrogène ainsi que les fumées. Il est conçu pour un usage intérieur à température ambiante. Le MQ2 doit être alimenté en 5V pour le capteur physico-chimique puisse atteindre sa température de fonctionnement. Il dispose d'une sortie analogique et d'un réglage de la sensibilité par potentiomètre.(3)

A. Caractéristiques : (39).

- La tension de fonctionnement est de +5V
- Peut être utilisé pour mesurer ou détecter le GPL, l'alcool, le propane, l'hydrogène, le CO et même le méthane
- Tension de sortie analogique : 0V à 5V
- Tension de sortie numérique : 0 V ou 5 V (Logique TTL)
- Durée de préchauffage 20 secondes
- Peut être utilisé comme capteur numérique ou analogique
- La sensibilité de la broche numérique peut être modifiée à l'aide du potentiomètre

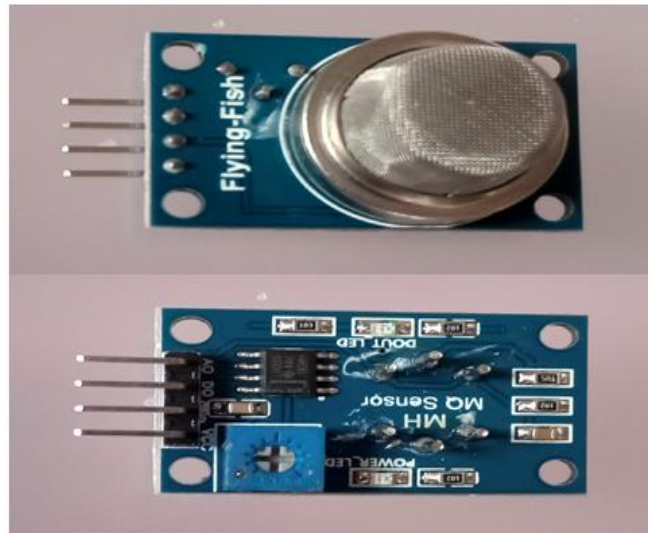


Figure IV-16: Capteur MQ2

B. Matériel nécessaire pour tester le MQ-2 sur un ARDUINO : (40).

Pour ce tutoriel vous aurez besoin du matériel suivant :

- 1x ARDUINO MEGA 2560
- 1x Breadboard (optionnel)
- 1x Détecteur de gaz MQ-2
- Quelques câbles Dupont M/M

C. Circuit :

Les différents pins d'un capteur MQ2 sont :

- VCC: alimentation positive
- (5V) GND: alimentation négative
- D0: sortie du signal du commutateur TTL
- A0: sortie du signal analogique

Quatre trous de vis pour un positionnement facile

Dimensions : 32 x 22 x 27mm

Connectez les 4 broches du capteur à L'ARDUINO en suivant le schéma de câblage suivant :

- Reliez les Pins Vcc et GND du capteur au 5V et au GND de l'ARDUINO.
- Reliez le Pin A0 du capteur à l'entrée analogique A1 de l'ARDUINO.
- Reliez le Pin D0 du capteur à l'entrée digitale 1 de l'ARDUINO.

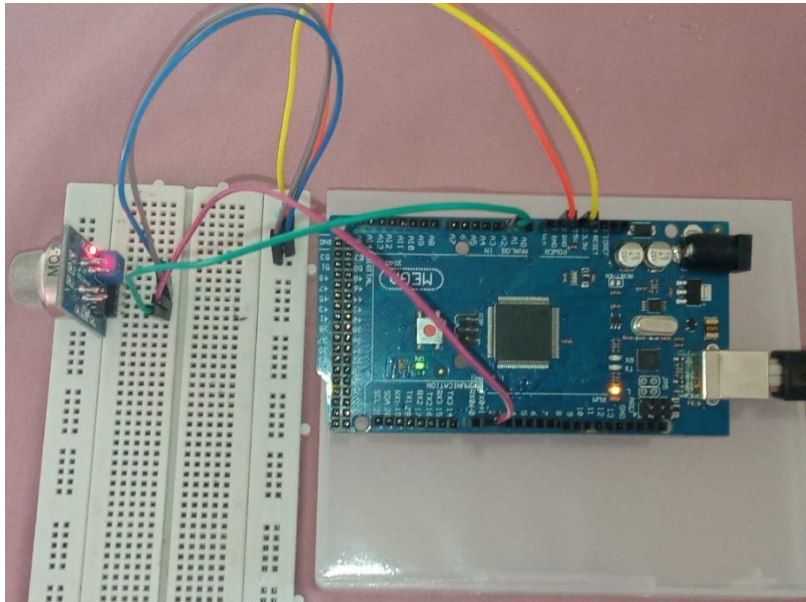


Figure IV-17: test de MQ-2 sur ARDUINO.

