

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



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN DE CYCLE MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

Thème

Effets des gaz d'échappement des automobiles sur
l'environnement – Étude comparative des émissions
des moteurs à Essence, Diesel et à Gaz

Préparé par :

GHENOUMAT Ikram et ZGHIDA Fatiha

Soutenu publiquement le : 30 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M. SAD CHEMLOUL Nord-Eddine	Professeur (UIK. Tiaret)	Président
M. BOUZOUINI Mohammed	Maître Assistant "A" (UIK. Tiaret)	Examineur
M. MAZARI Djamel	Maître Assistant "A" (UIK. Tiaret)	Examineur
M. ELGUERRI Mohamed	Maître de Conférences "A" (UIK. Tiaret)	Encadrant

Année universitaire : 2021 – 2022

REMERCIEMENTS

Nos louanges et nos gratitude intarissables vont en premier lieu à ALLAH, que son nom soit exalté, le tout-puissant qui nous a prodigué le courage, la volonté et la patience afin d'accomplir cette modeste œuvre.

*Nos très grandes reconnaissances vont à notre cher encadreur, **Dr. ELGUERRI Mohamed** qu'avec son noble esprit scientifique et sa modestie sans égale, nous a inculqué les vraies valeurs de l'homme du savoir qui par sa patience, sa loyauté scientifique et morale a su diriger avec une si parfaite habileté ce présent travail.*

On tient également à remercier Mr SAD CHEMLOUL Nord-Eddine d'avoir accepté de présider le jury de notre projet de fin de cycle.

On remercie Mr BOUZOUINI Mohammed et Mr MAZARI Djamel qu'ont bien voulu examiner notre travail. Leur présence va valoriser, de manière certaine, le travail que nous avons effectué.

On tient à remercier aussi nos collègues de graduation qui nous ont toujours encouragé et partagé avec nous de précieux moments de discussions fructueuses qui étaient toujours utiles pour l'avancement du travail de ce mémoire.

DÉDICACES

Avant toute chose, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience durant la réalisation de ce modeste travail. Je dédie ce travail :

À mes parents, Merci pour votre amour, votre affection, vos encouragements, sacrifices...que Dieu vous garde.

À toutes les personnes qui me sont chères.

À mes chères sœurs et mon frère qui m'ont beaucoup soutenu et encouragé.

À mes chers ami(e)s.

À tous les peuples opprimés dans le monde entier auxquels notre Algérie fait partie.

GHENOUMAT

DÉDICACES

Avant toute chose, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience durant la réalisation de ce modeste travail. Je dédie ce travail :

À mes parents, Merci pour votre amour, votre affection, vos encouragements, sacrifices que Dieu vous garde.

À toutes les personnes qui me sont chères.

À mes chers frères et sœurs (surtout Khalida) qui m'ont beaucoup soutenu et encouragé.

À mes chers ami(e)s.

À tous les peuples opprimés dans le monde entier auxquels notre Algérie fait partie.

Liste des Figures

Figure I.1 : Classification des moteurs thermiques.....	8
Figure I.2 : Ensemble d'un moteur thermique.	9
Figure I.3 : Moteur à essence quatre cylindres.	10
Figure I.4 : Moteur Diesel.....	11
Figure I.5 : Moteur à gaz à quatre cylindres.	14
Figure I.6 : Fonctionnement de moteur à deux temps.	16
Figure I.7 : Fonctionnement de moteur à quatre temps.	16
Figure I.8 : Diagramme de cycle mixte (cycle de Sabathé) [6].	18
Figure I.9 : Cycle de Beau de Rochas.	19
Figure I.10 : Principe de fonctionnement du moteur à essence.	20
Figure I.11 : Principe de fonctionnement du moteur Diesel.	22
Figure I.12 : Cycle de Diesel.	22
Figure II.1 : Entrées – Sorties d'une réaction de combustion [10].	28
Figure II.2 : Triangle du feu montrant l'association des trois éléments indispensables [11] .	30
Figure II.3 : Classification basée sur l'absence ou la présence de la flamme [14]. .	33
Figure III.1 : Evolution des fractions molaire pour mélange pauvre	47
Figure III.2 : Evolution des fractions molaires pour mélange riche.....	49
Figure III.3 : Évolution de la fraction molaire en fonction de la température mélange riche.	51
Figure III.4 : Evolution des fractions molaires pour mélange pauvre	55
Figure III.5 : Evolution des fractions molaire pour mélange riche.	57
Figure III.6 : Évolution de la fraction molaire en fonction de la température mélange riche.	59
Figure III.7 : Evolution des fractions molaire pour mélange pauvre.	64
Figure III.8 : Evolution des fractions molaire pour mélange riche.	66
Figure III.9 : Évolution de la fraction molaire en fonction de la température mélange riche.	68
Figure III.10 : La variation de la fraction molaire de produit (N ₂) (mélange pauvre).	70
Figure III.11 : Variation de la fraction molaire de produit (N ₂) (mélange riche).	70
Figure III.12 : Variation de la fraction molaire de produit (H ₂ O) (mélange pauvre).	71
Figure III.13 : Variation de la fraction molaire de produit (H ₂ O) (mélange riche).	71
Figure III.14 : Variation de la fraction molaire de produit (CO ₂) de combustion ...	73
Figure III.15 : Variation de la fraction molaire de produit (H ₂) (mélange riche).....	74
Figure III.16 : Variation de la fraction molaire de produit (O ₂) (mélange pauvre).	74

Liste des Tableaux

Tableau I.1: Phases des trois moteurs à essence, Diesel et gaz.	23
Tableau II.1 : Tableau montrant les différentes classes de feu [13].	30
Tableau III.1 : Propriétés thermodynamiques des produits de dissociation.....	43
Tableau III.2 : Propriétés de l'essence C_7H_{16}	43
Tableau III.3 : Fractions molaires pour un mélange pauvre.....	46
Tableau III.4 : Evolution des fractions molaire pour mélange riche.....	48
Tableau III.5 : Enthalpie de réaction pour différents mélanges.	49
Tableau III.6 : Les propriétés du Gazole $C_{14} H_{30}$	54
Tableau III.7: Fractions molaires pour un mélange pauvre.....	55
Tableau III.8 : Fractions molaires pour un mélange riche.	57
Tableau III.9 : Enthalpie de réaction pour différents mélanges	58
Tableau III.10 : Propriétés du propane $C_3 H_8$	62
Tableau III.11 : Fractions molaires pour un mélange pauvre.....	64
Tableau III.12 : Fractions molaires pour un mélange pauvre.....	66
Tableau III.13 : Enthalpie de réaction pour différents mélanges.	66

Nomenclature

Symboles latins

a	– Nombre de moles de l'air [mol]
i	– Nombre de moles de l'azote [mol]
$h ^T, h ^{TP}$	– Enthalpies molaires à T et à P [$kJ/kmol$]
$h^o ^T, h^o ^{TP}$	– Enthalpies molaires sensibles à T et à P [$kJ/kmol$]
m, n	– Nombres d'atomes du carbone et de l'hydrogène
s^o	– Entropie molaire à l'état standard [$kJ/(kmol \cdot K)$]
t	– Nombre de moles de l'eau [mol]
u	– Vitesse [m/s]
v	– Nombre de moles d'hydrogène [mol]
w	– Nombre de moles de constituant donné [mol]
x	– Nombre de moles du dioxyde de carbone [mol]
y	– Nombre de moles du monoxyde de carbone [mol]
z	– Nombre de moles d'oxygène [mol]
Di	– Dosage idéal
$H^o, H^o ^T, H^o ^{TP}$	– Enthalpie standard et enthalpies standards à T et à T et P [kJ]
$H ^{TP}$	– Enthalpie à T et P [kJ]
I	– Constituant donné
Kp	– Constante d'équilibre
P	– Pression [bar]
R	– Richesse
R_u	– Constante universelle des gaz parfaits [$kJ/(kmol \cdot K)$]
T	– Température [K]
W	– Travail [kJ]

Symboles grecs

Δ	– Déterminant de l'équation du second degré
ΔE_C	– Variation de l'énergie cinétique [kJ]
ΔQ	– Quantité de chaleur de combustion [kJ]
$\Delta_f h^o, \Delta_f h^o T$	– Enthalpies molaires de formation à l'état standard et à T [kJ/kmol]
$\Delta_r H^o, \Delta_r H^o T$	– Enthalpies de réaction à l'état standard et à T [kJ]
$\Delta_r g^o$	– Energie libre molaire (de Gibbs) de réaction à l'état standard [kJ/kmol]
$\Delta_r s^o$	– Entropie molaire de réaction à l'état standard [kJ/kmol]
α	– Nombre de moles du constituant i dans la réaction [mol]

Exposants et indices

*	– État stœchiométrique
o	– État standard
i	– Constituant
r	– Réaction
f	– Formation
$1, 2$	– États de la combustion, solutions de l'équation du second degré
GE	– Dissociation gaz à l'eau
T	– Température
P	– Pression

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les moteurs à combustion interne	5
I.1. Introduction.....	6
I.2. Historique	7
I.3. Moteurs thermiques	7
I.3.1. Définition	7
I.3.2. Classification des moteurs thermiques	8
I.3.3. Ensemble d'un moteur thermique	9
I.4. Types de moteurs	9
I.4.1. Moteurs à essence	9
I.4.2. Moteurs diesel (à allumage par compression)	11
I.4.3. Moteurs à gaz naturel.....	12
I.5. Moteur à combustion interne.....	14
I.6. Types de moteurs à combustion interne	15
I.6.1. Moteur à deux temps	15
I.6.2. Moteur à quatre-temps.....	16
I.7. Principe de fonctionnement de chaque type de moteurs	18
I.7.1. Moteur à essence	18
I.7.2. Moteur diesel.....	21
I.7.3. Moteur à gaz.....	22
I.8. Comparaison entre les trois moteurs.....	23
I.8.1. Moteur à essence	23
I.8.2. Moteur diesel.....	24
I.8.3. Moteur à gaz.....	24
Chapitre 2 : Processus de combustion	25
II.1. Introduction	26
II.2. Différents aspects d'une réaction chimique de combustion	26

II.2.1.	Aspect thermodynamique	26
II.2.2.	Aspect cinétique	27
II.3.	Principe générale d'une réaction de combustion	27
II.4.	Facteurs de qualité d'une réaction de combustion.....	28
II.4.1.	Rendement de la combustion.....	28
II.4.2.	Niveau thermique.....	28
II.5.	Triangle du feu	29
II.5.1.	Carburant.....	29
II.5.2.	Combustible	29
II.5.3.	Énergie d'activation.....	29
II.6.	Différentes classes de feu	30
II.7.	Pouvoirs calorifiques.....	30
II.7.1.	Pouvoir calorifique inférieur (pci).....	31
II.7.2.	Pouvoir calorifique supérieur (pcs).....	31
II.8.	Types de combustion.....	31
II.8.1.	Combustion rapide	31
II.8.2.	Combustion lente	31
II.8.3.	Combustion complète	31
II.8.4.	Combustion incomplète (en défaut d'air).....	32
II.9.	Classification des combustions.....	32
II.10.	Notion de stœchiométrie	33
II.11.	Processus de combustion dans les trois moteurs	37
II.11.1.	Combustion dans le moteur diesel.....	37
II.11.2.	Combustion dans les moteurs à essence.....	38
II.11.3.	Combustion dans les moteurs à gaz	38
Chapitre 3 : Formulation thermochimique de la combustion des différents moteur		40
III.1.	Introduction	41
III.2.	Réaction de combustion.....	42
III.3.	Enthalpie de réaction ($\Delta_r h^*$), composition des gaz brûlés à (t, p).....	43
Partie 1.....		44
III.4.	Combustion de l'essence	45

III.4.1. Combustion de l'heptane	45
III.4.2. Composition des gaz brulés en fonction de la richesse du mélange	45
iii.4.3. Résultats et discussion	52
Partie 2.....	53
III.5. Combustion du diesel.....	54
III.5.1. Combustion du tétradécane	54
III.5.2. Composition des gaz brulés en fonction de la richesse du mélange	54
III.5.3. Discussion et résultats.....	60
Partie 3.....	61
III.6. Combustion du gaz	62
III.6.1. Combustion du propane	62
III.6.2. Composition des gaz brulés en fonction de la richesse du mélange	63
III.6.3. Discussion et résultats.....	69
III.7. Analyse comparative des taux d'émissions	69
III.8. Analyses et discussions	75
Conclusion générale	76
Références bibliographiques	78
ملخص	73
Résumé	73
Abstract	73

Introduction générale

Les véhicules à moteurs à combustion interne (MCI) polluent l'environnement avec les gaz d'échappement (GE), les huiles de carter, les vapeurs de carburants et d'huile de boîte de vitesses, la poussière et les aérosols formés lors de l'usure des routes, des pneus, des plaquettes de freins et des disques d'embrayages. Encore, pendant le transport de certaines marchandises, plusieurs polluants sont aussi émis. Une fois dans l'atmosphère, ces substances peuvent, dans certaines conditions météorologiques, former de nouveaux composés toxiques, qui peuvent être plus dangereux que les composants d'origine. L'exemple le plus frappant est l'interaction des hydrocarbures et des oxydes d'azote en présence de la lumière solaire. Dans ce cas, l'ozone, les hydrocarbures contenant de l'oxygène (aldéhydes, cétones), les composés azotés avec les hydrocarbures (nitrates de peroxyacétyle - NPA) et d'autres polluants se forment et s'accumulent intensément dans l'atmosphère, qui, en réagissant avec la vapeur d'eau, peut former des fumées (smog).

Les émissions de substances toxiques par les véhicules à moteur sont annuellement de 30 à 40 millions de tonnes, dont la part des voitures et des motos est d'environ 5%, les autobus 16% et le reste pour les émissions des moteurs de camions [1]. À titre de comparaison, les émissions de substances toxiques par le parc automobile américain s'élèvent à un peu plus de 46 millions de tonnes par an.

Le problème de la pollution de l'air par les véhicules à MCI est particulièrement aigu dans les grandes villes et peut atteindre 90% de la quantité totale d'émissions toxiques. Récemment, en raison de la croissance du secteur privé de la flotte, la pollution de l'air des rues des villes atteint des valeurs plusieurs fois supérieures au niveau sanitaire autorisé. Une situation aussi difficile nécessite une compréhension claire que le sens du problème et une étude approfondie des moyens de réduire la quantité d'émissions nocives des véhicules.

La conversion de l'énergie du carburant en travail mécanique, effectuée dans les MCI, s'accompagne de la formation de polluants. Au total, les gaz d'échappement des MCI contiennent environ 280 composants qui, selon leurs propriétés chimiques, la nature de leur impact sur la biosphère, sont divisés en non toxiques (N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O , H_2) et toxiques (CO , NO_x , C_xH_y , SO_2 , H_2S , noir de carbone, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), aldéhydes, phénols, cétones) [1].

Les concentrations limites de composants toxiques dans l'air sont fixées comme normes d'hygiène, c'est-à-dire du point de vue de la santé humaine. Cependant, il ne faut pas oublier le grand préjudice pour la santé humaine d'une exposition prolongée à de faibles concentrations de substances nocives et l'exposition totale à plusieurs composants toxiques.

Le monoxyde de carbone provoque une inhibition des fonctions des centres actifs de formation d'hémoglobine, ce qui perturbe les processus oxydatifs dans le corps, ce qui peut entraîner la mort.

Une attention particulière doit être portée au phénomène d'intoxication chronique par de faibles doses de monoxyde de carbone, qui peut survenir à une concentration volumique de CO égale à 0,01 %. Environ 95 % du monoxyde de carbone inhalé par les piétons pénètre dans l'air avec les gaz d'échappement des véhicules. L'empoisonnement au CO peut dans certains cas provoquer un accident, car même avec un faible niveau de pollution, l'attention du conducteur est sensiblement réduite et la réaction ralentie.

Les oxydes nitriques en combinaison avec la vapeur d'eau forment de l'acide nitrique, qui détruit le tissu pulmonaire, ce qui entraîne des maladies chroniques. Une concentration dangereuse est supérieure à 1 à 2 ppm (**ppm** exprime la fraction massique : 1 **ppm** = 1 mg/kg).

Les hydrocarbures imbrûlés émis avec les gaz d'échappement sont un mélange de plusieurs centaines de composés chimiques. Le composé le plus dangereux est le Benzpyrène, qui a des propriétés cancérigènes.

Certains hydrocarbures aromatiques ont de fortes propriétés toxiques, ils affectent les processus d'hématopoïèse, les systèmes nerveux central et musculaire. Les hydrocarbures de type aliphatique sont moins toxiques, mais ont un effet narcotique sur le système nerveux central.

Le dioxyde de soufre a également un effet nocif sur le corps humain, irrite les organes hématopoïétiques - la moelle osseuse et la rate, et provoque également des perturbations dans le métabolisme des glucides. L'empoisonnement chronique avec de petites doses de dioxyde de soufre se manifeste sous la forme de maux de tête, d'insomnie, d'irritation de la membrane muqueuse et, dans certains cas, de bronchite chronique et de conjonctivite.

Autre le carbone, la suie est porteuse d'hydrocarbures cancérigènes adsorbés à sa surface. L'utilisation d'essence au plomb contenant du plomb tétrastyle est interdite dans de nombreuses grandes villes.

L'impact des gaz d'échappement des voitures sur la végétation est encore plus prononcé que sur les humains. L'ozone, qui se forme dans l'air en présence d'hydrocarbures et d'oxydes d'azote, est un oxydant très puissant. En combinaison avec les acides nitrique et

sulfurique, dont les « matières premières » pour la formation sont également des composants des gaz d'échappement, il entraîne un stress et la mort des plantes.

Chapitre 1

Généralités sur les moteurs à combustion interne

I.1. Introduction

La société a fréquemment utilisé des moteurs thermiques comme machine pour créer de la puissance mécanique depuis la création du moteur à combustion. L'utilisation de carburant dans les moteurs à combustion interne a contribué au développement de sources d'énergie mobiles pour des applications exigeant des puissances spécifiques élevées et des énergies spécifiques. Les moteurs à combustion interne continuent d'être la principale source de puissance mécanique pour les applications mobiles. La chaleur générée par la combustion dans une chambre à volume variable est utilisée pour élever la pression à l'intérieur d'un gaz qui remplit cette chambre (ce gaz est d'ailleurs initialement composé de carburant : combustible et de comburant : l'air). Cette montée en pression provoque l'application d'une force sur un piston, transformant le mouvement de translation du piston en mouvement de rotation de l'arbre (vilebrequin).

Les moteurs sont regroupés en trois types en fonction de la technique d'allumage du mélange air-carburant :

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

Un mélange essence-air approprié est introduit dans la chambre de combustion du cylindre où l'allumage est réalisé par une étincelle dans les moteurs à allumage commandé.

Le carburant des moteurs à allumage par compression est du carburant Diesel, qui est introduit sous pression dans la chambre de combustion contenant de l'air déjà comprimé et chauffé, sur lequel il s'enflamme spontanément. Ces moteurs sont appelés moteurs Diesel.

Un moteur à gaz est un moteur à combustion interne utilisant un gaz comme carburant.

Les moteurs à combustion interne sont des moteurs à allumage par étincelle et à compression car la combustion de ces moteurs constitue aujourd'hui la majorité des unités de production de puissance mécanique dans de nombreux domaines, notamment dans les transports, où ils se sont notamment développés grâce à leurs atouts : bon rendement, compacité, fiabilité..., ce qui explique l'extension que nous avons prise à l'industrie des moteurs. Et toutes ses branches connexes à tous les pays du monde aujourd'hui.

I.2. Historique

Le moteur thermique de combustion interne à pistons est très ancien, au moins dans ses principes, c'est une exception faite de la machine à vapeur, il est difficile de trouver actuellement des réalisations techniques aussi près des idées générales conçues il y a un siècle. C'est effet en janvier 1862 que le français Alphonse Beau de Rochas, Rochas, ingénieur de chemin de fer de Provence, obtient un brevet pour le cycle à quatre temps avec compression préalable, universellement appliqué de nos jours. Quelques années plus tard en 1876, l'Allemand N. A. Otto (Nikolaus Otto) réalise le premier moteur thermique fonctionnant selon le cycle de Beau de Rochas [1].

Avec les Français Hugon et Lenoir apparait en 1860 le moteur à deux temps à un seul cylindre fait naissance, mais la première application de la compression préalable au cycle deux temps sera due, en 1879, à « Dugald Clerk ». Les moteurs à combustion interne qui sont alors fabriqués fonctionnent aux gaz des hauts fourneaux ou à l'essence de pétrole avec allumage par étincelle. Un autre type de moteur va naître des travaux R. Adolphe Diesel qui essaie tout d'abord, d'appliquer le cycle de Carnot à la réalisation d'un moteur alimenté en poussière de charbon. Celui-ci est injecté dans une atmosphère portée à une température élevée par compression, et il doit s'enflammer spontanément au fur à mesure de son introduction.

Les travaux entrepris par l'inventeur, avec la collaboration des ingénieurs de la « société Krupp », aboutiront en 1897 au moteur Diesel tel qu'on le connaît aujourd'hui. Ainsi apparaissent les moteurs à combustion interne à deux temps et à quatre temps, à allumage commandé et à allumage par compression, dont les réalisations successives depuis un siècle, aboutiront aux machines perfectionnées que nous connaissons aujourd'hui [1].

I.3. Moteurs thermiques

I.3.1. Définition

La fonction d'un moteur thermique est de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique. Les moteurs thermiques également connus sous le nom de moteurs à combustion interne sont généralement divisés en deux types [2] :

- Le moteur à combustion interne du système est mis à jour à chaque cycle. Le système est en contact avec une seule source de chaleur (l'atmosphère), comme c'est le cas avec les moteurs à gaz, essence et Diesel.

- Les moteurs à combustion externe dans lesquels le système (l'air) est recyclé, n'ont pas besoin d'être renouvelés et nécessitent donc deux sources de chaleur, par exemple dans la dernière catégorie on retrouve les moteurs à vapeur, le moteur Stirling [2].

I.3.2. Classification des moteurs thermiques

Les moteurs thermiques sont représentés par le synoptique de la figure I.1.

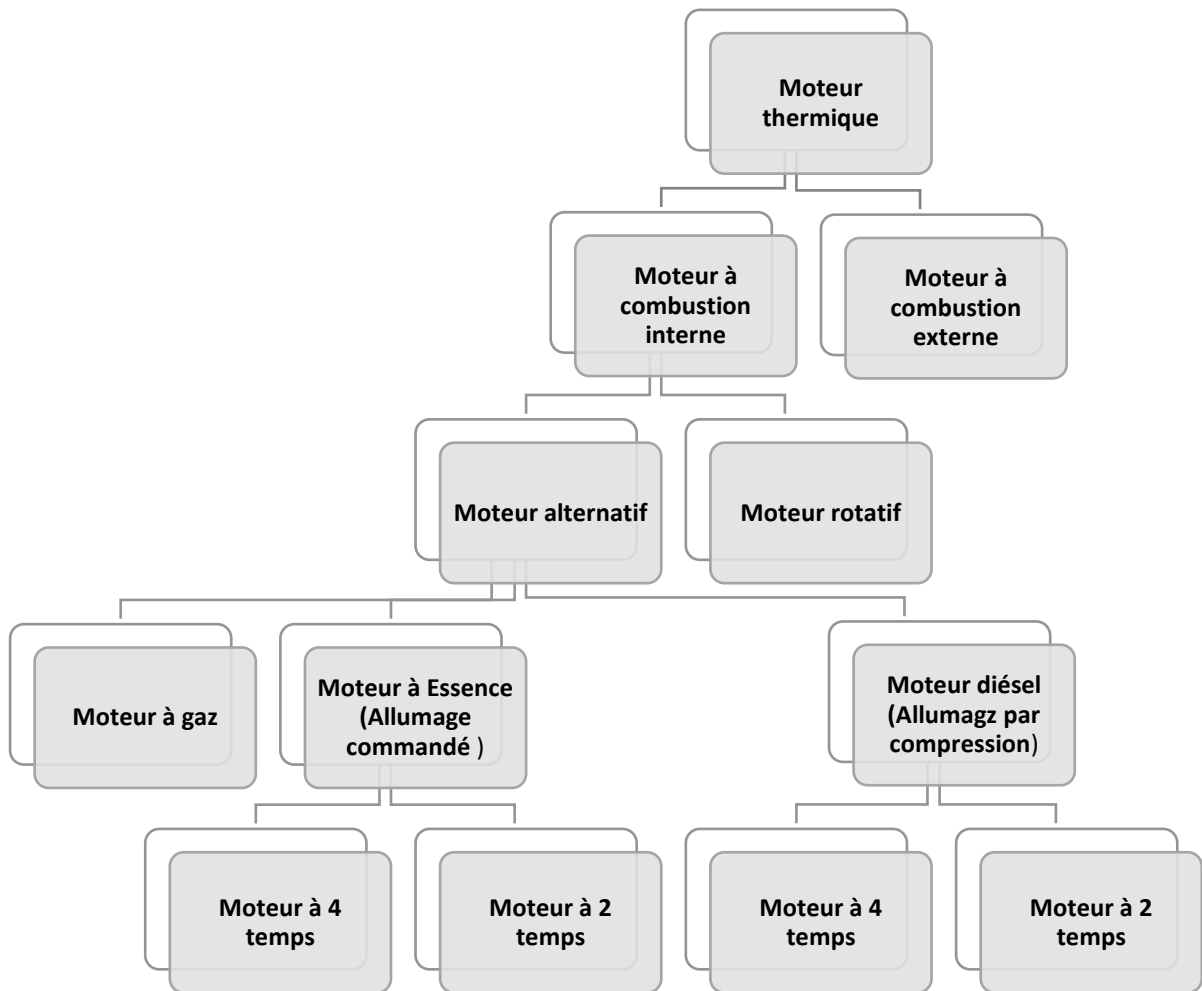


Figure I.1 : Classification des moteurs thermiques.

I.3.3. Ensemble d'un moteur thermique

Avant de d'écrire le fonctionnement d'un moteur à combustion interne, il est nécessaire de connaître les principaux organes qui le composent



Figure I.2 : Ensemble d'un moteur thermique.

I.4. Types de moteurs

I.4.1. Moteurs à essence

Le moteur à essence (allumage commandé) est relativement plus léger et plus vif dans les bas régimes et lorsqu'il est froid, car l'allumage se fait par l'intermédiaire d'une bougie. Il est relativement plus silencieux, puisque l'explosion du mélange air-carburant dans un moteur

Diesel, à la suite de l'auto-inflammation, provoque une onde de choc importante dont le bruit ressemble à une sorte de claquement. Généralement, la mise en marche du moteur à allumage commandé est plus rapide aux bas régimes, car l'allumage est réalisé par une étincelle produite par la bougie. Les régimes moteurs étant de surcroît plus élevés, les véhicules de sport et les voitures de luxe sont généralement munis de moteurs à allumage commandé.

Il est cependant plus facile d'obtenir une puissance plus importante, mais à haut régime seulement à cause d'un faible couple à bas régime. [3].

Néanmoins, le rendement thermodynamique théorique du moteur à essence est sensiblement inférieur que celui du moteur Diesel, elle dépasse rarement 30 %. La différence tient essentiellement aux taux de compression : plus le taux de compression est élevé, meilleur est le rendement, car le carburant est brûlé plus complètement.

La consommation de carburant est plus élevée dans les moteurs à allumage commandé, non seulement à cause de la question du rendement déjà évoquée, mais aussi à cause de la valeur énergétique plus faible de l'essence. À puissance égale, un moteur à essence aura un régime de rotation supérieur et, en contrepartie, un couple inférieur à bas régime. Les voitures à essence, même dotées d'un pot catalytique produisent beaucoup plus de CO₂ que les Diesels.



Figure I.3 : Moteur essence quatre cylindres.

I.4.2. Moteurs Diesel (à allumage par compression)

L'Allemand Rudolf Diesel a conçu en 1893 le premier prototype de ce type de moteur qui porte son nom à nos jours. Il s'agissait d'un moteur à quatre-temps dont le combustible est injecté, par le biais d'un système d'injection, directement à forte pression dans la chambre de combustion. Ce type de moteur, dont le taux de compression est élevé, a connu une expansion rapide dans le domaine de l'automobile depuis sa création [3].

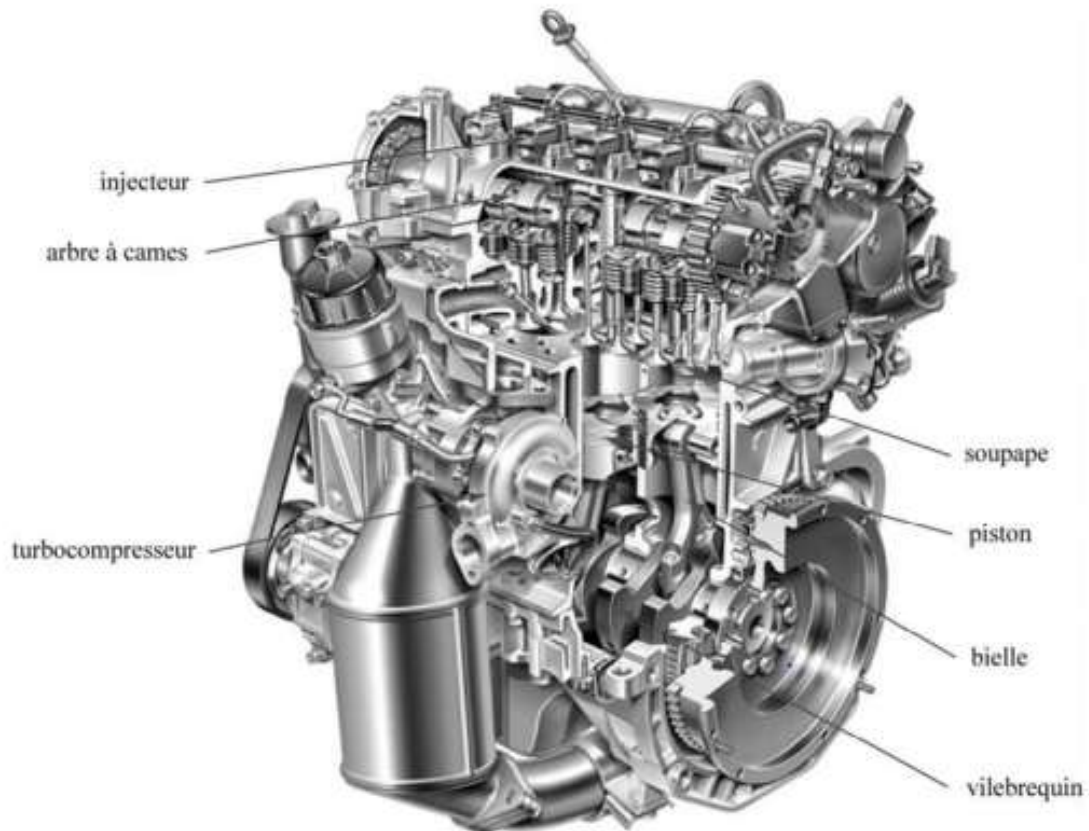


Figure I.4 : Moteur Diesel.

De l'importance de ces moteurs on peut citer certains avantages et inconvénients :

Avantages du Diesel

- Le rendement est supérieur à celui d'un moteur à essence : une proportion plus grande de la chaleur est convertie en travail.
- Le carburant Diesel coûte environ 10 % moins cher que l'essence. La consommation moyenne est moins élevée que la motrice essence.

Inconvénients du Diesel

- De fortes contraintes thermiques et mécaniques sont exercées sur les composants mécaniques du moteur, d'où la nécessité de les surdimensionner.
- Le coût d'entretien est environ 20 % plus élevé que celui d'un moteur à essence
- L'étanchéité entre le cylindre et le piston est plus difficile à réaliser.
- Le moteur est plus bruyant.
- Les moteurs Diesel émettent un certain nombre de polluants parmi lesquels.
- Le dioxyde de carbone CO₂.
- L'oxyde d'azote NO_x.
- Les hydrocarbures HC.
- Les fines particules (dont le diamètre est inférieur à 2.5 micromètres).
- Le dioxyde de soufre SO₂.

I.4.3. Moteurs à gaz naturel

Avantages du gaz naturel par rapport aux carburants traditionnels

- Les moteurs fonctionnant avec ce type de carburant émettent beaucoup moins de polluants que ceux qui utilisent les combustibles traditionnels tels que l'essence, le carburant Diesel ou le gaz du pétrole liquéfié (GPL). Le gaz naturel est composé principalement de méthane. Par unité d'énergie, il produit ainsi le moins de CO₂ (jusqu'à 25 % plus faibles par rapport à l'essence), le gaz qui contribue majoritairement à l'effet de serre. En outre, les moteurs au gaz naturel émettent moins d'agents polluants acidifiants que les carburants conventionnels.
- Les émissions de particules fines sont presque nulles pour les véhicules qui roulent au gaz naturel. Donc le gaz naturel est beaucoup moins nocif pour l'environnement et pour la santé humaine : le NO₂ et les particules fines entraînent des maladies respiratoires et de l'asthme.
- Les véhicules alimentés au gaz naturel sont moins bruyants que ceux roulant au carburant Diesel. Cet avantage est un aspect important dans les zones urbaines, où actuellement le transport en commun utilise généralement le Diesel. De plus, étant donné qu'un moteur au gaz naturel émet moins de vibrations de résonance qu'un moteur Diesel, le moteur s'use moins et les frais d'entretien sont moins élevés.

- Le gaz naturel étant plus léger que l'air, il se disperse et se dilue rapidement dans l'air ambiant. Contrairement à l'essence et au gaz du pétrole liquéfié, Il s'enflamme uniquement quand sa concentration dans l'air se situe entre 5 et 15 %. En dessous de 5 %, le mélange est trop pauvre pour brûler et au-dessus de 15 %, le mélange est trop riche et ne brûlera pas non plus. Le point d'inflammation du gaz naturel est d'approximativement 1076 °F, pour le Diesel, il est de 500 °F, alors que l'essence s'enflamme à 428 °F. Le gaz naturel prend donc moins facilement feu que le Diesel et l'essence.
- Le gaz naturel est transporté en toute sécurité par gazoducs souterrains. Ceci permet aussi de distribuer du gaz naturel dans les stations-service des zones à forte densité de population. Un réservoir de gaz naturel résiste mieux à une collision qu'un réservoir à essence traditionnel. Le gaz naturel est stocké dans des cylindres dont la paroi mesure 10 à 20 mm d'épaisseur et qui sont réalisés en matériaux durables et comprennent des dispositifs de sécurité intégrés [3].
- Les véhicules roulant au gaz naturel sont actuellement plus chers que ceux fonctionnant avec les carburants traditionnels. Néanmoins, le gaz naturel pour véhicule est significativement moins cher que les carburants classiques tels que l'essence ou le Diesel : 1 kg de gaz naturel comprimé coûte à la pompe de 30 à 40 % moins cher qu'un litre de Diesel. L'écart de prix entre un véhicule au gaz et un véhicule essence ou Diesel va diminuer au fil du temps.

Grâce à la combustion plus propre du gaz naturel, il y aura moins de frais d'entretien et la durée de vie du moteur est nettement plus longue que celle de moteur à essence ou Diesel. En plus, le gaz naturel possède d'autres avantages tels que :

- Couple disponible à bas régime est plus élevé qu'à celui de l'essence.
- Stabilité de fonctionnement accrue.
- Bruits de fonctionnement atténués.
- Démarrages en richesse stœchiométriques possibles.
- Indice d'octane élevé.

Inconvénients sont les suivants :

Pour stocker le gaz naturel comprimé, il faut plus d'espace que pour stocker un même poids d'essence. Donc, les réservoirs qui stockent le gaz naturel comprimé sont très souvent grands et prennent beaucoup d'espace. Cependant, il est également possible d'installer le

réservoir sous la carrosserie, grâce à une disposition plus rationnelle des composants (par exemple, Volkswagen Touran EcoFuel, Fiat multipla, la Nouvelle Fiat Panda, etc.).

En outre de cet inconvénient majeur, on peut citer d'autres tels que :

- Le couple du moteur au gaz naturel est moins élevé que celui du moteur à essence.
- Le réseau de distribution du gaz naturel est peu développé



Figure I.5 : Moteur à gaz quatre cylindres.

I.5. Moteur à combustion interne

Un moteur thermique à combustion interne est un type de convertisseur d'énergie. Il est capable de convertir l'énergie thermique (produite par la combustion d'un mélange d'un combustible et d'un comburant) en énergie mécanique. Si la combustion se produit à l'intérieur du moteur, on dit que le moteur est un interne à combustion. Si l'énergie est transportée par un fluide colporteur extérieur au moteur, comme une turbine à vapeur, on parle alors de moteur à combustion externe. La création d'énergie thermique commence par l'injection de carburant finement pulvérisé, qui est ensuite mélangé à de l'air pour former le mélange combustible dans le cylindre.

Cette phase représente l'opération d'admission à cette étape d'introduction dans le cylindre, où le mélange gazeux est à basse pression. S'il est allumé à ce moment, il ne pourra pas fournir la pression nécessaire pour produire un travail suffisant ; il faut donc d'abord le compresser : c'est la phase de compression. Le mélange combustible est alors enflammé, ce qui entraîne une pression supplémentaire qui peut pousser le piston, qui à son tour convertit la pression en un effort mécanique, provoquant la rotation de l'induit du moteur via le mécanisme bielle-manivelle. Enfin, pour démarrer un nouveau cycle, les gaz brûlés sont expulsés dans l'atmosphère avant qu'un mélange frais ne soit introduit dans le cylindre : c'est ce qu'on appelle le processus d'évaporation [4].

I.6. Types des moteurs à combustion interne

Classification selon les phases du moteur (deux ou quatre temps)

I.6.1. Moteur à deux temps

Un moteur à piston (de type moteur à combustion) qui délivre de la puissance à chaque descente des pistons dans les cylindres.

Ceci diffère d'un moteur à 4temps où les pistons ne délivrent de la puissance que lors d'une descente sur deux [5].

Fonctionnement

Le fonctionnement d'un moteur à deux temps repose sur le même principe que le moteur à quatre temps mais le processus est différent. Aux lieux des quatre phases, le moteur à deux temps ne compte que deux phases tout en produisant le même effet que le moteur à quatre temps.

- Le moteur à 2 temps effectue uniquement un temps de travail et un temps de compression.
- Le moteur à deux temps n'a pas de soupapes mais une lumière d'échappement.

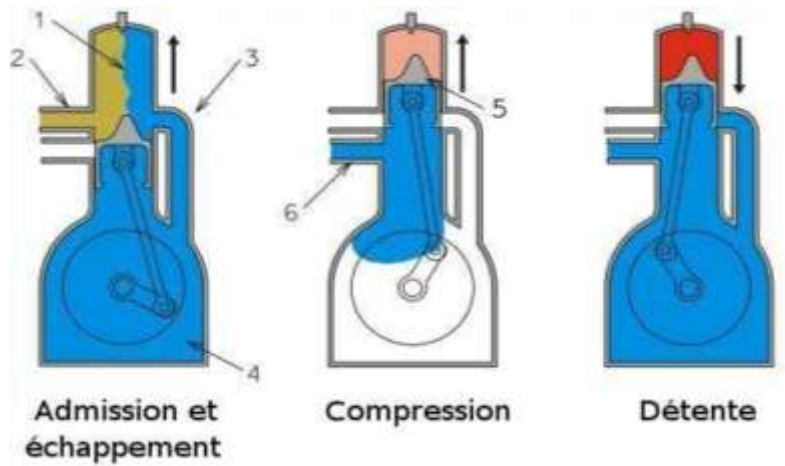


Figure I.6 : Fonctionnement de moteur à deux temps.

I.6.2. Moteur à quatre-temps

C'est un moteur à piston qui nécessite de faire deux tours complètes pour revenir au point de départ. Le moteur a été inventé par Nicolas Otto en 1876, c'est pourquoi on parle parfois aussi de moteur Otto. On parle plus généralement de moteur à quatre temps car :

Fonctionnement

- Processus de travail se déroule en 4 mouvements du piston.
- Un mélange air-carburant est introduit dans le cylindre au cours de l'une de ces phases.

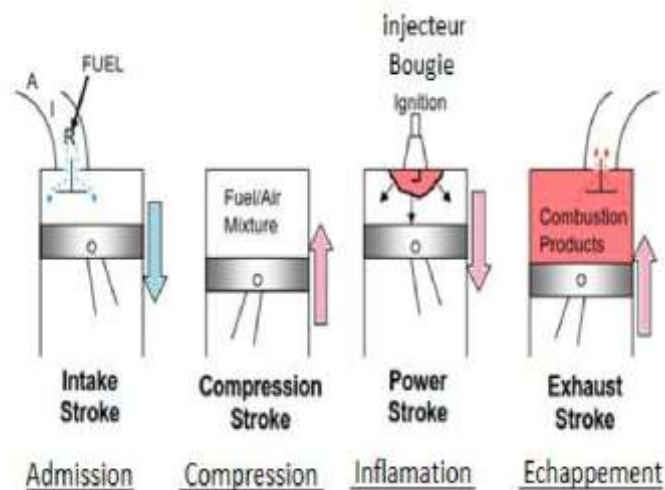


Figure I.7 : Fonctionnement de moteur à quatre temps.

Le carburant est consommé au fil d'une série d'explosions régulières de façon très précise suite aux explosions à l'intérieur des cylindres, les pistons sont repoussés vers le bas. Ceci fait tourner le vilebrequin qui transmet en partie la puissance du moteur à un arbre à cames.

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

1er temps : Admission (SA ouverte ; SE fermée)

Le piston est au PMH et va se déplacer vers PMB aspirant de l'air frais pour remplir le cylindre ; c'est la course d'aspiration qui dure depuis le PMH jusqu'au PMB soit $1/2$ tour de vilebrequin qui est égale à 180° . Cette évolution a lieu à la pression atmosphérique.

2ème temps : Compression : (SA fermée ; SE fermée)

Le piston se déplaçant de PMB vers PMH comprime l'air frais qui se trouve emprisonné dans le cylindre à une pression de l'ordre de 35 à 40 bars ce qui le porte à une température voisine de 500 à 600°C .

3ème temps : - Injection – Combustion – Détente (SA fermée ; SE fermée)

Le piston est au PMH, l'air comprimé puis porté à haute température, on injecte de gasoil finement pulvérisé dans la chambre de combustion. La pression d'injection doit être supérieure à la pression régnant alors dans le cylindre pour permettre l'introduction de combustible.

La pression varie suivant le type de moteur qui est entre 80 et 250 bars et même plus dans certains moteurs Diesel marins. L'injection est progressive et dure $15/100$ environ de la course du piston soit 25° à 30° de rotation de vilebrequin.

Au contact de l'air comprimé à température élevée, le combustible s'enflamme de lui-même. La température d'inflammation du gas-oil étant voisine de 300°C , donc inférieure à celle de l'air contenu dans le cylindre. Il s'enflamme spontanément à mesure qu'il est injecté. Néanmoins, un certain temps mesurable s'écoule entre le début de l'injection et le début de combustion. Cet intervalle est connu sous le nom de « délai d'allumage ».

Les gaz augmentent de volume, leur détente chasse le piston vers le PMB. Le vilebrequin reçoit de l'énergie durant toute cette course : c'est le temps moteur. Au moment de la combustion la pression des gaz atteint 50 à 100 bars ; la température est alors de l'ordre de 1800 à 2000°C .

4ème temps : Échappement ("SA" fermée ; "SE" ouverte)

La soupape d'échappement s'ouvre, il s'ensuit une retombée instantanée de pression ensuite les gaz brûlés sont chassés par le piston qui remonte vers le PMH. La température est tombée à 500°C environ, la soupape d'admission s'ouvre et le cycle recommence [6].