D. Code de base :

C'est le code qui permet de tester le MQ-2. Par défaut, la sortie analogique du MQ-2 est connectée à l'entrée analogique A0 de l'ARDUINO.

```

GAZ_CO $
#define pinAnalogGaz1 1
#define pindigitalGaz1 1
//Type capteur gaz
class capteurGaz{
private: int pinAnalog;
private: int pinDigital;

public: capteurGaz(int pinA, int pinD){
    pinAnalog = pinA;
    pinDigital = pinD;
}
public: float Mesure() {
    float gaz = analogRead(pinAnalog);
    return gaz;
}
public: float MesureV() {
    float gaz = Mesure();
    return gaz*5/1023;
}
public: float MesurePPM() {
    float gaz = MesureV();
    float PPM = -2828.6 * gaz +4242.9;//calibration pour le CO
    return PPM;
}
};
//Fin type capteur GAZ
capteurGaz GAZ01 = capteurGaz(pinAnalogGaz1, pindigitalGaz1);
void setup() {

..
//Fin type capteur GAZ
capteurGaz GAZ01 = capteurGaz(pinAnalogGaz1, pindigitalGaz1);
void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    Serial.begin(9600);
    pinMode(pindigitalGaz1, INPUT);
    //GAZ01 = new GAZ01(pinAnalogGaz1, pindigitalGaz1);
}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
    Serial.print("mesure Gaz  en bits  [0 a 1023] =");
    Serial.println( GAZ01.Mesure());

    Serial.print("mesure Gaz  en volte [0 à 5] =");
    Serial.println( GAZ01.MesureV());
    Serial.print(" calibration de mesure Gaz en uinte (PPM) =");
    Serial.println( GAZ01.MesurePPM());

    delay(1000);
}

```

E. Comment déterminer la concentration de monoxyde de carbone gazeux à l'aide de MQ-2

Pour détecter la présence d'un gaz Monoxyde de carbone (CO), on calcule le ratio entre la résistance initiale (R0) et la résistance (le signal analogique lu par l'ARDUINO) que le MQ2 renvoie à tout moment (Rs).

Connaissant ce ratio, on utilise la courbe théorique ci-dessous pour déterminer la quantité de ppm de Monoxyde de carbone (CO) gazeux.

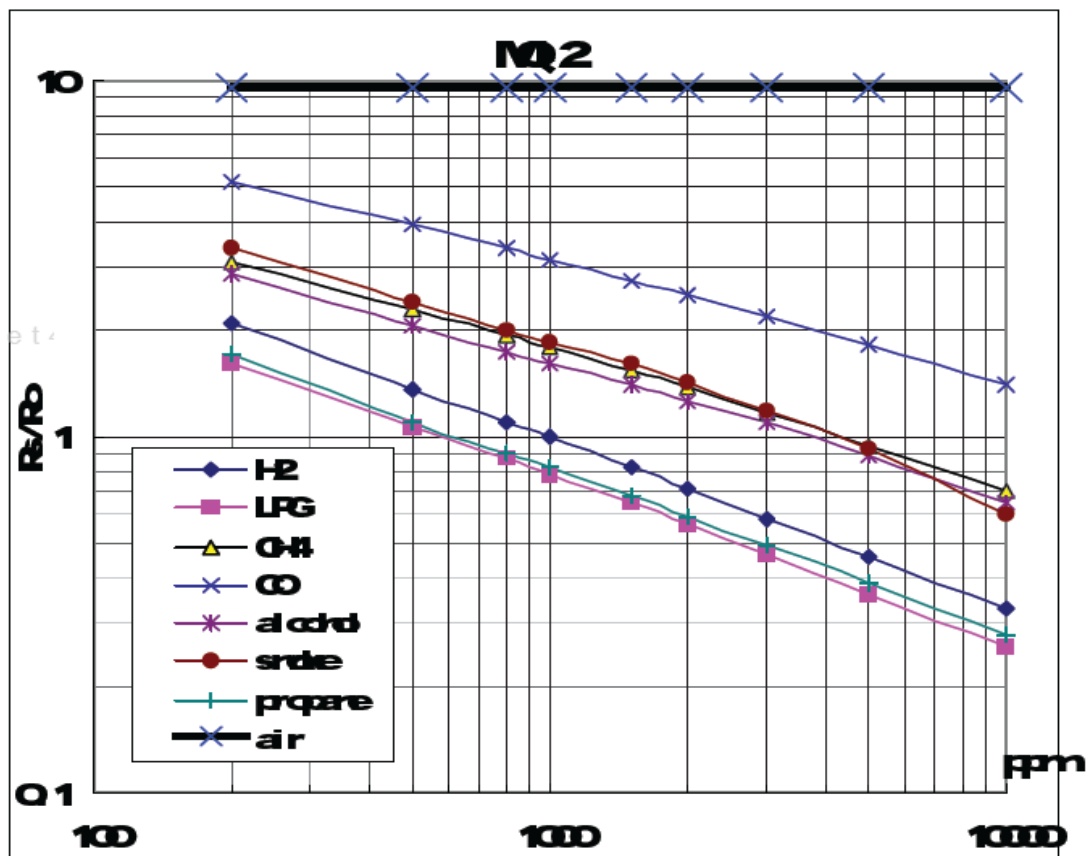


Figure IV-18: caractéristique de sensibilité du MQ-2 pour plusieurs gaz. (40).