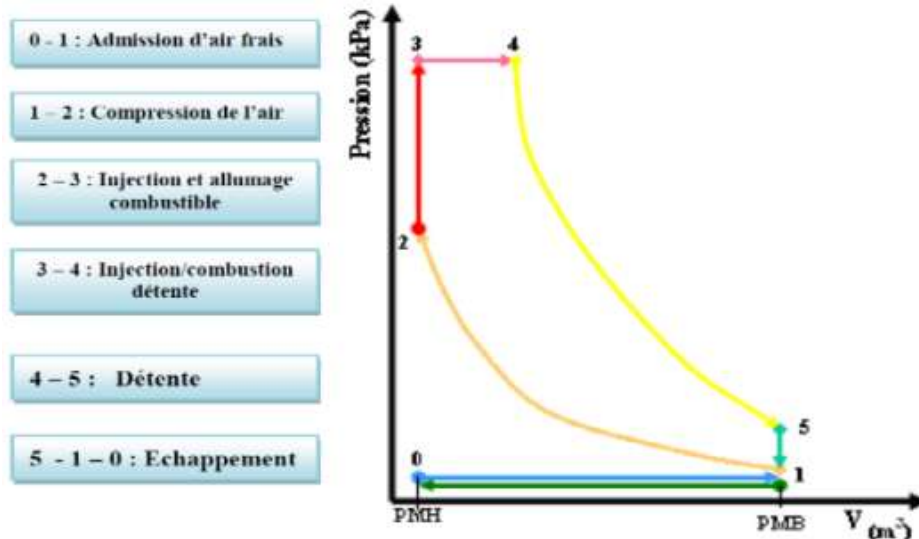


Figure I.8 : Diagramme de cycle mixte (cycle de Sabathé) [6].

I.7. Principe de fonctionnement de chaque type de moteurs

I.7.1. Moteur à essence

Les moteurs à essence employés aujourd'hui utilisent le cycle à 4 temps.

Premier temps : Admission d'air frais. La soupape d'admission s'ouvre lorsque le piston aspire de l'air dans sa descente, un peu comme une pompe à vélo. Avec un carburateur ou une injection indirecte, une partie du carburant est d'abord vaporisée dans l'air d'admission pour créer un mélange gazeux. Dans le cas de l'injection directe, l'essence est vaporisée directement dans le cylindre ou la culasse au début de l'étape suivante.

Deuxième temps : Compression au fur et à mesure que l'on réfère à la soupape d'admission, le piston monte et comprime le mélange gazeux, qui est maintenant emprisonné dans le cylindre, suivi de la culasse.

Troisième temps : Allumage, combustion et détente. Lorsque le piston atteint le point de non-retour (PMH), l'allumage produit une étincelle dont la chaleur enflamme le mélange gazeux pré comprimé. La combustion peut alors atteindre des températures supérieures à 1000°C. L'augmentation de pression qui en résulte va propulser le piston vers son point de

rupture le plus bas (PMB), obligeant le vilebrequin à faire un demi-tour via sa liaison via la bielle articulée sur deux pivots. Il s'agit du seul temps moteur utile.

Quatrième temps : Échappement. Le vilebrequin redirige le piston du PMB via la bielle, toujours par inertie de rotation. Pour éviter la compression parasite des gaz qui s'échappent, la soupape est ouverte légèrement avant le PMB pour leur évacuation. En conséquence, le terme « Avance à l'Ouverture d'Échappement » est utilisé (AOE) [7].

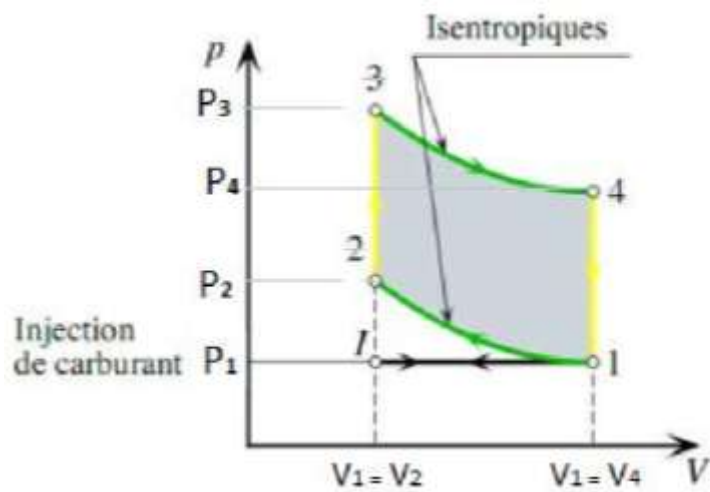


Figure I.9 : Cycle de Beau de Rochas.

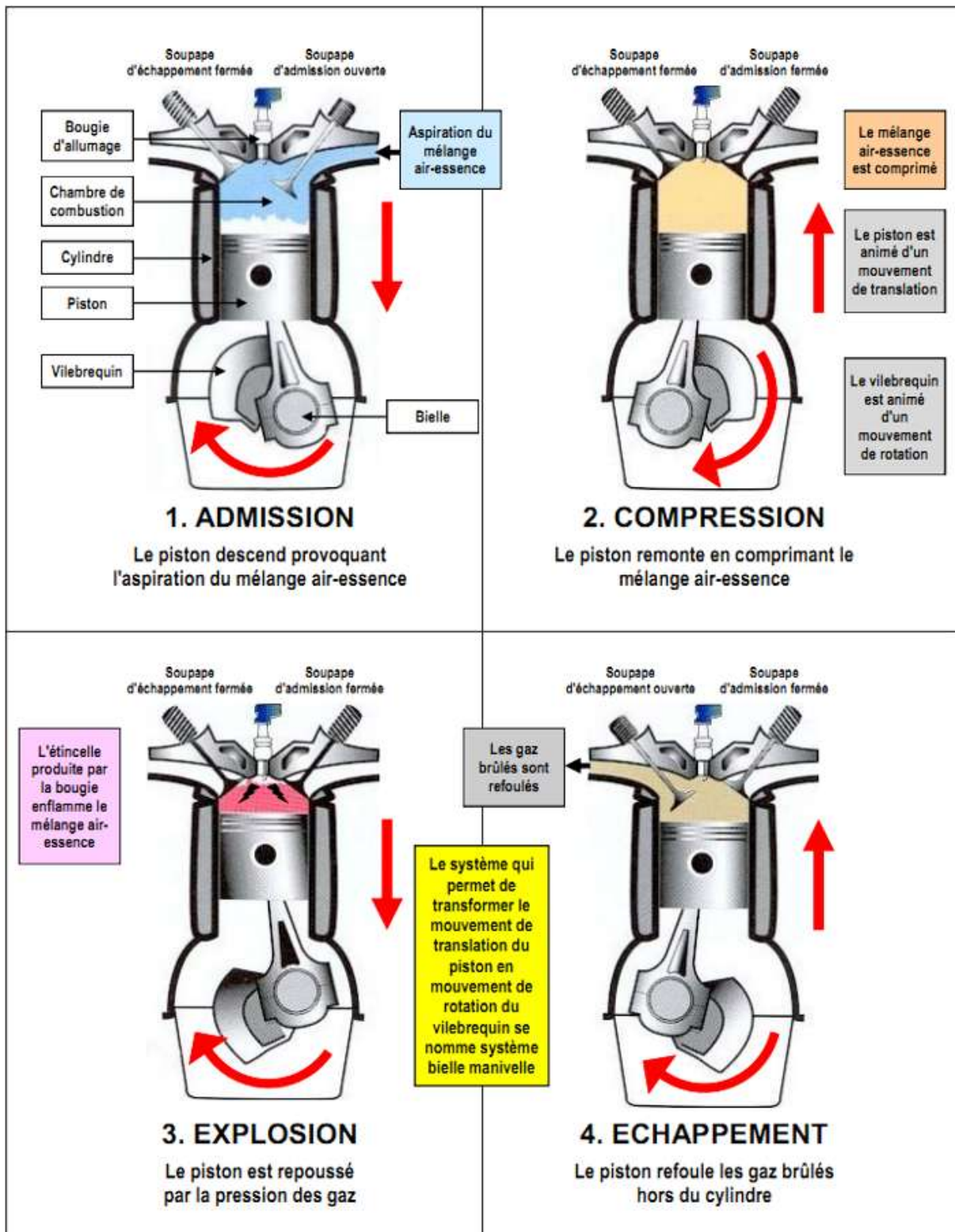


Figure I.10 : Principe de fonctionnement du moteur à essence.

I.7.2. Moteur Diesel

Le Diesel (ou gasoil) est un carburant unique en ce qu'il ne s'enflamme pas avec une bougie mais est mélangé à de l'air sous haute pression (et à basse température). Voici un exemple de moteur 4temps. Il faut donc quatre groupes (piston cylindre) pour permettre au moteur de tourner. Ces ensembles ont une déclinaison de 180° ($2 \times 360^\circ$ divisé par 4). Les quatre étapes sont décrites ci-dessous comme une seule unité. Du fait du décalage, chaque piston fournit un effort lors de la combustion d'un demi-tour, provoquant le déplacement du vilebrequin.

Il faut deux tours de suite au vilebrequin pour effectuer un tour.

- **Admission**

Le piston descend et la soupape d'admission s'ouvre.

L'air frais écrase le cylindre.

Il n'y a actuellement pas de carburant disponible.

Le vilebrequin fait un demi-tour.

- **Compression**

La soupape d'admission se ferme et le piston rentre.

L'air est contraint et se réchauffe rapidement.

Lorsque le piston atteint les 9/10ème de sa course, une quantité prédéterminée de carburant est injectée sous pression.

- **Combustion détente**

Les soupapes ont été fermées.

L'air et le carburant contenus dans le cylindre sont sous pression.

La température (400 à 600°C) est suffisamment élevée pour que le mélange s'enflamme, provoquant une poussée qui pousse le piston vers le bas (et fait tourner le vilebrequin d'un demi-tour).

- **Échappement**

Enfin, la soupape d'échappement s'ouvre et le piston revient, captant l'air chaud qui a été éjecté dans le pot d'échappement [7].

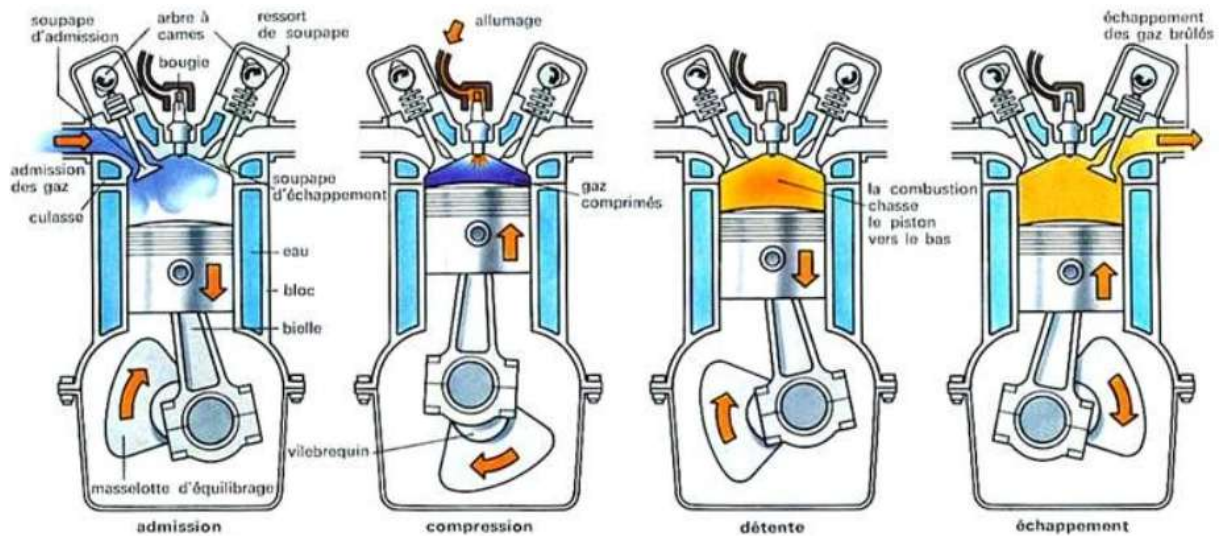


Figure I.11 : Principe de fonctionnement du moteur Diesel.

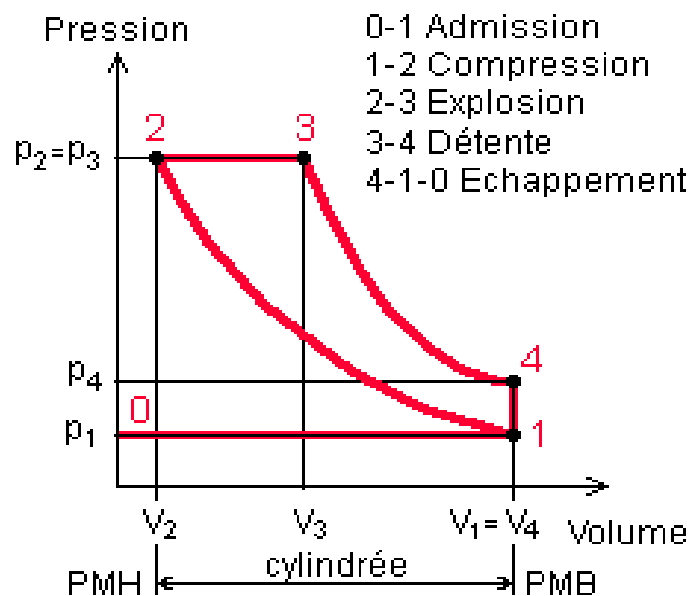


Figure I.12 : Cycle de Diesel.

I.7.3. Moteur à Gaz

Un système GPL-c est constitué de trois parties : d'un réservoir, d'un vaporiseur-détendeur et d'un système d'admission. Placé près de la roue de secours, le réservoir GPL est composé d'une soupape de sécurité qui s'active en cas de surpression (supérieure à 27 bars), d'une jauge indiquant le niveau de carburant restant, d'une électrovanne qui arrête l'alimentation en carburant en cas de rupture, d'un raccord et d'un limiteur de remplissage.

Ensuite, le rôle du vaporiseur-détendeur intervient dans le changement d'état du GPL pour le faire passer d'un état liquide à un état gazeux.

Enfin, le système d'admission permet d'acheminer le GPL gazeux dans les chambres de combustion grâce à des injecteurs séquentiels. Ces injecteurs sont programmés pour n'alimenter dans les cylindres que la quantité nécessaire. Commutateur est aussi installé sur le tableau de bord pour permettre au conducteur de changer de carburant en cours de route.

I.8. Comparaison entre les trois moteurs

Nous comparerons ces trois moteurs à base de :

Leurs fonctionnements (le cycle à 4temps)

En prenant comme base le cycle à 4 temps d'un moteur thermique nous constatons [8] :

Tableau I.1: Phases des trois moteurs à essence, Diesel et gaz

I.8.1. Moteur à essence

Cycle	Fonction assurée dans le moteur à essence	Composants mécaniques en fonctionnement
Admission	Aspiration d'un mélange air-essence	Soupapes d'admission carburatrice ou injectrice pour le mélange
Compression	Compression du mélange de 8 à 12 bars, provoquant un échauffement d'environ de 300°C	Piston dans la chambre de combustion
Combustion (détente)	Allumage du mélange par étincelle électrique	Bougies d'allumage
Échappement	Évacuation des gaz brûlés	Soupapes d'échappement

I.8.2. Moteur Diesel

Cycle	Fonction assurée dans le moteur à Diesel	Composants mécaniques en fonctionnement
Admission	Aspiration d'air	Soupapes d'admission
Compression	Compression de l'air de 20 à 30 bars provoquant un échauffement de l'ordre de 600°C	Piston dans la chambre de combustion
Combustion (détente)	Injection du combustible sous forte pression (100 à 300 bars) qui s'enflamme spontanément au contact de l'air	Injecteur
Échappement	Évacuation des gaz brûlés	Soupapes d'échappement

I.8.3. Le moteur à gaz

Cycle	Fonction assurée dans le moteur à gaz	Composants mécaniques en fonctionnement
Réservoir	Arrête l'alimentation en carburant en cas de rupture, un raccord et d'un limiteur de remplissage.	Soupapes de sécurités
Vaporisateur et détenteur	Changement d'état du GPL pour le faire passer d'un état liquide à un état gazeux.	
Système d'admission	Permet d'acheminer le GPL gazeux dans les chambres de combustion.	Des injecteurs séquentiels.

Chapitre 2

Processus de combustion

II.1. Introduction

La combustion est une réaction chimique globalement exothermique, lente au départ mais pouvant devenir rapide et violente, avec émission de rayonnement et élévation de température pouvant se traduire par un dégagement de chaleur. Cela peut se produire dans un système "ouvert" ou dans un système "fermé" avec ou sans échange de matière et d'énergie entre le système et le milieu extérieur. Les réactions chimiques ne peuvent se produire que si des espèces chimiques, telles que des atomes, des ions, des radicaux et des molécules, entrent en contact en premier ou sont suffisamment proches pour s'altérer mutuellement.

La réaction de combustion est essentiellement une réaction oxydo-réduction dans laquelle l'oxydant est appelé comburant (oxygène pur ou dilué, ozone, chlore, nitrates, etc.) et le réducteur est appelé combustible (H_2 , CO, hydrocarbure, etc.). Elle s'effectue par un mécanisme complexe faisant intervenir un grand nombre de réactions dites « élémentaires », dont chacune dégage de la chaleur, la chaleur l'emportant sur la consommation. Si ce processus a oxydé le carburant dans la mesure du possible, nous pouvons écrire [9] :



La combustion est un processus chimique qui se produit lorsqu'un combustible est oxydé par un oxydant ; les résultats de la combustion sont également connus sous le nom de gaz brûlés ou de fumée. La combustion génère de l'énergie calorifique, en général, émet de la lumière. La croissance de la civilisation industrielle contemporaine et la protection de l'environnement dépendent de la régulation de cette réponse de combustion. Les corps suivants sont présents dans un phénomène de combustion :

- Le combustible
- Le comburant
- Le produit de combustion

II.2. Différents aspects d'une réaction chimique de combustion

Une réaction chimique peut être envisagée sous deux aspects :

II.2.1. Aspect thermodynamique

Cet aspect concerne les caractéristiques énergétiques de la réaction indépendamment de son évolution dans le temps.

II.2.2. Aspect cinétique

Cet aspect concerne l'étude du déroulement de la réaction au cours du temps.

L'étude des réactions chimiques porte sur les éléments suivants :

A) L'effet thermique

- Chaque réaction s'accompagne d'une émission ou d'une absorption de chaleur.
- La grandeur de cet effet thermique dépend de la réaction et d'un certain nombre de facteurs
- L'étude des chaleurs de réaction est dénommée : "la thermochimie"

B) L'équilibre chimique

- Les réactions sont plus ou moins complètes suivant les conditions de leurs déroulements.
- Pour prévoir une transformation et sa limite on fait appel à une discipline dénommée : "la thermodynamique chimique".

C) L'oxydo-réduction

- Dans ce cas, les réactions s'accompagnent d'un transfert de charges électriques qui leur donne des propriétés caractéristiques.

D) La vitesse de réaction

- Lorsqu'une réaction se déroule avec une certaine vitesse, l'étude de sa vitesse fait l'objet d'une discipline dénommée : "la cinétique chimique"

II.3. Principe générale d'une réaction de combustion

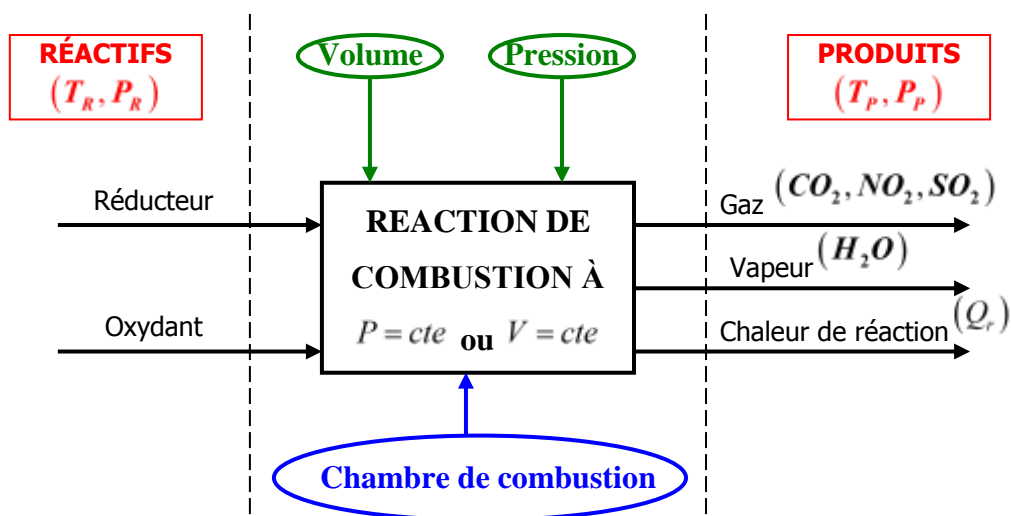


Figure II.13 : Entrées – Sorties d'une réaction de combustion [10].

II.4. Facteurs de qualité d'une réaction de combustion

La qualité de la combustion pour un combustible est principalement déterminée par deux facteurs :

II.4.1. Rendement de la combustion

Il caractérise le degré d'accomplissement de la réaction chimique, ou bien l'absence d'imbrûlés ou de composés incomplètement oxydés.

En pratique, la combustion est optimisée en jouant sur la quantité d'air. Un grand excès d'air garantit la disponibilité suffisante de la quantité d'oxygène pour le déroulement de la combustion.

Cet état de fait :

- Limite les risques d'imbrûlés.
- Dilue les fumées, dont la température chute.

II.4.2. Niveau thermique

Le niveau thermique caractérise le niveau atteint par les températures de la combustion. Il est déterminé par le rapport de la quantité de chaleur libérée par la combustion à la quantité des réactifs et des produits. La température qui résulte suite à la réaction de combustion est d'autant plus élevée lorsque :

- Le combustible renferme une plus grande proportion d'éléments eux-mêmes combustibles C, H et S.
- La quantité d'air amenée se rapproche davantage de la quantité théorique.

Le niveau atteint par la température de combustion dépend essentiellement de :

- La composition chimique du combustible,
- Pouvoir calorifique du combustible,
- La quantité d'air amenée,
- Températures respectives de l'air et du combustible au moment de la combustion [10].

II.5. Triangle du feu

Une combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments que l'on nomme de façon symbolique le triangle du feu :

II.5.1. Carburant

Les plus fréquemment utilisés est :

- L'air comprend principalement l'oxygène, l'azote, la vapeur d'eau et du CO₂.
- L'oxygène pur.

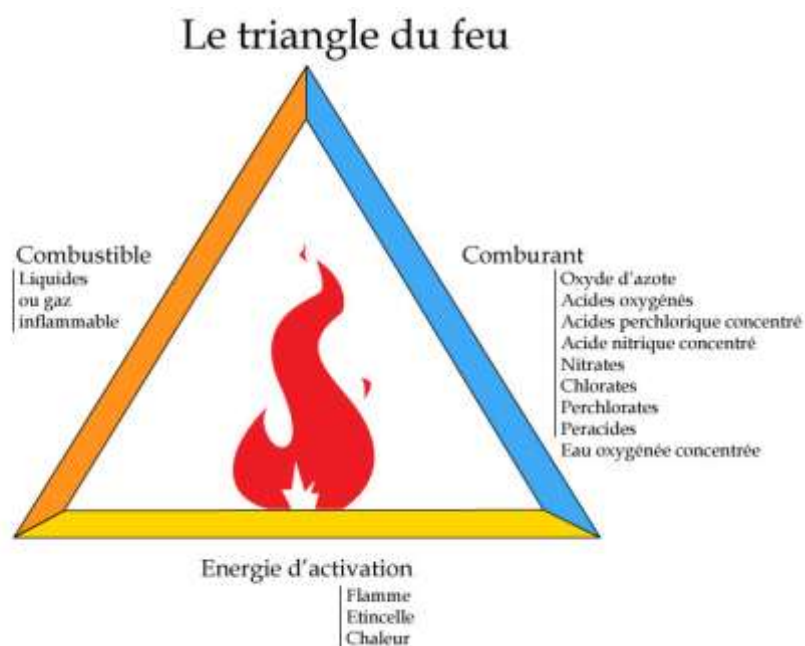
II.5.2. Combustible

C'est une substance qui peut brûler en présence d'un comburant, est souvent un produit organique, c'est-à-dire composé principalement de carbone et d'hydrogène, ex (gaz, fioul, alcool, bois, charbon).

II.5.3. Énergie d'activation

Généralement la chaleur ou une flamme, par exemple celle produite par une étincelle. Les énergies d'activation sont multiples et d'origines différentes :

- Thermique
- Chimique
- Biologique
- Mécanique
- Électrique



Benard, 2011

Figure II.2 : Triangle du feu : association des trois éléments indispensables [11], [12].

II.6. Différentes classes de feu

- **Feu de classe A** : feux de matériaux solides, généralement organiques, dont la combustion se fait normalement avec formation de braises (bois, charbon, papier etc.).
- **Feu de classe B** : feux de liquides ou de solides liquéfiés (cires, résines, paraffines, graisses, hydrocarbures, solvants, Alcools, ...).
- **Feu de classe C** : feux de gaz.
- **Feu de classe D** : feux de métaux.

Tableau II.1 : Tableau présentant les différentes classes de feu [13].

Classes de feux	Produits	Procédés d'extinction	Moyens d'extinction	Observation
A Feux dits « secs »	- Bois. - Charbon. - Caoutchouc. - Végétaux. - Papier, carton. - Textiles. - Plastique...	Refroidissement ou arrêt de la réaction provoquée par la présence d'oxygène.	- Eau (jet plein ou diffusé). - Eau avec additif. - Eau légère. - Poudre polyvalente. - Liquide ignifugé. - Mousse.	
B Feux dits « gras »	<i>Liquides particulièrement inflammables :</i> - Ethers. - Cétones. - Alcools. - Solvant. <i>Liquides inflammables de 1^{ère} catégorie :</i> - Pétrole, kérosène, super carburant... - White spirit... <i>Liquides inflammables de 2^{ème} catégorie :</i> - Gasoil, fioul... - Huile, grasse	Refroidissement ou arrêt de la réaction provoquée par la présence d'oxygène.	- Poudres sèches BC ou ABC. - Anhydride carbonique. - Halogènes autorisés. - Mousse anti-alcools. - Poudres sèches BC ou ABC. - Anhydride carbonique. - Halogènes autorisés. - Eau légère. - Mousse.	- Si le liquide est répandu en nappe, utiliser le sable sec.
C Feux dits « de gaz »	- Gaz de ville. - Butane. - Propane. - Acétylène. - Méthane...	Arrêt de la réaction provoquée par la présence d'oxygène.	- Poudres sèches BC ou ABC. - Anhydride carbonique. - Halogènes autorisés.	- En cas de fuite enflammée ou non, fermer la vanne d'arrivée du gaz.
D Feux hors classification	- Aluminium. - Magnésium. - Sodium. - Potassium. - Protoxyde de sodium...	Arrêt de la réaction provoquée par la présence d'oxygène.	- Poudres spéciales. - Liquides spéciaux. - Sables sec, ciment...	

II.7. Pouvoirs calorifiques

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète, sous la pression atmosphérique normale, de l'unité de combustible, celui-ci ainsi que les produits de combustion étant à 0 °C.

- **Notation** : PC.
- **Unité** : [kJ/kg(n) de combustible] ou [kJ/m³(n) de combustible] [13].

II.7.1. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

C'est l'énergie thermique libérée par la réaction de combustion sous forme de chaleur sensible, à l'exclusion de l'énergie de vaporisation (chaleur latente) de l'eau présente en fin de réaction. La différence entre ces deux pouvoirs est due à la chaleur de condensation de l'eau contenue dans les fumées ; il est évident que plus un combustible renfermera de l'eau et d'hydrogène libre, plus grande sera la différence entre ces deux pouvoirs.

II.7.2. Pouvoir calorifique supérieur (PCS)

C'est l'énergie thermique libérée par la réaction de combustion. Cette énergie comprend la chaleur sensible, mais aussi la chaleur latente de vaporisation de l'eau, généralement produite par la combustion. Cette énergie peut être entièrement récupérée si la vapeur d'eau émise est condensée, c'est-à-dire si toute l'eau vaporisée se retrouve finalement sous forme liquide.

II.8. Types de combustion

II.8.1. Combustion rapide

La combustion rapide est une forme de combustion au cours de laquelle de grandes quantités de chaleur et d'énergie sous forme de lumière sont relâchées, donnant naissance au feu. Elle est utilisée dans certaines machines telles que les moteurs à combustion interne ou les armes thermo-bariques.

II.8.2. Combustion lente

La combustion lente est une réaction qui entraîne un faible dégagement de calories avec peu d'élévation de température et une absence de flammes.

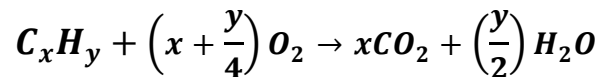
II.8.3. Combustion complète

Lors d'une combustion complète, le réactif réagira avec le comburant jusqu'à former des Produits qui ne pourront plus être oxydés avec le comburant : les produits ont atteint un degré de stabilité qu'une réaction de combustion ne peut modifier.

Dans le cas d'un hydrocarbure réagissant avec le dioxygène, les produits de combustion sont le dioxyde de carbone un produit de combustion stable, ainsi une combustion complète fournit les mêmes produits de réactions quels que soient les réactifs. Une combustion complète

permet d'obtenir la quantité maximale d'énergie disponible étant le pouvoir calorifique.

La réaction de combustion d'un *alcane* liquide type C_xH_y , est dite complète, si les gaz brûlés ne comprennent que des produits complètement oxydés. Dans notre cas : le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O).

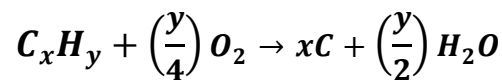


II.8.4. Combustion incomplète (en défaut d'air)

La combustion incomplète aura lieu quand il n'y aura pas assez de comburant pour permettre la réaction complète du combustible ou lorsque le temps de contact à une température rendant la combustion possible est trop faible. Elle produit donc des résidus de combustion, sous forme de cendres qui génèrent des fumées, dont certains composés sont très toxiques pour l'homme et pour l'environnement tel que le monoxyde de carbone (gaz mortel), des particules de carbone pur (suie, goudron, cendres), des oxydes d'azote, des hydrocarbures (cancérogènes tel le benzène, ou fortement toxiques telles les HAP), des composés organiques volatiles.

La réaction de combustion d'un *alcane* liquide type C_nH_{2n+2} est dite incomplète si les produits sont : le monoxyde de carbone (C) et de l'eau (H_2O).

La combustion incomplète qui produit du carbone (solide) et de l'eau :



II.9. Classification des combustions

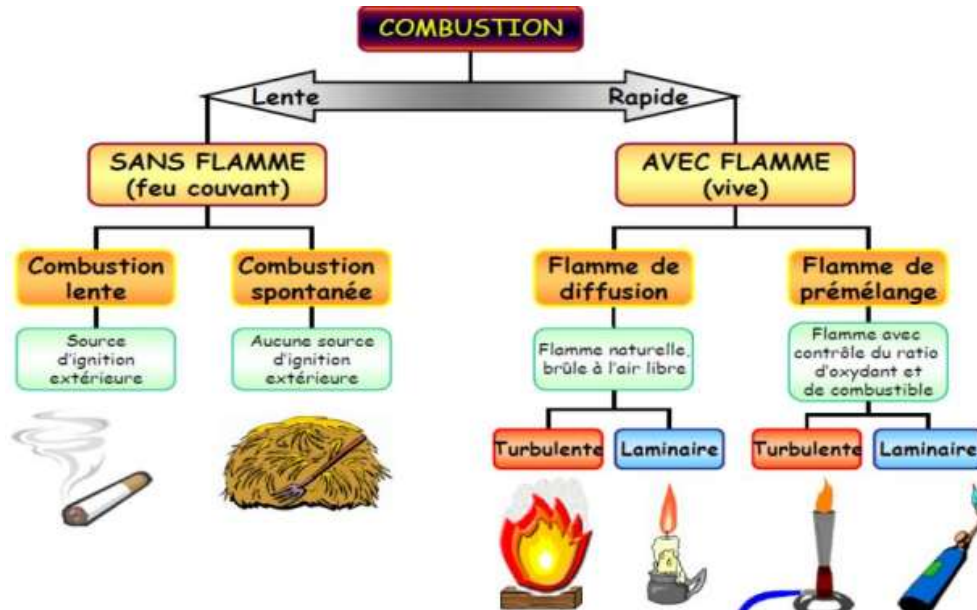


Figure II.3 : Classification basée sur l'absence ou la présence de la flamme [14].

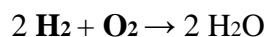
II.10. Notion de stœchiométrie

La notion de la stœchiométrie est associée à une combustion propre avec un maximum de chaleur dégagée. Elle s'articule sur deux aspects, à savoir, la composition des réactifs et la nature de la combustion. En effet, un mélange réactif est dit stœchiométrique si :

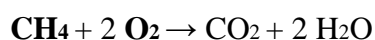
1- La combustion est complète où tout le carburant est transformé en produits de combustion.

2- Le mélange est strict où ni le carburant ni le comburant ne se trouvent dans les produits. La combustion s'écarte de la stœchiométrie si le mélange réactif est strict mais la combustion est incomplète ou dans le cas où le mélange n'est pas strict même si la combustion est complète. Voici quelques exemples de réactions stœchiométriques [15] :

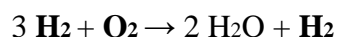
Combustion complète d'un mélange strict H_2 / O_2



Combustion complète d'un mélange strict CH_4 / O_2 et de réactions non stœchiométriques :



Combustion incomplète d'un mélange non strict H_2 / O_2

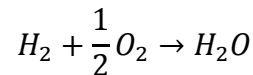


Combustion incomplète d'un mélange non strict CH_4/O_2



Exemple 1.1 : Analyse de la combustion d'un mélange stœchiométrique H_2/O_2 .

On utilisera à cet effet l'équation de la réaction suivante : $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ en commençant par la réécrire en mettant un coefficient stœchiométrique égal à l'unité à côté de l'espèce H_2 comme suit :



Calculons d'abord le nombre de moles total dans le mélange réactif composé d'oxygène et d'hydrogène purs :

$$n_{\text{H}_2} = 1 \text{ mole}, \quad n_{\text{O}_2} = \frac{1}{2} \text{ mole} \quad \text{et} \quad n = n_{\text{H}_2} + n_{\text{O}_2} = \frac{2}{3} \text{ moles}$$

Les fractions molaires :

$$X_{\text{H}_2} = \frac{n_{\text{H}_2}}{n} = \frac{2}{3}, \quad X_{\text{O}_2} = \frac{n_{\text{O}_2}}{n} = \frac{1}{3}$$

La masse molaire du mélange réactif est :

$$m_{\text{H}_2/\text{O}_2} = (x_{\text{H}_2} * m_{\text{H}_2}) + (x_{\text{O}_2} * m_{\text{O}_2})$$

$$m_{\text{H}_2/\text{O}_2} = \left(\frac{2}{3} * 2\right) + \left(\frac{1}{3} * 32\right) = 12 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}}$$

Rapport molaire air/fuel :

c'est le résultat de la division des moles de comburant sur les moles de carburant :

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{n_{\text{O}_2}}{n_{\text{H}_2}} = \frac{1}{2} = \frac{1 \text{ kmole O}_2}{2 \text{ kmole H}_2}$$

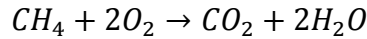
Rapport massique air/fuel :

C'est le résultat de la division du nombre de moles d'oxydant sur le nombre de moles de carburant.

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{\text{O}_2}}{m_{\text{H}_2}} = \frac{n_{\text{O}_2} m_{\text{O}_2}}{n_{\text{H}_2} m_{\text{H}_2}} = \frac{\frac{1}{2} * 32}{1 * 2} = \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg H}_2}$$

Ce qui revient à dire que lors de la combustion complète d'un mélange strict H_2 / O_2 chaque kg d'hydrogène nécessite 8 kg d'oxygène.

Exemple 1-2 : Analyse de la combustion d'un mélange stœchiométrique CH_4 / O_2 .



Calculons d'abord le nombre de moles total dans le mélange réactif composé d'oxygène et d'hydrogène purs :

$$n_{CH_4} = 1 \text{ mole}, \quad n_{O_2} = 2 \text{ moles} \quad \text{et} \quad n = n_{CH_4} + n_{O_2} = 3 \text{ moles}$$

Les fractions molaires :

$$x_{CH_4} = \frac{n_{CH_4}}{n} = \frac{1}{3}, \quad x_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n} = \frac{2}{3}$$

La masse molaire du mélange réactif est :

$$m_{CH_4/O_2} = (x_{CH_4} * m_{CH_4}) + (x_{O_2} * m_{O_2})$$

Rapport air/fuel molaire :

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{n_{O_2}}{n_{CH_4}} = \frac{2}{1} = 2 \frac{\text{kmole } O_2}{\text{kmole } H_2}$$

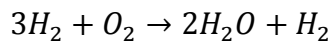
Rapport air/fuel massique :

C'est le résultat de la division de la masse de l'oxydant sur la masse du carburant.

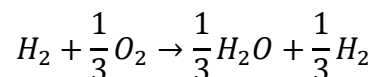
$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{O_2}}{m_{CH_4}} = \frac{n_{O_2} m_{O_2}}{n_{CH_4} m_{CH_2}} = \frac{2 * 32}{1 * 16} = 4 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg } CH_4}$$

Ce qui revient à dire que lors de la combustion complète d'un mélange strict $J < O_2$ chaque kg de Méthane nécessite 4 kg d'oxygène.

Exemple 1-3 : Analyse de la combustion d'un mélange non strict composé de H_2 / O_2 .



On utilisera à cet effet l'équation de la réaction suivante : $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$ en commençant par la réécrire en mettant un coefficient stœchiométrique égal à l'unité à côté de l'espèce H_2 comme suit :



Calculons d'abord le nombre de moles total dans le mélange réactif composé d'oxygène et d'hydrogène purs :

$$n_{H_2} = 1 \text{ mole}, \quad n_{O_2} = \frac{1}{3} \text{ mole} \quad \text{et} \quad n = n_{H_2} + n_{O_2} = \frac{4}{3} \text{ moles}$$

Les fractions molaires :

$$x_{H_2} = \frac{n_{H_2}}{n} = \frac{3}{4}, \quad x_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n} = \frac{1}{4}$$

La masse molaire du mélange réactif est :

$$m_{H_2/O_2} = (x_{H_2} * m_{H_2}) + (x_{O_2} * m_{O_2})$$

$$m_{H_2/O_2} = \left(\frac{3}{4} * 2\right) + \left(\frac{1}{4} * 32\right) = 9.5 \frac{kg}{kmole}$$

Rapport air/fuel molaire :

C'est le résultat de la division du nombre de moles d'oxydant sur le nombre de moles de carburant.

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{n_{O_2}}{n_{H_2}} = \frac{\frac{1}{3}}{1} = \frac{1 \text{ kmole } O_2}{3 \text{ kmole } H_2}$$

Rapport air/fuel massique :

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{O_2}}{m_{H_2}} = \frac{n_{O_2} m_{O_2}}{n_{H_2} m_{H_2}} = \frac{\frac{1}{3} * 32}{1 * 2} = 5.33 \frac{kg \text{ } O_2}{kg \text{ } H_2}$$

Sachant que chaque kg d'hydrogène nécessite 8 kg d'oxygène pour avoir la stœchiométrie on a dans ce cas précis un défaut de 2,67 kg d'oxygène. Autrement dit, on dispose d'une quantité d'Oxygène égale à ~ 66 % la quantité nécessaire à la stœchiométrie.

Exemple 1-4 : Analyse de la combustion d'un mélange non strict composé de CH₄/ O₂.



Calculons d'abord le nombre de moles total dans le mélange réactif composé d'oxygène et d'hydrogène purs :

$$n_{CH_4} = 1 \text{ mole}, \quad n_{O_2} = 3 \text{ moles} \quad \text{et} \quad n = n_{CH_4} + n_{O_2} = 4 \text{ moles}$$

Les fractions molaires :

$$x_{CH_4} = \frac{n_{CH_4}}{n} = \frac{1}{4}, \quad x_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n} = \frac{3}{4}$$

La masse molaire du mélange réactif est :

$$m_{CH_4/O_2} = (x_{CH_4} * m_{CH_4}) + (x_{O_2} * m_{O_2})$$

$$m_{CH_4/O_2} = \left(\frac{1}{4} * 16\right) + \left(\frac{3}{4} * 28\right) = 28 \frac{kg}{kmole}$$

Rapport air/fuel molaire :

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{n_{O_2}}{n_{CH_4}} = \frac{3}{1} = 3 \frac{kmole O_2}{kmole CH_2}$$

Rapport air/fuel massique :

C'est le résultat de la division de la masse de l'oxydant sur la masse du carburant.

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{m_{O_2}}{m_{CH_4}} = \frac{n_{O_2} m_{O_2}}{n_{CH_4} m_{CH_2}} = \frac{3 * 32}{1 * 16} = 6 \frac{kg O_2}{kg CH_4}$$

Sachant que chaque kg de Méthane nécessite 4 kg d'oxygène pour avoir la stœchiométrie on a dans ce cas précis un excès d'oxygène de 2 kg. Autrement dit, on dispose d'une quantité d'Oxygène égale à 150 % de celle nécessaire à la stœchiométrie [XX].

II.11. Processus de combustion dans les trois moteurs

II.11.1. Combustion dans le moteur Diesel

La combustion dans les moteurs diesel est un processus très complexe et jusqu'aux années 90 la parfaite connaissance du process n'était pas encore maîtrisée. Durant des dizaines d'années, les chercheurs avaient des difficultés à surmonter le défi pour dévoiler tous ses secrets malgré les avancées technologiques en photographie à grande vitesse, la puissance de calcul des ordinateurs et le développement de modèles mathématiques permettant de simuler la combustion dans le moteur diesel.

Dans les moteurs diesel, le carburant est souvent injecté dans le cylindre du moteur vers la fin de la course de compression, juste quelques degrés d'angle de vilebrequin avant le PMH. Le carburant liquide est généralement injecté à grande vitesse en un ou plusieurs jets à travers de petits orifices ou buses dans la pointe de l'injecteur. Il s'atomise en petites gouttelettes et pénètre dans la chambre de combustion. Le carburant atomisé absorbe la chaleur de l'air comprimé chauffé environnant, se vaporise et se mélange avec l'air haute pression à haute température environnant. Au fur et à mesure que le piston continue de se

rapprocher du PMH, la température du mélange (principalement de l'air) atteint la température d'allumage du carburant. L'allumage rapide de certains carburants et air pré-mélangés se produit après la période de retard d'allumage. Cet allumage rapide est considéré comme le début de la combustion (également la fin de la période de retard d'allumage) et est marqué par une forte augmentation de la pression du cylindre lors de la combustion du mélange air-carburant. L'augmentation de pression résultant de la combustion pré-mélangée comprime et chauffe la partie non brûlée de la charge et raccourcit le délai avant son allumage. Il augmente également le taux d'évaporation du carburant restant. L'atomisation, la vaporisation, le mélange vapeur-air de carburant et la combustion se poursuivent jusqu'à ce que tout le carburant injecté soit brûlé [16].

II.11.2. Combustion dans les moteurs à essence

Un moteur à essence démarre le processus de combustion à chaque cycle à l'aide d'une bougie d'allumage. L'air et le carburant sont généralement mélangés à l'aide de carburateurs ou d'un système d'injection de carburant dans le système d'admission avant l'entrée dans le cylindre du moteur. Au niveau de la chambre de combustion, la bougie d'allumage produit une décharge électrique à haute tension entre deux électrodes qui enflamme le mélange air-carburant qui entoure la bougie. Lors de l'admission, le carburant et l'air aspirés se mélangent dans le cylindre avec les gaz brûlés résiduels restant du cycle précédent. Après la fermeture de la soupape d'admission, le contenu du cylindre est comprimé au-dessus de la pression et de la température atmosphériques à mesure que le volume du cylindre est réduit. Entre 10 et 40 degrés d'angle de vilebrequin avant le PMH, une décharge électrique à travers la bougie d'allumage démarre le processus de combustion. Ce processus est ensuite répété pendant un cycle de périodes pendant le processus du moteur [17].