Avec (R0 : résistance du capteur à 1000 ppm de H2 dans l'air pur. Rs: résistance du capteur à diverses concentrations de gaz).

Ici par exemple, le ratio $R_s/R_0 = 2$, on lit une concentration en monoxyde de carbone gazeux de 4000 ppm sur la courbe bleue de (CO).

Calibration de monoxyde de carbone gazeux dans le programme :

```

public: float MesurePPM() {
    float gaz = MesureV();
    float PPM = (-2828.6 * gaz) + 4242.9; //calibration pour le CO
    return PPM;
}

```

IV.6.2 Capteur température LM35 DZ :

Le capteur de température LM35 est un capteur analogique de température fabriqué par Texas Instruments. Il est extrêmement populaire en électronique, car précis, peu coûteux, très simple d'utilisation et d'une fiabilité à toute épreuve.

Le capteur de température LM35 est capable de mesurer des températures allant de -55°C à $+150^{\circ}\text{C}$ dans sa version la plus précise et avec le montage adéquat, de quoi mesurer n'importe quelle température (32).

A. Matériel nécessaire pour tester le LM35 DZ sur un ARDUINO :

Pour réaliser ce montage, il va nous falloir :

- Une carte ARDUINO MEGA 2560 (et son câble USB),
- Un capteur LM35 (attention, il existe plusieurs versions, voir l'encadré ci-dessous),
- Une plaque d'essai et des fils pour câbler notre montage.

B. Les principales caractéristiques des capteurs LM35 : (41).

Caractéristique	LM35
Grandeur physique mesurée	Température en $^{\circ}\text{C}$
Type de sortie	Analogique
Plage de mesures	$-55^{\circ}\text{C} \dots 150^{\circ}\text{C}$
Sensibilité	$10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

Tableau IV-1: Les principales caractéristiques des capteurs LM35.

C. Circuit :

Les différents pins d'un capteur LM35 sont :

- VCC: alimentation positive
- (5V) GND: alimentation négative
- A0: sortie du signal analogique

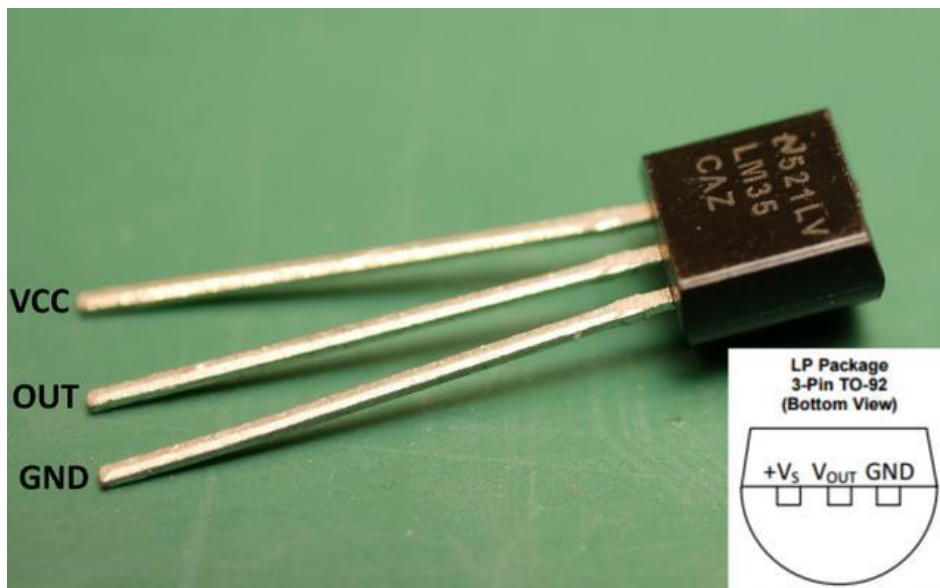


Figure (20) : Brochage du capteur LM35 (32).

Connectez les 3 broches du LM 35 à l'ARDUINO en suivant le schéma de câblage suivant :

- Reliez les Pins Vcc et GND du capteur au 5V et au GND de l'ARDUINO.
- Reliez le Pin A0 du capteur à l'entrée analogique A1 de l'ARDUINO.