II.11.3. Combustion dans les moteurs à gaz

L'utilisation de carburants alternatifs dans les moteurs à combustion interne est en augmentation en raison des réglementations strictes en matière d'émissions et du coût plus élevé du carburant diesel. Les carburants alternatifs apportent également des solutions à un éventail de problèmes environnementaux et économiques. Les carburants alternatifs, y compris les biocarburants et les carburants gazeux tels que le méthanol, le gaz naturel et l'hydrogène, présentent un potentiel de réduction des émissions et de la consommation de carburant et ont donc été étudiés et largement utilisés. En outre, les carburants alternatifs peuvent réduire la dépendance vis-à-vis du pétrole importé et renforcer la sécurité

énergétique. Parmi les carburants gazeux alternatifs, le GPL est considéré comme le plus prometteur pour les MCI en raison de sa combustion propre, de ses prix compétitifs, de ses sources variées et de ses importantes réserves [18].

Sur les véhicules, le mélange de gaz comprimé est en bouteilles. Une multivalves spéciale est installée sur ces appareils, ce qui permet de remplir le cylindre et de doser le mélange dans le moteur à gaz à combustion interne. Le mélange liquéfié pénètre dans la vanne par le gazoduc, avec un dispositif de filtrage installé. Le gaz est nettoyé des particules solides et des résines qui peuvent s'y trouver. Le mélange entre ensuite dans l'évaporateur de gaz. La pression du gaz chute à la pression atmosphérique. Le mélange entre dans le distributeur et est transféré dans le mélangeur. Dans cet appareil, il se mélange et entre dans la chambre de combustion. Le processus de combustion est alors déclenché par des réactions thermochimiques et des transformations thermodynamiques.

Chapitre 3

Formulation thermochimique de la combustion des différents moteurs

III.1.Introduction

Les bons modèles conceptuels sont à la base des théories mathématiques couronnées de succès. Des modèles et des théories ont été discutés pour les déflagrations, les détonations, la diffusion des flammes, l'allumage, la combustion de propulsion, et la combustion turbulente.

Dans plusieurs de ces domaines, la genèse des théories mathématiques s'est produite pendant les cinquante dernières années et est anticipées à l'avenir dans toutes les avancées significatives. L'interaction croissante entre la théorie et le calcul facilitera ce progrès.

À long terme, une question appropriée concerne les nouvelles méthodes analytiques efficaces qui émergeront pour aborder des problèmes mathématiques pertinents des méthodes de théorie de combustion comparables à la méthode de révolution asymptotique des années 60. Il y aura sûrement des améliorations spectaculaires des capacités expérimentales, par exemple avec le diagnostic laser et il sera important que la théorie prenne contact avec l'expérience pour qu'elle progresse correctement.

Le taux de développement des capacités informatiques est, cependant, plus grand, et puisque les équations de conservation fondamentales sont vraisemblablement connues, les avancées à travers les relations de calcul sont les plus prometteuses.

Pour bien comprendre le processus de combustion et ses aléas nous faisons appel à quelques travaux effectués dans ce domaine, en plus nous faisons référence de quelques ouvrages pour la clarification de certaines notions importantes.

Christian et al. ont développé un modèle numérique de prédiction des émissions des principaux polluants (CO , CO_2 et NO), pour un moteur à gaz soumis à différentes conditions de fonctionnement et ce modèle phénoménologique a correctement décrit les émissions de CO et de CO_2 mesurées expérimentalement pour l'ensemble des conditions de fonctionnement du moteur exploré.

Fisher et al. [2] décrivent dans leurs travaux le développement d'un modèle cinétique chimique détaillé pour le butanoate méthylique, un substitut des carburants biodiesels. Ils ont développé des propriétés thermodynamiques et des modèles cinétiques chimiques détaillés pour la combustion de deux gaz oxygénés : butanoate méthylique, un composé modèle pour des carburants biodiesel, et formiate méthylique, une molécule relative plus simple.

Dans le travail de Zhiwei et al. [3] une étude de modélisation a été entreprise pour découvrir si en optimisant les paramètres de régime de 258 réactions C_3 d'un mécanisme de chimie de combustion qui a été ajouté à 205 réactions $C_{<3}$, un mécanisme précédemment. Optimisé fournirait l'explication satisfaisantes de la vitesse de flamme C_3 et les données d'allumage.

Mittal et al. [4] Ont effectué l'étude expérimentale et numérique utilisant l'analyse d'incertitude des paramètres les plus importants pour évaluer le mécanisme pour la combustion des mélanges $CO + H_2$ aux pressions élevées de la gamme 15-50 bar aux températures de 950 à 1100 K.

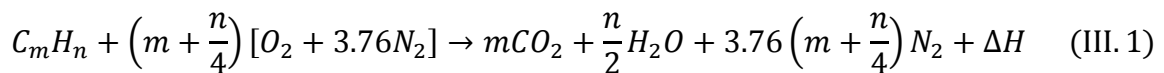
Des expériences ont été réalisées dans une machine de compression rapide. Des retards d'auto-allumage ont été mesurés pour les compositions stœchiométriques de $CO + H_2$ contenant entre 0 et 80 % de CO dans le mélange total de carburant.

Buck master et al. [5] ont mis l'accent sur le développement de la théorie de combustion avec ceux du progrès de la modélisation informatique.

III.2. Réaction de combustion

La détermination de la température finale de combustion nécessite un bilan énergétique qui se présente selon le cas.

La réaction globale est couramment mise sous la forme d'une équation chimique avec la prise en compte de la composition initiale du combustible. Dans le cas d'un mélange stœchiométrique composé d'air sec et d'hydrocarbure C_mH_n , on peut écrire :



Considérant la teneur en gaz résiduels négligée, comme hypothèse de combustion idéale, la détermination de la composition initiale des gaz brulés de la réaction chimique (Eq. III.1) se fait par l'équilibre de chacun de ses membres en termes de bilans de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote en connaissant le dosage nécessaire du mélange Gazole/air.

Le dosage idéal est défini comme étant le rapport des masses du comburant et du carburant misent en jeu

$$Di = \frac{m_{car} \cdot R}{m_{com} \cdot \varphi} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{avec} \quad m_{car} = \sum_I n_I m_I \quad (\text{III.3})$$

$$\text{et} \quad m_{com} = n_{O_2} m_{O_2} + 3.76 n_{N_2} m_{N_2} \quad (\text{III.4})$$

III.3. Enthalpie de réaction ($\Delta_R H^*$), composition des gaz brûlés à (T, P)

Rappelons que l'enthalpie d'un corps pur ne peut être calculée de façon absolue car elle dépend de l'énergie interne qui n'est pas calculable [10]. Néanmoins, des tables d'enthalpies molaires standards ont été établies afin de pouvoir calculer rapidement une enthalpie standard de réaction à partir des valeurs de ces enthalpies molaires

$$\Delta_r H^o|T = \sum_i \alpha_i^r \cdot \Delta_f h_i^o|T$$

Cela suppose de définir une échelle arbitraire d'enthalpies molaires en définissant un zéro arbitraire d'enthalpie. C'est pour éviter cet inconvénient qu'a été définie l'enthalpie standard de formation à la température T notée $\Delta_f h^o|T$ dont les valeurs pour chaque corps pur sont tabulées à la température de référence de 298 K (25 °C) et résumées au tableau 1.

L'enthalpie standard de formation à T , d'un composé chimique est la différence d'enthalpie mise en jeu lors de la formation d'une mole de ce composé à partir des corps simples (purs) pris dans l'état standard et stables à la température considérée T . Elle correspond à l'enthalpie standard de réaction à T , $\Delta_r H^o|T$ de la réaction de formation du corps pur à partir des corps purs simples correspondants, stables dans l'état standard à T .

$$\text{À } T = T^* \Rightarrow \Delta_R H^* = \sum n_i^R H_i^* \text{ et pour } T^* = 298 \text{ K.}$$

Tableau III.1 : Propriétés thermodynamiques des produits de dissociation

<i>Espèce</i>	<i>CO₂</i>	<i>CO</i>	<i>H₂O</i>	<i>H₂</i>	<i>N₂</i>	<i>O₂</i>
Δh^o [kJ/kmol]	-393520	-110530	-241830	0	0	0
s^o [kJ/kmol·K]	-393520	197,66	188,84	130,68	191,51	205,04

Partie 1

Combustion de l'essence

III.4. Combustion de l'essence

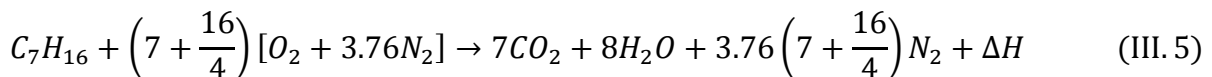
III.4.1. Combustion de l'heptane

L'heptane ou n-heptane est l'hydrocarbure saturé de la famille des alcanes linéaires de formule C_7H_{16} . Un heptane est le terme générique pour désigner un des 9 isomères ou qui qualifie un dérivé de ces molécules. L'heptane, liquide incolore, a des propriétés qui peuvent être trouvées dans de nombreux ouvrages traitant le processus de combustion (tableau 1) :

Tableau III.2 : Propriétés de l'essence C_7H_{16} .

Température d'auto-inflammation	280	[°C]
Température d'ébullition	98.42	[°C]
Température fusion	-91	[°C]
Masse volumique	683	[Kg/m ³]
Masse molaire	100.201	[g/mol]
Enthalpie	-187.89	[kJ/mol]
Entropie	425.41	[J/ k.mol]

Pour le propane l'équation (1) s'écrit

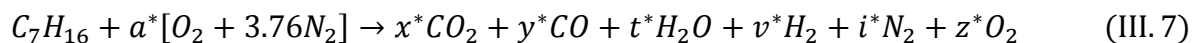


Et le dosage

$$D = \frac{(7.12)+(16.1).1}{[(2.16)+3.76(2.14)].11} = \frac{1}{15.1008} \approx \frac{1}{16} \quad (III.6)$$

III.4.2. Composition des gaz brûlés en fonction de la richesse du mélange

À l'état standard :



Bilan des masses :

$$C : x^* + y^* = 7$$

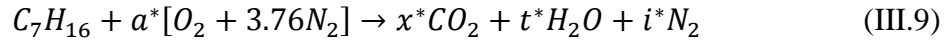
$$H : t^* + v^* = 8 \quad (III.8)$$

$$N : i^* = 3.76a^*$$

$$O : a^* = x + \frac{y^*}{2} + \frac{t^*}{2} + z^*$$

• **Mélange stricte (R=1)**

Lors d'une Combustion stœchiométrique le carbone et l'hydrogène sont oxydés sans excès d'oxygène, ce qui implique l'absence de CO, H₂ et O₂, la réaction (7) se réduit à :



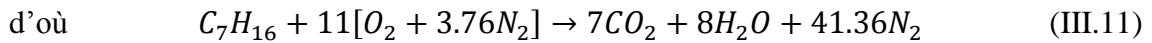
Bilan des masses

$$C : x^* + y^* = 7$$

$$H : t^* + v^* = 8 \quad (III.10)$$

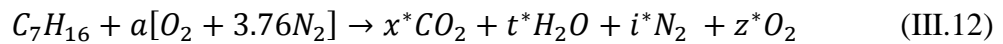
$$N : i^* = 3.76a^* = 41.36$$

$$O : a^* = 11$$



• **Mélange de pauvre (R<1)**

Il y a absence de monoxyde de carbone et d'hydrogène, soit :



Bilan des masses

$$C : x^* = 7$$

$$H : t^* = 8 \quad (III.13)$$

$$N : i^* = 3.76a = 3.76 \frac{a^*}{R}$$

$$O : z^* = a - x^* - \frac{t^*}{2} = \frac{a^*}{R} - 11$$

Le bilan permet d'établir le tableau III.2 :

Tableau III.3 : Fractions molaires pour un mélange pauvre.

R	x*	t*	z*	i*
0.5	7	8	11	82.72
0.6	7	8	7.33	68.93
0.7	7	8	4.71	59.08
0.8	7	8	2.75	51.7
0.9	7	8	1.22	45.96

On représente graphiquement (Fig. III.1) la variation de la fraction molaire des produits de combustion pour un mélange pauvre ($0.5 \leq R \leq 0.9$).

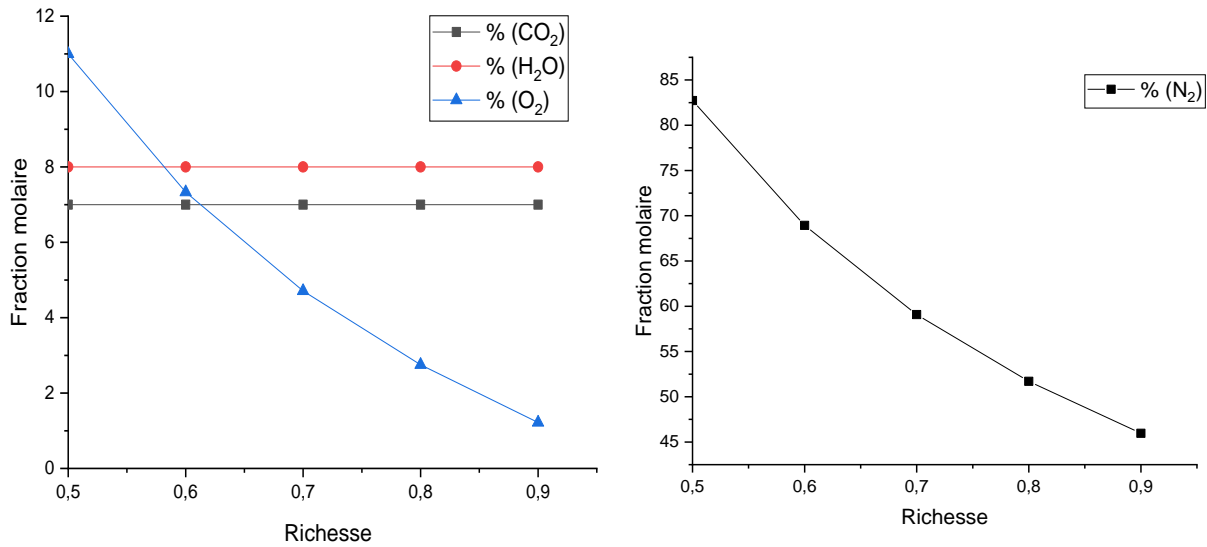
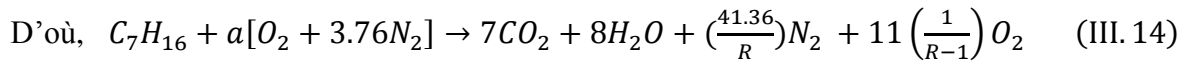
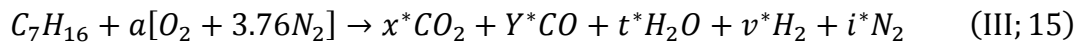


Figure III.1 : Evolution des fractions molaire pour mélange pauvre



- **Mélange riche ($R > 1$)**

Les produits de combustion ne contiennent pas d'oxygène



Bilan des masses

$$C: y^* = 7 - x^*$$

$$H: v^* = 8 - t^* \quad (III.16)$$

$$N: i^* = \frac{a^*}{R} 3.76$$

$$O: t^* = 2 \frac{a^*}{R} - 7 - x^*$$

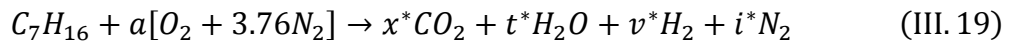
D'autre part, on l'équation du gaz a l'eau :



Dont l'équilibre est négligeable :

$$K_P^{GE} = \frac{y^* t^*}{x^* v^*} = 10^{-6} \approx 0,0 \quad (\text{III.18})$$

si $y^* = 0$



Bilan des masses

$$C: x^* = 7$$

$$H: v^* = 8 - t^* = 22 - \frac{22}{R}$$

$$N: i^* = \frac{a^*}{R} 3.76 = \frac{41.36}{R} \quad (\text{III.20})$$

$$O: t^* = 2 \left[\frac{a^*}{R} + 7 \right] = \frac{22}{R} - 14$$

Soit

$$\left(\frac{22}{R}\right) - 14 > 0$$

$$\Rightarrow 1 < R < 1.55$$

$$22 - \frac{22}{R}$$

Le bilan permet d'établir le tableau 5

Tableau III.4 : Evolution des fractions molaire pour mélange riche.

R	x*	t*	V*	i*
1.1	7	6	2	37.6
1.2	7	4.3	3.67	34.47
1.3	7	2.92	5.07	31.82
1.4	7	1.71	6.28	29.54
1.5	7	0.66	7.33	27.57

On représente graphiquement (fig.17) la variation de la fraction molaire des produits de combustion pour un mélange riche ($1.1 \leq R \leq 1.5$)

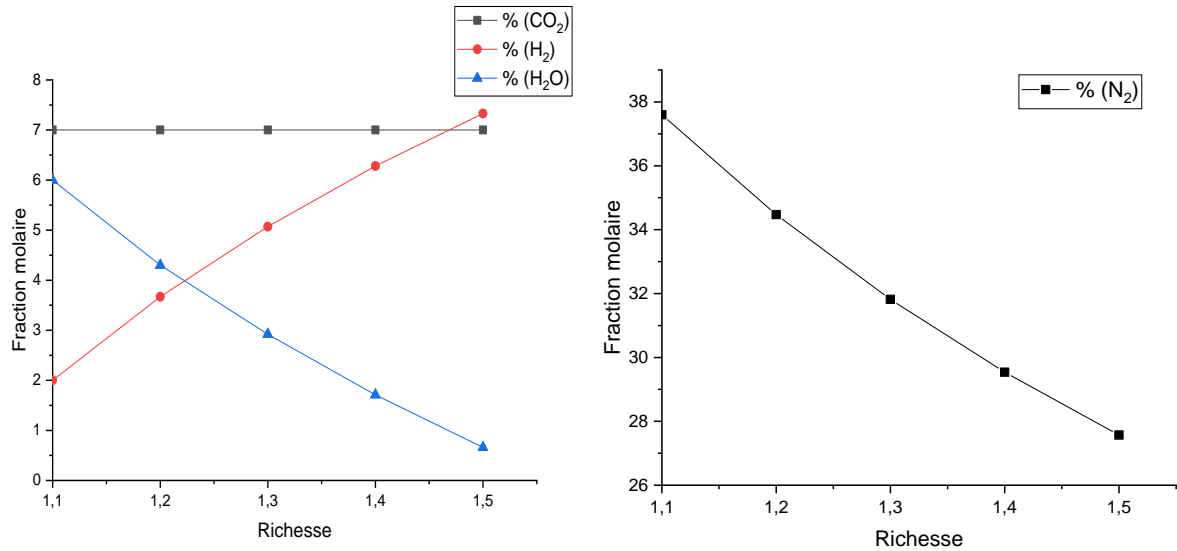


Figure 14 : Évolution des fractions molaires pour mélange riche.

L'enthalpie de formation des gaz diatomiques tels que H_2 et N_2 étant négligeable $\Delta_f h_i^o \cong 0$, L'équation de l'enthalpie de réaction s'écrit :

$$\Delta_R = x^* \Delta H_{CO_2}^F + y^* \Delta H_{CO}^F + t^* \Delta H_{H_2O}^F - \Delta H_{C_7H_{16}}^F \quad (III.21)$$

On résume, dans le tableau, les valeurs de l'enthalpie de réaction pour chaque mélange étudié.

Aux hautes températures les molécules telles que le CO_2 et le H_2O se dissocient, cette température, qui est celle qui provoque la première cassure moléculaire, correspond à la chaleur de dissociation dégagée par la combustion en ce moment. Les réactions de dissociation du CO_2 et du H_2O sont :



On en déduit alors, que le H_2 , CO et le O_2 présents dans la réaction en haut, proviennent de la dissociation ci-dessus, néanmoins on retrouve toujours du CO_2 et du H_2O dans les produits de la réaction vu que la réaction de dissociation est incomplète.

Tableau III.5 : Enthalpie de réaction pour différents mélanges.

Mélange	Strict	Pauvre	Riche			
			R			
$\Delta_R H \left[\frac{J \cdot k}{mol} \right]$	-447460	-447460	1.1	-4017730	1.4	-2981315.71
			1.2	-3614680	1.5	-2727970
			1.3	-3273637.69		

Dans cette partie nous ne traitons que la combustion d'un mélange riche, les cas de combustion de mélanges stricte et pauvre étant similaires à ceux précédemment étudiés.

Soit pour un mélange riche à température et à pression constantes, le bilan des masses

$$\begin{aligned} \text{C: } y^* &= 7 - x^* \\ \text{H: } v^* &= 15 \frac{22}{R} + x \end{aligned} \quad (\text{III.23})$$

$$\text{N : } i^* = \frac{41.36^*}{R}$$

$$\text{O : } t^* = 2 \frac{a^*}{R} - 7 - x^*$$

Et la constante d'équilibre du gaz à l'eau s'écrit

$$K_p^{GE} = \frac{y.t}{x.v} = \frac{(7-x) \left(\frac{22}{R} - 7 - x \right)}{x \left(15 \frac{22}{R} + x \right)} \quad (\text{III.24})$$

D'où

$$\left(k_p^{GE} - 1 \right) x^2 + \left(15 k_p^{GE} - \frac{22 k_p^{GE}}{R} + \frac{22}{R} \right) x - \left(\frac{154}{R} - 49 \right) = 0 \quad (\text{III.25})$$

$$\Delta_{k_p^{GE}} = \left(15 k_p^{GE} - \frac{22 k_p^{GE}}{R} + \frac{22}{R} \right)^2 - 4 \left(k_p^{GE} - 1 \right) \left(\frac{154}{R} - 49 \right) \quad (\text{III.26})$$

Les solutions de l'équation sont :

$$x_{1,2} = \frac{- \left(15 k_p^{GE} - \frac{22 k_p^{GE}}{R} + \frac{22}{R} \right) \pm \sqrt{\Delta_{k_p^{GE}}}}{2 \left(k_p^{GE} - 1 \right)} \quad (\text{III.27})$$

La constant d'équilibre est donné par

$$K_p = e^{\frac{\Delta_r g}{R_u T}}$$

$$\Delta_r g = \Delta_r h - T \Delta_r s$$

$$\Delta_r h = \sum \Delta_f h(\text{produits}) - \sum \Delta_f h(\text{réactifs})$$

$$\Delta_r s = \sum s(\text{produits}) - \sum s(\text{réactifs})$$

La connaissance de l'enthalpie et de l'entropie standards de formation des constituants entrant en jeu dans la dissociation, avec un choix judicieux de la température, on peut

déterminer K_p . Une fois la constante d'équilibre obtenue, on peut donc calculer le déterminant Δ puis déterminer les fractions molaires pour la réaction de dissociation en commençant par (solution de l'équation) pour chaque valeur de R ensuite les autres fractions molaires.