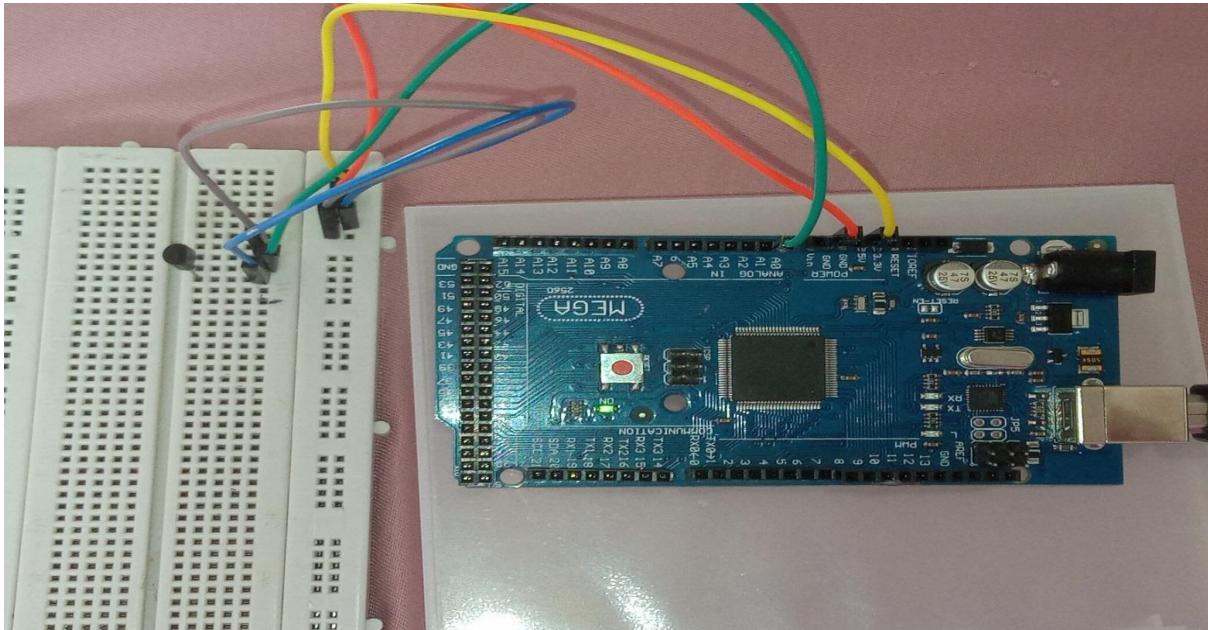


Figure IV-19: test de LM35 sur ARDUINO.

D. Code de base :

C'est le code qui permet de tester le LM35 par défaut, la sortie analogique du LM35 est connectée à l'entrée analogique A0 de l'ARDUINO.

```

Téléverser
Temperature §
#define pinTemperature 0
//Partie température
float calibtemp(int mesure ) {
    return mesure * 0.48828125; CALIBRATION
}
//Mesure Température

float MesureTemp() {
    int mesure = analogRead(pinTemperature);
    float temperature = calibtemp( mesure );
    return temperature;
}

void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    Serial.begin(9600);
    //pinMode(pindigitalGaz1, INPUT);
    pinMode(pinTemperature, INPUT);
}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
    //Afficher Temperature Ambiante
    Serial.print("mesure temperature");
    Serial.println(MesureTemp());
    delay(1000);
}

```

IV.6.3 Capteur thermocouple type k :

Un thermocouple est un composant électronique ou plus précisément un capteur qui sert à mesurer la température.

Un thermocouple deux fils constitués de deux types de matériaux différents « métaux ». Les deux fils métalliques sont soudés ensemble à une extrémité qui crée un point de jonction. La température est mesurée à ce point de jonction. Un changement de température à ce point de jonction entraîne la tension. Cette tension est ensuite utilisée pour calculer la température à l'aide de certaines tables ou d'un module comme max6675.

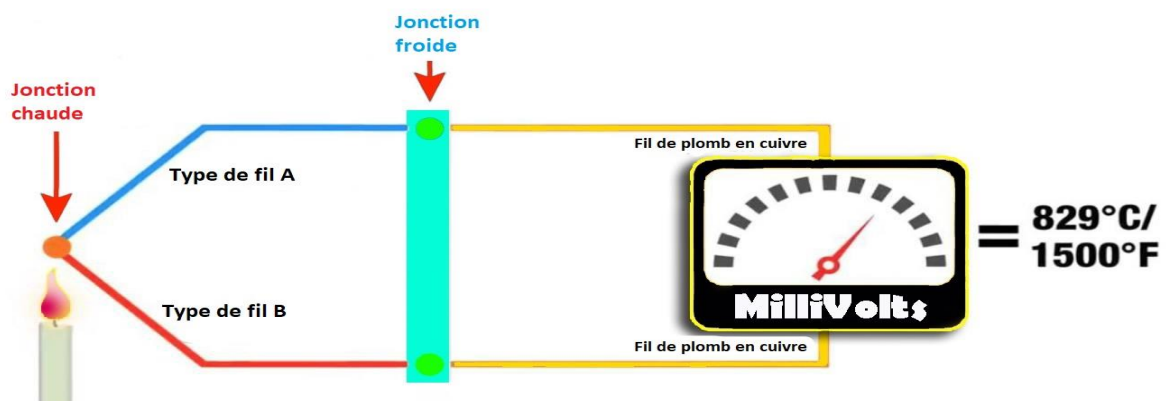


Figure IV-20: Architecture d'un thermocouple. (42)

Le thermocouple de type K est le thermocouple le plus couramment utilisé. Ceci est assez célèbre parmi tous les professionnels en raison de son coût, de sa précision, de sa fiabilité et en plus de tout cela, il a une large plage de température. Ce capteur de température peut être utilisé dans les machines de moulage par injection plastique, les appareils de chauffage, etc. C'est la raison pour laquelle j'ai sélectionné ce type de thermocouple et décidé de faire un tutoriel détaillé sur le thermocouple de type k. Plus tard, j'utiliserai ce capteur dans une machine de moulage par injection plastique.

Plage de température du thermocouple de type K : Nickel-Chrome / Nickel-Alumel

Écart de température : -270 à 1260C

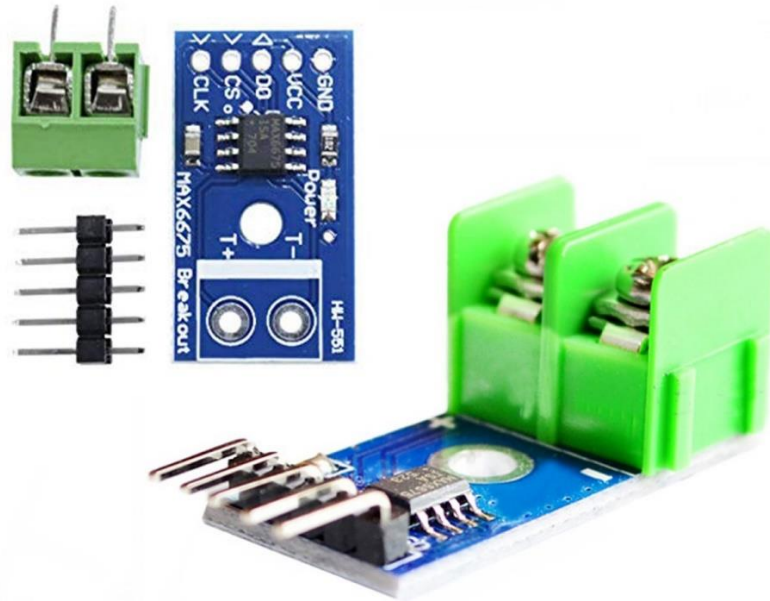
A. Module MAX6675 :

Figure IV-21: Amplificateur MAX6675. (42)

Voici à quoi ressemble le module de dérivation MAX6675. Le max6675 est un amplificateur de capteur de température à thermocouple. La capacité de résolution de température du module de dérivation max6675 est de 0,25 degré.

IV.6.3.1 Spécifications de la fiche technique MAX6675 :

Tension de fonctionnement : 0 à 5,5 volts

Courant : 50 milliampères

Comme vous pouvez le voir sur l'image ci-dessus, toutes les broches sont clairement étiquetées GND, VCC, D0, CS, CLK, + et -.

Les deux fils du thermocouple sont livrés avec les manchons Rouge et Bleu. Le rouge est connecté à la borne + du module max6675 tandis que le fil bleu est connecté à la borne - du module de dérivation max6675.

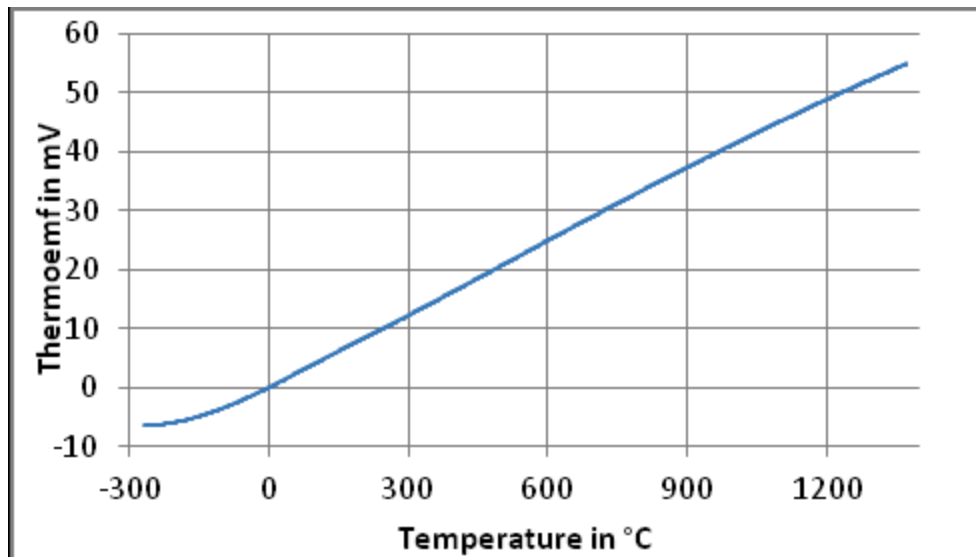


Figure IV-22: Thermo-emf par rapport à la température pour le thermocouple de type K. (43)

```

max_6675thermocouple2.HEX $
#include "max6675.h"
int thermoDO = 4; // so
int thermoCS = 5; //
int thermoCLK = 6; // sck

float temp1 = 0;
MAX6675 thermocouple(thermoDO,thermoCS ,thermoCLK );
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  delay(500);
}
void loop() {
  Serial.println(thermocouple.readFahrenheit());
  temp1 = thermocouple.readCelsius();
  Serial.print("Temp: ");
  // adjust the following conditions according to the temperature we want to set .
  if(temp1 < 40 )
  {
    Serial.println("normal");
    delay(1000);
  }
  if(temp1 > 40)
  {
    Serial.println("High");
    delay(1000);
  } else
  delay(500);
}