Sur les figures III.3, on représente graphiquement l'évolution des fraction molaire en fonction de température pour des richesses fixées.

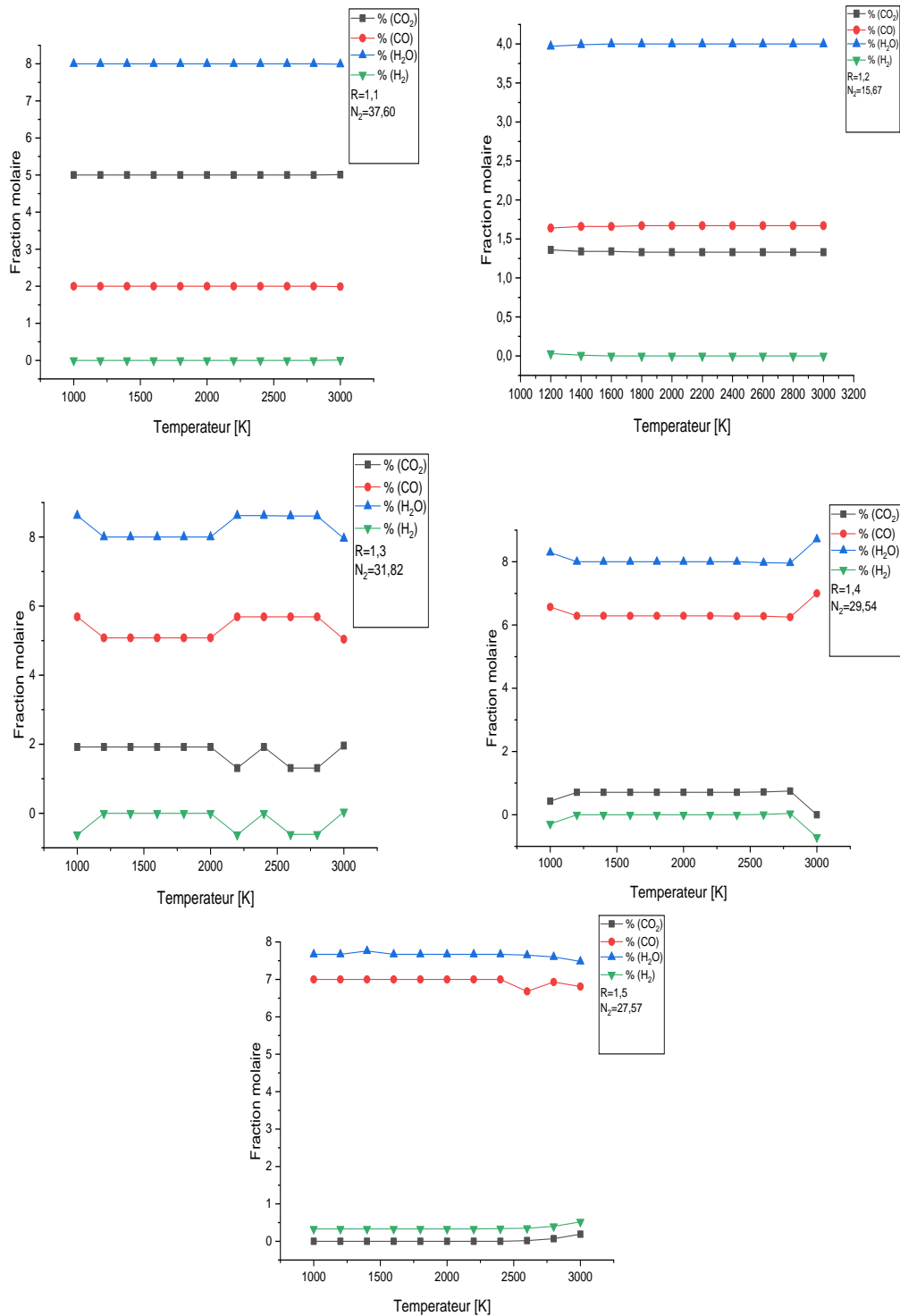


Figure III.3 : Évolution de la fraction molaire en fonction de la température, mélange riche.

III.4.3. Résultats et discussion

La combustion d'un mélange pauvre (Figure III.1) est caractérisée par l'absence de CO et de H₂. Le CO₂ et le H₂ restent en quantités molaire constantes (respectivement 7 et 8) durant le processus de combustion quelle que soit le mélange air/combustible, tandis que le O₂ décroît moyennement (de 11 à 1.22) et le N₂ décroît aussi mais fortement à des fractions molaires (83 à 45.96).

Dans le cas d'une combustion d'un mélange riche pour l'heptane (Figure III.2) en absence du CO₂ et d'O₂, le CO₂ demeure constant en teneur (égale à 7) pour n'importe quelle proportions air/combustible.

Pour l'eau (H₂O) la fraction molaire diminue de 6 à 0.66, par contre, pour le H₂ elle augmente de 2 à 7.33 mais pour le N₂ elle décroît de 37.6 à 27.57. On note que les taux de fraction molaire est différent pour chaque type de produit de combustion.

L'enthalpie de réaction $\Delta_r H$ est constante pour le mélange strict et pauvre, mais elle est inversement proportionnelle à la richesse pour le mélange riche.

On remarque dans la figure III.3 que pour chaque richesse on a une valeur constante de l'azote (N₂). La variation des fractions molaire prend des allures différentes pour chaque richesse mais les taux des variations des constituants restent modérés, constante en fraction de la température de combustion pour le CO et le H₂O dans une valeur (respectivement 8 et 6) et constante pour le CO₂ et H₂.

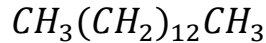
Partie 2

Combustion du Diesel

III.5. Combustion du Diesel

III.5.1. Combustion du tétradécane

Le tétradécane est un alcane linéaire de formule brute $C_{14}H_{30}$ il possède 1858 isomères structuraux, sa molécule est dite saturée et peut être représentée par

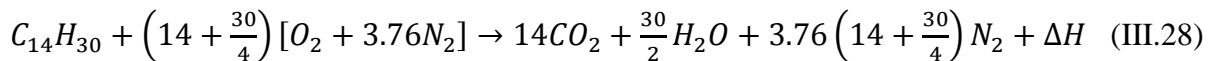


Le tétradécane, liquide incolore, a des propriétés qui peuvent être trouvées dans de nombreux ouvrages traitant le processus de combustion (Tableau 7)

Tableau III.6 : Les propriétés du Gazole $C_{14}H_{30}$.

Température d'auto-inflammation	220	[°C]
Température d'ébullition	253.58	[°C]
Température fusion	5.82	[°C]
Masse volumique	759	[Kg/m ³]
Masse molaire	198.388	[g/mol]
Enthalpie de formation	-332100	[J/mol k]
Entropie	700.04	[J/mol k]

Pour le Gazole l'équation (1) s'écrit



et le dosage
$$D = \frac{(14.12)+(30.1).1}{[(2.12)+3.76(2.14)].21.5} = \frac{1}{14.906} \approx \frac{1}{15}. \quad (III.29)$$

III.5.2. Composition des gaz brûlés en fonction de la richesse du mélange

A l'état standard



Bilan des masses

$$C : x^* + y^* = 14$$

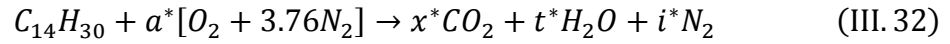
$$H : t^* + v^* = 15 \quad (III.31)$$

$$N : i^* = 3.76a^*$$

$$O : a^* = x + \frac{y^*}{2} + \frac{t^*}{2} + z^*$$

• **Mélange stricte (R=1)**

Lors d'une Combustion stœchiométrique le carbone et l'hydrogène sont oxydés sans excès d'oxygène, ce qui implique l'absence de CO, H₂ et O₂, la réaction (7) se réduit à



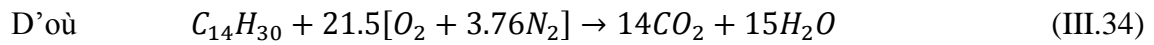
Bilan des masses

$$C: x^* + y^* = 14$$

$$H: t^* + v^* = 15 \quad (III.33)$$

$$N: i^* = 3.76a^* = 80,84$$

$$O: a^* = 21.5$$



• **Mélange pauvre**

Tableau III.7 : Fractions molaires pour un mélange pauvre

R	x*	t*	z*	i*
0.5	14	15	21.5	161.68
0.6	14	15	14.33	134.74
0.7	14	15	9.21	15.49
0.8	14	15	5.38	101.05
0.9	14	15	2.39	89.82

On représente graphiquement (fig.19) la variation de la fraction molaire des produits de combustion pour un mélange pauvre (0.5 ≤ R ≤ 0.9).

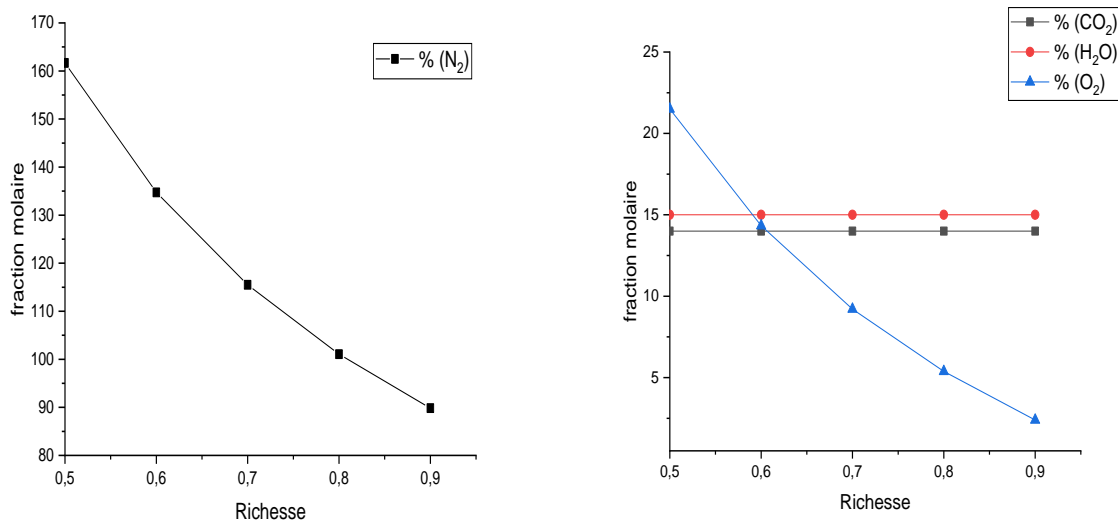
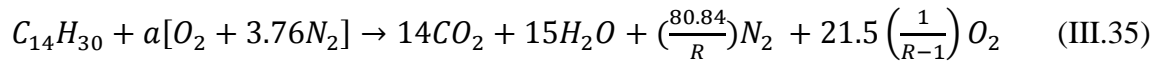


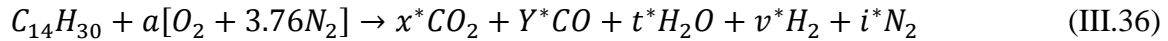
Figure III.4 : Évolution des fractions molaires pour mélange pauvre

D'où,



• **Mélange riche (R > 1)**

Les produits de combustion ne contiennent pas d'oxygène



Bilan des masses

$$C: y^* = 10 - x^*$$

$$H: v^* = 15 - t^* \quad (III.37)$$

$$N: i^* = \frac{a^*}{R} 3.76$$

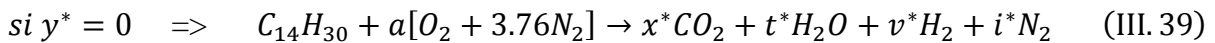
$$O: t^* = 14 - 2 \frac{a^*}{R} + x^*$$

D'autre part, on l'équation du gaz a l'eau



Dont la l'équilibre est négligeable

$$K_P^{GE} = \frac{y^* * t^*}{x^* * v^*} = 10^{-6} \approx 0,0$$



Bilan des masses

$$C: x^* = 14$$

$$H: v^* = 43 - \frac{43}{R} \quad (III.40)$$

$$N: i^* = \frac{a^*}{R} 3.76 = \frac{80,84}{R}$$

$$O: t^* = 2 \left[\frac{a^*}{R} + 14 \right] = \frac{43}{R} - 28$$

Soit

$$\left(\frac{43}{R}\right) - 28 > 0 \Rightarrow 1 < R < 1.55$$

$$43 - \frac{43}{R}$$

Le bilan permet d'établir le Tableau 9.

Tableau III.8 : Fractions molaires pour un mélange riche.

R	x^*	t^*	V^*	i^*
1.1	14	11.09	3.90	73.49
1.2	14	7.83	7.17	67.37
1.3	14	5.08	3.93	62.18
1.4	14	2.71	12.29	57.74
1.5	14	0.67	14.33	53.89

On représente graphiquement (fig.20) la variation de la fraction molaire des produits de combustion pour un mélange pauvre ($1.1 \leq R \leq 1.5$).

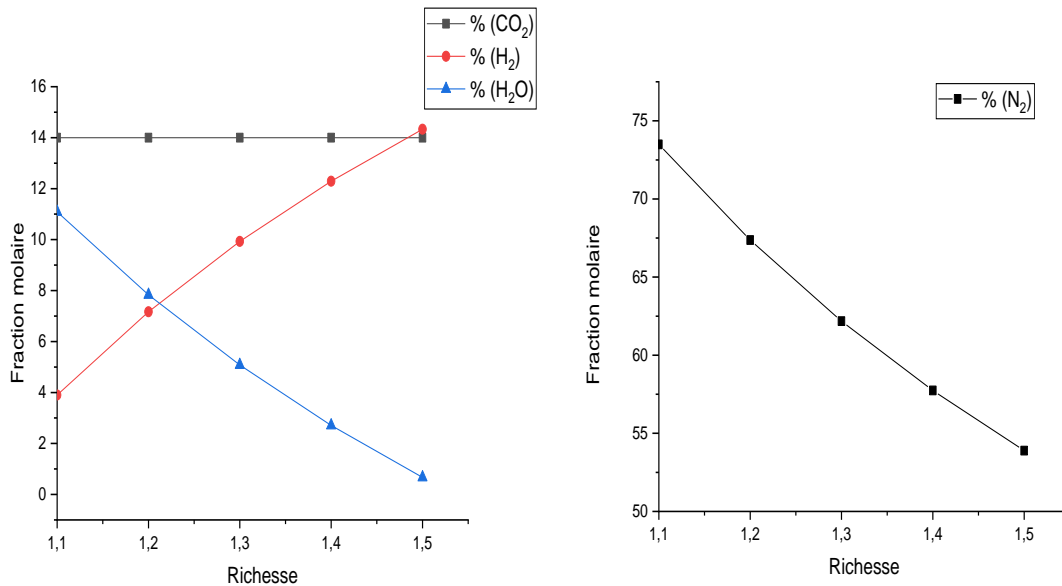


Figure III.5 : Evolution des fractions molaires pour mélange riche.

L'enthalpie de formation des gaz diatomiques tels que H₂ et N₂ étant négligeable ($\Delta_f h_i^o \cong 0$), L'équation de l'enthalpie de réaction s'écrit

$$\Delta_R = x^* \Delta H_{CO_2}^F + y^* \Delta H_{CO}^F + t^* \Delta H_{H_2O}^F - \Delta H_{C_{14}H_{30}}^F \quad (\text{III.41})$$

On résume, dans le tableau, les valeurs de l'enthalpie de réaction pour chaque mélange étudié.

Aux hautes températures les molécules telles que le CO₂ et le H₂O se dissocient, cette température, qui est celle qui provoque la première cassure moléculaire, correspond à la chaleur de dissociation dégagée par la combustion en ce moment.

Les réactions de dissociation du CO_2 et du H_2O sont :



On en déduit alors, que le H_2 , CO et le O_2 présents dans la réaction en haut, proviennent de la dissociation ci-dessus, néanmoins on retrouve toujours du CO_2 et du H_2O dans les produits de la réaction vu que la réaction de dissociation est incomplète.

Tableau III.9 : Enthalpie de réaction pour différents mélanges

Mélange	Strict	Pauvre	Riche			
			R			
$\Delta_{RH} \left[\frac{J \cdot k}{mol} \right]$	-613282	-613282	1.1	-7859294.55	1.4	-5833575.71
			1.2	-7071515	1.5	-5338400
			1.3	-6404932.31		

Dans cette partie nous ne traitons que la combustion d'un mélange riche, les cas de combustion de mélanges stricte et pauvre étant similaires à ceux précédemment étudiés.

Soit pour un mélange riche à température et à pression constantes, le bilan des masses

$$C: y^* = 10 - x$$

$$H: v^* = 29 - \frac{43}{R} + x \quad (III.43)$$

$$N: i^* = \frac{80.84}{R}$$

$$O: t^* = \frac{43}{R} - 14 - x$$

Et la constante d'équilibre du gaz à l'eau s'écrit

$$K_p^{GE} = \frac{y \cdot t}{x \cdot v} = \frac{(10-x) \left(\frac{43}{R} - 14 - x \right)}{x \left(29 - \frac{43}{R} + x \right)} \quad (III.44)$$

$$D'où \quad (k_p^{GE} - 1)x^2 + \left(29k_p^{GE} - \frac{43k_p^{GE}}{R} + \frac{43}{R} \right)x - \left(\frac{602}{R} - 196 \right) = 0 \quad (III.45)$$

$$\Delta_{k_p^{GE}} = \left(29k_p^{GE} - \frac{43k_p^{GE}}{R} + \frac{43}{R} \right)^2 - 4(k_p^{GE} - 1) \left(\frac{602}{R} - 196 \right) \quad (III.46)$$

Les solutions de l'équation sont

$$x_{1,2} = \frac{- \left(29k_p^{GE} - \frac{43k_p^{GE}}{R} + \frac{43}{R} \right) \pm \sqrt{\Delta_{k_p^{GE}}}}{2(k_p^{GE} - 1)} \quad (III.47)$$

La connaissance de l'enthalpie et de l'entropie standards de formation des constituants entrant en jeu dans la dissociation, avec un choix judicieux de la température, on peut déterminer K_p . Une fois la constante d'équilibre obtenue, on peut donc calculer le déterminant Δ puis déterminer les fractions molaires pour la réaction de dissociation en commençant par (solution de l'équation) pour chaque valeur de R ensuite les autres fractions molaires.

Sur les figures III.6, on représente graphiquement l'évolution des fractionmolaires en fonction de température pour des richesses fixées.

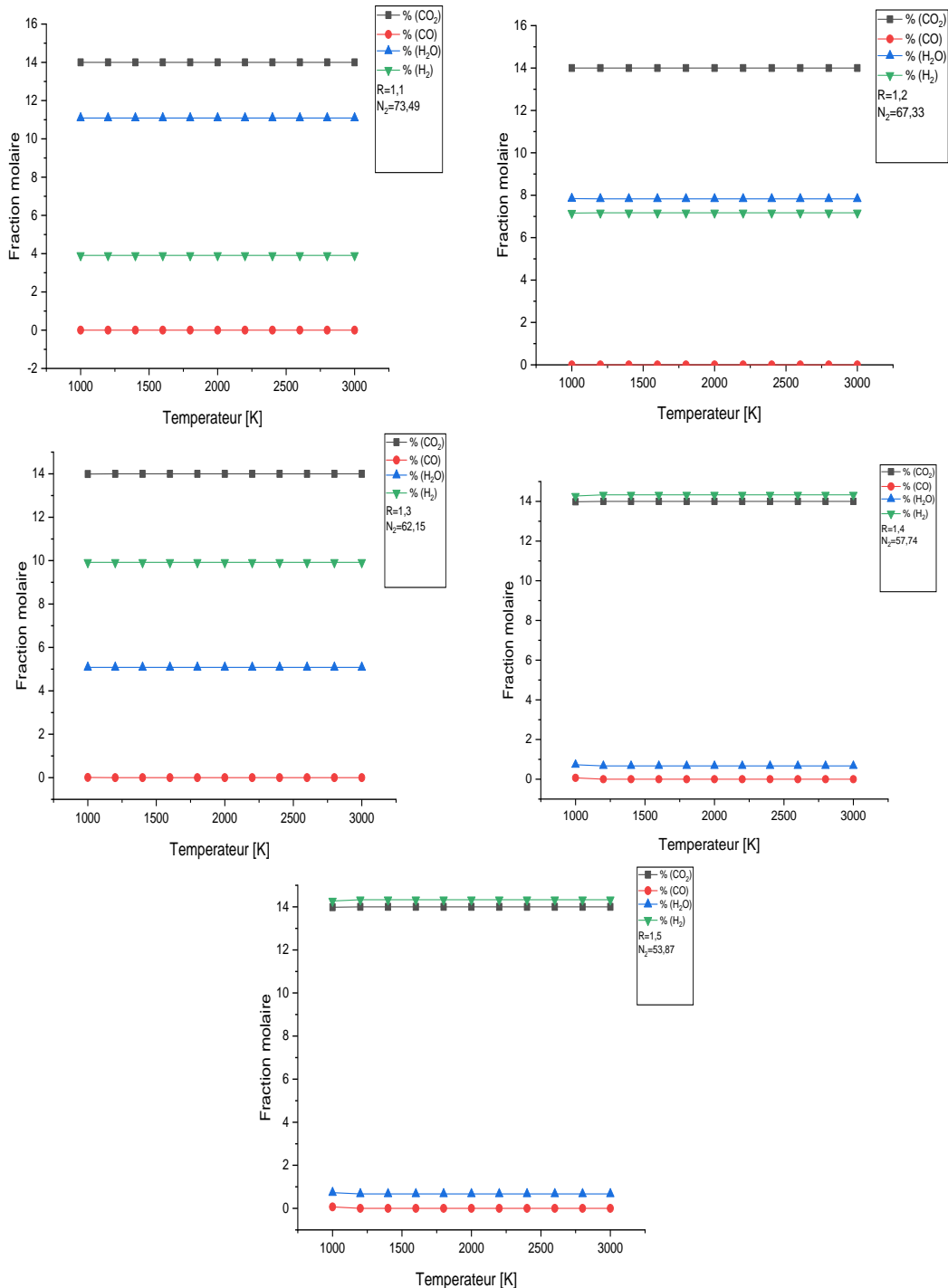


Figure III.6 : Évolution de la fraction molaire en fonction de la température, mélange riche.