```

IV.6.4 Capteur d'oxygène :

Les capteurs d'oxygène, également appelés capteurs Lambda, mesurent le mélange air-carburant à partir de l'échappement et l'efficacité du convertisseur catalytique (CAT). Un capteur d'oxygène mesure la composition de l'air avant le CAT et l'autre mesure la composition de l'air après le CAT. S'il n'y a pas suffisamment de changement des émissions, il indique à l'ECM que vous devez effectuer des réparations en affichant un voyant de contrôle du moteur sur votre tableau de bord (38).



Figure IV-23: la sonde lambda et sa composante.

- La tension sonde varie donc suivant l'état du mélange pauvre ou riche.
- Cette tension varie entre 0,1 Volt à l'état pauvre et 0,9 Volts à l'état riche.

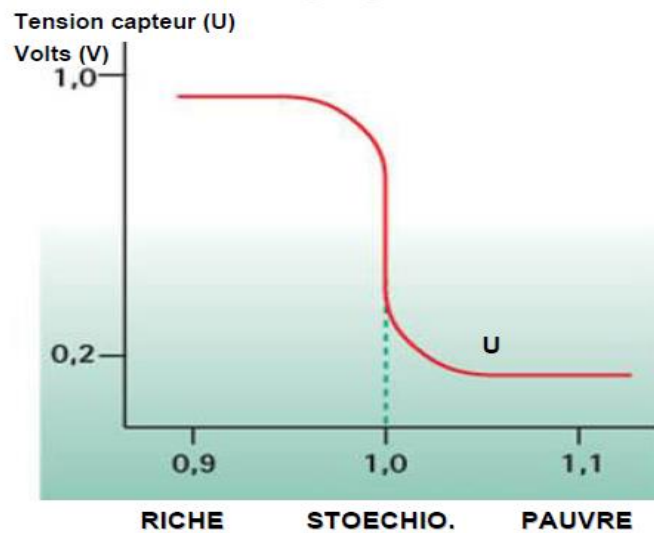


Figure IV-24: Courbe de calibration de sonde lambda (44) .

Cette tension varie entre 0,1 volt à l'état pauvre et 0,9 volt à l'état riche.

A. Code de base :

```

Sonde_Lambda
#define pinAnalogSonde_lambda 1
//Type sonde Lambda
class SondeLambda{
private: int pinAnalog;
public: SondeLambda(int pinA){
    pinAnalog = pinA;
}
public: float Mesure() {
    float volt = analogRead(pinAnalog);
    return volt;
}
public: float MesureV() {
    float volt = Mesure();
    return volt*(5/1024);
}
};
SondeLambda GAZ_O2 = SondeLambda(pinAnalogSonde_lambda);
void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    Serial.begin(9600);
}
void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
    Serial.print("mesure Gaz en bits [0 a 204] =");
    Serial.println( GAZ_O2.Mesure());
    Serial.print("mesure Gaz en volte [0 à 1] =");
    Serial.println( GAZ_O2.MesureV());
    //GAZ_O2= analogRead();
    if(GAZ_O2.Mesure() < 0.5)

```

```
// put your setup code here, to run once:
Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  Serial.print("mesure Gaz  en bits  [0 a 204] =");
  Serial.println( GAZ_O2.Mesure());
  Serial.print("mesure Gaz  en volte [0 à 1] =");
  Serial.println( GAZ_O2.MesureV());
  //GAZ_O2= analogRead();
  if(GAZ_O2.Mesure() < 0.5)
  {
    Serial.println("melange  pauvre");}
  else
    Serial.println("melange  riche");
  delay(1000);
}
```

IV.7 Conclusion :

Les capteurs sont un moyen de tester les objets physiques qui nous entourent, tels que la température, la concentration de gaz, etc.

Les capteurs varient en fonction de leurs composants internes et de l'endroit où ils sont utilisés, et la plupart des capteurs que nous avons étudiés nécessitent du courant pour fonctionner.

Les capteurs doivent être programmés afin d'être personnalisés pour mesurer, et afin d'avoir des résultats dans un ordinateur ou un autre appareil numérique qui affiche les résultats obtenus à partir d'un capteur.

Conclusion générale

La pollution atmosphérique et le réchauffement climatique provoqué par les émissions de gaz à effet de serre sont devenus un des sujets de première importance dans le monde entier. La contribution des moteurs à ce fléau est importante. Un grand nombre de travaux de recherches ont été menés dans le but d'identifier des sources d'énergie de substitution plus écologiques que les produits pétroliers conventionnels. Le présent travail est consacré à l'étude de monitoring des gaz d'échappement des moteurs à combustion interne. L'étude est basée sur l'approche de simulation numérique cette étude émane de la nécessité de comprendre et de maîtriser le code de calcul Fluent utilisé pour plusieurs types de simulation numérique. Tout d'abord on a installé le logiciel Fluent. Ensuite, on a utilisé un autre logiciel (ARDUINO) pour faire programmer des capteurs.

Dans la première partie de ce travail, on a présenté une généralité sur les moteurs à combustion interne. Ensuite, le second chapitre est consacré aux détails des formations des polluants. Le troisième chapitre décrit d'une façon générale les équations de continuités et des modèles de turbulences ainsi la combustion. Après on a introduit notre résultat de simulation dans le quatrième chapitre qui contient la méthode de travail sur Fluent. Le dernier chapitre présente la préparation expérimentale de dispositif d'acquisition de données liées aux paramètres d'échappement notamment la formation de gaz polluants, pour cela plusieurs capteurs ont été préparés et programmés.

La simulation a été conduite en utilisant le modèle de turbulence KE, le modèle de combustion EDM ainsi que la réaction globale de l'heptane, les résultats de la simulation présentent une solution proche du comportement réel du moteur à combustion interne. Cependant, les ajustements des paramètres, tels que la richesse, la température de refroidissement, l'instant d'allumage et la concentration des différents gaz présents à l'échappement, apportent plus de précisions aux modèles utilisés.

Références

1. **Pulkrabek, Willard W.** *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Upper Saddle River, New Jersey 07458 : Prentice Hall, 1997.
2. **Colin R. Ferguson, Allan T. Kirkpatrick.** *Internal Combustion Engines Applied Thermosciences*. Colorado State University, USA : John Wiley & Sons, Ltd, 2016. 978-1-118-53331-4.
3. **Hege, John B.** *The Wankel rotary engine: A History*. California, USA : MC Farland, 2015.
4. **Taylor, Charles Fayette.** *The Internal Combustion Engine in Theory and Practice, Volume 2 - Combustion, Fuels, Materials, Design*. Cambridge, London : MIT Press, 1985.
5. **Robert Bosch GmbH.** *Automotive Handbook, 6th . s.l. : Wiley–Blackwell, 2004.*
6. [En ligne] <https://maxhjeems.weebly.com/week-3.html>.
7. **Heywood, John.** *Internal Combustion Engine Fundamentals 2nd. s.l. : McGraw-Hill Education, 2018. 978-1-26-011611-3.*
8. [En ligne] <https://quizlet.com/256731324/engine-parts-diagram/>.
9. [En ligne] <https://www.engineeringchoice.com/the-car-engine-parts/>.
10. **MacKenzie, John Heywood and Don.** *On-the-Road-toward-2050. s.l. : Massachusetts Institute of Technology, 2015. 978-0-9962185-0-4.*
11. **SCIENCING.** [En ligne] <https://sciencing.com/types-pollutants-5270696.html>.
12. [En ligne] [Citation : 28 05 2021.] <https://www.polyignes.fr/environnement/les-effets-des-polluants-des-voitures-sur-lenvironnement-10339.html>.
13. **CATON, JERALD A.** *An Introduction to Thermodynamic Cycle Simulations for Internal Combustion Engines*. Texas, USA : John Wiley & Sons, 2016. 978-1-119-03756-9 (cloth).
14. **x-engineer.** [En ligne] [Citation : 17 05 2021.] <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/performance/effects-of-vehicle-pollution-on-human-health/>.
15. **Onder, Lino Guzzella and Christopher H.** *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Zürich, Switzerland : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 978-3-642-10774-0.
16. **toppr.** [En ligne] [Citation : 17 05 2021.] <https://www.toppr.com/guides/chemistry/environmental-chemistry/air-pollution/>.
17. [En ligne] [Citation : 18 05 2021.] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DI5uGsvTiC8U&psig=AOvVaw30isMh7IDzJMuwQ8zjyKbf&ust=1622677047563000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCIjT65vN9_ACFQAAAAAdAAAAABAJ.