III.5.3. Discussion et résultats

La combustion d'un mélange pauvre (Figure III.4) est caractérisée par l'absence de CO et de H₂. Le CO₂ et le H₂ restent en quantités molaire constantes (respectivement 14 et 15) durant le processus de combustion quel que soit le mélange air/combustible, tandis que le O₂ décroît modérément de 21.5 à 2.39 et le N₂ décroît également mais fortement de 161.68 à 98.82.

Dans le cas d'une combustion de mélange riche en air pour le tétradécane (Diesel) (Figure III.5) en absence du CO₂ et O₂, le CO₂ demeure constant en teneur (égale à 7) pour n'importe quelles proportions air/combustible.

L'eau (H₂O) diminue en fraction molaire de 11.09 à 0.67, le H₂ augmente de 3.90 à 14.33 et le N₂ décroît de 73.49 à 53.89.

L'enthalpie de réaction $\Delta_r H$ reste constante pour le mélange strict et pauvre mais elle est inversement proportionnelle à la richesse pour les mélanges riches.

On remarque dans la figure III.6 que pour chaque richesse on a une valeur constante de N₂. La variation des fractions molaires prend des allures différentes pour chaque richesse mais les taux de variation des constituants restent modérés, constante, en fraction de la température de combustion pour le CO et le H₂O (la valeur change pour chaque richesse) et constante pour le CO₂ et H₂ (la valeur est change pour chaque richesse).

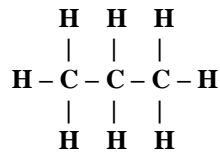
Partie 3

Combustion du gaz

III.6. Combustion du gaz

III.6.1. Combustion du propane

Le propane un hydrocarbure saturé linéaire de la famille des alcanes, de formule C_3H_8 . Ce gaz entre pour 65 % dans la composition du propane commercial, sa molécule est dite saturée C_nH_{2n+2} et peut être représenté par sa formule semi développée $CH_3 - CH_2 - CH_3$ ou par sa formule développée plane sous la forme.



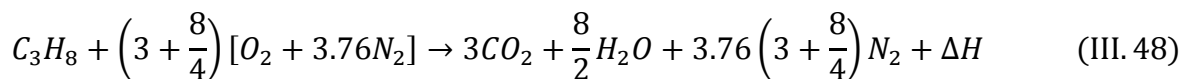
Les propriétés qui peuvent être trouvées dans de nombreux ouvrages traitant le processus de combustion (Tableau 11)

Tableau III.10 : les propriétés du propane $C_3 H_8$.

Température d'auto-inflammation	490	[°C]
Température d'ébullition	-42	[°C]
Température fusion	-183.63	[°C]
Enthalpie de formation	-103.88	[KJ/mol]
Entropie	270.01	[J/K.mol]

Généralement vendu à l'état liquide, notamment sous forme de GPL (c'est l'un de ses constituants principaux). Un additif, l'éthane thiol, est utilisé comme odorant pour signaler les fuites éventuelles.

L'équation (1) de combustion du propane est :



Les masses molaires des composantes associées sont : $C = 12$, $O = 16$, $H = 1$ et $N = 14$,

Sachant que pour le propane :

$$R = 1 \quad \text{et} \quad \Phi = 5,$$

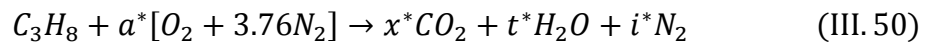
Alors :

$$D = \frac{(3.12) + (8.1).1}{[(2.16) + 3.76(2.14)].5} = \frac{1}{15.6} \approx \frac{1}{16} \quad (\text{III.49})$$

III.6.2. Composition des gaz brûlés en fonction de la richesse du mélange

L'air dans notre cas constitue le comburant pour réaliser la combustion, il se trouve dans l'atmosphère gazeuse terrestre et se compose principalement de deux éléments : l'azote et l'oxygène. Le premier représente environ 78 % de l'air que nous respirons, le reste étant l'oxygène pour 21 % et une dizaine d'éléments gazeux en très petites quantités représentent le 1 % manquant.

À l'état standard



Bilan des masses

$$C : x^* + y^* = 3$$

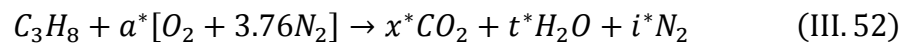
$$H : t^* + v^* = 8 \quad (III.51)$$

$$N : i^* = 3.76a^*$$

$$O : a^* = x + \frac{y^*}{2} + \frac{t^*}{2} + z^*$$

- **Mélange stricte (R=1)**

Combustion stœchiométrique le carbone et l'hydrogène sont oxydés sans excès d'oxyde, ce qui implique l'absence de CO, H₂ et O₂, la réaction (3) se réduit à



Bilan des masses

$$C : x^* + y^* = 3$$

$$H : t^* + v^* = 4 \quad (III.53)$$

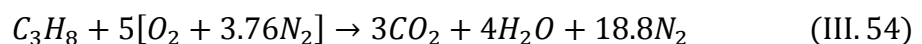
$$N : i^* = 3.76a^* = 18.8$$

$$O : a^* = 5$$

Rappelons que dans le cas $R = 1 \Rightarrow a = a^*$ et que $m = 3$ et $n = 8$ alors on aura :

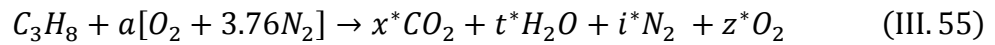
$x^* = 3$, $t^* = 4$, $a^* = 5$ et $i^* = 18,8$.

Donc la réaction s'écrit par :



• **Mélange de pauvre (R<1)**

Il y a absence de monoxyde de carbone et d'hydrogène $y^* = v^* = 0$, soit



Bilan des masses

$$\begin{aligned} C: x^* &= 3 \\ H: t^* &= 4 \\ N: i^* &= 3.76a = 3.76 \frac{a^*}{R} \\ O: z^* &= a - x^* - \frac{t^*}{2} = \frac{a^*}{R} - 5 \end{aligned} \quad (III.56)$$

Et comme : $R = a^* / a$, d'où $a = a^* / R$, $z^* = 5 / R - 5$ et $i^* = 3,76 \cdot 5 / R$.

Sachant que $R < 1$, on peut obtenir pour les valeurs ce qui suit :

Tableau III.11 : Fractions molaires pour un mélange pauvre.

R	x^*	t^*	z^*	i^*
0.5	3	4	5	37.60
0.6	3	4	3.33	31.33
0.7	3	4	2.14	26.85
0.8	3	4	1.25	23.5
0.9	3	4	0.55	20.89

On représente graphiquement (fig.22) la variation de la fraction molaire des produits de combustion pour un mélange pauvre ($0.5 \leq R \leq 0.9$).

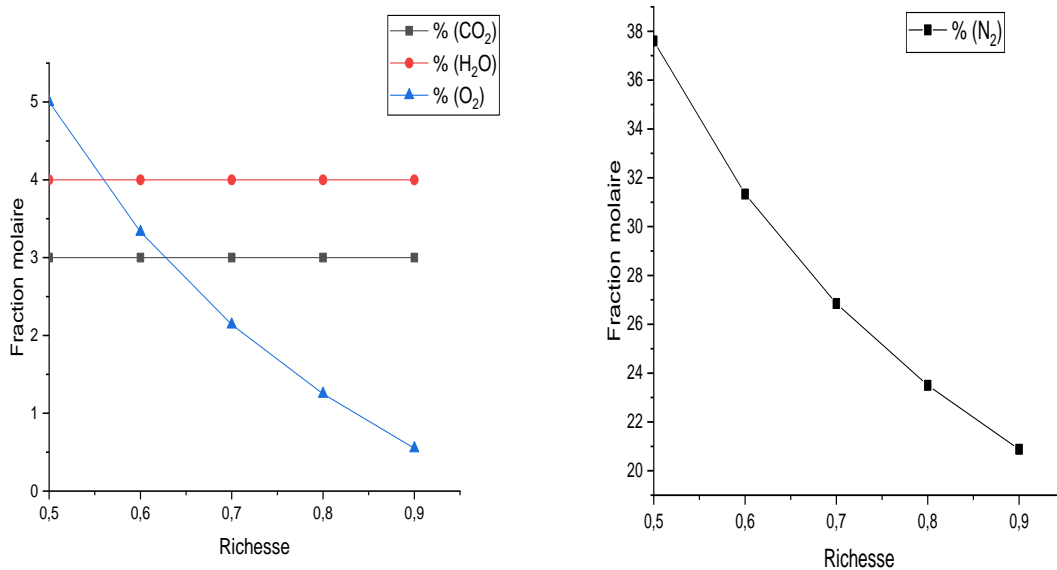
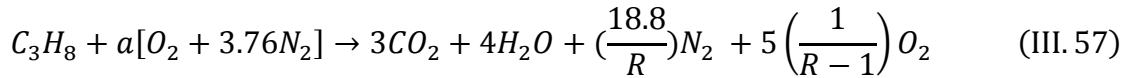


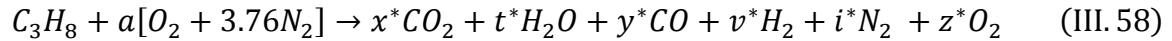
Figure III.7 : Evolution des fractions molaires pour mélange pauvre.

D'où



• **Mélange riche (R > 1)**

Les produits de combustion ne contiennent pas d'oxygène



Bilan des masses

$$\begin{aligned} C : y^* &= 3 + x^* \\ H : v^* &= 4 - t^* \end{aligned} \quad (III.59)$$

$$N : i^* = \frac{a^*}{R} 3.76$$

$$O : t^* = 2\frac{a^*}{R} - 3x^* - 14$$

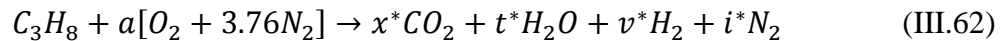
D'autre part, on l'équation du gaz a l'eau



Dont la l'équilibre est négligeable

$$K_P^{GE} = \frac{y^*.t^*}{x^*.v^*} = 10^{-6} \approx 0,0 \quad (III.61)$$

$$si y^* = 0$$



Bilan des masses

$$C : x^* = 3$$

$$H : v^* = 15 - t^* = 10 - \frac{10}{R}$$

$$N : i^* = \frac{a^*}{R} 3.76 = \frac{18.8}{R}$$

$$O : t^* = 2\left[\frac{a^*}{R} + 3\right] = \frac{10}{R} - 6$$

Puisque R > 1, alors pour les valeurs on doit avoir t* et v* positifs, c'est-à-dire :

$$t^* > 0 \Rightarrow 5/R - 3 > 0 \Rightarrow 5/R > 3 \quad R < 5/3 = 1,6$$

$$v^* > 0 \Rightarrow 10 - 10/R > 0 \Rightarrow 10/R > 10 \Rightarrow R > 1,$$

D'où : 1 < R < 1,6, ce qui répond à notre cas.

Tableau III.2 : Fractions molaires pour un mélange pauvre.

R	x^*	t^*	V^*	i^*
1.1	3	3.09	1	17.09
1.2	3	2.33	1.7	15.67
1.3	3	1.69	2.31	14.46
1.4	3	1.14	2.86	13.43
1.5	3	0.66	3.33	12.53

On représente graphiquement (Fig. III.8) la variation de la fraction molaire des produits de combustion pour un mélange riche ($1.1 \leq R \leq 1.5$).

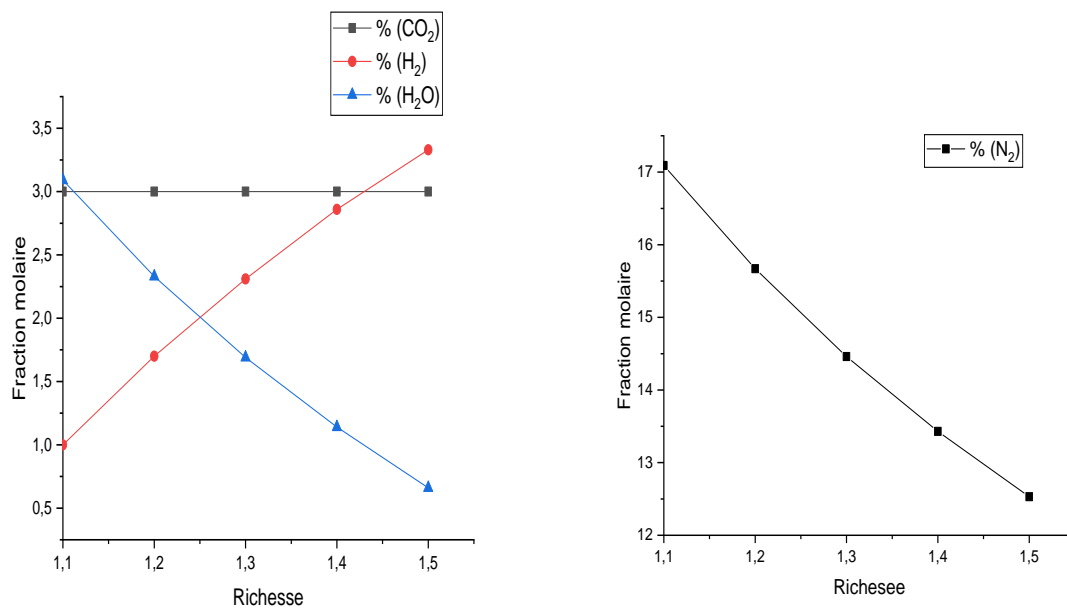


Figure III.8 : Evolution des fractions molaires pour un mélange riche.

L'enthalpie de formation des gaz diatomiques tels que H₂ et N₂ étant négligeable ($\Delta_f h_i^\circ \cong 0$), l'équation de l'enthalpie de réaction s'écrit

$$\Delta_R = x^* \Delta H_{CO_2}^F + y^* \Delta H_{CO}^F + t^* \Delta H_{H_2O}^F - \Delta H_{C_3H_8}^F \quad (\text{III.63})$$

On résume, dans le tableau III.12, les valeurs de l'enthalpie de réaction pour chaque mélange étudié.

Tableau III.3 : Enthalpie de réaction pour différents mélanges.

Mélange	Strict	Pauvre	Riche				
			R				
			1.1	1.2	1.3	1.4	
$\Delta_R H \left[\frac{J \cdot k}{mol} \right]$	-531504	-531504	-1824188.55	-16409884	-1485964.77	-1353091.14	-1237934

$$K_p^{GE} = \frac{y^* \cdot t^*}{x^* \cdot v^*} = \frac{(3-x)(10/R - (x+3))}{x(7+x-10/R)} \quad (\text{III.64})$$

$$\Rightarrow K_p^{GE} \cdot x \cdot (7+x-10/R) = (3-x)(10/R - x - 3) \quad (\text{III.65})$$

$$\Rightarrow (K_p^{GE} - 1)x^2 + (7K_p^{GE} - 10K_p^{GE}/R + 10/R)x - (30/R - 9) = 0 \quad (\text{III.66})$$

Qui a pour déterminant :

$$\Delta = (7K_p^{GE} - 10K_p^{GE}/R + 10/R)^2 + 4(K_p^{GE} - 1)(30/R - 9) = 0 \quad (\text{III.67})$$

Les solutions sont donc :

$$x_{1,2} = \frac{-(7K_p^{GE} - 10K_p^{GE}/R + 10/R) \pm \sqrt{\Delta}}{2(K_p^{GE} - 1)} \quad (\text{III.68})$$

La connaissance de l'enthalpie et de l'entropie standards de formation des constituants entrant en jeux dans la dissociation, avec un choix judicieux de la température, on peut déterminer K_p . Une fois la constante d'équilibre obtenue, on peut donc calculer le déterminant Δ puis déterminer les fractions molaires pour la réaction de dissociation en commençant par (solution de l'équation) pour chaque valeur de R ensuite les autres fractions molaires.

Sur les figures III.9, on représentent graphiquement l'évolution des fractionmolaires en fonction de température pour des richesses fixées.

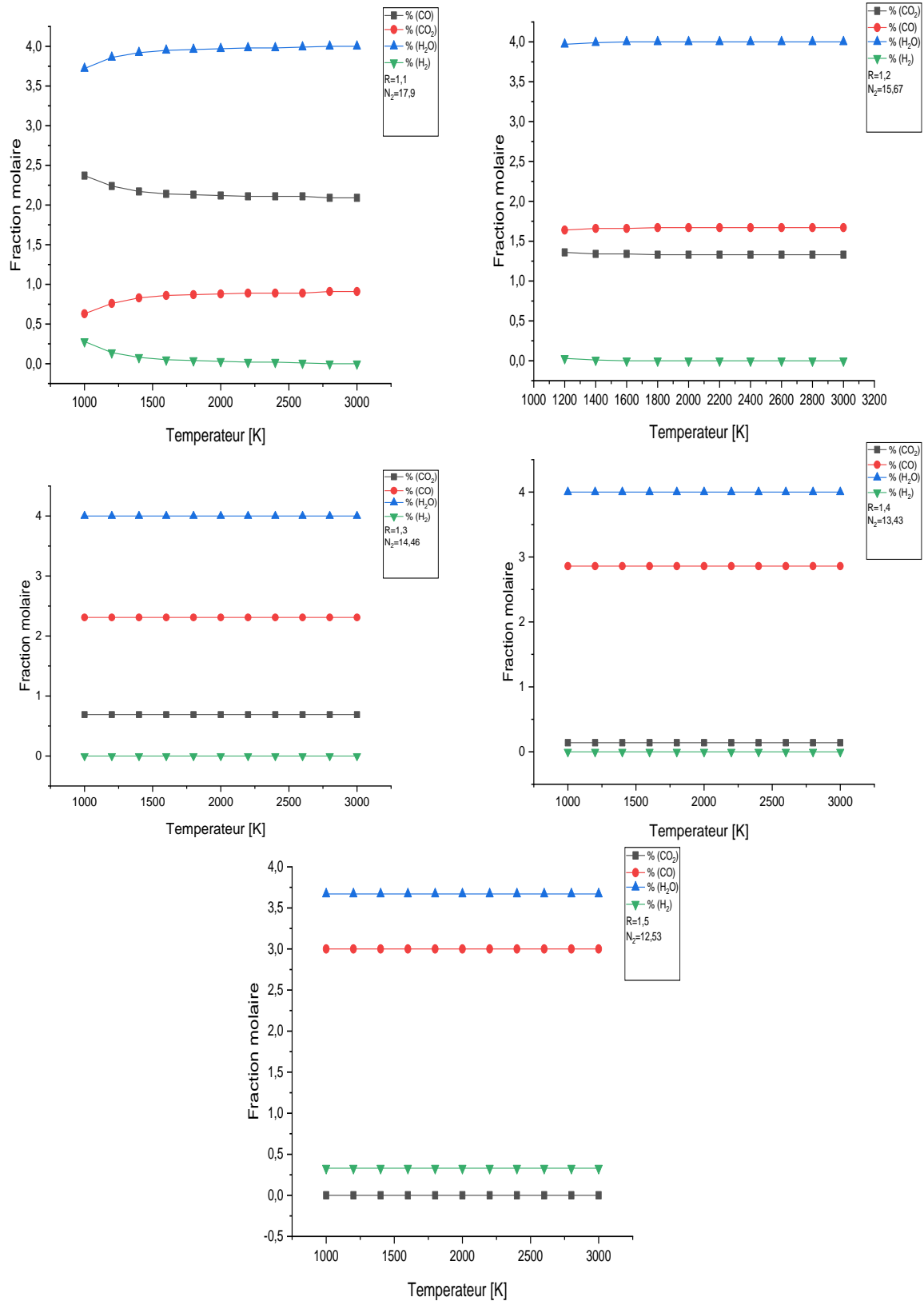


Figure III.9 : Évolution de la fraction molaire en fonction de la température, mélange riche.

III.6.3. Discussion et résultats

La combustion d'un mélange pauvre (Fig. III.7) est caractérisée par l'absence de CO et H₂. Le CO₂ et le H₂ restent en quantités molaire constant (respectivement 3 et 4) durant le processus de combustion quel que soit le mélange combustible/air, tandis que le O₂ décroît moyennement (5 à 0.55) et le N₂ fortement (37.60 à 20.89). Dans le cas d'une combustion de mélange riche en heptane (figure III.10) en absence du CO₂ et O₂, le CO₂ demeure constant en teneur (égale à 3) pour n'importe quelles proportions combustible/air.

Le H₂O diminue (3.09 à 0.66), le H₂ augmente (1 à 3.33) et le N₂ décroît (17.09 à 12.53).

L'enthalpie de réaction $\Delta_r H$ est constante pour le mélange strict et pauvre, mais elle est inversement proportionnelle à la richesse pour le mélange riche. On remarque dans la figure III.11 que pour chaque richesse on a une valeur constante de N₂. La variation des fractions molaire prend des allures différentes pour chaque richesse mais les taux des variations des constituants restent modérés, constante en fraction de la température de combustion pour le CO et le H₂O (change pour chaque richesse) et constante pour le CO₂ et H₂ (change pour chaque richesse).

III.7. Analyse Comparative des taux d'émissions

On représente graphiquement (Fig. III.10 et III.11) la variation de la fraction molaire du produit de combustion (N₂) pour un mélange pauvre et un mélange riche dans les trois moteurs.