18. [En ligne] [Citation : 18 05 2021.] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.sanair.com%2Fwhat-is-the-difference-between-carbon-black-and-soot%2F&psig=AOvVaw0OzYICScQmnzO4tHGsfH5U&ust=1622677253881000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCOil-vzN9_ACFQAAAAAdAAAAABAV.
19. [En ligne] [Citation : 18 05 2021.] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Frefiningcommunity.com%2Fsulfur-recovery-fact-soot%2F&psig=AOvVaw0OzYICScQmnzO4tHGsfH5U&ust=1622677253881000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCOil-vzN9_ACFQAAAAAdAAAAABAb.
20. [En ligne] [Citation : 18 05 2021.] https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj5krmhz_fwAhUOIBQKHRrpDd0QFnoECAQQA&url=http%3A%2F%2Fwww4.ac-nancy-metz.fr%2Fautocompetences%2F2_ressources_pedagogiques%2F1_motorisation%2Fstockage_le%25E7ons_tech.
21. Prakash Kumar Sen, Lakhan Puri Goswami, Shailendra Kumar Bohidar. *EFFECT OF CATALYTIC CONVERTER AND EGR SYSTEM ON EMISSION CHARACTERISTIC OF IC ENGINE*. s.l. : International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, 2015.
22. [En ligne] [Citation : 20 05 2021.] <https://www.vroomly.com/blog/vanne-egr-fonctionnement-duree-de-vie-et-prix/>.
23. [En ligne] [Citation : 20 05 2021.] <http://www.mineralinfo.fr/ecomine/impacts-normes-antipollution-demande-mondiale-en-platinoides-cas-platine-palladium-rhodium>.
24. [En ligne] [Citation : 21 05 2021.] <https://changeformblue.com/fr/actus-vehicules-adblue/les-normes-euros-sur-les-vehicules-quest-ce-que-cest/>.
25. [En ligne] [Citation : 21 05 2021.] <https://www.ecologie.gouv.fr/normes-euros-demissions-polluants-vehicules-lourds-vehicules-propres>.
26. [En ligne] [Citation : 21 05 2021.] https://fr.wikipedia.org/wiki/Normes_europ%C3%A9ennes_d%27%C3%A9missions.
27. [En ligne] [Citation : 31 05 2021.] <https://www.elprocus.com/different-types-of-sensors-used-in-automobiles/>.
28. GmbH, Robert Bosch. *Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics Systems and Components*. Plochingen, Germany : Robert Bosch GmbH, 2007. 978-3-658-01783-5.
29. [En ligne] [Citation : 15 06 2021.] <https://fr.wikidia.org/wiki/Arduino>.
30. Riadh, ZERROUKI Mohamed Amine et NESNAS. *CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN SYSTÈME DE COMMANDE D'UNE HABITATION*. Tizi ousou : ZERROUKI Mohamed Amine et NESNAS Riadh ; CONCEPTION ET RÉALISATUNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE DEPARTEMENT ELECTRONIQUE , 2018.
31. [En ligne] [Citation : 15 06 2021.] <https://info-guit.pagesperso-orange.fr/info16.html>.

32. [En ligne] [Citation : 17 06 2021.] <https://www.carnetdumaker.net/articles/mesurer-une-temperature-avec-un-capteur-lm35-et-une-carte-arduino-genuino/>.
33. [En ligne] [Citation : 17 06 2021.] <https://www.yakarouler.com/p/capteur-de-cliquetis-bosch-0261231173..>
34. [En ligne] [Citation : 12 06 2021.]
https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.mecatechnic.com%2Ffr%2Fcapteur-de-cliquetis-porsche-997-sondes-capteurs-debitre~997-MOT-SON-CLI.htm&psig=AOvVaw37Zjws1lQg7FHkrquE_fnV&ust=1624045275370000&source=images&cd=vfe&ved=0CAcQjRxqFwoTCIC.
35. [En ligne] [Citation : 12 06 2021.]
https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.fiches-auto.fr%2Farticles-auto%2Ffonctionnement-d-une-auto%2Fs-1700-le-capteur-pmh-vilebrequin.php&psig=AOvVaw2siSHL-9U0Qj6Gep0jpUqU&ust=1624041785059000&source=images&cd=vfe&ved=0CAcQjRxqFwoTCIDQiLOqn_.
36. [En ligne] [Citation : 12 06 2021.]
https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.hella.com%2Ftechworld%2Ffr%2Ftechnique%2Fcapteurs-%26-Actionneurs%2Fcapteur-d-arbre-a-comes-3899%2F&psig=AOvVaw1pEhswRfg55H3q-UQ37bNm&ust=1624041894108000&source=images&cd=vfe&ved=0CAcQjRxqFwoTCPiX_tap.
37. [En ligne] [Citation : 12 06 2021.]
https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.facet.eu%2Ffr%2Fproduits%2Fcapteurs%2Fcapteurs-de-position-du-papillon%2F&psig=AOvVaw30oLIAiTvOPY3SpeH8Y0FO&ust=1624042123541000&source=images&cd=vfe&ved=0CAcQjRxqFwoTCMC4gNuqn_ECFQAAAAAdAAAAABAO..
38. [En ligne] [Citation : 02 06 2021.] <https://mechanicbase.com/engine/car-sensors/>.
39. [En ligne] [Citation : 16 06 2021.] [https://www.orbit-dz.com/product/mq2/..](https://www.orbit-dz.com/product/mq2/)
40. [En ligne] [Citation : 16 06 2021.] <https://projetsdiy.fr/utiliser-detecteur-gaz-fumees-mq2-code-arduino/>.
41. [En ligne] [Citation : 17 06 2021.]
<https://www.ukonline.be/cours/embeddedsystemes/digitaltransmission/chapitre2-3>.
42. [En ligne] [Citation : 19 06 2021.] <https://www.electronicclinic.com/k-type-thermocouple-max6675-and-arduino-based-temperature-monitoring/>.
43. *CyThermocouple_V_1.10_001-84997*. s.l. : CYPRESS PERFORM.
44. [En ligne] [Citation : 15 06 2021.]
https://www.guzzitek.org/documents/lambda/SondeLambda_PotCatalytique_MAJ01.pdf.