- **Mélange pauvre ($0.5 \leq R \leq 0.9$).**

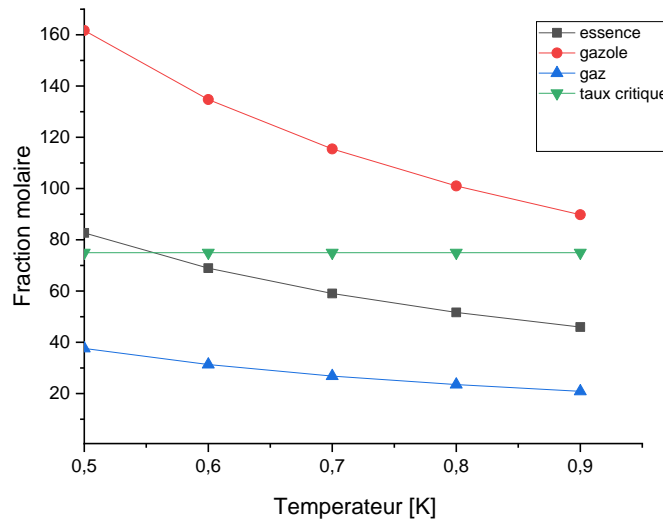


Figure III.10 : Variation de la fraction molaire de produit (N₂) (mélange pauvre).

- Mélange riche (1.1 ≤ R ≤ 1.5).

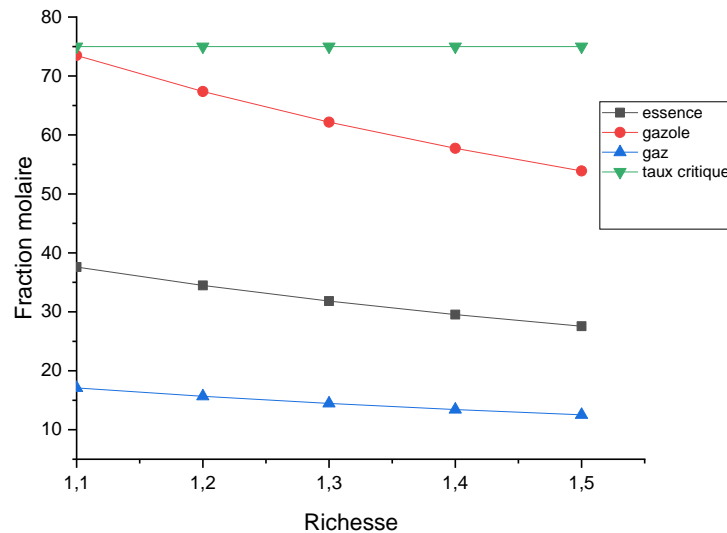


Figure III.11 : Variation de la fraction molaire du produit de combustion N₂ (mélange riche).

On représente graphiquement (Fig. III.12 et III.13) la variation de la fraction molaire de produit (H₂O) de combustion pour un mélange pauvre et riche dans les trois moteurs.

- Mélange pauvre (0.5 ≤ R ≤ 0.9).

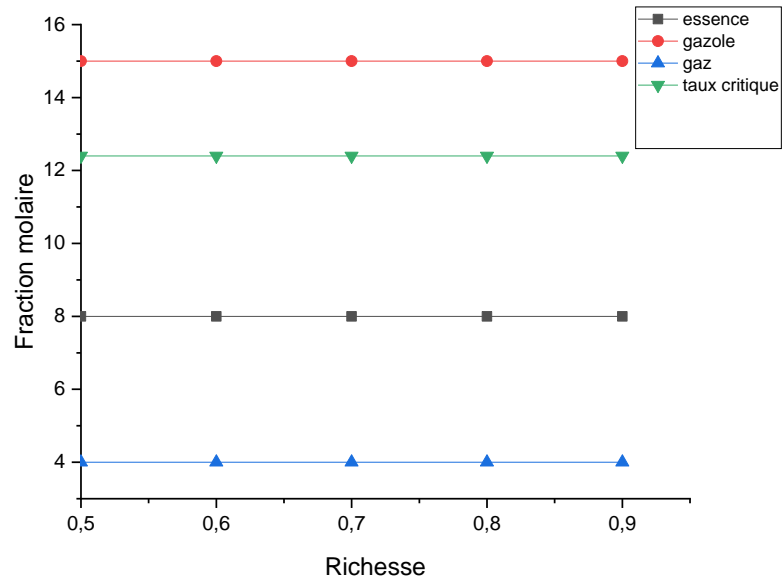


Figure III.12 : Variation de la fraction molaire de produit (H₂O) (mélange pauvre).

- Mélange riche ($1.1 \leq R \leq 1.5$).

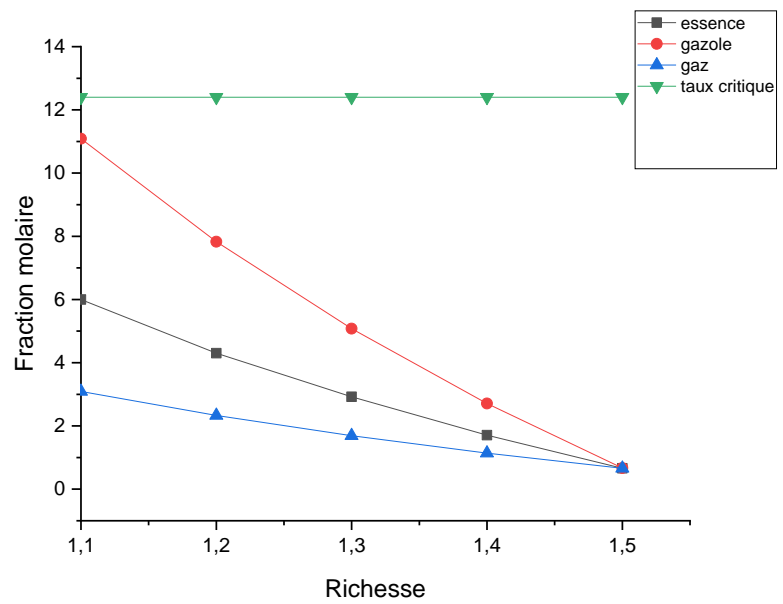


Figure III.13 : Variation de la fraction molaire de produit (H₂O) (mélange riche).

On représente graphiquement (fig.29) la variation de la fraction molaire de produit (CO₂) de combustion pour un mélange pauvre et riche dans les trois moteurs.

- **Mélange pauvre et riche**

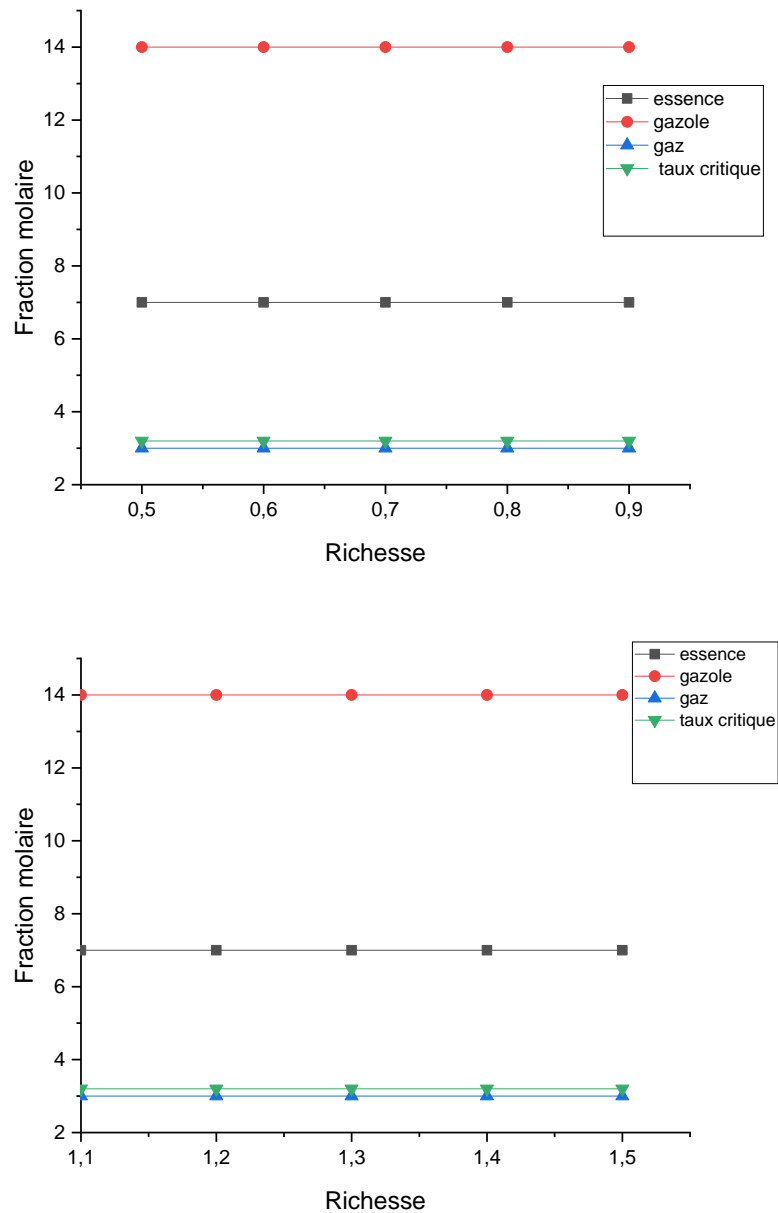


Figure III.14 : Variation de la fraction molaire de produit (CO_2) de combustion pour un mélange pauvre et riche.

On représente graphiquement (Fig. 30) la variation de la fraction molaire de produit (H_2) de combustion pour un mélange riche dans les trois moteurs. ($1.1 \leq R \leq 1.5$).

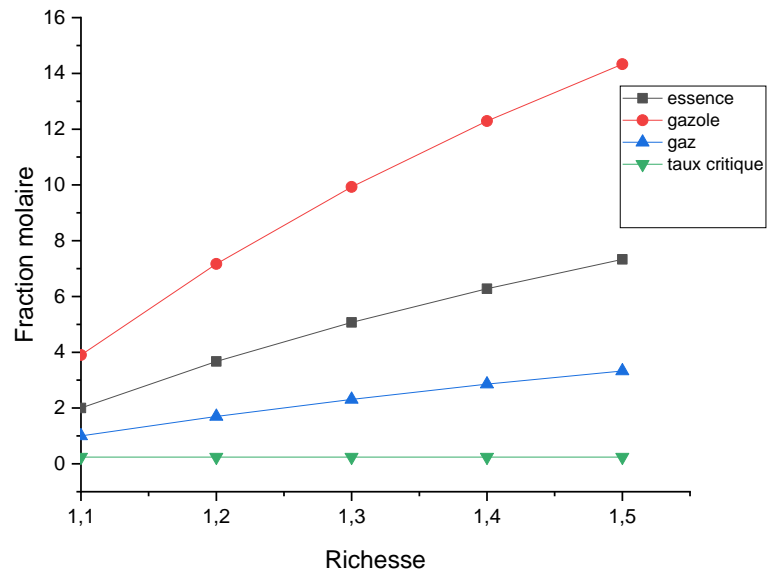


Figure III.15 : Variation de la fraction molaire de produit (H₂) (mélange riche)

On représente graphiquement (fig. 31) la variation de la fraction molaire de produit (O₂) de combustion pour un mélange pauvre dans les trois moteurs ($0.5 \leq R \leq 0.9$).

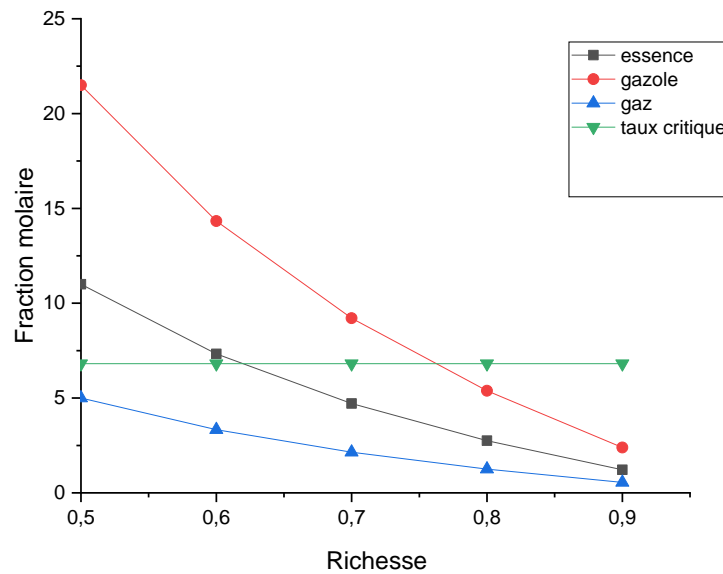


Figure III.16 : Variation de la fraction molaire de produit (O₂) (mélange pauvre).

III.8. Analyses et discussions

La composition des gaz brûlés de la combustion dans les moteurs est déterminée à des richesses : stricte, pauvre et riche à des états standards. Elle se compose de CO, CO₂, H₂O, H₂, N₂ et O₂. Dans la réaction du mélange strict, tout le carbone et l'hydrogène sont oxydés sans excès d'oxygène, ce qui implique l'absence de CO, H₂ et O₂. Pour le mélange pauvre il n'y a ni CO ni H₂, mais les fractions molaires de produit sont en fonction de la richesse.

Le mélange riche est sans oxygène et la réaction de gaz à l'eau intervient alors en considérant l'absence soit de CO soit du H₂O. S'il n'y a pas de CO et pour R allant de 1.1 à 1.5 on trouve que pour des fractions molaires de H₂O > 0, la richesse R < 1.5 et pour des fractions H₂ > 0, R < 1. D'où 1 < R < 1.5, ce qui vérifie notre cas. Alors, pour les valeurs de R entre 1 et 1.5 on obtient les fractions molaires correspondantes à ces richesses. Le cas de l'absence de H₂O est rejetée car il n'est pas vérifié.

Lorsque l'on compare la fraction molaire des émissions étudiées de combustion pour le mélange riche et pauvre, nous notons ce qui suit :

Pour le mélange pauvre (**Fig. 25.**) nous constatons que l'oxydes d'azote(N₂), ont augmenté de manière significative pour le Diesel d'une valeur de 161, et pour l'essence d'une valeur 84 et au gaz de 38 par rapport à la valeur critique de N₂ est 75.

Pour le mélange riche (**Fig. 26.**) On note une diminution des émissions évoquée précédemment par rapport au mélange pauvre, mais il est tout de même plus élevé dans le Diesel d'une valeur 73 que dans l'essence de 37 et le gaz de 17.

Pour le mélange pauvre et mélange riche (**Fig. 29.**) nous constatons que le dioxyde de carbone (CO₂), ont augmenté pour le Diesel d'une valeur de 14, pour l'essence d'une valeur 7 et le gaz de 3 par rapport à sa valeur critique de 3.2.

On remarque (**Fig. 30**) que l'hydrogène (H₂), ont augmenté pour le Diesel d'une valeur de 161, pour l'essence d'une valeur 82 et le gaz de 39 par rapport à sa valeur critique de.

On note une augmentation de l'oxygène (O₂) pour le Diesel (**Fig. 31**) d'une valeur de 22, pour l'essence d'une valeur 11 et le gaz de 5 par rapport à sa valeur critique de 14.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce projet de fin de cycle de master en Génie Mécanique, option énergétique que nous avons préparé nous a permis d'étudier les effets des gaz d'échappement des automobiles sur l'environnement où nous avons conclu les facteurs d'échappement des véhicules affectant les humains et leurs santé, car ils ont un impact sur l'environnement qui ne réduit pas les dommages, où les oxydes d'azote et les hydrocarbures interagissent avec la lumière du soleil, causant des dommages à la couche d'ozone dans les couches supérieures de l'atmosphère qui protègent la planète des rayons nocifs du soleil telles que les ultra-violet. L'oxyde d'azote et le dioxyde de carbone contribuent au réchauffement de la planète qui entraîne un réchauffement climatique, des pénuries d'eau, des inondations et l'assèchement des sols et plus particulièrement les émissions des moteurs Diesel.

Les émissions de Diesel contribuent à la pollution de l'air, de l'eau et du sol, elles sont également dangereuses pour la santé humaine car elles contribuent au développement du cancer, des maladies cardiovasculaires et respiratoires où la fumée qui en résulte réduit la capacité de voir correctement, et en plus, les émissions contribuent au réchauffement climatique et par conséquent au changement climatique qui provoque la déstabilisation des équilibres de la planète.

Références bibliographiques

- [1] B. Kerboua, Modélisation des caractéristiques mécaniques du moteur thermique alternatif en régime instationnaire, Mémoires de Magister ; Université de Tlemcen ; 2000.
- [2] G. Maillard, Technologie de l'automobile, Le Moteur 1, Educavivres 1996.
- [3] R. Maamri, Modélisation et expérimentation des moteurs à combustion, Thèse du doctorat D, Université du Québec ; Octobre 2014.
- [4] A. Allalou, Simulation numérique de la combustion dans un moteur à combustion interne ; Mémoire du Master, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2021.
- [5] P.A.N. Sovanna. 10/2004/ITC/GIM, Moteur thermique/chapitre 1 et 2 et 3.
- [6] ROGER TORRI, les moteurs à quatre temps et à deux temps, LES Editions Foucher 1983.
- [7] A. Allalou, Simulation numérique de la combustion dans un moteur à combustion interne ; Mémoire du Master, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2021.
- [8] www.fiches-auto.fr/essais-tests/ accès le 26/04/2022.
- [9] Y. Chebbout, simulation de la combustion du méthane/air ; Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi Oum-El-Bouaghi, 2016.
- [10] M. B. Guemmour, TEC369 - Cours des moteurs à combustion interne "Combustion et calcul thermochimique", Université de Tiaret, 2012.
- [11] Principes de gestion des risques chimiques, physiques et biologiques, Cours, Université de Nantes, http://uved.univ-nantes.fr/GRCPB/sequence2/html/chap3_part10_11.html, accès le 28/04/2022.
- [12] Julliard Jacques, De la découverte du feu à la combustion de la biomasse, Article encyclopédique, <https://www.encyclopedie-energie.org/de-la-decouverte-du-feu-a-la-combustion-de-la-biomasse/> accès le 02/05/2022.
- [13] Christian Guilié, Cours de combustion 2^{ème} partie - Combustions réelles ..., octobre 2012, https://exergia.fr/sites/exergia.fr/files/print_pdf/Cours%20de%20combustion.pdf, accès le 10/05/2022.

- [14] Josianne Roy, Les types de combustion, Master en Sciences, octobre 2006, http://www.regie-energie.qc.ca/audiences/3653-07/Interv3653/C-5-4-SE-AQLPA_02doc02_3653_07fev08.pdf, accès le 15/05/2022.
- [15] M. Bencherif, Moteurs à Combustion Interne, Combustion et Éléments de Carburation ; Cours en ligne, Université d'Oran, Mohammed Boudiaf 2018, <http://dspace.univ-usto.dz/handle/123456789/333>, accès le 19/05/2022.
- [16] Engine & emission technology online - since 1997, Ressource Internet pour les informations techniques et commerciales liées à tous les types de moteurs à combustion interne, https://dieselnet.com/tech/diesel_combustion.php, accès le 25/05/2022.
- [17] Muhammad Saiful Bin Mustafa, Turbulent flame speed in spark ignition engine combustion process using cfd, Bachelor of Mechanical Engineering Universiti Malaysia Pahang 2011, <http://umpir.ump.edu.my/id/eprint/2872/>.
- [18] Diming Lou, Yedi Ren, Yunhua Zhang and Xia Sun, Study on the Effects of EGR and Spark Timing on the Combustion, Performance, and Emissions of a Stoichiometric Natural Gas Engine, ACS Omega, 2020, 5, 26763–26775 <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsomega.0c03859>.

ملخص

تتأثر جودة الاحتراق بشكل خاص بالتغير في تكوين خليط الهواء / الوقود الذي يحد بشكل كبير من إنتاج الانبعاثات الملوثة للهيدروكربونات غير المحترقة وأول أكسيد الكربون. تعتبر نسبة الهواء / الوقود مهمة جدًا، لأن تفاعل الاحتراق غير ممكن بجميع النسب. لذلك فإن ثراء المزيج هو أمر حاسم بالنسبة لجودة الاحتراق، فهو يساهم في التحكم في منتجات الاحتراق وفي تقليل الانبعاثات بشكل كبير. في هذه الرسالة، نتناول الاحتراق في محركات البنزين والديزل والغاز من أجل تحديد تركيبة الغازات المحترقة وفقًا لثراء الخليط المختار مبدئيًا بقيم الثراء وضمن حدود الاحتراق العادي. يتم إجراء مقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها مع المعدلات الحرجة المنشورة مما يجعل من الممكن تحديد أي من المحركات أقل تلويثًا والذي يتضح أنه محرك الديزل.

Résumé

La qualité de la combustion est particulièrement influencée par le changement de la composition du mélange air/carburant qui conditionne considérablement la production des émissions polluantes en hydrocarbures imbrulés et en monoxyde de carbone. Le dosage air/carburant est très important, car la réaction de combustion n'est pas réalisable en toutes proportions. La richesse du mélange est donc déterminante pour la qualité de la combustion, elle contribue au contrôle des produits de combustion et à réduire considérablement les émissions. Dans ce mémoire, on étudie la combustion dans les moteurs à essence, Diesel et gaz afin de déterminer la composition des gaz brûlés en fonction de la richesse du mélange choisi initialement à des valeurs de la richesse et dans les limites d'une combustion normale. Une comparaison des résultats obtenu est effectuée avec des taux critiques publiés permettant de qualifier lequel des moteurs et moins polluant et qui s'avère que c'est le moteur Diesel.

Abstract

The quality of combustion is particularly influenced by the change in the composition of the air/fuel mixture which considerably conditions the production of polluting emissions of unburned hydrocarbons and carbon monoxide. The air/fuel ratio is very important, because the combustion reaction is not possible in all proportions. The richness of the mixture is therefore decisive for the quality of the combustion, it contributes to the control of the products of combustion and to the considerable reduction of emissions. In this thesis, we deal with combustion in gasoline, Diesel and gas engines in order to determine the composition of the burnt gases according to the richness of the mixture initially chosen at richness values and within the limits of normal combustion. A comparison of the results obtained is carried out with published critical rates making it possible to qualify which of the engines is less polluting and which turns out to be the Diesel engine.